

ANNEX

# Monitoreando Volcanes: Técnicas y Estrategias empleadas por el Personal del Observatorio Vulcanológico Cascades, 1980-90



BOLETÍN 1966 DEL SERVICIO GEOLÓGICO DE LOS ESTADOS UNIDOS

En Cooperación con USAID-OFDA



## DISPONIBILIDAD DE ESTA PUBLICACIÓN

Se pueden obtener copias adicionales de esta edición en Español del USGS Boletín 1966 de:

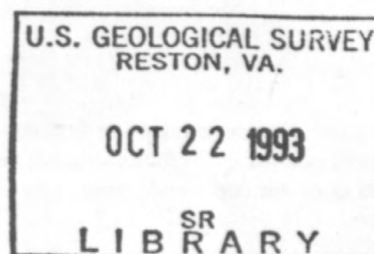
Scientist-in-Charge  
US Geological Survey  
Cascades Volcano Observatory  
5400 MacArthur Blvd.  
Vancouver, WA 98661  
USA



# Vigilando Volcanes: Técnicas y Estrategias Empleadas por el Personal del Observatorio Vulcanológico Cascades, 1980–90

JOHN W. EWERT and DONALD A. SWANSON, Editores

CHRISTA VON HILLEBRANDT-ANDRADE, Traductora



BOLETÍN 1966 DEL SERVICIO GEOLÓGICO DE LOS ESTADOS UNIDOS

[U.S. GEOLOGICAL SURVEY BULLETIN 1966]

Publicado con el Apoyo de

La Oficina de Asistencia al Exterior en Caso de Desastres de USAID

[Office of Foreign Disaster Assistance (OFDA), U.S. Agency for International Development]



U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR

BRUCE BABBITT, Secretary



U.S. GEOLOGICAL SURVEY

Dallas L. Peck, Director

Any use of trade, product, or firm names  
in this publication is for descriptive purposes only  
and does not imply endorsement by the U.S. Government

UNITED STATES GOVERNMENT PRINTING OFFICE, WASHINGTON : 1993

---



## **PREFACIO A LA EDICIÓN EN ESPAÑOL DEL BOLETÍN 1966**

El financiamiento para la edición en Español de "Vigilando Volcanes: Técnicas y Estrategias Empleadas por el Personal del Observatorio Vulcanológico Cascades, 1980-1990" fue proporcionado por la Oficina de Asistencia al Exterior en Caso de Desastres de la Agencia para el Desarrollo Internacional [Office of Foreign Disaster Assistance (OFDA), US Agency for International Development (USAID)] por intermedio del Programa de Asistencia durante Desastres Volcánicos [Volcano Disaster Assistance Program (VDAP)]. VDAP es un programa cooperativo entre el Servicio Geológico de los Estados Unidos y OFDA, y fue creado para asistir a otros países durante crisis volcánicas.

Un objetivo a largo plazo de VDAP es lograr que otros países independientemente puedan mitigar los peligros volcánicos en sus regiones. Una forma mediante la cual el VDAP espera alcanzar esta meta es el intercambio de información técnica sobre vigilancia volcánica, como por ejemplo por medio de publicaciones como ésta. Sin embargo, la vigilancia volcánica por si sola no es suficiente para mitigar los efectos peligrosos de erupciones volcánicas. Para una efectiva mitigación, los vulcanólogos tienen que: 1) detectar el movimiento del magma hacia la superficie y anticipar la hora y sitio de una posible actividad volcánica, 2) tener una idea de los tipos y escalas de actividad eruptiva que son posibles o probables y hacer la evaluación correspondiente de los peligros volcánicos; y 3) comunicar efectivamente esta información a las autoridades gubernamentales. Una mitigación efectiva de los peligros volcánicos requiere de las tres tareas mencionadas, antes que comience el evento volcánico. El Boletín 1966 trata el primer punto. Información general sobre los puntos 2 y 3—asesoramiento de amenazas volcánicas y comunicación de estas amenazas—puede ser encontrada en "Los Peligros Volcánicos" editado por R. I. Tilling (1989). "Los Peligros Volcánicos" está siendo traducido al español y cuando sea publicada en 1993 se podrá obtener de UNESCO y/o la Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos (WOVO).

John W. Ewert y Donald A. Swanson, Editores



## NOTA DE LA TRADUCTORA

Este Boletín, escrito originalmente en Inglés, fue traducido al Español con el propósito de que científicos, técnicos y personal que trabajan o van a trabajar en vigilancia volcánica en América Latina y otros países Hispanoparlantes tuvieran un manual bastante detallado en su idioma materno como referencia. A continuación comparto con ustedes algunas observaciones sobre la traducción.

La terminología usada varía de país a país y siempre traté de escoger la más aceptada y utilizada. Hubieron algunos términos que, para su traducción, recurrí a mi mejor criterio y documentación. Por ejemplo, opté (siguiendo los académicos) por traducir la palabra "monitoring" como "vigilancia" y no "monitoreo," aunque ampliamente usado, aún no ha sido aceptado. Otro término que me dio trabajo fue "single setup leveling," un término nuevo introducido por el Observatorio Vulcanológico Cascades para reemplazar "dry tilt" (inclinometría seca), y opté por "nivelación de montaje único." La mayoría de los términos geográficos y nombres de instituciones/agencias no fueron traducidos. Los capítulos fueron escritos por diferentes personas y, por lo tanto, el lenguaje y los términos usados también variaron, sin embargo, traté de ser lo más consistente posible. Por otro lado, todos los precios de los artículos están en dólares de los Estados Unidos.

Soy vulcanóloga y aunque desde mi infancia he usado el Inglés y Español intercambiamente, no tengo preparación formal como traductora, por lo tanto, les pido anticipadamente su indulgencia por cualquier cosa que se me haya escapado.

Quiero aprovechar este espacio para agradecer al Ing. Gerardo Andrade y la Sra. Emmi de Quiñones, quienes revisaron este trabajo, por sus sugerencias y comentarios.

Finalmente, este año (1993) ha sido un año muy trágico para la vulcanología con las erupciones de Galeras en Colombia y Guagua Pichincha en Ecuador que costaron la vida a varias personas, incluyendo vulcanólogos, científicos y técnicos. Una de estas personas fue el Ingeniero Geólogo Victor Hugo Pérez Oviedo, con quien estudié y trabajé en Ecuador, y que más que colega fue un amigo y a quien le dedico este trabajo de traducción. Que la muerte de V.H. y de las otras personas sirvan de inspiración para que trabajemos aún más fuertemente para que tragedias como estas no se repitan.

Christa G. von Hillebrandt-Andrade  
9 de Junio de 1993  
San Germán, Puerto Rico



# INDICE

## Introducción 1

John W. Ewert y Donald A. Swanson, Editores

1. Un Sistema de Medida de la Amplitud Sísmica en Tiempo Real (RSAM) 5  
Thomas L. Murray y Elliot T. Endo
2. Un Sistema Telemétrico Digital para una Frecuencia Baja de Datos 11  
Thomas L. Murray
3. Operación de Redes Telemétricas de Baja Potencia en Ambientes Severos 25  
Andrew B. Lockhart, Thomas L. Murray y Bruce T. Furukawa
4. Un Sistema para la Adquisición, Archivo y Análisis de Datos de Tiempo-Serie de Baja Frecuencia en Tiempo Casi Real 39  
Thomas L. Murray
5. Sistemas para la Adquisición de Datos Sísmicos en el Observatorio Vulcanológico Cascades 47  
Elliot T. Endo y Gloria Smith
6. Métodos Usados para Vigilar la Deformación del Piso del Cráter y del Domo de Lava en el Mount St. Helens, Washington 57  
Eugene Y. Iwatsubo y Donald A. Swanson
7. Inclínómetros Electrónicos para la Vigilancia Volcánica: Lecciones del Mount St. Helens 75  
Daniel Dzurisin
8. Medidas de Distancia en Pendiente en los Flancos del Mount St. Helens, Desde Fines de 1980 Hasta el Final de 1989 91  
Eugene Y. Iwatsubo, Lyn Topinka y Donald A. Swanson
9. Vigilando la Deformación de Grietas Radiales con Medidores de Desplazamiento 103  
Eugene Y. Iwatsubo, John W. Ewert y Thomas L. Murray
10. Técnicas de Trilateración y Medidas de Distancia Usadas en Cascades y Otros Volcanes 111  
Eugene Y. Iwatsubo y Donald A. Swanson
11. Instalación de Hitos y Reflectores Permanentes para Redes Geodésicas de Deformación 125  
Michael P. Doukas y John W. Ewert



12. Nivelación Geodésica como Herramienta para Estudiar Volcanes Intranquilos **135**  
Daniel Dzurisin
13. El Uso de Procedimientos de Nivelación Geodésica de Primer Orden, Clase II para Vigilar Desplazamiento Vertical **147**  
Kenneth M. Yamashita y William P. Kaiser
14. Nivelación de Montaje Unico para Vigilar el Desplazamiento Vertical (Inclinación) en los Volcanes de los Cascades **155**  
Kenneth M. Yamashita
15. Un Método de Nivelación Trigonométrica de Montaje Unico para Vigilar Cambios en la Inclinación del Suelo **163**  
John W. Ewert
16. Vigilancia del Nivel de Agua en Lagos como Herramienta para Estudios de Deformación de Corteza **171**  
Jack W. Kleinman y Peter M. Otway
17. Técnicas de Vigilancia Continua del Agua Superficial en Volcanes Activos: Ejemplos del Drenaje Loowit, Mount St. Helens y Kelut Crater Lake, Indonesia **189**  
Kenneth A. McGee, A. Jefferson Sutton, David E. Wieprecht y Mark E. Iven
18. Técnicas Fundamentales para el Estudio de Gases Volcánicos: Un Acercamiento Integral a la Vigilancia **195**  
A. Jefferson Sutton, Kenneth A. McGee, Thomas J. Casadevall y J. Barry Stokes
19. Videovigilancia en Volcanes Activos con Televisión de Rastreo Lento **203**  
Bruce T. Furukawa, Thomas L. Murray y Kenneth A. McGee
20. Fotografía Básica en el Mount St. Helens y Otros Volcanes de la Cordillera Cascades **209**  
Lyn Topinka
21. La Importancia de las Observaciones de Campo para Vigilar Volcanes, y el Planteamiento que "La Vigilancia sea lo más Sencillo y Práctico Posible" **233**  
Donald A. Swanson

# Vigilando Volcanes: Técnicas y Estrategias Empleadas por el Personal del Observatorio Vulcanológico Cascades, 1980-90

## INTRODUCCION

*Por John W. Ewert y Donald A. Swanson, Editores*

Para conmemorar el décimo aniversario de la erupción del 18 de Mayo de 1980 del Mount St. Helens hemos preparado este boletín para describir muchas de las técnicas de vigilancia (monitoreo) usadas desde entonces para seguir la actividad del volcán. Todos los capítulos de este volumen fueron escritos por los técnicos y científicos que son o fueron en los últimos 10 años, miembros del Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO-Cascades Volcano Observatory), que fue establecido en Vancouver, Washington, en el verano de 1980 en respuesta a la erupción del cercano Mount St. Helens. En los diferentes capítulos del boletín se describen las técnicas y estrategias empleadas por el personal del CVO para recopilar los datos usados para vigilar la actividad volcánica y predecir la actividad eruptiva del Mount St. Helens, como también otros volcanes en los Estados Unidos, América Latina y Nueva Zelanda. Los capítulos enfocan los métodos de adquisición y manejo de datos, no en la interpretación de aquellos que podrían resultar de dicha vigilancia. Anticipamos que los lectores de este boletín serán científicos y técnicos, particularmente de países en vía de desarrollo, que están o van estar vigilando volcanes. La intención del boletín no es presentar un texto comprensivo de vigilancia volcánica, si no una destilación de como respondió el personal del CVO ante la necesidad de vigilar un volcán compuesto activo y los dinámicos desarrollos tecnológicos durante los años 80. Se puede encontrar información adicional en UNESCO (1972), Civetta y otros (1974), Tazieff y Sabroux (1983) y Tilling (1989).

Durante la década, una gran parte de la vigilancia sísmica del Mount St. Helens fue conducida por S. D. Malone y sus colegas en el Programa de Geofísica de la Universidad de Washington, no por el personal del CVO. Las técnicas usadas por el grupo de Malone están

descritas en manuales que aún no han sido publicados (Malone y Zollweg, 1985; Malone 1989), pero que pueden ser pedidos a Malone (Geophysics Program, AK-50, University of Washington, Seattle, WA 98195, USA). Los métodos usados por el grupo de Malone son apropiados para redes sísmicas grandes que usan grandes computadoras centrales ("mainframe") para la adquisición y procesamiento de datos. Se pueden encontrar ejemplos de como estas técnicas pueden ser aplicadas para interpretar actividad volcánica en Malone y otros (1981), Malone (1983), Malone y otros (1983), Hoffsetter y Malone (1986), y Swanson y otros (1985).

Como resultado de los avances tecnológicos, varios métodos usados para vigilar volcanes han cambiado grandemente desde 1980. El más importante de éstos ha sido la revolución en el campo de la electrónica, especialmente las microcomputadoras. Distanciómetros electrónicos (EDM-electronic distance meters) más pequeños y poderosos, telemetría digital de baja potencia, sistemas de adquisición y procesamiento de datos sísmicos basados en computadoras personales (PC-personal computers) e interfaces y controladores para computadoras portátiles son sólo algunos de los resultados de esta revolución que nos han permitido mejorar las técnicas de vigilancia ya establecidas o desarrollar nuevas metodologías.

Cuando el Mount St. Helens demostró señales de intranquilidad en Marzo de 1980, la experiencia de la mayoría del personal enviado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos al volcán se limitaba al Kilauea donde habían trabajado en el Observatorio Vulcanológico de Hawaii (HVO-Hawaiian Volcano Observatory). Aunque la mayoría de las técnicas usadas en 1980 fueron desarrolladas y/o usadas en el HVO, se hizo patente que el estilo eruptivo diferente de los volcanes compuestos en general, y en particular del Mount St. Helens,



requeriría la modificación de las prácticas de vigilancia. Los capítulos de este libro demuestran que tan necesarias fueron estas modificaciones.

Los capítulos caen en algunos grupos obvios: telemetría, adquisición de datos sísmicos, manejo de datos, deformación del suelo, geoquímica e imágenes. Los primeros tres grupos representan las áreas en las cuales los avances tecnológicos han sido más marcados. El cambio rápido de las condiciones antes de una erupción requieren que los datos estén a la disposición de los vulcanólogos lo más cerca posible al tiempo real, para poder evaluar razonablemente el futuro y así contribuir a la mitigación de los peligros volcánicos. Para ser lo más efectivo posible, los datos tienen que estar disponibles en un formato en el cual los diferentes parámetros medidos pueden ser comparados y analizados fácil y rápidamente.

El monitor de amplitud sísmica en tiempo real (RSAM real-time seismic-amplitude monitor) (Murray y Endo, capítulo 1) permite que los datos sísmicos sean cuantificados y utilizados justo cuando más se necesitan—cuando la actividad sísmica del volcán satura todos los otros sistemas de adquisición y análisis de datos sísmicos. Sistemas de radio-telemetría económicos y de baja potencia (Murray, capítulo 2; Lockhart y otros, capítulo 3) permiten que casi cualquier sensor envíe datos desde un volcán en tiempo casi real. El sistema de vigilancia volcánica basado en microcomputadoras usando el programa BOB (Murray, capítulo 4) permite que todos los datos recolectados por un equipo de vigilancia sean archivados, procesados y desplegados en base a un tiempo común. El desarrollo de este sistema, conjuntamente con los sistemas sísmicos que usan PC-AT y estaciones de trabajo Sun (Endo y Smith, capítulo 5), más que cualquiera otra cosa, representan la contribución nueva más dramática a los métodos de vigilancia volcánica hecha por el grupo del CVO. Estos sistemas, que están basados en PC's, son poderosos, portátiles, y muy económicos en comparación con aquellos que solo estaban marginalmente disponibles al comienzo de los 80's.

La mitad de los capítulos cubren las técnicas para la vigilancia de la deformación del suelo, usando métodos con y sin telemetría. Este énfasis refleja en parte el éxito del personal del CVO en cuanto a la predicción de la actividad eruptiva usando estos métodos (Swanson y otros, 1983, 1985). Cuatro de los cinco capítulos tratan directamente la vigilancia del Mount St. Helens mismo y sugieren procedimientos de campo basados en una década de experiencia: aquellos por Iwatsubo y Swanson (capítulo 6), Dzurisin (capítulo 7), Iwatsubo, Topinka y Swanson (capítulo 8) y Iwatsubo, Ewert y Murray (capítulo 9). Dos de estos capítulos tratan aspectos de las técnicas y estrategias de EDM empleadas por el personal

del CVO en otros volcanes (Iwatsubo y Swanson, capítulo 10; Doukas y Ewert, capítulo 11). Los capítulos restantes sobre deformación cubren varios aspectos de nivelación, incluyendo nivelación geodésica (Dzurisin, capítulo 12; Yamashita y Kaiser, capítulo 13), nivelación de montaje único usando métodos clásicos (Yamashita, capítulo 14) y trigonométricos (Ewert, capítulo 15) y nivelación de lagos (Kleinman y Otway, capítulo 16) que incorpora la experiencia de los Estados Unidos y Nueva Zelandia.

En los capítulos sobre nivelación introducimos el término "nivelación de montaje único" ("single-setup leveling") para reemplazar el término, aunque ampliamente usado, no expresivo y de jerga, "inclinometría seca". El nuevo término también reemplaza "nivelación inclinométrica", el cual mezcla un método (nivelación) con una meta (determinar la inclinación). El término "nivelación de montaje único" implica que para esta técnica de nivelación se monta el instrumento una sola vez, una implicación que describe con destreza el método. Esperamos que este término más expresivo sea usado en el futuro por otros colegas.

Mientras el primer capítulo sobre geoquímica describe una técnica para la vigilancia continua de manantiales y lagos (McGee y otros, capítulo 17), el segundo resume los métodos integrados de la vigilancia geoquímica (Sutton y otros, capítulo 18). Los capítulos que cubren geoquímica reflejan la necesidad percibida por los geoquímicos del CVO de obtener datos en tiempo casi real. La vigilancia geoquímica continua de una variedad de especies químicas, sin duda proporcionará importantes datos que podrían ser integrados con otros datos de vigilancia en los años venideros.

Los capítulos sobre imágenes describen el sistema de vigilancia con una televisión de rastreo lento para observar el cráter a una distancia de 8.5 km (Furukawa y otros, capítulo 19) y los esfuerzos para tener una documentación fotográfica (Topinka, capítulo 20) que es usada para trazar el desarrollo de la erupción y la evolución del cráter, domo y paisaje aledaño. El último capítulo del boletín (21), escrito por Swanson, señala el valor de las observaciones y medidas realizadas en sitio como parte de la vigilancia volcánica, y enfatiza que tales técnicas constituyen un componente importante de cualquier sistema de vigilancia, y sugiere que la vigilancia debe ser hecha de la manera más sencilla y práctica posible.

Los avances en las técnicas de vigilancia presentados en este boletín son notables por varias razones. La tecnología disponible ha sido adaptada a la vigilancia de volcanes activos por un grupo muy pequeño de personas dedicadas e innovadores. La mayoría de los desarrollos de los nuevos procedimientos, y la modificación de los antiguos, fueron conducidos con una

filosofía: que las técnicas sean lo más económico y práctico posible integrando tecnología ampliamente disponible. Esta filosofía resultó en sistemas que son apropiados y están dentro de los límites presupuestarios de naciones en vías de desarrollo que tienen una necesidad de evaluar, vigilar y mitigar peligros volcánicos. Además, la experiencia personal, difícilmente adquirida y basada en prueba y error de 10 años de vigilancia del Mount St. Helens y otros volcanes ha contribuido a la mejora significativa de los procedimientos.

La mayoría de los capítulos fueron escritos por el personal técnico del CVO, que en su mayoría son responsables del desarrollo y prueba de las tecnologías de vigilancia. Las nuevas y mejoradas capacidades resultaron de un ambiente de verdadero intercambio fomentado por un observatorio en el cual el personal científico y técnico comparten y aprenden unos con otros diariamente. Este tipo de ambiente alienta a las personas preguntarse "¿cómo podemos mejorar esto?" y les da la oportunidad y libertad de tratar de mejorar. Nosotros creemos que los capítulos demuestran la sabiduría de promover y mantener tal ambiente.

Nada es permanente excepto el cambio. Todas las técnicas descritas en este boletín pueden y serán mejoradas con el tiempo. Ciertamente, muchas de las modificaciones dependerán del volcán que necesita ser vigilado. Los capítulos en el boletín deben servir como buenos puntos de partida para tales mejoras. Particularmente esperamos que este boletín le sea útil a los científicos y técnicos de países en vía de desarrollo —nuestra audiencia principal— encontrarán a este boletín útil y podrán adaptar las metodologías a sus problemas particulares.

## REFERENCIAS CITADAS

Civetta, L., Gasparini, P., Luongo, G., and Rapolla, A., eds., 1974, *Physical volcanology*: Amsterdam, Elsevier, 333 p. (Developments in Solid Earth Geophysics 6).

- Hofstetter, A., and Malone, S.D., 1986, Observation of volcanic tremor at Mount St. Helens in April and May 1980: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 76, p. 923-938.
- Malone, S.D., 1983, Volcanic earthquakes: Examples from Mt. St. Helens, *en* *Earthquakes: Observations, theory, and interpretation*: Amsterdam, North Holland, p.436-455.
- , 1989, *The HAWK real-time seismic recorder users manual*: University of Washington Geophysics Program *in-house* publication.
- Malone, S.D., and Zollweg, Jim, 1985, *University of Washington Seismic Processing System*: University of Washington Geophysics Program *in-house* publication.
- Malone, S.D., Endo, E.T., Weaver, C.S., and Ramey, J.W., 1981, Seismic monitoring for eruption prediction, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.R., eds., *The 1980 eruptions of Mount St. Helens*, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 803-813.
- Malone, S.D., Boyko, C., and Weaver, C.S., Seismic precursors to the Mount St. Helens eruptions in 1981 and 1982: *Science*, v. 221, p. 1376-1378.
- Swanson, D.A., Casadevall, T.J., Dzurisin, D., Malone, S.D., Newhall, C.G., and Weaver, C.S., 1983, Predicting eruptions at Mount St. Helens, June 1980 through December 1982: *Science*, v.221, no. 4618, p. 1369-1376.
- Swanson, D.A., Casadevall, T.J., Dzurisin, Daniel, Newhall, C.G., Malone, S.D., and Weaver, C.S., 1985, Forecasts and predictions of eruptive activity at Mount St. Helens, USA, 1975-1984: *Journal of Geodynamics*, v. 3, p. 397-423.
- Tazieff, Haroun, and Sabroux, J.C., eds., 1983, *Forecasting volcanic events*: Amsterdam, Elsevier, 635 p. (Developments in Volcanology 1).
- Tilling, R.I., ed., 1989, *Volcanic hazards*: Washington, D.C., American Geophysical Union, Short Course in Geology, v. 1, 123 p.
- UNESCO, 1972, *The surveillance and prediction of volcanic activity; a review of methods and techniques*: Paris, United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, 166 p.





# 1. Un Sistema de Medida de la Amplitud Sísmica en Tiempo Real (RSAM)

Por Thomas L. Murray y Elliot T. Endo

## Abstracto

Aunque existen varios sistemas para el registro y detección de terremotos en tiempo real, pocos tratan el problema de vigilar continuamente la amplitud de las señales sísmicas durante condiciones de crisis volcánica, cuando los eventos individuales son difíciles de reconocer. Nosotros desarrollamos un sistema de Medida de Amplitud Sísmica en Tiempo Real (RSAM-Real-time seismic-amplitude measurement system) que usa un convertidor económico analógico-digital de ocho bits que es controlado por una computadora portátil para proporcionar información sobre amplitud absoluta promediada cada minuto para ocho estaciones sísmicas cerca del Mount St. Helens. El nivel de voltaje absoluto para cada estación es digitalizado a una frecuencia de 60 muestras/segundo, promediado e inmediatamente transmitido a una computadora central para su análisis. El RSAM proporciona una historia continua de la actividad sísmica que es fácil para acceder. Sistemas de RSAM, que calculan el promedio de amplitudes por espacios de 10 minutos, han sido instalados en los observatorios vulcanológicos de Cascades, Alaska y Hawaii. El RSAM ha sido una herramienta útil para la predicción de actividad eruptiva en los volcanes Mount St. Helens y Redoubt, Alaska.

## INTRODUCCION

Durante una crisis volcánica, la sismicidad comúnmente alcanza niveles a los cuales es difícil distinguir eventos sísmicos individuales. Los registros sísmicos analógicos proporcionan alguna información, pero no siempre es posible hacer un análisis rápido sin perturbar substancialmente la continuidad del registro. Aunque existen varios sistemas de detección de terremotos en tiempo real, la mayoría no proporcionan información cuantitativa durante períodos de alta sismicidad que comúnmente se observan antes de las erupciones volcánicas. Sin embargo, es justo bajo estas condiciones que se necesita procesar rápidamente la información sísmica cuantitativa. Para llenar este vacío,

nosotros desarrollamos un sistema sencillo y económico de medida de amplitud sísmica en tiempo real.

El RSAM mide la amplitud máxima de hasta ocho señales sísmicas. La frecuencia de muestreo es de aproximadamente 60 muestras/segundo. Se usan estos datos para calcular dos medidas para cada señal que entra.

1. La amplitud promediada por un minuto (voltaje absoluto) para cada señal es calculada sumando las medidas hechas en el minuto y dividiendo por el número de medidas. Hemos encontrado que almacenando y analizando datos de un minuto para períodos mayores a unos pocos días puede ser pesado, debido al volumen de datos (1,440 medidas/día por señal). Si se calcula el promedio cada 10 minutos usando los promedios de un minuto, los datos son analizados y procesados con mayor facilidad. En el Observatorio Vulcanológico de Hawaii (HVO) y en el Observatorio Vulcanológico de Alaska (AVO) promedios de 10 minutos son usados para análisis. Aparentemente, no hay ninguna pérdida de información pertinente usando promedios de diez minutos en comparación con los promedios de un minuto.

2. El número de eventos para cada señal entrante, ocurriendo en un período de 10 minutos, es calculado comparando las amplitudes promedias sucesivas cada dos segundos. Cuando se cumplen las siguientes condiciones el contador de eventos para esa entrada es incrementado:

Si  $A(n)$  es mayor al THRESHOLD

y

Si  $A(n)$  es mayor a  $RATIO$  por  $A(n-2)$

Donde  $A(n)$ ,  $n=1,2,3,\dots$  son los promedios sucesivos cada dos segundos. THRESHOLD (umbral) define la amplitud mínima para un evento y  $RATIO$  (razón) define que tanto mayor que el nivel de fondo debe ser la amplitud para ser considerada como un evento. El valor estándar ("default") para THRESHOLD es 5.0 unidades RSAM y para  $RATIO$  es 2.0.

Considerando que el RSAM no hace ningún esfuerzo para discriminar eventos sísmicos de deslizamientos, caídas de rocas, y otros ruidos de

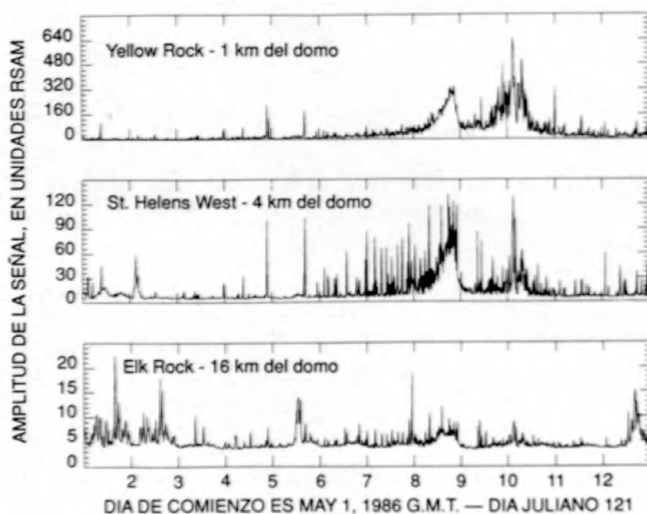


superficie, la medida se conoce como un "evento RSAM", no como un evento sísmico o terremoto.

Los datos son transferidos en intervalos de 10 minutos a la computadora central, donde inmediatamente se pueden analizar (Murray, capítulo 4). De esta manera, la sismicidad puede ser vigilada cuantitativamente en tiempo casi real (dentro de 10 minutos de adquisición), aún durante tiempos de intenso tremor.

La liberación de energía también puede ser vigilada en tiempo casi real. Cuadrando la amplitud promedia, se calcula un valor proporcional a la energía eléctrica generada por el movimiento del geófono. Se requieren estudios adicionales para determinar la relación exacta entre esta energía eléctrica y la energía sísmica.

Aunque el método aparenta ser hasta demasiado sencillo para ser efectivo, el RSAM comprobó ser útil para predecir los episodios de crecimiento del domo del Mount St. Helens de Mayo de 1985, Mayo de 1986 (fig. 1.1) y Octubre de 1986 y la erupción principal del 2 de Enero de 1990 del Volcán Redoubt, Alaska (fig. 1.2). Los datos del RSAM para las estaciones cercanas al domo de lava (Yellow Rock y St. Helens West) empezaron a superar el nivel de fondo unas 48 horas antes de que fuera emitido un nuevo lóbulo (fig. 1.1). La amplitud continuó incrementándose y llegó a un nivel pico cerca del tiempo en el cual probablemente fue



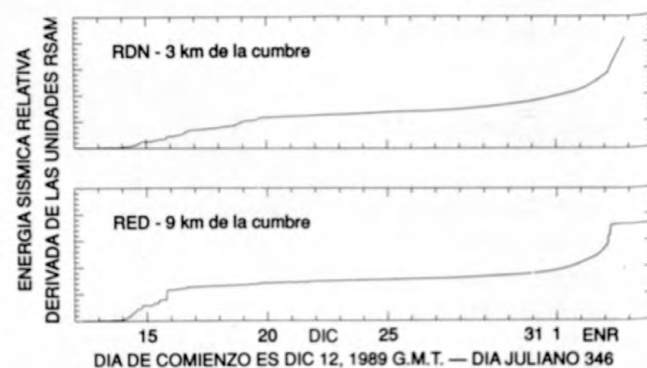
**Figura 1.1.** Amplitudes promediadas cada 15 minutos para tres estaciones sísmicas durante el episodio de crecimiento de domo del Mount St. Helens en Mayo de 1986. Las estaciones Yellow Rock y St. Helens West empezaron a mostrar un incremento de actividad 2 ó 3 días antes de la emisión del nuevo lóbulo en o alrededor del 9 de Mayo y mostraron un incremento drástico el día antes de la emisión. La amplitud de la señal en Elk Rock no mostró ningún incremento sobre el nivel de fondo y fue menor que aquella asociada con el viento el 1, 2, 5 y 12 de Mayo. Esto ilustra la importancia de usar el RSAM conjuntamente con los registros analógicos.

emitido (no se conoce el tiempo exacto de la emisión). Los picos y las amplitudes altas que siguieron la emisión fueron atribuidos a actividad superficial que resultó del emplazamiento del nuevo lóbulo.

La curva de liberación de energía antes de la erupción del 2 de Enero de 1990 del Volcán Redoubt está ilustrada en la figura 1.2. El empujamiento de la curva, que comienza el 1 de Enero, fue crítico para poder predecir la erupción (J. Power, comun. oral, 1990).

La sencillez del RSAM también puede ayudar a comunicar los niveles de sismicidad a los funcionarios públicos, que pueden desconocer la terminología estándar usada por los sismólogos. Un gráfico de tiempo-serie del RSAM puede, en muchos casos, ilustrar la actividad sísmica relativa más efectivamente que gráficos que demuestran las profundidades y magnitudes de los terremotos, o el número de terremotos de período largo versus período corto (Fairbanks Daily News-Miner, 1989).

El propósito del RSAM no es reemplazar los sistemas sísmicos convencionales. Sino, complementar un sistema convencional, proporcionando información en tiempo real de los niveles de amplitudes de tremores mientras otros sistemas calculan las localizaciones y magnitudes de los terremotos. Durante tiempos de poca o moderada actividad, el RSAM solo puede ser marginalmente útil y es especialmente susceptible a contaminación por viento u otros ruidos superficiales. Durante estos tiempos el RSAM debe ser usado en conjunto con registros sísmicos analógicos. Pero, durante épocas de tremor o actividad sísmica intensa, cuando los sistemas sísmicos convencionales no pueden mantener el ritmo de la actividad y los registros sísmicos analógicos se vuelven una sola mancha, el RSAM puede ser el monitor principal de sismicidad.



**Figura 1.2.** Descarga acumulativa de energía RSAM para las estaciones RDN y RED para la erupción de Enero 2, 1990 del Volcán Redoubt, Alaska. La energía RSAM se calcula cuadrando la amplitud promedia. Dado que aún no se conoce la relación entre la energía RSAM y la energía sísmica, la forma de la curva, no la cantidad de energía, proporcionó la información usada para predecir la erupción.

El RSAM puede ser usado como una unidad independiente, pero nosotros fuertemente recomendamos que sea configurado para transferir los datos a una computadora base más poderosa en intervalos de 10 minutos. La computadora base archiva los datos y permite que sean integrados a otra información de vigilancia volcánica para su análisis en tiempo casi real (Murray, capítulo 4).

## DESCRIPCION GENERAL

El sistema de Medida de la Amplitud Sísmica en Tiempo Real consiste de una computadora portátil Tandy (Radio Shack) Modelo 100 (o Modelo 102, que es esencialmente igual, excepto por el enchufe bus) y una tarjeta de adquisición de datos desarrollada en el CVO. La unidad completa cabe fácilmente en un espacio de 25.4 cm por 33 cm por 5.0 cm. Dado que consume muy poca energía (90 mA a 12 V) la unidad puede ser alimentada con una batería de carro o un panel solar, si necesario.

La tarjeta de adquisición de datos (fig. 1.3) introduce las ocho señales sísmicas entrantes por una memoria intermedia y después por filtros de paso-alto de 0.1 Hz para eliminar cualquier compensación DC. El multiplexor selecciona la señal deseada para muestreo. Luego la señal es rectificadora a onda completa para convertir cualquier componente negativo a voltaje positivo. Después, las señales son digitalizadas con un

convertidor analógico-digital de ocho bits. La comunicación entre la tarjeta de adquisición de datos y la computadora es a través del bus del sistema de computación, quedándose libres los otros terminales de la computadora para su conexión con otros dispositivos periféricos.

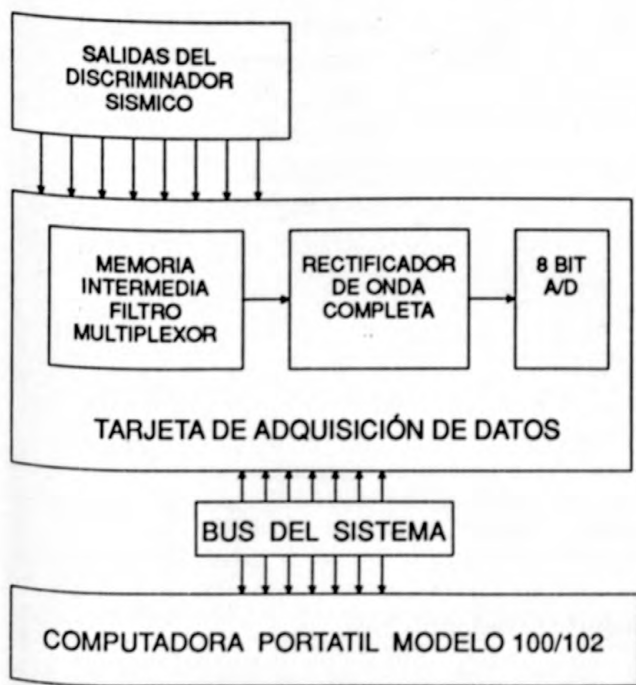
Generalmente los datos del RSAM se presentan en unidades RSAM. Las unidades RSAM son el valor promedio de la salida del convertidor analógico-digital de ocho bits que es multiplicado por 10 para que sea un íntegro. En un sistema configurado para discriminadores con una salida de  $\pm 2.5$  voltios, una unidad RSAM es aproximadamente 1 milivoltio. Para medidas más precisas, cada unidad debe ser calibrada individualmente.

## Adquisición de Datos y Procesamiento

La computadora calcula la amplitud promedia de la señal una vez por minuto para cada entrada, simplemente dividiendo la suma de cada una de las muestras digitalizadas de las entradas por el número de muestras. Usando el promedio sobre un período de un minuto permite que se pare momentáneamente la adquisición de datos para poder procesar los datos. Esto simplifica grandemente la programación, porque la adquisición de datos y el procesamiento no tienen que ser llevados a cabo concurrentemente. El procesamiento de datos requiere aproximadamente 0.5 segundos por cada dos segundos de adquisición de datos a 60 muestras/segundo. La mayoría del tiempo de procesamiento es usado por la rutina de detección de eventos.

Al principio de cada minuto, una llamada al subprograma de adquisición de datos causa que la computadora digitalice 125 muestras por cada entrada sísmica a una frecuencia de aproximadamente 60 muestras/segundo/entrada y devuelve las sumas de los valores digitalizados. Las sumas devueltas son sumadas a los totales corrientes para el minuto entero. En este punto los valores son revisados para determinar si ha ocurrido un evento RSAM. Entonces, llama nuevamente al subprograma de adquisición de datos y el ciclo continúa durante el resto del minuto. Al final del minuto, las amplitudes promedias son calculadas dividiendo los totales corrientes por el número de muestras. Luego empieza el proceso nuevamente para los datos del próximo minuto (fig. 1.4). Dependiendo de la configuración, los promedios pueden ser enviados a una computadora más poderosa a través de un enlace RS-232C para su análisis y almacenamiento o meramente enviados a una impresora. Los Modelos 100/102, aunque son computadoras-8085 de 32 kilobyte, tienen numerosas opciones.

Un listado completo del programa estándar usado por el RSAM está en Murray y Endo (1989).



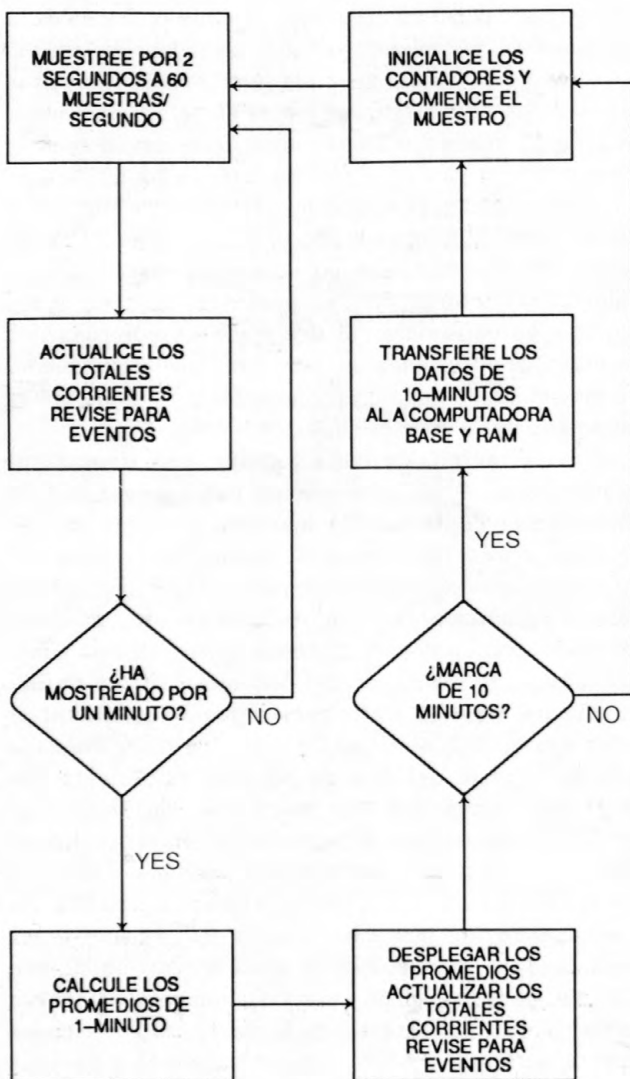
**Figura 1.3.** Diagrama de bloque del Hardware del RSAM

## HARDWARE PARA LA ADQUISICION DE DATOS

La tarjeta de adquisición de datos puede ser dividida en tres secciones: (1) suministro de energía, (2) interfaz sistema-bus, y (3) acondicionador/convertidor de señal. La esquema del circuito se encuentra en las figuras 1.5 y 1.6 y los elementos están listados en la tabla 1.1.

### Suministro de Energía

El suministro de energía (U5-U8) convierte la entrada de 12-voltios (J2) a  $\pm 12$  voltios para alimentar la sección analógica del circuito,  $\pm 5$  voltios para el multiplexor, y +6 voltios para alimentar la computadora



**Figura 1.4.** Diagrama de flujo para el programa del RSAM

**Table 1.1.** Lista de los componentes para la tarjeta de adquisición de datos.

Elemento	Valor	Descripción
C1-C2	10mF	Electrolítico, 16 V
C3-C4	100mF	Electrolítico, 16 V
C5-C6	10mF	Electrolítico, 16 V
C7	150pF	Disco cerámico
C8-C12	0.1mF	Mallory CK05BX104K
C13	33mF	Kemet T352-F336K-010AS
C22-C35	33mF	Kemet T352-F336K-010AS
C37-C38	0.1mF	Mallory CK05BX104K
RN1	100K	Bourns 4610x-101 100K
R2	10k	Potenciómetro
R3	2.7k	5%, 1/4 W
R4	10K	5%, 1/4 W
R22-R43	100K	5%, 1/4 W (8 resistencias en total)
R82-R86	10K	5%, 1/4 W (5 resistencias en total)
D1		LM 385-1.2 para entradas de $\pm 2.5$ V LM 336-2.5 para entradas de $\pm 5.0$ V
D2-D3		1N914
D4		1N5818
D5-D6		1N914
D10-D11		1N914
U1		National Semiconductor NSC810
U2		74HC138
U3		CD4011B
U4		74HC688
U5		ICL7662
U6		78L05CP
U7		LM7806CK
U8		ICL7662
U9		ADC0803LCN
U10-U17		TL022
U18		CD4051B
U19		LM358

vía J3. Esto permite la alimentación de la unidad entera por una batería de 12 voltios. La toma de corriente es menor a 100 miliamperios.

### Interfaz Sistema-Bus

La interfaz sistema-bus (U1-U4) decodifica las direcciones para el adaptador de interconexión programable (PIA-programmable interface adapter), U1,



Nota 1) \* D5, D6 y C13 están localizados en el lado de la tarjeta que tiene soldadura.

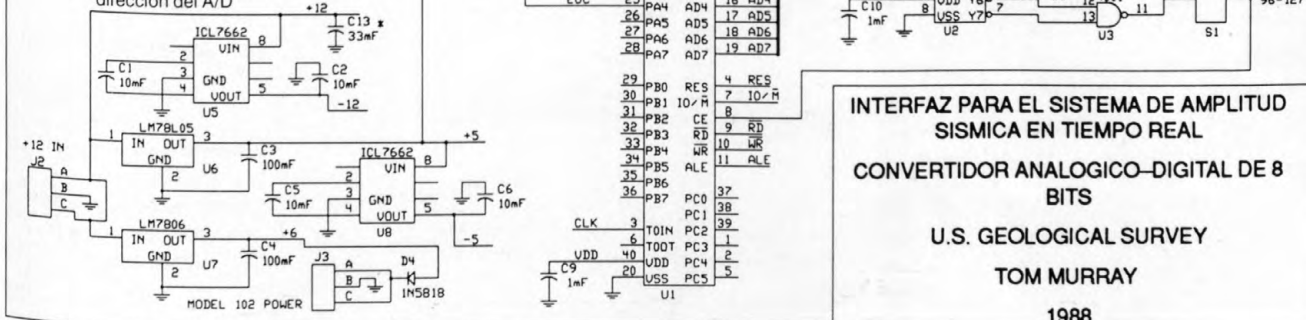
2) Pins 5 y 6 del U2 fueron intercambiados durante la producción de la tarjeta.

3) D1 es un LM385-12 para discriminadores con salida de 2.5 voltios.  
D1 es un LM336-25 para discriminadores con salida de 5.0 voltios

4) En el manual del Modelo 102 la configuración de los pins para el bus del sistema es para el enchufe DIP (dual in line package—encapsulado dual en línea) de 40-pins del Modelo 100, no para el conector de terminación en masa usado en el 102. J1 ilustra las salidas correctas para el Modelo 102.

5) Montajes estándar para la dirección/interruptor.

S1 32-63 (todas las posiciones apagadas excepto la 2) para la dirección del PIA  
S2 5 (todas las posiciones apagadas excepto 1 y 3) para la dirección del A/D



**Figura 1.5.** Diagrama de circuito para los suministros de energía, convertidor analógico-digital, e interfaz del sistema-bus para el Modelo 100/102 de la tarjeta de adquisición de datos.

y para el convertidor analógico-digital (A/D), U9. Entre J1 y el enchufe bus del sistema del Modelo 100/102 va un cable tipo cinta de 40 conductores que conecta la tarjeta a la computadora. Las direcciones de entrada-salida (I/O) 0-127 del Modelo 100/102 están disponibles para usos externos, como la tarjeta de adquisición de datos. El interruptor S1 selecciona el bloque de dirección (32-63, 64-95, o 96-127) donde va a residir el PIA. Los tres bloques permiten que hasta tres tarjetas sean conectadas a un Modelo 100/102 (aunque hasta ahora, no se ha añadido una segunda o tercera tarjeta). S2 fija la dirección de I/O para el A/D. Aunque S2 puede ser fijado en cualquiera dirección menor a 128, recomendamos que sea fijado a una en el bloque 0-31, dejando las direcciones más altas para los PIA's.

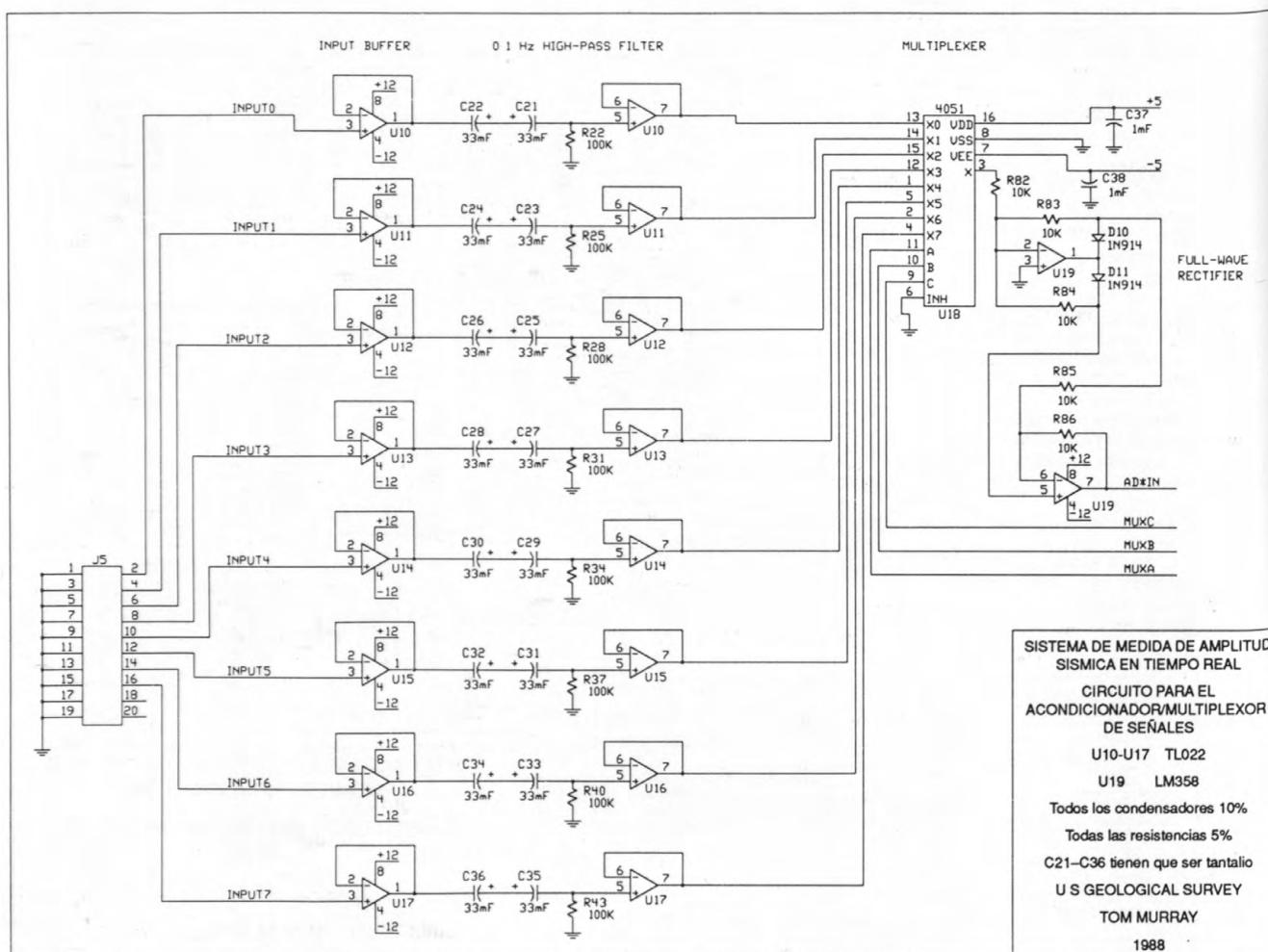
Note que solo tres de las 22 líneas digitales de I/O son usadas para controlar el multiplexor. Las líneas sobrantes están disponibles para mejorar el circuito.

## Acondicionador/Convertidor de Señales

Las señales sísmicas analógicas entran a la tarjeta vía J5. Todos los bajones de señal son cortados a tierra. Estas señales deben ser tomadas en las salidas de los discriminadores o en las entradas a los tambores de registro analógico.

U10-U17 introduce cada una de las ocho señales por la memoria intermedia y los pasa por unos filtros de paso-alto de 0.1 Hz para remover cualquier compensación DC. Los bits 0-2 del terminal A del PIA controlan la entrada que el multiplexor (U18) manda al A/D (U9) para su digitalización. Dado que el A/D va a aceptar solamente voltajes positivos, la señal debe ser rectificadora en onda completa (U-19) antes de ser digitalizada.

D1 suministra el voltaje de referencia para el A/D. El voltaje de escala completa para el A/D es dos veces



**Figura 1.6.** Diagrama de circuito para el acondicionador/multiplexor de las señales de la tarjeta de adquisición de datos.

mayor que el voltaje de referencia. Para señales con un rango de  $\pm 2.5$  voltios, se usa un voltaje de referencia de 1.22 voltios (LM385-1.22). Para señales con un rango de  $\pm 5.0$  voltios, se usa un voltaje de referencia de 2.5 voltios (LM336-2.5). Note que la R2 puede ser usada para fijar el LM336-2.5 a precisamente +2.500 voltios, pero tal ajuste no es posible con el LM385-1.22.

## CONCLUSIONES

Con el RSAM no se intenta reemplazar los registradores analógicos o sistemas convencionales de adquisición de datos. Su inhabilidad para distinguir ruido cultural de sismicidad volcánica excluye usarlo sin otro método para visualmente inspeccionar la actividad sísmica. Por otro lado, su valor es solamente marginal durante tiempos de baja sismicidad. Sin embargo, mientras aumenta la sismicidad durante una crisis

volcánica, aumenta el valor del RSAM. Mientras más alto sea el nivel de sismicidad, mayor es la importancia potencial del RSAM. Dependiendo de la naturaleza y el nivel de la sismicidad, el RSAM puede dar la única medida cuantitativa en tiempo real de la actividad sísmica. En poco tiempo, el RSAM ha demostrado rápidamente su utilidad en la vigilancia y predicción de erupciones y se ha convertido en una herramienta esencial en los observatorios vulcanológicos de Cascades y Alaska.

## REFERENCIAS CITADAS

- Fairbanks Daily News-Miner, 1989, Travelers wait as Redoubt rumbles anew: December 19, p. 5.
- Murray, T.L., and Endo, E.T., 1989, A real-time seismic amplitude measurement system (RSAM): U.S. Geological Survey Open-File Report 89-684, 26 p.

## 2. Un Sistema Telemétrico Digital para una Frecuencia Baja de Datos

Por Thomas L. Murray

### ABSTRACTO

El envío telemétrico de datos de aparatos electrónicos que miden la inclinación del suelo, temperatura, tensión, concentración de gases y otros fenómenos puede proporcionar información muy valiosa sobre la actividad volcánica actual o inminente. Para facilitar tal tipo de vigilancia, desarrollé un sistema telemétrico digital para una frecuencia baja de datos que transmite datos a intervalos de 10 minutos a través de enlaces de radio VHF/UHF a un centro de acopio de datos. Los voltajes analógicos son digitalizados en el campo con un convertidor analógico-digital de 12-bits-más señal. Los datos son transmitidos en un formato Bell 103 para que la mayoría de modems compatibles conectados al terminal serial puedan recibir, procesar y almacenar los datos. El transmisor entero, incluyendo radio, antena, y suficientes baterías para alimentar la unidad para un año entero, puede ser almacenado en un barrilete de acero de 9 galones. Las consideraciones de diseño impuestos por el Mount St. Helens resultó en un sistema robusto, económico y de bajo consumo energético que puede ser adaptado para usar en otros volcanes.

### INTRODUCCION

Para la vigilancia de actividad volcánica es muy útil poder medir la inclinación del suelo, las concentraciones de gas, la temperatura y otros fenómenos en intervalos de 10 minutos (Dzurisin y otros, 1983; McGee y otros, 1987). El envío telemétrico de tales medidas al centro de acopio de datos proporciona información en tiempo casi real sobre la condición del volcán, cuando las observaciones personales o la colección de datos en sitio no es práctico debido a grandes peligros o mal tiempo. El sistema descrito aquí es uno para una frecuencia baja de datos en el cual las medidas son hechas y transmitidas en intervalos mayores o iguales a un minuto. Su operación se asemeja a aquel descrito por Roger y otros (1977). Los transmisores individuales de campo aceptan hasta 16 entradas analógicas. Estas entradas son digitalizadas, y los datos son transmitidos por radio a un centro de acopio

de datos a intervalos preseleccionados, normalmente cada 10 minutos. Las transmisiones típicamente toman menos de 10 segundos, permitiendo que la mayoría de tiempo el transmisor esté en un estado de reposo de bajo consumo energético. Este procedimiento no sólo ahorra energía, sino que también permite que numerosos transmisores compartan la misma radio- y audiofrecuencia. Cada transmisor, en cambio, se auto activa, transmite sus datos y se vuelve a dormir, dejando que otros transmisores transmitan sus datos. Las transmisiones son recibidas por un radioreceptor y transmitidos por el terminal del modem a una computadora portátil operada con baterías donde los datos son decodificados y almacenados.

El sistema fue usado por primera vez en el Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO-Cascades Volcano Observatory) en 1984. Desde entonces ha sido instalado en Colombia, Ecuador, Guatemala y Alaska. Datos de inclinómetros, sensores de temperatura, magnetómetros, tensiómetros, sensores de gases y de sensores de calidad de agua han sido transmitidos por este sistema.

Normalmente los datos son transmitidos a un receptor localizado en un observatorio volcánico, pero no siempre tiene que ser así. Una red de cuatro transmisores establecida en Yellowstone Lake, Wyoming, transmite datos a una computadora Radio Shack, Modelo 100 localizada en una caseta detrás de una estación de guardaparques. Los datos son transferidos semanalmente a CVO por línea telefónica. Aunque un desperfecto en un fusible causó la pérdida de algunos datos durante el primer año, el sistema ha estado funcionando desde entonces sin problemas.

A continuación hay una descripción general del transmisor. En Murray (1988) he descrito la operación del transmisor en mayor detalle.

### CONSIDERACIONES DE DISEÑO

El envío telemétrico de datos del cráter del Mount St. Helens presenta varios problemas que limitan el



diseño de un transmisor. Las estaciones están localizadas en y alrededor del domo de lava, el mismo que está situado en un cráter con forma de herradura abierto hacia el norte. Algunas de las estaciones están localizadas en pequeños riscos en el flanco del domo. Las estaciones pueden estar enterradas por hasta 3 m de nieve durante el invierno, haciéndolas inaccesibles por hasta 6 meses del año. La potencia radial, tamaño físico y consumo energético fueron las principales consideraciones que se tomaron en cuenta para el diseño del sistema y cada una será discutida a continuación.

## Potencia Radial

Dado que el cráter tiene forma de herradura, no hay línea de vista para contacto radial entre un transmisor en el flanco sur del domo y las repetidoras localizadas hacia el norte. Esta geometría requiere que la señal del radio sea lo suficientemente potente para ser reflejada de la pared del cráter hacia el norte. Antenas de alta ganancia no son prácticas debido a las consideraciones del sitio, por lo tanto se usan radios de alta potencia (4 vatios) en muchas de las repetidoras telemétricas.

## Tamaño Físico

Las estaciones en los flancos del domo de lava están comúnmente ubicadas en riscos estrechos localizados en la parte superior de taludes. Estos riscos pueden ser tan pequeños como  $0.3 \text{ m}^2$ . Aunque los taludes son lo suficientemente estables como para uno parase encima cuando está haciendo la instalación o mantenimiento, no son lo suficientemente estables para colocar un transmisor. Por lo tanto, el paquete entero de transmisión (aparatos electrónicos, baterías, y antenas) tiene que ser lo suficientemente pequeño como para poder colocarlo en los riscos.

## Consumo de Energía

Muchas de las estaciones en el domo son completamente inaccesibles entre Diciembre y Junio, debido a la cobertura de nieve. Por otro lado, hay que usar baterías primarias, debido a que la caída de ceniza, el polvo acareado por viento y la topografía restringen la utilidad de los paneles solares. El acceso a estas estaciones es por helicóptero (caro) o a pie (lento), así que es deseable que los transmisores funcionen un año entero sin tener que reemplazar las baterías. El espacio pequeño en los riscos limita el número y tamaño de

baterías que pueden ser usadas, a la vez restringiendo el consumo energético.

## CARACTERISTICAS DEL SISTEMA

Tomando las consideraciones descritas arriba como guías, diseñé un transmisor digital con las siguientes características:

1. Bajo consumo energético. El consumo energético promedio para un transmisor digital, cuando está transmitiendo cuatro medidas a 300 baudios cada 10 minutos, es menos de  $300 \mu\text{A}$  a 12 voltios. El consumo energético de un radio es mucho mayor. Un radio de 4 vatios consume hasta 900 mA a 12 voltios mientras está transmitiendo; su consumo energético para el ejemplo anterior es de 6.2 mA a 12 voltios. La energía total requerida para la estación, (excluyendo aquella requerida por los sensores) para un año es un poco menos de 60 amp-horas. Dos baterías alcalinas de 6 voltios de 20-amp-hora conectadas en serie pueden alimentar el transmisor digital por un año. El radio requiere cuatro baterías alcalinas de 7.5 voltios y 40-amp-hora conectadas en serie/paralelo para alimentarlo para un año.

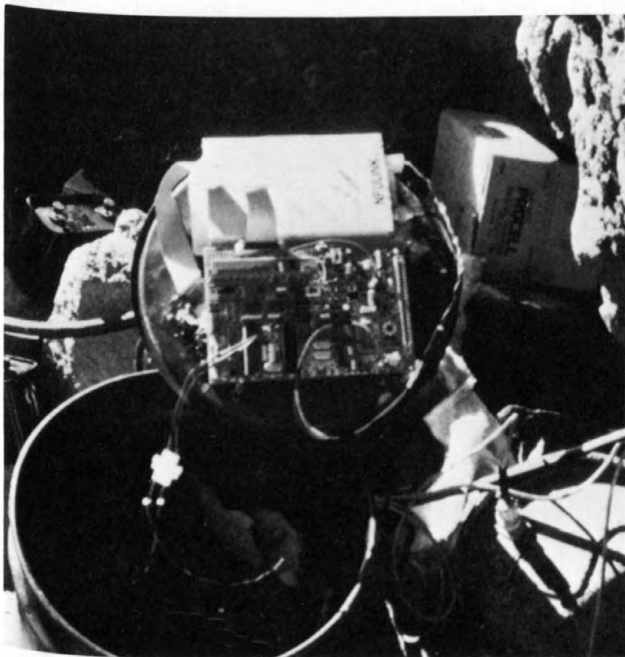
2. Transmisión de datos a 300 baudios en formato estándar Bell 103. El transmisor utiliza un modem de un chip (Motorola MC 14412FP) para transmitir los datos en enlaces radiales en el formato Bell 103. Esto permite que casi cualquier computadora con un modem de 300 baudios compatible con Bell 103 pueda recibir los datos. Además de un cable, no se requiere de ningún circuito especial entre el radio y modem. El formato Bell 103 también permite que las transmisiones sean añadidas a las señales sísmicas y que los enlaces radiales sean compartidos, aunque para esto es necesario sacrificar dos bandas sísmicas de audio (1020 y 1360 Hz ó 2040 y 2380 Hz). Cuando los datos son transmitidos conjuntamente con las señales sísmicas, puede ser necesario usar un filtro en el receptor, si el filtro del modem no discrimina lo suficientemente bien la señal.

3. El compartir de un radio- y audiofrecuencia. El tiempo corto requerido para transmitir los datos también permite que múltiples transmisores compartan el mismo radio- y audiofrecuencia. Esta situación es análoga a tener numerosas cuadrillas comunicándose entre si usando la misma frecuencia radial de voz. El radio de cada cuadrilla está solamente en modo de transmisión mientras se transmite el mensaje, 1 ó 2 segundos. Al final del mensaje, el radiotransmisor se apaga, permitiendo que otra cuadrilla transmita un mensaje. Igual como cuando dos personas tratan de transmitir un mensaje al mismo tiempo, las transmisiones pueden interferir una con otra. Al igual como en el sistema descrito por Roger y otros (1977), el sistema descrito

aquí no trata de evitar estos encuentros, sino transmite los datos suficientes veces a intervalos semi fortuitos para que los encuentros ocasionales sean tolerables. El



A



B

**Figure 2.1.** A, Transmisor, radio, y baterías almacenados en un tanque metálico. La antena está montada en la tapa y está protegida de nieve y hielo por un tubo plástico. B, Radio (arriba) y transmisor (abajo) montados en la parte interior de la tapa.

intervalo fortuito de transmisión se logra mediante el uso de un oscilador económico, relativamente inexacto. El intervalo de transmisión, aunque nominalmente puesto para 10 minutos, varía entre 8 y 12 minutos. Los encuentros de transmisión entre estaciones ocurre, pero dada la variación entre los intervalos de transmisión, es poco probable que las próximas transmisiones de las dos estaciones se sobrepongan nuevamente y las transmisiones serán recibidas exitosamente.

4. La utilización de radiotransmisores de 4 vatios. El tiempo requerido para transmitir los datos (2 segundos) es relativamente corto en comparación con el tiempo entre transmisiones (10 minutos), por lo tanto, los radios con salidas de 4 o más vatios pueden ser usados sin que se consuma mucha energía. Estos radios generalmente pueden eliminar la necesidad de utilizar antenas tipo yagi requeridos por radios usados típicamente en estaciones sísmicas, cuyas potencias de salidas son bajas (100-250 mW) debido a que siempre están transmitiendo. Eliminando los yagis se reduce el costo, tamaño y problemas relacionados con el clima y visibilidad.

5. La transmisión de datos dos veces para determinar su validez. Cada medida es transmitida en un mensaje de seis bytes. Los primeros dos bytes contienen los datos, el tercero contiene el número del canal (medida) que indica a cual sensor corresponden los datos. El cuarto y quinto byte son los bytes uno y dos repetidos. El sexto byte es la repetición del número del canal. Un mensaje se considera válido cuando los primeros tres bytes son iguales a los últimos tres.

6. Poner transmisor, radio, antena y baterías en un solo paquete. En el Mt. St. Helens, se almacenan los transmisores en barriletes metálicos de 9 galones (fig. 2.1). La tarjeta de transmisión y del radio están montadas en el interior de la tapa y las baterías alcalinas están colocadas en el fondo del tanque. En el tanque hay suficiente espacio para almacenar suficientes baterías para alimentar el sistema por un año, con transmisiones cada 10 minutos. Una antena tipo "látigo" de un cuarto de onda está colocada en la parte superior de la tapa. La tapa metálica es una excelente superficie a tierra para la antena. Un tubo plástico de 10 cm es colocado en la tapa para proteger la antena de nieve y hielo.

7. Toda la lógica en el hardware, no en el software. La lógica del transmisor está basada en el hardware, no en un microprocesador. Se usan interruptores para seleccionar el intervalo de transmisión, identificaciones de canales, etc. Las demoras están determinadas por constantes de tiempo de resistores-condensadores (RC). Los transmisores de campo toman muestras a intervalos determinados y transmiten los datos. Para hacer cualquier tipo de cambio en este arreglo, como promediar los datos o transmitir los

datos más frecuentemente si ciertos valores llegan al límite, hay que modificar la tarjeta. Tales modificaciones no son fáciles, mientras que en sistemas basados en microprocesadores, los cambios podrían ser llevados a cabo mediante el software. Sin embargo, lógica basada en hardware tiene sus ventajas. La mayoría de los circuitos integrados son fabricados por varias compañías y están disponibles en la mayoría de los países. También, la identificación de los problemas no requiere de un osciloscopio de alta velocidad, ni un analizador de lógica. Un osciloscopio relativamente lento (200 kHz), un ohm-voltímetro y un contador de frecuencia (MHz) es lo único que se necesita.

8. Identificación de problemas en el campo. Una computadora portátil de Radio Shack Modelo 100/102 con un modem Bell 103 integrado sirve como un receptor portátil de campo. El Modelo 100/102 permite ver los datos mientras son transmitidos en el campo. La validez de los datos puede ser revisada antes de dejar la estación.

9. Bajo costo. El costo actual de los componentes para un transmisor completo, excluyendo el radio está por

debajo de \$550. El costo del radiotransmisor oscila entre \$200 y \$500.

## TEORIA DE OPERACION

El transmisor consiste de 10 bloques (fig. 2.2):

1. Reloj
2. Suministro de energía del sistema
3. Lógica para control de transmisión
4. Multiplexor analógico
5. Convertidor analógico-digital
6. Contador del número del canal
7. Contador del número de estaciones transmitidas
8. Receptor transmisor asincrónico universal (UART: universal asynchronous receiver transmitter)
9. Modem
10. Radio

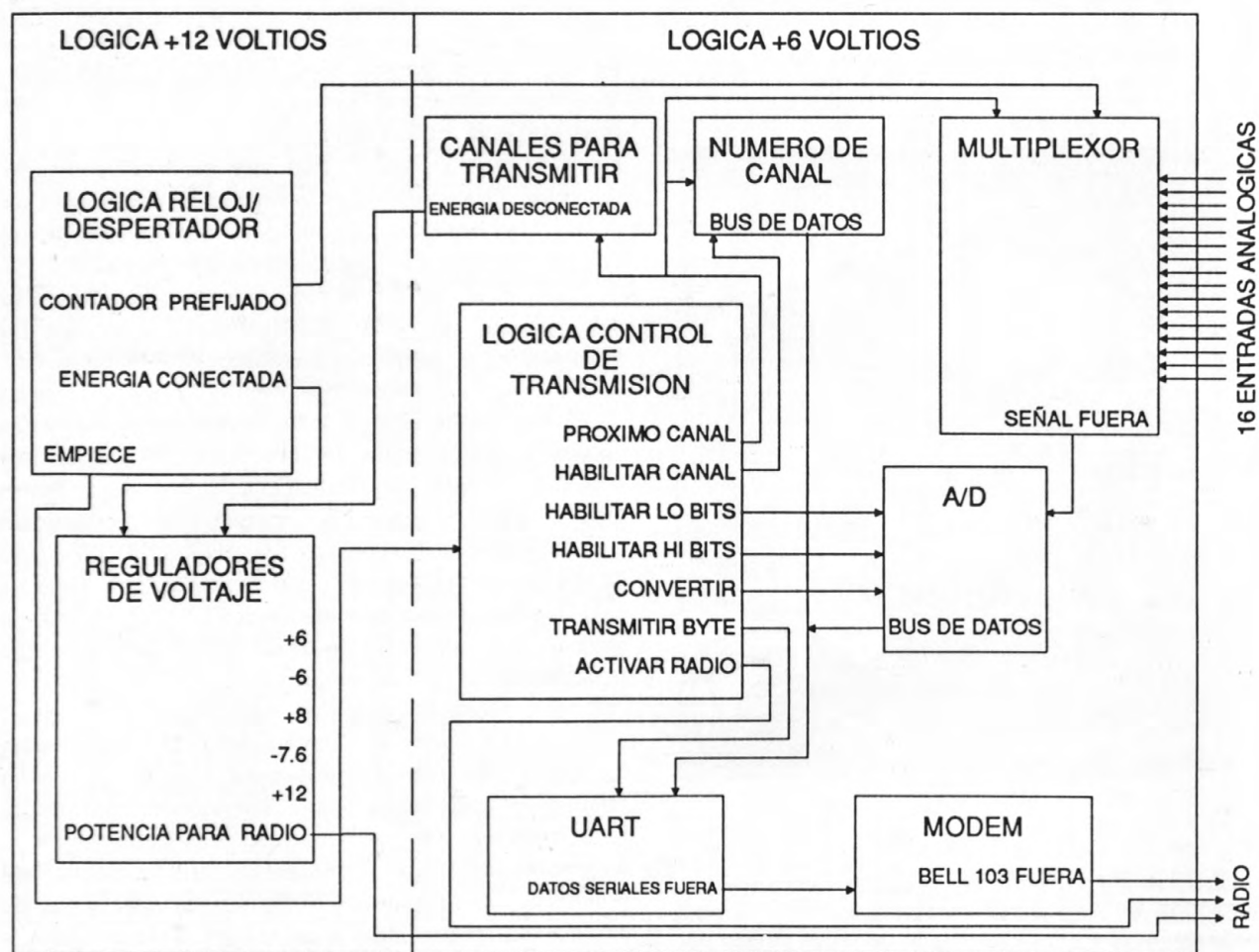


Figure 2.2. Diagrama de bloque de un transmisor



Para ahorrar energía, el transmisor está normalmente en un estado de reposo de baja potencia; la energía solo se aplica al reloj y, si se usa, al IC U14 (una de dos opciones para el multiplexor analógico; ver abajo). A intervalos escogidos con interruptores, el reloj habilita el suministro de energía, y el transmisor de control lógica empieza la secuencia de transmisión de datos. Los contadores que indican la entrada analógica inicial para ser seleccionada para la digitalización y el número del canal son fijados a los valores correctos. Entonces se digitaliza la entrada analógica seleccionada.

El radiotransmisor, que estaba apagado para evitar la interferencia de radio-frecuencias durante la conversión A/D es habilitada en este momento. Los datos digitalizados y el número del canal son convertidos por el UART de datos de 8-bit paralelo a datos de 8-bit serial. El flujo de datos seriales es convertido por el modem a tonos audibles, que son transmitidos por radio. Se apaga el radiotransmisor al finalizar la transmisión. El contador del número de canales transmitidos, el contador del seleccionador-analógico-digital y el contador del número del canal se incrementan por uno. Si todos los canales programados son transmitidos, se apaga el suministro de energía y el transmisor digital retorna a su estado de reposo. Sin embargo, si otro canal va ser transmitido, la próxima entrada analógica es digitalizada y los datos se transmiten de igual manera. La secuencia de transmisión de datos continúa hasta que el número designado de canales ha sido transmitido.

## DESCRIPCION DEL CIRCUITO

El esquema del circuito para el transmisor está ilustrado en la figura 2.3 y el listado de sus componentes está en la Tabla 2.1.

### Reloj

El reloj (U1, CD4047) es un oscilador de baja energía cuya frecuencia de salida (aproximadamente 2 Hz) está dividida en nueve intervalos de transmisión que son programados con interruptores. Los intervalos tienen un margen nominal entre 36 segundos y 2.5 horas. Una resistencia y un condensador determinan la frecuencia exacta de la salida del oscilador. Usando componentes de calidad estándar con exactitudes de  $\pm 5\%$  o inferior se asegura que el intervalo entre transmisiones será variable. Un intervalo de transmisión nominal de 10 minutos puede variar entre 8 y 12 minutos.

## Suministro de Energía del Sistema

Una transición positiva en la salida del circuito del reloj despierta, mediante la habilitación del suministro de energía, el transmisor de su estado de reposo de baja energía. Los reguladores lineales de corriente tranquilo y bajo, U7 y U9 (ICL7663), e invertidores de voltaje, U8 y U10 (ICL7660), proporcionan  $\pm 6$  y  $\pm 8$  voltios. Un canal P transistor de efecto de campo con semiconductor de metal-óxido (MOSFET-metal oxide semiconductor field effect transistor), VPO300L, proporciona +12 voltios para alimentar los sensores. La potencia a tierra es pasada al radio a través de un canal-N MOSFET. Sin embargo, en este momento el radio todavía no se pone en modo de transmisión.

## Lógica de Control de Transmisión

Los circuitos integrados U19-U20 y U24-U27 controlan la secuencia de eventos después que el transmisor es despertado de su estado de reposo (fig. 2.4). Usando circuitos de resistencias-condensadores para programar las demoras, la lógica de control aumenta los contadores, inicia las conversiones A/D, controla el radiotransmisor, y secuencialmente canaliza los datos y el número del canal al UART (descrito a continuación) para la conversión de paralelo a serial.

## Multiplexor Analógico

Uno de dos multiplexores, el HI-506-A (U14) o el CD4051 (U32), pueden ser utilizados para pasar las señales analógicas al convertidor A/D para su digitalización. El HI-506-A permite hasta 16 entradas y tiene protección para sobrevoltaje; puede resistir  $\pm 25$  voltios aplicados a sus entradas cuando la energía está desconectada. El HI-506-A es fabricado por Harris Semiconductor y cuesta actualmente como \$20. El CD4051 es un multiplexor de 8 canales y no tiene protección para sobrevoltaje; está disponible de numerosos suplidores por menos de \$1.

Originalmente yo pensé que el HI-506-A con su protección para sobrevoltaje sería usado en situaciones en las cuales las señales entrantes están presentes cuando el transmisor está en estado de reposo. Esto ocurriría si los sensores siempre estuvieran prendidos. Si los sensores solamente están activados cuando el transmisor está en estado activo, se usaría el CD4051.

Después descubrí que el HI-506-A no se daña si entran señales cuando los suministros de energía están apagados, el voltaje aplicado escapa por el multiplexor por su pin de potencia. Dado los requisitos de baja

**Tabla 2.1.** Lista de elementos para la tarjeta del transmisor digital  
[Componentes equivalentes "pin-por-pin" de fabricantes no listados pueden ser sustituidos]

Numero del Elemento	Elemento	Valor	Comentarios	Numero del Elemento	Elemento	Valor	Comentarios
C1	disco cerámico	.1 $\mu$ F		R17	resistencia	100	1/4 vatio 5% carbon
C2	disco cerámico	.01 $\mu$ F		R18	cortado		
C3	no usado			R19	no usado		
C4	electrolítico	10 $\mu$ F		R20	resistencia	1M	1/4 vatio 5% carbon
C5	no usado						
C6	disco cerámico	.1 $\mu$ F		R21-R33	resistencia	100K	1/4 vatio 5% carbon
C7	disco cerámico	.01 $\mu$ F					
C8-C11	electrolítico	10 $\mu$ F		R34	resistencia	150K	1/4 vatio 5% carbon
C12	electrolítico	15 $\mu$ F					
C13	disco cerámico	47 $\mu$ F		R35	resistencia	100K	1/4 vatio 5% carbon
C14	electrolítico	10 $\mu$ F					
C15	disco cerámico	.01 $\mu$ F		R36	resistencia	1M	1/4 vatio 5% carbon
C16	polipropeleno	.1 $\mu$ F	Electrocube 935B1B105K	R37	resistencia	250K	1/4 vatio 5% carbon
C17	disco cerámico	.01 $\mu$ F					
C18	polipropeleno	.22 $\mu$ F	Electrocube 935B1B224K	R38	resistencia	2.4K	1/4 vatio 5% carbon
C19	polipropeleno	.47 $\mu$ F	Electrocube 935B1B474K	R39	resistencia	100K	1/4 vatio 5% carbon
C20	disco cerámico	.01 $\mu$ F		R40	resistencia	1M	1/4 vatio 5% carbon
C21	no usado						
C22	disco cerámico	.47 $\mu$ F		R41	resistencia	150K	1/4 vatio 5% carbon
C23-24	disco cerámico	.001 $\mu$ F					
C25	tantalum	1 $\mu$ F		R42	resistencia	100K	1/4 vatio 5% carbon
C26-27	disco cerámico	56 $\mu$ F	Necesario si U29 es un IM4702IPE				
C28	disco cerámico	.01 $\mu$ F		R43	cortado		
C29	disco cerámico	.01 $\mu$ F		R44	no usado		
C30	electrolítico	10 $\mu$ F		R45-R53	resistencia	100K	1/4 vatio 5% carbon
C31-C32	electrolítico	22 $\mu$ F					
C33	disco cerámico	.01 $\mu$ F		R54	no usado		
R1	resistencia	750K	1/4 vatio 5% carbon	R55	resistencia	100K	1/4 vatio 5% carbon
R2	resistencia	100K	1/4 vatio 5% carbon	R56	resistencia	10M	1/4 vatio 5% carbon
R3	resistencia	200K	1/4 vatio 5% carbon	R57	resistencia	15M	1/4 vatio 5% carbon
R4	no usado			R58-R59	resistencia	100K	1/4 vatio 5% carbon
R5-R7	resistencia	100k	1/4 vatio 5% carbon				
R8	no usado			R60-61	*		Selecciona la banda de salida para el VCO
R9	resistencia	100K	1/4 vatio 5% carbon				
R10	resistencia	3M	1/4 vatio 5% carbon	R62-R64	potenciómetro		Spectrol 64W103
R11	resistencia	1M	1/4 vatio 5% carbon	R65	potenciómetro		Spectrol 64W104
R12	resistencia	20	1/4 vatio 5% carbon	R66	potenciómetro		Spectrol 64W103
R13	resistencia	360K	1/4 vatio 5% carbon	R67	resistencia	100K	1/4 vatio 5% carbon
R14	resistencia	100K	1/4 vatio 5% carbon	R68	resistencia	100	1/4 vatio 5% carbon
R15	resistencia	20	1/4 vatio 5% carbon	R69	resistencia	100K	1/4 vatio 5% carbon
R16	resistencia	510	1/4 vatio 5% carbon	R70	resistencia	20K	1/4 vatio 5% carbon
				R71	resistencia	100K	1/4 vatio 5% carbon
				D1-4	diodo	IN914	

**Tabla 2.1.** Lista de elementos para la tarjeta del transmisor digital—*Continuación*  
[Componentes equivalentes "pin-por-pin" de fabricantes no listados pueden ser sustituidos]

Numero del Elemento	Elemento	Valor	Comentarios	Numero del Elemento	Elemento	Valor	Comentarios
D5	tranzorb		General Semiconductor #1.5KE18CA	U15	circuito integrado	OP07CZ	PMI
D6	diodo		Motorola IN5400 (3 amp)	U16	circuito integrado	MM74C193N	National
D7-D14	IN914			U17	circuito integrado	MM74C193N	National
Z0-Z15	tranzorb		General Semiconductor #1.5KE7.5CA (optional)	U18	circuito integrado	MM74C373N	National
Q1	MOSFET		Silconix VPO300L	U19	circuito integrado	CD4043BE	National
Q2-Q3	MOSFET		Motorola IRF511	U20	circuito integrado	CD40106BE	National
S1	interruptor	10 posición		U21	circuito integrado	MC14081BCP	Motorola
S2-S3	interruptor	DPDY	Sprague QSP 1410	U22	circuito integrado	ICL7109IIL	Intersil (temp. ext)
S4-S5	interruptor	DIP de 8 polos	C&K BD08	U23	circuito integrado	LM236H-2.5	National (temp. ext)
S6	interruptor	DIP de 4 polos	C&K BD04	U24	circuito integrado	MC4081BCP	Motorola
S7	interruptor	DIP de 8 polos	C&K BD08	U25	circuito integrado	CD4075BCN	National
S8-S9	interruptor	DIP de 4 polos	C&K BD04	U26	circuito integrado	MC14017BCP	Motorola
Y1	cristal	3.5795 MHz	US Crystal	U27	circuito integrado	CD4001BCN	National
Y2	cristal	2.4576 MHz	US Crystal	U28	circuito integrado	IM6402IPL	Intersil
Y3	cristal	1.0 MHz	US Crystal	U29	circuito integrado	IM4712PE or IM4702IPE	Intersil
T1	transformador	600 ohm primario/ secundario impedancia		U30	circuito integrado	MC14412FP	Motorola
U1	circuito integrado	CD4047BE	National	U31	circuito integrado	TL022CP	Texas Instruments
U2	circuito integrado	CD4020BE	National	U32	circuito integrado	CD4051BF	National
U3	circuito integrado	CD4043BE	National	J1	I/O conector	AP925255-26-R	
U4	circuito integrado	CD40106BE	National	J2	Conector de panel de borde de 44 pins		
U5	circuito integrado	CD4050BCN	National	J3	Conector de panel de borde de 44 pins		Conector de repuesto
U6	circuito integrado	MC14504BCP	Motorola		Enchufe DIP de 8 pins	Augat 508-AG37D	9 en total
U7	circuito integrado	ICL7663CPA	Intersil		Enchufe DIP de 14 pins	Augat 514-AG37D	7 en total
U8	circuito integrado	ICL7660CPA	Intersil		Enchufe DIP de 16 pins	Augat 516-AG37D	18 en total
U9	circuito integrado	ICL7663CPA	Intersil		Enchufe DIP de 20 pins	Augat 520-AG37D	1 en total
U10	circuito integrado	ICL7660CPA	Intersil		Enchufe DIP de 28 pins	Augat 528-AG37D	1 en total
U11	circuito integrado	MC14017BCP	Motorola		Enchufe DIP de 40 pins	Augat 540-AG37D	2 en total
U12	circuito integrado	MC14017BCP	Motorola				
U13	circuito integrado	MM74C193N	Motorola				
U14	circuito integrado	HI-506-A	Harris(opcionado) con U32				

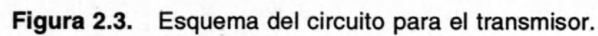
energía del transmisor, este escape podría ser suficiente para alimentar la tarjeta. Cuando esto ocurre, el transmisor nunca regresa a su estado de reposo, sino sigue transmitiendo. Este problema fue resuelto alimentando al HI-506-A continuamente desde el suministro de +12 voltios.

Conner (1990) presentó una solución más elegante al problema. El colocó diodos entre el multiplexor y sus suministros de energía (fig. 2.5). Esto evita que la corriente que se escapa alimente el transmisor. El también planteó que este esquema protegería la "mayoría de los interruptores de semiconductores complementarios de óxido metálico (CMOS=complementary metal oxide

semiconductors) de daños causados por señales analógicas que están presentes cuando los suministros de energía de los interruptores de energía están apagados." Esto sugiere que un CD4051 con diodos en serie en los pins del suministro de energía puede ser usado cuando los sensores están operando continuamente. El HI-506-A solo tiene que ser utilizado si más de ocho canales van a ser transmitidos o si la posible variación de la salida fuera mayor al voltaje máximo permitido por la CD4051 ( $\pm 9$  voltios).

Un contador binario que se puede prefijar, U13, controla cual de las entradas analógicas (0-15) es seleccionada por el multiplexor. El contador se





**Figura 2.3.** Esquema del circuito para el transmisor.

incrementa por uno cada vez que se transmite un canal, y consecuentemente el multiplexor pasa la próxima entrada al convertidor A/D. La entrada analógica inicial muestreada está designada por el interruptor S6. Cuando se usa un multiplexor de 8 canales CD4051, el cuarto bit (MSB) del contador es ignorado.

Antes de pasar al convertidor analógico-digital, un amplificador operacional, U15 (OP07), introduce la salida del multiplexor en la memoria intermedia.

LO está conectado directamente a la tierra de la entrada analógica.

Una entrada de escala completa es dos veces mayor al voltaje de referencia. R62 está ajustada para darle al voltaje de referencia U23 (LM236-2.5) una salida de +2.500 voltios para que el transmisor tenga un margen de entrada de escala completa de  $\pm 5$  voltios. El tiempo máximo que coge la conversión es 33.3 ms. La resolución del convertidor es de 1.22 mV.

Para una correcta operación, C16 C18, y C19 tienen que ser condensadores con baja adsorción propia como polipropileno.

## Convertidor Analógico-digital

El U22 (ICL7109) es un convertidor A/D integrante de doble pendiente de 12-bits-mas-señal. La salida de la memoria intermedia U15 está conectada al INPUT HI del convertidor A/D mediante la R36. INPUT

## Contador del Identificador de Canal

Los contadores binarios U16 y U17 (ambos CD40193) determinan el número del canal que es

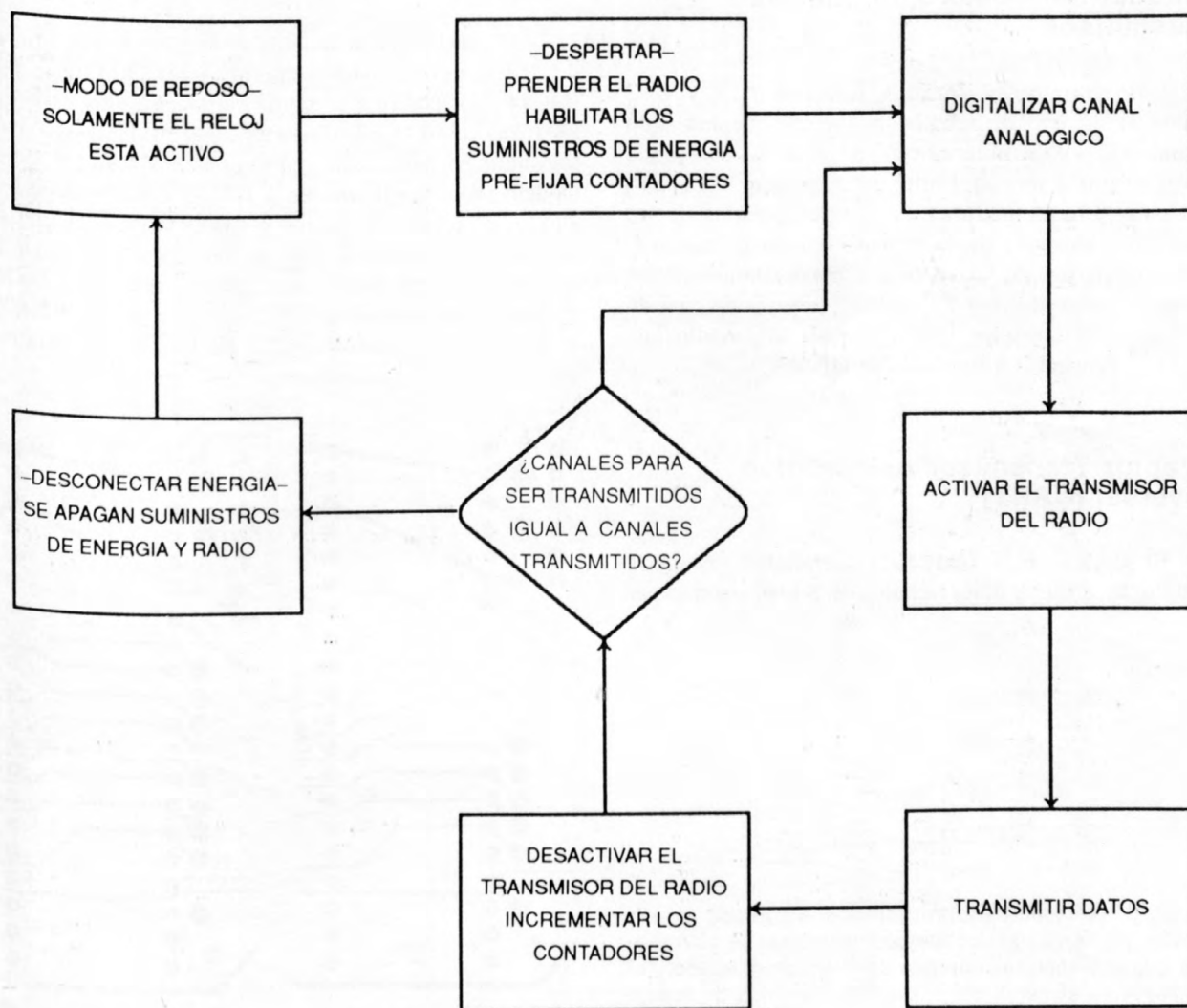


Figura 2.4. Diagrama de flujo para lógica del control de transmisión.

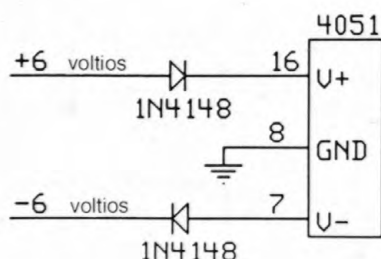
transmitido con los datos para cada entrada analógica. Cada entrada analógica tiene asignado un número específico (0-255). El receptor usa el número del canal para asociar el sensor correcto con los datos en el mensaje. El número inicial para el transmisor es fijado por el interruptor S7. Después que cada entrada es transmitida, se incrementa el número del canal. De esta manera se incrementa secuencialmente el número de canal para cada transmisor desde el número inicial fijado con S7. Por ejemplo, si se instalaran tres transmisores, cada uno transmitiendo cuatro canales, el transmisor 1 debería tener el número 1 y transmitir los canales 1-4. El segundo transmisor debería tener el número 5 y transmitir los canales 5-8. Si se piensa añadir dos canales más al transmisor 2, los canales 9 y 10 deberían ser separados para esta expansión. Por lo tanto el número inicial para el tercer transmisor debería ser 11 y transmitir los canales 11-14.

## Contador del Número de Canales Transmitidos

Los contadores décadas Johnson U11 y U12 cuentan el número de señales analógicas que han sido transmitidas y restituye el transmisor a su estado de reposo después que el límite programado haya sido alcanzado. Los contadores están configurados de tal manera que después de la transmisión de cada canal, sube en turno, una de las 16 salidas. Poniendo uno de los 16 interruptores de S4 y S5 en "on", selecciona cual de las salidas del contador está conectada al circuito que regresa el transmisor a su estado de reposo.

## Receptor Transmisor Asincrónico Universal (UART)

El UART, U28 (IM6402), convierte los datos paralelos de 8 bits a datos seriales de 8-bits, paridad par



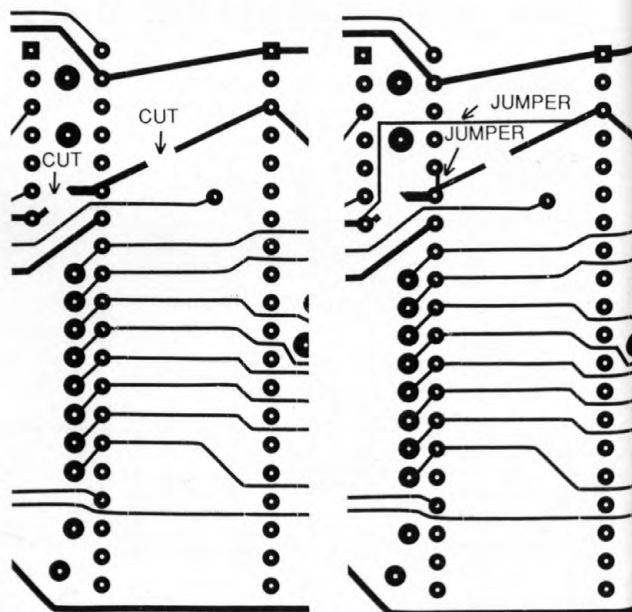
**Figura 2.5.** Circuito para prevenir que la corriente de las entradas analógicas se escapen por las barras de potencia. Dado que el alcance de entrada del A/D es  $\pm 5$  voltios y el multiplexor se alimenta con  $\pm 6$  voltios, la caída de voltaje debido a los diodos no afecta el margen de la entrada analógica de las señales (según Conner, 1990).

y 2-stop-bit. El interruptor S8 fija la frecuencia de baudios. En el CVO se utilizan 50 o 300 baudios; se prefiere 300 baudios porque con una transmisión más rápida reduce el tiempo de transmisión del radio, ahorrando así energía. Se usa una frecuencia de 50 baudios para los enlaces telemétricos que utilizan la banda de audio de 455-505 Hz en vez de la banda de audio de 1,070-1,270 Hz del Bell 103 común. La frecuencia de la banda de 455-505 Hz es muy baja para hacer transmisiones a 300 baudios.

Si los datos no van a ser recibidos por una IBM PC o compatible en la cual se está ejecutando un programa GWBASIC, la tarjeta debe ser modificada para desactivar la generación paridad (fig. 2.6). GWBASIC no acepta bits de paridad con datos de 8 bit.

## Modem

Un modem con manipulación por desplazamiento de frecuencia (FSK=frequency-shift keying), U30 (MC14412), codifica la salida serial en tonos de audio. El transmisor normalmente está configurado para transmitir en modo Bell 103 Originate. En este modo, el modem produce un tono de 1,270 Hz cuando detecta un alto lógico en la salida serial del UART. Produce un tono de 1,070 Hz cuando detecta un bajo lógico. El modo de contestación (answer mode) puede ser seleccionado usando el interruptor S8. En modo de contestación, el modem produce tonos de 2,225 Hz y 2,025 Hz para alto y bajo lógico, respectivamente.



**Figura 2.6.** Modificación de la tarjeta para inhabilitar la generación de paridad.



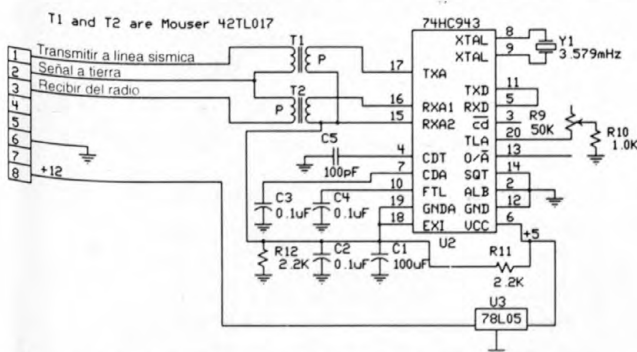
Si está disponible la audiofrecuencia que usa el transmisor, los transmisores pueden compartir los enlaces radiales con los datos sísmicos analógicos. Para frecuencias Originate, esto significa que canales sísmicos estándar con frecuencias centrales entre 1,020 y 1,360 Hz no pueden estar presentes. Para frecuencias Answer, los canales sísmicos con frecuencias centrales entre 2,040 y 2,380 no pueden estar presentes.

Se deben tomar las precauciones necesarias para asegurar que la telemetría de baja frecuencia de datos no interfiera con la telemetría sísmica. Dado que los transmisores con frecuencias bajas de datos envían datos en ráfagas, el radioreceptor seguramente va a recibir pulsos de ruidos mientras se prenden y apagan los radiotransmisores. Para evitar esto, las señales de frecuencias bajas de datos deben ser introducidas a una memoria interna. Esto se hace con un modem de un chip (fig. 2.7). En este circuito, la salida del radioreceptor es desmodulada por la sección receptora del modem. La salida desmodulada es enviada a la sección de transmisión del modem, donde es remodulada y colocada en la línea sísmica. Ruido del radioreceptor causará que la salida del modem module entre sus dos tonos de salida, pero evitará que la salida se desvíe fuera de esa banda.

Note que la salida del modem de memoria intermedia será en tonos Originate si la entrada es en tonos Answer, y viceversa. Se necesitaría un segundo modem de memoria intermedia para revertir los tonos nuevamente si esto fuera un problema.

## Radio

La potencia y los controles para el radio están disponibles de la tarjeta vía J5. La potencia a tierra del radio se prende y se apaga por intermedio de Q2. Con el transmisor en estado de reposo, Q2 está apagado y la tierra del radio está prácticamente desconectada de la



**Figura 2.7.** Circuito para introducir las transmisiones en memoria intermedia, habilitándolas para que puedan compartir enlaces radiales con datos sísmicos analógicos.

tierra de la batería. Cuando el transmisor está activo, Q2 se prende, proporcionando un camino de baja impedancia entre la tierra del radio y la tierra de la batería. Cambiando la tierra de esta manera, el voltaje del radio no tiene que ser necesariamente igual a aquel que alimenta el transmisor. La desventaja es que la conexión del radio a tierra tiene que ser aislada de la conexión de la potencia a tierra.

Para evitar interferencias de radiofrecuencia mientras se están muestreando las señales analógicas, el radiotransmisor es activado solamente cuando los datos van a ser transmitidos. Normalmente los radios se cambian al modo de transmisión mediante el corte de la línea de control PTT (PTT=Push-to-talk = deprime-para-hablar) a tierra mediante un interruptor. Q3 tiene esta función, cuando está prendido ("ON"), proporciona un camino de baja impedancia entre PTT y la potencia a tierra, activando el radiotransmisor.

La salida del transmisor digital es acoplado con transformadores a través de T1 al radio. El nivel de la salida es normalmente de 0.8 voltios pico a pico. Si el radio utiliza señales entrantes en el dominio de milivoltio, recomiendo que una red de divisores de resistencia sea colocada lo más cerca posible al radio para bajar la señal al nivel correcto. Esta configuración minimiza los problemas de interferencia.

## CONSUMO ENERGETICO

El consumo energético del transmisor digital no es un gran problema. Aún transmitiendo todos los 16 canales cada 10 minutos a 300 baudios, dos baterías alcalinas para linterna de 6 voltios y 20-amp-hora (Duracell ID9260) suministran suficiente energía para un año. La fórmula para calcular el consumo promedio de corriente es:

$$\text{CORRIENTE PROMEDIO} = \text{REPOSO} + ((\text{CNLS} \cdot 2 / \text{INTERVALO}) \cdot \text{ACTIVO})$$

donde:

REPOSO =	el consumo de corriente durante reposo (0.06 mA si se usa U32, 0.4 si se usa U14)
CNLS =	el número de canales a ser transmitido,
2 =	el número de segundos para transmitir un canal a 300 baudios (sustituya con 5 para transmisiones a 50 baudios),
INTERVALO =	el tiempo entre transmisiones (en segundos), y
ACTIVO =	el consumo de corriente mientras está activo (13 mA + corriente para sensores externos).

Alimentar el radio es un problema mucho más grande. Un radio típico de 4 vatios puede requerir 900 mA para transmisión y 20 mA en modo de recepción. La fórmula para determinar el consumo promedio de corriente para el radio es:

$$\text{CONSUMO DE CORRIENTE DEL RADIO} = ((\text{RCV} \cdot 1) + (\text{XMIT} \cdot 1)) \cdot \text{CNLS} / \text{INTERVALO}$$

donde

RCV =	consumo de corriente por el radio en modo de recepción,
1 =	segundos/canal que el radio está en modo de recepción,
XMIT =	consumo de corriente del radio en modo de transmisión,
1 =	segundos/canal que el radio transmite a 300 baudios (sustituya 2 para 50 baudios),
CNLS =	número de canales transmitidos, e
INTERVALO =	tiempo entre transmisiones (en segundos)

Algunas baterías, como las alcalinas y carbón-zinc, no tienen una descarga plana de voltaje. Si no, el voltaje cae lentamente mientras se descarga la batería. Aunque una batería de 12 voltios puede ser tasada en 10 amp-horas, 5 de estos amp-horas pueden estar a voltajes menores a 10 voltios. Y, bajo 10 voltios la salida de energía del radio puede caer a niveles inaceptables. Si el radio puede ser operado con seguridad a 16 voltios es preferible alimentarlo con baterías de 7.5 voltios puestas en serie/paralelo para suministrar una potencia nominal de 15 voltios (Lockhart y otros, capítulo 3). Sin embargo, la potencia nominal de 15 voltios excedería el voltaje operacional máximo para el transmisor digital. Por esta razón, el transmisor digital puede ser operado con un conjunto separado de baterías para alimentar el radio.

## CONCLUSION

El sistema descrito aquí ha sido utilizado en el CVO desde 1984. Su bajo costo, tamaño pequeño, y fortaleza de los transmisores ha permitido la instalación de sensores en áreas de Mt. St. Helens y otros volcanes que de otra manera no hubiera sido considerado práctico. Los datos transmitidos con este sistema continúan proporcionando información esencial para la vigilancia del Mt. St. Helens y otros sitios.

Los transmisores digitales no son tan flexibles como aquellos basados en microprocesadores. Sin embargo, generalmente en el campo no se requiere hacer un procesamiento más complejo para la transmisión telemétrica de datos de inclinación, esfuerzo, o

temperatura, entre otros. Hasta que se demuestre que un procesamiento más complejo es necesario, este sistema seguirá siendo útil.

## REFERENCIAS CITADAS

- Conner, D., 1990, Analog switches and multiplexers: EDN, vol. 35, no. 6, 8 p.
- Dzurisin, D., Westphal, J.A., and Johnson, D.J., 1983, Eruption prediction aided by electronic tiltmeter data at Mount St. Helens: Science, vol. 221, no. 4618, p. 1381-1382.
- McGee, K.A., Sutton, A.J., and Sato, M., 1987, Use of satellite telemetry for monitoring active volcanoes, with a case study of a gas-emission event for Kilauea Volcano, December 1982, *en* Decker, R.W., Wright, T.L., and Stauffer, P.H., eds., Volcanism in Hawaii: U.S. Geological Survey Professional Paper 1350, p. 821-825.
- Murray, T.L., 1988, A system for telemetering low-frequency data from active volcanoes: U.S. Geological Survey Open-File Report 88-0201, 28 p.
- Roger, J.A., Johnston, M.J.S., Mortenson, C.E., and Myren, G.D., 1977, A multi-channel digital telemetry system for low-frequency geophysical data: U.S. Geological Survey Open-File Report 77-490, 111 p.

## APENDICE

### Especificaciones para el Transmisor

#### Requisitos de potencia:

Voltaje suministrado	8.7-15 voltios DC
Corriente suministrada (U32 instalado)	60 µA reposo
(U14 instalado)	400 µA reposo
(sin radio)	15 mA transmitiendo

Corriente promedio (cuatro canales transmitiendo cada 10 minutos, 300 baudios, y U32 instalado):  
<300 µA

#### Entradas Analógicas:

Alcance	±5 voltios
Convertidor A/D	integrando
	12 bit-más-señal
Convertidor A/D	
alcance de salida	0-8192
Resolución	1.22 mV
Número de entradas	16 terminación simple (U14), 8 terminación simple (U32)

### Potencia de salida:

Cambiada +6.0 voltios	10 mA a 5.7 voltios
Cambiada -6.0 voltios	5 mA a 5.7 voltios
Cambiada +8.0 voltios	25 mA a 7.8 voltios
Cambiada -7.4	5 mA a 7.0 voltios
Voltaje suministrado cambiado	>100 mA

### Datos salida:

8 bit binario, paridad par, 2 stop bits  
(incorrectamente citado como paridad impar en Murray, 1988).

Interruptor de baudío seleccionable 50, 75, 110, 150, 300

Frecuencias FSK estándar para el Bell 103

Originate HI	1,270 Hz
LO	1,070 Hz
Answer HI	2,225 Hz
LO	2,025 Hz

Los datos de cada canal son transmitidos en un mensaje de 6-bytes. Los primeros dos bytes contienen los datos. Dado que la salida del convertidor A/D es de 13 bits (12 bits más un bit señal) y los datos son transmitidos en bytes de 8 bits, se necesitan 2 bytes para transmitir los datos del canal. Los 8 bits menos significativos son transmitidos en el primer byte y los 5 bits más significativos son transmitidos en el segundo byte. El número del canal es transmitido en el tercer byte. Entonces los 3 bytes son transmitidos nuevamente para completar el mensaje. Los datos y el número del canal son transmitidos dos veces para proporcionar una manera para verificar la validez del mensaje.

### Empaquetadura:

Tanque de acero sellado con un diámetro de 35.1 cm y una altura de 36 cm.

Protector de la antena construido con un tubo plástico con un diámetro de 10 cm.

### Requisitos para el Receptor

La mayoría de las computadoras que tienen un modem compatible con el Bell 103 pueden ser programadas para recibir datos enviados por el transmisor. Programas en BASIC para recibir los datos han sido escritos para las computadoras Radio Shack Modelo 100/102 e IBM compatible (Toshiba T1000).

Aunque un radorreceptor y computadora pueden recibir datos de numerosos transmisores, el número total de transmisores debe ser menor a 30. Si se usan más de

30 canales, las transmisiones de los diferentes transmisores van a interferir demasiadas veces.

## PROGRAMA PARA EL RECEPTOR DE CAMPO DEL MODELO RADIO SHACK 100/102

Una computadora Radio Shack Modelo 100/102 es usada como receptor portátil de campo. El siguiente programa en BASIC para el Modelo 100/102 vigila el modem. Cuando recibe un mensaje válido, el número del canal y los datos aparecen en la pantalla. Dado la velocidad lenta del Basic del Modelo 100/102 una porción del programa ha sido escrita en el lenguaje de máquina del Modelo 100/102.

La señal transmitida es conectada al Modelo 100/102 a través del pórtil para el modem. La señal alta va al pin 4 y la señal baja al pin 2. El interruptor del seleccionador del modem debe estar en la posición ACP y, si el transmisor está transmitiendo en las frecuencias originarias normales el interruptor ANSWER/ORIGinate debe estar en la posición ANS. Si el transmisor está usando frecuencias answer, el interruptor debe estar en la posición ORG.

Las líneas 21-31 contienen el código de la máquina para la rutina que recibe los datos del modem. La rutina revisa primeramente la paridad para los datos y errores de armazón. Si no detecta un error después de recibir 6 bytes, va a determinar si los tres primeros bytes son iguales a los últimos tres bytes. Si son iguales, el mensaje se considera como válido y se sale de la rutina con el valor igual a 6 en la localización 62700. Se sale de la rutina cada diez segundos para verificar si existe alguna entrada con el teclado. En esos casos, el valor de la localización no es igual a 6.

20 ' FLDRVCVR

21 DATA 00,00,00,E3,D5,C5,E5,C9,00,E1,C1,D1,E3,C9,00,48,0C,62,6B

22 DATA C3,24,F5,78,91,3C,32,EC,F4,AF,32,EB,F4,C9,CD,ED,F4,EB,48

23 DATA 0C,23,0D,CA,1D,F5,7E,2B,77,23,C3,11,F5,CD,F3,F4,C9,CD,6B

24 DATA F5,CD,ED,F4,CD,87,F5,C6,00,C2,A1,F5,00,00,00,CD,6D,6D,CA

25 DATA 27,F5,CD,7E,6D,CD,F3,F4,C2,F9,F4,77,23,0D,C2,24,F5,E5,2B

26 DATA CD,AF,F5,C2,61,F5,2B,CD,AF,F5,C2,61,F5,2B,CD,AF,F5,C2,61

27 DATA F5,E1,CA,00,F5,E1,CD,0B,F5,0C,2B,C3,24,F5,C9,47,23,7E,5F

28 DATA 23,7E,57,6B,62,3A,EB,F4,4F,C5,AF,47,09,C1,78,91,3C,4F,C9

29 DATA 00,00,00,00,00,00,21,E2,F4,CD,0F,19,3A,E8,F4,21,EA,F4,BE

30 DATA 77,3E,00,CA,9D,F5,3E,01,00,00,00,C9,CD,F3,F4,78,91,3C,32

31 DATA EB,F4,AF,32,EC,F4,C9,E5,7E,2B,2B,2B,96,E1,C9

32 ' blanquear el área para el código de la maquina

33 CLEAR 512,62650

34 PRINT "LOADING MACHINE CODE"

35 ' lo siguiente ingresa ("POKE") el código de máquina anterior a la memoria

36 FOR I=0 TO 204

38 READ A\$

40 H%=ASC(LEFT\$(A\$,1))

42 L%=ASC(MID\$(A\$,2,1))



```

44 IF H%60 THEN H%=16*(H%-55):GOTO 48
46 H%=16*(H%-48)
48 IF L%60 THEN L%=L%-55 ELSE L%=L%-48
49 ' el código de la máquina es insertado a la máquina
50 ' empezando en la localización 62698
51 H%=H%+L%:POKE(62698+I),H%
52 NEXT I
60 '
85 PRINT "PROGRAM STARTED"
135 ' el DA% es usado para decodificar el mensaje de 6 bytes
140 DIM DA%(6)
600 ' línea 604 abre el pórtico del modem si la generación
601 ' de la paridad ha sido inhabilitada, debe leer como es.
602 ' si no abierto como
603 ' "MDM:8E2D"
604 OPEN "MDM:8N2D" FOR INPUT AS I
605 ' la tasa baudio original es 300, para 50 baudios ejecute lo
606 ' lo siguiente
610 ' OUT 188,0 : OUT 189,76 : OUT 184,195
612 ' para 75 baudios ejecute lo siguiente
615 ' OUT 188,0 : OUT 189,72 : OUT 184,195
616 '
617 ' Q$ es la memoria intermedia para recibir el mensaje de 6 bytes.
618 ' tiene que ser un byte más largo que el mensaje
620 Q$="1234567"
621 ' si no se ejecuta la siguiente línea, los datos recibidos
622 ' en Q$ aparecerán en la línea 620 la siguiente vez que
623 ' se ejecute el programa.
624 MID$(Q$,1,6)=MID$(Q$,1,6)
625 '
626 ' busque un mensaje válido
630 CALL 62753,5,VARPTR(Q$)
635 ' si el peek=6 un mensaje válido ha sido recibido.

```

```

636 ' si no fue un tiempo fuera de 10 segundos
640 IF PEEK(62700)=6 THEN GOSUB 900
645 ' regrese para más datos
650 GOTO 630
731 '
900 ' decodifique el mensaje
902 ' primero ingresar los 6 bytes en DA%
1000 FOR I%=1 TO 6
1020 DA%(I%)=ASC(MID$(Q$,I%,1))
1021 NEXT I%
1090 ' convierte datos binarios a un valor integral
1100 DA%(2)=DA%(4)+(DA%(5)AND15)*256
1120 IF DA%(5)AND32 THEN GOTO 1122
1121 DA%(2)=4096-DA%(2):GOTO 1140
1122 ' DA%(2) va a contener los datos, DA%(6) ya tiene
1123 ' el número del canal
1124 DA%(2)=DA%(2)+4097
1130 ' imprime el mensaje en la pantalla
1140 GOSUB 1300
1162 RETURN
1300 '
1301 ' imprime el mensaje decodificado
1500 PRINT USING "ID=### ";DA%(6);
1501 PRINT USING "DATA=#### ";DA%(2);
1502 ' calcula el voltaje de los datos
1503 V!=((DA%(2)-4097)*.00122)
1504 PRINT USING "+#.### VOLTS ";V!;
1505 PRINT TIMES
1540 BEEP
1541 ' regrese para más
1550 RETURN
1600 ' fin del programa

```

### 3. Operación de Redes Telemétricas de Baja Potencia en Ambientes Severos

Por Andrew B. Lockhart, Thomas L. Murray y Bruce T. Furukawa

#### ABSTRACTO

Los problemas principales que han afectado las redes telemétricas de baja potencia en el Mount St. Helens han sido el clima y gases corrosivos, mientras que un problema secundario ha sido el suministro de energía. Los relámpagos y vándalos han sido también motivo de preocupación. Hemos encontrado que estos problemas pueden ser minimizados con una cuidadosa preparación de la estación y empaquetado de los instrumentos. Estuches herméticos protegen equipos sensibles de gases corrosivos y humedad. Se usan estuches no metálicos en ambientes altamente corrosivos donde los estuches metálicos se deterioran rápidamente. Los estuches pueden ser protegidos de una exposición directa al ambiente mediante encerramientos que varían desde barriles metálicos hasta edificios pequeños. Los problemas atribuidos a la formación de escarcha de hielo en las antenas pueden ser minimizados protegiendo las antenas con radomos o usando antenas log-periódica. Los daños a circuitos por relámpagos y conexiones eléctricas incorrectas hechas durante el cambio de baterías pueden ser minimizados mediante conexiones a tierra y con el uso de diodos y aparatos para la supresión de transientes. Para alimentar las estaciones remotas, hemos usado paneles solares con baterías recargables, baterías primarias y generadores termoeléctricos alimentados con propano. Hemos encontrado que los paneles solares con baterías recargables son la fuente de energía más barata, aunque las baterías primarias son la fuente de energía más confiable. Las reparaciones en sitio y el mantenimiento se complican bajo malas condiciones, requiriendo planificación previa y expectativas realistas. Atención a detalles es la clave para la operación de redes telemétricas de baja potencia.

#### INTRODUCCION

Los datos telemétricos de sensores localizados en volcanes activos proporcionan información valiosa con la cual se pueden evaluar los peligros volcánicos en tiempo real. Los sensores y equipo telemétrico de campo están

sujetos a algunos problemas, ambientales y culturales, que pueden dañar los equipos e interrumpir el flujo de datos al observatorio. Problemas singulares para volcanes activos incluyen los gases corrosivos y tephra.

Los problemas principales relacionados con el mantenimiento del equipo electrónico en volcanes activos son:

1. Clima y gases volcánicos corrosivos.
2. Cambios bruscos de corriente debido a relámpagos o conexiones incorrectas a baterías.
3. Mantenimiento de suficiente energía para las operaciones remotas.
4. Vándalos.

El clima y gases corrosivos han sido la causa principal de los problemas en los equipos de campo en el Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO-Cascades Volcano Observatory); preocupaciones con el suministro de energía son secundarias. Aunque relámpagos asociados con tormentas y vándalos no han sido un gran problema en el Mount St. Helens, han sido una fuente seria de problemas en otros volcanes que hemos visitado.

Una cuidadosa preparación de la estación y empaquetado de los instrumentos puede minimizar, aunque no eliminar, la mayoría de los problemas. Nosotros, basados en nuestra experiencia en el Mount St. Helens y otros volcanes, discutimos algunos métodos para proteger y suministrar energía a instrumentos de campo. También delineamos una guía para la identificación de problemas ("troubleshooting") y enumeramos las herramientas que nos han sido útil durante la instalación y mantenimiento de instrumentos de campo bajo condiciones severas. Nuestro informe está dirigido a personas que preparan e instalan instrumentos.

#### EMPAQUETADO DE INSTRUMENTOS

El empaquetado incorrecto de equipo electrónico usado en ambientes severos puede permitir que la

humedad y gases corrosivos dañen circuitos sensitivos. La humedad es un problema especialmente molesto y puede causar la quiebra total de los circuitos electrónicos. Quizás peor, su presencia en circuitos con impedancia alta en las entradas puede generar datos incorrectos o ruido. Quizás tal problema ni se detecte si alguna otra cosa no afecta el circuito. Gases corrosivos pueden magnificar el problema. Dióxido de azufre se combina con la humedad para formar ácido sulfúrico, que acelera rápidamente la corrosión de circuitos, alambres y encerramientos metálicos incorrectamente protegidos.

El método principal para proteger circuitos electrónicos de humedad y gases corrosivos es empaquetarlos de tal manera que la humedad y gases no entren en contacto con ellos. Hemos dividido los empaquetados en tres categorías, (1) estuches que contienen los componentes electrónicos, (2) encerramientos protectores donde se colocan los estuches, baterías y cabling y (3) equipo de interconexión y revestimientos para tarjetas impresas de circuitos.

## Estuches Para Instrumentos

Los estuches son la barrera principal entre los componentes electrónicos y el medio ambiente. Un buen estuche es hermético y no permite que ni la humedad, ni los gases corrosivos, entren en contacto con los circuitos. El estuche debe tener una empaquetadura o un sello tipo aro ("O-ring") en la tapa y alrededor de cada hueco en la caja, tales como aquellos para los tornillos o remaches que sujetan un mango o una bisagra. Si no dispone de empaquetaduras o sellos, un sellador como Scotchkote o silicón que se vulcaniza a temperatura de ambiente (RTV-room-temperature-vulcanizing) debe ser aplicado liberalmente en el área bajo cuestión para evitar la entrada de humedad y aire al estuche.

Algunos RTV's contienen pequeñas cantidades de ácido acético. Aunque este ácido no es lo suficientemente corrosivo para penetrar estuches metálicos, puede dañar alambres de cobre, conductores de resistencia y enchufes. Un RTV no acético como Dow Corning 3145-RTV debe ser usado con cables y componentes metálicos o electrónicos.

Es preferible usar estuches no metálicos, como aquellos fabricados por Pelican Products Inc., en áreas donde los gases son lo suficientemente corrosivos como para destruir estuches metálicos. La mayoría de los estuches no metálicos usan algún componente metálico para los tornillos o los pins en las bisagras. Un revestimiento protector debe ser aplicado si estos componentes no son de acero inoxidable.

Como los estuches no metálicos no proporcionan un blindaje a los circuitos electrónicos, éstos deben ser colocados en cajas metálica que tengan conexiones a tierra y que van dentro de los estuches.

En ambientes menos corrosivos, estuches metálicos, como aquellos fabricados por Zero Corp. pueden ser usados. Los estuches metálicos, si tienen conexión con tierra, dan un mejor blindaje eléctrico a los circuitos que los estuches no metálicos comunes, reduciendo así la posibilidad de interferencias con el radio transmisor. Ellos proporcionan también una buena superficie a tierra sobre la cual puede ser montada la antena tipo látigo. Una alternativa para los estuches metálicos diseñados específicamente para circuitos electrónicos son los tanques para municiones comúnmente disponibles en tiendas donde venden artículos sobrantes del ejército, o barriletes metálicos pequeños (4 o 9 galones, aproximadamente 16 o 36 litros). Ellos resultan ser contenedores económicos y herméticos, si sus empaquetaduras están en buenas condiciones.

Si posible, se deben usar conectores para pasar las señales y el corriente por el estuche. No se debe pasar un alambre por un hueco taladrado en el estuche y aplicar un sellador: un jalón al alambre puede destruir el sello rompiendo la ligadura con el alambre o el estuche. Los cables forrados que pasan por el estuche también proporcionan un conducto para la humedad y también deben ser evitados.

Nosotros usamos conectores circulares estándar resistentes al medio ambiente, Amphenol serie-MS, para pasar las señales y corriente por los encerramientos del instrumento. La humedad no puede pasar por estos conectores, aunque los huecos donde se montan deben ser sellados. Los conectores no ambientales son más económicos que los ambientales y pueden ser sustituidos si son cuidadosamente sellados dentro del estuche con Scotchkote u otro sellador. Una desventaja de usar los conectores metálicos serie-MS es que la corrosión de conectores apareados causa que sus roscas se unan y sea difícil, si no imposible separarlos. La aplicación de un poco de pintura o Scotchkote normalmente ayuda prevenir esto.

Nosotros usamos conectores "N", preferiblemente con contactos de oro, para conexiones de radiofrecuencia externas al estuche. A diferencia de los conectores BNC o PL-259/SO-239, los conectores "N" son inherentemente a prueba de agua, aunque aún así si están localizados fuera de un encerramiento protector los envolvemos con cinta eléctrica para protección adicional.

Se debe colocar desecante en los estuches para eliminar cualquier humedad que penetre el estuche o que condense después que se haya cerrado el estuche. El desecante debe ser reemplazado anualmente o cada vez que se abre el estuche.



## Encerramientos Protectores

Los encerramientos protegen al estuche con los instrumentos, alambres misceláneos interconectados y baterías de una exposición directa al clima, polvo y ceniza y gases corrosivos. También protegen los instrumentos de vándalos. Los encerramientos pueden variar desde tanques de acero de 55 galones, que tienen suficiente espacio para una estación sísmica y baterías, hasta pequeños edificios, que ofrecen espacio para trabajar en el equipo fuera del clima (figs. 3.1-3.3). Plástico, fibra de vidrio y madera sobreviven bien las condiciones corrosivas que rápidamente destruyen el acero.

Si el fondo del encerramiento está debajo del nivel del suelo, el caso típico para tanques de 55 galones que están enterrados, huecos grandes (5-10 cm) deben ser cortadas en la parte de abajo para permitir el drenaje de agua. Si el encerramiento está localizado en terreno de baja permeabilidad, como el fondo del cráter del Mount St. Helens, la probabilidad de agua subterránea inundando el encerramiento es menor que la inundación por agua que entre por arriba.

Los encerramientos protectores también previenen que vándalos y cazadores de recuerdos se entremetan fácilmente con el equipo. Dado que el vándalo persistente eventualmente va a entrar a cualquier sitio, el propósito de la seguridad de la estación debe ser desalentar a las personas simplemente curiosas o solamente poca maliciosas de entrar. Los encerramientos contruidos en concreto y acero son más difíciles de destruir que aquellos de plástico o de planchas metálicas (fig. 3.4). Asegurar lo mejor posible una estación contra vándalos, puede ser tan dificultoso como instalar el equipo mismo.

En muchos casos, simplemente asegurando el equipo con un candado puede prevenir el daño de los instrumentos por personas honestas, pero curiosas. Los candados de las diferentes estaciones deben tener la misma llave. Una variedad de candados, cada una con una llave distinta, asegura que algún día la llave de la estación sea olvidada o perdida, y el técnico tendrá que dañar el encerramiento o candado para poder llegar al equipo. Siguiendo el mismo razonamiento, si se usan candados con combinación, todas deben tener la misma combinación. Un encerramiento abierto por abajo para el candado limita el acceso al candado por abajo y aumenta grandemente la dificultad de serrar o cortarla en dos.

Será más difícil ver el encerramiento si éste se esconde o camufla. Para limitar las personas que vean y se entremetan con la estación, la misma se puede pintar con colores que combinan con el área circundante, se entierra o se esconde detrás de matorrales o rocas (fig. 3.5).

## Revestimientos Para Equipos Interconectados y Tarjetas de Circuitos Impresos

Rociar las tarjetas de circuitos impresos con revestimientos de uretano o acrílico puede prevenir que



**Figura 3.1.** Repetidora de radio en Guacamole, flanco norte del Mount St. Helens. Las baterías y repetidora están almacenadas en un barril de acero de 55 galones (izquierda del mástil de antena). El mástil de la antena consiste de un poste de maderas cimentado en el suelo sin tirantes. Un encerramiento cilíndrico en la parte superior del mástil protege la antena tipo látigo de la receptora de nieve y hielo. La antena tipo Yagi es para el transmisor. El panel solar sujetado al mástil alimenta la estación. Tirantes de cinta adhesiva aseguran al mástil los cables que van a las antenas y paneles solares.

la humedad acumulada en el estuche afecte el circuito. Aunque no es efectivo si la tarjeta está sumergida en agua, el revestimiento puede proteger la tarjeta cuando hay mucha humedad o condensación.

Todas las conexiones deben estar soldadas. Hasta las conexiones prensadas también deben ser soldadas como protección adicional contra la corrosión. En efecto, una soldadura transforma un conductor semi suelto a uno sólido, y hemos encontrado que conductores sólidos son menos susceptibles a corrosión que sus calibres equivalentes de alambres trenzados. Las conexiones

deben ser aisladas con cinta eléctrica o tubería que se encoge con calor y si posible selladas con ScotchKote. El uso de alambres aislados con Teflón en vez de cloruro polivinil (PVC-polyvinyl chloride) limita el efecto de gases corrosivos que penetran el aislamiento y dañan el conductor.

## ANTENAS Y MASTILES PARA ANTENAS

La Nieve y el hielo son los problemas más grandes para las antenas. Escarcha en los elementos de una antena yagi la desentona y hasta puede, con el peso adicional, doblar sus elementos. Los elementos de yagis enterrados en nieve pueden ser doblados o rotos debido al peso de esta. Una antena con una acumulación de escarcha tiene un área superficial mayor al viento y es más susceptible a ser rotada en su mástil de su orientación correcta.

Mientras más grande sea la antena, mayores son todos estos problemas. Las antenas grandes tienen un área superficial mayor hacia el viento y acumulan pesos mayores de escarcha que aquellas más pequeñas. Las antenas más grandes son más difíciles de proteger del clima con encerramientos y cobertores y son más fáciles para ser vistos por cazadores de recuerdos, la mejor antena es la más pequeña que funciona. Cuando es posible, usamos antenas tipo látigo en vez de yagis.

Un método que sirve para prevenir la desintonación de una antena a causa de escarcha es colocarla dentro de un encerramiento conocido como radomo. Yagis UHF que están protegidas por radomos de fibra de vidrio están disponibles comercialmente (fig. 3.2). Las Yagis VHF son demasiado grandes para colocarlas convenientemente dentro de un radomo; nosotros hemos usado una yagi de banda ancha, log-periódica o colocado la antena dentro de una pequeña estructura de madera. Las antenas log periódicas son más pesadas, grandes y caras que las yagis comunes y se usan solamente cuando son necesarias. Para tramos radiales cortos (30 km) usamos yagis normales porque las señales son suficientemente fuertes para ser recibidas aún cuando la antena está cubierta por hielo. La mayoría de nuestras yagis y antenas log-periódicas están pintadas de negro para mejorar el calentamiento solar y acelerar la fusión del hielo.

Antenas tipo látigo también son susceptibles a hielo. El viento puede causar que la antena cubierta con hielo oscile como un péndulo invertido, eventualmente rompiéndose en o cerca de su base. Para evitar esto, nosotros construimos un protector que consiste de tubo plástico de alcantarillado de 4 pulgadas (10 cm) para que actuara como un radomo para la antena. El tubo se asegura a la parte superior del estuche del instrumento o superficie plana con una brida de piso hecha de tubería plástica. Una tapa de tubería en la parte de arriba completa



**Figura 3.2.** Repetidora de radio en Harry's Ridge, 8 km al norte del Mount St. Helens. Las señales de numerosos sismómetros son recibidas, sumadas y retransmitidas en esta estación. Encerramientos blancos (radomos) protegen a las antenas UHF de nieve y hielo. El edificio sirve como un sitio protegido para las baterías y radios. En estaciones como estas, que requieren de numerosas antenas, una torre de tres patas cimentada en el suelo es usado como mástil.

el protector. Con un protector para la antena de esta naturaleza, el radio puede transmitir aunque esté profundamente enterrado en la nieve (fig. 3.3).

Normalmente es suficiente ajustar bien las abrazaderas que sujetan la antena al mástil para prevenir que esta rote. En sitios donde el viento es particularmente fuerte, nosotros taladramos un hueco de 3 mm de diámetro en la abrazadera dentro del mástil e insertamos un clavo o tornillo de acero para asegurar que no rote la antena en el mástil.

El hielo y la nieve también presentan problemas para el cable de la antena. Si el cable no está bien asegurado al mástil de la antena, viento, nieve o hielo pueden literalmente arrancar el cable del conector. El cable debe ser asegurado con cinta adhesiva, grapas o de alguna otra manera para prevenir esfuerzos en la unión entre el conector y cable. Debe estar un poco suelto en el área cerca de la antena para prevenir que cualquier rotación de la antena esfuerce la unión entre el cable y conector.

Nosotros hemos encontrado que un tubo de acero de 1.5 – 2 pulgadas (4.75 cm a 5 cm) de largo sujetado a un poste de madera 4 × 4 (8 cm por 8 cm), cimentado en el suelo y sin tirantes es un mástil excelente para una antena. El tubo permite una orientación más cuidadosa de la antena y panel solar que un poste cuadrado. No hemos tenido problemas con este arreglo, ni aún cuando ha estado enterrado bajo 3 m de nieve. Tratamos de no usar mástiles que estén sujetos con tirantes para evitar problemas asociados con la acumulación de nieve sobre los mismos. Otro problema con los tirantes es que vibraciones inducidas por el viento pueden aumentar el ruido de alta frecuencia en estaciones sísmicas.

### PROTECCION CONTRA RELAMPAGOS Y PARA LOS SUMINISTROS DE ENERGIA

Los equipos de campo están sujetos a daños por relámpagos y conexiones eléctricas incorrectas hechas



**Figura 3.3.** Estación del inclinómetro tipo bóveda de Yellow Rock, en el piso del cráter 1 km norte del domo en el Mount St. Helens. Un encerramiento hecho a pedido de fibra de vidrio y colocado sobre una plataforma de cemento fue enterrado para formar una bóveda para almacenar un inclinómetro, baterías, y equipo de telemetría. Los datos son transmitidos mediante una antena tipo látigo encerrado dentro de un cilindro en la parte superior de un poste de madera. Esta estación está enterrada bajo 3-5 m de nieve en el invierno. El tubo localizado a la izquierda de la bóveda se usa para localizar la bóveda cuando la nieve entierra la antena.



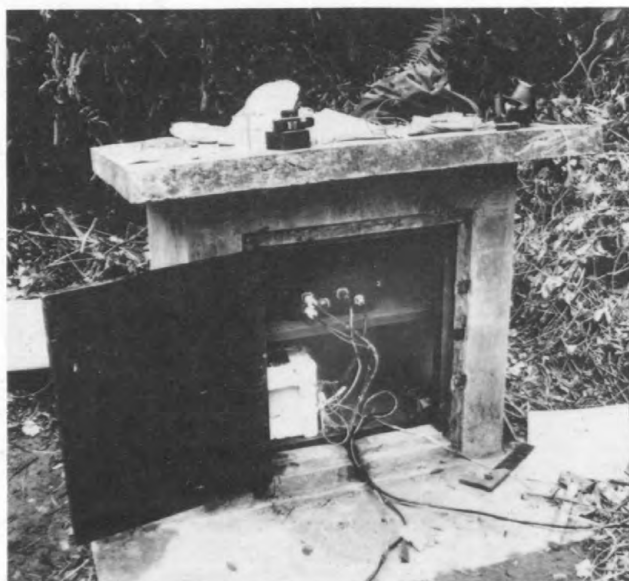
mientras se cambia la batería. Para contrarrestar estos efectos se pueden instalar fácilmente diodos de protección, diodos que suprimen transientes y tubos para descarga de plasma.

### Protección Contra Conexiones Eléctricas Incorrectas

Las baterías son la fuente de energía más común en las estaciones de campo. El peligro más grande de usar baterías es la posible inversión de la polaridad en los conectores después de cambiar las baterías. Los instrumentos pueden ser protegidos de una inversión de las salidas de la batería mediante la instalación de un diodo de bloqueo colocado en línea con uno de los conectores o colocando un diodo de corte que atraviese los conectores.

El diodo de bloqueo no permite que la corriente fluya por un circuito si las salidas de la batería están invertidas, pero esto tiene un costo, que es la reducción del voltaje aplicado al equipo por una cantidad igual al bajón de voltaje atravesando el diodo (fig. 3.6A). Un diodo normal de unión de silicón tiene un bajón de diodo de 0.6 voltios. Es preferible usar un diodo con barrera-Schottky, que tiene un bajón de 0.3 voltios. La capacidad de corriente del diodo tiene que ser mayor que la potencia máxima necesitada por el equipo que se está protegiendo, o se dañará el diodo.

Un diodo de corte atravesando la entrada de voltaje provee un corte a tierra cuando el voltaje está invertido (fig. 3.6B). Un diodo de corte debe ser usado en



**Figura 3.4.** Bóveda de concreto con puerta de acero previene que los ladrones accedan fácilmente la instrumentación telemétrica.

situaciones en las cuales el bajón de voltaje de un diodo de bloqueo no es aceptable. Sin embargo, si la capacidad de corriente del diodo de corte es excedido, y se daña el diodo y se elimina el corto circuito, los circuitos del instrumento pueden ser dañados. Para prevenir esto, el diodo tiene que tener la máxima capacidad de corriente de la salida de la batería o un fusible debe ser colocado en el circuito entre el diodo y batería. El amperaje del fusible debe ser menor que la mitad del amperaje del diodo para asegurar que el fusible se derrita antes que falle el diodo. Por ejemplo, un diodo de 3 amperios debe ser protegido por un fusible de 1 amperio.

El establecimiento de convenciones para las conexiones de los pins para todos los conectores hechos en casa también ayuda mantener una polaridad correcta de la batería. En el CVO, nos hemos puesto de acuerdo que para todos los conectores hechos en casa, aunque tengan 2, 5 o 10 pins, el pin A es +12 voltios y pin B es para tierra. Si un conector no está suministrando +12 voltios, su pin A está desconectado o el pin tiene la capacidad de aguantar +12 voltios. Esto evita que los equipos se dañen si los conectores están colocados en el sitio equivocado. Nosotros siempre asignamos +12 voltios al alambre rojo y tierra al alambre negro.

### Protección contra Relámpagos

Nada puede proteger completamente un equipo electrónico de baja potencia de daño por un relámpago directo. Sin embargo, daños por transientes de voltaje inducidos por relámpagos pueden ser minimizados mediante el uso de diodos para suprimir transientes, tubos para descarga de plasma (olla de gas) y técnicas correctas de tierra.

Nosotros hemos encontrado que una de las defensas principales contra daño por relámpagos es una tierra correcta. Aún si no hay aparatos como diodos para suprimir transientes u ollas de gas, si existe una buena tierra los daños al sistema por relámpagos serán minimizados. La repetidora de radio de CVO localizada en Coldwater Peak comparte un edificio con repetidoras instaladas y operadas por otras agencias. Las repetidoras de las otras agencias han sido dañadas dos veces por relámpagos, mientras que la del CVO no ha sufrido ningún daño. La única diferencia entre las dos instalaciones es que la del CVO tiene una buena tierra y las otras no.

En áreas susceptibles a relámpagos, nosotros recomendamos que el terminal negativo de la fuente de energía (típicamente una batería) esté conectada a la varilla de tierra con un cable fuerte (12 "gauge" o más). Si el estuche para la antena y el instrumento es de metal, también debe estar conectada a la varilla de tierra con un cable muy fuerte. Se deben cubrir las conexiones con

varillas de tierra expuestas al medio ambiente con grasa espesa y conductiva para retardar corrosión.

Una excepción a esta configuración de tierra es en los transmisores digitales telemétricos usados por el CVO (Murray, Cap. 2). Los interruptores de los circuitos suministran energía al radio conectando y desconectando la tierra del radio de la tierra de la potencia. Si se usa un radio cambiado a tierra, la tierra cambiada debe estar aislada de la tierra de la potencia. Si no, la tierra cambiada y la tierra de la potencia serán cortadas en la varilla de tierra negando el interruptor. En tales casos, solo la tierra del suministro de energía debe ser conectada a la varilla de tierra.

Los diodos para suprimir transientes como los Tranzorbs funcionan similar a los diodos zener pero empalman la corriente mucho más rápidamente (1 pico

segundo). Puestos a través de la potencia entrante y las líneas de señal, el Tranzorb no permite que los picos de voltaje inducidos por relámpagos sobrepasen los niveles aceptables. Nosotros usamos supresores de transientes de la serie 1.5KE. Ellos tienen un grado máximo de 1,500 vatios para la disipación de picos de energía y están disponibles para un intervalo de voltajes que va desde 6.8 a 400 voltios. Se pueden usar modelos bipolares con señales de audio o con sensores como inclinómetros que tienen un alcance de salida de voltaje de  $\pm 5$ .

Los tubos de descarga de plasma instalados entre el cable para la antena y la antena protegen el radio de transientes de voltaje inducidos en la antena. Aunque no tenemos ninguna evidencia directa de la efectividad de la olla de gas, sugerimos fuertemente su instalación en áreas de frecuentes tormentas eléctricas.



A



B

**Figura 3.5.** Instalación del inclinómetro telemétrico en el Volcán Galeras, Colombia. A, Basurero plástico, parcialmente enterrado almacena baterías, componentes electrónicos, radio y antena. B, Estación, vista de la carretera (flecha). La vegetación que se colocó después alrededor del contenedor hizo que la estación fuera casi invisible desde la carretera.

## SUMINISTRO DE ENERGIA A ESTACIONES REMOTAS

Nosotros tenemos tres métodos para suministrar energía a nuestras estaciones remotas: (1) paneles solares con baterías recargables, (2) baterías primarias, y (3) generadores termoelectricos alimentados con propano.

### Paneles Solares y Baterías Recargables

De los tres métodos, paneles solares y baterías recargables son la solución más económica a largo plazo. Para este método, un panel solar carga una o más baterías de 12-voltios, que en cambio suministran energía a los instrumentos. Las baterías sirven como depósitos de energía, almacenando el exceso de energía producido por el panel solar durante el día para suministrar energía durante la noche y períodos de poco sol.

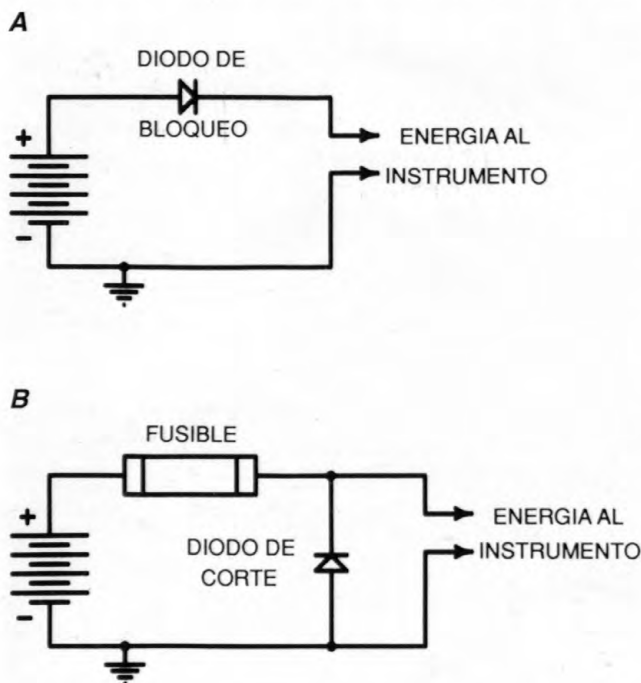
Un diodo de bloqueo y un regulador de voltaje conectan el panel y las baterías. Un diodo de bloque permite que la corriente de potencia entre a la batería, pero evita que la corriente fluya de vuelta hacia el panel solar, provocando un posible daño al panel. Si posible, un diodo de barrera Schottky debe ser usado en vez de

un diodo de silicón con una unión normal p-n, porque la caída de voltaje más pequeño del diodo de barrera Schottky disminuye la potencia disipada por el diodo. El regulador de voltaje evita la sobrecarga de las baterías. Para paneles de 40 vatios o menos, un diodo zener de 50 vatios, 14 voltios (por ejemplo, #1N3313B) conectada a través de la salida del panel solar evita la sobrecarga. El zener debe ser colocado lo más cerca posible a la batería para minimizar cualquier caída de voltaje debido a una pérdida de línea entre el zener y la batería.

En áreas como las Cascadas, donde la capacidad de una batería de una estación típica es grande en comparación con el panel, el regulador quizás no sea necesario. En este caso el panel no tiene suficiente potencia para sobrecargar la batería. Nosotros hemos desarrollado una fórmula en el CVO para determinar la necesidad de un regulador. Si la salida máxima del panel solar (en vatios) es 15 veces menos que la capacidad de reserva de la batería (en amp-horas), no se necesita un regulador. Por ejemplo, un sistema que está usando un panel de 15 vatios y tiene una capacidad de reserva de 300 amp-horas, no necesita un regulador, dado que multiplicando el vatiaje (15) por 15 da un resultado de 225, muy por debajo de la capacidad de 300 amp-horas. Cuando se está operando sin regulador, el nivel electrolítico debe ser revisado periódicamente, preferiblemente al final del verano (Solar Power Corp.).

Hay que ser cuidadosos con los sistemas que no están regulados. El voltaje de circuito abierto del panel solar puede ser de hasta 23 voltios. Cuando conectado a una batería este va a caer a los 11-14 voltios normales y no será un problema. Si se saca la batería del circuito (por ejemplo, para ser cambiada), dejando que el panel cargue el instrumento directamente, el instrumento quizás no tenga suficiente potencia para bajar el voltaje más que 1-2 voltios. Si esto pasa, el voltaje máximo permitido para el instrumento puede ser excedido y los circuitos dañados. Para minimizar esta posibilidad, por lo menos dos baterías conectadas en paralelo deben ser usadas para alimentar la estación. El panel solar debe estar conectada a una batería y el instrumento a la otra. Mientras se cambian o se añaden baterías una a la vez, esta configuración evitará una carga directa del panel solar al instrumento, sin por lo menos una batería para amortiguar el voltaje.

Un balance debe ser alcanzado en la determinación de la salida necesaria del panel solar y la capacidad de reserva necesaria de las baterías. Un panel muy grande puede generar suficiente corriente de carga hasta en el día más nublado para permitir el uso de una batería de baja capacidad, una con justamente suficiente capacidad para alimentar el equipo durante la noche. En el otro extremo, un sistema con un panel justo lo suficientemente grande para suministrar suficiente carga, si se calcula sobre una base anual, puede operar bien con



**Figura 3.6.** Protección de circuitos de daños debido a salidas de batería invertidas. A, Diodo de bloqueo. Usando un diodo con juntura p-n de silicón se disminuye la entrada de voltaje por 0.6 voltios; un diodo Schottky disminuye el voltaje por 0.3 voltios. B, Diodo de corte. Un fusible puede ser incluido para prevenir que el diodo exceda su capacidad de corriente.



una batería con una capacidad de reserva nominal en el verano, pero puede requerir una batería con una enorme capacidad de reserva para alimentar el instrumento durante el invierno cuando hay poca claridad del sol.

Encontrando la combinación óptima entre la capacidad de la batería y el tamaño de panel es principalmente un asunto de experiencia. En muchas áreas, las cimas de las montañas están típicamente en las nubes y en los valles hay sol. En tales áreas, estaciones localizadas en las partes altas de montañas van a requerir paneles más grandes y (o) más baterías que aquellas en los valles. La topografía local y la vegetación también pueden limitar la cantidad de sol que recibe el panel. Nuestra experiencia en las Cascadas ha sido que para cada 130 miliamperios (mA) de toma de corriente promedio se debe usar una batería con una capacidad mínima de 300 amp-horas junto con un panel solar de por lo menos 15 vatios. Hasta en los climas más soleados, nosotros pensamos que la configuración mínima para una toma de corriente promedio de 125 mA consiste de un panel solar de 10 vatios y una batería con una capacidad de reserva de 125 amp-horas.

Otro factor fácilmente pasado por alto al escoger la capacidad de reserva necesaria de la batería es el efecto de ceniza volcánica en el panel. La ceniza es un problema especialmente grande en los trópicos, donde los paneles solares están montados casi horizontalmente para maximizar la exposición al sol. Los depósitos de ceniza pueden bloquear completamente el sol y causar que el panel no sea de utilidad hasta que sea limpiado, ya sea manualmente o con lluvia. Una capacidad adicional de reserva de la batería debe ser incluida para que la estación pueda funcionar aún en períodos de caída de ceniza.

Los problemas con la caída de ceniza se complican aún más si el panel solar tiene una superficie protectora de silicón y no de vidrio. La ceniza puede penetrar la superficie, bloqueando permanentemente el sol de las células solares. Por esta razón, paneles solares con superficies suaves deben ser evitados.

Nosotros hemos tenido buena suerte con las baterías de 100-amp-horas diseñadas específicamente para uso con paneles solares (baterías fotovoltaicas) y con las baterías marinas/de vehículos recreacionales (RV-recreational vehicle) de descarga profunda ("deep discharge"). Son un buen compromiso entre costo, tasa de auto-descarga, volumen y peso. Baterías que según la promoción duran 10-20 años en operaciones fijas existen, pero debido a su alto costo (dos a tres veces más caras que baterías marinas/RV) y la inseguridad en su longevidad en las estaciones, nosotros solo las hemos usado en nuestras estaciones repetidoras de voz. No hemos tenido buena suerte con baterías electrolíticas con gelatina. Aparentemente no son tan tolerante a baja- y sobre-cargas como las baterías con elementos líquidos.

Las baterías deben ser colocadas en un sitio ventilado, si no el gas de hidrógeno producido mientras se están cargando las baterías puede acumularse y explotar. Una explosión de este tipo destruyó una caseta de concreto en California que contenía equipo sísmico (F. Fischer, comun. oral, 1990). Otras explosiones han ocurrido donde las baterías se ventilaban a través de un tubo que iba desde los respiraderos de la batería hacia afuera. La concentración del hidrógeno en la tubería fue lo suficientemente grande para incendiar y destruir las baterías cuando cayeron rayos cerca de la salida del tubo (Craven, comun. oral, 1980).

## Baterías Primarias

El uso de baterías primarias resulta ser el método más confiable para suministrar energía. La única desventaja es el alto costo a largo plazo. El costo de las células primarias requeridas para suministrar suficiente energía a una estación sísmica para un año es de \$250-300. En contraste, una estación con panel solar requiere de una inversión original de \$500 pero debe servir por lo menos 5 años sin ninguna inversión adicional. El ahorro sobre 5 años es de por lo menos \$750, sin incluir los gastos de obtención y deshecho de la batería (desperdicio peligroso).

Nosotros usamos baterías primarias en estaciones donde hay muy poco sol, en aquellos donde hay muchos vándalos, o en sitios que están sujetos a caídas balísticas del volcán que podrían dañar el panel. Si es posible, nosotros ponemos suficientes baterías como para 13 meses de operación. Así solamente hay que cambiar las baterías una vez al año y hay un mes adicional por seguridad. Todas las baterías de la estación deben ser cambiadas al mismo tiempo. Las baterías frescas serán descargadas por cualquier batería parcialmente descargada que se deje en el circuito.

Para estaciones donde la toma promedio de corriente es mayor a 20 mA, nosotros usamos baterías de 2.5 voltios y 1,000 amp-hora, como aquellas fabricadas por SAB/Nife Inc. Cinco baterías de ese tipo conectadas en serie pueden proveer los 12.5 voltios necesarios para alimentar las estaciones. Aunque 1,000 amp-horas va a suministrar una estación que está jalando 105 mA por 13 meses (396 días), nosotros conservadoramente redondeamos este número a 100 mA que es suficiente para una estación sísmica. Para las estaciones que jalen más de 100 mA, conectamos en paralelo conjuntos adicionales de 5 baterías para que puedan suministrar suficiente energía a los equipos por un año.

Una limitación de estas células primarias es que no pueden proporcionar un corriente mayor a 1 amperio. En las estaciones que requieren periódicamente de tal salida alta de corriente (1 amperio), pero un jalón promedio de

baja corriente, añadimos una célula más en la serie para 15 voltios en total. Las células primarias cargan una segunda batería alambrada en paralelo a través de un diodo de bloqueo. A diferencia de los paneles solares, que usan diodos de bloqueo con barreras Schottky para minimizar el bajón de voltaje, aquí un diodo de unión p-n de silicón es deseado para bajar el voltaje a los 14.4 voltios aceptables, eliminando la necesidad de un regulador de voltaje. Con esta configuración, las baterías primarias suministran suficiente potencia para mantener la segunda batería cargada y para satisfacer las necesidades energéticas a largo plazo. La segunda batería satisface las necesidades de períodos cortos de alta potencia.

Para estaciones donde el jalón promedio de corriente es menor a 10 mA, se usan células alcalinas primarias. Ellas están disponibles con grados más pequeños de amp-hora que las baterías SAB-Nife mencionadas arriba, con las reducciones correspondientes en tamaño y peso. Tampoco necesitan ser ventiladas y pueden ser encerradas en estuches herméticos. Esto permite que los instrumentos y las baterías estén encerrados en un estuche hermético y elimina la necesidad de un encerramiento protector. (fig. 3.7).

La desventaja principal de las baterías alcalinas es que su voltaje de salida se reduce gradualmente durante la vida de la célula (Union Carbide Corp., 1976, p. 288). Una batería alcalina normal de 6 voltios, 40 amp-hora es calificada usando un corte de voltaje de 3.2 voltios (Duracell Inc., 1986). Para aprovechar lo más que se puede la energía almacenada en la batería, el equipo que está alimentando debe poder funcionar con un suministro de 3.2 voltios. En contraste, el voltaje de salida de las baterías SAB-Nife virtualmente permanecen al mismo nivel hasta que la batería está casi descargada. Cuando se usan baterías alcalinas, siempre se debe escoger una batería que tenga el voltaje más alto que el equipo puede aceptar con seguridad, para que la mayor cantidad posible de energía de la célula pueda ser utilizada (Union Carbide Corp., 1976, p. 288). Los radios de nuestros transmisores para frecuencias bajas de datos (Murray, Capit. 2) operan nominalmente a 12 voltios, pero hemos encontrado que pueden operar con seguridad con suministros de hasta 17 voltios (si por ninguna otra razón que están en modo de transmisión por solo unos pocos segundos cada 10 minutos; esto no se recomienda para radios que están funcionando continuamente). Para alimentar estos radios, se conectan conjuntos de 2 baterías de 7.5 voltios, 40 amp-hora en serie para dar un suministro nominal de 15 voltios. Esta configuración proporciona 28 amp-horas útiles hasta un corte de 10.0 voltios. Una configuración comparable usando baterías de 12 voltios, 40 amp-horas darían solo 15 amp-horas hasta llegar al corte de 10.0 voltios.

Se debe evitar usar células primarias de carbón-zinc, pues tienen una pendiente de descarga más pronunciada que las baterías alcalinas (Duracell Inc.,



**Figura 3.7.** Estación de inclinómetro telemétrico Oops, flanco este del domo de lava del Mount St. Helens. El inclinómetro está localizado en una repisa en la pared de roca detrás de la placa de acero en la parte superior de la foto. El equipo de telemetría y las baterías están almacenados en un barrilete de acero de 9 galones en la parte inferior derecha. La antena tipo látigo está adentro de un tubo de plástico sujetado a la tapa del barrilete. Alivio para los esfuerzos del cable que conecta el inclinómetro a la telemetría está proporcionado mediante la sujetación del cables con clavos P-K martilleados en la roca.

1986), menor densidad energética, vida de anaquel más corto y un pobre desempeño a bajas temperaturas.

## Generadores Termoeléctricos

Ya no usamos generadores termoeléctricos alimentados por propano. Su ventaja estaba en su habilidad de poder proporcionar corrientes de salidas continuas relativamente altas (3 amperios). Aunque la cantidad de propano que se requeriría no era alta, (380 litros por mes), el alto costo del transporte a las estaciones remotas por helicóptero nos obligó a buscar otras alternativas. En vez de generadores termoeléctricos, ahora combinamos grandes bancos de paneles solares con capacidad de reserva de baterías. También, programamos el encendido y apagado del equipo para bajar el consumo promedio de energía. Sin embargo, en sitios donde el propano puede ser entregado por camión, generadores termoeléctricos deben ser considerados.

## REPARACIONES EN EL CAMPO BAJO MALAS CONDICIONES

Hasta en buen tiempo, la reparación de instrumentos en el campo nunca es tan fácil como en los laboratorios. Bajo condiciones de viento, lluvia y gases nocivos, seguramente solo se podrán hacer las reparaciones más rudimentarias. Para ayudar a hacer las reparaciones de campo, nosotros llevamos algunas cosas que no son necesarias en el laboratorio:

1. Una plancha para suelda de 12 voltios y una batería. La suelda también puede ser alimentada con las baterías de 12 voltios de las estaciones con paneles solares. Hemos encontrado que las planchas alimentadas con butano no son confiables cuando hace frío, ni a grandes alturas.

2. Una carpa liviana. Esta puede ayudar a mantener el personal y a los instrumentos secos durante fuertes lluvias o agua/nieve.

3. Deseccante adicional. Esto debe ser transportado en un contenedor hermético, como fundas sellables para el congelador, para que el desecante se mantenga seco hasta que se necesite. El desecante debe ser reemplazado anualmente o después que se haya abierto el estuche de instrumentos o éste haya sido expuesto a humedades altas.

4. Lubricante penetrante "WD-40" en una lata de aerosol. Use esto bajo condiciones mojadas para sacar el agua de los conectores antes de reconectarlos. También, puede facilitar las conexiones con roscas que han sido corroídas. No use WD-40 bajo condiciones secas, ni cuando hay mucho polvo; el polvo se acumulará en los

conectores engrasados y los sellos, impidiendo un buen sello.

5. Un sellador como silicón RTV o Scotchkote para evitar que se corroen las conexiones expuestas y para sellar aberturas. Con suficiente sellador y cinta eléctrica, se puede hacer casi cualquier cosa a prueba de humedad. Se puede usar Scotchkote en superficies mojadas pues desplaza agua.

6. Expectaciones bajas. Si posible, evite trabajar en los equipos bajo malas condiciones atmosféricas. Debido a la impaciencia y humedad adicional, la estación puede ser dejada en peores condiciones que en las cuales se encontraba antes de la visita.

## SUGERENCIAS PARA IDENTIFICAR PROBLEMAS EN EL CAMPO

El equipo usado para la vigilancia volcánica es tan diverso, con muchos sensores únicos en su clase, que la necesidad de identificar problemas en equipos desconocidos y sin documentación no es poco común. Los siguientes pasos básicos pueden ayudar a identificar los problemas en equipos conocidos y desconocidos.

Antes de salir al campo:

1. Trate de identificar la causa del problema estudiando sus síntomas. ¿Dejó de transmitir completamente o está transmitiendo intermitentemente? ¿Está transmitiendo correctamente, pero los datos están incorrectos? ¿Empezó el problema durante lluvia o durante una tormenta eléctrica? ¿Acaba de empezar la temporada de caza? ¿Podría estar ligado a un problema en otro sitio? Una estación que dejó de funcionar durante una tormenta eléctrica seguramente sufrió daños por relámpagos y, por lo menos, se va a tener que reemplazar el radio. Una estación que aparentemente está operando, pero los datos se están volviendo cada vez menos plausibles, seguramente tiene un problema relacionado con humedad. Una estación alimentada con panel solar que opera solamente durante el día seguramente necesita una batería nueva.

2. Revisar el receptor para asegurar que el problema está en el campo y no en el observatorio.

3. Asegurar que el equipo que se lleva al campo para reemplazar equipo dañado está operando correctamente.

En la estación:

1. Primero, hacer una inspección visual. Buscar conexiones corroídas o rotas, señales de daño, etc.

2. Segundo, confirmar que la potencia correcta está entrando al equipo. Esto incluye revisar que la potencia está llegando al equipo y que cualquier regulador de voltaje o convertidor DC/DC está operando correctamente.



3. Intente aislar el problema siguiendo las señales por el circuito para ver donde se desvían. Siempre sea sospechoso de los conectores.

4. Asegure que todos los circuitos están bien asegurados en sus respectivos enchufes. Los chips a veces se salen de sus enchufes. Busque los chips que tienen un lado más alto que el otro.

5. Una tarjeta de circuito mojada debe ser reemplazada. Aunque quizás solo sea necesario secarla en el sol para que regrese a su estado funcional, esto solo debe ser intentado en una emergencia. Puede ser que el circuito parezca que está operando normalmente después de secar, pero problemas intermitentes o datos ruidosos pueden aparecer después. Los potenciómetros de ajuste y condensadores electrolíticos son componentes que quizás tengan que ser reemplazados después de ser expuestos a agua. Recuerde, encuentre la fuente del escape, y selle el hueco.

6. Si hay suficiente tiempo, trate de determinar precisamente el problema antes de reemplazar la tarjeta o el instrumento. Quizás no sea posible reproducir el problema en el laboratorio electrónico.

7. Simplemente porque empiece a funcionar el equipo correctamente, no asuma que todo haya sido reparado. Un contacto marginal o un componente quizás hayan sido colocados solo temporariamente en su estado funcional. Trate de aislar el problema para poder asegurar que el equipo seguirá funcionando.

## COMENTARIOS CONCLUYENTES

Los procedimientos y técnicas delineados aquí no siempre van a ser aplicables. En algunas situaciones, nos desviamos de ellas. Pero, sí sirven como un marco de referencia en la preparación y mantenimiento de estaciones, especialmente en ambientes donde hay nieve y hielo como en el Mount St. Helens.

Un punto que no se ha hecho explícitamente, pero que es la llave para la operación de redes telemétricos de baja potencia es: atención a los detalles. No importa cuanto esfuerzo se haya puesto en la instalación de equipo, un hueco sin sellar en un estuche puede ser causa suficiente para su fracaso. En estaciones accesibles solamente por helicóptero, una unión de suelda fría puede costar cientos, sino miles de dólares para reparar. Prestando atención a los detalles durante la preparación y empaquetado de instrumentos es el factor más importante para lograr una operación confiable a largo plazo.

## PRODUCTOS/FABRICANTES MENCIONADOS EN ESTE TEXTO

Sellador/adhesivo RTV

Dow Corning  
Box 0994  
Midland, Michigan 48686-0994

Scotchkote

3M/Electronic-Products Division  
P.O. Box 2963  
Austin, Texas 78769-2963

Estuches para instrumentos

Pelican Products Inc.  
2255 Jefferson Street  
Torrance, California 90501

Zero Corp.  
777 Front St.  
Burbank, California 90503

Conectores

Amphenol Corp.  
358 Hall Ave.  
Wallingford, Connecticut 06492

Antenas

Scala Electronic Corp.  
P.O. Box 4580  
Medford, Oregon 97501

Larsen Electronics, Inc.  
P.O. Box 1799  
Vancouver, Washington 98668

Diodos para suprimir transientes

General Semiconductor Industries Inc.  
2001 W. 10 Place  
Tempe, Arizona 85281

Tubos para descarga de plasma

Polyphaser Corp.  
P.O. Box 1237  
Gardnerville, Nevada 89410-1237

Diodos Zener

Motorola Semiconductor Products, Inc.  
P.O. Box 20912  
Phoenix, Arizona 85036

Baterías

SAB/Nife  
P.O. Box 7366  
Greenville, North Carolina 27834

Duracell Inc.  
Berkshire Industrial Park  
Bethel, Connecticut 06801

WD-40

WD-40 Co.  
San Diego, California 92110

## REFERENCIAS CITADAS

Duracell Inc., 1986, Duracell primary battery systems: Bethel, Conn., publicación PBSB-7/86, 8 p.  
Duracell Inc., 1986, Duracell specification summary: selected products: Bethel, Conn., publicación PSS-8/86, 4 p.

Solar Power Corporation, sin fecha, Solar electric generator systems—principles of operation and design concepts: Woburn, Mass., 11 p.  
Union Carbide Corp., 1976, Eveready battery engineering data: Danbury, Conn., 830 p.





## 4. Un Sistema Para la Adquisición, Archivo y Análisis de Datos de Tiempo-Serie de Baja Frecuencia en Tiempo Casi Real

Por Thomas L. Murray

### ABSTRACTO

La interpretación oportuna de datos es esencial para la vigilancia volcánica. Yo desarrollé un sistema en el Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO) para la adquisición y el despliegue en forma gráfica, en tiempo casi real, de datos de baja frecuencia (frecuencia de muestreo igual o menor a un minuto). Los datos de redes telemétricos de baja frecuencia de datos y del sistema de amplitud sísmica en tiempo real son transferidos a una computadora central cada 10 minutos y un minuto, respectivamente. Los datos recolectados manualmente son entrados manualmente a la computadora central, mientras que los datos de redes telemétricas remotas son recolectados semanalmente mediante un sistema telefónico. En la computadora central, el programa BOB que desarrollé en el CVO, facilita la interpretación de los datos al presentarlos de manera gráfica. Aunque en el CVO la computadora central es una VAX 11/750, también se puede correr el sistema en una IBM PC XT/AT o compatible como computadora central, haciéndolo más portátil.

### INTRODUCCION

Para poder dar avisos oportunos sobre inminentes erupciones volcánicas, el personal científico del Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO-Cascades Volcano Observatory) debe recolectar grandes cantidades de datos y analizarlos dentro de minutos de su recolección. No se requiere de un análisis comprensivo en tiempo real de los datos, pero precursores de actividad eruptiva pueden ser pasados por alto si los datos son recolectados y archivados sin ser inspeccionados. En el CVO, desarrollé un sistema (fig. 4.1) para la adquisición y el procesamiento de datos de baja frecuencia (datos muestreados a intervalos mayores o igual a un minuto) para poder detectar actividad anómala y para archivar los datos para análisis futuro.

La inclinación del terreno, las temperaturas de las fumarolas, las concentraciones de gases y el número de terremotos por hora son típicas medidas de baja frecuencia. Un inclinómetro telemétrico que envía tres medidas (componentes radiales y tangenciales de inclinación y temperatura) cada diez minutos, produce diariamente 432 medidas o sea, más de 150,000 medidas anualmente. Un sistema que mide la amplitud sísmica de ocho estaciones a intervalos de un minuto produce más de 10,000 datos diariamente. Se usan computadoras portátiles económicas para la adquisición de estos datos en tiempo real de redes telemétricos de frecuencia baja de datos (Murray, 1988) y del sistema de medida de amplitud sísmica en tiempo real (RSAM-Real-time seismic-amplitude measurement system) (Murray y Endo, capítulo 1). Cada computadora almacena los datos en su memoria interna y, en intervalos de 1- o 10-minutos transfiere los datos más recientes a la computadora central de análisis. Los datos recolectados manualmente, medidas de nivelación de montaje unico, emisiones de dióxido de sulfuro medidas con el Espectrómetro de Correlación (COSPEC-Correlation Spectrometer), medidas con el distanciómetro electrónico (EDM-electronic distance meter) y el número de terremotos por hora son entrados a la computadora manualmente. Una vez en la computadora central, los datos están disponibles inmediatamente para ver y correlacionar con otras medidas mediante el programa BOB (Murray y Endo, 1986).

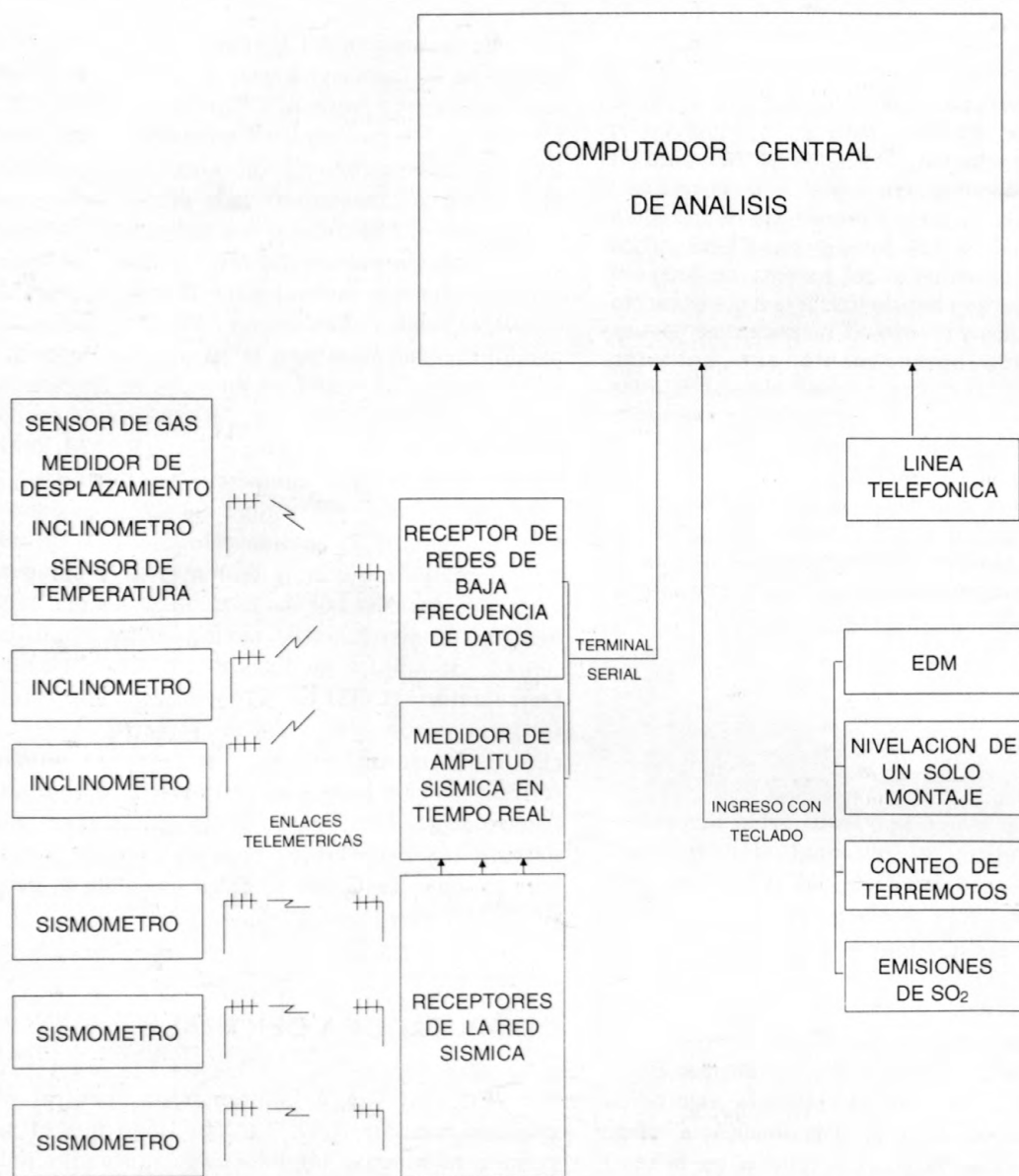
### COMPUTADORA CENTRAL

En el CVO, la computadora central es una minicomputadora VAX 11/750. Dado que el sistema permite multitareas (multitasking) y usuarios múltiples (multiusers) simultáneamente, varios usuarios pueden acceder los datos al mismo tiempo. Varios terminales

para llamadas permite a los científicos que no están en el observatorio mantenerse al tanto de los datos más recientes. Los recursos de la VAX (como terminales para llamadas y cientos de megabytes de espacio en el disco) permiten la recolección y almacenamiento de datos no solo del Mount St. Helens pero también de redes telemétricos locales en el Parque Nacional de Yellowstone, Wyoming y del Volcán Kilauea, Hawaii, y de varias otras localidades vía la red de satélites GOES. Todos los datos entran a la base de datos, accesible por un solo programa, BOB.

La VAX funciona maravillosamente en un observatorio fijo, pero es difícil transportar. Para vigilar un volcán que está lejos del observatorio, datos podrían ser transmitidos a la VAX del CVO desde el volcán

(como se hace con la red telemétrica de Yellowstone), y los científicos en el volcán podrían usar los terminales para llamar a ver los datos. Pero, líneas telefónicas exclusivas son caras, y una erupción podría interrumpir el sistema telefónico. Es preferible tener una computadora en la localidad para lograr el flujo más eficiente posible de datos a los científicos que están vigilando el volcán. Con este propósito en mente, modifiqué los programas del sistema de CVO para poder correrlos en una IBM PC XT/AT o compatible. Manuales para la instalación y uso de la versión para la PC están disponibles (Murray 1990a, 1990b). Las diferencias entre una VAX y una IBM PC como la computadora central de análisis son pequeñas y normalmente irreconocibles para el usuario. La desventaja principal de la PC es que no



**Figura 4.1.** Sistema del CVO para la adquisición de datos de baja frecuencia.

está diseñada para permitir multitareas y usuarios múltiples. Sin embargo, programas disponibles comercialmente (Desqview), proporcionan a la computadora una capacidad de multitarea para permitir la adquisición automática de datos en el fondo mientras en el primer plano la computadora está desempeñando otras tareas, como graficar los datos. Además, la computadora no solamente tiene que estar dedicada a la recolección y despliegue de los datos de baja frecuencia; también puede ser usada como una PC normal. Pero la computadora todavía está limitada a un teclado y un monitor, y solo una persona la puede usar a la vez. Experiencia demuestra que esto no es un problema durante situaciones críticas, porque en estos momentos la mayoría de los análisis se hacen mirando las tendencias y correlacionando los datos de varios precursores. Los 10 minutos típicamente disponibles entre las nuevas adquisiciones de datos es normalmente suficiente para delinear e inspeccionar los datos.

La falta de un terminal para recibir llamadas ya no es un problema principal para las PC's dada la proliferación de las máquinas facsímiles (fax) que facilitan una distribución rápida de gráficos a los científicos fuera del laboratorio. Desarrollos actuales para redes de PC's ha de resultar próximamente en un sistema de multiusuarios y un sistema de terminales para recibir llamadas.

Con sus costos cada vez más bajos, las IBM PC's y compatibles son las computadoras centrales preferidas para el análisis de datos. El sistema mínimo recomendado para una PC que va a servir como computadora central de análisis es el siguiente:

#### **Equipo:**

- IBM AT o compatible
- EGA, VGA o monitor Hércules
- Coprocesador matemático
- EMS 4.0 de 2 megabyte con gestión de memoria
- Disco duro de 30 megabyte
- Dispositivo para diskettes de 5 1/4 pulgadas, mínimo 360 kilobyte
- Dispositivo para diskettes de 3 1/2 pulgadas, mínimo 720 kilobyte

#### **Programas requeridas:**

- Dos 3.2 o 3.3 por Microsoft, Redmond, Washington
- Interpretive BASIC (GWBasic) por Microsoft, Redmond, Washington
- Geograf Graphics Utilities por Geocomp, Concord, Massachusetts
- Desqview por Quarterdeck Office Systems, Santa Mónica, California

QDOS II por Gazelle Systems, Provo, Utah o programa de utilidades similar con un procesador de palabras ASCII

Se recomienda la sustitución del equipo indicado arriba por uno más poderoso como una 80386 y/o uno con un disco duro más grande. Aunque se puede usar una IBM XT o compatible en vez de una AT, la baja velocidad del reloj de los XT's y del procesador 8086 puede retardar la respuesta de la computadora a niveles no aceptables cuando se está corriendo Desqview.

## **ADQUISICION DE DATOS**

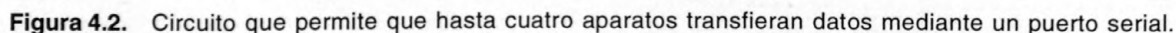
La computadora central adquiere datos por uno de tres métodos: (1) automáticamente con una conexión directa automática entre la computadora de adquisición de datos y la computadora central, como en las redes telemétricas de tasa baja de datos en el Mount St. Helens, (2) manualmente, entrando los datos usando el teclado, como para los datos no registrados electrónicamente, como EDM o medidas de agrimensura magnetométrica, y (3) semiautomáticamente a través de transferencias periódicas de datos sobre líneas telefónicas, como con redes telemétricas remotas de frecuencias bajas de datos en Yellowstone y Hawaii.

Los datos recolectados automáticamente pueden ser vistos en tiempo casi real dado que los archivos de datos en la computadora central son automáticamente actualizados dentro de 10 minutos de la recepción de los mismos. Los costos de líneas telefónicas y trabajo limitan que los datos recolectados semiautomáticamente y manualmente estén disponibles en tiempo casi real. Por ejemplo, una línea telefónica exclusiva podría ser establecida entre la red telemétrica en Yellowstone y el VAX del CVO y los datos podrían ser transferidos automáticamente en intervalos de 10 minutos, como se hace en las redes del Mount St. Helens. Las líneas telefónicas y modem serían transparentes para el VAX, que no vería ninguna diferencia entre la red de Yellowstone y las redes del Mount St. Helens.

## **Adquisición Automática de Datos**

Los datos de las redes telemétricas de baja frecuencia de datos y del medidor de amplitud sísmica en tiempo real son automáticamente adquiridos por varias computadoras portátiles como la Radio Shack Modelo 100 o Toshiba 1000 que están conectadas a un terminal serial de la computadora central. Las computadoras portátiles reciben y transfieren periódicamente los datos a través de una línea serial a una computadora central. El





La operación del receptor de baja frecuencia de datos no será afectada por un malfuncionamiento del RSAM y vice versa. Si la computadora central falla, se podrá delinear y correlacionar los datos rápidamente, pero las portátiles todavía adquirirán y desplegarán los datos que podrán ser revisados y graficados manualmente, si necesario.

Un problema grande con este sistema es la posibilidad que las dos portátiles intenten transferir datos a la computadora central al mismo tiempo. Mensajes simultáneos interferirán entre si, el resultado siendo que

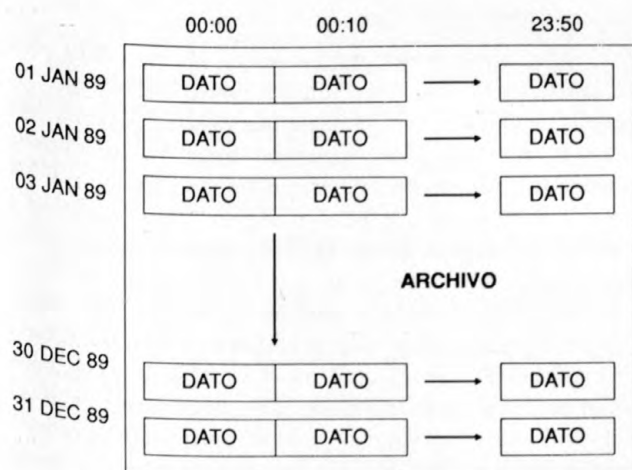
ninguno de los datos serán correctamente recibidos. Para evitar esto, se le asigna a cada portátil una ventana de tiempo (mínimo 10 segundos) durante la cual transmitir datos. La sincronización semanal de los relojes de las portátiles las mantiene dentro de sus ventanas respectivas.

## Entrada Manual de los Datos

El otro método para que la computadora central adquiriera datos es entrándolos directamente con el teclado. Esta es la mejor forma de entrar datos que son recolectados infrecuentemente. Por ejemplo, los datos recolectados con el EDM o mediante nivelación de montaje unico son entrados manualmente a la computadora y después se corre un programa para actualizar los archivos. Otros archivos de datos son actualizados simplemente usando un procesador de palabras.

## Adquisición Semiautomática de los Datos

El tercer método para adquirir datos es mediante una combinación de los dos métodos previos. Las computadoras portátiles en el Parque Nacional Yellowstone y en Hawaii reciben los datos de redes telemétricos con frecuencias bajas de datos. Estas portátiles, que están equipadas con módulos de memoria de 256-kilobyte para mayor capacidad de almacenaje de datos, y modems de 1200 baudios para comunicaciones vía telefónica, corren una versión modificada de los programas que se corren en los portátiles del CVO.



**Figura 4.3.** Formato de archivo de datos binarios para acceso directo. Ejemplo para una frecuencia de muestreo de 10 minutos.

Semanalmente, se llaman estas redes y sus datos son transferidos al VAX del CVO. Después se corre un programa para actualizar los archivos con los datos. Se usa un procedimiento similar para pasar los datos transmitidos vía el satélite GOES a la estación de tierra en Isla Wallops, Virginia.

## ALMACENAJE DE DATOS

El sistema divide los datos en dos grupos. Un grupo consiste de los datos recolectados en intervalos irregulares, como medidas de EDM. Estos grupos de datos puede tener tan poco como 30 lecturas al año. En contraste, lecturas de un solo eje de un inclinómetro electrónico telemétrico tomadas cada 10 minutos a través de un año resultan en grupos con más de 52,000 datos por año. Yo decidí no intentar de usar el mismo formato de archivo para los dos tipos de conjuntos de datos, sino proporcionar dos formatos, uno para grandes cantidades de datos recolectados en intervalos regulares y otro para pequeños conjuntos de datos recolectados a intervalos irregulares.

Datos recolectados frecuente y regularmente son almacenados en formato binario en archivos de acceso directo (fig. 4.3). A cada archivo se le asigna suficiente memoria para un año de datos de la medida específica. Para datos recolectados a intervalos de 10 minutos, resulta ser un poco menos que 215 kilobytes. Estos archivos están subdivididos en 366 registros (367 registros para años bisiestos), un registro para cada día del año y un registro inicial indicando el número de datos por día (que es equivalente al número de datos por registro). Cada registro contiene los datos para su día del año. El intervalo de tiempo entre los datos es calculado dividiendo 1,440 (número de minutos en un día) por el número de datos por día. Intervalos que no son divisores íntegros de 1,440, como 17 minutos, no son permitidos.

FECHA	HORA	DATO 1	DATO 2
01 JAN 89	08:10	+ 1.233	- 456.7
07 JAN 89	13:30	+ 1.238	- 998.0
12 FEB 89	10:42	+ 1.238	- 998.0
12 FEB 89	14:13	+ 1.235	- 455.9
21 FEB 89	12:05	+ 1.235	- 460.0

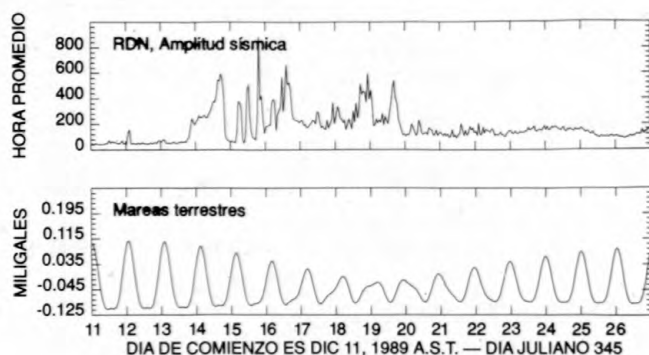
**Figura 4.4.** Muestra de un archivo de datos ASCII. Note que -998.0 se usa para indicar que no se hizo la medida.

Archivos de acceso serial en formato ASCII son usados para datos muestreados a intervalos irregulares (fig. 4.4). Los datos en estos archivos están en columnas, con la fecha y la hora de las medidas en un formato normalizado al comienzo de cada línea. Los datos nuevos son ingresados a estos archivos mediante programas o con un procesador de palabras. El archivo entero tiene que ser leído para acceder los datos más recientes. Para archivos largos, esto puede tomar demasiado tiempo. Si necesario, los archivos grandes pueden ser subdivididos en archivos más pequeños por día, mes o año para acelerar el acceso.

El programa BOB que desarrollé en el CVO para graficar y analizar los datos, proporciona una manera fácil para acceder los datos de los dos tipos de archivos. BOB también tiene la habilidad de acceder datos de un aparato de archivo como también del dispositivo en línea. Si no encuentra los datos en el dispositivo en línea, BOB busca los datos en otros dispositivos, como un disco óptico. BOB trata todos los datos sacados de los diferentes aparatos como un conjunto continuo de datos. Existen también programas que convierten archivos de un tipo a otro.

## ANÁLISIS DE DATOS

El programa interactivo y manejado mediante comandos, BOB, es el corazón del análisis de datos. El permite un retiro rápido de los datos en cualquier tipo de formato y una correlación entre los conjuntos de datos. BOB fue desarrollado especialmente para poder analizar rápidamente datos en tiempo-serie en situaciones de crisis. El eje de tiempo en los gráficos de BOB está en el formato de día, mes, año en vez de solamente días julianos para poder determinar rápidamente cuando ocurrieron los eventos, especialmente para la comunidad no científica. Períodos de tiempo tan cortos como un día o tan largos como 50 años pueden ser graficados para ver



**Figura 4.5.** Ejemplo de un gráfico producido por el programa BOB para el Volcán Redoubt. Ver texto para explicación.

la relación entre tendencias actuales y registros de largo plazo. Los datos ausentes son manejados fácilmente. Hacer gráficos múltiples en los cuales cada conjunto de datos tiene un número diferente de datos no requiere de ningún comando especial. El número máximo de datos permitidos por BOB es justo sobre 400,000 en el VAX, mientras que en una PC está limitado por el espacio disponible. Si necesario, BOB también convierte entre GMT (Greenwich Mean Time-Hora Media de Greenwich) y hora local. A continuación está un listado de los comandos que se usaron para producir el gráfico de las mareas terrestres y medidas RSAM para las primeras dos semanas de las erupciones de 1989 del Volcán Redoubt, Alaska ilustrado en la figura 4.5.

EXE REDOUBT	Seleccione Volcán Redoubt
B_DATE 12 DEC 89	Seleccione fecha comienzo
E_DATE 25 DEC 89	Seleccione fecha final
STID RSAM	Escoja estación RSAM
MEAS RDNZ	Escoja medida que corresponde al sismómetro RDNZ
FILL A	Poner los datos para el intervalo de tiempo seleccionado en la columna A
AVG 6 A	Promedia cada seis medidas para producir un promedio para cada hora
TITLE A RDN SEISMIC AMPLITUDE	Asigne un título a la columna A
LABEL A HOURLY AVERAGE	Asigne un rótulo a las unidades de A
STID TIDE	Escoja estación para mareas
MEAS TIDE	Escoja medidas para mareas terrestres
FILL B	Poner los datos en la columna B
TITLE B EARTH TIDES	Asigne un título a la columna B
TZONE AST	Asignar Tiempo Estándar de Alaska para la zona de tiempo
TOPTITLE REDOUBT VOLCANO	Asigne el título para el gráfico completo
PLOT 2 A B	Grafica los datos de las columnas A y B

Una muestra del gráfico producido por BOB para el episodio de construcción de domo del Mount St. Helens de Octubre de 1986 está ilustrada en la figura 4.6.

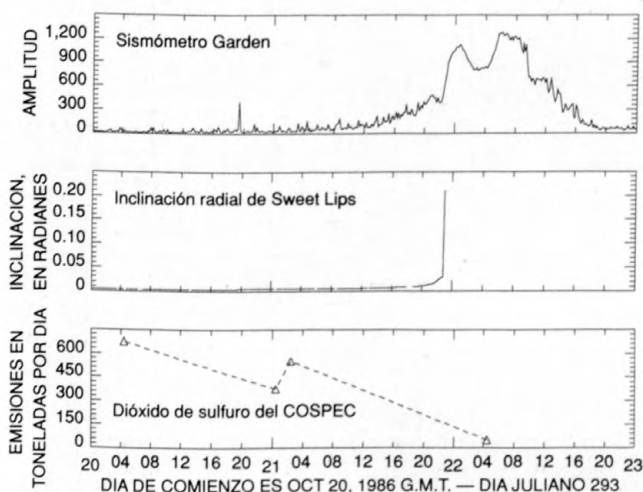
Macros sencillos, archivos "batch", y programas manejados con menús permiten un acceso fácil a los datos por personas con poco o ningún conocimiento del sistema. Cuando la PC es la computadora central, estos programas están escritos en BASIC para que las modificaciones y mejoras puedan ser hechas fácilmente por cualquiera persona con experiencia de programación en casi cualquier lenguaje. Para el VAX, estos programas están escritos en FORTRAN. Con estos programas, el personal del observatorio puede imprimir los gráficos para los datos de los pasados días o meses con un comando. En modo interactivo, BOB proporciona el medio para mirar de cerca tendencias a corto plazo y ver como ellas se relacionan con tendencias a largo plazo.



Varios tipos de datos pueden ser graficados en una escala común de tiempo para buscar correlaciones.

BOB también proporciona al usuario localizaciones convenientes de los archivos que contienen los datos pertinentes de las estaciones e instrumentos. Estos archivos pueden contener información como número de serie del instrumento, factores de calibración, y localización de las estaciones. Tal información puede ser crítica durante una crisis.

Si el usuario necesita un análisis estadístico mas profundo o mayor capacidad de gráficos, BOB puede escribir los datos en formato ASCII para su uso con los programas comerciales de análisis de datos. Las mayores capacidades estadísticas y de gráficos de estos programas pueden ser entonces aprovechadas.



**Figura 4.6.** Ejemplo de un gráfico producido por el programa BOB para la erupción del Mount St. Helens de Octubre de 1986 que resultó en la construcción del domo.

## CONCLUSION

El sistema usado en el CVO puede ser el núcleo de futuros sistemas de vigilancia volcánica. La versión VAX, en operación desde 1985, ha evolucionado desde un método para meramente graficar datos de inclinómetros hasta su estado actual. La versión para PC funcionó muy bien en las crisis del Volcán Galeras, Colombia, en 1989 y del Volcán Redoubt, Alaska, 1989-90.

Como actualmente configurado, el sistema proporciona una manera flexible para recolectar, analizar y archivar datos de baja frecuencia, ya sean enviados por telemetría directamente al sistema, almacenados en una computadora en una estación remota o recolectados manualmente. Según se hagan disponibles equipos y programas más poderosos y económicos se mejorará el sistema.

## REFERENCIAS CITADAS

- Murray, T.L., 1988, A system for telemetering low-frequency data from active volcanoes: U.S. Geological Survey Open-File Report 88-201, 28 p.
- \_\_\_\_\_, 1990a, A user's guide to the PC-based time-series data-management and plotting program BOB: U.S. Geological Survey Open-File Report 90-56, 53 p.
- \_\_\_\_\_, 1990b, An installation guide to the PC-based time-series data-management and plotting program BOB: U.S. Geological Survey Open-File Report 90-634A, 25p.
- Murray, T.L., and Endo, E.T., 1986, BOB, a computer graphics tool for real-time integrated volcanic monitoring (abs.): EOS, v. 67, no. 16, p. 397.



## 5. Sistemas para la Adquisición de Datos Sísmicos en el Observatorio Vulcanológico Cascades

Por Elliot T. Endo y Gloria Smith

### Abstracto

Entre fines de 1987 hasta principios de 1990 el Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO-Cascades Volcano Observatory) instaló y operó dos sistemas diferentes para la adquisición de datos sísmicos de una pequeña red sísmica. Los sistemas estaban configurados para detectar y registrar pequeños sismos que ocurrían debajo del Mount St. Helens de la red de 14 a 16 estaciones sísmicas. El primer sistema de adquisición de datos es un sistema PC/AT, que utiliza los programas distribuidos por la Asociación Internacional de Sismología y Física del Interior de la Tierra (IASPEI-International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior). El segundo sistema usa una estación de trabajo Sun, con un subsistema analógico a digital con una interfaz SCSI, y programas para la adquisición de datos escritos para computadoras que usan el sistema operativo UNIX. La operación de los dos sistemas en 1989 le dio la oportunidad al CVO para evaluar los dos sistemas económicos de adquisición de datos sísmicos digitales. Fue fácil instalar los dos sistemas que funcionaron según lo esperado.

### INTRODUCCION

Desde Diciembre de 1987, el Observatorio Vulcanológico Cascades ha sido un sitio de prueba Beta para probar y evaluar programas para la adquisición y análisis de datos sísmicos escritos para computadoras IBM PC/AT y compatibles por Tottingham y otros (1989), Lee y Valdés (1989) y Valdés (1989). En Noviembre de 1988, comenzamos a probar las primeras versiones de los programas distribuidos actualmente por la IASPEI (Toolbox for seismic data acquisition, processing and analysis). Una computadora AST Premium 286 (compatible con la PC/AT 80286), para la adquisición de datos sísmicos, ha estado operando continuamente los últimos dos años. El sistema actualmente registra 15 canales de datos sísmicos, 8 corresponden a las estaciones sísmicas mantenidas por CVO y 7 a las estaciones sísmicas mantenidas por el

Programa de Geofísica de la Universidad de Washington (UWGP-University of Washington's Geophysics Program) en el área del Mount St. Helens (fig. 5.1). Durante actividad normal, datos sísmicos registrados por el sistema PC/AT son procesados diariamente. En 1989 más de 600 sismos fueron escogidos para localizaciones rutinarias, alrededor de 400 de estos fueron calificados como sismos de calidad "A" o "B" (Lee y Valdés, 1985), (figs. 5.2-5.4).

A fines de Enero de 1989 empezamos a operar un sistema para la adquisición de datos sísmicos en una estación de trabajo Sun (WS-workstation), usando una de las primeras producciones de Data Samplers (subsistemas analógico a digital) desarrolladas por Cutler Digital Design (Ward y Cutler, 1987). El sistema para la adquisición de datos sísmicos utiliza los mismos programas que Peter Ward del Servicio Geológico de los Estados Unidos modificó para una estación de trabajo similar que registra datos de la red sísmica del Katmai. El sistema del CVO registra actualmente las señales de 13 estaciones sísmicas de un componente y una estación de tres componentes. Por varias razones, el procesamiento rutinario de los terremotos registrados por el sistema de la estación de trabajo del Sun no ha sido implementado, por lo tanto una comparación rigurosa entre los dos sistemas no fue posible.

### Historia de Implementación

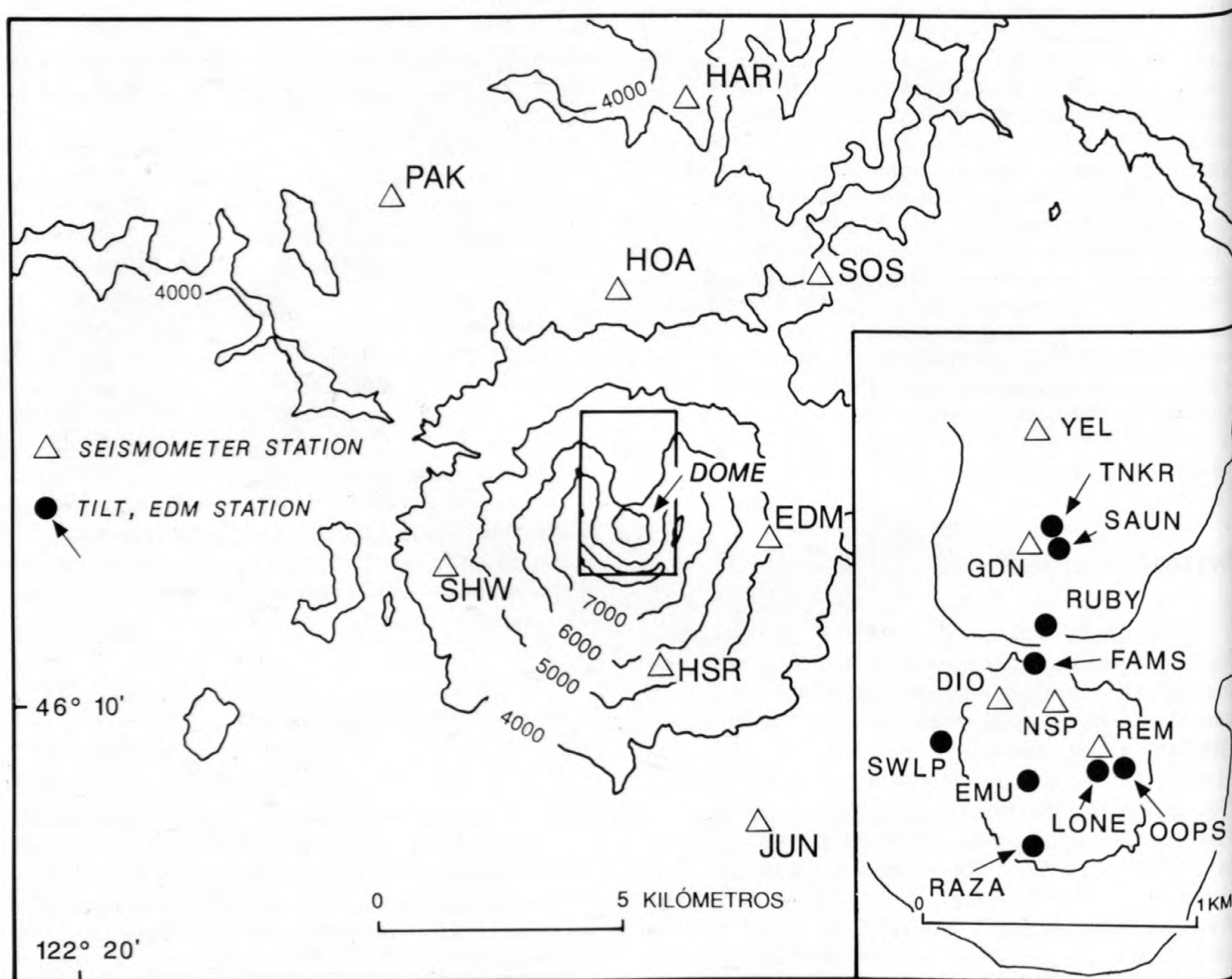
Después de dos eventos de construcción de domo en 1986, fue claro que el CVO requeriría de algo adicional a los registradores portátiles digitales de eventos sísmicos, para analizar los sismos del Mount St. Helens. Los resultados de nuestras investigaciones preliminares señalaron la necesidad de un registro digital relativamente completo de los precursores sísmicos eruptivos a una frecuencia de muestreo más alta para encontrar la evidencia de una migración de hipocentros. También requeriríamos datos de estaciones adicionales dentro del cráter para mejorar las localizaciones de los



sismos someros asociados con la migración de magma. En el otoño de 1986, cuando se tomó la decisión de instalar un sistema de adquisición de datos en tiempo real, los únicos programas apropiados disponibles eran los del sistema de Procesamiento Sísmico de Caltech-USGS (CUSP-Caltech-USGS Seismic Processing System, Tanigawa y otros, 1987) escritos por Carl Johnson. El CUSP requeriría un procesador VAX con el sistema operativo VAX VMS de Digital Equipment. Nosotros podríamos haber instalado el CUSP en el VAX 11/750 disponible en el CVO, pero el costo del convertidor analógico a digital (A/D), terminal de gráficos y tarjeta de interfaz de alta velocidad fueron estimados en \$30,000 en 1987. Un problema potencial con tal instalación era el impacto que podría tener sobre los usuarios existentes del VAX y en procesos de alta prioridad. Una solución razonable era de procurar una Micro VAX WS, que

asumimos podría complementar el VAX 11/750 existente y proporcionarnos con la capacidad de graficar a alta velocidad. Otro problema para CVO iba a ser la instalación de un sistema (CUSP) para el cual no existía documentación. En la primavera de 1987 una WS para gráficos de Micro VAX RC fue pedido al Micro VAX mediante una procuraduría nacional. El precio de lista de la GSA (Administración General de Servicios de los EE.UU.AA.) para un Micro VAX RC completamente configurado era \$17,600. Ese precio no incluía el costo aproximado de \$12,000 para el subsistema A/D.

Mientras esperábamos noticias de la procuraduría nacional, P.L. Ward estaba buscando un sistema económico de registro que podría ser usado en el proyecto del Monumento Nacional Katmai, Alaska. No se podían considerar registros analógicos dado el proceso intensivo de trabajo para convertir los datos a un formato

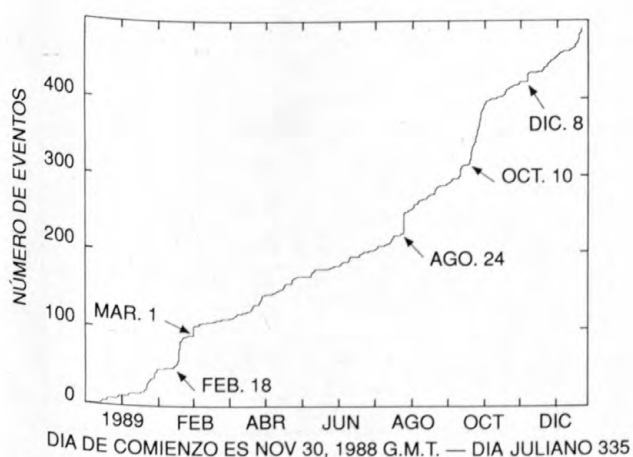


**Figura 5.1.** Distribución de las estaciones sísmicas en el Mount St. Helens en 1989. Las estaciones sísmicas ERT (15 km al oeste) y CDF (14.5 km al sureste) y MTM (20 km al sur) no están indicadas. Las localizaciones de un subconjunto de inclinómetros telemétricos están graficadas en el cuadro interior. Las líneas de nivel están en pies.

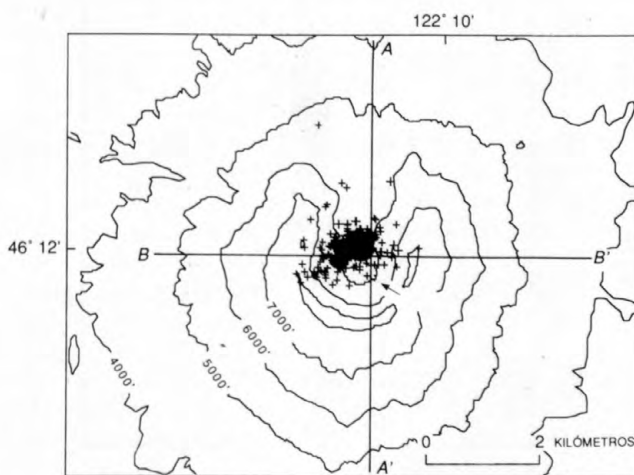
digital. La adquisición de datos digitales en tiempo real era la única solución razonable. Registradores portátiles fueron considerados y rechazados por el proceso demoroso de reproducción ("playback") a un sistema de computación y las limitaciones severas para expandir la red. Los sistemas comerciales para la adquisición de datos sísmicos y el CUSP fueron rechazados debido a los altos costos de los equipos y programas y por los requisitos de las estaciones. El CUSP hubiera sido innecesariamente grande y complejo para una red tan pequeña como la del Katmai. Un sistema basado en una PC fue rechazado por las limitaciones del sistema operativo DOS. Ward también quería aprovechar sus conocimientos del UNIX y los programas en UNIX para análisis de datos sísmicos que estaban disponibles en el Observatorio Geológico de Lamont Doherty (LDGO -Lamont Doherty Geological Observatory) y en los Laboratorios Nacionales de Lawrence Livermore. Dado que ningún subsistema A/D estaba disponible para operar con los sistemas operativos UNIX generalmente disponibles, Ward, conjuntamente con Reese Cutler (Cutler Digital Design), diseñaron y construyeron el Data Sampler (Ward y Cutler, 1987), que podría servir de interfaz con un sistema de computación tipo UNIX mediante una interfaz estándar de una pequeña computadora (SCSI-small computer standard interface). Aunque cualquier computadora que usa el sistema operativo UNIX podría haber sido usado, probablemente se escogió una Sun WS debido a que en el LDGO estaba bastante adelantado el desarrollo de los programas que usaban el ambiente de ventanas Sun. La Sun WS no estaba diseñada para expansión mediante un bus de computadora como las computadoras VAX.

En Septiembre de 1987, mientras trabajaba con Ward en King Salmon, Alaska, Endo tuvo su primera oportunidad para observar la operación de la Sun WS y el prototipo del Data Sampler. El se impresionó por el hecho de que en un período de tres meses el Data Sampler no solo fue diseñado, construido y probado con un Sun WS, pero también se dejó funcionando. El sistema Sun WS podría ser vigilado desde Menlo Park, California mediante un terminal para el modem. Con la ayuda del Servicio Nacional de Parques, los datos se grababan en una cinta magnética, que entonces era enviada a P.L. Ward en Menlo Park. Algunos atributos atractivos del muestreador de datos eran su costo estimado de \$5,000 para una versión de 16 canales y el bajo costo de una expansión.

Poco después de regresar al CVO a fines de Septiembre, fuimos informados que el Micro VAX RC ya no esta disponible en el inventario del GSA y que un sistema equivalente de repuesto requeriría unos \$12,000 adicionales del proyecto. A estas alturas en el año fiscal no era posible conseguir estos fondos a una fecha tan tarde en el año fiscal. Aunque hubieran existido los fondos, el costo de un sistema Micro VAX estaba alcanzando un nivel irrazonable. Nos dieron menos de un día para tomar una decisión en cuanto a la disposición de los fondos previamente comprometidos. Después de haber observado la Sun WS en operación, no hubo ninguna duda en sustituir la Sun WS por la Micro VAX RC WS. Con los \$17,600 originalmente comprometidos para el Micro VAX RC pudimos ordenar una Sun WS de 141 megabyte con un dispositivo de cinta de 1/4 pulgada y una unidad de disco de 71 megabyte. La Sun WS llegó al CVO a principios de Diciembre de 1987. Algo que no



**Figura 5.2.** El número acumulado de sismos de calidad "A" y "B" en el Mount St. Helens registrados por el sistema PC/AT para la adquisición de datos desde Noviembre de 1988 a Enero de 1990.



**Figura 5.3.** Los epicentros de los sismos de calidad "A" y "B" localizados durante el período de Noviembre de 1988 a Enero de 1990. Líneas A-A' y B-B' son las localizaciones de los perfiles en la figura 5.4.

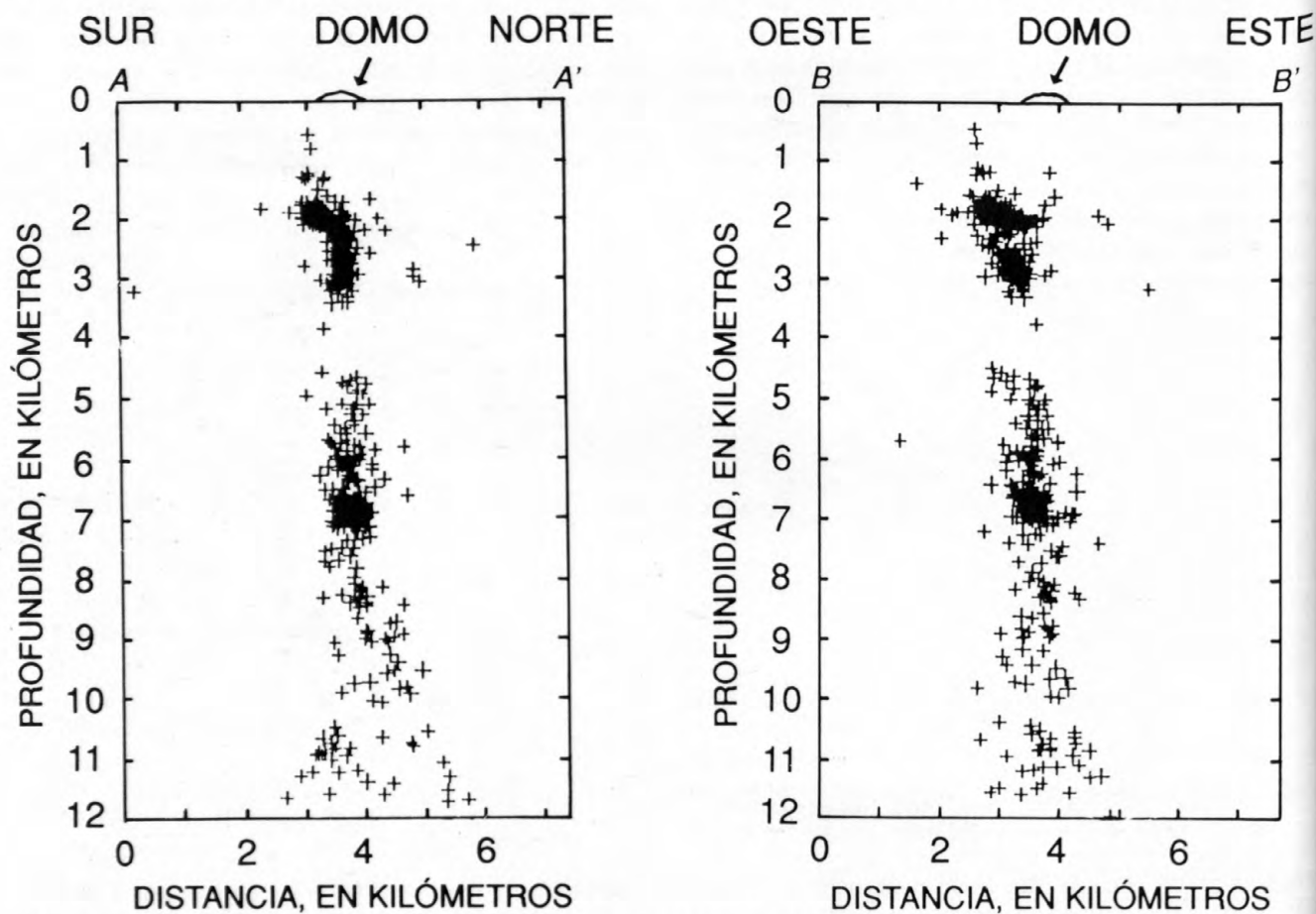
sabíamos era cuando iba a estar disponible un modelo de producción del Data Sampler para la Sun WS. Todavía teníamos la necesidad inmediata de un sistema que podía registrar hasta 16 canales.

A fines de Diciembre de 1987 se obtuvo una copia de la versión más reciente de los programas de la IASPEI para la adquisición de datos en un sistema PC/AT. Dado sus costos relativamente bajos y el hecho que los equipos tipo PC podrían ser usados para otros fines si decidíamos abandonar el sistema PC/AT, se tomó la decisión de usar este sistema hasta que pudiéramos implementar completamente el sistema de la Sun WS. El sistema PC/AT era uno de bajo riesgo, dado el costo relativamente bajo de la tarjeta A/D. Debido a la simplicidad del DOS, el sistema PC/AT fue instalado en unas pocas horas. Mucho de ese tiempo se fue haciendo el alambrado desde la salida de los discriminadores hasta el A/D y verificando las entradas.

La versión original del programa fue una decepción. Mientras el programa escogía y localizaba los sismos en tiempo real, debido a un error de programación se creaban numerosos archivos para un solo sismo. En esencia, era un sistema de un terremoto.

Para la primavera y verano de 1988 no existía un programa de análisis para la PC/AT para poder confirmar las fases escogidas por el programa. En Octubre de 1988 recibimos una versión mejorada de los programas de adquisición de datos sísmicos, y pocas semanas después programas para análisis de datos escritos por Carlos Valdés. La última versión ha estado operando y detectando terremotos desde el 15 de Octubre de 1988. Hasta la fecha, nosotros no hemos detectado ningún problema con los programas. Actualmente se utilizan los programas de análisis para escoger manualmente las fases para localizar rutinariamente los sismos del Mount St. Helens.

El Data Sampler para la Sun WS, que fue ordenada a fines de Junio de 1988, llegó el 27 de Septiembre de 1988. Para fines de Octubre, se completó la cablería al cuarto de la Sun WS, se instaló el reloj GOES y se realambró el estante de los discriminadores para usar un conector tipo cinta. Después de estudiar los manuales de UNIX por semanas y con la ayuda de P.L.Ward, Endo pudo cambiar el sistema operativo UNIX a la versión 3.5, un requisito para la operación del Data Sampler. El 9 de Noviembre se operó exitosamente el Data Sampler



**Figura 5.4.** Secciones transversales Norte-Sur y Este-Oeste de los diagramas de hipocentros de calidad "A" y "B". Las localizaciones están en la figura 5.3. Las líneas de nivel están en pies.



en modo "develocorder." El 5 de Diciembre recibimos los programas adicionales de Ward para poner la Sun WS en modo de detección. Instalaciones adicionales fueron temporalmente atrasadas hasta recibir los discriminadores adicionales para el estante localizado en el cuarto de la Sun WS. El 26 de Enero de 1989 el sistema de la Sun WS para la adquisición de datos estaba funcionando a tiempo completo.

## Análisis y el Sistema de Adquisición de Datos con la PC/AT

El sistema PC/AT (AST Premium 286) utiliza los programas de adquisición de datos sísmicos publicados por IASPEI (Lee, 1989). La versión actual tiene la capacidad de procesar 16 canales ("single ended"), detectar y registrar sismos, y opcionalmente localizar los terremotos en tiempo real. El sistema del CVO recibe actualmente las señales de 15 estaciones sísmicas. El decimosexto canal se utiliza para registrar el código de tiempo del reloj satélite de IRIG-B (Inter Range Instrumentation Group). Aunque no es esencial para la localización de sismos con la AT compatible, se requiere el código de tiempo (preferiblemente IRIG-E) para amarrar el tiempo del sistema de computación a aquel de otras redes sísmica y para poder determinar el tiempo correcto de origen.

Con ayuda de Lee, el archivo con los parámetros de entrada fue modificado para detectar y registrar exitosamente la mayoría de los sismos pequeños de Mount St. Helens que son observados en los registros sísmicos analógicos. Cualquier evento registrado con una amplitud de 20-25 mm de pico a pico y con una duración coda mayor a 5 segundos parece ser registrado por el sistema. Como con cualquier sistema en línea, el ruido telemétrico ocasionalmente produjo detecciones falsas que llenaron el disco duro. Hay como 27 megabytes (aproximadamente 100-150 eventos) de espacio en el disco para grabar datos de sismos y detecciones falsas. Un archivo típico con 16 trazas digitalizadas a 200 muestras por segundo por 35 segundos requiere 230,400 bytes de espacio. Una frecuencia de muestreo de 100 muestras por segundo sería más que suficiente para la mayoría de las redes pequeñas y doblaría el número de eventos registrados. Nosotros revisamos los archivos diariamente. Los Registros analógicos son revisados y los archivos con sismos son identificados. Los archivos con detecciones falsas (señales de ruido telemétrico, avalanchas, o de caídas de rocas) son borrados, mientras que los archivos con sismos son grabados en un disco óptico (capacidad para 200 megabytes) o en diskettes (capacidad para 1.2 megabytes). Como no tenemos una red local (LAN-Local Area Network) para las PC's para inspeccionar y

transferir los datos, el sistema de adquisición de datos está fuera de línea por 15-60 minutos, tiempo requerido para hacer la transferencia de los archivos. Actualmente estamos usando los programas de IASPEI escritos por Carlos Valdés (Valdés, 1989). Con monitores EGA y un mouse, es fácil escoger las fases de los sismos y localizar los sismos utilizando el programa de localización HYPO71PC (Lee y Valdés, 1985). Una versión del programa permite al usuario escoger la ventana de tiempo para hacer un análisis espectral. Si la respuesta absoluta del sistema es conocido, el momento sísmico para los sismos individuales también puede ser calculado.

A continuación está nuestra configuración de equipos para el sistema AST 286:

Disco duro de 40 megabyte, tiempo de acceso	
28 ms	
Dispositivo de 1.2 megabyte para diskettes de 5	
1/4 pulgada	
2 megabyte RAM, 100 ns chips	
Coprocesador matemático 80287	
Un terminal serial, un terminal paralelo	
Tarjeta de video EGA	
Monitor NEC de colores multisync	
Teclado	
MS-DOS	
Dispositivo IBM 3363 WORM de 200 megabyte	
Data translation DT2821 A/D y licencia para	
usar programas ATLIB	
Tarjeta de gráficos monocromáticos compatible	
con Hercules	
Monitor monocromático	
Costo para el sistema detallado arriba:	
Sistema Premium AST 286	\$3,595
Dispositivo IBM 3363 WORM	\$1,858
DT281 A/D y licencia	\$1,524
Total	\$6,977

Para el despliegue de las trazas sísmicas, habría que añadir un monitor monocromático y una tarjeta al sistema AST para un costo adicional de \$200. Para el análisis de datos, se usa una AT compatible, Everex 1700 12 Mhz, la cual tiene la siguiente configuración:

Disco duro de 40 megabyte	
Dispositivo de 1.2 megabyte para diskettes de 5	
1/4 pulgada	
Dispositivo de 720 kilobyte para diskettes de 3	
1/2 pulgada	
1 megabyte de RAM	
Coprocesador matemático 80287 8 MHZ	
Tarjeta de gráficos EGA y monitor NEC	
Mouse de Microsoft	
Dispositivo IBM 3363 WORM	

El costo aproximado para el sistema Everex, sin el dispositivo WORM, fue como \$3,000. El sistema Everex



que fue procurado costó \$2,100 y vino con 1 megabyte y sistema monocromático, sin gráficos EGA, mouse, coprocesador matemático o dispositivo WORM. Los componentes (tarjeta de video EGA, mouse, monitor EGA) de un sistema XT existente usado normalmente para el procesamiento de palabras, gráficos y otras tareas fueron añadidos o usados con el sistema Everex. Una tarjeta A/D, no fue instalado en la Everex, ya que no fue configurado idénticamente con el sistema AST. El costo total para los dos sistemas AT compatibles fue de alrededor de \$12,000. La adquisición continua de datos y el análisis rutinario no pueden ser realizados con la misma AT compatible; se requieren dos sistemas idénticos para asegurar un registro continuo. Mientras en uno de los sistemas se lleva a cabo el análisis, se puede usar el otro sistema para la adquisición y registro de sismos. El segundo sistema sirve también como respaldo en la eventualidad que falle el primer sistema. Si tuviéramos un gran enjambre sísmico, nuestro plan actual es de transferir todos los datos a un disco óptico para minimizar el tiempo que la computadora no puede estar adquiriendo y registrando sismos. Si los sistemas para adquisición y análisis de datos estuvieran cerca, se podría instalar un sistema de red de área local (LAN-local area network) que eliminaría la necesidad de una segunda tarjeta A/D y un sistema con la misma configuración. También, se podrían transferir los archivos con los datos sin tener que interrumpir la adquisición de datos. Para el archivo de los datos, se requeriría solamente un dispositivo WORM. Los sistemas comprados para ser usar los en otros sitios deben considerar el problema de registros continuos (sistema de respaldo) y análisis rutinario de datos. Se podrían correr (aunque más lentamente) los programas para análisis escritos por Carlos Valdés en una PC/XT con gráficos EGA, un coprocesador matemático, disco duro y mouse.

El proceso de implementación de los programas para la PC/AT fue una tarea relativamente fácil. El usuario solo tiene que instalar los directorios apropiados, copiar los archivos de un diskette al disco duro, cambiar los archivos config.sys y autoexec.bat, y editar los archivos de parámetros con los nombres de las respectivas estaciones, número de canales, parámetros para la identificación de eventos, entre otros. Una tarjeta para gráficos monocromáticos y la tarjeta A/D tienen que ser instaladas con los puentes correctamente colocados. El monitor monocromático fue usado para el despliegue continuo de las trazas sísmicas.

Como con todos los otros equipos tipo PC en el CVO, no se tiene un contrato de mantenimiento para los equipos mencionados, dado que el CVO tiene el personal capacitado para hacer el mantenimiento. El costo relativamente bajo de los equipos PC no justificaban un contrato de mantenimiento.

## Sistema con una Estación de Trabajo Sun

El sistema con una estación de trabajo (WS-work station) Sun implementado en el CVO consiste de dos estaciones de trabajo Sun 3/50. Una WS está configurada para la adquisición de datos con el Data Sampler (subsistema A/D, Ward y Cutler, 1987) fabricado por Cutler Digital Design. El Data Sampler que se usa tiene un módulo de entrada para 16 canales. Módulos adicionales pueden ser instalados en el Data Sampler para manejar hasta 256 canales. Las funciones principales del Data Sampler son recibir las entradas sísmicas analógicas de los diferentes canales, digitalizar las señales a una frecuencia determinada, y almacenar temporalmente los datos hasta su transferencia a la computadora para procesamiento. El Data Sampler es único sistema que usa el tiempo decimal codificado (BCD-binary coded decimal) paralelo de un reloj satélite GOES para los cuatro bits de datos menos significativos. Si no hay tiempo BCD paralelo, el usuario tiene la opción de usar el reloj interno, que es menos exacto. Para el sistema operativo UNIX, el Data Sampler aparenta ser un dispositivo de cinta magnética SCSI de nueve trazas. Los programas para probar el Data Sampler y para detectar y registrar sismos fueron escritos o modificados por P.L. Ward.

El sistema del CVO es completamente operacional, con una frecuencia de muestreo de 100/segundo. A fines de 1989 empezamos a procesar los datos de los sismos registrados por el Sun WS para evaluar su funcionamiento conjuntamente con el del sistema PC/AT. La segunda WS fue instalado principalmente para analizar datos, pero una estructura de directorio similar al del sistema de adquisición de datos ha sido instalado por si acaso falla el equipo de adquisición de datos. Para el análisis de datos se usa principalmente el programa de SUNPICK de LDGO. En el CVO, las Sun WS están conectadas entre si mediante un ethernet. El sistema ethernet es conveniente para el compartir de archivos y recursos.

La configuración actual para la Sun WS es:

Una Sun 3/50 con:

- Disco duro de 320 megabyte
- Dispositivo para cinta magnética de 1/4 pulgada de 60 megabyte
- 4 megabyte RAM, floating point accelerator
- Monitor monocromático de 19 pulgadas

Una Sun 3/50 con:

- Disco duro de 141 megabyte
- Dispositivo para cinta magnética de 1/4 pulgada de 60 megabyte
- 4 megabyte RAM,
- Floating point accelerator
- Monitor monocromático de 19 pulgadas

Data Sampler para 16 canales  
 Reloj satélite GOES  
 Dispositivo de disco de Delta Microsystems  
 SCSI de 292 megabyte

Costo para el sistema detallado arriba:

Dos sistemas Sun 3/50	\$17,421
Un dispositivo periférico de ("drive") de Delta Microsystems	\$ 4,702
Un Data Sampler	\$ 4,975
Un reloj satélite GOES	\$ 4,275
Un disco de 320 megabyte mejorado ("upgrade")	\$ 6,500
Total	\$37,873

El disco de 292 megabyte de Delta Microsystems tiene suficiente espacio para los programas de adquisición de datos sísmicos y para 224 megabyte de datos. Se pueden almacenar aproximadamente 500-700 sismos con una duración de 75-100 segundos en el espacio disponible para datos. Esta configuración permite que haya un equipo sustituto para el sistema de adquisición de datos. El mantenimiento de todo este equipo cuesta \$800/año fiscal y pensamos que el mantenimiento de los programas para las dos estaciones de trabajo cuesten unos \$1,600. Las estaciones de trabajo Sun con esta configuración cuestan \$37,873 y costaría \$3500 ampliar el sistema para que pudiera recibir 256 canales.

## Evaluación Preliminar de los Sistemas PC/AT y Sun WS

Durante los dos años (Diciembre de 1987 a Diciembre de 1989) de operación continua, el equipo de la AST Premium 286 PC/AT nunca falló. Aproximadamente 75 a 85 % de los sismos detectados en tres o más estaciones sísmicas en el cráter del Mount St. Helens fueron registrados exitosamente por el sistema PC/AT. Fallos en el registro se debieron principalmente a detecciones tardías que resultaron en la pérdida de arribos de la onda *P* en las estaciones sísmicas. La selección de una frecuencia más baja de muestreo y un tiempo más largo de pre-evento resolvieron parcialmente el problema. Durante enjambres sísmico se perdieron algunos eventos; quizás un tiempo más largo de post-evento podría resolver este problema. Un problema en la detección correcta de eventos a fines de 1989 estuvo relacionado con la configuración de la red del CVO, la red de detección que utiliza principalmente las estaciones sísmicas del CVO y la ganancia relativamente baja de las estaciones sísmicas del cráter. Un número significativo de terremotos con profundidades mayores a

5 km no fueron registrados por el sistema PC/AT. Estamos experimentando con diferentes parámetros de detección para corregir este problema.

Los problemas más graves asociados con el sistema PC/AT están relacionados con problemas de transmisión telemétrica. Cuando han habido interferencias telemétricas en uno de los dos enlaces telemétricos principales del Mount St. Helens el programa ha creado numerosos archivos con ruido. Discriminadores como el USGS J120, que se aguantarían cuando se fuera la señal, eliminarían el problema de muchas detecciones falsas. Sin una LAN, el análisis rutinario de los datos es incómodo en comparación con la Sun WS, porque no se puede adquirir datos mientras se están revisando los archivos para determinar cuales contienen eventos sísmicos. Si hubiera ocurrido un enjambre, todos los archivos hubieran sido pasados a un disco óptico, el único aparato para almacenaje masivo instalado en las computadoras PC/AT del CVO.

Durante los 10 meses de operación, el video y el disco duro del sistema Sun WS han fallado una vez. Los sistemas Sun WS aparentemente han detectado casi todos los sismos del Mount St. Helens que han sido detectados por tres o más estaciones sísmicas. Siempre ha registrado todos los arribos de las ondas *P* de los terremotos. La Sun WS tiene la ventaja de usar bits de tiempo de la salida paralela BCD del reloj satélite para un sello de tiempo absoluto en las trazas de los datos digitales. El sistema Sun WS también tiene la ventaja de un disco duro de mayor capacidad y el uso del sistema operativo UNIX, que permite la flexibilidad en los nombres de directorios y archivos, y el uso de archivos script, alias, y del ambiente de ventanas y gráficos de mayor resolución.

Los dos sistemas detectan y registran bien los sismos locales, y cada uno tiene sus ventajas y desventajas. El sistema PC/AT implementado en el CVO costó un tercio menos que el sistema Sun WS y fue fácil para instalar, pero sufre de las limitaciones de las PC/AT's y el DOS. Un enjambre sísmico de corta duración durante Agosto de 1989 rápidamente llenó el espacio del disco disponible en una partición estándar de 32 megabyte en el sistema operativo 3.3. Durante una merma de actividad, los archivos con los eventos tuvieron que ser pasados a un disco óptico para crear espacio para los eventos subsiguientes. En comparación, fue más difícil instalar la Sun WS, dada la necesidad de entender UNIX y los detalles requeridos para su configuración. La Sun WS registró más eventos durante el mismo período y requirió poca atención dado el espacio substancialmente mayor. Los archivos pudieron ser revisados sin interrumpir el proceso de adquisición de datos. Dado el tiempo exacto de los archivos de la Sun WS no hubo que hacer correcciones de tiempo.

## Filosofía Operacional

La implementación de un sistema de adquisición de datos sísmicos en el CVO fue motivado por la necesidad de mejorar las localizaciones de los sismos someros del Mount St. Helens. Parte del problema de localizar eventos someros pequeños es la limitada flexibilidad de reconfigurar la telemetría de la red sísmica regional (alrededor de 128 estaciones sísmicas) operada por la Universidad de Washington. Otro problema asociado con el registro de sismos pequeños por una red sísmica regional es el uso ineficiente del almacenaje de datos. Para un sismo pequeño, que podría ser detectado por solo 15 estaciones sísmicas localizadas a menos de 20 km del Mount St. Helens, habría que grabar los datos digitales para las 112 estaciones sísmicas de la red localizadas a una mayor distancia. La manera más eficiente y económica para registrar un subconjunto de la red regional y unas pocas estaciones adicionales era mediante sistemas de adquisición de datos sísmicos de menor capacidad como los PC/AT o Sun WS.

La instalación de dos sistemas de adquisición de datos en el CVO surgió por la necesidad de tener un sistema en tiempo real que pudiera rutinariamente proporcionar al CVO con localizaciones rápidas de sismos y un método para hacer el mejor trabajo posible en cuanto al registro de la sismicidad precursora asociada con la actividad de construcción del domo en el Mount St. Helens. Nos cogieron durante la evolución de dos sistemas. El sistema PC/AT era muy fácil para instalar, pero sus limitaciones en cuanto a nuestros requisitos fueron reconocidas y por lo tanto se probó el sistema Sun WS. Se requieren realizar trabajos adicionales en la Sun WS para hacer localizaciones en tiempo real y gráficos, y tener un sistema completo de análisis de datos usando el formato de datos propuesto por Ward. Después de una instalación completa del sistema Sun WS, nuestro plan es mantener el sistema PC/AT como respaldo. Estos sistemas ayudaron al personal de CVO envuelto con la adquisición y análisis de datos sísmicos mejorar sus destrezas en estas áreas. Gracias a los sistemas, durante el pasado año hemos podido participar en el análisis rutinario de los datos sísmicos de Katmai. Un analista sísmico a tiempo parcial ayuda con la evaluación rutinaria de los datos sísmicos digitales del Mount St. Helens y Katmai. Hemos procesado 37 cintas DC600 (60 MB) de datos sísmicos del Katmai.

El sistema Sun WS es un ejemplo del costo cada vez menor del desarrollo de equipos y programas mediante el uso de programas documentados preexistentes. La disponibilidad de Sunpick para X-windows, XPICK de la Universidad de Alaska y programas para el UNIX manuales deben resultar en costos más bajos para el desarrollo de programas para

futuros sistemas de adquisición de datos sísmicos en tiempo real. Otra ventaja de los programas documentados y programas usados por otras instituciones, son los costos potencialmente más bajos para su mantenimiento. Los dos sistemas eliminan la necesidad de tener especialistas de computación a tiempo completo para programar y mantener los programas. El sistema Sun WS es el sistema que nosotros probablemente seleccionaríamos para una red sísmica con 16 canales o más de datos.

La amplia disponibilidad de computadoras PC/AT (y compatibles) en países en vía de desarrollo, convierten al sistema PC/AT en la herramienta ideal de los vulcanólogos de esos países para la adquisición y el análisis de registros sísmicos. Con los programas de análisis de datos escritos por Carlos Valdés (Valdés, 1989) y el formato DOS de los archivos, cualquier persona con una computadora IBM compatible con capacidad para gráficos EGA puede disponer de sismogramas digitales. Desarrollos recientes en los equipos y programas de los sistemas PC/AT y computadoras más rápidas apuntan a la posibilidad de registrar y procesar datos de hasta 128 canales.

## CONCLUSION

Nuestra experiencia con los sistemas de adquisición de datos tanto para la PC/AT y Sun WS, indica que cualquiera de los dos sistemas son apropiados para usar con redes sísmicas pequeñas. Los dos tienen sus ventajas y desventajas. EL económico sistema PC/AT es relativamente simple para instalar y mantener y utiliza equipos tipo PC disponibles en todo el mundo. La desventaja del sistema basado en la PC/AT yace principalmente en las limitaciones del DOS 3.3 y las versiones anteriores. La Sun WS ofrece las ventajas del UNIX y la disponibilidad de más de un programa para el análisis de datos, pero actualmente usa un Data Sampler costoso y es más difícil implementar y más costoso mantener. Un sistema ideal sería uno que utilizaría los mejores aspectos de los dos sistemas. El sistema PC/AT sería ideal para la adquisición de datos, mientras que una WS tipo UNIX que aceptaría X-windows aceleraría el análisis rutinario de datos. Cualquier sistema que se escoge, debe ser uno que minimice la necesidad para equipos caros, mantenimiento costoso para los equipos y programas, costos fuertes de programación y cambios potencialmente costosos en los sistemas de computación en operación.

## AGRADECIMIENTOS

Estamos endeudados con Willie H.K. Lee, Carlos Valdés y Peter Ward por sus esfuerzos en desarrollar



programas para las PC/AT y Sun WS. Los resultados de los dos sistemas de adquisición de datos no hubieran sido posibles sin los trabajos realizados en la red sísmica del CVO por Tom Murray, Bruce Furukawa y otros miembros del personal del CVO. También apreciamos el trabajo del personal de la Universidad de Washington quienes mantuvieron la porción de la red sísmica del UWGP en el Mount St. Helens, y el personal de análisis sísmico de la universidad por la información sísmica.

## REFERENCIAS CITADAS

- Lee, W.H.K., 1989, Getting started, *en* Lee, W.H.K., ed., Toolbox for seismic data acquisition, processing, and analysis: International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, p. 1-46.
- Lee, W.H.K., and Valdes, C.M., 1985, HYPO71PC: A personal computer version of the HYPO71 earthquake location program: U.S. Geological Survey Open-File Report 85-749, 30 p.
- Tanigawa, W.R., English, T.T., Johnson, C.E., Koyanagi, R.Y., Nakata, J.S., and Tomori, A.H., 1987, Seismic processing at the Hawaiian Volcano Observatory: Abstract volume, Hawaii Symposium on How Volcanoes Work, p. 249.
- Tottingham, D.M., Lee, W.H.K., and Rogers, J.A., 1989, User manual for MDETECT, *en* Lee, W.H.K., ed., Toolbox for seismic data acquisition, processing, and analysis: International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, p. 49-122.
- Valdes, C.M., 1989, User manual for PCEQ, *en* Lee, W.H.K., ed., Toolbox for seismic data acquisition, processing, and analysis: International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, p. 175-201.
- Ward, P.L., and Cutler, R., 1987, An inexpensive, buffered analog-to-digital converter for use on the SCSI bus with the UNIX operating system; U.S. Geological Survey Open-File Report 87-624, 81 p.





## 6. Métodos Usados para Vigilar la Deformación del Piso del Cráter y del Domo de Lava en el Mount St. Helens, Washington

Por Eugene Y. Iwatsubo y Donald Swanson

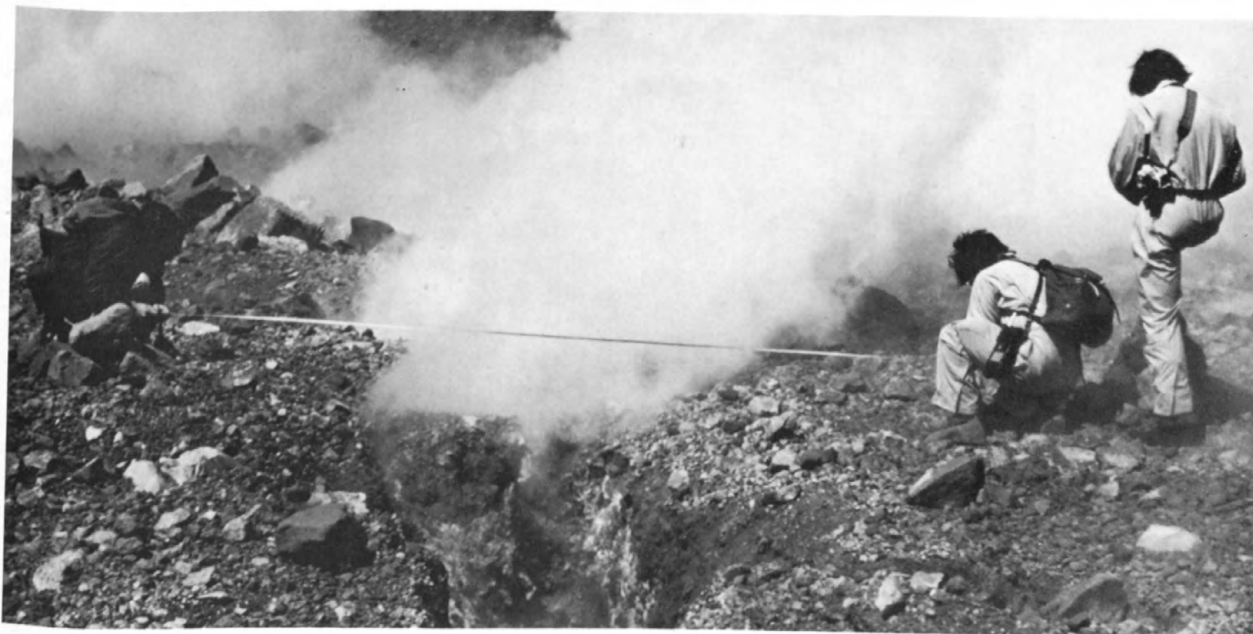
### ABSTRACTO

El domo de lava en el Mount St. Helens creció por episodios entre Octubre de 1980 y Octubre de 1986, y durante este período, muchas técnicas y procedimientos fueron establecidos para ayudar a vigilar, estudiar y predecir episodios de crecimiento. Estos incluyen medidas de desplazamiento en grietas radiales y fallas de cabalgamiento en el piso del cráter y en el domo, nivelación del piso del cráter y uso repetido de redes de trilateración y distanciómetros en el piso del cráter y en el domo. Redes de distanciómetros fueron uno de los métodos más confiables para predecir los episodios de construcción del domo. Métodos nuevos y viejos han sido adoptados para establecer y medir tales redes. El uso de distancias y ángulos nos ha permitido localizar las estaciones en un

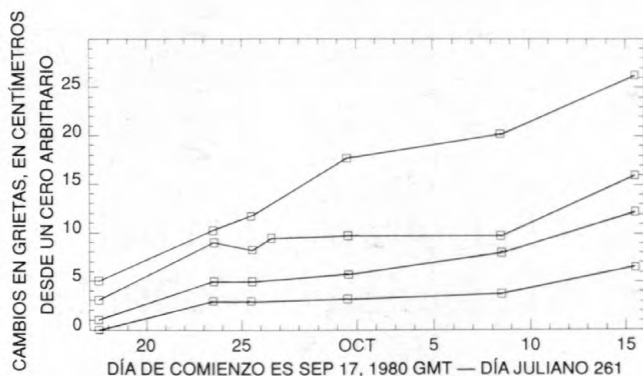
sistema de coordenadas que ofrece una vista tridimensional de la deformación del suelo en el cráter.

### INTRODUCCION

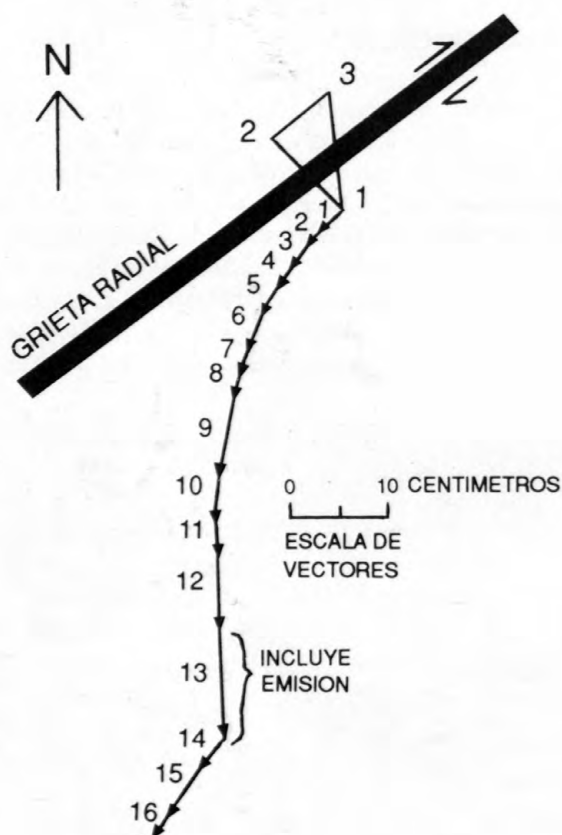
Muchos métodos han sido utilizados en el Mount St. Helens para vigilar la deformación del domo y piso del cráter adyacente. Estos métodos varían desde simplemente utilizar una cinta métrica de acero para medir el ancho de las grietas y fallas de cabalgamiento (Chadwick y otros, 1983; Chadwick y Swanson, 1989) hasta el uso de distanciómetros electrónicos (EDM-electronic distance meter) y medidores de desplazamiento (Iwatsubo, Ewert, y Murray, capítulo 9).



**Figura 6.1.** Científicos del CVO midiendo la apertura de una grieta radial en el piso del cráter. Las grietas se ensanchaban mientras magma se introducía debajo del domo de lava. A través de las medidas del ensanchamiento acelerado de la grieta, pudimos predecir episodios de construcción del domo.



**Figura 6.2.** El ensanchamiento de cuatro grietas radiales antes del episodio eruptivo de Octubre de 1980. El 15 de Octubre (el día antes del episodio explosivo), se habían formado muchas grietas nuevas que fueron observados por las cuadrillas de campo.



**Figura 6.3.** Vectores de desplazamiento para "Christina's radial," una grieta localizada al lado del domo de lava en el piso del cráter. Los vectores ilustran el ensanchamiento y desplazamiento horizontal, debido a la extensión y movimiento combinado de una placa de cabalgamiento limitada por una grieta. Justo antes, y durante la emisión del 6 de Septiembre de 1981 (vector 13), el sentido del movimiento era principalmente de extensión (tomado de Chadwick y Swanson, 1989).

Mientras crecía y cambiaba el domo, también variaron los métodos utilizados para vigilar y predecir su actividad. Muchas de las técnicas descritas en este trabajo ayudaron a predecir episodios de crecimiento del domo (Swanson y otros, 1983).

Muchas de las técnicas que usamos fueron adaptadas de otros sitios y modificadas para satisfacer nuestras necesidades. Muchos años antes de 1980, los principios de vigilancia de actividad volcánica mediante la medida de deformación horizontal, habían sido útiles en Japón y Hawaii (Yokoyama y otros, 1981; Kinoshita y otros, 1974). Antes y después de la erupción, nosotros adaptamos esas técnicas para vigilar los flancos exteriores del Mount St. Helens (Lipman y otros, 1981; Swanson y otros, 1981; Iwatsubo, Topinka y Swanson, capítulo 8). En 1981, cuando reconocimos que el domo se deformó como respuesta a una intrusión de magma, establecimos redes para medir distancias dentro del cráter para vigilar el domo. Esta herramienta ha sido una de nuestras mejores dentro del cráter para predecir episodios eruptivos en el Mount St. Helens.

## HISTORIA

A mediados de Septiembre de 1980, empezaron a formarse grietas radiales en el piso del cráter alrededor del punto de emisión, que estaba tapado por un pequeño domo que se formó en Agosto. Estacas de varilla fueron insertadas en el suelo a ambos lados de las grietas para establecer estaciones de grietas y se midieron las distancias entre las varillas con una cinta métrica (fig. 6.1). Nuestra intención era vigilar estas grietas o cualquier tipo de movimiento; la predicción de actividad eruptiva futura basada en este tipo de movimiento se consideraba poco probable. Sin embargo, antes del episodio explosivo de Octubre de 1980, las grietas se ensancharon aceleradamente en respuesta al ascenso de un cuerpo magmático (fig. 6.2). El 15 de Octubre, observadores notaron que se habían formado muchas grietas radiales nuevas desde la última visita el 8 de Octubre. Un episodio explosivo ocurrió el 16-18 de Octubre, después del cual se comenzó a formar un nuevo domo; este domo con sus adiciones subsecuentes, ha sobrevivido hasta el presente. Muchas nuevas grietas radiales se empezaron a formar en el piso del cráter mientras el domo continuaba creciendo. Se establecieron estaciones de grietas para vigilarlas (Swanson y otros, 1981), estableciéndose así el programa de deformación del cráter.

Se obtuvieron muchos datos útiles de las medidas de las grietas. Los cambios de distancias a lo largo de una misma grieta fueron los más importantes de estos, pero también se pudieron calcular vectores de desplazamiento para cada estación (fig. 6.3). Nosotros





**Figura 6.4.** Midiendo la distancia entre estacas de varilla al pie de una falla de cabalgamiento. La varilla más cercana está en la placa inferior de cabalgamiento y la lejana está en la placa superior. La placa superior de cabalgamiento se deslizó sobre la placa inferior mientras se acercaba un episodio eruptivo, y por lo tanto la distancia se acortaba. La tasa de acortamiento se aceleraba mientras el magma se acercaba a la superficie del domo de lava.

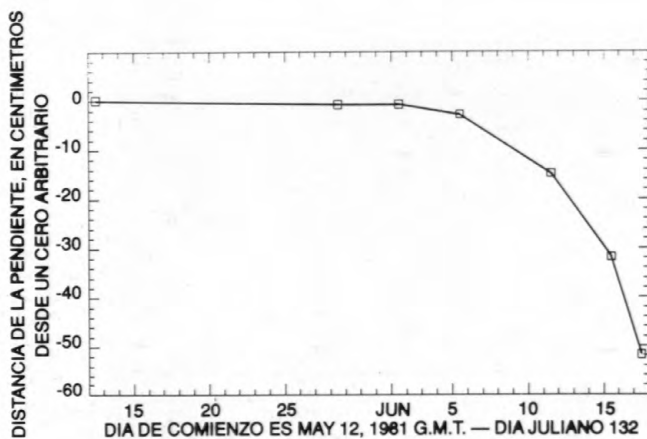
encontramos que la mayoría de las grietas mostraban aperturas casi puramente dilatacionales, pero algunas grietas, que formaban fallas de ruptura delimitando placas de cabalgamiento, mostraban componentes de desplazamiento dilatacional y de desgarre (Chadwick y Swanson, 1989).

Fallas de cabalgamiento en el piso del cráter fueron observadas por primera vez durante el episodio de construcción del domo de Diciembre de 1980. Estaciones de cabalgamiento, establecidos en el límite delantero de la placa superior, fueron vigilados de la misma manera que las estaciones de grietas (fig. 6.4). Mientras la placa superior de cabalgamiento sobrecorría la placa inferior, se acortaban las distancias medidas. El acortamiento se aceleraba antes de los episodios de construcción del domo, al igual que la tasa de apertura de las grietas. Las tasas fluctuantes fueron utilizadas para predecir el comienzo del próximo episodio eruptivo (Chadwick y otros, 1983; Swanson y otros, 1983). También nivelamos entre las varillas y determinamos que la placa superior estaba siendo levantada mientras cabalgaba hacia el frente.

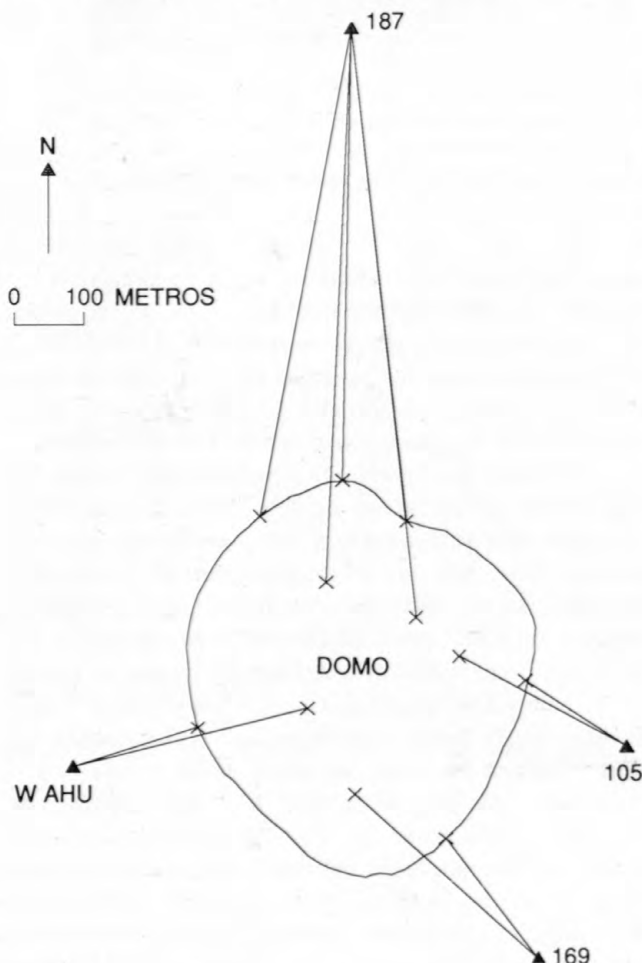
En Mayo de 1981 un clavo de acero inoxidable Parker-Kalon (PK) fue clavado en la lava en la base del domo, y se midió la distancia a la varilla en el piso del cráter con una cinta métrica de acero. La distancia medida

se acortaba a un paso acelerado con la aproximación del próximo episodio eruptivo (fig. 6.5). Esta fue la primera vez que reconocimos que el domo estaba respondiendo a la lenta intrusión de magma antes de un episodio eruptivo. El significado de este conjunto de datos eventualmente nos llevó a una nueva fase de vigilancia.

Una red de nivelación alrededor del domo fue establecida en el verano de 1981 para determinar la cantidad de levantamiento y subsidencia del piso del cráter. Este tipo de vigilancia arrojó resultados interesantes pero demandaba mucho personal y consumía mucho tiempo, particularmente considerando las logísticas de helicóptero, incertidumbres sobre el tiempo y los peligros volcánicos. Uno de los problemas más severos era la pobre visibilidad en muchas partes del cráter debido a los gases que subían de las fumarolas y el vapor que subía del piso caliente del cráter. Los datos de nivelación mostraban un levantamiento del piso del cráter centrado alrededor del domo antes de un episodio de construcción del domo. Antes y después del episodio de construcción del domo en Junio de 1981 se completó una nivelación, y se observó una subsidencia a lo largo de la línea cuando se comparaba con la línea pre-eruptiva. Subsidencia fue mayor cerca al domo y resultó posiblemente de (1) pérdida de presión volátil actuando contra el piso del cráter, (2) pérdida de



**Figura 6.5.** El movimiento del lóbulo sureste del domo de lava en relación con el piso del cráter, Mayo-Junio, 1981. La distancia medida entre el domo y el piso del cráter se acortaba mientras el episodio eruptivo se acercaba. Esta fue la primera indicación que tanto el domo como el piso del cráter respondían a un magma ascendente. La distancia medida fue aproximadamente 18 m.



**Figura 6.6.** Mapa esquemático ilustrando las estaciones instrumentales y los blancos dentro del cráter y en el domo en 1981. Esta fue la primera red completa usando un EDM para vigilar el domo. La medida más larga era de 1,000 m.

volumen del magma debajo del piso antes de la emisión y (3) carga al piso del cráter por la inyección de nuevo magma. Después de 1981, discontinuamos la nivelación porque consumía demasiado tiempo para ser completado rutinariamente para propósitos de predicción. Si las circunstancias hubieran sido más favorables, la nivelación se hubiera continuado debido a los datos únicos que proveía.

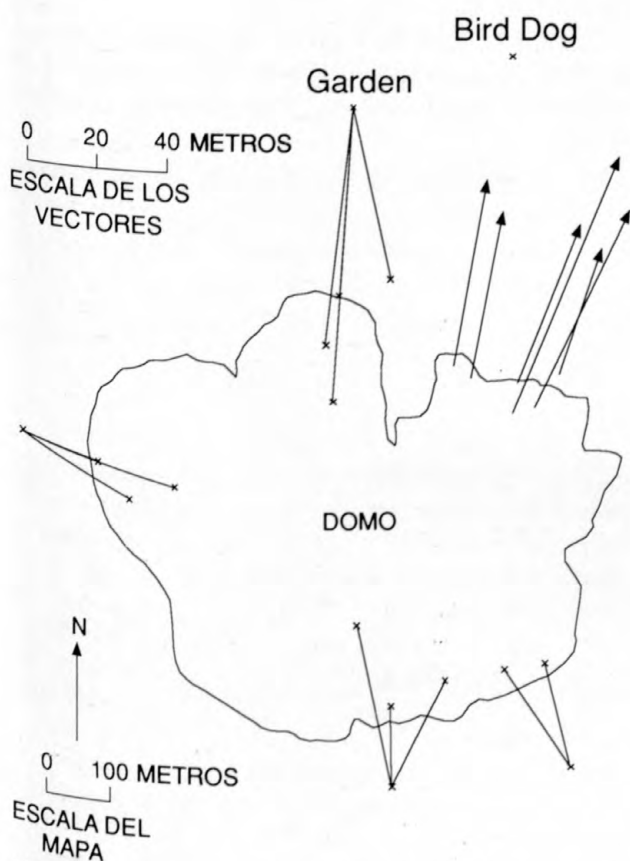
En 1981, se estableció una red de trilateración para vigilar el piso del cráter al norte del domo. El método de trilateración consiste en medir los lados de un triángulo y puede ser usado para establecer un control horizontal (Sturgess y Carey, 1987); sin embargo, nuestra intención era usar los datos para calcular vectores de desplazamiento. No se realizaba la trilateración como herramienta para predecir episodios eruptivos, pero como un experimento de investigación. Los resultados se sumaron a nuestro entendimiento de los procesos que estaban ocurriendo en el domo y en el piso del cráter. Comparando los datos de nivelación y trilateración, fue claro que los desplazamientos horizontales dominaron sobre los desplazamientos verticales durante el mismo período de tiempo. Por ejemplo, una estación en el piso del cráter se movió 50 cm horizontalmente y unos pocos milímetros verticalmente. Los datos de trilateración también mostraban que el desplazamiento horizontal en el piso del cráter era acumulativo, permanecía en vez de retornar a su posición previa.

Hacia fines del verano de 1981, nos sentíamos relativamente cómodos subiendo el domo, así que empezamos un programa intensivo de vigilancia en el domo mismo, en parte incitados por los datos en la figura 6.5. En Octubre de 1981, reflectores plásticos de carretera atornillados a tablas, fueron colocados en varios sitios en el domo. Estaciones instrumentales de EDM fueron establecidas en el piso del cráter y se midieron las distancias a los reflectores con el EDM. La primera red de EDM está ilustrada en la figura 6.6.

Se usó un teodolito para medir los ángulos cenitales a los reflectores. Conjuntamente con los datos del EDM, para cada reflector se calcularon los componentes horizontales y verticales dirigidos hacia la estación del EDM. Los ángulos horizontales fueron solamente medidos para algunos reflectores para observar los cambios en la distancia horizontal en dos o más blancos mientras crecía el domo. Retrospectivamente, los ángulos horizontales debían haber sido medidos para todas las estaciones en el domo y estos debían haber sido referidos a un punto conocido. Si esto se hubiera hecho, se hubiera podido establecer las coordenadas para cada uno de los reflectores. Algunos ángulos horizontales con puntos de referencia en el borde del cráter demostraron un movimiento horizontal relativo al domo, pero las coordenadas no pudieron ser calculados de estos datos.

Durante el episodio eruptivo del 19 de Marzo de 1982 (Waitt y otros, 1983), todas las grietas y fallas de cabalgamiento en el piso del cráter fueron enterradas por pómez o destruidos, terminando así una de las fases principales de vigilancia. Nuevas redes de EDM fueron establecidas alrededor del domo, y se continuó con este tipo de vigilancia. Sin grietas, ni fallas de cabalgamiento para medir, las medidas de EDM se convirtieron, y siguen siendo hasta hoy día, el método principal para vigilar la deformación del domo.

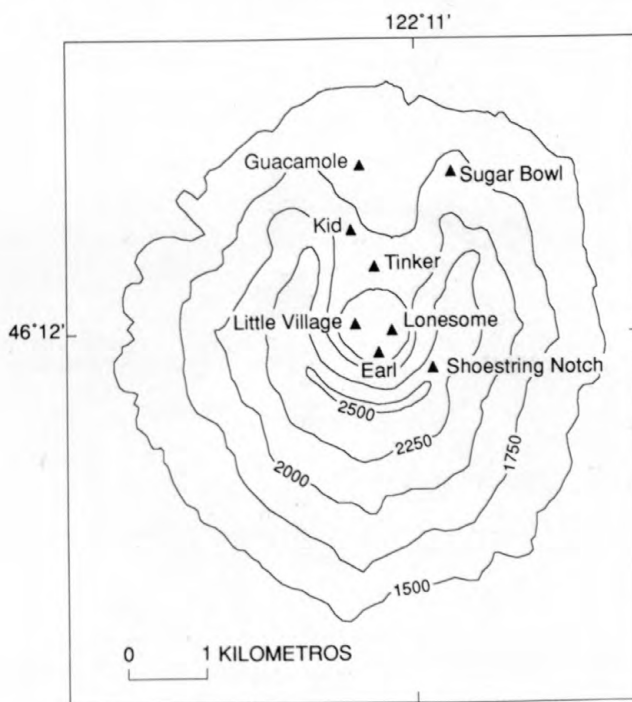
Durante un año de crecimiento lento y continuo del domo, se instaló una red de triangulación en el flanco norte del domo en 1983. Para el método de triangulación se mide un lado del triángulo (línea base) y por lo menos dos ángulos internos para



**Figura 6.7.** El desplazamiento horizontal determinado por triangulación para las estaciones instrumentales en la parte noreste del domo. Las líneas de nivel son esquemáticas. El período de tiempo para estas medidas fue mediados de Julio a fines de Septiembre 1983, durante un período prolongado de crecimiento del domo concentrado principalmente en la parte noreste del domo. Dos estaciones instrumentales para triangulación eran Garden y Bird Dog. Los blancos en las paredes casi verticales del domo estaban marcadas por "bombas" de pintura que se soltaron desde una puerta de un helicóptero. Otras partes del domo fueron vigiladas con el EDM y teodolito; x's pequeños identifican estaciones instrumentales y blancos.

calcular la localización de una estación (Shafer, 1987). El propósito de esta red era vigilar las partes inaccesibles del domo donde era imposible colocar reflectores para hacer medidas con el EDM. Los componentes horizontales y verticales podrían ser calculados de los datos de triangulación (fig. 6.7) y fueron un punto clave para determinar cual era la parte más activa del domo en el flanco norte. Otras partes del domo fueron medidas con un EDM y un teodolito.

En 1984 se añadió una nueva dimensión a nuestro programa de vigilancia cuando Peter Otway del Departamento de Investigación Científica e Industrial de Nueva Zelandia (DSIR-Department of Scientific and Industrial Research) introdujo el uso de coordenadas basadas en el sistema de coordenadas planas estatales. Inicialmente, se intentó hacer triangulaciones desde dos estaciones instrumentales en Kid y Sugar Bowl (fig. 6.8), respectivamente. Angulos cenitales y horizontales fueron medidos a los reflectores en el domo y se calcularon las coordenadas. Este método consumía mucho tiempo y no era rentable. Métodos estándares de agrimensura fueron adoptados para usar las medidas tomadas con el EDM y



**Figura 6.8.** Estaciones críticas en el borde y adentro del cráter del Mount St. Helens. Kid y Sugar Bowl fueron dos de las estaciones instrumentales principales para triangulación en 1984. Shoestring Notch en el borde del cráter, fue usada durante el verano de los años 1985-88 para vigilar partes del domo. Guacamole, Sugar Bowl y Shoestring Notch son puntos de referencia horizontal usados para varias estaciones instrumentales en el cráter en 1990. Guacamole es controlada desde Tinker y Little Village, Sugar Bowl desde Lonesome y Shoestring Notch desde Earl.

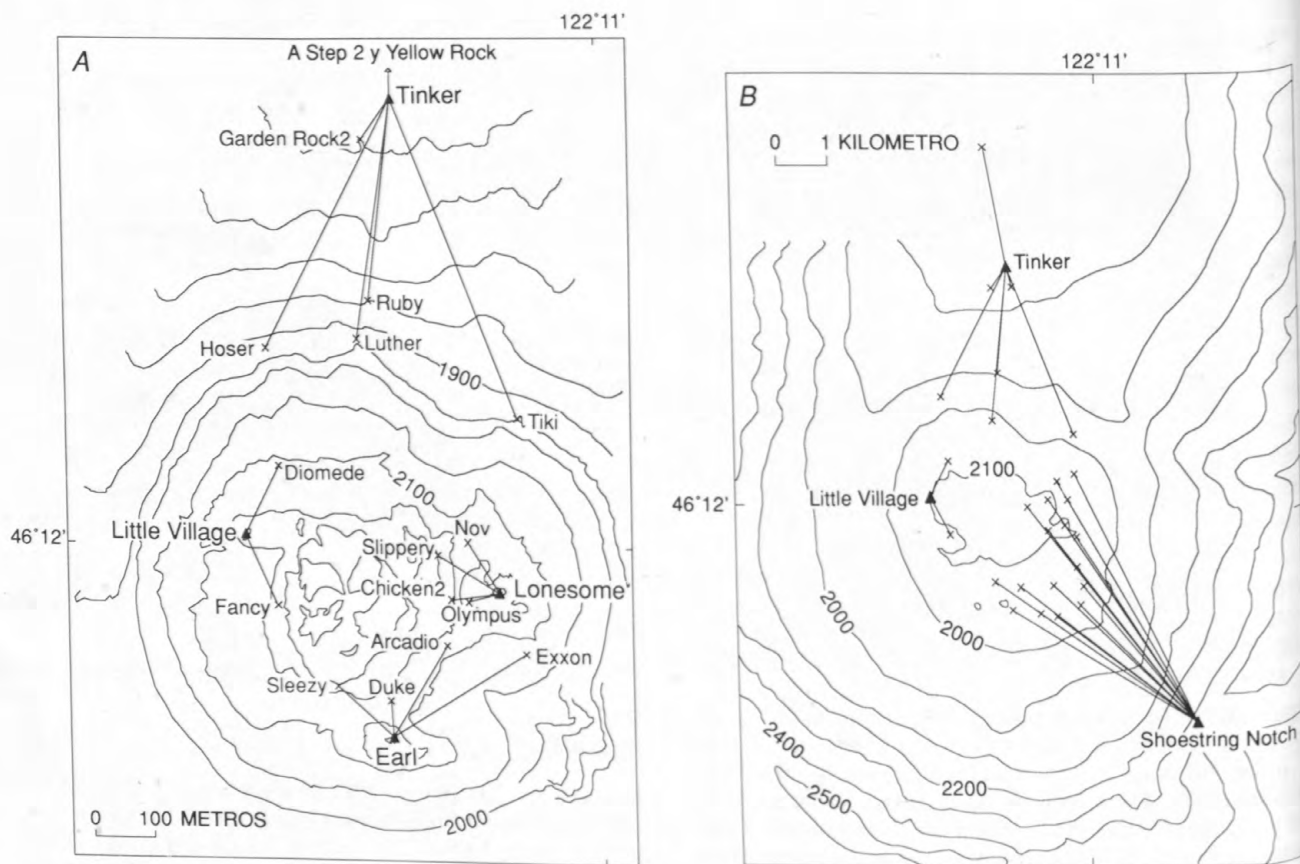


los teodolitos para localizar los reflectores. Mientras las distancias tomadas con el EDM y ángulos cenitales ya estaban siendo medidos, solo había que medir los ángulos horizontales que tenían puntos de referencia conocidos para calcular las coordenadas.

Mientras continuaba creciendo el domo, el espacio disponible en el piso del cráter entre el domo y las paredes del cráter se reducía. En todos los lados, excepto al norte, se hizo más y más peligroso trabajar en el cráter debido a las caídas de rocas de las paredes inestables del cráter en el verano y las avalanchas de nieve en el invierno. Los campos permanentes de nieve y hielo y escombros de avalanchas de rocas en el piso oriental, occidental y austral del cráter, efectivamente impedían un levantamiento estas áreas. En 1985, debido a la falta de espacio para trabajar en el piso del cráter, transferimos la mayoría de nuestras actividades de vigilancia al domo en sí. Solo se continuaba vigilando la parte norte del domo desde el piso del cráter. Las redes

de EDM fueron establecidas en varios sitios en el domo. Debido a las áreas limitadas para el aterrizaje de helicópteros en la cima del domo, algunas estaciones instrumentales solo pudieron ser ocupadas durante los meses de invierno cuando la nieve cubría la superficie irregular y rocosa. Para poder obtener datos de deformación del domo en el verano, una estación instrumental con un solo instrumento, Shoestring Notch, fue establecida en el borde suroriental del cráter (fig. 6.8, 6.9B). Era imposible llegar a Shoestring Notch en el invierno, porque a menudo las condiciones eran demasiado peligrosas en la hendidura; sin embargo, generalmente podíamos trabajar en la parte superior del domo durante el invierno. Por lo tanto, teníamos dos redes de vigilancia, una para el verano y otra para el invierno (fig. 6.9).

En 1989, debido a un recorte presupuestario y la ausencia de actividad volcánica, se discontinuaron las medidas de Shoestring Notch. Para compensar, se añadió

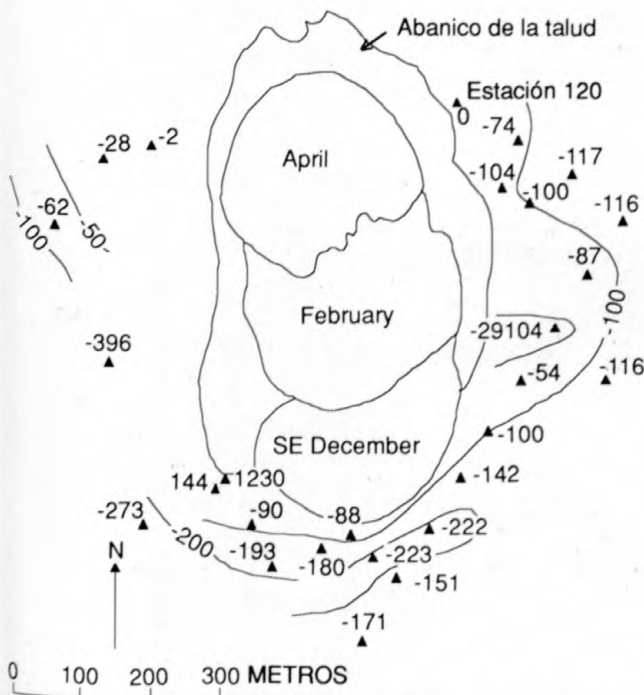


**Figura 6.9.** Mapas esquemáticos del Mount St. Helens. A, mapa esquemático digitalizado ilustrando la red de EDM del cráter en 1990. La distancia a Yellow Rock es 374 m y a Step 2 es 1,621 m. Antes de 1990, esta fue la red de vigilancia invernal en el domo, y en vez de la estación instrumental Earl, hacíamos disparos desde Lonesome hasta el área Earl. B, red de EDM de verano con Shoestring Notch como la estación instrumental principal para vigilar la parte sureste del domo. Las líneas de nivel están en metros. Todas las localizaciones de las estaciones fueron identificadas con triángulos.



## MÉTODOS DE VIGILANCIA

La vigilancia de grietas y fallas de cabalgamiento es relativamente simple y económica, requiriendo solo de varillas y una cinta métrica de acero de 25 m. Nosotros cortamos las varillas en estacas de 40-50 cm de largo y los clavamos en el suelo, dejando suficiente varilla expuesta para poder colocar la cinta. Muchas varillas, particularmente si no se insertan lo suficiente, pueden ser



**Figura 6.10.** El desplazamiento vertical en milímetros, determinado por nivelación antes y después del episodio de construcción del domo de Junio 18-20, 1981. Las líneas de nivel fueron dibujados a -50, -100, y -200 mm. La estación 120 fue un poste de control y fue vigilado mediante ángulos verticales desde el piso del cráter septentrional. El desplazamiento anómalo y positivo está localizado sobre fallas de cabalgamiento que se levantaron durante este episodio. "SE December," "February," y "April" identifican lóbulos emitidos del domo en Diciembre de 1980 y Febrero y Abril de 1981, respectivamente.

Medidores de desplazamiento han sido instalados para vigilar varias grietas en el piso del cráter y en el domo. El costo es mucho más alto debido al costo del medidor y la telemetría digital o la grabación en sitio. Se requiere de más tiempo y cuidado para establecer tales estaciones, pero se pueden obtener medidas continuas. Iwatsubo, Ewert y Murray (capítulo 9) describen como se usan los medidores de desplazamiento para vigilar grietas en el piso del cráter y en el domo.

Cuando se establece una estación de grieta o cabalgamiento con una varilla, es esencial enumerar las estacas y leer las distancias entre las varillas consistentemente. ¡Nosotros nos hemos confundido suficientes veces para enfatizar este punto! Es típico tener tres varillas que conforman un triángulo que cubre la grieta o falla de cabalgamiento. Un cuadrilátero rígido sería más preciso pero no se justifica en nuestra situación. Nosotros establecemos una estación de grieta colocando una varilla (designada # 1) a un lado de la grieta (o en la placa superior de una falla de cabalgamiento) y dos al otro lado (# 2 y # 3), numerados en sentido horario. Midiendo las distancias entre 1 y 2 y entre 1 y 3, se puede vigilar el ensanchamiento o el acortamiento de una grieta. La medida 2-3 sirve como una línea de referencia y para chequear la precisión (1-2 mm) de las medidas. Entre las tres medidas, se puede calcular el desplazamiento de vectores para la varilla 1 relativo a las varillas 2 y 3. Como punto índice a los dos lados de la cinta, generalmente usamos una marca que se hace en el centro superior de la varilla. Una persona sujeta la marca cero de la cinta sobre el punto central de una varilla, y la cinta se estira fuertemente y se toma la medida en el punto central de la otra varilla.

## Nivelación, Trilateración y Triangulación

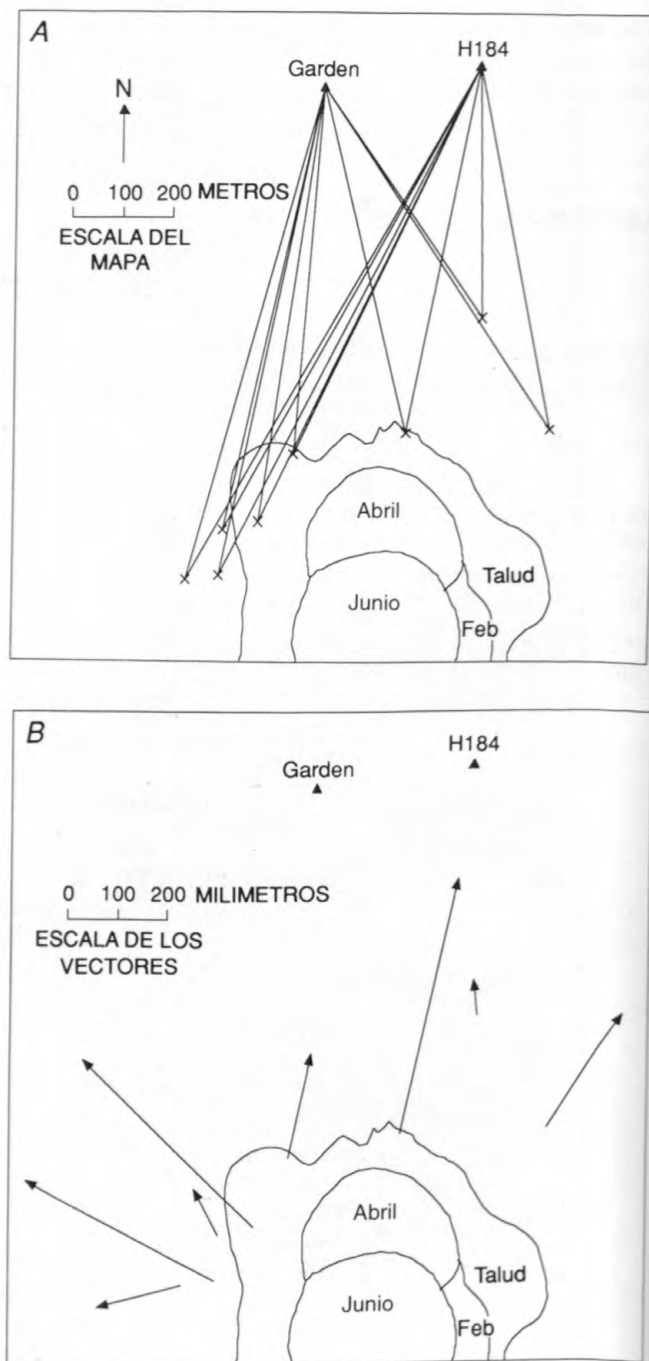
Las campañas de nivelación y trilateración demandaban mucho personal y consumían mucho tiempo. Se necesitaban tres a cuatro personas para nivelar, y por lo menos cuatro o cinco para triangular. Las estaciones de nivelación y trilateración consistían de postes de acero de 1.5 m con identificaciones metálicas o de las estacas de varilla de las fallas de cabalgamiento. Entre los puntos de nivelación habían aproximadamente 50-100 m. Usamos miras colapsables de fibra de vidrio de 4 m y un nivel automático Lietz B4. Un poste en el piso oriental del cráter servía como punto de

referencia; sus movimientos fueron vigilados midiendo los ángulos verticales del piso del cráter al norte del domo. El desplazamiento vertical para el episodio de construcción del domo del 18-20 de Junio de 1981 está ilustrado en la figura 6.10. El poste de referencia para este episodio fue la estación 120; este subió 75 mm entre Abril 14 y Junio 15 antes que empezara el crecimiento y retornó a su elevación del 14 de Abril para el 24 de Junio, después de la emisión.

Las estaciones instrumentales de trilateración estaban localizadas aproximadamente 700 m al norte del domo y se asumió que eran estables. Se midió la distancia entre las dos estaciones instrumentales para obtener una línea base. El movimiento de las estaciones instrumentales fue verificado con medidas hechas desde Harry's Ridge al norte del domo (Iwatsubo, Topinka, y Swanson, capítulo 8). El EDM fue montado sobre uno de los postes, mientras personas aguantaban prismas en los postes que servían como blancos. Después se movía el instrumento a la segunda estación instrumental y se calculaban las distancias a todos los puntos. El gran desplazamiento observado durante el episodio de Septiembre de 1981 (fig. 6.11) fue mucho mayor que cualquier movimiento pequeño que pudo haber ocurrido en las estaciones instrumentales.

En 1983, una red de triangulación fue establecida para vigilar el domo. Se establecieron dos estaciones instrumentales en el piso del cráter y los blancos en las partes inaccesibles del domo fueron marcados con pintura fosforescente que fue tirada en fundas desde la puerta de un helicóptero. Se midió la distancia y acimut de la línea base entre las dos estaciones instrumentales. Desde la primera estación instrumental, se midieron los ángulos de cenitales y horizontales a todos los blancos (con referencia a la segunda estación de instrumentos). Entonces se movía rápidamente el teodolito a la segunda estación instrumental y se repetía el procedimiento. Los datos obtenidos utilizando este método no eran tan exactos como aquellos adquiridos con el EDM, parcialmente debido a la dificultad de apuntar el teodolito a la misma parte del blanco que consistía de una mancha de pintura. Pero con el tiempo, se determinaron tendencias y desplazamientos vectoriales confiables.

Durante los meses de invierno, debido a la cobertura de nieve, era difícil hacer las medidas. Mientras que se podía completar la trilateración si la acumulación de nieve era menor a 1 m (la altura típica de un poste sobre el suelo), solo se podía hacer la nivelación si el suelo estaba libre de nieve. También se discontinuó la triangulación porque la nieve cubrió los blancos inaccesibles que no pudieron ser sacados.



**Figura 6.11.** Datos de trilateración durante el episodio de construcción del domo de Septiembre 6, 1981. A, Red con aquellas estaciones que pudieron ser medidas desde las dos estaciones instrumentales. Normalmente, hay muchos más blancos, pero las condiciones adversas limitaron los datos. B, Vectores de desplazamiento calculados con las medidas. Cambios en la distancia de la pendiente y los vectores de desplazamiento están en milímetros. Cambios en la distancia de la pendiente eran acumulativos y permanentes. Escala del mapa es diferente a la escala de vectores. "Feb," "Abril," y "Junio" identifican lóbulos emitidos en Febrero, Abril y Junio de 1981, respectivamente.

## Redes de EDM

Desde que se estableció la primera red de EDM en el cráter, siempre han habido por lo menos tres estaciones instrumentales para vigilar la mayor parte del domo posible. Desde cada estación instrumental, se miden con un EDM y un teodolito las distancias y ángulos a varios (2–8) blancos en el domo y piso del cráter. Por ejemplo, en 1990 habían cuatro estaciones instrumentales y aproximadamente 19 blancos con reflectores (fig. 6.9A). La configuración de la red cambiaba con la destrucción de algunos blancos por caídas de rocas o con la construcción del domo.

En 1985, empezamos a vigilar el domo desde Shoestring Notch durante los meses de verano. La vigilancia desde Shoestring Notch nos obligó a modificar nuestra técnica de colección de datos. Estacas de varilla que eran visibles desde Shoestring Notch fueron colocadas en la parte superior de la parte suroriental del domo. Los sectores occidentales y septentrionales del domo no podían ser vistos desde Shoestring Notch, pero podían ser vigilados por las redes de EDM debido a los sitios favorables para el aterrizaje de helicópteros en el domo y en el piso del cráter (figura 6.9B). Se establecieron aproximadamente 15–20 puntos con varilla para ser medidos desde Shoestring Notch. Las estacas de varilla fueron pintadas con pintura fosforescente anaranjado para que fueran visibles desde Shoestring Notch mediante el telescopio del teodolito. En Shoestring Notch una persona manejaba el instrumento, otra



**Figura 6.12.** Varilla (0.5 pulgadas, 1.3 cm de diámetro) con tapitas de aluminio usada como estaciones instrumentales en el domo y en el piso del cráter. Las tapitas de aluminio pueden ser estampadas con la identificación de la estación. Estas tapas fueron compradas comercialmente.

escribía, mientras que otra persona colocaba el reflector en cada varilla en el domo, después que se tomaban las medidas la persona se desplazaba rápidamente a la próxima varilla hasta que se hacían todas las medidas. La comunicación por radio era esencial para este tipo de levantamiento. Dado que los ángulos cenitales y horizontales se medían hasta la parte de arriba de cada varilla, ninguna persona tenía que estar presente durante estas mediciones. Para los ángulos horizontales había un punto de referencia en el piso del cráter.

### Estaciones instrumentales y blancos

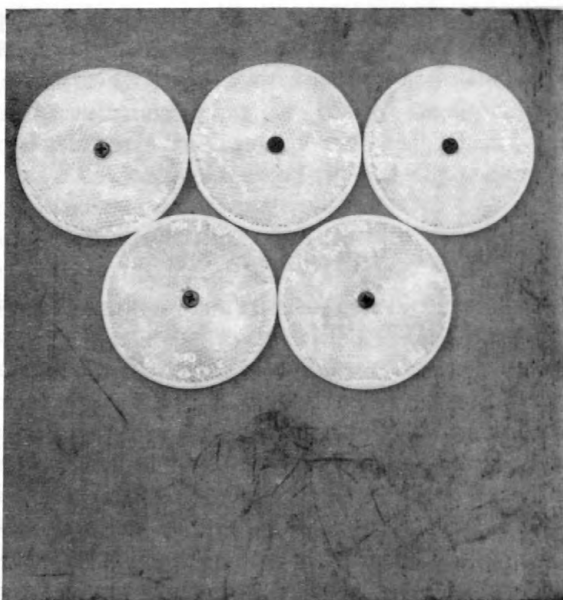
Las estaciones instrumentales se establecen clavando estacas de varilla de 40–50 cm en el suelo hasta lo más que se puede o hasta que sobresalen 5–10 cm. Se usan clavos PK de 5 cm para instalar estaciones sobre rocas. Para siempre centrar sobre el mismo punto, se poncha el centro de la varilla con un huequito; los clavos PK se pueden comprar con las cabezas ya horadas. Antes, la mayoría de las varillas que utilizábamos tenían un diámetro de 0.38 pulgadas (1 cm), pero actualmente se está usando una varilla de mayor diámetro, 0.5 pulgadas (1.3 cm) para aprovechar las tapitas de aluminio (comercialmente disponibles) que ya están marcadas y caben justamente sobre las varillas más resistentes (fig. 6.12). Las tapitas pueden ser marcadas para su identificación.

Los primeros blancos consistían de un grupo de reflectores plásticos de carretera (cada reflector tiene un diámetro de 8 cm) montados sobre tablas cuadradas de 30 cm por lado (figura 6.13A) que a su vez eran colocadas en el domo y en el piso del cráter. Para poder verlas mejor se pintaban las tablas de anaranjado antes de colocar los reflectores. Las tablas estaban sujetadas por trozos pequeños de varilla que eran introducidos al domo o por clavos PK y alambre de acero inoxidable, o por una combinación de varilla, clavos y alambre. Nuestra lema era "usar lo que servía." Los blancos para el piso del cráter estaban montados en postes que eran colocados en el piso. Los reflectores de carretera son baratos y funcionan para distancias pequeñas de EDM (<200 m). Sin embargo, mientras crecía el domo, las distancias aumentaban y tuvimos que usar mejores reflectores.

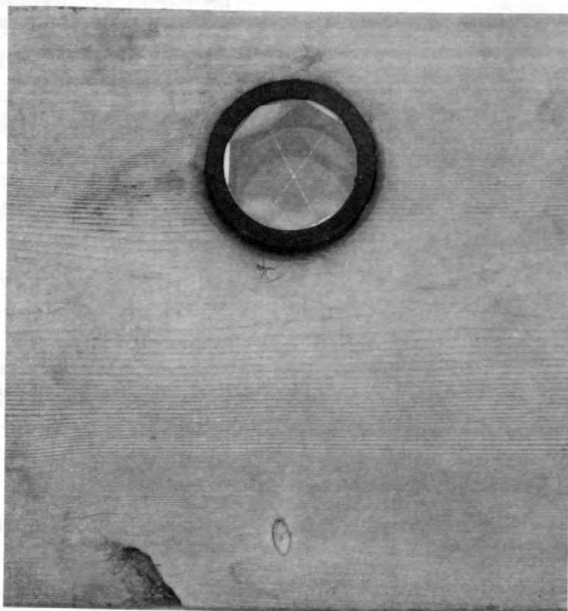
Otro tipo de reflector es un prisma sencillo de vidrio cubo-esquinado (7 cm diámetro) que se monta en un hueco taladrado en la tabla que servía de blanco. Aunque con estos prismas se podían medir distancias más grandes, eran caros (\$100–\$150), particularmente si se consideraba la vida corta de los mismos debido a las caídas de rocas, crecimiento del domo, y corrosión del vidrio (ver "Problemas de Blancos y Reflectores" a continuación). Por lo tanto, probamos retrorreflectores más económicos (\$45–\$60) que también satisficieron



A



B



**Figura 6.13.** A, La tabla de blanco con cinco reflectores plásticos de carretera. Nosotros apuntamos al centro del reflector central de la fila superior para medir ángulos. B, Tabla de blanco con un retrorreflector de vidrio montado. Se taladra un hueco por la tabla y después se coloca el reflector con silicón para sellar la tabla.

nuestras necesidades. Este tipo de reflector consiste de tres espejos ortogonales que emulan la esquina de un cubo. Estos reflectores de vidrio son fijados a las tablas de la misma manera que los prismas cubo-esquinados (fig. 6.13B). El costo es menor, permitiendo por lo tanto la colocación de más blancos en el domo. Aunque los retrorreflectores no tienen la misma calidad o exactitud que los prismas de vidrio cubo-esquinados, los grandes movimientos que ocurren en el domo hacen que estas desventajas sean insignificantes.

### EDM y Teodolito

En Octubre de 1981, usamos por primera vez un EDM, un instrumento Hewlett-Packard, modelo 3808A, infrarrojo de alcance mediano (Iwatsubo y Swanson, capítulo 10), para medir las distancias entre el piso del cráter y el domo. Los ángulos cenitales se miden con un teodolito tipo antiguo (lectura inversa), Wild T2. El HP3808A era el EDM más pequeño disponible para nosotros en 1981, pero debido a su tamaño y bulto era difícil entrar y usarlo en el cráter. El HP3808A podía medir grandes distancias, pero requería hasta un minuto por medida. Dada la lentitud de la medición y las condiciones variantes de vapor en el domo, muchas veces era difícil completar las medidas. Además, para medir los ángulos, era necesario remover el HP3808A del trípode para poder montar el teodolito. Cuando se realizaban varias medidas en la misma estación instrumental, era difícil y demoroso estar continuamente cambiando los instrumentos. Esto era un problema especialmente difícil cuando los movimientos estaban en el orden de varios o más centímetros por hora.

En 1982 se compró un EDM Lietz Red 1a para ser usado específicamente en el cráter. Este EDM es relativamente pequeño y puede ser montado directamente encima del teodolito usando una montura tipo yugo (fig. 6.14; tabla 6.1). El menor tamaño y peso del Lietz permiten que las personas puedan caminar entre las estaciones; como resultado, se ahorra un tiempo considerable de helicóptero, con la ventaja adicional que el piso del cráter y el domo pudieron ser observados en mayor detalle durante las campañas de levantamiento que antes. El Lietz funcionó muy bien mientras lo usamos, pero en 1988 se compró un Geotronics Geodimeter 210. El Geodimeter 210 es aún más pequeño, liviano y preciso que el Lietz Red 1A (tabla 6.1). Dado que el Geodimeter 210 se monta sobre el telescopio del teodolito es más fácil usarlo.

Para todas las medidas, se toma la temperatura y presión solamente en la estación instrumental. La temperatura, presión y humedad son los parámetros atmosféricos que se necesitan para hacer las correcciones de pendiente-distancia. Para las redes en el cráter,





**Figura 6.14.** Científicos midiendo distancias y ángulos desde la cima del domo. El EDM Lietz Red 1A está montado encima de un teodolito T2.

usamos un termómetro de mercurio manual porque las líneas son tan cortas que la temperatura tiene poco efecto sobre la distancia corregida. Se usa un altímetro/barómetro Thommens para medir la presión. No se mide la humedad debido a su efecto insignificante.

## Trípodes y montura

Hay dos métodos comunes para centrar trípodes sobre un punto, (1) un "tribrach" con una plomada óptica y (2) varilla telescópica para centralización. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas. El tipo de vigilancia que es requerido podría influenciar sobre la selección del tipo de trípode y el método de centralización. No importa el tipo que se escoja, pero sí es crítico chequear y mantener el mismo sistema de nivelación. Los dos sistemas son igualmente de fáciles para chequear y ajustar y el procedimiento que se escoje debe convertirse en parte de la rutina de mantenimiento.

## Tribrachs y trípodes estándar

Un tribrach con plomada óptica (ahora en adelante conocido como un tribrach) requiere de un trípode con una cabeza plana y una tuerca enroscada de  $5/8 \times 11$  (trípode estándar). Las ventajas de un tribrach son (1) la mayoría de los teodolitos y yugos de EDM caben en un tribrach, y (2) el trípode estándar puede ser colocado cerca al suelo. Esto es útil cuando el trabajo tiene que ser realizado bajo condiciones de mucho viento y/o sobre una roca sobre la cual está la estación. No solamente los vientos son menos severos cerca del suelo, pero los instrumentos son más fáciles de proteger y son más estables porque las piernas del trípode están bien abiertas.

Una desventaja del tribrach y trípode estándar es la necesidad de medir la altura de instrumento (HI-height of instrument) sobre la señal de la estación y corregir para las diferentes HI's durante la vigilancia rutinaria. Si se establece una metodología para medir la HI cada vez, y todo el mundo cumple, los problemas serán minimizados. Sin embargo, errores pueden ser introducidos si se mide inconsistentemente la HI.

**Tabla 6.1.** Especificaciones para los EDM's Lietz Red 1A y Geodimeter 210.

Especificación	Lietz	Geodimeter
Alcance	1 Prisma 3 Prismas	2.3 km 4.0 km
Precisión:	$\pm (5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$	$\pm (5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})^1$ $\pm (5 \text{ mm} + 3 \text{ ppm})^2$
Peso <sup>3</sup> :	3.5 kg	1.4 kg
Dimensiones:	160x90x180 mm	175x85x85 mm
Alcance de temperatura:	-20°C hasta +50°C	-20°C hasta +50°C

<sup>1</sup> Para una sola medida estándar

<sup>2</sup> Para valor aritmético medio (cada medida mostrada es una media actualizada)

<sup>3</sup> Peso incluye batería interna

Mientras se hacen las medidas para vigilar el domo, es importante revisar los datos crudos en el campo para ver si han habido cambios significativos desde la última medida. Esta práctica también ayuda detectar errores grandes en las medidas. Si se usa un tribrach sin intentar de establecer un constante de HI para cada estación, la comparación de los datos crudos puede ser complicado. La medida de distancias de pendiente y ángulos cenitales dependen de la HI. Si cada vez que se coloca el tribrach cambia la HI, los datos crudos de distancia de la pendiente y ángulos cenitales van a cambiar independientemente de si se mueve el blanco. Para comparar medidas sucesivas, los datos deben ser reducidos a una distancia horizontal o de punto-a-punto. Estas reducciones pueden ser hechas en el campo con una calculadora programable o con una computadora pequeña. Este procedimiento coge tiempo y podría ser un factor crítico cuando las condiciones atmosféricas y eruptivas cambian rápidamente.

Lo ideal es consistentemente usar la misma HI para cada estación instrumental. Sin embargo, con un tribrach esto también es difícil y demoroso. Una manera fácil de hacer esto es siempre usar el mismo trípode con las piernas completamente extendidas y marcar donde las piernas deberán ser colocadas. Alternativamente, parches de cemento con huecos pequeños para las patas pueden ser usadas para siempre posicionar el trípode en el mismo sitio. Nosotros hemos tenido éxito con esta técnica, que tomamos prestada del Observatorio Volcánico de Hawaii, para algunas estaciones en el Mount St. Helens (Iwatsubo, Topinka, y Swanson, capítulo 8).

### Trípode con varilla de centralización

El uso de trípodes con varilla de centralización simplifican la vigilancia rutinaria y se ha convertido en nuestro método preferido. El sistema que emplea trípodes con varilla de centralización son fáciles y rápidos para montar usando la varilla (tallo) telescópica de centralización. Cada estación instrumental tiene una

altura de tallo fijo, y el trípode se monta cada vez con esta altura. Como la altura de la varilla es siempre igual, las distancias crudas de pendiente pueden ser comparadas porque las correcciones atmosféricas no afectan mucho las líneas cortas (generalmente <400 m). No hay ningún error por cinta métrica con la varilla de centralización, pero errores pueden ser introducidos mediante lecturas incorrectas de la altura de la varilla.

Los trípodes con varilla de centralización tienen dos desventajas principales. Las varillas de centralización permiten que el trípode sea bajado solo hasta el largo mínimo de la varilla, que es un metro. El instrumento por lo tanto puede quedar muy alto para trabajar en condiciones de mucho viento o sobre una roca alta. La segunda desventaja es que los trípodes con varilla de centralización tiene una cabeza única que conecta a la varilla y requiere de un adaptador especial (alrededor de \$125 cada uno) para montar equipo estándar de agrimensura. Esto no es un problema si se tienen todas las piezas, pero si se olvida o se pierde un adaptador, difícilmente se podrán hacer las medidas. Es una buena idea siempre tener un adaptador de repuesto en el campo.

### Mantenimiento y Calibración del Equipo

El mantenimiento y calibración del equipo es importante y debe formar parte del programa rutinario. Los tribrachs, trípodes con varilla de centralización y trípodes estándar pueden ser probados y ajustados por el usuario. Los EDM's deben ser calibrados con las líneas de referencia establecidas por el Servicio Geodésico Nacional; sin embargo pueden ser verificados en áreas donde no existen líneas de referencia. No se conocerá la exactitud del EDM, pero si su precisión, y precisión es un factor clave para la vigilancia rutinaria. Si el EDM mide la línea de referencia con precisión, los datos en el campo van a ser creíbles. Otra manera de chequear un EDM es medir su frecuencia de modulación (la frecuencia que se usa para medir distancias). Esta frecuencia está en los manuales del fabricante. Es importante usar un contador de frecuencia que tiene una orden de magnitud más alta que la frecuencia de modulación para asegurar medidas correctas. Estos contadores son costosos y no son equipo estándar; el CVO no tiene uno. Si existe una discrepancia entre las líneas de referencia o medidas de frecuencia, el EDM debe ser revisado y calibrado en la fábrica.

Los teodolitos son los únicos instrumentos que tienen que ser probados por la fábrica o un distribuidor autorizado. La cantidad y condiciones de uso deben determinar el programa de calibración y limpieza del EDM y del teodolito.

El procedimiento para chequear y ajustar los tribrachs o varillas de centralización es sencillo y debe ser realizado a menudo. Generalmente se incluyen las instrucciones en el manual del instrumento o se puede usar una referencia general de agrimensura (Brinker y Minnick, 1987). El trabajo de campo rutinario es duro para el equipo. Los movimientos durante el transporte en el vehículo o un helicóptero pueden causar que éste se desajuste. Si el método de centralización está desajustado, se afectarán los datos. Una vez en el Mount St. Helens, el trípode con varilla de centralización del cráter se descalibró, y no se notó inmediatamente. Las medidas durante ese período de tiempo demostraron una dispersión significativa y causaron preocupación sobre el comportamiento errático del domo. Después que se ajustó la varilla de centralización, los datos se suavizaron e ilustraron que no había ocurrido ninguna deformación.

## Problemas con los Blancos y Reflectores

El problema principal que se ha tenido con los reflectores ha sido la corrosión y soplete de "arena" en los reflectores de plástico y vidrio. El ácido fluorhídrico mezclado con vapor puede corroer fuertemente el vidrio en solamente una semana. Otros gases volcánicos depositan sublimados que también los desgastan. La ceniza que es acareada por el viento es también un abrasivo fuerte. Estos factores tienen que ser tomados en cuenta cuando se colocan reflectores en el domo. Si hay mucho gas presente, los reflectores no van a durar mucho. Nosotros hemos aprendido a evitar áreas que están frecuentemente cerca o viento abajo de fumarolas, aún si las fumarolas aparentan ser débiles. Aún tomando estas precauciones, los reflectores colocados en áreas aparentemente libres de gases y protegidos de los vientos y vapor comúnmente se corroen dentro de una semana a un mes. Por estas razones, es sabio colocar los blancos en más sitios que lo absolutamente necesario.

Caídas de rocas del domo y descantillamiento de caras de rocas en las cuales están colocados los reflectores, han causado la destrucción de muchos reflectores. No es raro perder hasta 90 por ciento de los reflectores antes y durante los episodios de construcción del domo.

Durante los meses de invierno, problemas ocurren cuando nieve y hielo cubren los reflectores. Desde 1981 hasta 1984, salíamos frecuentemente a medir el domo, aún durante el invierno. Las temperaturas bajas no permiten la fusión de la nieve o hielo en los reflectores y por lo tanto es necesario que alguien visite y limpie cada reflector. Aún si el reflector está libre de hielo, el vapor puede condensarse en los reflectores, y alguien tenía que continuamente estar secándolo hasta que se complete la

medida. Esto consume tiempo y a menudo es demasiado emocionante (debido a las caídas de rocas del domo y condiciones de hielo) para la persona realizando la limpieza. A fines de 1980 la actividad eruptiva disminuyó, y las cuadrillas no tenían que salir con tanta frecuencia, y a veces solo cuando hacía buen tiempo y consecuentemente los reflectores estaban libre de nieve.

Las condiciones vaporosas también limitaban la habilidad de completar una medida. Ningún EDM infrarrojo puede medir a través de vapor. Esto ha sido un problema desde que se estableció la primera red, particularmente durante los meses de invierno. Es común que durante el invierno haya que esperar una hora o más hasta que se despeje el vapor para poder completar una medida. Antes de los episodios de construcción del domo los datos son críticos, y tales demoras en tiempo, aunque frustrantes, valen la pena.

Si hay que medir ángulos, siempre se debe usar el mismo punto de referencia en el blanco. Si se usan prismas, usar el medio de la prisma o prismas como el punto de referencia para todos los ángulos. Esto simplifica el procedimiento y es fácil recordar.

## COORDENADAS

El sistema de coordenadas que usamos está basado en el sistema de coordenadas planas estatales convertido en metros. Los puntos iniciales conocidos fueron localizados por la División Nacional de Mapeo como parte del control para producir los mapas topográficos del domo y cráter. Todas las estaciones instrumentales, los puntos de referencia y blancos tienen coordenadas  $x$  (este-oeste) e  $y$  (norte-sur), y una elevación. Las coordenadas se calculan cada vez que se hace una medida y pueden ser comparadas con la medida previa para crear un vector de desplazamiento. Antes de los episodios de construcción del domo, estos vectores pueden indicar la localización de la fuente de presión dentro o debajo del domo.

## Arreglo de la Red

Nosotros establecimos una red usando coordenadas empezando con dos puntos nominalmente estables, uno instrumental y otro de referencia, cada uno con su longitud, latitud y elevación conocida. La longitud y latitud son convertidas a coordenadas  $x$  e  $y$ , respectivamente que son más fáciles de manipular para las reducciones rutinarias de datos. La conversión se hace mediante un paquete de programas disponibles comercialmente (Departamento de Comercio, División del Servicio Geodésico Nacional). Cuando no hay dos



puntos conocidos, un método alternativo es escoger dos puntos prominentes de un mapa y establecer sus latitudes, longitudes y elevaciones. Todas las localizaciones subsecuentes serán relativas a estos puntos de partida. Los puntos de partida no tienen que tener localizaciones exactas, pero todas las localizaciones calculadas a partir de estos puntos serán internamente consistentes.

Cuando establecemos una red, tratamos de limitar el número de puntos de referencia. La situación ideal sería un punto de referencia para cada estación de referencia. Los mejores puntos de referencia son las torres de acero que fueron instaladas para otras medidas de EDM alrededor del Mount St. Helens (Swanson y otros, 1981; Iwatsubo, Topinka, y Swanson, capítulo 8). También usamos postes de acero y mástiles de antenas. Cualquier cosa sobresaliente que se puede reconocer fácilmente puede ser usado, siempre se debe tomar en cuenta la bruma del verano y la nieve del invierno (ver figura 6.8 para las referencias horizontales usadas en 1990).

Uno de los requisitos más importantes para usar un sistema de coordenadas es localizar anualmente los puntos instrumentales y de referencia. Esto es especialmente crítico si las estaciones están localizadas en sitios potencialmente activos o inestables, como el domo y piso del cráter. Todas las estaciones instrumentales en el domo son localizadas por lo menos una vez al año, aún cuando no ha habido actividad eruptiva. Cuando hay actividad eruptiva, tratamos de relocalizar cada estación instrumental en el domo. Esto siempre crea un desajuste en nuestros datos de coordenadas, pero es necesario. Una manera de evitar este desajuste es localizar la estación instrumental cada vez que se ocupa. Esto es teóricamente bueno, pero es difícil en la práctica. Se podrían usar dos maneras para localizar la estación instrumental: (1) medir la distancia y ángulo cenital a un punto conocido, y un ángulo horizontal entre ese punto y otro punto conocido, y (2) localizar la estación desde otra estación instrumental, como se localizaría un blanco. Para poder usar el primer método sin una persona que coloque el reflector, un reflector debe ser instalado en una torre, mástil o poste conocido. En el Mount St. Helens, este tipo de estación está típicamente localizado en el borde del cráter para mejor visibilidad. Durante los meses de verano es posible medir la distancia, pero en invierno, escarcha y nieve pueden cubrir el reflector. Es demasiado costoso volar a y limpiar el reflector cada vez que se hace una medida. El costo prohíbe el segundo método también, dado que se tendría que hacer un viaje especial cada vez que se toma una medida. Lo mejor que podemos hacer es localizar cada punto de referencia y estación

instrumental por lo menos una vez al año, o cuando sea necesario debido a un movimiento significativo del domo.

## PROGRAMAS Y ANOTACIONES

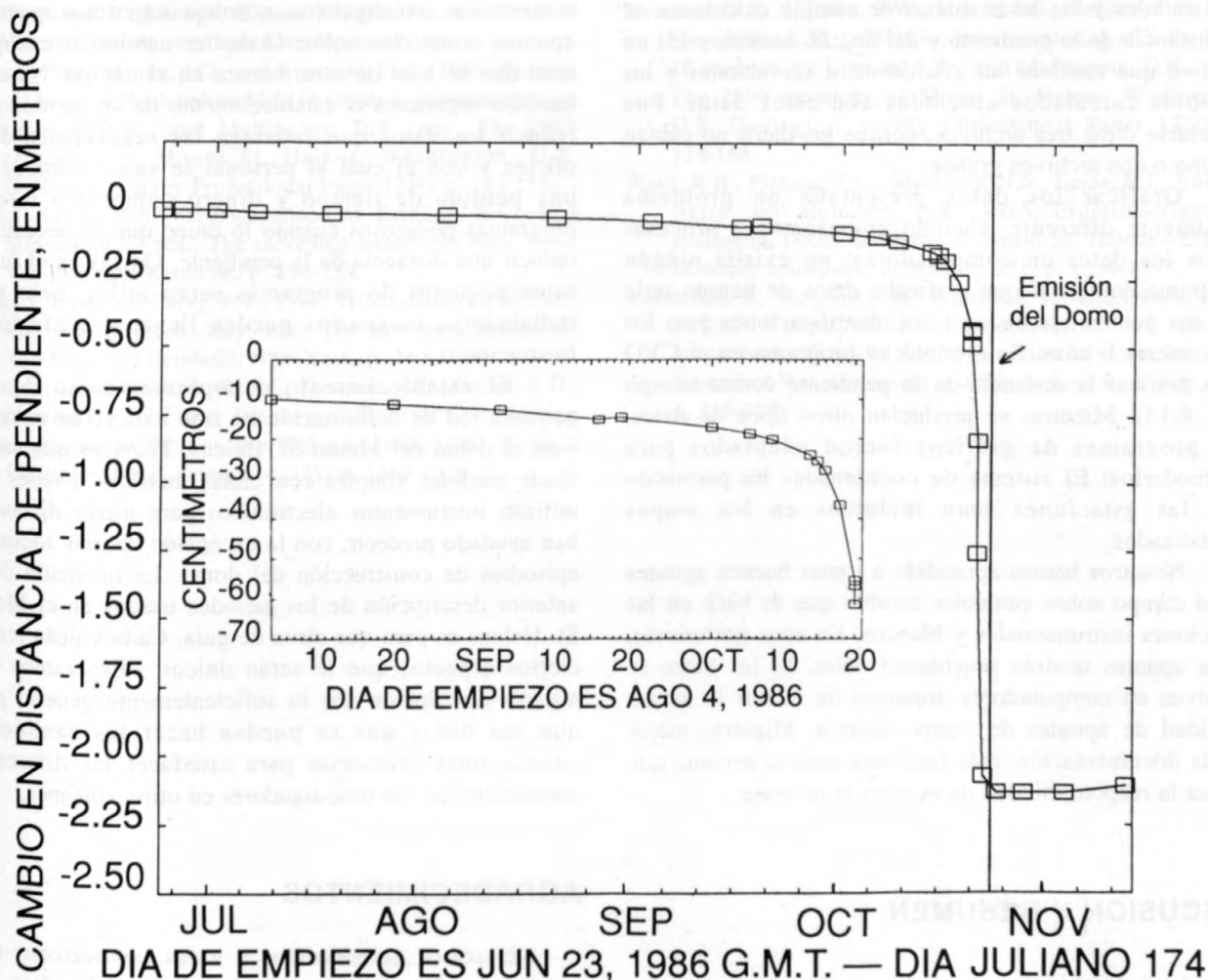
La reducción de los datos de EDM puede ser realizada con programas propios o comerciales. La mayoría de nuestros programas de reducción y gráficos han sido escritos por el personal del CVO. Nosotros hemos progresado desde la reducción manual de datos, a una computadora de mano HP-41C, a una computadora mini-VAX y finalmente a una computadora PC. La ventaja de los programas propios es la posibilidad de tener programas que satisfagan las necesidades y poder ser modificados según las necesidades. Mientras adquirimos experiencia, nuevos conocimientos pueden ser aplicados para expandir y mejorar los programas existentes.

Las distancias de pendiente corregidas para los parámetros atmosféricos forman la base para el cálculo de las distancias horizontales y de punto-a-punto. Siempre entramos los parámetros atmosféricos en la fórmula dada por el fabricante del EDM, en vez de usar las correcciones atmosféricas o ambientales que vienen con el instrumento, porque las tablas no son lo suficientemente exactas para la mayoría de las aplicaciones y la fórmula es más consistente. Para calcular las distancias de punto-a-punto o horizontales, se necesita tener los ángulos cenitales o verticales o las elevaciones de las estaciones.

Inicialmente, los programas fueron escritos para reducir los datos a una distancia de la pendiente a una altura de varilla fija, usando solo la temperatura del instrumento y la presión para las correcciones atmosféricas. Este método trabajó hasta que la altura fija de varilla cambió para algunas medidas. Entonces se escribió un programa para convertir la distancia de la pendiente desde una altura de varilla variable a una distancia de la pendiente con la altura de varilla correcta. Este programa de conversión fue crítico cuando se hizo necesario la vigilancia del domo desde Shoestring Notch en el borde del cráter. En Shoestring Notch, un trípode con varilla de centralización fue usado al comienzo para establecer la altura de varilla. Pero, debido al viento fuerte, fue necesario usar un trípode estándar y un tribrach para poder montar el equipo cerca al suelo, y consecuentemente se usó una HI diferente cada vez. Este programa de conversión fue la única manera para comparar cambios en la distancia de la pendiente.

Después años de trabajo con los datos de EDM recomendamos reducir los datos a distancias





**Figura 6.15.** Los cambios de distancia para una estación típica en el domo durante períodos tranquilos y eruptivos. Esta estación, localizada en la parte noroeste del domo, fue medida desde una estación instrumental en el piso septentrional del cráter. El cuadro interior es una ampliación de los datos que precedieron el episodio de construcción del domo de Octubre de 1986. Mediante la observación de la curva mientras se acerca el episodio, se puede predecir el comienzo de la actividad. Un nuevo lóbulo en el domo fue observado por primera vez la mañana de Octubre 22 (línea vertical).

punto-a-punto. Nosotros medimos rutinariamente los ángulos cenitales, y es fácil calcular las distancias punto-a-punto. No existe la necesidad de usar programas de conversión, y cualquier sistema de trípode puede ser usado para obtener datos crudos. Cuando solo se puede medir la distancia de la pendiente y no el ángulo cenital, todavía se pueden calcular las distancias punto-a-punto, si no ha habido deformación a gran escala. Dada las distancias cortas (200-400 m), la diferencia de ángulo cenital que se necesita para cambiar la distancia punto-a-punto por 1 mm es aproximadamente 2.5 minutos de arco para un ángulo cenital de 84 grados (ángulo cenital promedio en el Mount St. Helens). El error típico para ángulos cenitales en el cráter es menor a 15 segundos de arco, así que los 2.5 minutos están muy por encima de nuestro ruido de fondo.

Los datos reducidos son almacenados en la computadora. El almacenaje de todos los datos crudos pertinentes ahorrará tiempo si se tienen que hacer nuevos cálculos. Las distancias crudas de pendiente, ángulos cenitales, temperaturas, presiones y alturas de instrumentos y blancos facilitarán una reducción rápida de los datos posteriormente. Por muchos años, no almacenamos estos datos en la computadora, pero mientras aprendimos más y más, fue necesario reprocesar los datos, y todos los datos crudos tuvieron que ser ingresados nuevamente a la computadora. Ahora, todos los datos pertinentes se almacenan conjuntamente con los datos reducidos. Nosotros tenemos tres archivos de datos para cada blanco: (1) un archivo que contiene la distancia cruda y reducida y los cambios asociados, (2) un archivo que contiene los componentes verticales y

horizontales y las tasas diarias de cambio calculadas de la distancia de la pendiente y del ángulo cenital, y (3) un archivo que contiene las coordenadas, elevaciones y los cambios calculados asociados con estos datos. Fue necesario crear tres archivos, porque los datos no cabían en uno o dos archivos grandes.

Graficar los datos presentaba un problema totalmente diferente. Cuando empezamos a procesar todos los datos en computadoras, no existía ningún programa comercial que graficaba datos de tiempo-serie con los puntos adecuados y las identificaciones para los días, meses o años. Se escribió un programa en el CVO para graficar la distancia de la pendiente contra tiempo (fig. 6.15). Mientras se producían otros tipos de datos, los programas de gráficos fueron adaptados para acomodarlos. El sistema de coordenadas ha permitido que las estaciones sean incluidas en los mapas digitalizados.

Nosotros hemos aprendido a tomar buenos apuntes en el campo sobre cualquier cambio que se hace en las estaciones instrumentales y blancos. En años posteriores, estos apuntes tendrán muchísimo valor. Si los datos se archivan en computadores, tratamos de incluir la mayor cantidad de apuntes de campo posible. Mientras mejor sea la documentación, más fácil será para la persona que tendrá la responsabilidad de escribir el informe.

## DISCUSION Y RESUMEN

La habilidad de ocupar nuevamente las estaciones es un factor crítico para la determinación del equipo a usarse y la precisión requerida. La exactitud del EDM debe estar en acorde con la resolución que demanda la vigilancia. Es mejor y más versátil usar un EDM más exacto. Si los blancos serán medidos frecuentemente, la precisión no tiene que ser tan buena como para aquellas estaciones que se miden periódicamente. La toma de medidas frecuentes permite el establecimiento de tendencias en los datos y disminuyen el efecto de unos pocos puntos malos. Es importante seguir estas guías, pues desviaciones en las tendencias normalmente implican cambios en el volcán. Nosotros nunca confiamos en medidas únicas sino que siempre buscamos patrones y tan pronto como posible medimos nuevamente.

Es importante que los métodos de campo y oficina sean consistentes. Hemos aprendido, aunque a la mala, que a la larga, inconsistencia, crea más trabajo. Trate de tener métodos sencillos sin que se afecten los datos recolectados.

Una vez que los equipos y procedimientos de campo se establecen, el procesamiento de datos y el almacenaje se hacen importante. Para propósitos

históricos e investigativos, nosotros sugerimos mantener apuntes completos sobre cualquier cambio o cualquier cosa que se hizo de otra manera en el campo. Nosotros también sugerimos el establecimiento de un método para reducir los datos que satisfaga las necesidades de la oficina y con el cual el personal se siente cómodo. Es una pérdida de tiempo y dinero comprar o diseñar programas poderosos cuando lo único que se necesita es reducir una distancia de la pendiente. Quizás en el futuro estos paquetes de programas serán útiles, pero para trabajadores inexpertos pueden llevar a confusión y frustración.

El establecimiento e implementación de una pequeña red de deformación ha sido exitoso en el cráter y en el domo del Mount St. Helens. Técnicas que varían desde medidas simples con cintas métricas a redes que utilizan instrumentos electrónicos para medir distancias han ayudado predecir, con la excepción de uno, todos los episodios de construcción del domo. La intención de la anterior descripción de los métodos usados en el Mount St. Helens es para que sirva de guía. Cada volcán tendrá ciertos aspectos que le serán únicos. Esperamos que nuestra descripción sea lo suficientemente general para que sea útil y que se puedan hacer los cambios y adaptaciones necesarias para satisfacer las diferentes necesidades de los investigadores en otros volcanes.

## AGRADECIMIENTOS

Nosotros agradecemos a todas las personas que ayudaron a instalar y medir las redes del cráter. De manera especial agradecemos a Bill Chadwick, John Ewert, Christina Heliker, y Peter Otway (Nueva Zelanda DSIR) por haber pasado largas horas ayudando a diseñar e instalar muchos de los métodos que han sido tan importantes para nuestro proyecto. También agradecemos a Robin Holcomb, quien fue clave para los esfuerzos de nivelación.

## REFERENCIAS CITADAS

- Brinker, R.C., and Minnick, Roy, eds., 1987, *The surveying handbook*: New York, Van Nostrand Reinhold, 1270 p.
- Chadwick, W.W., Jr., and Swanson, D.A., 1989, Thrust faults and related structures in the crater floor of Mount St. Helens volcano, Washington: *Geological Society of America Bulletin*, v. 101, no. 12, p. 1507-1519.
- Chadwick, W.W., Jr., Swanson, D.A., Iwatsubo, E.Y., Heliker, C.C., and Leighley, T.A., 1983, Deformation monitoring at Mount St. Helens in 1981 and 1982: *Science*, v. 221, no. 4618, p. 1378-1380.
- Kinoshita, W.T., Swanson, D.A., and Jackson, D.B., 1974, The measurements of crustal deformation related to volcanic activity at Kilauea volcano, Hawaii, *en* Civetta, L.

Gasparini, P., Luongo, G., and Rapolla, A., eds., Physical volcanology: Amsterdam, Elsevier, p. 87-115.

Lipman, P.W., Moore, J.G., and Swanson, D.A., 1981, Bulging of the north flank before May 18 eruption-geodetic data, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.R., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 143-155.

Shafer, L.M., 1987, Triangulation, *en* Brinker, R.C., and Minnick, Roy, eds., The surveying handbook: New York, Van Nostrand Reinhold, p. 296-339.

Sturges, B.N., and Carey, F.T., 1987, Trilateration, *en* Brinker, R.C. and Minnick, Roy, eds., The surveying handbook: Van Nostrand Reinhold, New York, p. 340-389.

Swanson, D.A., Casadevall, T.J., Dzurisin, D., Malone, S.D., Newhall, C.G., and Weaver, C.S., 1983, Predicting eruptions at Mount St. Helens, June 1980 through December 1982: Science, v. 221, p. 1369-1376.

Swanson, D.A., Lipman, P.W., Moore, J.G., Heliker, C.C., and Yamashita, K.M., 1981, Geodetic monitoring after the May 18 eruption, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.R., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 157-168.

Waitt, R.B., Pierson, T.C., MacLeod, N.S., Janda, R.J., Voight, Barry, and Holcomb, R.T., 1983, Eruption-triggered avalanche, flood, and lahar at Mount St. Helens—Effects of winter snowpack: Science, v. 221, p. 1394-1397.

Yokoyama, I., Yamashita, H., Watanabe, H., and Okada, H., 1981, Geophysical characteristics of dacite volcanism—The 1977-1978 eruption of Usu volcano: Journal of Volcanological and Geothermal Research, v. 9, p. 335-358.

apropiadas para la aplicación específica. Idealmente, la magnitud y dimensión de la deformación del suelo deben ser determinadas con medidas geodéticas antes de que se instalen los inclinómetros. Segundo, se debe hacer el esfuerzo para fijar los inclinómetros al suelo de una manera estable y significativa y protegidos de efectos ambientales extrínsecos. La mejor manera de hacer la instalación depende de los recursos disponibles: limitaciones logísticas, condiciones de tiempo, pero en general se prefieren hacer instalaciones permanentes en roca dura o sedimentos bien cementados. Para poder determinar los factores extrínsecos y la evolución de la inclinación del suelo, se deben instalar no menos de tres inclinómetros en una red que cubra el área de interés. Las estaciones localizadas en los flancos de la montaña se sitúan en el borde de la zona de deformación, pero en tales sitios se deben instalar inclinómetros de forma que los factores ambientales afecten las inclinaciones de poca importancia. Si es posible, para redundancia se deben instalar dos inclinómetros en cada estación y cualquier diferencia entre los dos registros de inclinación deben ser tomadas en cuenta en la interpretación de la confiabilidad de las medidas. Un tercer paso importante es instalar suficientes datos de línea base para cada estación inclinométrica para caracterizar mejor los efectos de los factores ambientales antes como los efectos extrínsecos que pueden ser reconocidos e incluidos en las interpretaciones de la deformación volcánica. Un cuarto paso esencial es registrar los datos de cada inclinómetro continuamente para que la información disponible sobre el estado actual del suelo, tendencias de los cambios regionales y cambios permanentes. Este sistema debe incluir (1) conocimiento de la historia eruptiva reciente del volcán basada en registros históricos y estudios geológicos, (2) los catálogos espaciales y temporales de la deformación del suelo determinados por los datos de los inclinómetros, campañas de nivelación, mediciones de ERT o cualquier otra técnica geodética y (3) una información de vigilancia, incluyendo observaciones visuales, información química y medidas de gases volcánicos. Para este fin, se deben tener registros de datos de terreno las diferentes medidas para poderlas comparar con los datos de datos para comparación.





## 7. Inclínómetros Electrónicos para la Vigilancia Volcánica: Lecciones del Mount St. Helens

Por Daniel Dzurisin

### Abstracto

La proliferación reciente de inclinómetros electrónicos apropiados para la vigilancia volcánica presenta no sólo una oportunidad, si no también un desafío para los vulcanólogos encargados de dar avisos oportunos de futuras erupciones. Por un lado, los inclinómetros son valiosos instrumentos de vigilancia al estar ampliamente disponibles, ser relativamente económicos, fáciles de instalar y operar y capaces de vigilar continuamente la deformación del suelo en áreas remotas y peligrosas. Por el otro lado, algunas de las características de los inclinómetros pueden introducir información falsa y provocar confusión durante emergencias volcánicas verdaderas o percibidas si no se instalan, mantienen y se interpretan sus datos con bastante cuidado. La mayoría de los inclinómetros son instrumentos de líneas de base cortas que miden la inclinación sobre la horizontal cuya dimensión varía desde unos centímetros hasta unos pocos metros, varios órdenes más pequeños de magnitud que la escala de la deformación del suelo asociada con la mayoría de la actividad volcánica. Los efectos locales causados por factores como pendiente o características del suelo pueden ser mayores que los efectos de mayor escala asociados con una deformación volcánica. Por lo tanto, es imperativo verificar los datos provenientes de los inclinómetros y referirlos al campo de deformación de mayor escala tomando medidas geodésicas que cubran completamente el área de interés. Otras características de los inclinómetros que afectan su aplicabilidad a la vigilancia volcánica incluyen deriva secular, soluciones intermedias en cuanto a sensibilidad, repetitividad y alcance, y susceptibilidad a los factores ambientales como temperatura, preparación de la estación, precipitación, ciclos de congelación y fundición y cambios en el nivel del agua subterránea. Estas características, conjuntamente con el hecho que el patrón de inclinación del suelo asociada con la intranquilidad volcánica puede ser extremadamente variable en espacio y tiempo, tanto en un mismo volcán como entre diferentes volcanes, dificultan grandemente la interpretación de los datos de los inclinómetros durante una crisis.

Se pueden tomar algunos pasos para mitigar estos problemas. Primeramente, se deben seleccionar los inclinómetros con las especificaciones (sensibilidad, repetitividad, alcance, características de deriva) que son

apropiadas para la aplicación específica. Idealmente, la magnitud y dimensión de la deformación del suelo deben ser determinadas con medidas geodésicas antes de que se instalen los inclinómetros. Segundo, se debe hacer el esfuerzo para fijar los inclinómetros al suelo de una manera estable y significativa y protegerlos de efectos ambientales extrínsecos. La mejor manera de hacer la instalación depende de los recursos disponibles, limitaciones logísticas, condiciones de campo, pero en general es preferible hacer instalaciones subterráneas en roca dura o sedimento bien drenado. Para poder determinar los patrones espaciales y temporales de la inclinación del suelo, se deben instalar no menos de tres inclinómetros en una red que cubre el área de interés. Las estaciones localizadas en los flancos superiores de un volcán intranquilo o en algún otro sitio donde se esperan grandes inclinaciones deben tener precedencia, porque en tales sitios, es menos probable que los factores ambientales oculten las inclinaciones de onda larga de la corteza causadas por la intranquilidad. Si es posible, para redundancia se deben instalar dos inclinómetros en cada estación, y cualquier diferencia entre los dos registros de inclinación deben ser tomados fuertemente en consideración al interpretar la confiabilidad de las medidas. Un tercer paso importante, es adquirir suficientes datos de línea base para cada estación inclinométrica para caracterizar plenamente su respuesta a factores ambientales, tales como los efectos extrínsecos que pueden ser reconocidos e incluidos en las interpretaciones de la intranquilidad volcánica. Un cuarto paso esencial es interpretar los datos de cada inclinómetro conjuntamente con toda la información disponible sobre el estado actual del volcán, tendencia de los cambios recientes y posibles desenlaces. Este contexto debe incluir (1) conocimiento de la historia eruptiva reciente del volcán basado en registros históricos y estudios estratigráficos, (2) los patrones espaciales y temporales de deformación del suelo determinados de los datos de los inclinómetros, campañas de nivelación, medidas de EDM's o cualquier otra técnica geodésica y (3) otra información de vigilancia, incluyendo observaciones visuales, información sísmica y medidas de gases volcánicos. Para este fin, se deben tener estaciones donde se toman las diferentes medidas para desarrollar una base común de datos para comparación.

La experiencia demuestra que el mismo patrón de inclinación medido por diferentes métodos en diferentes sitios o a diferentes tiempos pueden tener implicaciones drásticamente diferentes para el desenlace de la intranquilidad volcánica. En vista de los riesgos altos asociados con la predicción de erupciones de volcanes explosivos en áreas pobladas, es preciso que los vulcanólogos basen sus predicciones sobre el conjunto de datos más completo y confiable posible. Los inclinómetros electrónicos pueden hacer una contribución única y valiosa a ese base de datos, pero solamente si se instalan, operan e interpretan de una manera cuidadosa y responsable.

## INTRODUCCION

Durante la pasada década, varios productores han introducido inclinómetros electrónicos relativamente económicos que son apropiados para la vigilancia de la deformación del suelo asociada con actividad volcánica. Cuando se combinan con telemetría radial y sistemas modernos de registro, estos instrumentos son capaces de registrar de manera virtualmente continua las inclinaciones del suelo en sitios remotos o peligrosos, complementando así varios tipos de levantamiento geodésico y contribuyendo a las predicciones eruptivas (por ejemplo, Dzurisin y otros, 1983a). Por experiencia personal con inclinómetros electrónicos en el Observatorio Vulcanológico de Hawaii (HVO-Hawaiian Volcano Observatory) y el Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO-Cascades Volcano Observatory) reconozco su utilidad para vigilar volcanes intranquilos, como también las desventajas que merecen ser consideradas cuidadosamente. Recientemente, me preocupa mucho que la amplia disponibilidad de inclinómetros electrónicos y la extensa publicidad que se ha dado a la contribución de los datos de los inclinómetros para las exitosas predicciones de episodios de construcción del domo en el Mount St. Helens (Swanson y otros, 1983; Dzurisin y otros, 1983a) podrían resultar en la colocación de inclinómetros en otros volcanes peligrosos, con consecuencias potencialmente trágicas.

Mi meta aquí es estimular el uso prudente de inclinómetros mediante la descripción de sus virtudes y debilidades basándome en las experiencias en el HVO y CVO desde 1976 hasta 1989, con un énfasis especial en las aplicaciones en el Mount St. Helens. Más que un informe de investigación, este artículo es un ensayo científico. Las recomendaciones están apoyadas por una combinación de datos y experiencia, pero la mayoría son generalizaciones que tienen que ser adaptadas a situaciones específicas. Sin embargo, particularmente creo que un mensaje importante para vulcanólogos que están intentando trabajar en volcanes peligrosos es: Los inclinómetros son herramientas valiosas cuando se usan

correctamente, pero como con cualquier herramienta pueden ser peligrosos y deben ser usados con cuidado.

## Clases de Inclinómetros Electrónicos

Los inclinómetros están disponibles en una variedad de formas, tamaños y precios que son apropiados para una gran variedad de aplicaciones. Ellos varían desde diseños relativamente sencillos usados como un dispositivo de seguridad en maletines ejecutivos a instrumentos sofisticados capaces de registrar las mareas terrestres o proporcionar una dirección inerte a los aviones y misiles. Para aplicaciones vulcanológicas, los tipos más comunes usan un fluido para medir cambios de inclinación a lo largo de una línea base que puede medir desde unos centímetros hasta unos metros.

Los inclinómetros de tubos de agua, son tubos en forma de U llenos de fluido, que típicamente tienen unos cuantos metros de largo. Mientras el tubo se inclina, el fluido (normalmente agua) sube en un lado del tubo en relación al otro lado donde cae el nivel. El cambio en el nivel del agua puede ser medido manualmente o detectado electrónicamente y convertido al cambio de inclinación equivalente. Un inclinómetro moderno, con un tubo de agua llenado a medias desarrollado por R. Bilham tiene una línea base de 1 km, es extremadamente preciso (sensibilidad 1 en  $10^{10}$ ) y su tasa de deriva a largo plazo es muy lenta (Agnew, 1986). Es relativamente fácil de instalar y ha sido usado con éxito para vigilar el hinchamiento del domo resurgente en la caldera en Long Valley en la parte central-oriental de California.

Los inclinómetros de burbuja usan el desplazamiento de una burbuja en un fluido para el mismo fin. Típicamente, una burbuja de unos cuantos milímetros en diámetro flota en un fluido electrolítico sellado en una ampollita de unos cuantos centímetros de ancho. El movimiento de la burbuja provocado por la inclinación de la ampollita es medido electrónicamente por electrodos que se proyectan dentro del fluido (Westphal y otros, 1983). La inclinación a lo largo de un eje puede ser medida usando una ampollita cilíndrica, mientras que la inclinación a lo largo de dos ejes puede ser medida usando una ampollita en forma de disco.

En los inclinómetros de mercurio el mercurio sirve como una placa de capacitancia en un circuito resonante en puente LC; una inclinación al lado opuesto de la placa en relación a la superficie de mercurio provoca un cambio de capacitancia que puede ser medido electrónicamente.

Dado que el inclinómetro de burbuja es el que más se usa en el CVO y otros observatorios vulcanológicos, las siguientes secciones fueron escritas con los inclinómetros de burbuja en mente. Sin embargo, muchas



de las ideas se pueden aplicar muy bien a otros tipos de inclinómetros, incluyendo diseños especializados que no se mencionaron arriba.

## Escogiendo El Inclinometro Apropriado

### Sensibilidad, Repetitividad, Alcance y Costo

Inevitablemente, el inclinómetro que se elija será una solución intermedia en cuanto a sensibilidad, repetitividad, alcance y costo. La **sensibilidad** de un sensor de inclinación es el incremento de inclinación más pequeño que produce un cambio medible en la salida del sensor. **Repetitividad** mide el intervalo de salidas producido por la misma entrada después de excursiones de inclinación; no es lo mismo que sensibilidad porque la mayoría de los sensores de inclinación están sujetos a histéresis. Por lo tanto, un sensor de inclinación puede ser capaz de detectar pequeños cambios de nivel como de 0.1 microradián, pero con una repetitividad de 1.0 microradián. El **alcance** de un sensor de inclinación es el cambio máximo de inclinación que puede ser medido con confianza; un concepto relacionado es **linealidad**, que mide la respuesta no proporcional del sensor a cambios de inclinación en los límites de su alcance. La mayoría de los inclinómetros usados para la vigilancia volcánica tienen alcances de 1 a 60 grados y linealidades de 1 a 5 por ciento. En general, una mejor sensibilidad correlaciona con alcances más pequeños, mejor linealidad y mayor costo.

El inclinómetro más preciso (o sea, el que tiene la sensibilidad y repetitividad más pequeña) que se puede comprar, quizás no sea la mejor selección, porque mejor sensibilidad y repetitividad generalmente significan un alcance más pequeño. Se logra poco al resolver un cambio de inclinación de 0.1 microradianes en un intervalo de 100 microradianes si las fluctuaciones diurnas o actividad volcánica causan inclinaciones de varios cientos de microradianes o más (1 microradián =  $0.206$  arco-segundos =  $5.730 \times 10^{-5}$  grados). Recíprocamente, es inútil vigilar cambios de inclinación en el orden de microradianes con un inclinómetro diseñado para resolver cambios de unos pocos arco-segundos en un intervalo de varios grados.

Idealmente, la magnitud y dimensión de la deformación del suelo debe ser determinada primeramente mediante métodos de agrimensura como trilateración o nivelación, como se discute en otras partes de este volumen. Esto no siempre es factible o aconsejable durante una emergencia volcánica. En tales casos, recomiendo el uso de inclinómetros con una sensibilidad y repetitividad de por lo menos 10 microradianes sobre el intervalo más amplio posible (normalmente unos miles de microradianes). La experiencia demuestra que la mayoría de las

inclinaciones causadas por erupciones volcánicas son de por lo menos unas decenas de microradianes dentro de unos pocos kilómetros del punto de emisión, por lo tanto no se requiere de una sensibilidad de menos de un microradián. Esto es particularmente cierto si el lugar donde se instala el inclinómetro está sujeto a cambios diurnos de inclinación mayores 1 microradián, algo común. Una excepción puede ser una instalación profunda (más profundo que 2 m) relativamente lejos del punto de emisión, donde los efectos diurnos son negligentes y se espera que los cambios de inclinación relacionados al volcán sean pequeños. Tales instalaciones son particularmente útiles para vigilar una cámara magmática profunda, que puede causar inclinaciones pequeñas sobre un área extensa. Para tales aplicaciones, escoja un inclinómetro con una sensibilidad de 1 microradián o menos, y entiérrelo por lo menos 2 m para reducir los efectos diurnos y estacionales.

Probablemente las inclinaciones más grandes se registrarán cerca de los puntos de emisión del volcán intranquilo y las mismas podrán ser detectadas con cualquier inclinómetro comercial. En este caso, el alcance es más importante que la sensibilidad. Durante episodios de construcción del domo en el Mount St. Helens, inclinaciones mayores a 10,000 microradianes han sido medidas en los flancos del domo de lava, mientras que en el piso del cráter a unos pocos cientos de metros, las inclinaciones han sido menores a 1,000 microradianes (figs. 7.1, 7.2). En el domo, la mayoría de los inclinómetros con sensibilidades en escala de microradianes estarían fuera de sus alcances útiles durante la parte más crítica del período antes de los episodios de construcción del domo, mientras que en el piso del cráter, los inclinómetros con alcances muy grandes serían incapaces de detectar pequeños cambios de inclinación que proporcionarían un registro útil del evento.

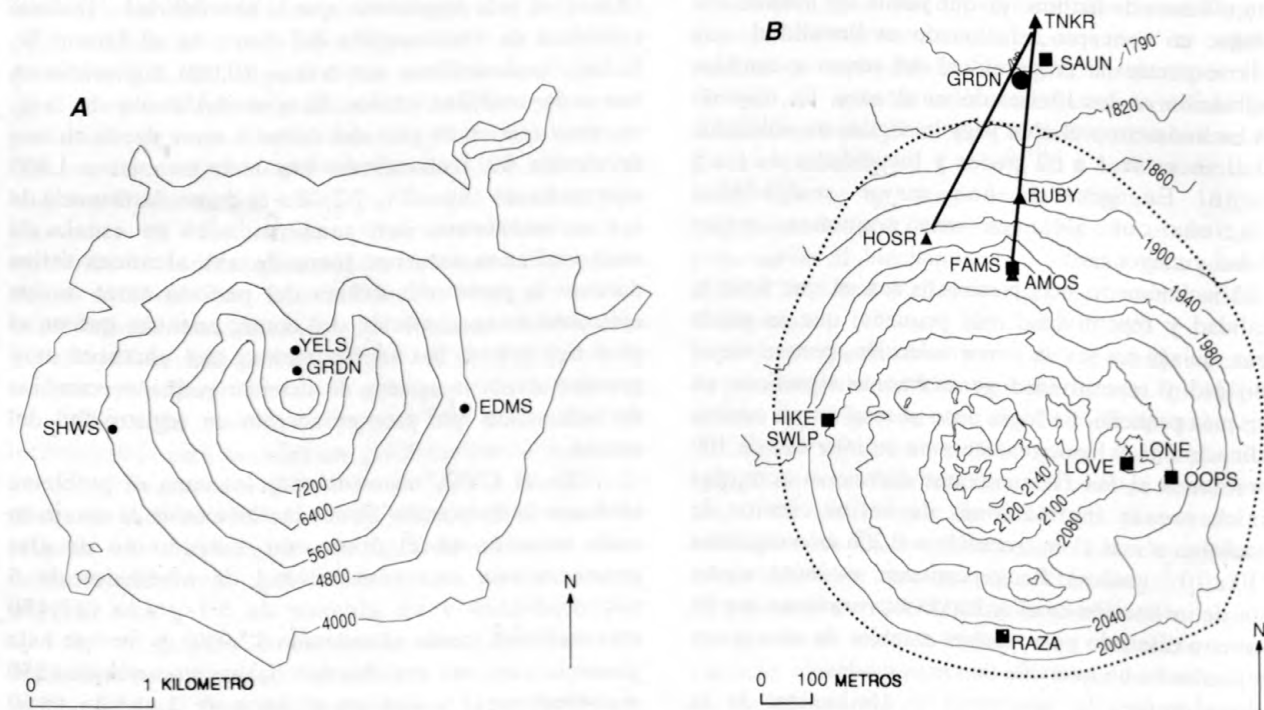
En el CVO, nosotros solucionamos el problema mediante la instalación de dos inclinómetros de un eje en cada estación en el domo, un instrumento de alta ganancia con una sensibilidad de alrededor de 5 microradianes y un alcance de  $\pm 1$  grado (17,450 microradianes, costo aproximado \$2,000), y otro de baja ganancia con una sensibilidad de un arco-minuto (350 microradianes) y con un alcance de 1 radián ( $\pm 60$  grados; costo \$100). Nosotros usamos inclinómetros de un eje para reducir el costo y porque el componente más importante de inclinación para propósitos de predicción de erupciones y evaluación del Mount St. Helens es radial al centro del domo. Los instrumentos de alta ganancia son lo suficientemente sensibles para detectar hinchamiento varias semanas antes de la culminación de los episodios de construcción del domo, pero están fuera de alcance útil durante los últimos días de actividad más intensa. Para ese tiempo, los instrumentos de baja

ganancia pueden trazar la deformación intensa que ocurre justo antes que el magma llegue a la superficie del domo. Combinando datos de los dos tipos de inclinómetros proporciona un registro relativamente completo de la inclinación del suelo desde el comienzo de la actividad precursora hasta el período más intenso de construcción del domo, a menos que el instrumento sea destruido por explosiones o caídas de rocas, durante el período de ajuste estructural al lóbulo recientemente emitido (fig. 7.3).

En el piso del cráter, cerca de la base del domo, la inclinación del suelo asociada con episodios de construcción del domo es típicamente uno a tres órdenes de magnitud más pequeña que en el domo mismo. Por lo tanto, nosotros instalamos inclinómetros de dos ejes en el piso del cráter que son más sensibles que los instrumentos usados en el domo, e intentamos protegerlos de la mejor manera posible de los efectos ambientales (ver a continuación). Cerca del domo (dentro de 700 m del punto de emisión) usamos sensores con una sensibilidad de  $\pm 1.0$  microrradián y con un alcance de 10 grados; más lejos del domo, usamos modelos con una

sensibilidad de 0.1 microrradián y un alcance de  $\pm 1$  grado. El costo aproximado para cada modelo es \$3,000.

Los inclinómetros de dos ejes proporcionan información direccional que ayuda a localizar la fuente de la deformación, que en este caso está consistentemente debajo del centro del domo. Sin embargo, a veces los datos de los inclinómetros no son suficientes para llegar a esta conclusión, debido a que muchas veces los efectos locales complican el patrón de los cambios medidos de inclinación. En teoría debe ser posible determinar la profundidad del punto de presión usando una red de varios inclinómetros instalados a varias distancias del domo, pero en la práctica esto no ha funcionado bien en el Mount St. Helens debido a, por lo menos, dos razones. Primero, las inclinaciones asociadas con los episodios de construcción del domo son tan pequeñas en el piso del cráter que son parcialmente oscurecidas por los efectos ambientales erráticos. Segundo, excepto durante una posible etapa muy temprana de actividad precursora, la deformación del domo y del piso del cráter es anisotrópico y no muy elástico y por lo tanto muy difícil de modelar.



**Figura 7.1.** A, Mapa esquemático del Mount St. Helens con las localizaciones de los sismómetros mencionados en el texto: YELS, Yellow Rock; GRDN, Garden; SHWS, St. Helens West; EDMS, East Dome. La localización aproximada del domo de lava está indicada por el contorno circular al centro. B, Mapa generalizado del domo de lava y piso del Cráter del Mount St. Helens con las localizaciones de las estaciones de EDM (triángulos), inclinómetros (cuadrados), un sismómetro (círculo), y un sensor de gas (x) mencionados en el texto: TNKR (Estación de EDM Tinker; SAUN, inclinómetro Sauna; GRDN, sismómetro Garden e inclinómetro (localizados juntos pero indicados por un círculo solamente); RUB, estación de EDM e inclinómetro Ruby (localizados juntos e indicados por un triángulo solamente); FAMS inclinómetro Famous; AMOS, estación de EDM Amos; HOSR, estación de EDM Hoser; LONE, sensor de gas Lone; OOPS, inclinómetro Oops; LOVE inclinómetro Lovelorn; RAZA, inclinómetro Raza; SWLP, inclinómetro Sweet; HIKE, inclinómetro Hike. El lóbulo de 1986 está indicado por varios contornos cercanos entre HIKE y LONE; líneas cortadas indican la base aproximada del domo.

## Modelos de plataforma versus pozo de perforación

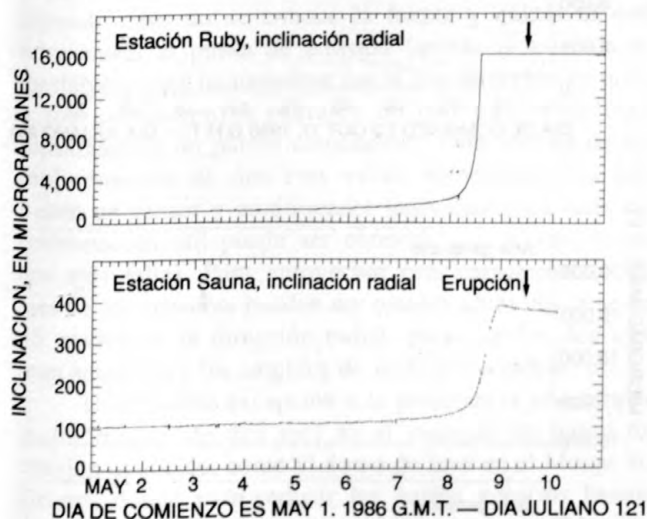
Vale la pena señalar que los inclinómetros de plataforma y de pozo de perforación ("borehole") físicamente miden diferentes cantidades, aunque para la mayoría de las aplicaciones de vigilancia volcánica la diferencia es insignificante (C.E. Mortensen, comun. oral, 1989). Si  $x$  y  $y$  son los ejes horizontales,  $z$  es el eje vertical,  $u_x$  y  $u_y$  son los componentes horizontales de desplazamiento, y  $u_z$  es el componente vertical del desplazamiento, entonces las inclinaciones horizontales medidas por el inclinómetro de plataforma estarían dadas por

$$\frac{\partial u_z}{\partial x} \quad \text{and} \quad \frac{\partial u_z}{\partial y}$$

mientras que las inclinaciones verticales medidas por el inclinómetro de pozo de perforación estarían dadas por

$$\frac{\partial u_x}{\partial z} \quad \text{and} \quad \frac{\partial u_y}{\partial z}$$

Las inclinaciones horizontales y verticales van a diferir si hay un gradiente significativo de esfuerzo dentro del volumen de roca detectada por el inclinómetro, debido a la deformación del volumen de roca en si. Esto es particularmente cierto si existen heterogeneidades. Sin embargo, para el caso de cero esfuerzo, como sucede en o cerca de la superficie donde no pueden haber tracciones, estas inclinaciones son equivalentes.



**Figura 7.2.** Registros de inclinación de las estaciones en el flanco norte del domo (arriba) y piso del cráter al norte del domo (abajo) para Mayo 1-10 de 1986, que incluyeron el episodio de construcción del domo de Mayo de 1986. La inclinación total en el domo fue 40 veces mayor que la del piso del cráter, aunque las estaciones estaban separadas por solo 300 m. Las flechas indican el comienzo de la extrusión.

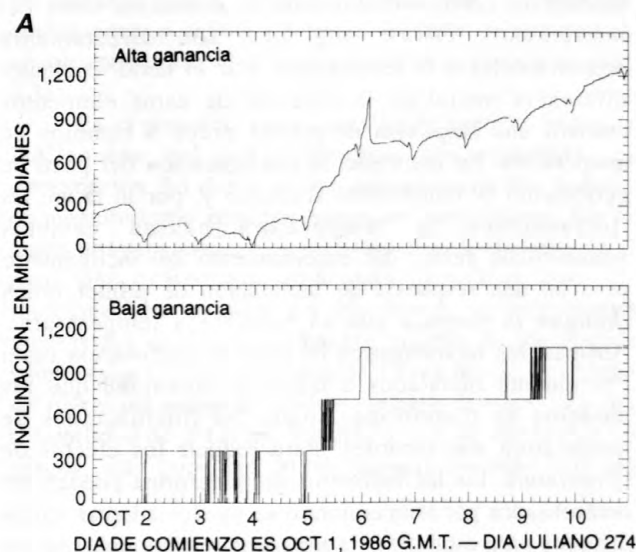
Otra consideración es, que la configuración de plataforma tiene una sensibilidad de primer orden a temperatura, mientras que en la configuración del pozo de perforación, este efecto es de segundo orden (C.E. Mortensen, comun. oral, 1989). Esto es porque la configuración de plataforma depende de elementos mecánicos, como tornillos para la nivelación tosca del instrumento, cuyas longitudes son directamente proporcionales a la temperatura. Por lo tanto, cualquier diferencia inicial en la longitud de estos elementos causará una respuesta de primer orden a cambios de temperatura. En contraste, la configuración del pozo de perforación es radialmente simétrico y, por lo tanto, las fluctuaciones de temperatura causan cambios volumétricos dentro del encerramiento del inclinómetro pero no una respuesta de inclinación de primer orden (aunque la burbuja aún es sensible a temperatura). Además, los inclinómetros de pozo de perforación están típicamente instalados a mayor profundidad que los modelos de plataforma, donde las fluctuaciones de temperatura son menores. Para reducir los efectos de temperatura, los inclinómetros de plataforma pueden ser compensados por temperatura o se pueden adoptar varios métodos para estabilizar la temperatura. Sin embargo, en aplicaciones para las cuales la sensibilidad a temperatura es un factor crítico, se prefiere usar la configuración de pozo de perforación. En la mayoría de las aplicaciones en volcanes intranquillos, esto no es un factor limitante, y la decisión sobre cual configuración usar, plataforma o pozo de perforación, puede ser basada en otros factores.

En mi experiencia, la decisión depende principalmente de las condiciones locales y de factores como disponibilidad relativa, precio y facilidad de instalación. Los modelos de pozo de perforación son usados más en Hawaii, mientras que los modelos de plataforma son usados casi exclusivamente en el Mount St. Helens. En parte, esto se debe a un accidente histórico y en parte como consecuencia de las distintas condiciones locales. En Hawaii el campo de deformación es normalmente lo suficientemente grande para que los inclinómetros puedan ser localizados en sitios relativamente seguros que sobreviven varias erupciones. En contraste, en el Mount St. Helens la deformación que se puede medir ocurre solamente en el domo de lava y piso del cráter circundante. Por lo tanto, los inclinómetros tienen que ser colocados cerca al punto de emisión en áreas peligrosas para que sean útiles. Como resultado, la mayoría de las estaciones de inclinómetros sobreviven solo unos pocos episodios eruptivos. Dada la vida útil corta de los inclinómetros en el Mount St. Helens, nosotros hemos preferido usar modelos de plataforma que son más fáciles de instalar y calibrar, y también generalmente menos costosos que los modelos de pozo de perforación.

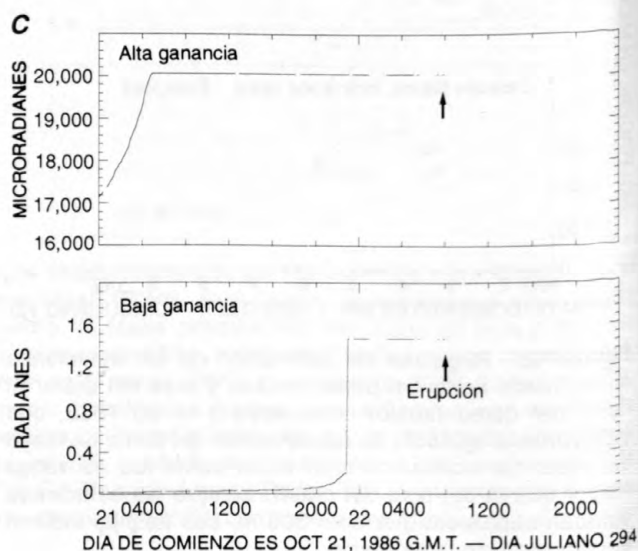
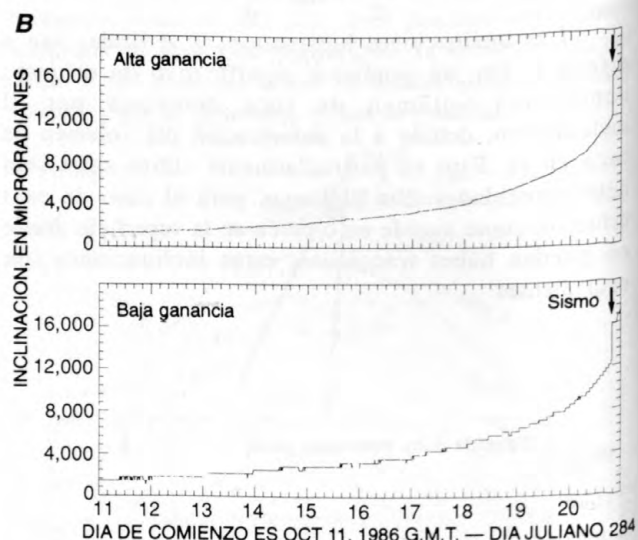


Otra consideración es la naturaleza del material superficial en las estaciones de inclinómetros. En Hawaii, los inclinómetros de pozo de perforación pueden ser instalados en flujos jóvenes de basalto o suelo, mientras que en el Mount St. Helens, el piso del cráter está

compuesto de escombros heterogéneos de erupciones, lahares y caídas de rocas. Es muy difícil cavar o taladrar este material. Por otro lado, aunque han pasado varios años desde las erupciones de 1980, este material está demasiado caliente como para construir instalaciones subterráneas para los inclinómetros. Por lo tanto, decidimos usar los modelos de plataforma instalados cerca de la superficie. Recientemente, un lente de nieve y hielo permanente intercalado con taludes de caídas de rocas se ha acumulado en el piso austral del cráter, por lo tanto el área ya no es apropiado para las instalaciones superficiales. La experiencia en la Caldera de Long Valley ha demostrado que los inclinómetros de pozo de perforación funcionan muy bien debajo de una masa de



**Figura 7.3.** A, Registros de inclinómetros de alta ganancia (arriba) y baja ganancia (abajo) de la estación Sweet en el flanco occidental del domo para Octubre 1-10 de 1986. La diferencia en ganancia entre los dos inclinómetros era de un factor de 100, aproximadamente (3.6 microradianes/conteo para el inclinómetro de alta ganancia versus 355 microradianes/conteo para el inclinómetro de baja ganancia). El patrón diurno en el registro de alta ganancia está causado principalmente por cambios de temperatura. Pasos discretos en el inclinómetro de baja ganancia ocurren porque el inclinómetro no responde a cambios de inclinación menores a 355 microradianes. Más de dos semanas antes del comienzo de la extrusión del 21-22 de Octubre, el instrumento de alta ganancia había detectado muy claramente la inclinación precursora, mientras que el instrumento de baja ganancia apenas la había detectado. B, Registros para los mismos inclinómetros desde Octubre 11-20 de 1986. Los dos registros son similares durante este período de deformación acelerada del domo. El 20 de Octubre, los dos inclinómetros fueron compensados por una cantidad similar debido a un sismo de magnitud 3. C, Los registros de los dos inclinómetros en Sweet desde Octubre 21-22, 1986. Observe que las escalas verticales son diferentes. El inclinómetro de alta ganancia se salió de escala temprano el 21 de Octubre después de registrar mas de 20,000 microradianes de inclinación hacia afuera. El inclinómetro de baja ganancia continuó operando unas 18 horas más y registró alrededor de 1.5 radianes (87 grados!) de inclinación hacia afuera hasta que se salió de escala. La estación fue destruida por una caída de rocas unas 9 horas después. La extrusión probablemente comenzó alrededor de las 0800 G.M.T. el 22 de Octubre (flechas).



nieve (Mortensen y Hopkins, 1987), pero tales instalaciones no son posibles en el Mount St. Helens, donde el lente de nieve y talud tiene más de 100 m de espesor y sigue creciendo.

En mi experiencia, la diferencia entre inclinómetros de plataforma y de pozo de perforación es menos importante que la manera en la cual se instala y se une al suelo cada uno de los tipos de inclinómetros. Un inclinómetro de plataforma instalada cuidadosamente, bien blindado de la mayoría de los efectos ambientales y bien unido al campo de deformación relacionado con el volcán, es mejor que un inclinómetro de pozo de perforación pobremente instalado, y vice versa.

### **Inclinómetros de Un Eje Versus de Dos Ejes**

Los inclinómetros de dos ejes proporcionan información útil sobre la localización de la fuente de la deformación, y por lo tanto, en la mayoría de los casos, son preferibles a los de un eje. Un inclinómetro de dos ejes determina el vector a la fuente de la deformación, mientras que el de un solo eje mide un componente del vector de inclinación. Las medidas de varios instrumentos de dos ejes indicando vectores de inclinación que son demostrablemente radiales a un posible punto de emisión quizás tengan unas implicaciones para peligros volcánicos muy diferentes que las medidas de instrumentos de un solo eje que solamente son sensibles a los componentes radiales de inclinación. En el primer caso, se estima que la fuente de la deformación está cerca al punto de emisión, pero en el segundo caso no se conoce la fuente y quizás ni está relacionada al punto de emisión (quizás la estación es inestable y está inclinándose hacia una dirección fortuita, y los componentes radiales de inclinación definen fortuitamente un patrón consistente). Otra ventaja de los inclinómetros de dos ejes es su redundancia ya que tienen un sensor y amplificador individual para cada eje (información útil puede ser obtenida aún si uno de los dos ejes falla). Para aprovechar esta característica, los ejes de los sensores pueden ser rotados aproximadamente 45 grados de la dirección radial, para que los dos ejes sean sensibles a los cambios de inclinación radial.

Una posible excepción a la preferencia general por inclinómetros de dos ejes es el caso de un punto de emisión conocido, como el domo de lava en el Mount St. Helens, donde para reducir los gastos nosotros hemos optado por inclinómetros de un eje orientados radialmente al centro del domo. El mismo compromiso puede ser considerado para vigilar los flancos de un estratovolcán intranquilo, donde la posible localización del punto de emisión se conoce. Sin embargo, generalmente la información adicional que proporciona un instrumento adicional tiene mayor peso que su costo mayor.

### **Cuando No se Deben Usar Inclinómetros**

Es importante recordar que los inclinómetros electrónicos generan un flujo casi continuo de datos que tienen que ser grabados, procesados, interpretados y archivados y que la grabación, procesamiento, interpretación y archivo de ceros es un trabajo que consume mucho tiempo y no es gratificante. Además, el mantenimiento rutinario y reparación de los inclinómetros (y equipo telemétrico y de registro) puede ser un trabajo pesado, particularmente durante períodos de mal tiempo cuando el acceso a las estaciones es difícil o imposible. Esto es especialmente cierto para volcanes remotos, donde el acceso puede ser difícil hasta bajo las mejores condiciones. Por lo tanto, pocas veces es sabio, cuando se disponen de escasos recursos, instalar inclinómetros en volcanes dormidos o con largos períodos de inactividad en anticipación al tiempo cuando el volcán se reactive. En tales casos, es normalmente suficiente vigilar la actividad sísmica con una red sísmica modesta y hacer campañas geodésicas al volcán, de acuerdo con un programa preestablecido o de acuerdo con la sismicidad o cualquier otra señal de intranquilidad.

Esta es la metodología que ha seguido el CVO para vigilar los volcanes actualmente dormidos en la Cordillera Cascade (con la excepción del Mount St. Helens). La actividad sísmica cerca de estos conos potencialmente activos es vigilada por las redes sísmicas regionales que son capaces de detectar sismos mayores a una magnitud umbral que varía de volcán a volcán (generalmente magnitud 2.5). Además, el CVO ha instalado redes geodésicas con líneas base en la mayoría de los volcanes potencialmente activos (Chadwick y otros, 1985; Dzurisin y otros, 1982, 1983b; Iwatsubo y otros, 1988; Yamashita y Doukas, 1987; Iwatsubo y Swanson, capítulo 10). Estas redes se miden cada pocos años o según las condiciones lo ameritan. Nosotros tomamos una decisión consciente de no instalar inclinómetros o cualquier otro instrumento de registro continuo, en vista de los largos intervalos entre las pasadas erupciones (siglos a milenios), nosotros juzgamos que el costo de instalación y mantenimiento, en dólares y mano de obra, son demasiados altos para justificar el esfuerzo.

Aún si se pueden comprar los inclinómetros, generalmente son una pobre elección para vigilar volcanes dormidos. Esto es porque, aunque los inclinómetros son apropiados para vigilar inclinaciones a corto plazo, son sujetos a una deriva a largo plazo de una variedad de fuentes, que pueden confundir las evaluaciones sobre el estado del volcán. Estas causas de deriva a largo plazo incluyen envejecimiento de los componentes electrónicos, ajustes del suelo debido al proceso de instalación o a la presencia de una estación o

factores ambientales o estacionales (fig. 7.4). Especialmente sobre escalas de tiempo mayores a unos meses, los cambios indicados por un inclinómetro electrónico tienen que ser verificados por campañas geodésicas. Por lo tanto, una vigilancia sísmica continua y campañas geodésicas periódicas son suficiente en la mayoría de volcanes dormidos; solamente se debe considerar la instalación de inclinómetros cuando se reactivan los volcanes, y entonces solamente para vigilar cambios a relativamente corto plazo.

## Tipos de Instalaciones para Inclinómetros

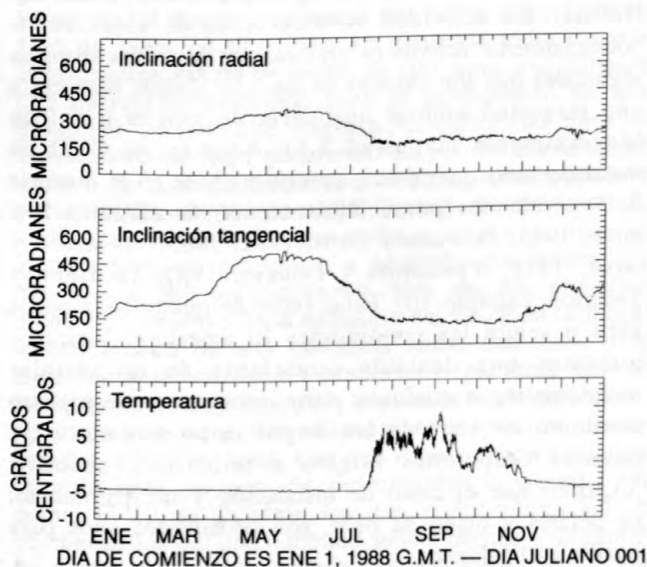
### Consideraciones Generales

Para poder proporcionar información útil para la vigilancia volcánica, los inclinómetros deben estar bien unidos con el suelo de tal manera que se puede proporcionar una medida representativa del campo de deformación promediada para el espacio en el área circundante. Aunque a primera vista este problema pueda parecer bastante simple, en la práctica es uno de los obstáculos más grandes que debe ser sobrepasado para

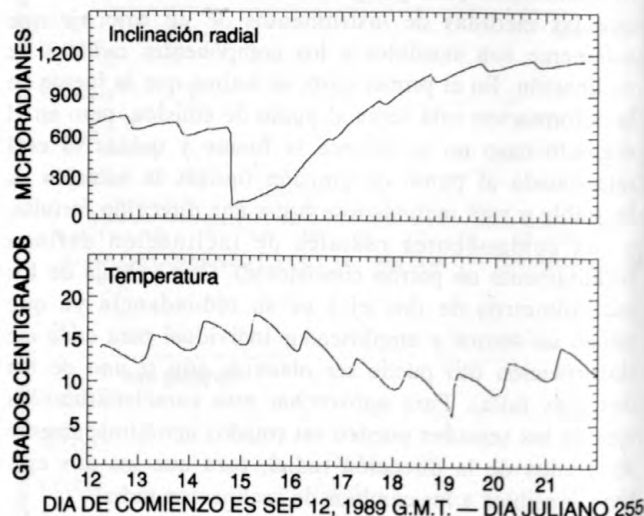
poder obtener datos significativos de los inclinómetros. Muchos inclinómetros sofisticados y costosos han sido operados en instalaciones pobremente diseñados, registrando muchos datos muy precisos, pero inútiles para la vigilancia de movimientos de suelo para el sitio en particular. Aún cuando se invierte tiempo, dinero y esfuerzo considerable en instalaciones de inclinómetros más elaborados, algunos de ellos son inevitablemente inadecuados. La experiencia demuestra que no se puede confiar consistentemente en ninguna receta en particular para instalaciones de inclinómetros de alta calidad: lo que trabaja bien en un sitio o en un momento dado puede fallar miserablemente en otra ocasión. Solamente un registro largo de datos del nivel de fondo de alta calidad pueden demostrar la confiabilidad de una instalación.

Las discusiones teóricas sobre los efectos topográficos y termales sobre los inclinómetros se encuentran en Harrison (1976) y Harrison y Herbst (1977). Estos autores argumentan que, para poder reducir tales efectos, los inclinómetros deben ser instalados lo más profundo posible en sitios que son topográficamente simétricos.

En mi experiencia, grandes dosis de sentido común y sudor proporcionan un buen comienzo para instalaciones efectivas de inclinómetros. Mientras más



**Figura 7.4.** Registros de inclinación y temperatura para 1988 de un inclinómetro montado sobre un peñón en el piso del cráter al norte del domo. Observe los cambios grandes de inclinación "reversible" (varios cientos de microradianes) causados por el peso de la precipitación y nieve mientras la estación estaba enterrada por nieve desde Enero hasta comienzos de Julio. Cuando la estación quedó nuevamente al aire libre a mediados de Julio, los cambios de inclinación de largo período virtualmente pararon y los efectos diurnos se hicieron aparente.



**Figura 7.5.** Registros de inclinación y temperatura para un período de 10 días en Septiembre de 1989 de la estación Oops, un inclinómetro de instalación superficial en el flanco oriental del domo. Efectos diurnos como éstos pueden ser modelados y removidos de los datos del inclinómetro, pero es mejor no remover tales efectos y comparar visualmente los registros de inclinación y temperatura. Durante períodos de tranquilidad, los cambios diurnos son una evidencia bienvenida que la estación está funcionando normalmente. Antes de la mayoría de las erupciones, los efectos diurnos son opacados por la deformación del suelo precursor mientras el magma sube hacia la superficie.



esfuerzo se pone en la instalación, mejor será. No hay ningún sustituto para el trabajo duro, ya sea cavando el hueco para blindar el inclinómetro de efectos ambientales o poniendo concreto para producir una fundación masiva. En general, mientras más profunda sea la instalación, mejor. Inclinómetros de pozo profundo, instalados a 30–100 m de profundidad bajo la superficie, van a detectar las mareas terrestres diarias (unas partes en  $10^7$ ) sin cualquier efecto diurno apreciable y con efectos estacionales de unos pocos microradianes (Meertens, 1987; Meertens y otros, 1989).

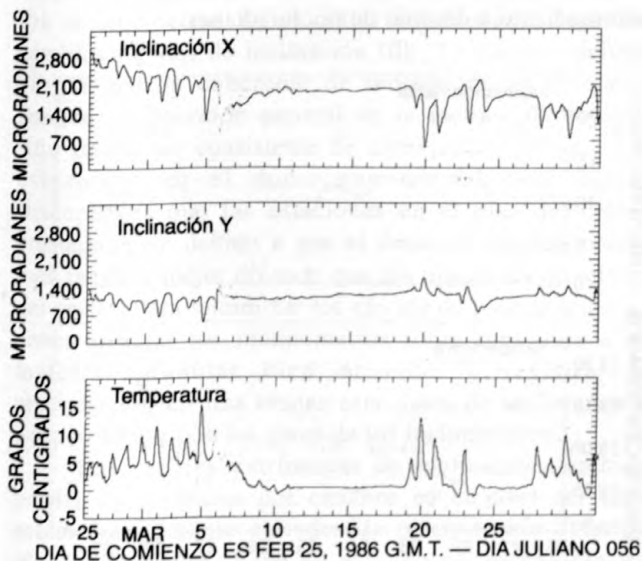
Las instalaciones cerca de la superficie son más fáciles y rápidas, pero están sujetas a grandes efectos ambientales. Inclinaciones diurnas de varios cientos de microradianes son comunes en las instalaciones superficiales expuestas a fluctuaciones de temperatura exterior (figs. 7.5, 7.6). En comparación, la magnitud de inclinación diurna causada por mareas terrestres sólidas son aproximadamente 0.1 microradianes en latitudes templadas. Las instalaciones subterráneas dentro de edificios son una buena elección si el área no está sujeta a mucho tráfico vehicular o peatonal. En tales casos, el inclinómetro debe estar mecánicamente aislado del edificio circundante, que puede deformarse en grados sorpresivos en respuesta a los efectos termoelásticos. Si se puede perforar o taladrar, el inclinómetro debe ser colocado por lo menos dos metros debajo de la superficie de la tierra y el hueco debe ser rellenado para aislar el inclinómetro de los cambios diurnos y estacionales de

temperatura. Yo prefiero instalaciones en roca dura cuando es posible, pero otra escuela de pensamiento recomienda sedimentos bien drenados como arena o cascajo seco. En el último caso, escoja un área que es relativamente plana y aisle el inclinómetro de por lo menos los decímetros superiores de sustrato, para minimizar los efectos de arrastre cerca a la superficie y de ciclos de congelación y descongelación. En la práctica, la decisión está dictada por las condiciones locales: en muchos estratovolcanes, hay muy poca roca dura expuesta por que la superficie está cubierta por material fragmentario suelto. En todo caso, sea flexible. Escoja lo que parece ser el mejor sitio posible, dado el tiempo y recursos disponibles-entonces desconfíe en la estación hasta probar su confiabilidad.

### Instalaciones Superficiales

El método más simple es instalar un inclinómetro de plataforma en una peña o plataforma de concreto que está parcialmente enterrada y bastante bien acoplada al suelo. Yo prefiero peñas que "timbran" cuando se les da con el martillo, pero esta prueba es arbitraria, depende de la naturaleza de la roca disponible y da poca seguridad en cuanto a su estabilidad. En el Mount St. Helens se obtuvieron buenos resultados con este método a comienzos de los 1980's, cuando los episodios de construcción del domo eran frecuentes y la mayoría de las estaciones duraban unos meses. Los inclinómetros fueron colocados sobre azulejos de cerámica cimentados a peñas grandes (hasta varios metros en diámetro) y relativamente planos que estaban casi en su totalidad enterradas en ceniza. Los instrumentos fueron tapados para protegerlos de ceniza y otros elementos, y se almacenaron las baterías y el sistema de telemetría (Murray, capítulo 2) en un contenedor fuerte. Empezando en 1985, se hicieron instalaciones similares en el área de la cumbre del domo, donde los inclinómetros fueron colocados en peñas enterradas en tephra o en roca dura recientemente emitida. La ventaja principal de este método es la facilidad de instalación, pero una desventaja grande es la susceptibilidad a los efectos ambientales (variaciones diurnas típicas están en el orden de varios cientos de microradianes). Por lo tanto, tales estaciones son apropiadas cuando el tiempo está limitado, otros métodos no son factibles o la señal de inclinación esperada es muy grande.

Otro método para instalar inclinómetros que ha funcionado bien en el Mount St. Helens ha sido su instalación en riscos grandes en los flancos del domo de lava. La motivación inicial para tales instalaciones era para proteger los inclinómetros del material balístico emitido durante explosiones pequeñas en el domo. Para este tipo de instalación se atornillaba una casetita de aluminio al risco o se hacía un hueco en la cara del risco



**Figura 7.6.** Los registros de inclinación y temperatura de la estación Lovelorn, localizada en un peñón que estaba parcialmente enterrado en tephra en la superficie del domo. Cambios diurnos de inclinación de varios cientos de microradianes por día ocurrieron siempre que la estación estaba expuesta a la atmósfera, pero eran virtualmente inexistentes mientras la estación estaba enterrada bajo nieve durante Marzo 6-18 y Marzo 24-26.

con un martillo eléctrico y un generador y se colocaba un inclinómetro de alta ganancia y otro de baja ganancia. Nosotros seguimos usando este método aún cuando las explosiones no eran muy frecuentes, porque en los flancos superiores del domo los riscos pendientes son más comunes que las peñas grandes y estables, apropiadas para la instalación descrita arriba. Los efectos diurnos en las estaciones en los riscos son comparables con aquellas en estaciones en peñas, típicamente unos cientos de microradianes por día.

### Instalaciones Subterráneas

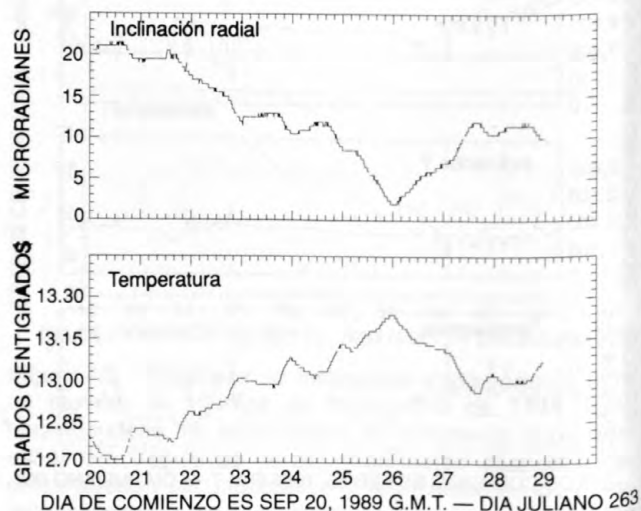
Siempre que sea posible, los inclinómetros deben ser enterrados por lo menos 2 m debajo de la superficie de la tierra para reducir los efectos ambientales. En las estaciones de roca dura, un hueco con diámetro relativamente pequeño puede ser taladrado para un inclinómetro de plataforma. En la caldera de Long Valley, nosotros taladramos cinco huecos de 20 cm y 5-10 m de profundidad en la roca dura y cimentamos el inclinómetro de plataforma al fondo de cada hueco. Usando una varilla de metal separable, se bajó cada inclinómetro al fondo del hueco donde un mecanismo diseñado especialmente para nivelación en la base del inclinómetro fue colocado en el cemento mojado. La nivelación tosca se logró midiendo la salida del inclinómetro en este punto y ajustándola con la varilla. Después que se endureció el cemento, se hicieron los ajustes finales con una herramienta acoplada a la varilla, mientras se alumbraba el fondo del hueco con la luz reflejada del sol. Este procedimiento era tedioso pero normalmente no cogía más de una hora.

Si no existe roca dura o la misma esta muy fracturada, huecos deben ser taladrados y rellenados con sedimento arenoso o tephra seco; arcillas y materiales saturados con agua deben ser evitados. Para poder sacar o renivelar toscamente el inclinómetro, el mismo puede ser cuidadosamente empacado cerca del fondo del hueco con arena bien clasificada en vez de ser cimentado.

Otro método para enterrar el inclinómetro en suelo o material suelto es excavar un hueco grande, colocar varillas y tirar concreto en el fondo e instalar el inclinómetro sobre el parche de cemento. Una fórmula que ha funcionado bien para nosotros ha sido hacer un hueco cilíndrico con 2 m de profundidad y 1 m de diámetro, y colocar un tubo metálico corrugado de un metro de largo en el fondo del hueco para drenaje. Coloque en el fondo del hueco por lo menos tres varillas metálicas de, por lo menos 2 m, preferiblemente hasta que no entren más. Postes metálicos para encerramientos o secciones de varilla de  $\frac{3}{8}$  o  $\frac{1}{2}$  pulgada son fáciles de conseguir y apropiados para este propósito. Si es necesario, corte las varillas 5-10 cm sobre el fondo del hueco y cúbralas con un parche de concreto de, por lo

menos, 50 cm de ancho y 10 cm de espesor. Instale el inclinómetro sobre el parche, cúbralo, y llene la tubería para drenaje con material de aislamiento que puede ser removido con facilidad para facilitar el mantenimiento del inclinómetro (una bolsa fuerte llena de pelotitas plásticas funciona bien). Cubra la parte de arriba del tubo de drenaje con una tapa o plato y entiérralo debajo de un metro de suelo. Si vandalismo es un problema, la instalación completa excepto la antena para la telemetría puede ser enterrada o escondida.

En el Mount St. Helens, el CVO usa un método similar para instalar los inclinómetros y otros instrumentos de vigilancia volcánica en el piso del cráter de 1980. En vez de tubería de drenaje, nosotros usamos bóvedas de fibra de vidrio de  $3\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$  de alto. Estas bóvedas son fabricadas especialmente para el CVO a un costo de \$600 cada una; bóvedas similares pueden ser fabricadas en cualquier sitio que exista la tecnología de fibra de vidrio. En el Mount St. Helens, las bóvedas son enterradas en túneles que son abiertos en pequeñas partes de los riscos o diques, que tienen la ventaja de proporcionar un acceso fácil por el frente. Al no tener pisos las bóvedas, se pueden colocar varillas y tirar concreto para acomodar los inclinómetros. Mediante el enterramiento de las partes superiores de las bóvedas debajo de 1-2 m de relleno para empaques, hemos reducido los cambios diurnos de inclinación de cientos de microradianes en las instalaciones de superficie a unos pocos radianes en estas bóvedas (fig. 7.7), mientras que los efectos estacionales son reducidos de cientos de microradianes a decenas de microradianes.



**Figura 7.7.** Registros de inclinación y temperatura de Garden Vault, un encerramiento para el instrumento enterrado 1 m debajo del piso del cráter al norte del domo. Observe que los efectos diurnos son grandemente reducidos en comparación con aquellos en las instalaciones superficiales (compare con las figs. 7.5, 7.6).

## Fuentes de Señales Extrínsecas de Inclinación

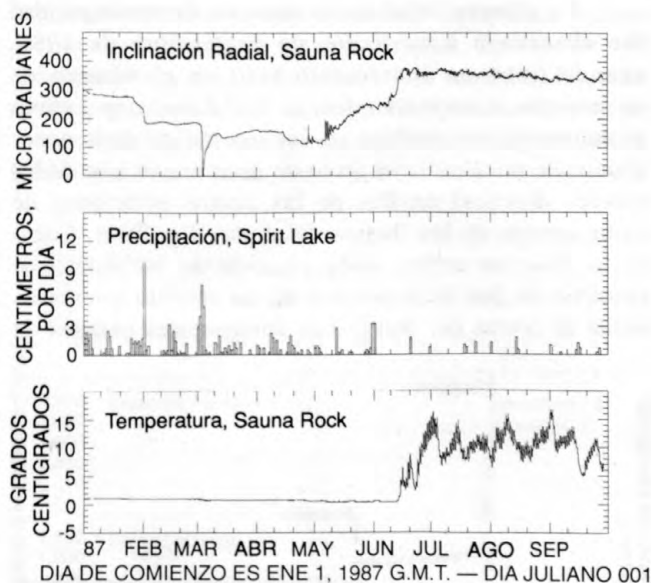
Aún si se ha seleccionado e instalado cuidadosamente un inclinómetro, todavía puede estar sujeto a varias fuentes de señales que no están relacionadas con la actividad volcánica. Como notado abajo, los cambios diurnos y estacionales de temperaturas pueden causar grandes señales de inclinación de hasta varios cientos de microradianes en instalaciones superficiales. Componentes sensibles a temperaturas en los inclinómetros y sistemas telemétricos pueden ser un factor, pero yo sospecho que en la mayoría de los casos, los esfuerzos termales en el inclinómetro o su encerramiento son la causa principal. La mejor solución es aislar el inclinómetro de efectos termales enterrándolo lo más profundo posible. Los esfuerzos termoelásticos causados por el calentamiento y enfriamiento de la superficie de la tierra pueden ser transmitidos al inclinómetro mediante la roca circundante o masa de suelo y por lo tanto son difíciles de eliminar (C.E. Mortensen, comun. escrita, 1989). En la mayoría de las aplicaciones de vigilancia volcánica, se creen que tales efectos son muy pequeños.

Otra fuente común de señales extrañas de inclinación es la precipitación. En el Mount St. Helens, la mayoría de la precipitación anual cae como nieve entre Octubre a Mayo, pero períodos cortos de precipitación ocurren durante todo el año. Particularmente durante caídas fuertes de nieve o lluvia, los inclinómetros en el cráter comúnmente registran cambios rápidos de inclinación (fig. 7.8) que no definen ningún patrón coherente de inclinación en el cráter, aunque la dirección general de la inclinación en cada sitio puede ser consistente de tormenta a tormenta. Las estaciones en el domo son normalmente menos susceptibles que las estaciones en el piso del cráter, presuntamente debido a que el domo es mecánicamente más fuerte y mejor drenado que los materiales de relleno del cráter. Para minimizar los efectos de precipitación, se deben instalar los inclinómetros sobre roca dura o en material granular bien drenado, y registrar la precipitación en una o más estaciones de inclinómetros para comparar con los datos de los inclinómetros.

Las señales extrínsecas de inclinación también pueden ser causadas por cambios en el nivel del agua subterránea durante períodos de precipitación o fusión rápida de nieve. Este es el caso en la caldera de Yellowstone, donde las inclinaciones de varios microradianes fueron detectadas durante períodos de fusión rápida de nieve por inclinómetros de alta precisión instalados en pozos de perforación de 30 m de profundidad (Meertens, 1987; Meertens y otros, 1989). Mientras más grandes las fluctuaciones del nivel de agua, mayor el efecto sobre los inclinómetros. Efectos

similares han sido observados en la Caldera de Long Valley, donde la fusión de nieve durante la primavera en la Sierra Nevada y el flujo de agua subterránea resultante por los materiales porosos del fondo de la caldera causan desviaciones de inclinación que son claramente registradas por una red de inclinómetros en pozos de perforación someros (Mortensen y Hopkins, 1987). Si posible, registre los cambios del nivel de agua cerca de la red de inclinómetros, pero en todo caso esté atento a tales cambios y sus posibles efectos sobre los inclinómetros.

Muchos otros procesos pueden causar que las señales de inclinación que no están directamente relacionadas con la actividad volcánica, incluyendo esfuerzos o grandes terremotos regionales, deslizamientos de tierra, y actividad humana o animal. Estos procesos son demasiado numerosos y variados para discutir aquí.



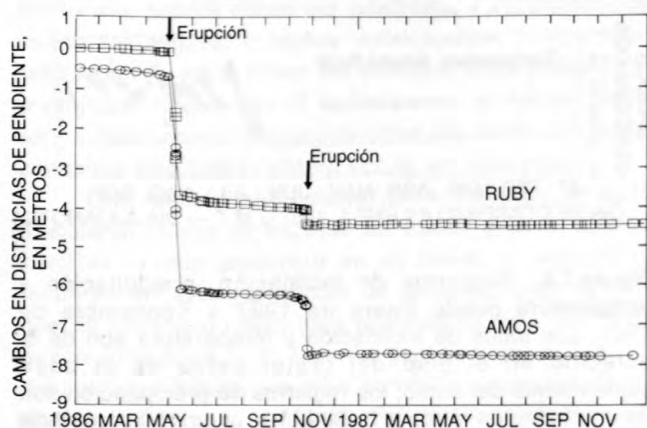
**Figura 7.8.** Registros de inclinación, precipitación y temperatura desde Enero de 1987 a Septiembre de 1987. Los datos de inclinación y temperatura son de la estación en el piso del cráter cerca de la base septentrional del domo; los registros de precipitación son de una estación cerca a Spirit Lake, unos 10 km al norte del domo. Observe los cambios relativamente grandes de inclinación (100–200 microradianes) durante períodos de fuertes nevadas Febrero 1 y Marzo 1–2 y también durante la descongelación en Mayo y principios de Junio. Empezando a mediados de Junio cuando se acabó la fusión y la precipitación era menos frecuente, los registros de inclinación fueron relativamente planos excepto por algunos efectos diurnos menores.



## INCLINOMETROS USADOS PARA AYUDAR A PREDECIR ERUPCIONES: UNA HISTORIA DE CASO

El episodio de construcción del domo en Octubre de 1986 en el Mount St. Helens ilustra el uso de inclinómetros electrónicos como parte de los esfuerzos integrados de vigilancia volcánica, que ha llevado a la predicción exitosa de numerosos episodios eruptivos desde Mayo de 1980 (Swanson y otros, 1983, 1987; Swanson y Holcomb, 1990). Después del episodio de construcción del domo de Mayo de 1986, que fue precedido por una serie de pequeñas explosiones que destruyeron la mayoría de las estaciones de vigilancia en el domo y piso del cráter circundante, el domo entró en un período típico de tranquilidad. Desde Junio hasta Agosto de 1986, todos los parámetros vigilados, incluyendo la actividad sísmica, deformación de suelo, y emisiones de gas, estuvieron en sus niveles de fondo. El único cambio que se observó en el cráter fue una extensión gravitacional del domo, indicada por las medidas del distanciómetro electrónico (EDM-electronic distance meter)(fig. 7.9).

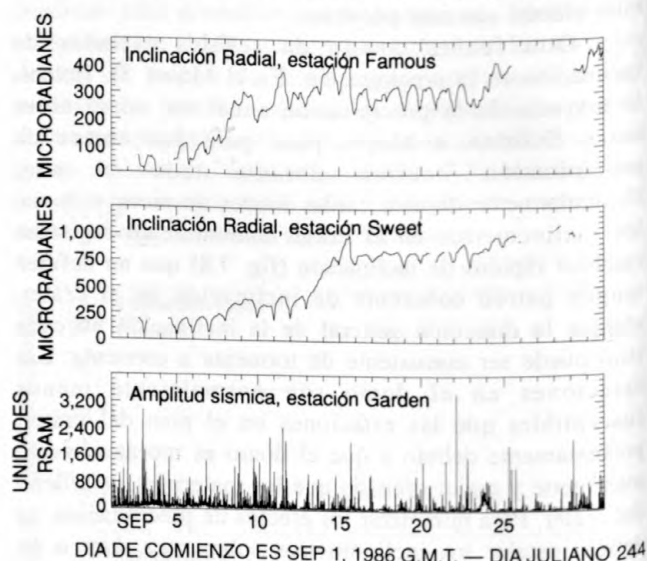
La primera señal de un aumento de intranquilidad fue observada a mediados de Septiembre de 1986, cuando hubo un incremento sutil en el número de terremotos ocurriendo debajo del domo que estuvo acompañado por cambios de inclinación de unos pocos cientos de microradianes (solo un poco mayor a la de los efectos diurnos) en dos de las cuatro estaciones de inclinómetros en los flancos del domo (fig. 7.10). Como se ha descrito arriba, cada estación de inclinómetros consistía de dos inclinómetros de eje sencillo orientados radial al centro del domo. Los componentes radiales de



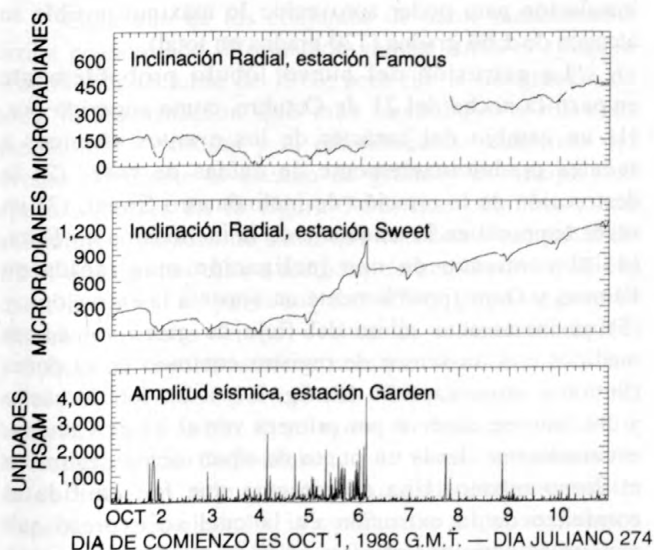
**Figura 7.9.** Cambios en la longitud de las líneas de la estación de EDM Tinker a dos reflectores en el flanco septentrional del domo desde Enero de 1986 a Diciembre de 1987, que incluyó los episodios de crecimiento de domo en Mayo de 1986 y Octubre de 1986. Para cada línea, se restó una longitud arbitraria nominal de las longitudes de las líneas medidas.

inclinación medidos a mediados de Septiembre y a lo largo del período precursor fueron dirigidas hacia afuera del centro del domo, consistente con el hinchamiento y crecimiento endógeno. Secuencias adicionales de sismos pequeños que culminaron el 1 y 5 de Octubre fueron acompañados por cambios pequeños adicionales en las estaciones Famous y Sweet; el último evento fue el más fuerte hasta esa fecha (fig. 7.11).

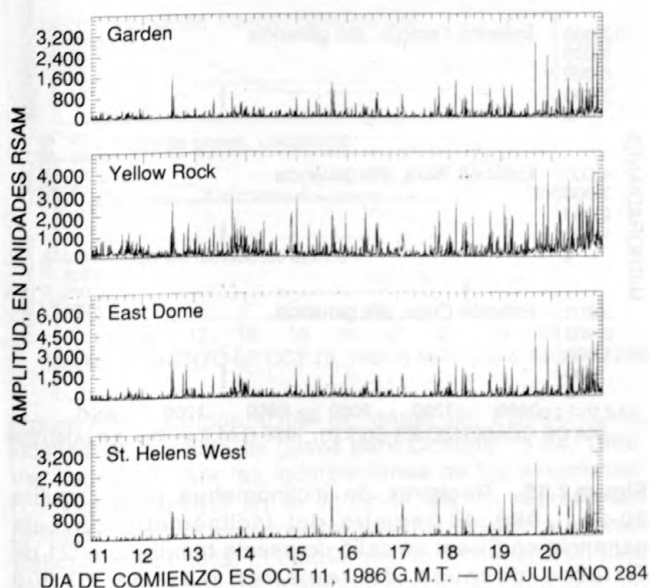
Después del evento del 5 de Octubre, hubo un pequeño receso en actividad volcánica, pero Famous y Sweet continuaron a inclinarse hacia afuera a una velocidad cada vez mayor. Las medidas de EDM demostraron que la deformación del domo, particularmente en el flanco occidental donde estaba localizado el inclinómetro Sweet, había empezado a acelerarse (fig. 7.9). El 16 de Octubre se observaron nuevas grietas en el domo y cobertura de nieve en el piso occidental del cráter y estaba aumentando constantemente la actividad sísmica debajo del domo y tasas de inclinación en Sweet y Famous (figs. 7.12, 7.13). Una comparación entre los datos sísmicos y de EDM con patrones de episodios anteriores de construcción de domo indicaba que era probable que



**Figura 7.10.** Los registros de inclinación de dos inclinómetros de alta ganancia en el domo (arriba, mitad) y un registro de RSAM (Real time Seismic Amplitude Measurement=Medida de Amplitud Sísmica en Tiempo Real; Endo y Murray, 1991) del sismómetro Garden, para el período Septiembre 1-30 de 1986. RSAM proporciona una medida de la actividad sísmica basada en la integración numérica de la salida eléctrica de un sismómetro. La escala vertical de RSAM es arbitraria; los valores demostrados son promedios de 10 minutos. Un enjambre de sismos someros debajo del domo el 15 de Septiembre estuvo acompañado por pequeños cambios de inclinación en Famous y Sweet, pero fueron demasiado pequeños para ser evidentes en los registros RSAM.



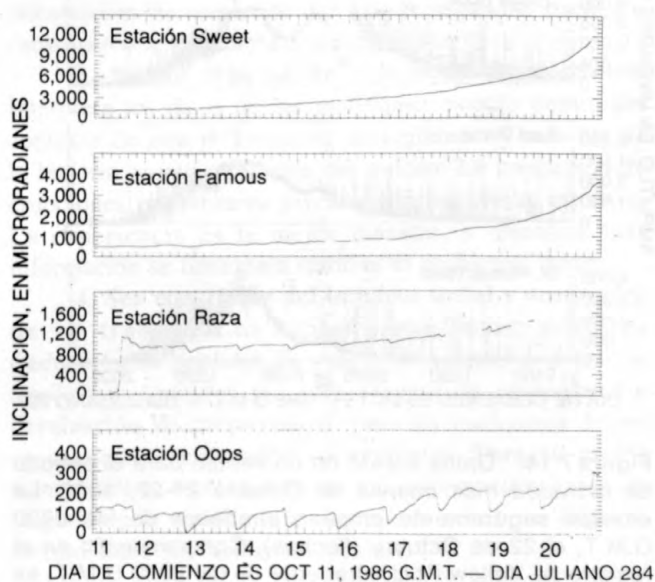
**Figura 7.11.** Los registros sísmicos de dos estaciones, Famous y Sweet y un registro de RSAM (promedio de 10 minutos) del sismómetro Garden para Octubre 1-10, 1986. Un apreciable enjambre de sismos pequeños debajo del domo que culminó Octubre 5 estuvo acompañado por el comienzo de una lenta, pero constante inclinación en Famous y Sweet. Observe que las escalas verticales para los datos de los inclinómetros son diferentes; la escala del RSAM es arbitrario.



**Figura 7.12.** Registros de RSAM (promedios de 10 minutos) de cuatro sismómetros localizados en el Mount St. Helens entre Octubre 11-20, 1986. La actividad sísmica aumentó constantemente durante este período, al mismo tiempo hubo un aumento en la tasa de inflación del domo.

comenzaría otro episodio dentro de las próximas tres semanas y ese mismo día se emitió la respectiva advertencia pública.

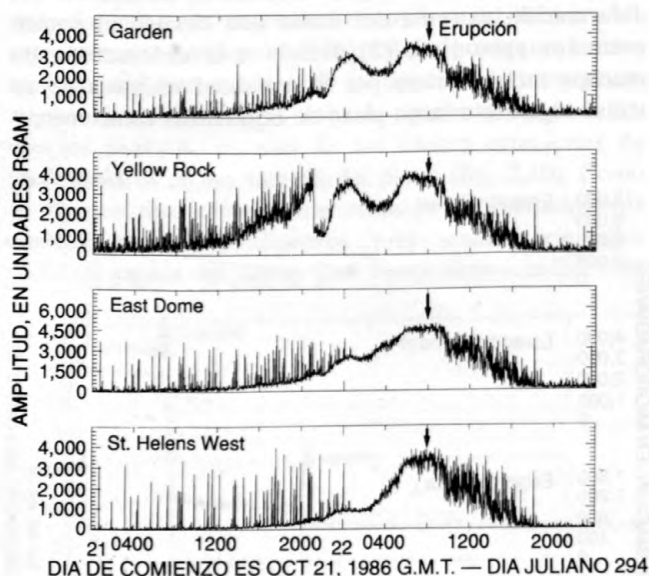
Para el 18 de Octubre, las medidas de EDM y datos del inclinómetro Sweet indicaban que el hinchamiento más rápido estaba ocurriendo en el flanco septentrional y occidental del domo, mientras que los inclinómetros en las estaciones Raza y Oops indicaban que los flancos australes y orientales del domo también habían empezado a inclinarse hacia afuera (figs. 7.9, 7.13). Una advertencia actualizada emitida el 19 de Octubre redujo la ventana de predicción de 3 semanas a 2-10 días. Se observaron nuevas grietas en el domo y piso del cráter el 20 de Octubre, cuando otra advertencia fue emitida para reducir la ventana de predicción a "dentro de los próximos días, más probablemente dentro de los próximos 3 días." Las predicciones fueron basadas principalmente en los datos de EDM y sismicidad, que indicaban una deformación que se aceleraba rápidamente de acuerdo con un patrón que se había repetido generalmente durante cada episodio previo a la construcción del domo. El patrón de cambios de inclinación fue menos útil para predicciones detalladas porque fue menos consistente entre episodios. Varios factores contribuyeron a estos defectos, incluyendo (1) deformación extrema del domo que cambió el patrón entre los episodios; (2) debido a la destrucción de muchos inclinómetros por la actividad eruptiva no se tenían registros a largo plazo de las mismas estaciones; y



**Figura 7.13.** Registros de cuatro inclinómetros en el domo desde Octubre 11-20, 1986. Ver figura 1 para las localizaciones de los inclinómetros. Observe las diferentes escalas verticales. Compensación en RAZA el 11 de Octubre fue causado por un sismo local durante la fase temprana de actividad precursor.

(3) las líneas de base cortas de los inclinómetros en relación a las líneas de EDM, que hacen que las medidas sean más sensibles a la deformación local. Por otro lado, los inclinómetros desempeñaron un papel de apoyo muy importante en las predicciones al proporcionar datos de deformación en tiempo real durante la noche y durante períodos de mal clima, cuando no era posible hacer las observaciones y medidas de EDM.

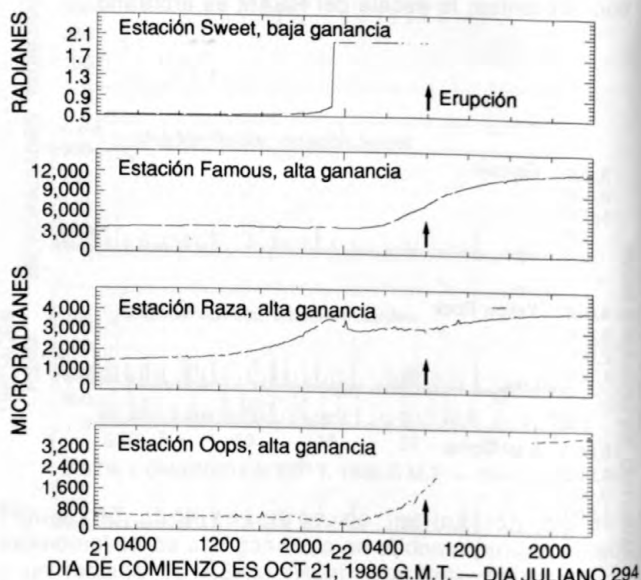
Para el 21 de Octubre, la actividad sísmica debajo del domo era muy intensa (varios sismos de  $M$  2-3), la ruptura del domo era obvio para los observadores en el cráter (muchas grietas nuevas y caídas de rocas), el inclinómetro de alta ganancia en Sweet se salió de escala, y el flujo de dióxido de azufre medido sobre el domo estaba sobre los niveles de fondo (figs. 7.14-7.16). El inclinómetro de baja ganancia registró casi 90 grados (!) de inclinación hacia afuera antes que fuera destruido al final del 21 de Octubre, mientras las otras estaciones de inclinómetros registraron cambios más pequeñas de inclinación que fueron generalmente consistentes con las medidas de EDM a reflectores cercanos. En anticipación a la inclinación hacia afuera durante una construcción del domo, el inclinómetro había sido ajustada durante su



**Figura 7.14.** Datos RSAM de un minuto para el período de actividad más intensa de Octubre 21-22, 1986. La emisión seguramente empezó alrededor de las 0800 G.M.T. el 22 de Octubre (flechas). Compensación en el registro de Yellow Rock alrededor de las 2030 G.M.T. es debido a un cambio de ganancia. La dispersión reducida en datos RSAM de las cuatro estaciones desde las 0000 hasta 0800 el 21 de Octubre indica un cambio en el carácter de la actividad sísmica de numerosos sismos discretos que producen picos RSAM a sismos pequeños, virtualmente continuos que mantienen el valor de RSAM a un nivel alto.

instalación para poder aprovechar lo máximo posible su alcance de  $\pm 60$  grados (120 grados en total).

La extrusión del nuevo lóbulo probablemente empezó la noche del 21 de Octubre, como sugerido por: (1) un cambio del carácter de los eventos sísmicos a señales predominantemente de caídas de roca, (2) la destrucción de la estación de inclinómetro Sweet, (3) un revés temporal en la tendencia de la inclinación en Raza, (4) el comienzo de una inclinación más rápida en Famous y Oops (posiblemente un ajuste a la extrusión), y (5) un incremento súbito del flujo de gases volcánicos medidos con un sensor de registro continuo en el domo (Sutton y otros, capítulo 18; fig. 7.16). Un lóbulo nuevo y creciente se observó por primera vez el 22 de Octubre, eventualmente desde un punto de observación seguro en el domo mismo. Una advertencia que fue emitida al comienzo de la extrusión en la cual se expresó que aunque la actividad sísmica permanecía alta, el nuevo lóbulo parecía estable y, por lo tanto, el colapso del lóbulo u otra parte del domo no parecía probable. El 27 de Octubre, una advertencia final informó que la sismicidad, deformación y emisión de gases habían bajado apreciablemente, y por lo tanto los peligros habían regresado a sus niveles pre-eruptivos.



**Figura 7.15.** Registros de inclinómetros para Octubre 20-21, 1986. El registro del inclinómetro de baja ganancia en Sweet se salió de escala temprano el 21 de Octubre después de registrar más de 20,000 microradianes de cambio de inclinación hacia afuera. El instrumento de baja ganancia continuó operando 18 horas más. El registró casi 90 grados de inclinación hacia afuera antes de salirse de escala hacia el final del 21 de Octubre; después fue destruido el 22 de Octubre. La emisión seguramente empezó alrededor de las 0800 G.M.T. el 22 de Octubre (flechas).



Cada uno de los conjuntos de datos mencionados arriba proporcionó información valiosa sobre el episodio eruptivo de Octubre de 1986, pero fue la integración de toda la información que más contribuyó a nuestras predicciones exitosas y al entendimiento científico del evento. Mediante el estudio de gráficos en tiempo real como aquellos en la figura 7.16, que combina cinco conjuntos separados de datos que van desde campañas de EDM cada pocos días a medidas de amplitudes sísmicas cada minuto, el personal del CVO pudo seguir la situación mientras ocurría, evaluar los peligros asociados, y comunicar oportunamente nuestras conclusiones a los oficiales públicos pertinentes. Obviamente, esto no hubiera sido posible si sólo uno o dos tipos de datos hubieran estado disponibles, o si varios conjuntos de datos hubieran sido interpretados independientemente. Considere, por ejemplo, la conclusión a que se hubiera llegado con los datos de los inclinómetros solamente (fig. 7.15). Tarde el 21 de Octubre, un inclinómetro se había literalmente volteado (Sweet), otro estuvo temporalmente

inclinándose hacia adentro, hacia el centro del domo (Raza), y otros dos no habían empezado a inclinarse rápidamente hacia afuera. Basado en este patrón confuso de cambios de inclinación solamente, no hubiera sido posible hacer una predicción específica. Sin embargo, en base de los datos sísmicos, de deformación y gases volcánicos, al CVO le fue posible hacer predicciones sobre el comienzo del actividad extrusiva.

## RECOMENDACIONES

1. **Sea escéptico.** No confíe en los datos de los inclinómetros, si existe información confiable que indica lo contrario. Resista cualquier tentación de interpretar datos hasta que suficiente información de las líneas base esté disponible para cada estación. Recuerde que una inclinación sustancial puede ser causada por la respuesta del terreno a la instalación del inclinómetro, variaciones diurnas, variaciones estacionales, precipitación, ciclos de congelación/descongelación, cambios en el nivel de agua, y otros factores no relacionados al actividad volcánica.

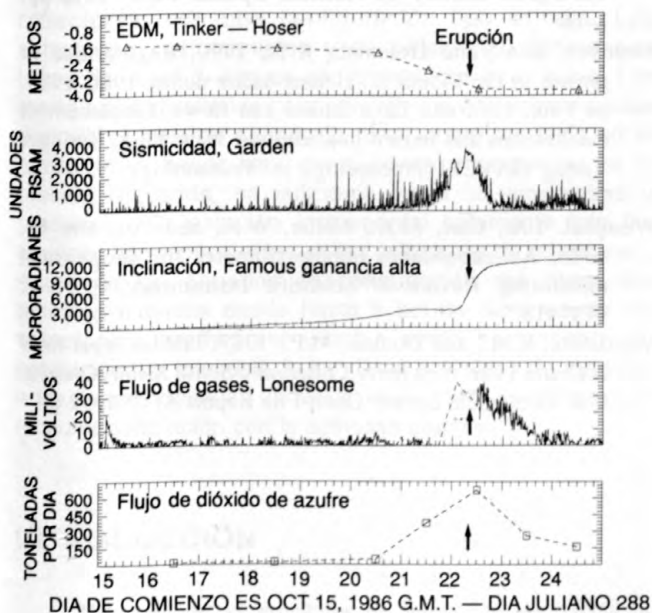
2. **Nunca crea en un solo inclinómetro.** Diseñe su red de inclinómetros con suficiente redundancia para compensar estaciones no confiables, que seguramente habrán, sin importar la cantidad de esfuerzo invertido durante la instalación. Para el futuro cercano, los pilares de la vigilancia volcánica y predicción de actividad eruptiva seguirán siendo sismología y geodesia. Si los recursos son limitados, se le debe dar prioridad a técnicas sísmicas y de deformación de suelo que con mayor seguridad darán los datos menos ambiguos para interpretación.

3. **Nunca crea en un solo conjunto de datos.** Interprete los datos de los inclinómetros sólo dentro del contexto de otra información de vigilancia y a la luz de la historia eruptiva reciente del volcán. La predicción de erupciones es una tarea joven y principalmente intuitiva. La experiencia es la mejor maestra, y mientras más información se tiene para resolver el problema, mejor.

4. **Sea consciente del impacto social y económico de su trabajo.** Los impactos pueden ser positivos (reducción de pérdidas de vida o propiedad) o negativos (molestias causados por una evacuación innecesaria o devaluación de propiedades), pero en cualquiera de los casos seguramente serán sustanciales. Para su propia tranquilidad, esté seguro de su información antes de llegar a una conclusión que pueda tener un impacto directo sobre los residentes locales.

## AGRADECIMIENTOS

Andy Lockhart y Carl Mortensen compartieron su considerable experiencia con los inclinómetros; Barry Voight y los editores, Don Swanson y John Ewert,



**Figura 7.16.** Comparación de datos de EDM, RSAM, inclinómetros y flujo de gases para Octubre 15-24, 1986. Ver figura 1B para las localizaciones de las estaciones. Los valores RSAM en el segundo gráfico representan promedios de 10 minutos de la señal RSAM; la escala vertical es arbitraria. El cuarto gráfico demuestra un flujo de gases volcánicos medidos continuamente por un sensor en LONE en el domo (Sutton y otros, capítulo 18). El gráfico inferior muestra la concentración de dióxido de azufre medida sobre el domo en intervalos de 1 a 2 días usando un COSPEC (espectrómetro de correlación) montado en una avioneta. La emisión probablemente comenzó alrededor de las 0800 G.M.T. el 22 de Octubre (flechas).

hicieron valiosas sugerencias. Jim Savage y sus colegas en el Tectonophysics Branch contribuyeron con una dosis saludable de escepticismo sobre los inclinómetros, por la cual estoy agradecido. Tom Murray y Gene Iwatsubo desarrollaron programas de computación para generar las figuras.

## REFERENCIAS CITADAS

- Agnew, D.C., 1986, Strainmeters and tiltmeters: Review of Geophysics, v. 24, p. 579-624.
- Chadwick, W.W. Jr., Iwatsubo, E.Y., Swanson, D.A., and Ewert, J.W., 1985, Measurements of slope distances and vertical angles at Mount Baker and Mount Rainier, Washington, Mount Hood and Crater Lake, Oregon, and Mount Shasta and Lassen Peak, California, 1980-1984: U.S. Geological Survey Open-File Report 85-279, 96 p.
- Dzurisin, D., Johnson, D. J., Murray, T. L., and Myers, B., 1982, Tilt networks at Mount Shasta and Lassen Peak, California: U.S. Geological Survey Open-File Report 82-670, 42 p.
- Dzurisin, D., Westphal, J.A., and Johnson, D.J., 1983a, Eruption prediction aided by electronic tiltmeter data at Mount St. Helens: Science, v. 221, no. 4618, p. 1381-1383.
- Dzurisin, D., Johnson, D.J., and Symonds, R.B., 1983b, Dry tilt network at Mount Rainier, Washington: U.S. Geological Survey Open-File Report 83-277, 19 p.
- Endo, E.T., and Murray, T., 1991, Real-time seismic amplitude measurement (RSAM): A volcano monitoring and prediction tool: Bulletin of Volcanology, v. 53, no. 7, p. 533-545.
- Harrison, J.C., 1976, Cavity and topographic effects in tilt and strain measurement: Journal of Geophysical Research, v. 81, p. 319-336.
- Harrison, J.C., and Herbst, K., 1977, Thermoelastic strains and tilts revisited: Geophysical Research Letters, v. 4, p. 535-537.
- Iwatsubo, E.Y., Topinka, L., and Swanson, D.A., 1988, Measurements of slope distances and zenith angles at Newberry and South Sister volcanoes, Oregon, 1985-1986: U.S. Geological Survey Open-File Report 88-377, 51 p.
- Meertens, C.M., 1987, Tilt tides and tectonics at Yellowstone National Park: Boulder, University of Colorado, Ph.D. thesis, 236 p.
- Meertens, C., Levine, J., and Busby, R., 1989, Tilt observations using borehole tiltmeters II: Analysis of data from Yellowstone National Park: Journal of Geophysical Research, v. 94, 587-601.
- Mortensen, C.E., and Hopkins, D.G., 1987, Tiltmeter measurements in Long Valley caldera, California: Journal of Geophysical Research, v. 92, no. B13, p. 13,767-13,776.
- Swanson, D.A., Casadevall, T.J., Dzurisin, D., Malone, S.D., Newhall, C.G., and Weaver, C.S., 1983, Predicting eruptions at Mount St. Helens, June 1980 through December 1982: Science, v. 221, p. 1369-1376.
- Swanson, D.A., Dzurisin, D., Holcomb, R.T., Iwatsubo, E.Y., Chadwick, W.W. Jr., Casadevall, T.J., Ewert, J.W., and Heliker, C.C., 1987, Growth of the lava dome at Mount St. Helens, Washington, (USA), 1981-1983, *en* Fink, J.H., ed., The emplacement of silicic domes and lava flows: Geological Society of America Special Paper 212, pp. 1-16.
- Swanson, D.A., and Holcomb, R.T., 1990, Regularities in growth of the Mount St. Helens dacite dome, 1980-1986, *en* Fink, J.H., ed., Lava domes and flows: Emplacement mechanisms and hazard implications: New York, Springer Verlag (IAVCEI Proceedings in Volcanology, v. 2), p. 3-24.
- Westphal, J.A., Carr, M.A., Miller, W.F., and Dzurisin, D., 1983, An expendable bubble tiltmeter for geophysical monitoring: Review of Scientific Instruments, v. 54, p. 415-418.
- Yamashita, K.M., and Doukas, M.P., 1987, Precise level lines at Crater Lake, Newberry Crater, and South Sister, Oregon: U.S. Geological Survey Open-File Report 87-293, 32 p.

## 8. Medidas de Distancia en Pendiente en los Flancos del Mount St. Helens, Desde Fines de 1980 Hasta el Final de 1989

Por Eugene Y. Iwatsubo, Lyn Topinka, y Donald A. Swanson

### ABSTRACTO

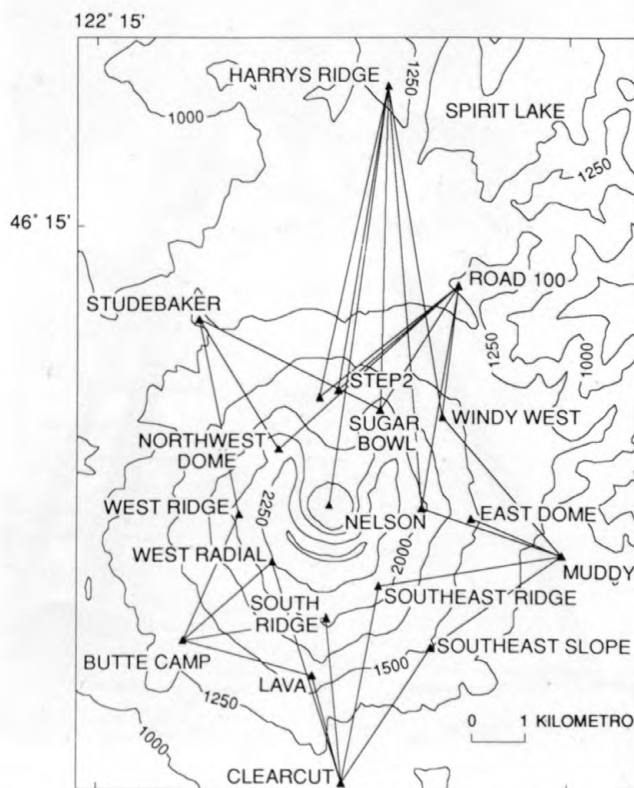
Una red de vigilancia de medidas de distancia en pendiente en los flancos del Mount St. Helens fue establecida un mes antes de la erupción principal del 18 de Mayo de 1980. Hasta 1990, la red se había expandido y comprendía 6 estaciones instrumentales y 13 estaciones de reflectores, con una configuración tipo estrella. Las estaciones instrumentales y de reflectores comprenden torres de acero 3-4 m de alto cimentados en el suelo. Las torres están diseñadas para permitir que se tomen medidas durante el invierno cuando la nieve cubre los hitos en el suelo. Para hacer las correcciones atmosféricas, a la presión requerida, es suficiente tomar la temperatura y presión en la estación instrumental solamente (sin las medidas correspondientes en las estaciones de reflectores). Antes de los períodos de construcción del domo, las medidas tomadas desde hasta 8 km de distancia de las estaciones pueden ser usadas como herramienta de predicción. La totalidad de los datos obtenidos de medidas a los flancos después de Mayo 18 de 1980 no demuestran ninguna correlación con la actividad eruptiva.

### INTRODUCCION

Después de la erupción de Mayo 18 de 1980, la vigilancia de la distancia en pendiente en los flancos del Mount St. Helens fue reanudada y expandida a una red de 7 estaciones instrumentales y 12 de reflectores (Swanson y otros, 1981). Una estación instrumental instalada antes de 1980 fue usada por un corto período, pero a fines de 1980 se abandonó, quedando seis estaciones instrumentales permanentes. Una decimotercera torre fue colocada en Noviembre de 1983.

El propósito de esta red es detectar un flujo grande de magma por el sistema actual de conductos. Desde fines de 1980 hasta el final de 1989, ha ocurrido un episodio explosivo y 16 episodios de construcción del domo. Aunque la cantidad de deformación ha sido

apreciable, este movimiento ha estado localizado en o cerca del domo; a veces, solamente partes del domo han sido afectadas por la intrusión magmática. No se detectaron cambios en la longitud de las líneas a los flancos del volcán que se pudieron asociar con cualquiera de estos episodios; por lo tanto ningún volumen significativo (varios millones de metros cúbicos o más) de magma ha entrado al sistema de conductos



**Figura 8.1.** Red de vigilancia de distancia en pendiente en el Mount St. Helens. La línea de Harry's Ridge al domo y piso del cráter representan varias líneas a blancos colocados cercanamente. Líneas de nivel en metros.



someros (alrededor de 1 km de profundidad), desde la erupción de Mayo 18 de 1980. Una intrusión de magma aún más grande tendría que ocurrir a una profundidad de 7–10 km, la profundidad de la cámara inferida de estudios sísmicos y petrológicos de la erupción del 18 de Mayo (Scandone y Malone, 1985; Carey y Sigurdsson, 1985; Rutherford y otros, 1985), antes de que se pudieran observar cambios en la longitud de las líneas medidas con la red del flanco exterior del volcán.

## RED

La red de distancia en pendiente en los flancos del Mount St. Helens, conocida como la red exterior, está



A

ilustrada en la figura 8.1 Una configuración en forma de estrella fue usada para obtener cobertura alrededor del volcán (Iwatsubo y Swanson, capítulo 10). Veintiocho líneas conforman la red exterior, con distancias que varían desde 2 hasta 8.5 km. Varias líneas adicionales de Harrys Ridge, miden distancias a blancos montados en el domo y piso del cráter.

Las estaciones instrumentales que se usaron poco después de Mayo 18 de 1980, consistían de varillas de construcción cimentadas en el suelo, cercana la una de la otra; una era para medir distancias con el distanciómetro electrónico (EDM-electronic distance meter) y la otra para medir ángulos con el teodolito. Dado el peligro asociado con los episodios explosivos que siguieron la erupción del 18 de Mayo (el último habiendo ocurrido en Octubre de 1980), se tomaban las dos medidas simultáneamente para minimizar el tiempo de permanencia en cada uno de los sitios. Desafortunadamente, debido a la actividad volcánica o las condiciones atmosféricas, algunas medidas se tomaron con prisa y no se registró información importante como la altura del instrumento (HI-height of instrument).



B

**Figura 8.2.** A, Torre de instrumento con el EDM montado sobre la placa superior de la torre. B, Torre de reflector con prismas montados cerca de su parte superior. Las alturas de las torres varían entre 3 y 4 m. Cada pata está cimentada en el piso. Torre de instrumento tiene un andamio para facilitar el acceso por todos sus lados. El palo con el termómetro está sujetado al andamio y a una pata de la torre.

Para resolver el problema de la altura del instrumento, se utilizó un método de montaje desarrollado por el Observatorio Vulcanológico de Hawaii (HVO-Hawaiian Volcano Observatory). Se hizo un parche de cemento alrededor de cada varilla para marcar el sitio donde se debían colocar las patas del trípode. Para poder reconocerlos fácilmente, se hicieron pequeños huecos en el cemento y se pintaron. Las patas del trípode, siempre extendidas completamente, se colocan en los huecos, asegurando así que el trípode tenga siempre la misma altura. Un tribrach con plomada óptica fue usada para centralizar cada instrumento sobre su varilla. Este método, con el parche de cemento, ha facilitado y acelerado el montaje.

Las estaciones de reflectores entre Mayo y Septiembre consistían de una agrupación de reflectores plásticos de carretera colocados sobre tablas que a su vez están atornilladas a postes de acero colocados en el suelo. Estos reflectores se colocaban típicamente a 1–1.5 m sobre el nivel del suelo. Para varios casos cuando las distancias de instrumento a reflectores eran más grandes, se utilizan prismas estándares de vidrio cubo-esquinado que fueron colocados en los postes, reemplazando los

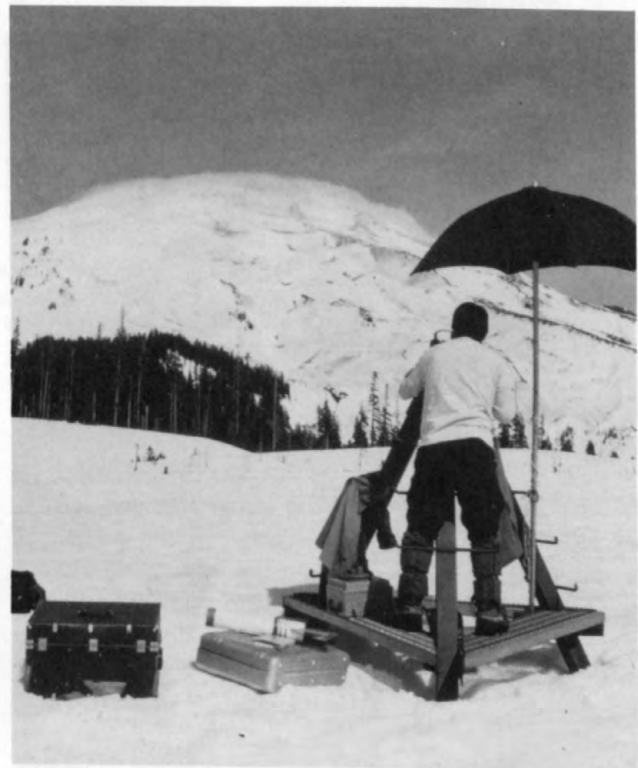
reflectores plásticos. La ceniza que muchas veces atizaba los reflectores, pero no era esto un gran problema ya que los reflectores de plástico no eran caros y eran fáciles para reemplazar. Los reflectores funcionaban bien durante los meses de verano, pero hubieran sido enterrados por nieve durante los meses de invierno.

En Septiembre de 1980, una empresa eléctrica local instaló torres de acero (figura 8.2) en todas las estaciones instrumentales y de reflectores (Swanson y otros, 1981) para vigilar la red durante todo el año, especialmente durante los meses de invierno. Estas torres están 3–4 m sobre el nivel del suelo y permiten que los reflectores e instrumentos siempre estén sobre el nivel de la nieve (fig. 8.3). Las estaciones para medir todas las distancias y ángulos fueron transferidas de los hitos en el suelo a las torres y se usaron durante todo el año.

Cada torre de reflectores tiene un prisma de vidrio cubo-esquinado montado cerca de su punto más alto para que esté sobre la nieve y ceniza en el aire (fig. 8.2B). Cada torre tiene uno o dos prismas dependiendo del número de estaciones instrumentales desde las cuales se miden distancias. Aunque los prismas están colocados a



A

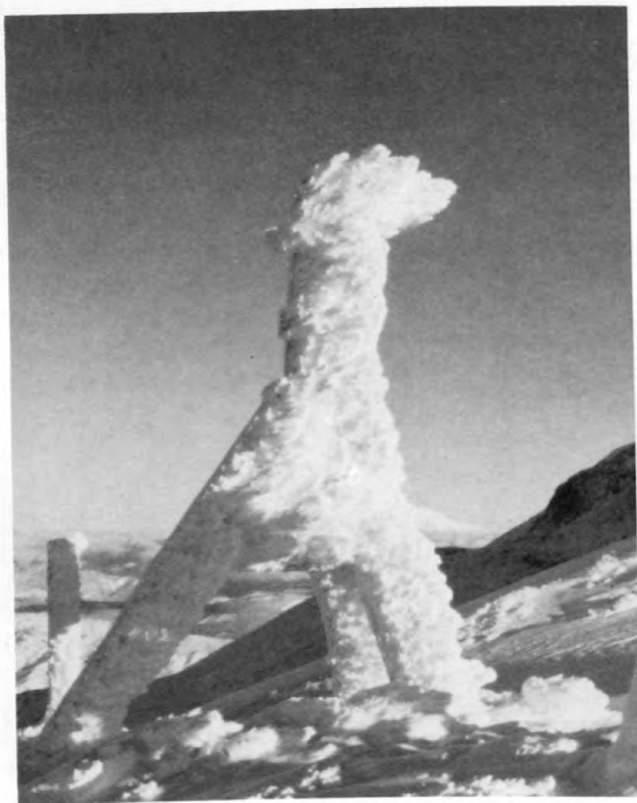


B

**Figura 8.3.** A, La estación instrumental Clearcut en el verano, y B, bajo condiciones invernales. Las torres de acero permiten el uso de las torres todo el año. Las acumulaciones de nieve raramente cubren las torres instrumentales y nunca las torres de reflectores.

una distancia bastante grande sobre el suelo, la ceniza corroyó algunos reflectores y fue un problema secundario hasta varios años después que se instalaron las torres. La mayoría de los reflectores han sido reemplazados una vez desde 1980, y unos cuantos, dos veces. El hielo es un problema grande durante los meses de invierno. Típicamente los prismas de vidrio están cubiertos de hielo y necesitan ser limpiados antes de que se pueda tomar la medida, y no es raro tener acumulaciones de escarcha de hasta un metro en las torres (fig. 8.4), la misma que ha sido removida con una hacha antes de que se puedan limpiar los prismas.

Las torres pueden tener problemas de inestabilidad. El problema es más grave en aquellas torres instaladas en los depósitos gruesos no consolidados de la erupción de Mayo 18, donde ha habido un asentamiento a lo largo de los años (fig. 8.5, líneas ROADSGB, HARRYSSGB, y HARRYSSTP). La torre Step, localizada en la entrada septentrional al cráter, instalada en material suelto de avalanchas de escombros, tuvo que ser cambiada en 1986 porque el risco fino sobre el cual estaba localizada se estaba erosionando. La torre Sugar Bowl ahora tiene una pata en el aire, porque el pómez y ceniza en la base se ha erosionado con el viento. Las torres localizadas en otras



**Figura 8.4.** La acumulación y cobertura de escarcha en la torre de reflectores y prismas es un problema durante los meses de invierno. Hubo que sacar todo el hielo de las prismas y limpiarlos antes de poder tomar las medidas.

partes del volcán, donde los depósitos de 1980 son delgados, parecen ser estables.

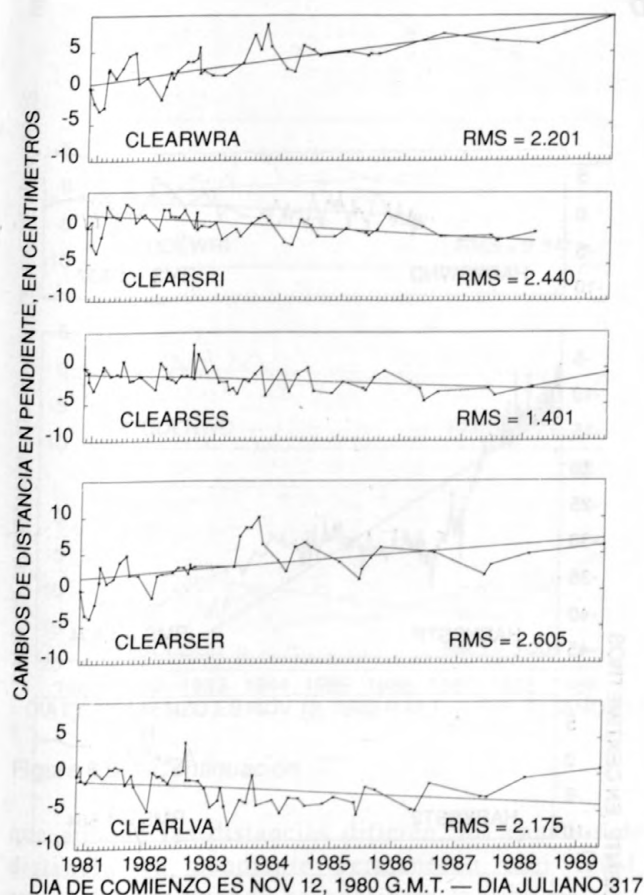
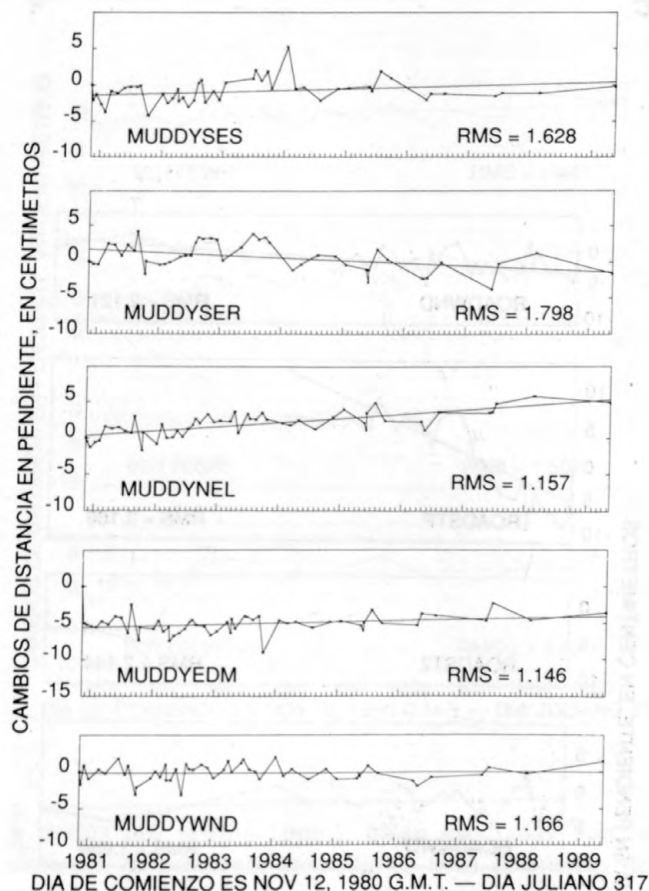
## EQUIPO

El EDM usado para hacer las medidas en nuestra red exterior es un Keufel & Esser Rangemaster III, capaz de medir hasta 60 km con 60 prismas con una exactitud de ( $\pm 5$  mm + 1 ppm). El Rangemaster III consume 5 amperios (amp) de corriente y requiere una batería grande de 12 voltios. Se pueden usar baterías de carros, pero estas son extremadamente pesadas. Nosotros usamos una batería de 24 amp-hora, sellada y recargable, con electrolitos gelificados (sus dimensiones son  $17 \times 16 \times 12.5$  cm; pesa 8.65 kg), que se coloca dentro de una caja de fibra de vidrio que tiene un mango para facilitar su transporte. Siempre llevamos dos baterías al campo y típicamente usamos las dos durante la campaña. La fuente de luz del EDM, un laser cuyo medio activo está constituido por una mezcla de helio y neón, es visible, y se puede ver la señal de retorno del reflector. El rayo visible es muy útil para la localización de los blancos que están a grandes distancias o durante condiciones atmosféricas marginales.

El Rangemaster III se monta con un yugo usando un tribrach con plomada óptica. El tribrach, el yugo y EDM están montados directamente encima de la torre instrumental de acero (fig. 8.2A). La placa superior de cada torre instrumental está perforada al centro para que el tribrach pueda ser montado. Se usa una tuerca ahusada para asegurar que el instrumento esté siempre centrado sobre el hueco.

La temperatura y presión del aire son los parámetros atmosféricos medidos para corregir la distancia en pendiente. Se toma la temperatura del aire a 7-8 m sobre la superficie del suelo. Un sensor calibrado de temperatura (Iwatsubo y Swanson, capítulo 10) es montado dentro de un protector aerodinámico que cabe encima de las secciones de un tubo de acero usado para alzar el protector. El sensor se monta dentro de un tubo de 46 cm de largo y 37 cm de diámetro que a su vez está colocado dentro de un tubo más grande de 8.5 cm de diámetro. Se usa tubería fenólica por su propiedad de distribuir calor radiante uniformemente sobre la superficie del tubo. Una cola o timón se coloca al final del tubo (fig. 8.6). Un pedazo corto de bronce sólido (7 cm de largo, 1.3 cm en diámetro) conectado a la mitad del tubo exterior perpendicular a su eje largo cabe dentro de la sección superior del tubo de acero (diámetro interior de 1.5 cm) y permite que gire el protector. El diseño entero sirve como una veleta, para que cuando cambie la dirección del viento, el protector gire y permita que el aire siempre fluya por el tubo y sensor. La



**A****B**

**Figura 8.5.** Cambios cumulativos de distancia en pendiente de las líneas medidas de las estaciones instrumentales A, Clearcut; B, Muddy; C, Road 100; D, Harrys Ridge; E, Studebaker; y F, Butte Camp. Una línea de mejor ajuste pasa por los datos, y la media cuadrática (RMS, en centímetros) de la línea está indicada en cada gráfico.

parte inferior del tubo de acero, del cual está agarrado el protector, descansa sobre el andamio que circunda la torre y el tubo se amarra a la pata de la torre para mayor estabilidad (fig. 8.2A).

Desde 1980 hasta 1986, la presión barométrica se medía usando un altímetro Wallace & Tiernan. En 1987, nosotros lo cambiamos por un barómetro/altímetro manual AIR-HB-1A (Iwatsubo y Swanson, capítulo 10) para lograr medidas más exactas. No se mide humedad.

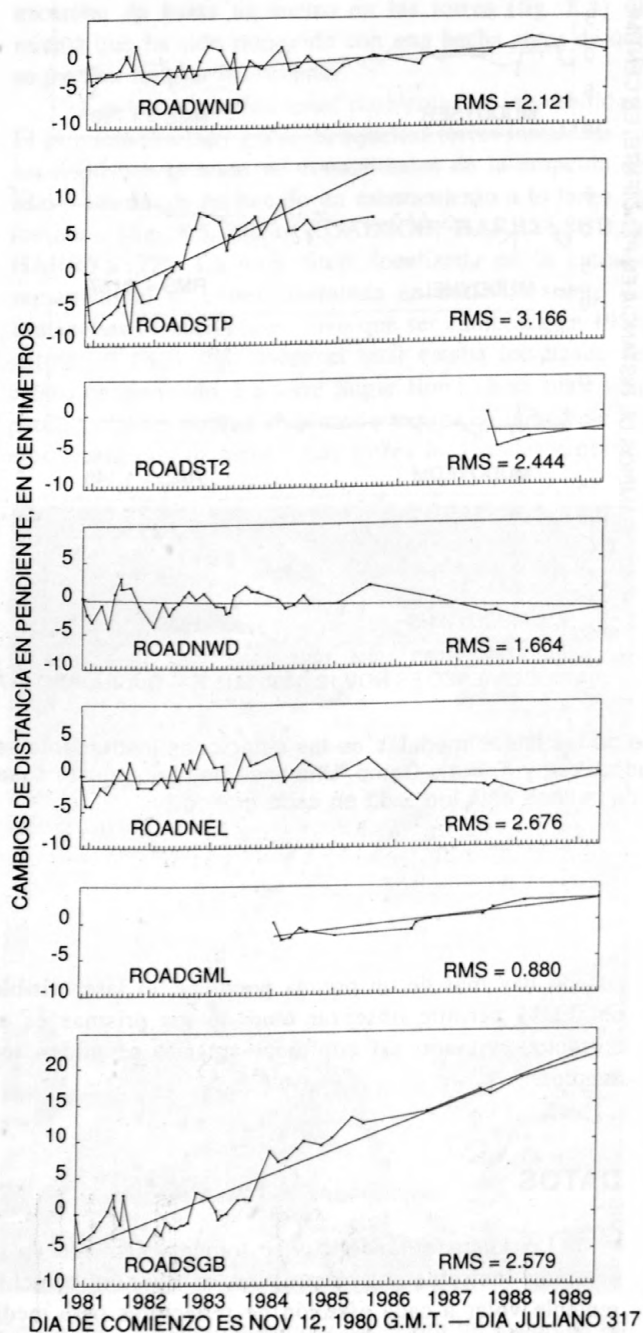
Un teodolito Wild T2 es usado para medir los ángulos cenitales y horizontales. El teodolito se monta directamente sobre la placa superior usando la misma tuerca roscada que para el EDM. Se miden los ángulos cenitales al mismo prisma que se usa para las medidas de EDM. Siempre se mide primero la distancia. Por lo tanto,

cuando hay más de un prisma por torre, el laser visible del EDM permite observar cual de los prismas es el correcto, evitando así confusión cuando se miden los ángulos.

## DATOS

Los datos atmosféricos se toman solamente en la estación instrumental, porque no es económicamente rentable volar a cada estación de reflectores para medir las condiciones atmosféricas. Una comparación de las distancias de pendiente calculadas usando datos atmosféricos medidos a un solo lado con aquellas para las cuales se hicieron medidas a los dos lados, demostró

C



D

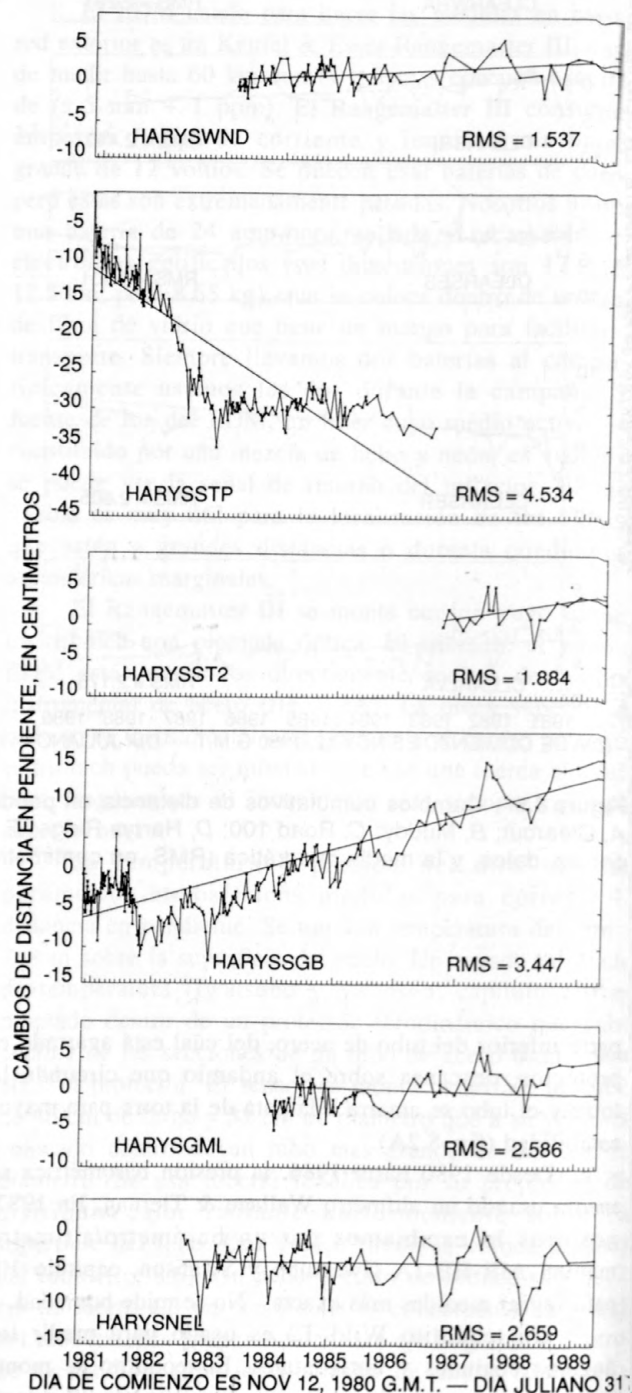
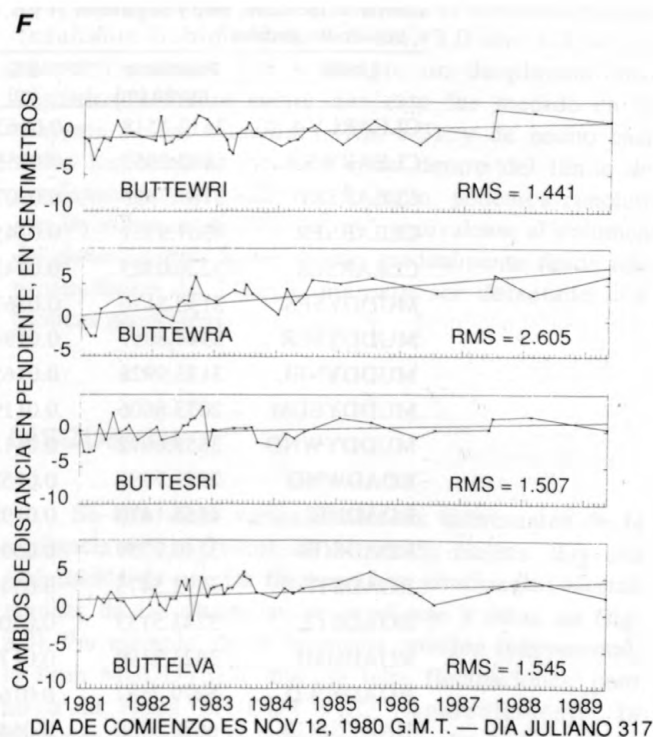
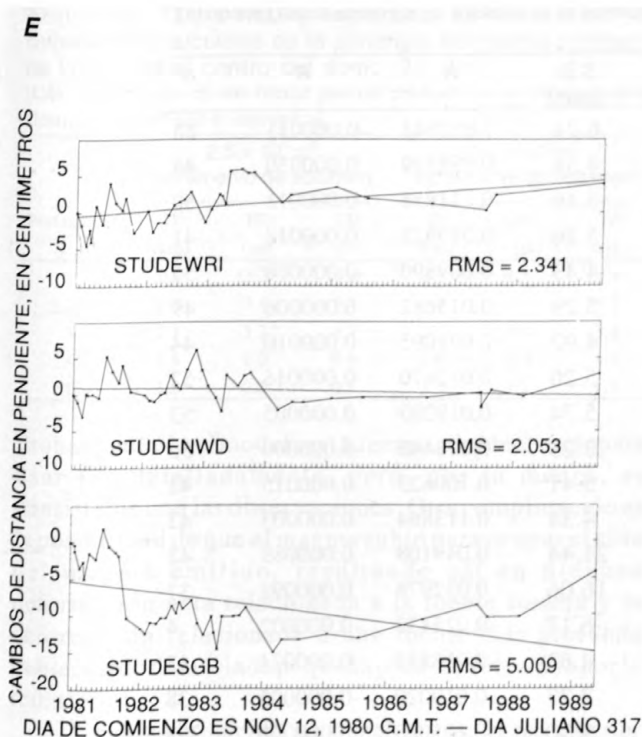


Figura 8.5.—Continuación



**Figura 8.5.—Continuación**

que aunque las distancias difieren, los cambios de distancia en pendiente permanecen casi igual, especialmente cuando se considera la diferencia de elevación entre el instrumento y reflector es menor a 300 m (Observatorio Vulcanológico de Hawaii, datos no publicados, 1989). En otras palabras, la exactitud difiere, pero la precisión es casi la misma.

Los datos atmosféricos de un solo lado pueden ser adecuados para propósitos de vigilancia, pero es imperativo que se tomen muchas medidas de distancias de pendiente para establecer la precisión asociada con cada una de las líneas. En el Mount St. Helens, muchas medidas de un solo lado son usadas para establecer tendencias y errores (fig. 8.5). Los errores relacionados con procedimientos de montaje, condiciones atmosféricas y medidas en pendientes fuertes (diferencia promedio de altura entre estaciones instrumentales y de reflectores es  $617 \pm 286$  m) pueden ser de hasta varios centímetros.

Los cambios cumulativos de la distancia en pendiente para las 28 líneas (líneas a Step son incluidas aunque la estación fue movida en 1989) están graficados en la figura 8.5. La línea recta es una regresión de media cuadrática mínima, mientras que el error de media cuadrática (RMS-root mean square) está dado en centímetros. La tabla 8.1 incluye otras estadísticas. Las desviaciones estándar (S.D.), en metros

y partes por millón (ppm), están asociadas con la distancia en pendiente promedio, y  $n$  es el número de medidas. La ecuación de regresión lineal es

$$y = A + Bx.$$

La desviación estándar para 25 de las líneas es  $0.0188 \pm 0.0044$  m ( $4.9068 \pm 1.2544$  ppm). La desviación media estándar no incluye las líneas medidas a las torres de Step y Sugar Bowl, que no estaban estables durante el período de medidas.

## RELACION ENTRE DEFORMACION OBSERVADA Y EL VOLUMEN DE MAGMA EMITIDO O MAGMA ALMACENADO

Un modelo Mogi (fuente puntual) simplificado (A. Okamura, comun. escrita, 1990) fue usado para estimar el desplazamiento horizontal máximo esperado y su distancia horizontal a la fuente para dos volúmenes de magma,  $2.5$  y  $5.0 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, sumado o restado a las profundidades que varían desde 1 a 5 km (tabla 8.2). El modelo asume un cambio de volumen en un material elástico e isotrópico. El alcance de profundidad es el que se considera probable para la cámara magmática debajo



**Tabla 8.1.** Estadísticas para las líneas externas de la red de las estaciones en la figura 8.5.

[La desviación estándar promedio (S.D.) es  $.0188 \pm 0.0044$  m ( $4.91 \pm 1.25$  ppm), excluyendo las medidas a las torres inestables Step y Sugarbowl. A y B, coeficientes en la ecuación de regresión lineal (ver texto); n, número de medidas.]

Línea	Pendiente media (m)	S.D. (m)	S.D. (ppm)	A	B	n
CLEARLVA	2612.3518	0.0163	6.24	0.052843	-0.000011	55
CLEARWRA	5142.2053	0.0255	4.38	0.058339	0.000030	44
CLEARSR	3787.7435	0.0207	5.46	-0.131858	-0.000013	50
CLEARSER	4567.9731	0.0245	5.36	0.019525	0.000018	41
CLEARSES	3229.0305	0.0143	4.43	0.009890	-0.000008	55
MUDDYSES	3155.5176	0.0167	5.29	0.015682	0.000006	49
MUDDYSER	3944.8057	0.0194	4.92	0.031095	-0.000010	44
MUDDYNEL	3133.9928	0.0165	5.26	0.012470	0.000016	52
MUDDYEDM	2073.8606	0.0119	5.74	-0.019293	0.000005	53
MUDDYWND	3559.6672	0.0115	3.23	-0.013443	0.000000	50
ROADWND	2921.7032	0.0158	5.41	0.100623	0.000015	42
ROADNEL	4558.1470	0.0198	4.34	0.113864	0.000003	43
ROADSGB	3240.9759	0.0695	21.44	0.049108	0.000089	42
ROADSTP	3392.5475	0.0545	16.06	0.032978	0.000092	37
ROADST2	3243.5133	0.0200	6.17	-0.025132	-0.000002	4
ROADGML	3823.3190	0.0177	4.63	-0.018813	0.000024	13
ROADNWD	5079.7687	0.0166	3.27	-0.019029	-0.000005	38
HARYSSGB	6679.5150	0.0648	9.70	-0.125063	0.000060	237
HARYSSTP	6346.4131	0.0916	14.43	-0.170432	-0.000148	215
HARYSST2	6101.6053	0.0209	3.43	0.009628	0.000030	24
HARYSGML	6391.8993	0.0257	4.02	0.012151	0.000000	95
HARYSNEL	8529.7190	0.0265	3.11	-0.035903	0.000000	107
HARYSWND	7033.3793	0.0171	2.43	0.010598	0.000013	88
STUDESGB	4461.8031	0.0454	10.18	-0.177775	-0.000031	42
STUDENWD	3502.0822	0.0206	5.98	0.013641	-0.000003	41
STUDEWRI	4507.9884	0.0263	5.83	0.009424	0.000017	37
BUTTEWRI	2814.4481	0.0152	5.40	-0.001051	0.000007	44
BUTTEWRA	2585.6419	0.0216	8.35	0.111692	0.000022	35
BUTTESRI	3014.5021	0.0151	5.01	0.031401	0.000006	37
BUTTELVA	2717.0358	0.0138	5.08	0.012025	0.000008	44

del Mount St. Helens. La distancia horizontal promedio desde las torres con los reflectores hasta el centro del domo es 2.1 km; la cantidad de desplazamiento horizontal para esta distancia promedio también está en la tabla 8.2(TD).

Los resultados de los cálculos sugieren que la red exterior podría detectar desplazamientos mayores que aquellos esperados en el nivel 2 de S.D., sólo para un cambio de volumen de más de  $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$  a una profundidad de alrededor de 1 km. Un volumen más pequeño, o una mayor profundidad no hubieran dado desplazamientos mayores que aquellos esperados en el nivel 2 de S.D. Sin embargo, medidas repetidas sobre un intervalo largo de tiempo quizás den una tendencia

convinciente aún si ni el volumen, ni la profundidad fueran adecuados para satisfacer la guía de confianza de 2 S.D.

Los resultados del modelaje son marginalmente consistentes con el volumen de episodios con un sólo crecimiento de domo. El episodio de crecimiento de domo promedio produjo un volumen de alrededor de  $3.6 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Swanson y Holcomb, 1990), y ninguna deformación fue detectada por la red exterior durante los eventos. De acuerdo con el modelo, esto implicaría que el magma salió de una cámara con una profundidad mayor a 1 km, que estaría dentro del margen de 1–2 km estimado de las observaciones sísmicas (Endo y otros, 1990).

**Tabla 8.2.** Desplazamiento horizontal (HD-horizontal displacement) máximo computado y distancia horizontal (D) de la fuente para dos volúmenes de magma profundo. TD, cambio esperado en las torres de reflectores (calculado de la distancia horizontal promedio de las torres al centro del domo, 2.1 km).

[Cálculos basados en una fuente puntual colocado en un medio espacio elástico, homogéneo e isotrópico]

Profundidad (km)	$2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ incremento de volumen			$5.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ incremento de volumen		
	D (km)	HD (cm)	TD (cm)	D (km)	HD (cm)	TD (cm)
1	0.7	15.3	6.6	0.7	30.6	13.3
2	1.4	3.8	3.4	1.4	7.7	6.9
3	2.1	1.7	1.7	2.1	3.4	3.4
4	2.8	1.0	0.9	2.8	1.9	1.8
5	3.5	0.6	0.5	3.5	1.2	1.8

Probablemente, el modelo está demasiado idealizado para usar tan detalladamente, pero, por lo menos, es consistente con las observaciones. Otra complicación es la posibilidad de que el magma subió para ocupar el sitio del magma emitido, resultando así en ninguna deformación neta relacionada a la fuente somera y la deformación relacionada a una fuente más profunda hubiera sido demasiado pequeña para ser detectada por la red exterior.

Un descubrimiento adicional es que la red exterior no detectó ninguna deformación resultante de la erupción de alrededor de  $77 \times 10^6 \text{ m}^3$  entre Octubre de 1980 y Octubre de 1986 (Swanson y Holcomb, 1990). De acuerdo con el modelo de una fuente puntual, la erupción de tal volumen de una profundidad de 7 km debe haber



**Figura 8.6.** Vista lateral del protector en el cual se coloca el sensor de temperatura. El protector gira sobre un tubo de acero como una veleta, permitiendo así que el viento pase por el tubo y el sensor de temperatura. El protector tiene aproximadamente 60 cm de largo.

resultado en alrededor de 6.6 cm de desplazamiento horizontal a 2.1 km del punto de emisión; desde profundidades de 8, 9 y 10 km, el desplazamiento resultante hubiera sido 4.6 cm, 3.0 cm y 2.4 cm, respectivamente. Sin embargo, un desplazamiento considerablemente menor que esto fue medido en la mayoría de las estaciones (fig. 8.5), y de hecho casi todos los cambios medidos están dentro del límite de confianza de la 2 S.D. Por lo tanto, podemos concluir que un volumen de  $77 \times 10^6 \text{ m}^3$ , equivalente al volumen del domo, *podría* haber subido gradualmente desde una profundidad de 7 km o más sin ser detectado con técnicas geodésicas.

## DISCUSION

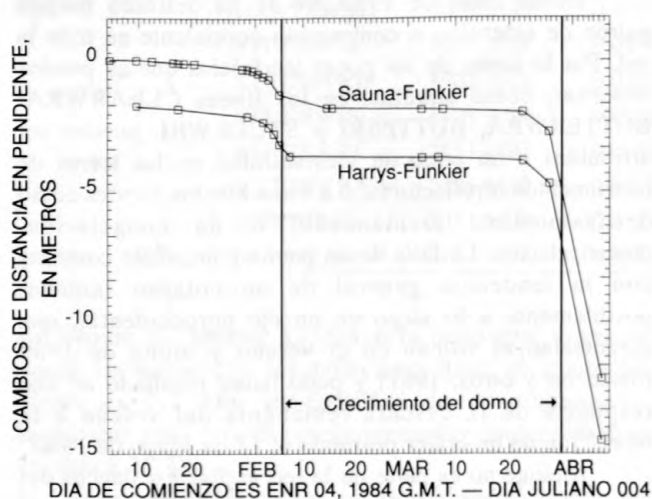
Se han visto varios resultados interesantes de la vigilancia de los flancos del Mount St. Helens. Hay una insinuación de que las fluctuaciones estacionales afectan algunas de las distancias de pendiente y otras no (fig. 8.5). Por ejemplo, desde la misma estación instrumental, la línea MUDDYSER muestra tales fluctuaciones, pero no a la línea MUDDYWND. Aparentemente, la elevación, longitud de línea y localización de la estación no tienen ningún efecto. Nosotros no tenemos ninguna explicación sencilla, aunque sospechamos que las fluctuaciones se pueden atribuir a efectos atmosféricos y no volcánicos.

Desde fines de 1980, no se ha definido ningún patrón de extensión o contracción consistente en toda la red. Por lo tanto, de las pocas tendencias que se pueden observar, como aquellas en las líneas CLEARWRA, BUTTERWRA, BUTTESRI y STUDEWRI, pueden ser atribuidas a un poco de inestabilidad en las torres de instrumentos o reflectores, o a otros efectos locales como deslizamientos, asentamiento o de congelación-descongelación. La falta de un patrón consistente contrasta con la tendencia general de un colapso interior, posiblemente a lo largo de un eje noroccidental, que caracterizó el volcán en el verano y otoño de 1980 (Swanson y otros, 1981) y pudo haber resultado de una respuesta de la cáscara remanente del volcán a la formación de un cráter profundo el 18 de Mayo de 1980.

Aunque no es parte de la red vigilar los flancos del volcán, las medidas de Harrys Ridge al domo (8 km) y al piso del cráter ayudan a predecir los episodios de construcción del domo y proporcionan un indicador alterno si las condiciones volcánicas en el cráter son demasiadas peligrosas para trabajar ahí. En 1984, antes de los episodios de construcción de domo de Febrero y Mayo, un blanco en el lado norte del domo fue medido desde las estaciones instrumentales Harrys Ridge y Sauna. Sauna estaba localizada aproximadamente 280 m

al norte del domo y formaba parte de la red de deformación del domo en el cráter (Iwatsubo y Swanson, capítulo 6). Las dos líneas reflejan las mismas características (fig. 8.7) y fueron usadas para predecir este episodio de construcción de domo. Además, la similitud entre las tendencias de las dos estaciones instrumentales indican que Sauna, en el piso del cráter, no se estaba moviendo significativamente—un pedazo de información vital que de otra manera no hubiera estado disponible.

Uno de los beneficios de las medidas de Harrys Ridge al domo es que las condiciones fuera del cráter casi siempre permiten aterrizajes en Harrys Ridge. En contraste, vientos grandes e impredecibles en el cráter a veces ponen en peligro el vuelo y aterrizaje del helicóptero. Durante períodos antes de un episodio eruptivo, cuando el trabajo puede estar limitado a Harrys Ridge debido a las consideraciones atmosféricas o de seguridad, estas medidas ayudan a definir mejor el ciclo de deformación. Un ejemplo es el episodio de Febrero de 1984 (fig. 8.7). El episodio de construcción de domo empezó Febrero 6. La línea Sauna-Funkier fue medida Febrero 5 y nuevamente Febrero 14, pero la línea Harrys-Funkier fue medida a mediados de Febrero 7, cuando las condiciones del viento prohibieron el trabajo en el cráter, y nuevamente Marzo 3. La distancia Harrys-Funkier el 7 de Febrero, cuando comparada con



**Figura 8.7.** Los cambios de distancia en pendiente al blanco Funkier en el domo desde dos estaciones instrumentales diferentes para los episodios de crecimiento de domo de Febrero y Marzo de 1984. La línea superior ilustra los datos medidos desde Sauna, 280 m al norte del domo en el piso del cráter. La línea inferior ilustra los datos medidos desde Harrys Ridge, 8 km al norte del domo. Se usaron las dos líneas para predecir los dos episodios.

aquella de Marzo 3, demuestra que la deformación virtualmente se había detenido para Febrero 7. Por lo tanto, el cambio en la distancia Sauna-Funkier medida entre Febrero 5 y Febrero 14 debe haber ocurrido antes del mediodía del 7 de Febrero.

## CONCLUSIONES

Desde fines de 1980, poca o ninguna deformación detectable ha sido medida en los flancos del Mount St. Helens. Toda la actividad eruptiva y de deformación ha ocurrido en el domo de lava.

Los datos atmosféricos tomados a un solo lado son suficientes para detectar una deformación a gran escala que puede ocurrir antes de un episodio eruptivo, como lo indican las medidas de Harrys Ridge a puntos dentro del cráter. Es importante recolectar la mayor cantidad de medidas de un solo lado para ayudar a definir los errores y tendencias para cada línea. Los datos demuestran variaciones fortuitas de alrededor de 5 ppm, que se consideran estar dentro de los errores esperados definidos por tendencias de largo plazo. Muchas líneas en el Mount St. Helens muestran este tipo de comportamiento.

Si hay una entrada significativa de magma en el sistema a una profundidad de alrededor de 1 km, un movimiento de los flancos debe indicar esta inflación. Lo que es "significativo" en este contexto no está bien entendido, además de que el nuevo volumen probablemente tendría que ser mayor a  $2.5 \pm 10^6 \text{ m}^3$ , como juzgado del modelo sencillo de una fuente puntual. A mayores profundidades una intrusión más grande podría pasar desapercibida por la red exterior. Hasta que ocurra la intrusión, esperamos que hayan muy pocos o ningún cambio a lo largo de las líneas del flanco exterior.

## REFERENCIAS CITADAS

- Carey, Steven, and Sigurdsson, Haraldur, 1985, The May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens 2: Modeling of dynamics of the plinian phase: *Journal of Geophysical Research*, v. 90, p. 2948-2958.
- Endo, E.T., Dzurisin, Daniel, and Swanson, D.A., 1990, Geophysical and observational constraints for ascent rates of dacite magma at Mount St. Helens, *en* Ryan, M.P., ed., *Magma transport and storage*: New York, John Wiley & Sons, p. 317-334.
- Rutherford, M.J., Sigurdsson, Haraldur, Carey, Steven, and Davis, Andrew, 1985, The May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens 1: Melt composition and experimental phase equilibrium: *Journal of Geophysical Research*, v. 90, p. 2929-2947.
- Scandone, Roberto, and Malone, S.D., 1985, Magma supply, magma discharge, and readjustment of the feeding system



of Mount St. Helens during 1980: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 23, p. 239-262.

Swanson, D.A., and Holcomb, R.T., 1990, Regularities in growth of the Mount St. Helens dacite dome, 1980-1986, *en* Fink, J.H., ed., *Lava flows and domes*: New York, Springer-Verlag, p. 3-24.

Swanson, D.A., Lipman, P.W., Moore, J.G., Heliker, C.C., and Yamashita, K.M., 1981, Geodetic monitoring after the May 18 eruption, *en* Lipman, P.W. and Mullineaux, D.R., eds., *The 1980 eruptions of Mount St. Helens*, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 157-168.

## Vigilando la Deformación de Grietas Radiales con Medidores de Desplazamiento

Ricardo Eugene Y. Iwatsubo, John W. Ewert, y Thomas L. Swanson

### RESUMEN

Las mediciones del cambio del ancho de las grietas radiales del cráter del Mount St. Helens, Washington, durante 1980-1986, son las principales herramientas usadas para monitorear la construcción del domo dacítico. Los cambios de ancho fueron monitoreados por sistemas de medición de desplazamiento de acero para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1981, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1982, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1983, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1984, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1985, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1986, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho.

### INTRODUCCION

Empezando en Septiembre de 1980, se formaron domos en el piso que eran radiales al cono del Mount St. Helens (Fig. 9.1). Mientras el magma ascendía por el cono, se deformaba el piso del cráter, creando segmentos o bloques de unidades por grietas que se abrieron o menos frecuentemente se cerraban entre y dentro del cono de extrusión (Chadwick y Ewert, 1981; Chadwick y Swanson, 1984; Swanson y otros, 1987). La velocidad del crecimiento o retroceso de las grietas se aceleraba antes que disminuyera la actividad. Inicialmente, se usó una cinta de medición para medir los cambios en el ancho de las grietas. Se instalaron medidores de desplazamiento de acero para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1981, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1982, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1983, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1984, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1985, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1986, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho.

Para medir el desplazamiento el movimiento de la grieta radial de un medidor electrónico (medidores de desplazamiento) fueron instalados para vigilar el ancho de las grietas. Cada 10 minutos los medidores de desplazamiento también los medidores que se usaban para monitorear la deformación del cráter. Los medidores de desplazamiento fueron instalados en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1981, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1982, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1983, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1984, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1985, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1986, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho.

### DESARROLLO DEL SISTEMA

Una de las razones para el desarrollo de vigilancia de grietas radiales a través de grietas explosivo de cráteres es para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1981, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1982, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1983, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1984, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1985, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1986, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho.

Otra que motivó el desarrollo de grietas radiales cuando las grietas radiales se abrieron o se cerraban. Los medidores de desplazamiento fueron instalados para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1981, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1982, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1983, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1984, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1985, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho. En 1986, un medidor de desplazamiento fue instalado en el cráter para monitorear la actividad de grietas de 10 a 15 cm de ancho.



## 9. Vigilando la Deformación de Grietas Radiales con Medidores de Desplazamiento

Por Eugene Y. Iwatsubo, John W. Ewert, y Thomas L. Murray

### ABSTRACTO

Las mediciones del cambio del ancho de las grietas en el piso del cráter del Mount St. Helens, Washington, fueron una de las principales herramientas usadas para predecir episodios de construcción del domo desde 1980-82. Estas medidas fueron tomadas por cuadrillas que usaron una cinta métrica de acero para determinar la distancia entre los pedazos de varilla colocados en el suelo a cada lado de las grietas. En 1981, un medidor de cinta electrónico con telemetría fue instalado en el piso del cráter para vigilar continuamente los movimientos de las grietas. Sin embargo, problemas físicos y electrónicos impidieron que éste y un segundo medidor electrónico fueran herramientas viables para predicción. En 1985, usando técnicas e instrumentación nueva, un tercer medidor de desplazamiento fue instalado en el domo, y siguió exitosamente el ensanchamiento de una grieta días antes del episodio de construcción del domo. Para 1989, habían dos medidores de desplazamiento de este tipo vigilando las grietas en el domo.

### INTRODUCCION

Empezando en Septiembre de 1980, se formaron grietas en el piso que eran radiales al cono del Mount St. Helens (fig. 9.1). Mientras el magma ascendía por el domo, se deformaba el piso del cráter, creando segmentos o bloques delimitados por grietas que se ensanchaban o menos frecuentemente se cerraban antes y durante los episodios de extrusión (Chadwick y otros, 1983; Chadwick y Swanson, 1989; Swanson y otros, 1983). La velocidad del ensanchamiento o cerramiento de las grietas se aceleraba antes que ocurriera la extrusión. Inicialmente, se usó una cinta métrica de acero para medir los cambios en distancia entre las estacas de varillas colocadas en el suelo a cada lado de las grietas seleccionadas (estaciones de grietas). Este método se convirtió en una herramienta confiable para predecir episodios de construcción de domo en el Mount St. Helens.

Para vigilar continuamente el movimiento de la grieta, cintas de medir electrónicos (medidores de desplazamiento) fueron instaladas para vigilar el desplazamiento entre las varillas. Cada 10 minutos los medidores de desplazamiento tomaban las medidas que eran enviadas por telemetría al Observatorio Vulcanológico de Cascadas (CVO-Cascades Volcano Observatory). En este capítulo se discuten los métodos usados para establecer medidores de desplazamiento permanentes en el Mount St. Helens. Aunque estos métodos tratan problemas específicos del Mount St. Helens, los mismos podrían ser adaptados a otros volcanes que muestran una deformación similar.

### DESARROLLO DEL METODO

Los datos obtenidos por las estaciones de vigilancia de grietas ayudaron a predecir el episodio explosivo de Octubre de 1980 (Swanson y otros, 1981, 1983). Debido al éxito de este método, se establecieron estaciones de grietas adicionales en el piso del cráter para vigilar la deformación y ayudar hacer predicciones.

Dado que solamente se podían tomar las medidas cuando las cuadrillas estaban en el cráter, la instrumentación fue diseñada para medir y enviar por telemetría las medidas de las grietas al CVO. En Junio de 1981, el primer medidor de desplazamiento fue instalado en el piso oriental del cráter. El medidor de desplazamiento y la electrónica fueron colocados dentro de una caja de fibra de vidrio al cual se conectó un tubo de plástico de 10 cm en diámetro y 12 m de largo. El alambre (acero inoxidable) del medidor de desplazamiento se pasó por el tubo de plástico a un poste localizado al otro lado de la grieta. Para este tiempo, muchas de las grietas estaban calientes y emitían vapor y gas caliente; en los sitios donde el alambre cruzaba la grieta, el tubo de plástico se colocaba dentro de un tubo de acero más grande para protección adicional.



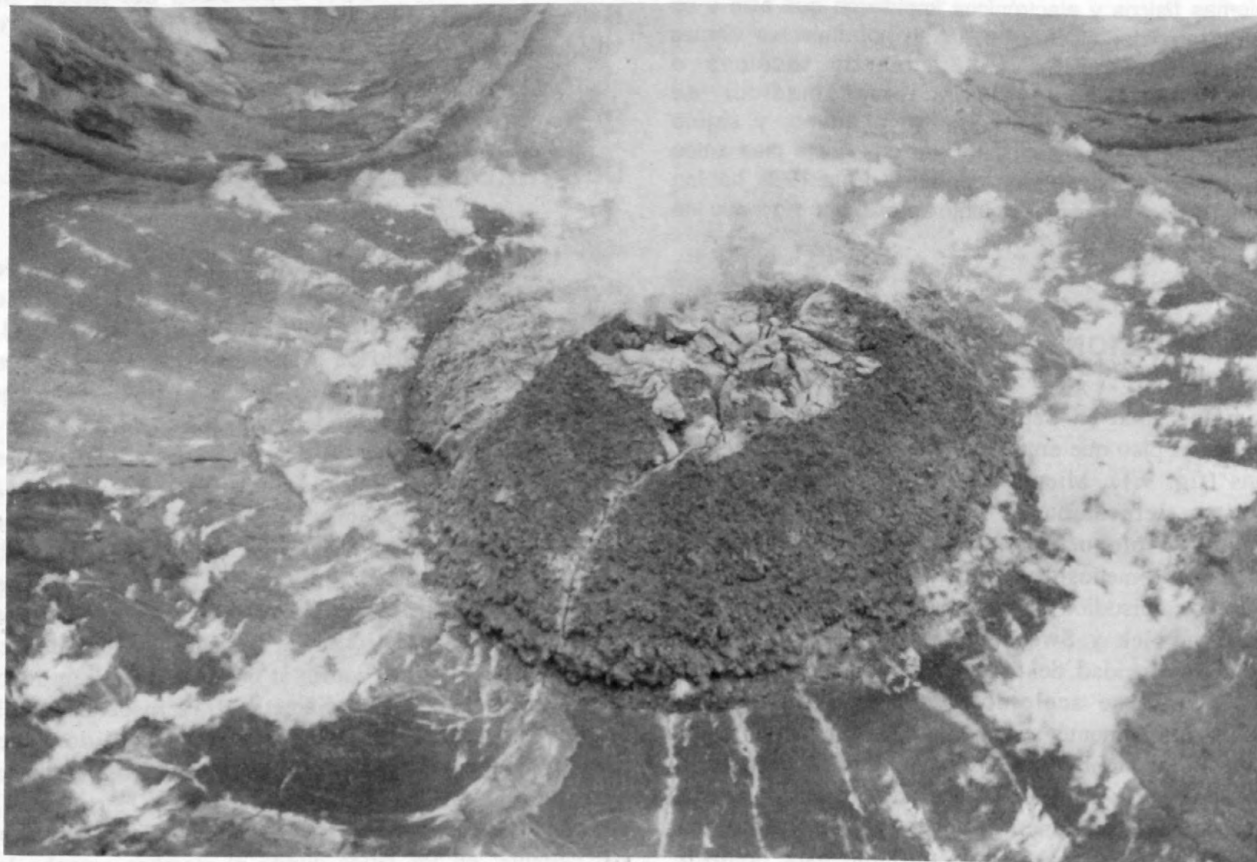
La unidad de telemetría se colocó dentro de una caja de fibra de vidrio. Las medidas fueron enviadas por telemetría al CVO cada 10 minutos. Queríamos observar el movimiento de los bloques a cada lado de la grieta antes y durante el episodio eruptivo, pero la condensación de vapor de agua y corrosión por los gases provocó que fallara el medidor.

Después de modificar el encerramiento electrónico para hacerlo hermético, el medidor fue instalado nuevamente en una grieta. Para verificar el funcionamiento del medidor de desplazamiento, se estableció una estación de grieta que era medida por una cuadrilla de campo. Antes del episodio de Septiembre de 1981, los datos enviados por telemetría del medidor de desplazamiento indicaban el cerramiento de la grieta; las medidas de campo confirmaron esta tendencia. Se esperaba que la grieta se ensanchara mientras se introducía el magma, y la construcción de la estación estaba diseñada para acomodar el ensanchamiento, no el cerramiento. Consecuentemente, mientras la grieta se seguía cerrando, el tubo de plástico se dobló y haló el alambre y consecuentemente el medidor de desplazamiento registraba ensanchamiento, aunque la grieta en si se estaba cerrando.

Después del episodio de Marzo de 1982, las grietas radiales en el piso del cráter fueron enterradas por depósitos de pómez (Waite y otros, 1983). Consecuentemente no se hicieron medidas de las grietas hasta 1985, cuando empezamos a establecer estaciones geodésicas en el domo (Iwatsubo y Swanson, capítulo 6). Para este tiempo un medidor de desplazamiento comercial fue adquirido e instalado (estación Steger) al lado de una estación de grieta existente (South August). Esta tercera instalación estaba a prueba de ambientes adversas, y los dos medidores de desplazamiento y distancia demostraban tendencias similares antes del episodio de Mayo de 1985 (fig. 9.2). Con la excepción de unas pequeñas modificaciones, esta es la configuración del sistema que está siendo usado en 1990.

## EQUIPO

El equipo principal consiste del medidor de desplazamiento en sí. El medidor de desplazamiento usado en 1981 fue diseñado e instalado por Malcolm Johnston y Tom Murray y fue descrito en un informe mensual del Observatorio Vulcanológico Cascades en



**Figura 9.1.** El domo en el Mount St. Helens en Diciembre, 1980, enseñando grietas radiales que se formaron en el piso del cráter adyacente.

Junio de 1981. Este medidor usaba un resorte, rueda, eje, alambre de acero inoxidable y potenciómetro de 360 grados. El alambre de acero inoxidable fue colgado desde un lado del pilote hasta el otro lado de la grieta a la caja electrónica donde estaba colocado el medidor de desplazamiento. El alambre fue colocado alrededor de la rueda y conectado al resorte para darle tensión. La rueda estaba soldada a un eje que tenía un lado conectado al contacto deslizante del potenciómetro. Se aplicaban cinco voltios a través del potenciómetro, mientras el alambre se movía y rotaba el potenciómetro, había un cambio correspondiente en el voltaje. La señal de salida del medidor de desplazamiento se transmitía digitalmente al CVO.

Desde 1985, se ha usado, con la instalación de la estación Steger, un medidor de desplazamiento adquirido de Celesco. El medidor de desplazamiento, modelo PT101, tiene un alambre de 3.8 m de largo, pero que puede ser comprado en longitudes que varían desde 1 cm a 12.7 m. El PT101 tiene un alcance de temperatura de -17.7 a 93.3 °C, el coeficiente termal es reportado como 0.0011 por ciento por °C, y la exactitud es de 0.10 por ciento a escala completa. Las dimensiones del medidor son 19 × 13.5 × 11 cm. Con un alambre de 3.8

m de longitud, la sensibilidad del medidor es 1.4 mV/mm. El PT101 trabaja con el mismo principio básico que el medidor de desplazamiento construido por Johnston y Murray.

## Materiales e Instalación

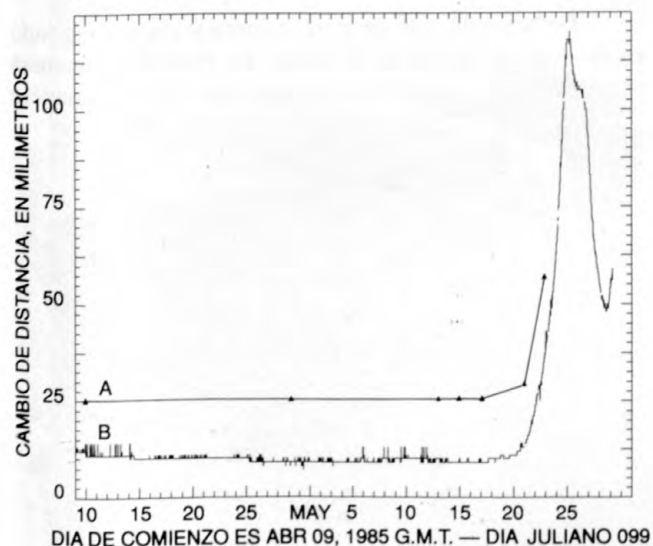
Los costos de instalación son pequeños comparados con el costo del medidor (\$500). En total, los materiales usados para la instalación y protección del alambre, cuestan aproximadamente \$50. A continuación se describen los materiales y métodos usados para instalar los medidores de desplazamiento en el Mount St. Helens.

El medidor de desplazamiento está montado dentro de una lata metálica (30 × 15.5 × 18 cm) que se usa para guardar municiones, excedente del ejército de los Estados Unidos, en la cual se taladran seis huecos, uno para el alambre del medidor de desplazamiento, uno para la señal de salida, y cuatro para sujetar el medidor a la lata (fig. 9.3A). Se usa un sellador de silicón alrededor de los huecos de los tornillos para evitar que entren agua y gas de las fumarolas a la lata. Una batería alcalina para linterna de 12 voltios (o dos batería alcalinas de 6 voltios), que también se coloca dentro de la lata alimenta el medidor. Una referencia regulada de 5 voltios suministra un voltaje constante al medidor. Las baterías cargan la referencia de 5 voltios y el medidor de desplazamiento por un año.

El alambre del medidor de desplazamiento pasa por un pequeño hueco taladrado en la lata para municiones. Para proteger el alambre de roces y ruptura en el filo metálico, se pasa por un tapón de caucho (un borrador de goma también sería suficiente) en el cual se taladra un hueco. El tapón es colocado dentro del hueco pequeño y se pega con un sellador de silicón (fig. 9.3B). Esto permite que el alambre se mueva libremente hacia dentro y hacia fuera, lo protege del filo metálico, y mantiene la integridad de la lata de munición.

Tres postes de acero son colocados en el suelo y cimentados (si los postes no quedan estables cuando se colocan), dos al lado del instrumento, y uno al otro lado de la grieta para el pilote terminal. Se fija la lata para municiones a los dos postes con dos abrazaderas para mangueras (figs. 9.3, 9.4) y se asienta directamente sobre el suelo para mayor estabilidad.

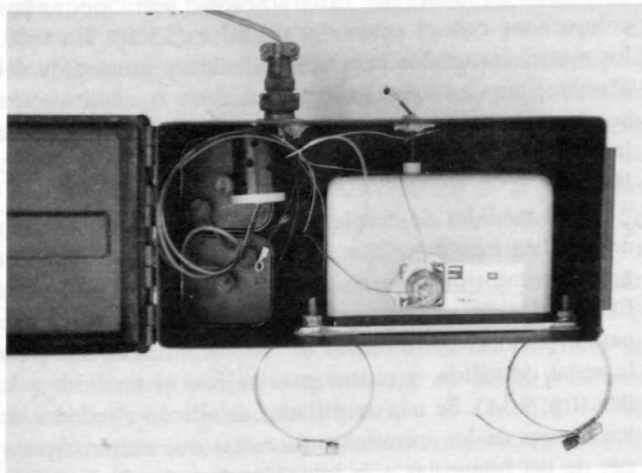
Entre los postes se hace un camino para que el alambre del medidor de desplazamiento pueda estirarse entre los dos pilotes sin tocar el suelo. Típicamente colocamos un alambre temporero entre los pilotes terminales, a la altura donde se va a colocar el alambre verdadero, que sirve como guía mientras se hace el camino. Este alambre temporero muestra donde el material debe ser sacado o rellenado y puede ser rozado



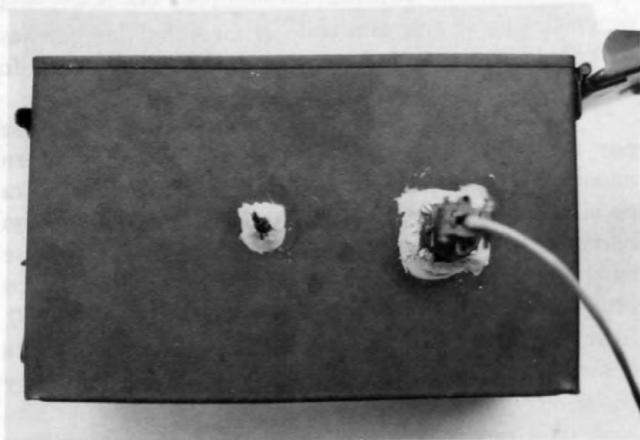
**Figura 9.2.** Cambios de distancia medidas con cinta (A) y con telemetría (B) a través de la grieta South August, Abril–Mayo, 1985. Datos telemétricos del medidor de desplazamiento Steger demuestran que la deformación comenzó Mayo 18 y definen una curva suave mientras aumenta la deformación. Las medidas con cinta reflejan los mismos desplazamientos, pero solo pudieron ser tomadas hasta Mayo 23. Inflexiones hacia abajo de los datos de desplazamiento de Steger corresponden a los eventos que ocurrieron durante el episodio de extrusión, que comenzó tarde el 24 de Mayo. La escala vertical demuestra el desplazamiento de solo un punto cero arbitrario.

o golpeado con escombros sin miedo de dañar el instrumento. Después que se hace el camino, se saca el alambre temporero y se coloca el alambre del medidor de desplazamiento.

Una vez colocado, el alambre debe ser protegido de los procesos volcánicos y ambientales. Las pequeñas explosiones pueden producir material balístico con un



**A**



**B**

**Figura 9.3.** A, Una vista desde arriba del interior del estuche del medidor de desplazamiento (lata para municiones). Una batería de doce voltios (dos baterías de 6 voltios conectadas en serie) alimenta la referencia de 5 voltios (contenedor pequeño de plástico conectado a los alambres). Los huecos son taladrados en la lata de munición para pasar los alambres y para montar el medidor. Se usan abrazaderas de mangueras para conectar el estuche a los postes. B, Vista cercana del cable saliendo de la lata. El tapón de goma (lado izquierdo) en el cual se perfora un hueco para pasar el cable es pegado con sellador de silicón. El tapón a la derecha es para la señal de salida de la unidad de telemetría.

diámetro de 1 m o más que puede caer sobre el alambre y la acumulación de nieve (hasta 10 m en el domo) durante los meses de invierno puede pinchar el alambre al suelo. Para proteger y facilitar el acceso al instrumento y los dos pilotes terminales, se colocan sobre cada pilote terminal, cajas de madera (61 cm cuadrados) con grandes espacios que permiten que el alambre se mueva libremente (fig. 9.4). Para cubrir las cajas, colocamos otro pedazo de madera encima de la caja sobre la cual se ponen unas rocas.

En 1985, para proteger el alambre en la estación Steger, se cortaron planchas de madera de 0.5 pulgadas (1.3 cm) en tiras de 30.5 cm de ancho que se conectaron para formar un marco tipo "A" sobre el alambre (fig. 9.5). Los extremos se sobrepasaban uno al otro para permitir que las planchas resbalaran si la grieta se ensanchaba o se cerraba. Tephra y rocas del domo fueron colocados en el marco A para darle un soporte lateral. Este método funcionó bien hasta que el medidor fue destruido durante el episodio eruptivo de Mayo de 1985. En Agosto de 1985, un medidor de desplazamiento fue instalado en el domo en la estación Rainbow Warrior. Nuevamente se usó un marco "A" para proteger el alambre, pero para Febrero de 1986, se habían acumulado 10 m de nieve sobre el medidor de desplazamiento y se aplastó el marco, rompiéndose el alambre.

Un segundo método para la instalación fue probado en la estación Rainbow Warrior. Se hizo una trinchera entre los postes donde se colocó una caja de madera



**Figura 9.4.** El estuche para el medidor de desplazamiento es conectado a los postes con dos abrazaderas de mangueras (se colocan rocas entre las abrazaderas y postes). La caja de madera permite un acceso fácil a los alambres y medidor de desplazamiento. Al pilote terminal se le conecta una caja similar. Así quedó la caja después de un invierno.



prensada de aproximadamente 20.5 cm cuadrados y 10 m de largo (formando un túnel). Después se pasó el alambre por el túnel y se conectó al pilote de anclaje. La parte superior de la caja, que estaba nivelada con relación a la superficie, fue cubierta con arena para protección adicional. De esta manera el alambre quedó protegido de nieve y balísticos. Este método no hubiera sido usado si la información que se tenía de la grieta no hubiera indicado que el movimiento principal de la grieta iba a ser ensanchamiento. El método con la caja enterrada no funcionaría para medir escalas grandes de contracción.

## PROBLEMAS

En 1981, los dos problemas principales que afectaron la operación del medidor de desplazamiento se debieron a los gases y diseño de construcción. El primer medidor de desplazamiento falló porque los componentes electrónicos se corroieron debido a la condensación de los gases. Subsecuentemente se usó un estuche ambiental. El segundo medidor de desplazamiento falló porque el forro

del alambre era demasiado rígido y no pudo acomodar el cerramiento de la grieta. Desde 1985, se guardan los medidores de desplazamiento en latas para municiones, porque estas son herméticas y lo suficientemente grandes para colocar el medidor y batería, además no son caras. El problema de la protección del alambre ha sido resuelto como se discutió anteriormente.

Poco después de instalar la estación Steger en 1985, notamos que los datos telemétricos diferían significativamente de aquellos medidos con cinta en la estación de grieta South August.

El problema resultó ser electrónico; la referencia de 5 voltios estaba derivando con el tiempo. La señal de salida del medidor de desplazamiento está directamente relacionada a su voltaje de entrada, la referencia de 5 voltios. Para obtener lecturas confiables de desplazamiento, la referencia de 5 voltios tiene que ser estable. Se usa una referencia de 5 voltios debido a la configuración de la telemetría digital. Ahora usamos una referencia de 5 voltios, REF-02, de Precision Monolithic Incorporated.

El problema más común ha sido la ruptura de los alambres, que típicamente se debe a la condensación de



**Figura 9.5.** Científicos midiendo la grieta South August con una cinta métrica de acero en 1985. El medidor de desplazamiento Steger está al fondo. Fíjese en la parte superior del marco tipo "A" (detrás de la cinta métrica) con tierra amontonada a su lado para soporte lateral.

gases corrosivos en los alambres, aún los alambres de acero inoxidable no son inmunes. La ruptura por corrosión no es un problema en el verano, cuando los gases pueden salir de la grieta y mezclarse libremente con la atmósfera. El problema surge en los meses de invierno, cuando las estaciones están profundamente enterradas bajo nieve.

Un medidor de desplazamiento roto es difícil de arreglar. Cuando se rompe el alambre, se regresa al estuche del medidor de desplazamiento y (1) se sale completamente de las ruedas, (2) causa que se libera la tensión, y (3) se puede dañar el potenciómetro. El fabricante nos proporcionó instrucciones de como rebobinar el alambre y ajustar la tensión del resorte; por otro lado, los potenciómetros pueden ser adquiridos localmente. Por lo tanto, podemos reparar los instrumentos cuando se dañan.

Para proteger los alambres finos (0.038 mm), trenzados y de acero inoxidable de los medidores de desplazamiento, de la corrosión durante los meses de invierno, nosotros conectamos un alambre más grueso (1 mm) de acero inoxidable sólido al pilote terminal y lo estiramos a través de la grieta caliente hasta 1-2 m del medidor de desplazamiento. El alambre más fino del medidor de desplazamiento es conectado entonces al alambre más grueso. Si el alambre grueso es demasiado largo, el resorte relativamente débil en el medidor de desplazamiento, no podrá sostenerlo sobre el suelo. En este caso la longitud total de la instalación debe ser acortada hasta que el resorte pueda aguantar el alambre más grueso sobre el suelo.

El alambre más grueso aumenta la expectativa de vida general de la instalación, pero el alambre más fino remanente todavía es susceptible a la corrosión con el tiempo. Antes de empezar a usar el alambre más grueso, las estaciones duraban 2-3 meses durante el invierno, pero con el alambre más grueso, las estaciones han durado hasta 6 meses antes de romperse el alambre más fino. Para mejorar las instalaciones, ahora reemplazamos el alambre del fabricante con hilo de pescar trenzado y forrado con nilón (se puede conseguir en tiendas de pesca). El diámetro del alambre forrado es un poco mayor que el del alambre que viene con el medidor de desplazamiento pero lo suficientemente pequeño para no afectar la sensibilidad del medidor.

Además de modificar el alambre, taladramos huecos (2-3 cm) en las cajas protectoras de madera y las enmarcamos para mejorar la circulación de aire y para ventilar los gases y vapor corrosivo lejos del alambre. Durante el invierno, la nieve en el suelo típicamente se derrite, por el calor de la grieta, causando así la formación de cavernas debajo de la nieve que ayudan a la circulación del aire alrededor del alambre. Se hacen más huecos en el área donde el alambre atraviesa la grieta, porque es allí donde más se concentran los gases

y vapor. Nosotros no taladramos huecos grandes (3 cm) sobre las áreas más frías, porque la nieve podría acumularse en los huecos y pinchar el alambre al suelo y causar datos erróneos.

## DATOS

Antes del episodio de Mayo de 1985, la estación de grieta South August y la estación Steger fueron vigiladas simultáneamente (fig. 9.2). Con las distancias medidas con cinta solamente, no se hubiera conocido el momento que comenzó la deformación en la estación de grieta South August, pero los datos telemétricos muestran que comenzó Mayo 18-19. El primer día que una distancia medida con cinta indicó un movimiento de extensión fue el 21 de Mayo, después que comenzó la deformación. El 23 de Mayo, las medidas hechas con cintas y los datos telemétricos indicaron una extensión de 33 mm y 31 mm, respectivamente. La cantidad total de desplazamiento entre las distancias medidas con cinta y de los datos telemétricos es similar, pero la curva está mejor definida con los datos telemétricos de 10 minutos. El cambio de tendencia del 25 de Mayo puede ser atribuido al movimiento de un bloque limítrofe, al sur de las dos estaciones, que pudo haber empujado el medidor y grieta hacia el Norte. Esto concuerda con la formación de un graben grande durante este episodio (Swanson, 1985; informes mensuales del CVO, Mayo de 1985). La grieta de South August empezó a ensancharse, mientras se estaba cayendo dentro del graben, justo antes de la pérdida de telemetría.

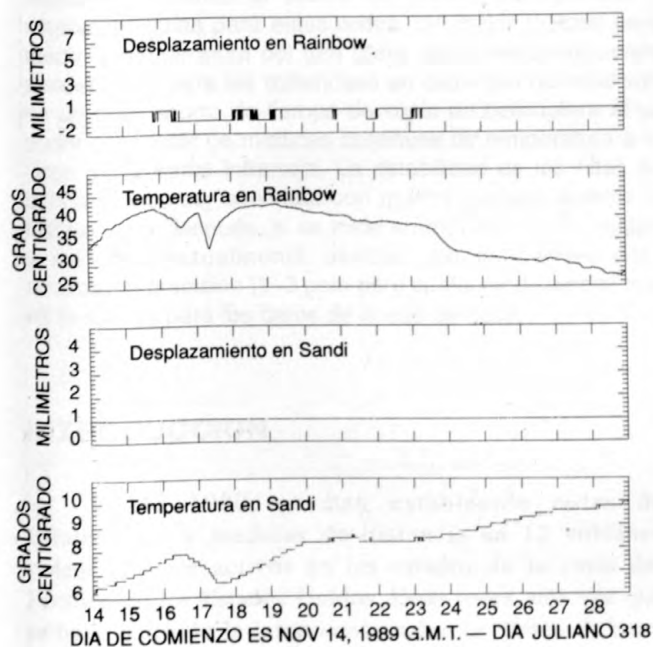
Normalmente los medidores de desplazamiento operan durante períodos de tranquilidad. La figura 9.6 comprende un gráfico de un período de 14 días para los dos medidores de desplazamiento en el domo en 1989. Las temperaturas del suelo fueron vigiladas a aproximadamente 0.5 m debajo de la superficie cerca del pilote de cada instrumento y demuestran que el suelo permanece relativamente caliente. Los datos en la figura 9.6 muestran que los medidores no son afectados por grandes fluctuaciones de temperatura.

La nieve puede pasar por los huecos de la caja protectora y por el marco de madera y acumularse sobre el alambre, causando datos erróneos (fig. 9.7). El 25 de Marzo, la nieve acumulada en la estación Sandi (localizada sobre la parte superior y occidental del domo) causó una lectura de extensión aparente. Tal extensión es repentina y escalonada, y difiere de la señal de deformación volcánica observada en la estación Steger (fig. 9.2). Mientras se derretía la nieve, la señal retornó a 1 a 2 mm de su posición original.

## RESUMEN

La vigilancia de grietas con medidores de desplazamiento se presta para estudios de deformación en procesos cercanos al punto de emisión del Mount St. Helens. Las estructuras que probablemente demostrarán desplazamiento tienen que ser identificadas mediante observaciones de campo y estudiadas cuidadosamente antes de la instalación del equipo de vigilancia en tiempo real. Los problemas que surgen de la instalación de medidores de desplazamiento no han sido triviales, pero la experiencia adquirida de fracasos y éxitos anteriores es importante. La vigilancia continua del movimiento en el Mount St. Helens es especialmente crítico antes de los episodios eruptivos. La deformación de una grieta activa corresponde a la intrusión de magma y puede dar información acerca de la tasa y cantidad de deformación que está ocurriendo. Durante mal clima, cuando las cuadrillas no pueden salir al campo, los datos del medidor de desplazamiento, como inclinación, gas y vigilancia sísmica, ayudan a descifrar la actividad eruptiva.

Sabiendo de antemano si una grieta en particular se ensancha o cierra durante una intrusión magmática ha

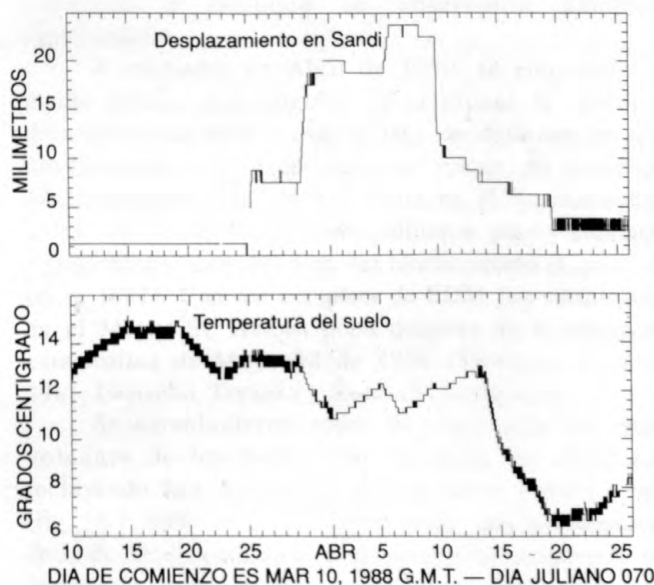


**Figura 9.6.** Gráficos que muestran un período de tranquilidad de 14 días en 1989 en dos medidores de desplazamiento, Rainbow Warrior y Sandi. Línea recta para Sandi indica un instrumento y electrónica estable, mientras que Rainbow Warrior (aunque tranquilo) muestra 1 mm de ruido de fondo. Las temperaturas son vigiladas cerca del pilote del instrumento a una profundidad de 0.5 m. Los cambios de temperatura no afectan las señales del medidor de desplazamiento.

ayudado a diseñar estaciones individuales. Cada ambiente va a tener su problemas y soluciones. En el Mount St. Helens, cada fracaso nos ha acercado a un mejor producto final. Colocando el medidor y los componentes electrónicos en estuches herméticos, protegiendo el alambre de nieve y material balístico, y resolviendo los problemas de alambres corroídos son algunas de las mejoras que nos han ayudado a diseñar un medidor de desplazamiento más duradero.

## REFERENCIAS CITADOS

- Chadwick, W.W., Jr., and Swanson, D.A., 1989, Thrust faults and related structures in the crater floor of Mount St. Helens volcano, Washington: Geological Society of America Bulletin, v. 101, p. 1507–1519.
- Chadwick, W.W., Jr., Swanson, D.A., Iwatsubo, E.Y., Heliker, C.C., and Leighley, T. A., 1983, Deformation monitoring at Mount St. Helens in 1981 and 1982: Science, v. 221, p. 1378–1380.
- Swanson, D.A., 1985, Graben formation, thrust faulting, and growth of the dacite dome, Mount St. Helens, Washington, May-June 1985: Eos (Transactions American Geophysical Union), v. 66, p. 852.
- Swanson, D.A., Lipman, P.W., Moore, J.G., Heliker, C.C., and Yamashita, K.M., 1981, Geodetic monitoring after the May 18 eruption, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.R., eds.,



**Figura 9.7.** El efecto de la nieve acumulada sobre el alambre de la estación Sandi durante una fuerte nevada. Normalmente, estos desplazamientos ocurren rápidamente y en forma escalonada mientras cae la nieve sobre el marco, se acumula y después cae por los huecos y sobre el alambre, aparentando que se estuviera abriendo la grieta. La señal regresa a su posición original antes de la caída de nieve (dentro de 1 a 2 mm) después de derretirse la nieve.





# 10. Técnicas de Trilateración y Medidas de Distancia Usadas en Cascades y Otros Volcanes

Por Eugene Y. Iwatsubo y Donald A. Swanson

## ABSTRACTO

Desde 1980 hasta 1989, científicos del Observatorio Vulcanológico Cascades del Servicio Geológico de los Estados Unidos establecieron redes de trilateración y medidas de distancia en Mount Baker, Mount Rainier y Mount St. Helens en Washington; Mount Hood, South Sister, Newberry y Crater Lake en Oregon; Medicine Lake, Mount Shasta, Lassen Peak y Mammoth Lakes en California; e Isla Augustine en Alaska. Las redes fueron instaladas para proporcionar información sobre líneas de base en volcanes potencialmente activos y peligrosos. La experiencia adquirida vigilando al Mount St. Helens ha ayudado a establecer guías para estas redes. Un mejor método para medir la temperatura del aire (para hacer las correcciones atmosféricas para las distancias) en cada hito ha resultado en un gran ahorro de tiempo de vuelo de helicóptero al ya poder prescindir de medidas continuas de temperatura a lo largo de la señal infrarroja. La estabilidad de los hitos es crítica y debe ser evaluada con mucho cuidado durante la instalación y después, si se mide un movimiento. El equipo y métodos actualmente usados son suficientes para alcanzar la precisión (2–3 ppm para cualquier distancia) que es requerida para los datos de líneas de base.

## INTRODUCCION

Desde 1980, se han establecido redes de trilateración y medidas de distancia en 12 volcanes potencialmente activos en los estados de la costa del Pacífico de los Estados Unidos. Estas redes, una vez que se haya obtenido la información sobre las líneas de base, pueden detectar la deformación superficial que puede reflejar un movimiento de magma por el conducto. La velocidad de la deformación aumenta mientras el magma se acerca a la superficie, y por lo tanto, estos movimientos pueden ayudar a determinar donde y cuando puede ocurrir una erupción (Lipman y otros, 1981). Antes de 1980, los distanciómetros electrónicos (EDM-electronic distance meters) habían sido usados principalmente para vigilar la deformación horizontal

durante inflación y deflación de volcanes tipo escudo (Kinoshita y otros, 1974). Se había intentado hacer muy poca vigilancia de deformación horizontal en estratovolcanes con la excepción del Volcán Usu en Japón, donde se observaron hasta 160 m de movimiento usando técnicas de trilateración para vigilar criptodomas formándose en el área de la cumbre en 1977–78 (Yokoyama y otros, 1981). Se midieron varias distancias en el Mount St. Helens y Mount Hood en 1972 pero no se volvieron a medir antes de la reactivación del Mount St. Helens en 1980. Varias distancias fueron medidas dos veces en el Mount Hood en el verano de 1980, debido a un enjambre de sismos, pero no se estableció una red completa y tampoco se observaron cambios significativos.

A mediados de Abril de 1980, se empezaron a medir distancias y ángulos en el Mount St. Helens, principalmente para vigilar la tasa de deformación del hinchamiento en el lado norte del volcán. Se midieron desplazamientos de 1.4–1.6 m/día en el hinchamiento antes del 18 de Mayo, pero hubieron pocos cambios significativos fuera del área del hinchamiento (Lipman y otros, 1981). Una red completa de EDM fue establecida en el Mount St. Helens poco después de la erupción catastrófica de Mayo 18 de 1980 (Swanson y otros, 1981; Iwatsubo, Topinka y Swanson, capítulo 8).

Se establecieron redes de vigilancia en otros volcanes de los estados de la costa del Pacífico, incluyendo Isla Augustine, Alaska, entre 1981 y 1989 (fig. 10.1; tabla 10.1). Todas las redes, con la excepción de la de Medicine Lake y la parcialmente completada de Mammoth Lake (las dos instaladas en 1989), han sido medidas nuevamente por lo menos una vez. La remediación periódica de estas redes es planificada como parte del programa de vigilancia a largo plazo y permite la verificación de datos previos, fortalece la información de las líneas de base y sirve para evaluar el estado del volcán.

Las técnicas y equipos desarrollados en los años 80 han ayudado a reducir los costos de vigilancia volcánica

**Tabla 10.1.** Lista de los años en los cuales fueron medidos cada uno de los volcanes.

[No se ha incluido el Mount St. Helens, el cual ha sido vigilado continuamente desde 1980. No se ocupó ninguna red durante 1987]

Volcán	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1988	1989
Augustine							X	X
Mount Baker	X		X					
Mount Rainier		X	X				X	X
Mount Hood			X	X				
Crater Lake	X	X	X	X			X	
South Sister					X	X		
Newberry					X	X		
Medicine Lake								X
Mount Shasta	X	X		X				
Lassen Peak	X	X		X				
Mammoth Mountain								X

sin sacrificar la precisión de los datos. En este informe explicamos las técnicas y procedimientos usados por los científicos del Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO-Cascades Volcano Observatory) para medir distancias en los volcanes. Para más información sobre técnicas generales de trilateración y medidas de distancia, ver Brinker y Minnick (1987) y Davis y otros (1981).

## EQUIPO

La mayoría del equipo usado para la agrimensura se puede obtener comercialmente (ver apéndice). Los métodos que usamos para instalar hitos y medir distancias, ángulos, presión barométrica, humedad y temperatura de aire están descritos a continuación. Estos métodos, que están siendo usados en 1990, han evolucionado desde 1981 y deben continuar mejorándose en el futuro.

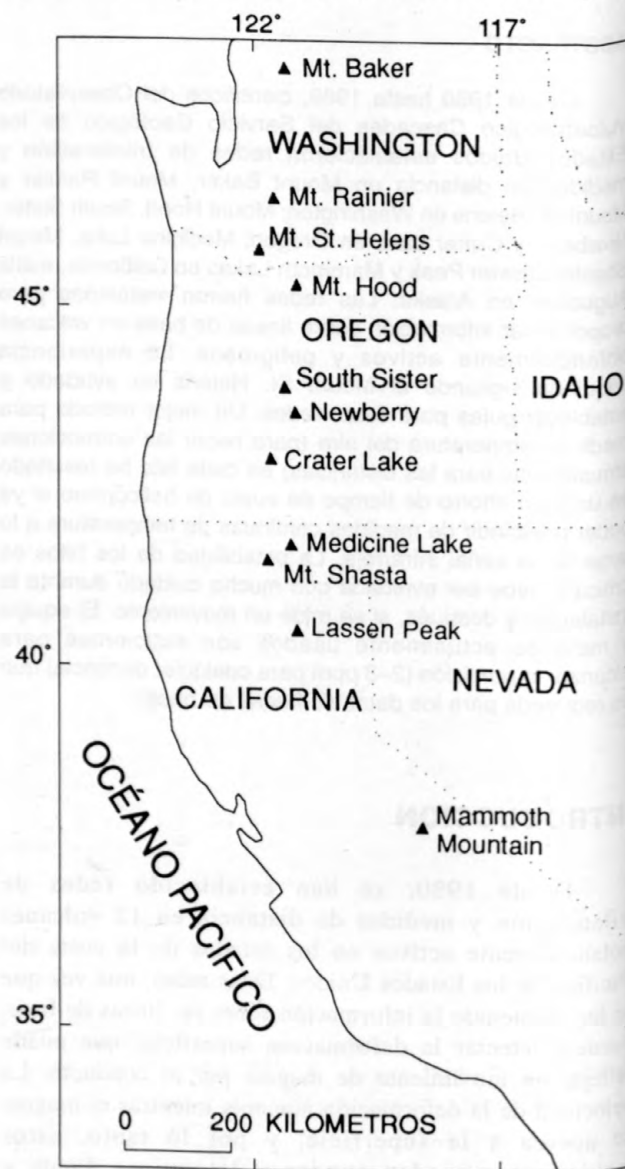
## Instalación de Hitos

Todos los hitos instalados son de bronce, y tienen 10 cm de diámetro y tallos de 7 cm de longitud que son cimentados en rocas o peñones (Chadwick y otros, 1985). Huecos de aproximadamente 2.5 cm de diámetro son perforados en la roca, principalmente a mano, usando un cincel en estrella de albañil para hormigón. En los hitos se graba el nombre de la estación y año de instalación. Un cemento de fraguado rápido (15 minutos para fraguado) es usado para cimentar los hitos en su sitio, porque comúnmente se instalan en elevaciones altas donde existe la posibilidad de congelación y destrucción del cemento regular (24 horas para fraguado). Inmediatamente después de la instalación inicial, protegemos al hito y cemento del sol directo para evitar el agrietamiento del cemento que se está endureciendo.

Aunque, los hitos colocados para hacer medidas de EDM pueden ser usados inmediatamente después de su instalación, es mejor esperar por lo menos 24 horas para que se endurezca completamente el cemento. Ver Doukas y Ewert (capítulo 11) para más información sobre la instalación de hitos.

## Equipo de Agrimensura

Hemos usado dos EDM's que pueden medir distancias de hasta 10 km, que es la distancia más grande



**Figura 10.1.** Los volcanes en los cuales el personal del Observatorio Vulcanológico ha instalado redes de deformación horizontal. No se ha incluido Augustine Island, Alaska.



**Tabla 10.2.** Especificaciones para el HP3808A y Geodimeter 114

[Pesos incluyen batería. Las distancias son aquellas dadas por los fabricantes para un número de prismas en un día claro (tufo claro o sol moderado) con un leve resplandor de calor]

	HP3808A	Geodimeter 114
Prismas		
1	3 km	6.5 km
3	6 km	8.0 km
Multiple	10 km (6)	9.0 km (7)
Peso	10 kg	2.7 kg
Tamaño	345 × 318 × 283 mm	220 × 190 × 87 mm
Exactitud	± (5 mm + 1 ppm)	± (5 mm + 1 ppm)
Montura	Yugo	Yugo o Teodolito

que se mide en nuestro programa de vigilancia. La medida típica es de 3 a 5 km. Para la mayoría de los trabajos de distancia horizontal en los Cascades y otros volcanes se usa un helicóptero, mientras que para las excursiones más cortas se va a pie, por lo tanto el EDM debe ser portátil. Desde 1981 a 1988, usamos un modelo Hewlett-Packard (HP) modelo 3808A (discontinuado); en 1989 compramos un Geotronics modelo Geodimeter 114, que es mucho más pequeño y liviano (tabla 10.2). Aunque las especificaciones del fabricante para el Geodimeter 114 son mejores que para el HP3808A, en la práctica nuestro HP3808A puede medir distancias más largas usando el mismo número de prismas de lo que dicen las especificaciones para el HP y hasta más lejos de lo que es posible con el Geodimeter 114.

Las dimensiones del EDM son críticas cuando hay viento fuerte y moderado. El HP3808A es voluminoso y puede coger viento y vibrar constantemente, dificultando la toma de todas las medidas. Cada medida con el HP3808A puede coger hasta un minuto, dependiendo de la longitud del disparo, aún en días calmados. Cuando los vientos provocan la vibración de los instrumentos, las medidas pueden tomar hasta varios minutos para completar y hasta pueden fallar. El Geodimeter 114 coge 14–25 segundos para las primeras medidas, y repite las medidas cada 4.5 segundos. A menudo, el Geodimeter 114 puede tomar 10 medidas antes que el HP3808A haga una. Esto es una ventaja muy grande bajo condiciones marginales.

Dado que el Geodimeter 114 es liviano es preferible para caminatas. Existe un marco de mochila para el HP3808A y es imprescindible para la mayoría de aplicaciones de campo; el estuche de transporte para el Geodimeter 114 viene con tirantes para que pueda ser usado como mochila. Los dos EDM's usan una batería de 12 voltios como fuente principal de energía. La batería del HP3808A cabe al fondo del instrumento mientras que la del Geodimeter 114 se conecta al EDM

con un cable externo. Nosotros sugerimos que se compre un cable de batería adicional que pueda ser usada con una batería de 12 voltios sellada o para carro. Se debe llevar esta batería al campo como una fuente alterna de energía. Si se planifican viajes para áreas remotas para períodos extendidos y es imposible recargar las baterías, se deben llevar varias baterías.

El HP3808A tiene un telescopio interno y está montado sobre el trípode usando un yugo incorporado. El Geodimeter 114 no tiene un telescopio interno, pero puede ser usado de dos maneras. El Geodimeter 114 está diseñado para trabajar con el telescopio del teodolito, que se usa para localizar los blancos. Un yugo con un telescopio (aumento 4–7×) montado encima también puede ser usado, y recomendamos que se compre el telescopio más poderoso disponible (aumento mínimo 30x). Debido a las limitaciones presupuestarias, nosotros no compramos un telescopio poderoso, y el telescopio con aumento 4–7× no es lo suficientemente poderoso para nuestras aplicaciones. Por lo tanto, nosotros siempre montamos el Geodimeter 114 encima del teodolito.

Cuando el EDM está montado sobre el yugo, el centro óptico o eje vertical de un EDM siempre se mantiene igual, sin importar la inclinación del EDM. En otras palabras, el EDM gira sobre el centro del hito. Sin embargo, cuando se monta el EDM sobre el telescopio del teodolito, el centro óptico del telescopio gira sobre el centro del hito, pero el centro óptico del EDM no lo hace. La diferencia entre los centros ópticos del teodolito y del EDM cuando está inclinado es el error de excentricismo. Para corregir este error, hay que medir el ángulo cenital o vertical e incorporarlo en la reducción de la distancia de pendiente. La fórmula para corregir la distancia de pendiente (SD) para el error de excentricismo (corr) es:

$$\text{corr} = e \cdot \cos(Z)$$

$$\text{SD corregido} = \text{SD crudo} - \text{corr, donde } Z < 90^\circ$$

$$\text{SD corregido} = \text{SD crudo} - \text{corr, donde } Z > 90^\circ$$

donde  $e$  es la distancia entre el centro óptico del teodolito y EDM, y  $Z$  es el ángulo cenital (Bevin y Dip, 1983).

Para medir los ángulos cenitales para el cálculo del error de excentricismo y determinar las elevaciones de las estaciones, usamos un teodolito Wild T2 (estilo viejo). El Wild T2 se lee manualmente al segundo más cercano; se recomienda cualquier teodolito de buena calidad de un segundo para medir los ángulos. El advenimiento de microprocesadores ha revolucionado la mayoría de los equipos de agrimensura, incluyendo el teodolito. Wild fabrica el teodolito T2000, que tiene una exactitud de 0.5 segundos y lee digitalmente hasta 0.1 segundo (Ewert, capítulo 15). Su desventaja para nuestros propósitos es su peso, 9.8 kg versus 6.3 kg para el T2.

Típicamente se montan los instrumentos y reflectores sobre los trípodes Kern que vienen con un bastón centrador, pero se pueden usar trípodes estándares con tribrachs ópticos. Para una discusión más detallada sobre trípodes, ver Iwatsubo y Swanson (capítulo 6).

Para reflectores usamos un prisma estándar (exactitud de  $\pm 2$  segundos arco) de vidrio cubo esquinado de 7.3 cm en diámetro con un montaje triple sin inclinación (un triad). Cuando usamos el HP3808A, llevamos dos tríadas en cada mochila para reflectores. Para casi todas las medidas, dos tríadas son suficiente. Con el Geodimeter 114, se llevan cuatro tríadas en cada mochila para reflectores, se usan 2-3 tríadas para cada línea promedio de 3-5 km. Recientemente, se han introducido monturas de inclinación con prismas de menor diámetro (5.9 cm). Cuando se miden líneas muy inclinadas, las monturas que se pueden inclinar son mejores que aquellos que no se inclinan porque pueden ser dirigidas directamente hacia el EDM aumentando así la fuerza de la señal de retorno. Las líneas más inclinadas pueden ser medidas con monturas que no se pueden inclinar pero se puede requerir de reflectores adicionales.

## Sistema Atmosférico

Se necesita saber la presión atmosférica absoluta, humedad y temperatura del aire para poder corregir la distancia de pendiente cruda para una distancia de pendiente verdadera. La distancia medida por el EDM está basada en una atmósfera estándar asumida por el fabricante. Cualquier desviación de la atmósfera estándar tiene que ser corregida. Una corrección de 1 por millón (ppm) es producida por:

- un cambio de  $1^{\circ}\text{C}$  en la temperatura del aire
- un cambio de 3.4 mbar en la presión atmosférica, o
- un cambio de 22.66 mbar en la presión del vapor de agua (Bevin y Dip, 1983).

La humedad tiene un efecto muy pequeño sobre las medidas, sin embargo se incluye en todas las reducciones de datos.

Un paquete atmosférico completo, incluyendo sensores de presión, humedad y temperatura, forma parte de los equipos de reflectores e instrumentos. Inicialmente se usó un sensor de presión barométrica para medir la presión barométrica, pero era demasiado voluminoso, consumía mucha energía, y requería mucho mantenimiento. Un altímetro/barómetro digital que se aguanta en la mano, modelo AIR-HB-1A, fue comprado para reemplazar el sensor de presión barométrica. El AIR-HB-1A está comercialmente disponible y ha servido para mejorar nuestras medidas de presión barométrica. Tiene un alcance de presión de 364-775 mm Hg con una

resolución de 0.1 mm Hg; otras especificaciones se encuentran en el Apéndice. El tamaño, capacidades y facilidad de uso de esta unidad lo hacen un componente ideal de este paquete atmosférico. Otro paquete barométrico comercial es el Ultimeter modelo 12, que tiene una resolución de 1 mm de Hg y un alcance de 330-787 mm Hg. Otros indicadores de presión, como el altímetro/barómetro Thommens, pueden ser usados, pero deben ser revisados diariamente, antes y después de uso, usando un instrumento exacto (como el AIR-HB-1A). Cada uno de nuestros paquetes de reflectores tiene un altímetro Thommens que se usa como respaldo para el AIR-HB-1A.

Las medidas de humedad sobre  $0^{\circ}\text{C}$  se hacen usando un sicrómetro-honda, que mide la temperatura de la burbuja seca y mojada. Cuando las temperaturas están bajo congelación, se debe encontrar otro método para medir la humedad.

La temperatura del aire es el parámetro atmosférico más importante que se mide y es otra área donde hemos mejorado nuestros métodos de recolección de datos. Las temperaturas en los puntos finales pueden ser afectadas por radiación del suelo, pero W.H. Prescott (reporte USGS no publicado, 1971) demostró que si se toma la temperatura a 7 m o más sobre el nivel del suelo, este problema puede ser minimizado. Ahora colocamos el sensor de temperatura en un poste telescópico de 7.6 m de largo de fibra de vidrio. Usando un poste de 7.6 m en vez de los postes anteriores de 6 m (Iwatsubo y otros, 1988), hemos minimizado los efectos de radiación de la tierra. Este poste es lo suficientemente fuerte para sostenerse en vientos moderados y suficientemente corto (1.78 m contraído) para usar en operaciones de helicópteros. Los postes de fibra de vidrio de 6 m son más cortos (1.06 m contraídos) y livianos, y todavía se usan cuando hay que caminar mucho y hay suficiente viento para permitir una buena mezcla del aire, ayudando así a minimizar los efectos de radiación del suelo.

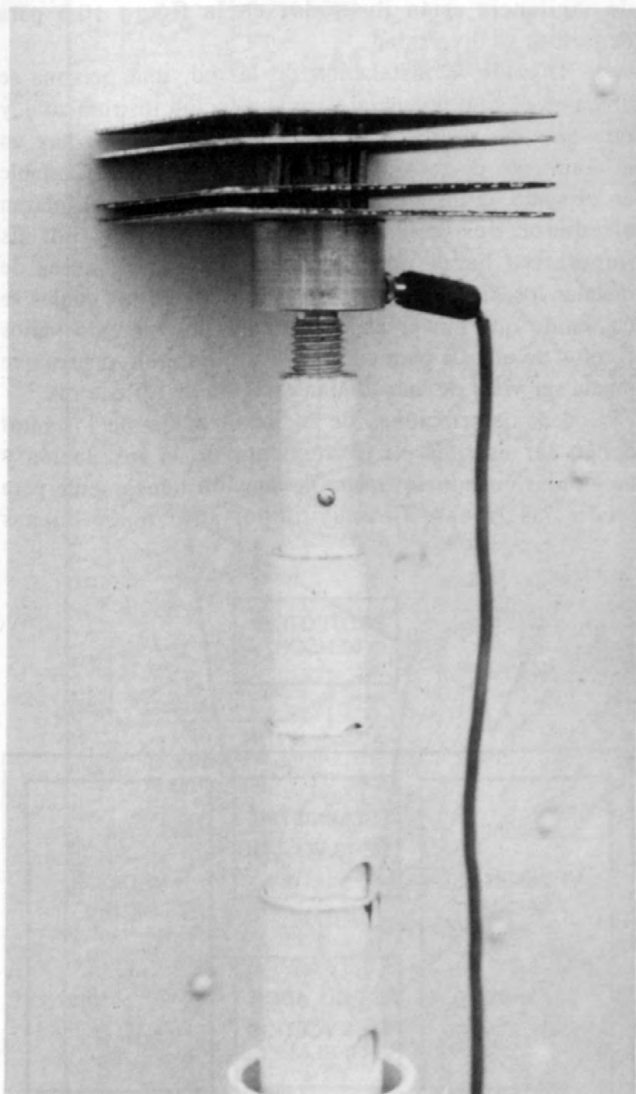
Para evitar una exposición directa del sol sobre el sensor de temperatura, éste se coloca en un protector diseñado para aspirar naturalmente. El protector consiste de cuatro placas de aluminio de 10 cm cuadrados, dos arriba del sensor y dos abajo (fig. 10.2). Hay 5-7 mm entre las parejas de placas entre las cuales está montado el sensor de temperatura; entre las placas de una misma pareja hay un cm de separación. El protector está sujetado a la parte superior de la varilla de nivelación por un palo de aluminio enroscado. Los lados de la placa, que miran hacia afuera del sensor están pintados de blanco para reflejar la luz, mientras que los lados hacia el sensor están pintados de negro para absorber la luz. Este protector es liviano y permite suficiente circulación de aire.

Un alambre para la potencia y señal de salida conecta el sensor de temperatura a una caja aparte que

contiene la fuente de energía, barómetro y despliegue digital para el sensor de temperatura. Un estuche hermético de resina con "foam" (47 × 39 × 17 cm; fabricado por Pelican Products, Inc.), (hermetico con una válvula de escape de presión), no corrosible y duradero alberga este equipo (fig. 10.3). Se puede cortar fácilmente una sección central en el "foam" para acomodar cualquier instrumento para que los equipos estén protegidos dentro del estuche. Después de años de uso, ninguno de nuestros estuches han sufrido daños.

Nosotros usamos un sensor de temperatura de precisión LM 335 de National Semiconductor, el cual se

alimenta con una referencia de voltaje de 5 voltios; actualmente se usa una referencia LM78L05 (fig. 10.4), pero para mejorar la estabilidad la vamos a cambiar por una REF-02. Una batería sellada recargable de 5 voltios (6.5 Ah), que permite períodos más largos de uso sin tener que recargar, alimenta la referencia de 5 voltios. Para períodos cortos, una batería de transistor de 9 voltios puede reemplazar la batería más grande de 12 voltios. A veces esto es necesario, cuando no es posible cargar la batería más grande y el estuche debido a su peso o volumen. La señal de salida del sensor de



**Figura 10.2.** El protector de temperatura montado en una mira de nivelación telescópica. El sensor de temperatura está montado entre los dos conjuntos de placas paralelas con alambres conectándolo a un conector en la parte inferior del protector. Se conecta un alambre separado a la caja donde se puede leer la temperatura.



**Figura 10.3.** Los estuches Pelican con el barómetro/altímetro (lado izquierdo), batería y regulador de 5 voltios (mitad), y multímetro digital para el despliegue de la temperatura (lado derecho). El alambre que viene del protector de temperatura se enchufa a la parte delantera de esta caja, justo debajo de la manija.



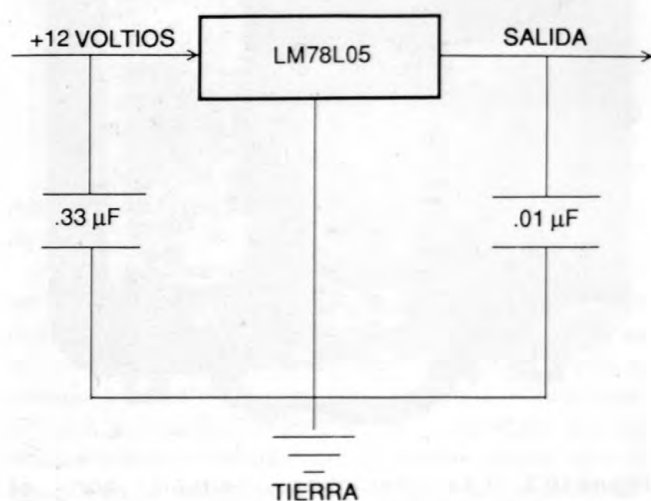
temperatura se puede ver en un multímetro Fluke de 4½ dígitos. La salida del sensor LM355 es en voltios y corresponde a la temperatura de aire y se lee al 0.1 °K más cercano. Un diagrama de flujo (fig. 10.5) ilustra el procedimiento para tomar las temperaturas del aire.

Se calibran los sensores de temperatura una vez al año con un termómetro de cuarzo. Para la calibración se usa una cámara ambiental, un termómetro de cuarzo (HP2804A con un sensor de respuesta rápida), unidad de adquisición de datos (HP3421A) y computadora personal. El alcance de calibración es de -20 a 50 °C en intervalos de 1 °C (Iwatsubo y otros, 1988).

Todos los equipos mencionados arriba, con la excepción del bastón centrador y trípode están empacados dentro de una mochila estándar con armazón exterior. Si se quiere, el trípode puede ser amarrado a la mochila. Es fácil cargar la mochila y todo cabe dentro del helicóptero. Estos factores son importantes cuando el sistema debe ser portátil.

## MONTAJE DE LA RED Y PROCEDIMIENTO DE MEDIDAS

Para empezar a establecer una red se necesita el mejor mapa topográfico disponible, preferiblemente con las áreas de vegetación señaladas. Se seleccionan alrededor de seis estaciones para la base de la montaña, aproximadamente a 60 grados radiales de distancia en relación con la cumbre. Idealmente se debe poder ver la próxima estación instrumental de cada estación para que se puedan hacer medidas entre ellas, pero esto no es

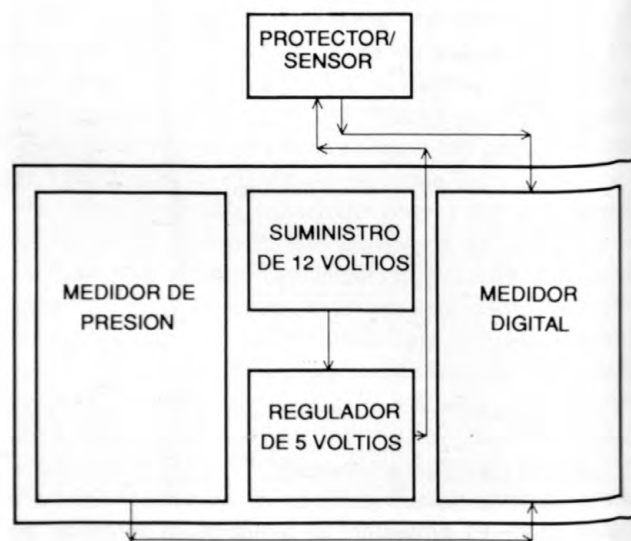


**Figura 10.4.** El diagrama de circuito de la LM78L05 usada para regular el voltaje para el sensor de temperatura. En el futuro vamos a usar una REF-02 para tener una referencia más estable.

crítico y a veces difícil de lograr. Después, seleccionamos los sitios para los reflectores a elevaciones intermedias o altas en el volcán para que puedan ser vistas desde por lo menos dos estaciones instrumentales. Los sitios para reflectores que son visibles de tres estaciones instrumentales son óptimas. Si solamente se tiene línea de vista a una estación instrumental, pero se considera que la línea es importante, se instala. Cuando se instalan las estaciones, tratamos de formar triángulos y cuando posible, interconectar toda la red. Esta meta se logra en el mapa, pero raramente es posible alcanzarla en el campo. La topografía, vegetación, cubierta de nieve y hielo y afloramientos de roca dictan finalmente lo que se puede establecer en cada volcán. Ejemplos de tres redes de vigilancia están ilustrados en la figura 10.6 para demostrar su diversidad.

Durante la instalación de la red, una persona se ubica en el sitio potencial para la estación instrumental, y otra en cada sitio donde van los reflectores. Si hay un afloramiento de roca sólida o un peñón grande y estable en el suelo se instala el hito. Las personas se desplazan alrededor del volcán hasta completar la red. Es imperativo hacer una confirmación visual antes de instalar los hitos. Han habido ocasiones en las cuales se ha tenido que mover el sitio para el instrumento varios cientos de metros para completar un triángulo o para que pueda ser visto de más de una estación de reflectores.

Las descripciones de la localización de los hitos deben ser escritas en el momento de la instalación y mejoradas cuando se ocupa la estación nuevamente para medir las líneas. Es muy importante tener buenas

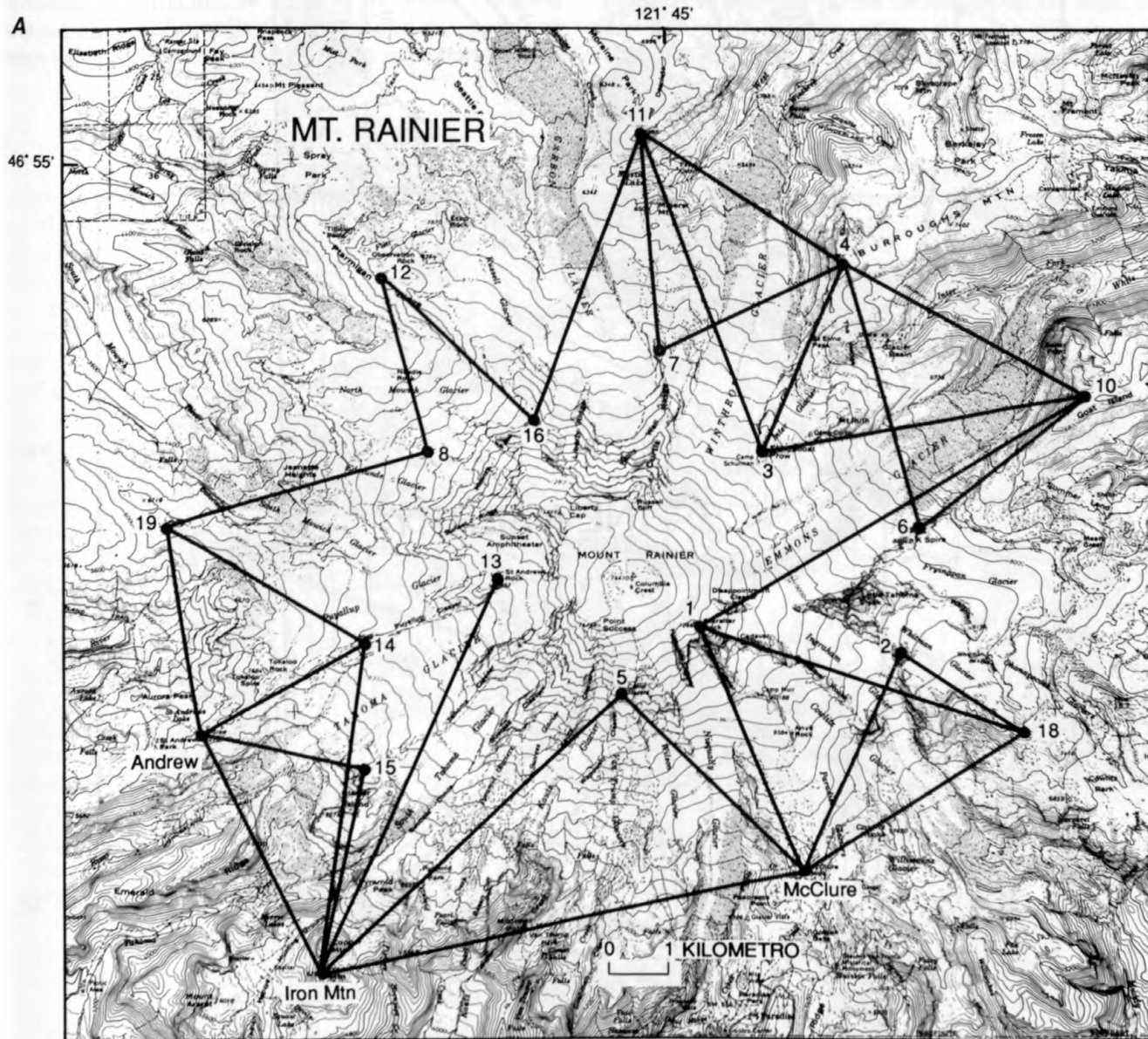


**Figura 10.5.** El diagrama de flujo con el sistema atmosférico. La batería de 12 voltios alimenta la referencia de 5 voltios, que en cambio alimenta el sensor de temperatura con su señal de salida (temperatura en kelvin) que se lee en un voltímetro digital.

descripciones de los hitos en el campo, para que en el futuro alguien que nunca ha estado en el hito, pueda encontrarlo. Nosotros tratamos de tener los apuntes más detallados posibles. Las descripciones deben incluir cualquier cosa que nos ayude a encontrar la estación, tomando en cuenta los efectos estacionales, como nieve cubriendo el hito, hojas caídas en otoño, y posiblemente futura intervención humana. Hemos tenido problemas con vandalismo en algunas estaciones donde personas han sacado o dañado los hitos. Si anticipamos problemas con

vándalos, enterramos los hitos varias decenas de centímetros en el suelo y detallamos cuidadosamente el lugar donde se necesita cavar. Las fotografías de los hitos y rocas circundantes ayudan mucho.

Típicamente usamos cuatro personas para medir una red, dos en el lado instrumental y una persona en cada una de dos estaciones de reflectores. Por varias razones todos los equipos deben tener radios de comunicación en dos direcciones; entre otras cosas, esto asegura que los datos atmosféricos sean tomados



**Figura 10.6.** Las redes de vigilancia establecidas en tres volcanes de los Cascades. A, Red de trilateración en Mount Rainier, Washington. Los números y nombres identifican los hitos. La red Rainier es una red de trilateración "típica." B, Red de medida de distancia en Newberry, Oregon. Paulina Peak está en la parte más alta del borde de la caldera, y todos los disparos radian hacia abajo de ahí. Esta es una red "atípica" que fue controlada por la topografía. Números identifican cada línea. C, Otra red "atípica," para vigilar Crater Lake, Oregon. Línea 1-3 fue establecida como una medida independiente para verificar la estabilidad de la línea 1-"Lodge."

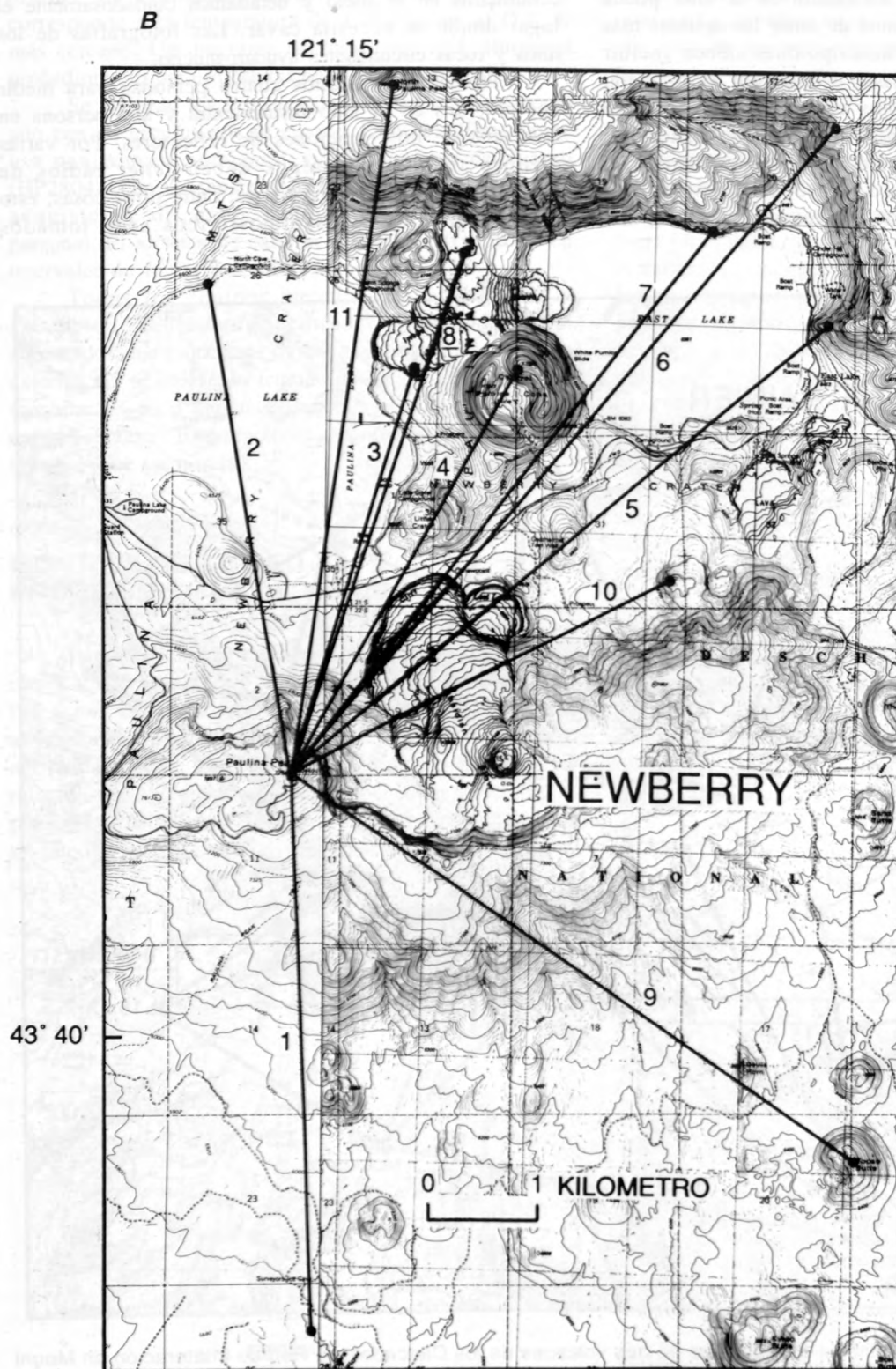


Figura 10.6.—Continuación



simultáneamente. La mayoría de las veces no es posible localizar el reflector sin la ayuda de un espejo de señales. Las personas en las estaciones instrumentales y de reflectores apuntan los espejos uno al otro, permitiendo a la persona que maneja el instrumento señalar el EDM, y la persona en los reflectores apuntar a los prismas. Algunas veces el espejo desde el lado del EDM puede coger el reflejo directamente de los prismas en el lado del reflector, y no se necesita ninguna persona para mover el espejo. En días nublados, ropa colorida, banderas y bengalas ayudan mucho. Una vez que se localiza el reflector, se mide la distancia y ángulo cenital. Se pueden medir dos líneas antes que alguien se mueva. La medición de una red sigue el mismo

procedimiento que su instalación; las personas se mueven de sitio a sitio por saltos alternos hasta completar todas las líneas.

En las estaciones instrumentales y de reflectores, aunque es crítico registrar toda la información que se necesita para reducir los datos, esta tarea es fácilmente pasada por alto. Para minimizar este problema, se puede hacer un formulario que debe ser llenado completamente antes de abandonar la estación. Nosotros usamos hojas de datos impresos en papel "Rite-in-the-Rain" (fig. 10.7). Las personas en las estaciones instrumentales y de reflectores llenan las partes apropiadas de las hojas de datos. A cada mochila se le asigna un número que corresponde al sensor de temperatura y es el "CAJA #"

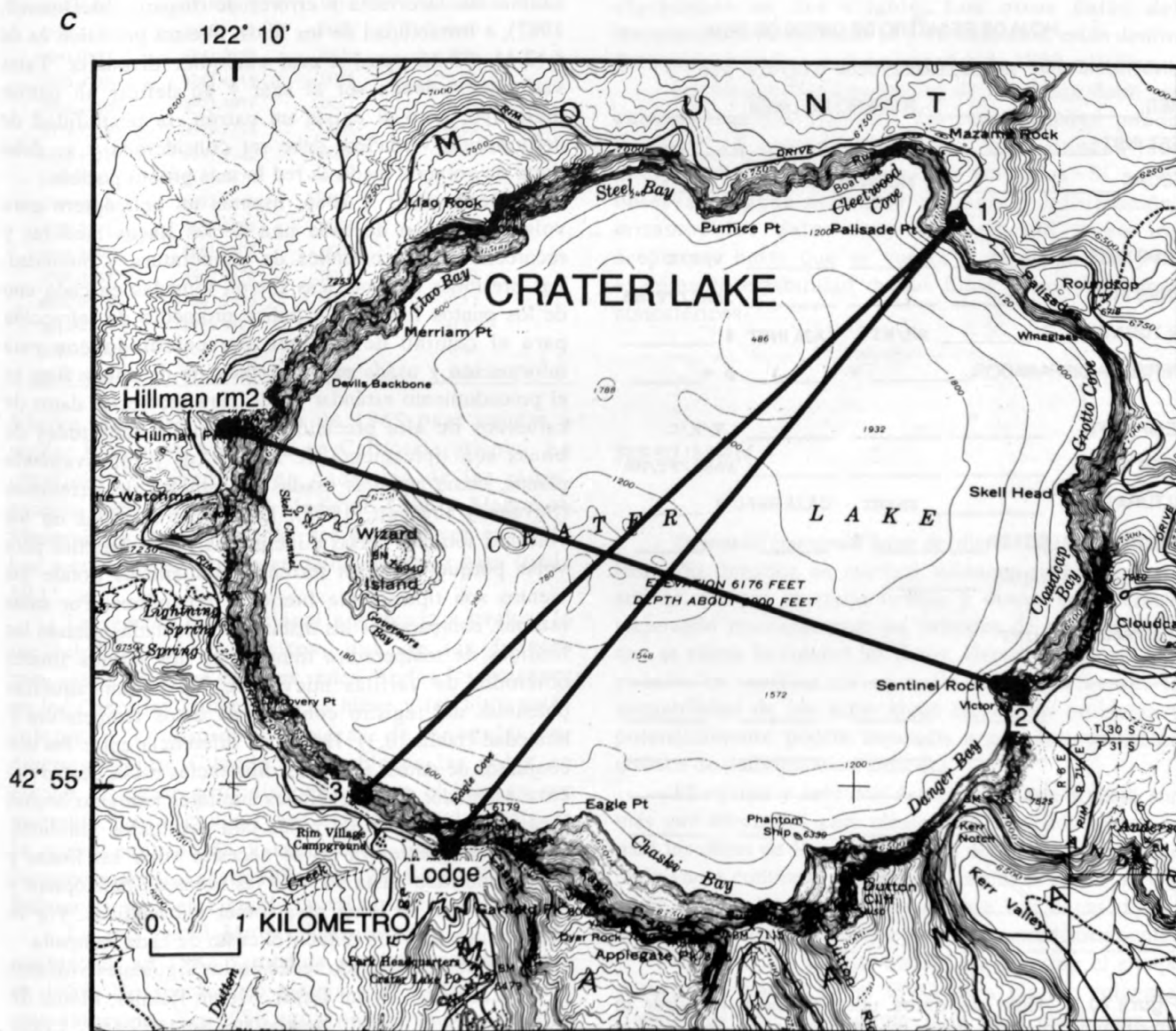


Figura 10.6.—Continuación

en la hoja de datos. Por lo tanto, siempre están juntos los mismos sensores, trípode, conjunto de reflectores y libreta, minimizando así problemas potenciales de calibración. Es imperativo que se registre la altura del centro óptico del EDM y de los prismas reflectores para poder reducir los datos (nosotros reducimos las distancias punto-a-punto). Las últimas líneas en las hojas son para registrar los ángulos. Hay espacio para los apuntes misceláneos en la parte de atrás de las hojas. Tales apuntes pueden incluir la geometría de un arreglo de prisma poco usual, diagramas de los mogotes, comentarios sobre las condiciones del tiempo o las condiciones del hito.

HOJA DE REGISTRO DE DATOS DE EDM

¿INSTRUMENTO? RM/HP/LEITZ/GEOD 114/GEO 210

RED \_\_\_\_\_ NUMERO DE LINEA \_\_\_\_\_

EST INST \_\_\_\_\_ EST REFL \_\_\_\_\_

FECHA \_\_\_\_\_ HORA (LOCAL) \_\_\_\_\_

TEMP INST \_\_\_\_\_ V/F/C \_\_\_\_\_

PRES INST \_\_\_\_\_ inHG/FT/MB \_\_\_\_\_

ALTURA INST \_\_\_\_\_ SH/HI CAJA INST # \_\_\_\_\_

PERSONA DISPARADOR \_\_\_\_\_ W = \_\_\_\_\_ D = \_\_\_\_\_

TEMP REFL \_\_\_\_\_ V/F/C \_\_\_\_\_

PRES REFL \_\_\_\_\_ inHG/FT/MB \_\_\_\_\_

ALTURA REFL \_\_\_\_\_ SH/HI CAJA REFL # \_\_\_\_\_

PERSONA REFLECTOR \_\_\_\_\_ W = \_\_\_\_\_ D = \_\_\_\_\_

NUMERO DE TRIADAS \_\_\_\_\_

DISTANCIA: M/FT

_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____

**Figura 10.7.** Hoja de datos utilizada para registrar la información durante cada medida, impresa en papel a prueba de agua. Los espacios "W" y "D" son para las lecturas húmedas y secas del sicrómetro-honda.

## DISCUSION

El tipo de equipo y métodos usados dependen de la precisión requerida. Si el proyecto requiere datos de la más alta calidad, los costos serán elevados debido a la necesidad de equipo especializado y horas de vuelo en helicóptero y avión para obtener perfiles de humedad y temperatura a lo largo de las líneas. Se puede obtener una precisión de 3 mm y error proporcional de 0.2 ppm de longitud de línea mediante la utilización de tales métodos donde la precisión relativa es más grande a mayores distancias (Savage y Prescott, 1973). Sin embargo, hemos encontrado que debido a los errores al azar, que incluyen centrado incorrecto y condiciones atmosféricas inexactas, errores sistemáticos como una calibración incorrecta y errores de disparo (McDonnell, 1987), e inestabilidad de los hitos, nuestra precisión es de  $\pm (2.46 \pm 2.26 \text{ ppm})$  a casi cualquier distancia. Tales variaciones deben ser al azar y no definir un patrón definitivo, pero si existe un patrón, la posibilidad de deformación verdadera debe ser considerada y se debe tratar de volver a medir la red lo más pronto posible.

Desde 1981 a 1986, usamos un helicóptero para volar a lo largo de cada una de las líneas medidas y recolectar datos continuos de temperatura y humedad. Las presiones barométricas fueron tomadas en cada uno de los puntos finales. Un índice promedio de refracción para el camino de la línea fue calculado con esta información y usada para la reducción de datos. Este es el procedimiento estándar usado para recolectar datos de esfuerzos de alta precisión, cuando las longitudes de líneas son típicamente de 20–30 km y relativamente planos, como aquellas usadas en estudios de terremotos (Savage y Prescott, 1973). Las líneas medidas en los volcanes son más cortas e inclinadas y más difíciles para volar porque están en terrenos montañosos donde los vientos son típicamente fuertes y repentinos. Por estas razones, comparamos las distancias calculadas usando las medidas de temperatura tomadas en los puntos finales obtenidos de varillas nuevas de 7.6 m con aquellas obtenidas del registro continuo de datos temperatura y humedad (tabla 10.3). Hay poca diferencia entre los dos conjuntos de datos; todas las diferencias están dentro del error esperado. Comparaciones similares han sido hechas para un sin número de redes con resultados similares. Consecuentemente, ya no se necesita volar las líneas y hemos ahorrado hasta 50% de las horas de helicóptero y el tiempo que se toma para tomar las medidas. Por lo tanto, hemos logrado reducir el costo de cada campaña.

Hemos establecido redes en los siguientes volcanes de los Cascades: Mount Baker, Mount Rainier, Mount St. Helens, Mount Hood, Newberry, South Sister, Crater Lake, Medicine Lake, Mount Shasta, y Lassen Peak. Redes similares han sido instaladas en Augustine.

**Tabla 10.3.** Distancias de punto-a-punto (en metros) entre líneas donde las temperaturas y humedad fueron tomadas durante vuelo y líneas para las cuales la temperatura (tomada a 7.6 m sobre el suelo) y humedad fueron tomadas en cada punto final.  
[En los dos casos, la presión barométrica fue tomada en cada punto final. PPM, partes por millón]

Línea volado	Dos cabos	Diferencia	
		m	ppm
2612.3428	2612.3425	-.0003	-0.11
5142.2388	5142.2304	-.0084	-1.63
3787.7485	3787.7478	-.0007	-0.18
4567.9478	4567.9472	-.0006	-0.13
3229.0068	3229.0069	.0001	0.03
3155.4868	3155.4855	-.0013	-0.41
3944.7571	3944.7550	-.0021	-0.53
3134.0022	3134.0064	.0042	1.34
2073.8518	2073.8512	-.0006	-0.29
3559.6423	3559.6407	-.0016	-0.45
4558.1172	4558.1149	-.0023	-0.50
3241.0857	3241.0888	.0031	0.96
3243.4739	3243.4814	.0075	2.31
3823.2954	3823.2971	.0017	0.44
5079.7373	5079.7372	-.0001	-0.02
6681.5571	6681.5542	-.0029	-0.43
6101.5864	6101.5870	.0006	0.10
6391.9248	6391.9245	-.0003	-0.05
7573.0171	7573.0166	-.0005	-0.07
4461.7808	4461.7804	-.0004	-0.09
3502.0552	3502.0570	.0018	0.52
4507.9756	4507.9696	-.0006	-0.13
2814.4336	2814.4325	-.0011	-0.39
3014.4924	3014.4950	.0026	0.86
2717.0093	2717.0099	.0006	0.22

Alaska, en 1988 y a fines de 1989 para ayudar a vigilar Mammoth Mountain en California oriental. La repetición de medidas en cada una de las redes, excepto para aquellas en Medicine Lake y Mammoth Mountain, ambas instaladas por primera vez en 1989, han servido para establecer datos de líneas base (tabla 10.1).

La remediación ocasional nos ayuda a evaluar la inestabilidad de los hitos, una de las fuentes principales de error en tales redes. Todos los volcanes en los Cascades reciben mucha nieve y los hitos están sujetos a condiciones severas de congelación-descongelación. Cuando se establecen las redes, se escoge el mejor sitio disponible para el hito en ese momento: en algunos casos esta opción dependía de la nieve acumulada y resultó en una evaluación incorrecta de la inestabilidad de los hitos. El Mount Rainier es un buen ejemplo de tal problema.

La red en el Mount Rainier (fig. 10.6A) fue establecida en 1982 y medida parcialmente de nuevo en 1983. No se observó ningún gran cambio durante este intervalo. En 1988, una porción de la red fue medida nuevamente y se observaron cambios más grandes de lo esperado en las distancia a varios hitos

en el área donde han ocurrido inundaciones periódicas por reventones de glaciares (T. Pierson, CVO, comun. escrita, 1987). La distancia a un reflector en la parte alta del cono (estación 13 en fig. 10.6A) se había reducido en 20 cm. Las estaciones 14 y 15, que se medían desde Iron Mountain, se habían movido -0.036 y 0.057 m, respectivamente. No estábamos seguros si había una deformación verdadera y por lo tanto se midió toda la red nuevamente en 1989. Cuando la red fue instalada por primera vez en 1982, la roca en la cual se colocó el hito número 13 estaba casi totalmente enterrada en nieve y parecía ser estable. En 1989, después de un invierno con poca nieve, la persona que instaló el hito observó que la nieve alrededor de la roca donde estaba el hito se había derretido, revelando que la roca era simplemente un canto suelto descansando sobre una pendiente fuerte y claramente no era estable. Los otros datos del levantamiento, estaciones 14 y 15 incluidos, están dentro del error esperado para las campañas de 1982 y 1983.

La inestabilidad potencial de los hitos debe ser cuidadosamente vigilada. La inestabilidad puede resultar en grandes cambios que pueden ser interpretados como deformación volcánica. Si no se observa ninguna actividad sísmica o deformación, miramos los datos muy críticamente y no los aceptamos hasta que se vuelve a medir la red y se examina la estabilidad de los hitos y los problemas atmosféricos.

## RESUMEN

Datos de líneas de base de distancias horizontales han sido tomados en muchos volcanes potencialmente activos. Hemos ahorrado tiempo y dinero considerable mejorando continuamente los métodos de vigilancia sin que se afecte la calidad los datos. Hemos visto que, aún cuando la instalación se hace cuidadosamente, la inestabilidad de los hitos sigue siendo un problema y potencialmente podría conducir a una interpretación errónea de deformación verdadera.

El equipo y métodos descritos en este trabajo son más que adecuados para alcanzar la precisión requerida para los datos de línea de base. El equipo y métodos sin duda van a continuar mejorándose a través de los años y si se miden las redes nuevamente los datos de las medidas de base seguirán mejorándose, estadísticamente.

La intención de este trabajo era describir el equipo y métodos usados en el CVO para vigilar volcanes. Esperamos que sirva como guía para establecer las necesidades de equipo, los métodos y procedimientos para proyectos similares en otros sitios.



## AGRADECIMIENTOS

Nosotros agradecemos a Teresa Atwill, Steve Brantley, Ed Brown, Ken Cameron, Tom Casadevall, Bill Chadwick, Dan Dzurisin, John Ewert, Christina Heliker, Dan Johnson, Jack Kleinman, Jeff Marso, Bobbie Myers, Peter Otway (New Zealand Geological Survey), John Power, Dave Schneider, Ben Talai (Rabaul Volcano Observatory, Papua New Guinea), Lyn Topinka, Richard Waitt, Dave Wieprecht, Ed Wolfe, y Jon y Ken Yamashita por su ayuda en uno o más volcanes. Agradecimientos especiales para Lyn Topinka por la mayoría de las fotografías, Tom Murray por el asesoramiento en electrónica y Elliot Endo por la programación de computación. También agradecemos a los pilotos del helicóptero que hicieron posible que se completaran estas medidas.

## REFERENCIAS CITADAS

- Bevin, A.J., and Dip, L.S., 1983, Electronic distance measuring and the practical surveyor (second edition): Auckland, Continuing Educating Committee, New Zealand Institute of Surveyors, 115 p.
- Brinker, R.C., and Minnick, Roy, eds., 1987, The surveying handbook: New York, Van Nostrand Reinhold, 1270 p.
- Chadwick, W.W., Jr., Iwatsubo, E.Y., Swanson, D.A., and Ewert, J.W., 1985, Measurements of slope distances and vertical angles at Mount Baker and Mount Rainier, Washington, Mount Hood and Crater Lake, Oregon, and Mount Shasta and Lassen Peak, California, 1980-1984: U.S. Geological Open-File Report 85-205, 96 p.
- Davis, R.E., Foote, F.S., Anderson, J.M., and Mikhail, E.M., 1981, Surveying theory and practice, sixth edition: New York, McGraw-Hill, 992 p.
- Iwatsubo, E.Y., Topinka, L., and Swanson, D.A., 1988, Measurements of slope distance and zenith angles at Newberry and South Sister volcanoes, Oregon, 1985-1986: U.S. Geological Survey Open-File Report 88-377, 51 p.
- Kinoshita, W.T., Swanson, D.A., and Jackson, D.B., 1974, The measurement of crustal deformation related to volcanic activity at Kilauea volcano, Hawaii, *en* Civetta, L., Gasparini, P., Luongo, G., and Rapolla, A., eds., Physical Volcanology: Amsterdam, Elsevier, p. 87-115.
- Lipman, P.W., Moore, J.G., and Swanson, D.A., 1981, Bulging of the north flank before the May 18 eruption—Geodetic data, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.R., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 143-155.
- McDonnell, P.W., 1987, Linear measurements—EDM instruments, *en* Brinker, R.C., and Minnick, Roy, eds., The surveying handbook: New York, Van Nostrand Reinhold, p. 109-128.
- Savage, J.C., and Prescott, W.H., 1973, Precision of Geodolite distance measurements for determining fault movements: Journal of Geophysical Research, v. 78, no. 26, p. 6001-6008.

- Swanson, D.A., Lipman, P.W., Moore, J.G., Heliker, C.C., and Yamashita, K.M., 1981, Geodetic monitoring after the May 18 eruption, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.R., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 157-168.
- Yokoyama, I., Yamashita, H., Watanabe, H., and Okada, H., 1981, Geophysical characteristics of dacite volcanism—The 1977-1978 eruption of Usu volcano: Journal of Volcanological and Geothermal Research, v. 9, p. 335-358.

## APENDICE

La lista de los equipos que se usan en el Observatorio Vulcanológico de Cascades para medir las distancias en volcanes que no sean el Mount St. Helens.

### Instalación de la Estación

Hitos - Hitos de bronce de 10 cm en diámetro  
Cinzel en estrella de albañil - 3/4 - 7/8" en diámetro  
Marrón de 3 libras  
Cemento - Jet Set, de fraguado rápido

### Equipo de Agrimensura

EDM-HP3808A y Geodimeter 114  
Teodolito-Wild T2 (estilo nuevo)  
Trípode-Kern tipo bastón centrador con placa adaptador.  
Cualquier trípode con tribrach óptico.  
Prismas-Prisma de vidrio cubo esquinado de una pieza, con exactitud menor a 2 segundos arcs.

### Equipo Atmosférico

#### Temperatura

Mira sin marca de 7.6 m de largo, Mound City.  
Sensor de temperatura, National Semiconductor LM355.  
Protector aspirado, hecho en el CVO.  
Regulador de 5 voltios, National Semiconductor LM7805 o Precision Monolith Corporation REF-02  
Batería sellada de 12 voltios, 6.5 Ah.  
Material para circuitos para referencia de 5 voltios, del CVO.  
Multímetro digital, 4 1/2 dígitos, Fluke 8060A.

#### Presión

Barómetro Modelo AIR-HB-1A, Atmospheric Instrumentation Research Inc.  
Especificaciones:

Alcance de temperatura: -10 a 40 °C

Tamaño: 3.0 × 9.1 × 14.5 cm

Peso: 280 g

Energía: batería de transistor de 9 voltios

Ultímetro modelo 12, Peet Bros. Company

Altímetro/barómetro Thommen

## Humedad

Sicrómetro-honda

## Caja

Caja Pelican, Pelican Products, Inc.

## Accesorios

Batería sellada de 12 voltios y cable de batería para el EDM, de repuesto.

Baterías de 9 voltios para multímetro digital y barómetro AIR, de repuesto.

Agua para sicrómetro-honda.

Mochila para el HP3808A y cintas para la mochila para el estuche del Geodimeter 114.

Espejo para señales.

Libreta y lápiz.

(EDM = Electronic Distance Measuring), totalímetro y niveles.

Floyd (1978) describe con bastante detalle los procedimientos para instalar los hitos geodésicos usados en las redes de control vertical en los Estados Unidos. Estos procedimientos son generalmente apropiados para instalaciones donde se puede llegar con camiones para la instalación de algunos o la larga de carreteras, pero la información sobre la selección de las estaciones con respecto al tipo de sustrato y clima es completa y pertinente a la instalación de hitos en y alrededor de volcanes activos. En este capítulo describiremos un sistema versátil para la instalación de hitos y prismas reflectores en volcanes. Este sistema fue desarrollado por el personal del Equipo de Asistencia durante Crisis Volcánicas (VCAT-Volcanic Crisis Assistance Team) del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Los diseños y métodos están diseñados para ser transportados fácilmente, compatibilidad de los componentes e instalación rápida y fácil de los puntos de referencia. Los métodos descritos aquí son los que han resultado ser efectivos, pero dependiendo de la disponibilidad de materiales y condiciones locales de campo se tendrán que hacer modificaciones. Los hitos permanentes deben ser resistentes a la corrosión.

## LA COLOCACIÓN DE LOS HITOS

La mayoría de los métodos geodésicos usados para vigilar volcanes pueden detectar movimientos de la corteza de unos pocos por millón, aunque en algunos volcanes activos los desplazamientos pueden ser de varios órdenes de magnitud mayor. Es importante asegurar que cualquier cambio medido refleje verdaderamente la actividad volcánica, no movimientos locales de suelo causado por la inestabilidad de los hitos o otros efectos no volcánicos, como movimientos del suelo o deslizamientos o cambios normales de gases atmosféricos (Hanks y otros, 1989). Por lo tanto, los hitos





# 11. Instalación de Hitos y Reflectores Permanentes para Redes Geodésicas de Deformación

Por Michael P. Doukas y John W. Ewert

## ABSTRACTO

Para medir la deformación sobre una gran área en un volcán activo, se tomaron prestados instrumentos y técnicas de agrimensura y geodesia. A continuación discutimos varios métodos empleados en el Observatorio Vulcanológico Cascades para instalar hitos y prismas reflectores usados para medir la deformación. Enfatizamos un sistema versátil diseñado para ser transportado fácilmente, con componentes compatibles y que pueda ser instalado rápida y fácilmente en volcanes intranquilos.

Los hitos para los instrumentos y prismas reflectores son instalados en huecos taladrados en roca dura o en fundaciones de concreto en material no consolidado.

Los visuales de espalda, líneas medidas hacia afuera del volcán a áreas que se presumen sean más estables, son usados para verificar la estabilidad de los hitos de EDM y están incluidos en las redes de deformación para verificar la estabilidad relativa de los mismos. Una selección cuidadosa de las estaciones, redes de deformación con la máxima cantidad de redundancia que sea práctica y medidas frecuentes, proporcionan una manera de verificar la estabilidad de los sitios donde se colocan los reflectores.

## INTRODUCCION

La vigilancia de la deformación de un volcán ayuda a los científicos determinar la posible evolución de un volcán intranquilo. La deformación puede ser vigilada remotamente en puntos seleccionados con sensores electrónicos (inclinómetros, medidores de desplazamiento, o tensiómetros) que envían datos por telemetría radial a un centro de registro de datos. Sin embargo, para medir la deformación sobre un área grande, los instrumentos y técnicas de agrimensura y geodesia tienen que ser empleados. En este capítulo discutimos las metodologías empleadas por el Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO-Cascades Volcano Observatory) para instalar los hitos que se necesitan para medir la deformación con instrumentos de agrimensura como distanciómetros electrónicos

(EDM's-Electronic Distance Meters), teodolitos y niveles.

Floyd (1978) describe con bastante detalle los procedimientos para instalar los hitos geodésicos usados en las redes de control vertical en los Estados Unidos. Estos procedimientos son generalmente apropiados para instalaciones donde se puede llegar con camiones, para la instalación de mogotes a lo largo de carreteras, pero la información sobre la selección de las estaciones con respecto al tipo de sustrato y clima es completa y pertinente a la instalación de hitos en y alrededor de volcanes activos. En este capítulo describimos un sistema versátil para la instalación de hitos y prismas reflectores en volcanes. Este sistema fue desarrollado por el personal del Equipo de Asistencia durante Crisis Volcánica (VCAT-Volcanic Crisis Assistance Team) del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Los sistemas y métodos están diseñados para ser transportados fácilmente, compatibilidad de los componentes e instalación rápida y fácil de los puntos de referencia. Los métodos descritos aquí son los que han resultado ser efectivos, pero dependiendo de la disponibilidad de materiales y condiciones locales de campo se tendrán que hacer modificaciones. Los hitos permanentes deben ser resistentes a la corrosión.

## LA COLOCACION DE LOS HITOS

La mayoría de los métodos geodésicos usados para vigilar volcanes pueden detectar movimientos de la corteza de unas partes por millón, aunque en algunos volcanes activos los desplazamientos pueden ser de varias órdenes de magnitud mayor. Es importante asegurar que cualquier cambio medido refleje verazmente la actividad volcánica, no movimientos locales de suelo causados por la inestabilidad de los sitios u otros efectos no volcánicos, como movimiento del suelo o deslizamientos o cambios termales, diurnos o estacionales (Banks y otros, 1989). Por lo tanto, los dos

factores más importantes para la instalación de hitos son la selección del sitio e instalación correcta.

## Selección del Sitio

Para la selección del sitio se toman en cuenta varios criterios: (1) establecer líneas de EDM que sean lo más corto posible dadas las limitaciones logísticas y consideraciones de seguridad para maximizar precisión; (2) tomar en cuenta las estructuras geológicas, como diques y fallas, cuando se están ubicando las redes de deformación (por ejemplo, líneas perpendiculares a las tendencias de los diques son particularmente útiles); (3) localizar las líneas de nivelación en suelo competente y radiales a la fuente de deformación; (4) vigilar la mayor parte posible de la circunferencia del volcán; (5) localizar las estaciones instrumentales con líneas de vista libres de obstáculos; y (6) escoger sitios que tengan buen acceso, para reducir el tiempo requerido para volver a ocupar la estación, y que estén protegidos de materiales volcánicos. La inclinación geodésica y medidas de nivelación requieren conjuntos de hitos colocados de acuerdo con las necesidades instrumentales y limitaciones topográficas (Dzurisin, capítulo 12; Yamashita, capítulo 14, Ewert, capítulo 15). La ubicación de un hito para ser usado como una estación instrumental en redes de EDM depende del alcance y

precisión del instrumento usado, longitud de las líneas entre el punto de referencia hasta los prismas, número de prismas requeridos (fig. 11.1) y grado hasta el cual las estaciones instrumentales están interconectadas (Iwatsubo, Topinka y Swanson, capítulo 8; Iwatsubo y Swanson, capítulo 10).

Se debe escoger con cuidado la ubicación de un hito para que los productos volcánicos, tales como flujos de lodo o caídas de ceniza, tengan poca probabilidad de enterrar la señal. Los hitos deben ser colocados en las crestas en vez de los flancos, por ejemplo. Esto también minimiza la inestabilidad de las señales debido al movimiento del terreno superficial, acción de las heladas y movimientos relacionados con los cambios estacionales en la hidrología del agua subterránea.

Un hito colocado en una roca es menos susceptible a estos efectos que una señal colocada en un sustrato no consolidado. Un sustrato no consolidado requiere más trabajo, equipo y concreto para sujetar el hito y crear un sitio estable. Todos los hitos usados en conjuntos de nivelación de montaje sencillo deben ser colocados en el mismo sustrato. Las instalaciones en roca no deben ser mezcladas con sustratos no consolidados en ninguna estación de nivelación inclinación de montaje sencillo, dada la respuesta termal variable de sustratos diferentes, que pueden producir datos no consistentes (Sylvester, 1985).

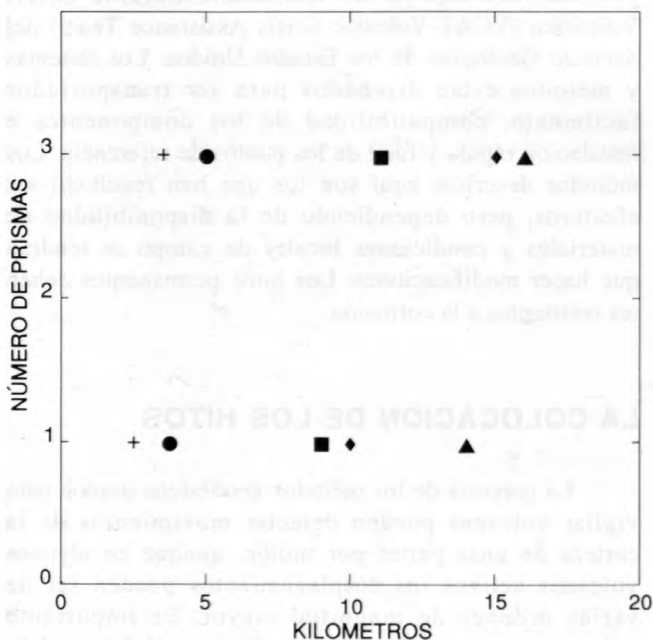
Para minimizar los problemas asociados con vandalismo, los hitos no deben ser colocados en áreas donde hay mucho tráfico humano. Si hay que colocar un hito en tal sitio es sabio enterrarlo para que no pueda ser visto por el observador casual. Si se entierra el hito hay que hacer una descripción cuidadosa del lugar, para que se pueda volver a encontrar. En general, se debe escribir una buena descripción del sitio con referencia a mojones que seguramente no serán destruidas por una erupción.

## Instalación de Hitos

Hay dos clases generales de sustratos que caracterizan áreas volcánicas, afloramientos de roca dura (típicamente flujos de lava) y sedimentos no consolidados (típicamente material volcanoclástico). Cada tipo de sustrato presenta su conjunto de problemas relacionados a la instalación de hitos.

### Instalación en Roca Dura

La señal más rápida y fácil para instalar en roca dura es un perno de anclaje de acero inoxidable. Estos pernos, que son elementos claves de nuestro sistema, son usados como hitos y puntos de anclaje para nuestros reflectores. Los pernos tienen un eje de 100 mm con rosca en la parte superior (una rosca National Course 13



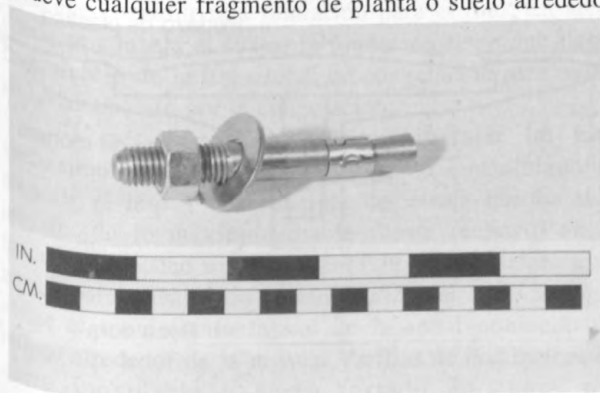
**Figura 11.1.** Alcance promedio y número de prismas que se requieren para cinco modelos de EDM's. Cruz, modelo Lietz RED2A; punto, modelos Wild D15; cuadrado, modelo Wild D13000; diamante, modelo Cubic Precision, Ranger Va; triángulo, modelo Geodimeter 6000.

**Tabla 11.1** Herramientas que se necesitan para instalar un perno de anclaje o hito en roca.

Herramientas para la instalación de pernos de anclaje e hitos.
Martillo
Cinzel en estrella de albañil, 1/2 y 3/4 pulgada
o
Taladro/martillo portátil a batería con
Baterías, con repuestos
Broca, 1/2 y 3/4 pulgada
Llave inglesa, 3/4 pulgada
Tubería plástica, trulla, agua, pedazo de plástico, mortero (1 parte cemento
3 partes arena limpia, 2 partes agua)
Herramientas de campo y equipo para el ensamblaje de montura de prismas
Pernos de anclaje en acero inoxidable, con tuerca y rodela 4 pulgadas de largo, rosca 1/2-13NC
Barras, 1 1/2 pulgada × 8 pulgadas de largo, cuatro huecos equidistantes con diámetro de 1/2 pulgada
Tornillos, "hex drive", 1/4 pulgada × 2 pulgadas de largo rosca 1/2-13NC
Llave inglesa, "allen", 1/4 pulgada
Tuercas, 1/2-13NC, rodela

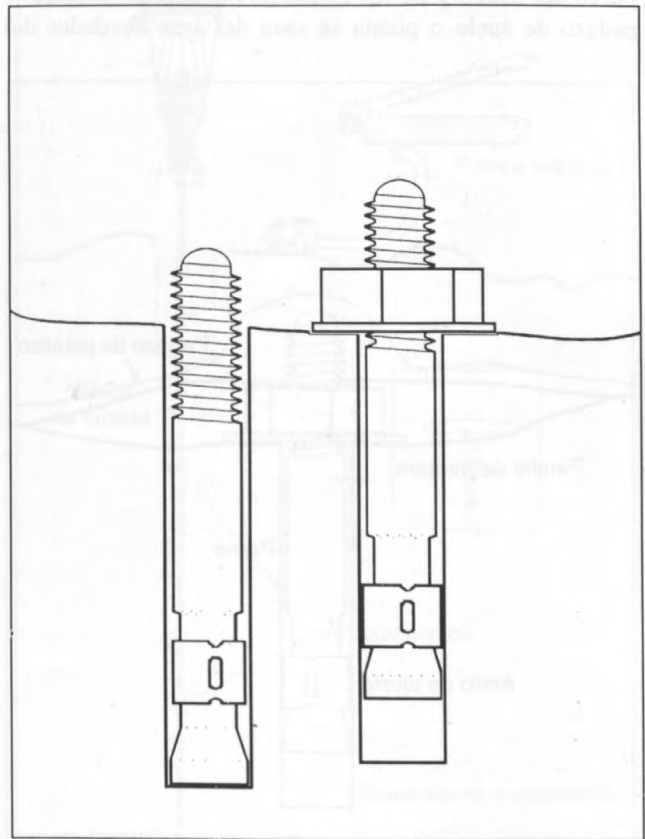
de 0.5 pulgada[1/2-13NC]), con un ensamble de anillo tipo cerradura en la base (fig. 11.2). La parte superior del perno tiene una marca que sirve como punto único de referencia. Hitos tipo perno pueden ser usados inmediatamente después de su instalación.

Las herramientas requeridas para instalar el perno están enumeradas en la Tabla 11.1. Para instalar un perno de acero inoxidable, se taladra un hueco del mismo tamaño que el perno pero con 88 mm de profundidad usando un cinzel en estrella de albañil y martillo, o preferiblemente un taladro/martillo a batería, liviana y manual y con una broca de carburo. Con el taladro a batería se puede acortar el tiempo de taladrar por un factor de 5-10, disminuyendo así la permanencia en sitios potencialmente peligrosos y aumentar el número de estaciones instaladas en un día. Fragmentos de roca se sacan del hueco soplando por un tubo de plástico y se remueve cualquier fragmento de planta o suelo alrededor



**Figura 11.2.** Perno de anclaje en acero inoxidable. Tiene aproximadamente 9 cm de largo.

del hueco. Se golpea el perno de anclaje hasta que está firmemente colocado en el hueco (fig. 11.3). Si se va usar el perno como marca de nivelación, debe llegar al fondo del hueco. La parte superior del perno es golpeada con un martillo hasta que la cabeza quede redondeada y se pueda colocar la mira de nivelación sobre ella. Si se va a usar el perno como señal de EDM, se le hace una cruz en la parte superior del perno con una sierra. Se coloca una tuerca en el perno y se ajusta subiendo el perno un poco para arriba. Esto hace que se deslice el anillo asegurador en el perno en una cuña cónica en la base del perno, expandiendo el anillo para que se presione contra las paredes del hueco y asegurando el perno en su sitio (fig. 11.3). En cualquier caso, el perno no puede ser removido sin romper la roca en la cual está colocada. Un parche de mortero es colocado alrededor de la tuerca y cabeza del perno para proteger la instalación de filtraciones de agua y para fortalecer la estación. El último paso, cuando se está trabajando con mortero, es cubrir el parche con un pedazo de plástico u otro material para ayudar que se frague bien el parche (fig. 11.4).

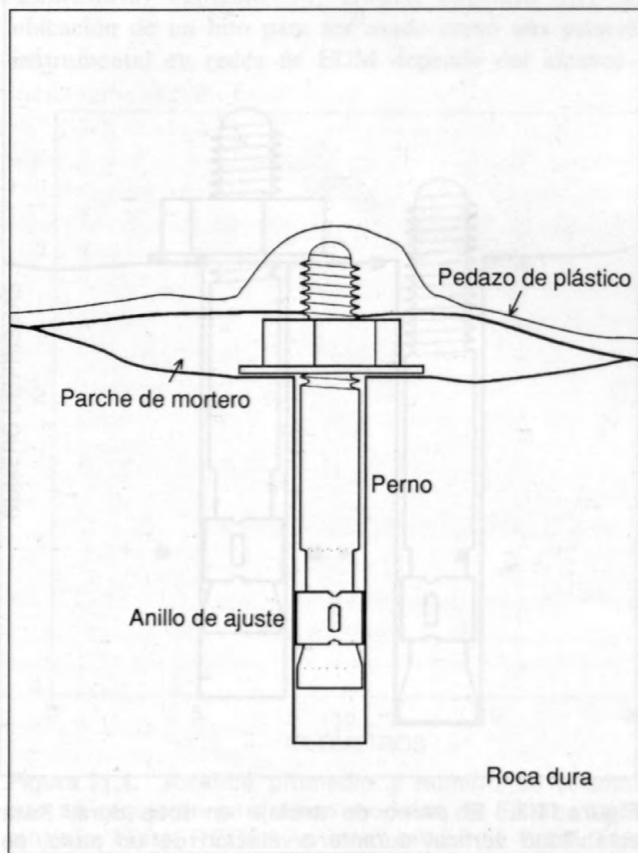


**Figura 11.3.** El perno de anclaje en roca dura. Para estabilidad vertical durante nivelación de un paso, se asienta firmemente el perno (izquierdo); para estabilidad horizontal durante vigilancia con EDM, se sube un poco el perno (derecho).

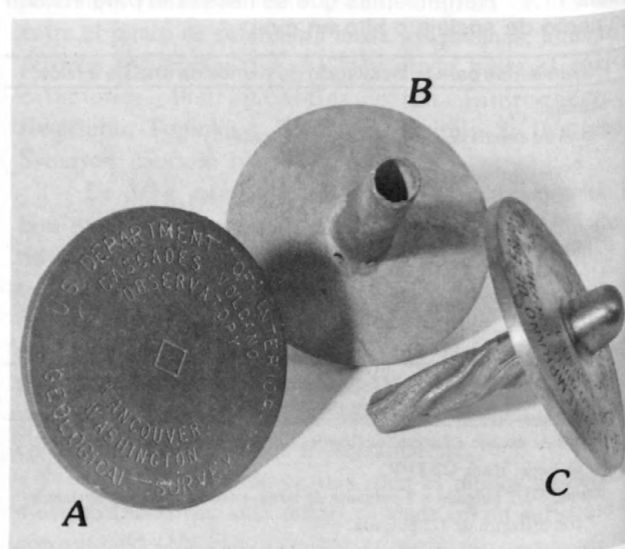


Los hitos principales usados en el CVO son de bronce y tienen una placa de aproximadamente 100 mm en diámetro y un tallo de aproximadamente 88 mm de longitud (fig. 11.5). Generalmente la parte superior del hito está grabada con una señalización y número de identificación, un procedimiento que no es posible con las instalaciones tipo perno. Los hitos usados para trabajos de EDM tienen una placa plana con una cruz en el centro, mientras que aquellos para nivelación de precisión y nivelación de un sitio tienen un pezón en el medio que sirve como un eje. Se han usado dos clases generales de tallos: un tallo sólido o hueco, redondo en sección transversal y un tallo sólido torcido y estriado. La forma torcida y estriada permite una mejor adherencia en concreto que aquellos con sección circular, una vez que se haya fraguado correctamente el concreto. Las herramientas que se necesitan para instalar los hitos de bronce en roca dura están enumeradas en la tabla 11.1.

Para instalar un hito de bronce en una roca dura, se selecciona una área relativamente plana en un afloramiento que no esté muy fracturada o con uniones ("jointed"). Se taladra un hueco de 100 mm, un poco más grande que el tallo. Se usa un tubo plástico para soplar el polvo del hueco y de las cercanías inmediatas. Cualquier pedazo de suelo o planta se saca del área alrededor del

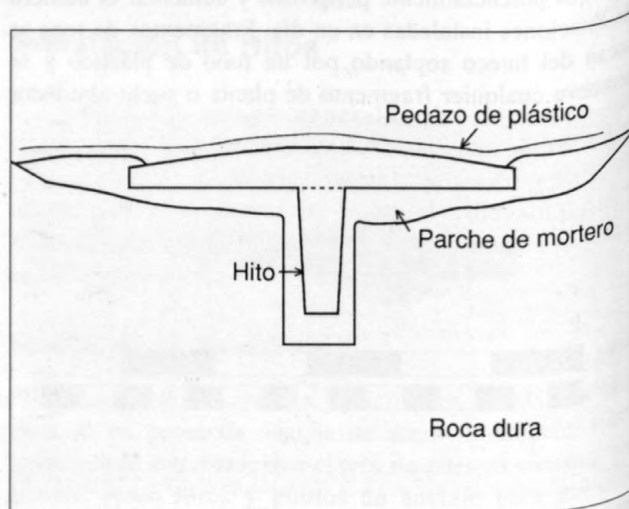


**Figura 11.4.** El perno de anclaje en sitio con un parche y plástico.



**Figura 11.5.** Clases de hitos. A, Hito para vigilancia con EDM con una superficie superior plana y con identificación; B, hito con tallo hueco; C, hito con pezón y tallo con estrías usado para redes de nivelación precisa.

huevo. Se coloca el hito en el huevo para comprobar si cabe correctamente y que el disco descansa justamente sobre la superficie de la roca. Se moja un poco la superficie en y alrededor del huevo para mejorar el agarre del mortero. Entonces se mezcla el mortero y se coloca en y alrededor del huevo. Si se usa un tallo hueco, se rellena el tallo y parte cóncava debajo del disco con mortero. Se coloca el hito en el huevo y se asienta firmemente en el mortero. Se puede añadir mortero alrededor del borde de la señal y cubrir un poco los bordes. El último paso, cuando se trabaja con el mortero, es cubrirlo con un pedazo de plástico o tela para ayudar



**Figura 11.6.** Hito instalado en roca dura.

**Tabla 11.2.** Herramientas que se necesitan para instalar un perno de anclaje o ensamblaje de varilla y construir mogotes en sustrato no consolidado.

Herramientas de campo para la instalación de un hito con un martillo a gasolina
Martillo a gasolina (24 kg)
Broca para martillo (3kg)
Cabeza enroscada
Gasolina
Prensa hidráulica
Quijada de prensa
Llave inglesa ajustable
Varilla de suelda de 2 m con diámetro de 1/2 a 1 pulgada, forrada en cobre y con rosca, con acoplamientos con rosca
Herramientas de campo para la instalación de pernos de anclaje, hitos y construcción de mogotes
Tres varillas de 2 m, con diámetro de 9-13 mm
Pala, trulla, mortero, gravilla y piedras
Pedazo de plástico, mortero (1 parte cemento, 3 partes arena limpia, 2 partes agua)
Herramientas de campo y equipo para hacer los montajes para los prismas
Cilindro (cortado, taladrado, encintado) 3 pulgadas de largo, 1 pulgada D.I., rosca 1/2-13NC
2 varillas de 2 m, diámetro de 15 mm
Barras, 1 1/2 pulgada x 8 pulgadas de largo, cuatro huecos con diámetro de 1/2 pulgada
Tornillos, hex drive, candado, 1/4 pulgada x 2 pulgadas de largo rosca 1/2-13NC
Llave inglesa, allen, 1/4 pulgada
Tuercas, 1/2-13NC, rodela

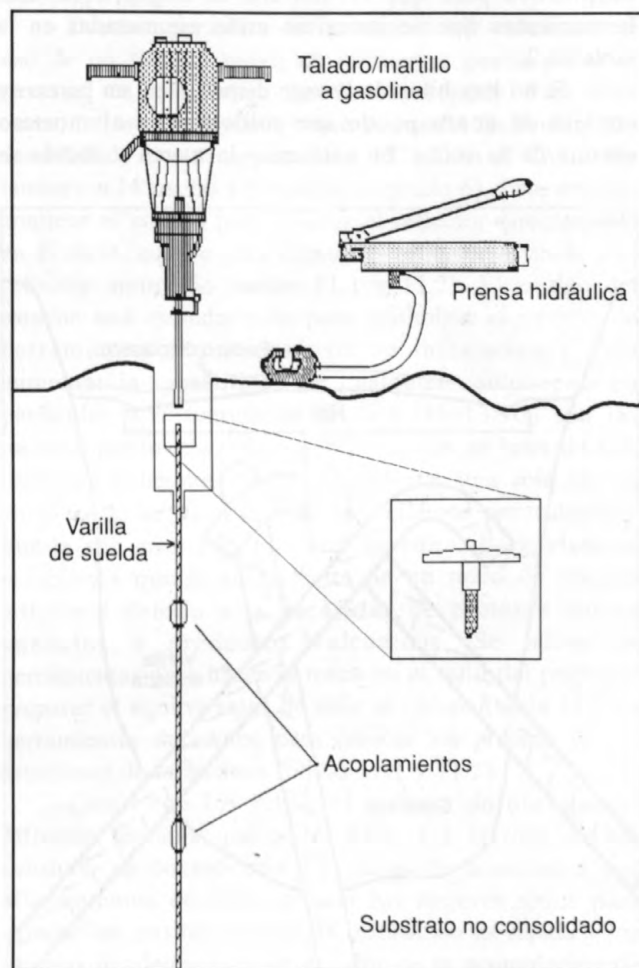
a que se frague lenta y correctamente. El hito puede ser usado inmediatamente como un punto de referencia de EDM, pero el concreto tiene que fraguarse por 12-24 horas antes que se pueda usar como hito para nivelación (fig. 11.6).

### Instalación en Substrato no Consolidado

Si no hay un afloramiento de roca disponible, se tiene que construir una fundación para el hito. En áreas donde se congela el suelo, la fundación tiene que llegar hasta debajo de la línea local de congelación para evitar un levantamiento por la congelación.

El método preferido para instalar un hito verticalmente estable en sustrato no consolidado es conectar el hito a una longitud de varilla que ha sido introducido lo máximo posible (hasta rechazo) en el fondo de un hueco somero (fig. 11.7). Esta instalación no servirá para trabajos de control horizontal si no se logra evitar el movimiento lateral de la señal poniendo un relleno alrededor de la misma. Varillas de dos metros en acero inoxidable o acero forrado en cobre son introducidos con un martillo/taladro a gasolina o una maceta. Para lograr un rechazo total hay que golpear con

el martillo por 25 a 30 segundos sin que se registre cualquier movimiento del hito. Si no se logra un rechazo total en los primeros 2 metros, se conecta una segunda varilla a la primera con un acoplamiento enroscado y a presión, y se sigue introduciendo. Se repite este procedimiento hasta lograr un rechazo total. Si se acaban las varillas o no se logra un rechazo total, el hito debe ser identificado como potencialmente inestable. En áreas con grandes espesores de tephra, la longitud de la varilla puede alcanzar 15-20 m. Una vez que se alcanza el rechazo, la parte expuesta de la varilla es cortada al largo deseado y se conecta un hito con tallo hueco con una prensa hidráulica. Dado el peso y tamaño de las herramientas que se necesitan para hacer este tipo de instalación el apoyo de un camión o helicóptero sería importante. En la tabla 11.2 están enumeradas las herramientas y materiales que se necesitan para este tipo

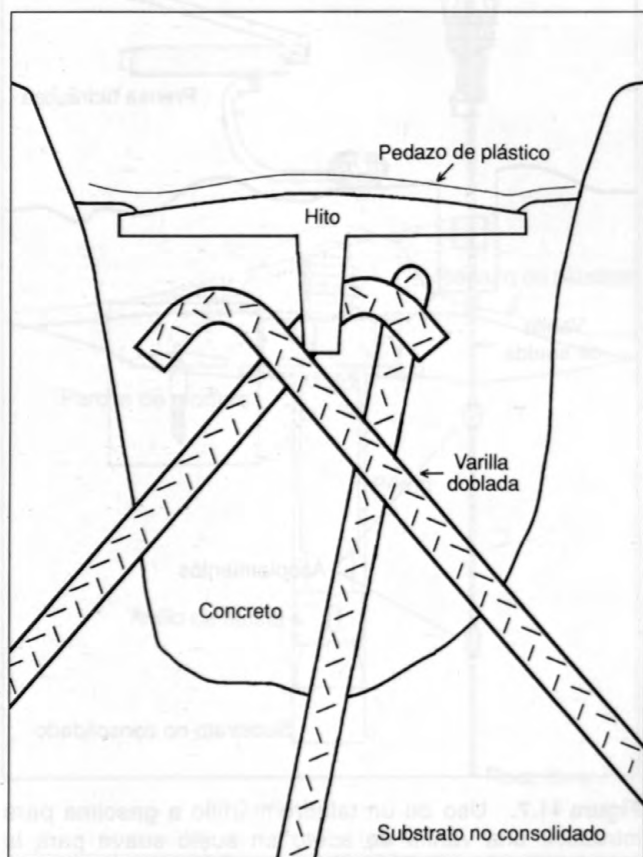


**Figura 11.7.** Uso de un taladro/martillo a gasolina para introducir una varilla de acero en suelo suave para la instalación de un hito. Un hito con tallo hueco es conectado a presión después que se haya alcanzado el rechazo.

de instalación, mientras que Floyd (1978) proporciona descripciones más detalladas de la metodología.

Se debe construir una fundación cuando no es práctico usar el método descrito anteriormente. Este método es más apropiado para áreas donde una congelación profunda no es un problema. Se cava un hueco de alrededor de .75 m de diámetro y 1 m de profundidad. Se introducen tres varillas de acero de 9- 13 mm de diámetro ( $\frac{3}{8}$  a  $\frac{1}{2}$  pulgada) y 2 m de largo hasta el fondo del hueco. Si se alcanza el rechazo antes que toda la varilla haya sido completamente introducida, se corta la varilla y se dobla hacia atrás en el hueco. Después se rellena el hueco hasta el nivel del suelo con capas de rocas cimentadas con mortero. Se pega mejor el mortero si se mojan primero las rocas. Se pone un parche de mortero encima de las rocas y se coloca el hito en el mortero mojado. Se puede poner más mortero alrededor del filo del hito para cubrir un poco el filo superior (fig. 11.8). El último paso es cubrir el parche con un pedazo de plástico para que el mortero se frague bien. Las herramientas que se necesitan están enumeradas en la tabla 11.2.

Si no hay hitos de bronce disponibles, un perno de anclaje de acero puede ser colocado en el mortero encima de la rocas. En este caso la tuerca y rodela se



**Figura 11.8.** Hito instalado en substrato no consolidado, demostrando la varilla doblada y rocas con mortero.

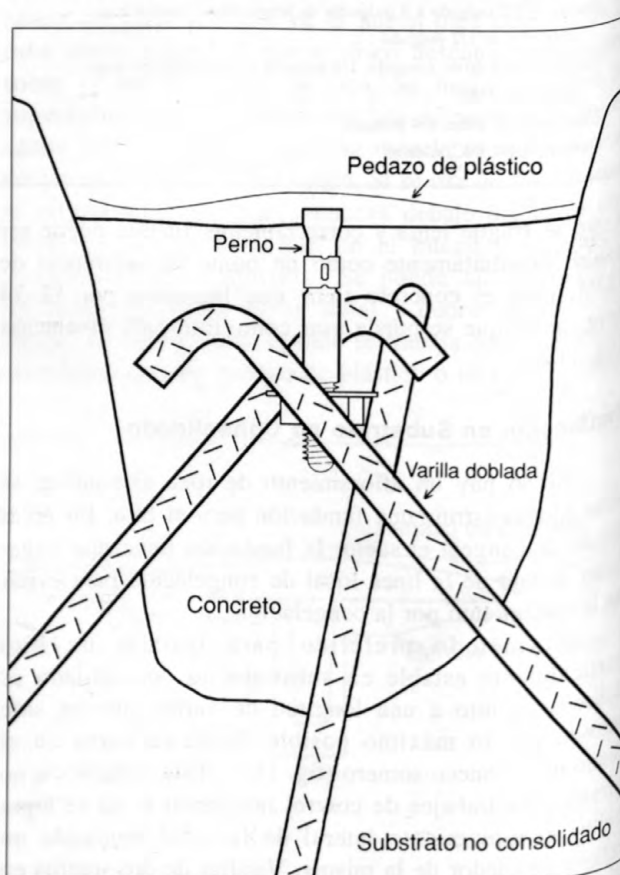
atornillan en el perno y este es colocado en el mortero al revés para maximizar su resistencia (fig 11.9).

## SISTEMA PARA CONECTAR PRISMAS

Una vigilancia de EDM confiable de volcanes activos requiere de una instalación de reflectores horizontalmente estables. Dependiendo de las limitaciones del tiempo, financiamiento, seguridad y acceso, puede ser más ventajoso colocar un reflector permanente en el volcán que mandar una cuadrilla de reflectores al flanco del volcán cada vez que se toman las medidas.

En el Mount St. Helens, los reflectores permanentes de EDM son montados en torres de acero de 3 m, en los flancos exteriores del volcán, para que estén sobre la nieve durante el invierno. Torres similares, localizadas en los flancos del volcán sirven como estaciones instrumentales donde se monta el EDM (Swanson y otros, 1981).

Estas torres pesan más de 200 kg y fueron colocadas por un helicóptero. Los sistemas trabajan bien para estudios largos (Iwatsubo, Topinka y Swanson,



**Figura 11.9.** Instalación de un perno de anclaje en una fundición con mortero. El perno de anclaje está instalado al revés para mayor estabilidad.



capítulo 8), pero su costo, tiempo de fabricación, y el apoyo logístico que se necesita para crear este tipo de red de estaciones no permite que sea usada para respuestas rápidas o de corto plazo. En otros volcanes en los Cascades se usa un sistema móvil de reflectores (Chadwick y otros, 1985; Iwatsubo y otros, 1988, Iwatsubo y Swanson, capítulo 10). El sistema móvil de reflectores se instala sobre un hito establecido en la estación para reflectores y consiste de un trípode, tribrach con plomada óptica o una varilla de centralización, sujetador de prismas y prisma(s) (fig. 11.10). Este sistema trabaja bien en los volcanes donde no se toman medidas frecuentemente y hay un helicóptero disponible (Iwatsubo y Swanson, capítulo 10). Una ventaja clara de usar un sistema móvil es que

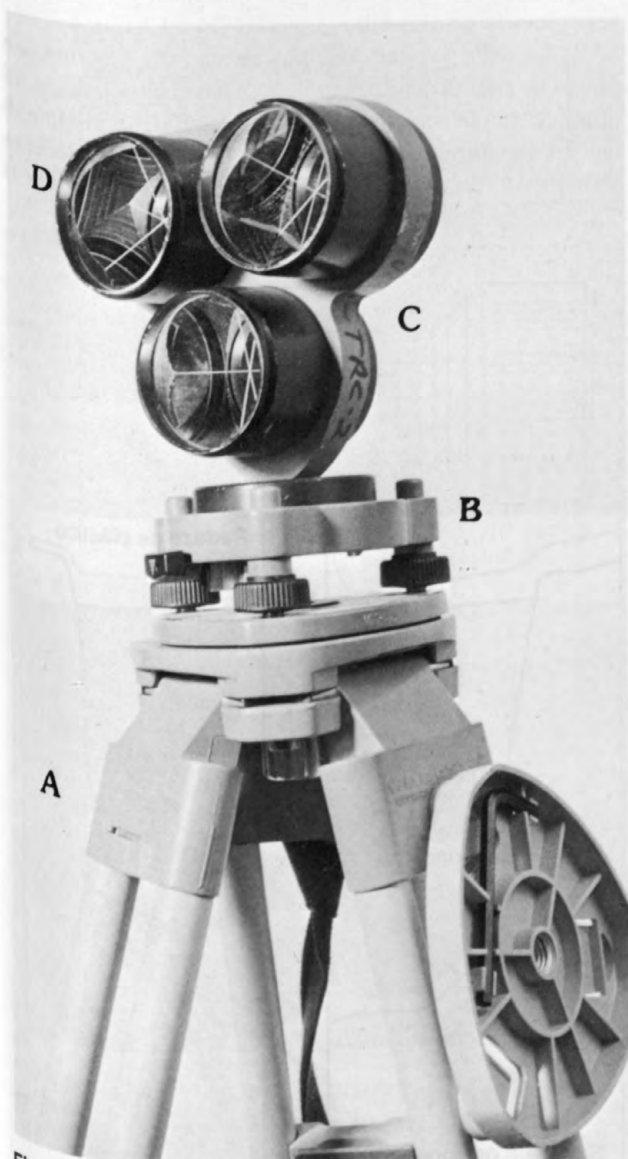


Figura 11.10. Típico sistema móvil de reflectores, incluyendo un (A) trípode, (B) tribrach, (C) tenedor de prisma y (D) prismas.

**Tabla 11.3.** Herramientas que se necesitan en el taller para preparar los prismas reflectores y ensamblajes para montura de prismas (cilindros y barras)

Equipo para roscar, mango
Elemento para roscar interiores, 1/2-13NC, para modificación de cilindros
Elemento para roscar con macho, 1/2-13NC, para modificaciones de prismas
Taladro, broca de 27/64 pulgada
Tornillo (torno) de banco
Sierra metálica
Taladro eléctrico, prensa taladradora

los datos de temperatura y presión pueden ser obtenidos en la estación con los reflectores por el personal que coloca los reflectores y así los datos de EDM pueden ser corregidos mejor para las condiciones ambientales. Sin embargo, el uso del sistema móvil consume mucho tiempo y requiere de más personal para montar y medir.

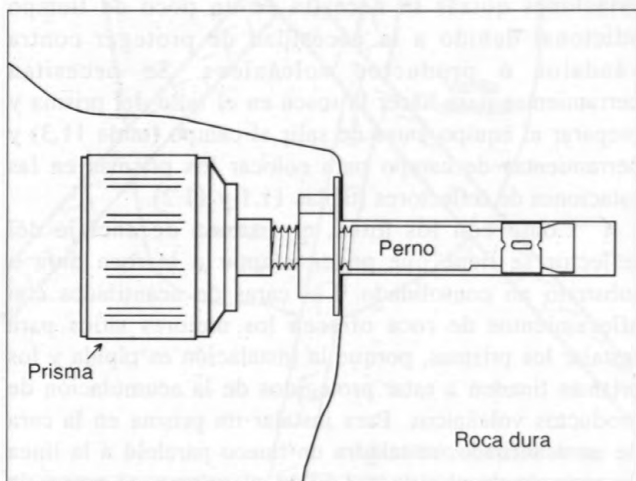
Durante períodos de intranquilidad volcánica, el uso de un sistema móvil de reflectores puede poner al personal en más riesgo que lo aconsejable. Para tales casos, un estuche liviano y que se instala fácilmente fue desarrollado por el personal del VCAT en el CVO (ver también a Iwatsubo y Swanson, capítulo 6). Este estuche contiene el equipo para colocar el reflector directamente en el suelo, equipo para montar el reflector al ancla y el reflector apropiado (tablas 11.1 y 11.2). El equipo del estuche está estandarizado para minimizar el número de herramientas requeridas para su instalación y para aumentar la versatilidad de cualquier componente en particular. Las tuercas de anclaje (1/2-13NC) son las mismas que se describieron en la sección de hitos de este capítulo. Generalmente hay que visitar una sola vez el sitio donde se va a instalar un reflector permanente y puede ser montado por una persona. Para algunas estaciones quizás se necesita de un poco de tiempo adicional debido a la necesidad de proteger contra vándalos o productos volcánicos. Se necesitan herramientas para hacer la rosca en el tallo del prisma y preparar el equipo antes de salir al campo (tabla 11.3) y herramientas de campo para colocar los prismas en las estaciones de reflectores (tablas 11.1 y 11.2).

Como con los hitos, el sistema de anclaje del reflector se tiene que poder adaptar a la roca dura o sustrato no consolidado. Las caras de acantilados con afloramientos de roca ofrecen los mejores sitios para instalar los prismas, porque la instalación es rápida y los prismas tienden a estar protegidos de la acumulación de productos volcánicos. Para instalar un prisma en la cara de un acantilado, se taladra un hueco paralelo a la línea de vista desde el sitio del EDM al prisma, el perno de anclaje se introduce y se asegura (fig. 11.11) y se monta el prisma o un marco para múltiples prismas. Las

herramientas que se necesitan para la instalación de un perno de anclaje están enumeradas en la tabla 11.1.

La idea general cuando se trabaja en sustrato no consolidado es asegurar en el piso una varilla a la cual se puede montar la envoltura de la montura y prisma (fig. 11.12). Para tal instalación es importante colocar el prisma por lo menos 50 cm sobre el nivel del suelo (preferiblemente el doble o más) para minimizar los efectos de refracción cerca a la superficie. Un cemento de piedra y mortero, similar a aquella descrita para los hitos en sustratos no consolidados, puede ser requerido para sujetar la varilla. La cantidad de esfuerzo que se invierte en las instalaciones en sustratos no consolidados dependerá hasta cierto punto de que tan grandes son los peligros en un sitio en particular y por cuanto tiempo se piensa vigilar el volcán. Por ejemplo, en el Mount St. Helens antes de la erupción de Mayo 18, 1980, los reflectores estaban meramente instalados en postes de verjas introducidos en el tephra (Swanson y otros, 1981). Las herramientas que se necesitan para instalar una varilla para reflectores en sustrato no consolidado están enumeradas en la tabla 11.2.

El sistema de montaje fue diseñado para poder usar el mismo equipo básico e intercambiable en cualquier sustrato. El equipo de montaje para los prismas para EDM consisten de piezas ampliamente disponibles y resistentes a la corrosión. Los prismas que usamos son cubos esquinados de vidrio sólido colocados en un estuche plástico. Estos tienen un tallo hueco, al cual se puede hacer una rosca para que acople a la rosca que usamos en nuestro sistema ( $\frac{1}{2}$ -13NC). Por lo tanto, un prisma puede ser colocado directamente a la parte enroscada del perno de anclaje en una instalación de roca dura (fig. 11.13A). Para instalar una estación con varios prismas se coloca sobre el perno una barra rectangular metálica, suficientemente larga para aguantar dos o tres

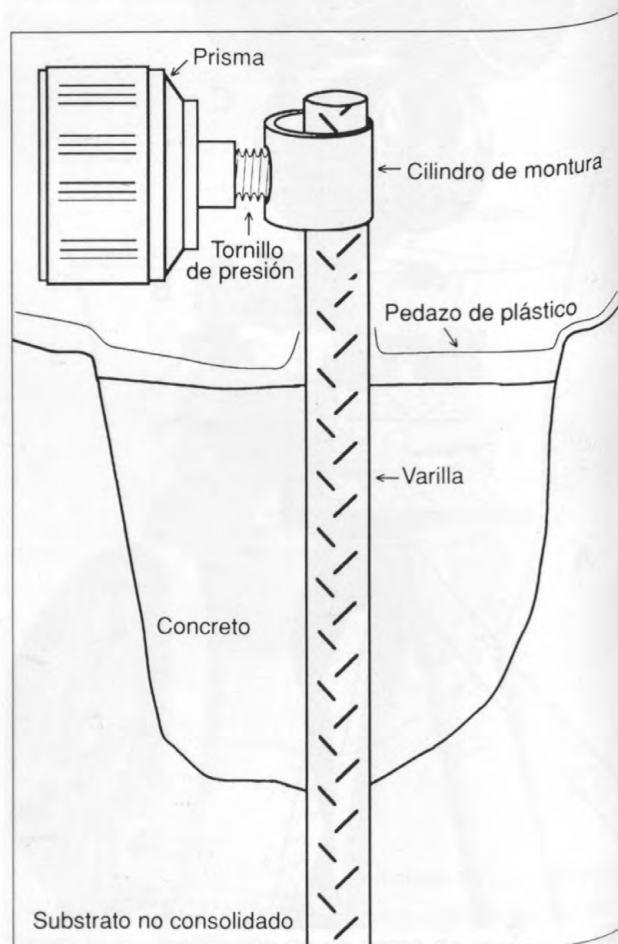


**Figura 11.11.** Perno de anclaje instalado en un acantilado vertical.

prismas y se colocan los prismas en la barra (fig. 11.13B) usando tornillos y tuercas (tabla 11.1). La barra metálica es de acero galvanizado o pintado de 25 mm x 6 mm con huecos equidistantes que han sido taladrados para acomodar los tornillos, a los cuales se atornillan los prismas. Otra barra puede ser colocada transversalmente para acomodar más prismas.

Se coloca y se sujeta una envoltura a la varilla de anclaje con una tornillo enroscado (fig. 11.13C, tabla 11.2). El tornillo se asegura con una tuerca. Las envolturas son secciones de tubo de acero con una dimensión exterior (DE) de 35 mm e interior (DI) de 25 mm (1.4 pulgada, DE, 1 pulgada DI) cortado en pedazos 75 mm de largo. Se taladran y se hacen roscas en los huecos del tamaño del tornillo ( $\frac{1}{2}$ -13NC) del sistema. Un prisma o barra metálica para múltiples prismas puede ser colocado en el tornillo (fig. 11.13C, 11.13D).

Se debe prestar bastante atención a la protección de la estación de vigilancia de la actividad volcánica, del clima y vandalismo, sin importar el tipo de sistema de anclaje-montura que se usa. Quizás, se pueda colocar en sitios con roca dura una cubierta para proteger la

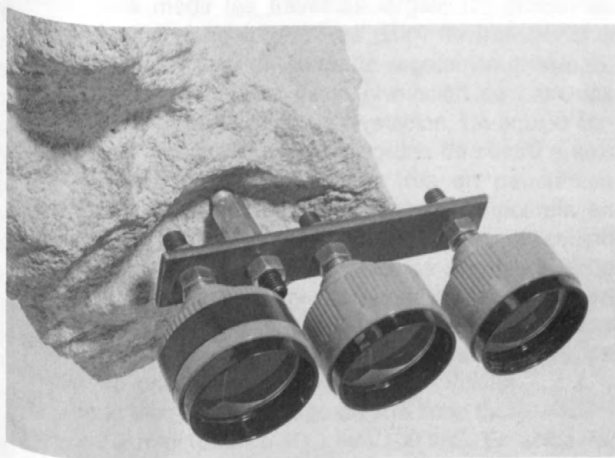


**Figura 11.12.** Cilindro de montura conectado a la varilla de anclaje instalada en terreno no consolidado.

estaciones (fig. 11.11, 11.14). Se puede construir una protección artificial, taladrando huecos en la roca, colocando varillas en ellos y usar mortero o roca para construir un techo sobre el prisma, o en terrenos planos o poco inclinados se puede colocar un mogote de roca o concreto (fig. 11.14, tabla 11.2). Este mogote debe ser construido alrededor de la varilla o ancla que está alrededor del prisma. Algunas veces es difícil evitar vandalismo. Uno podría sacar los prismas durante períodos de tranquilidad o poner un camuflaje alrededor de la estación.



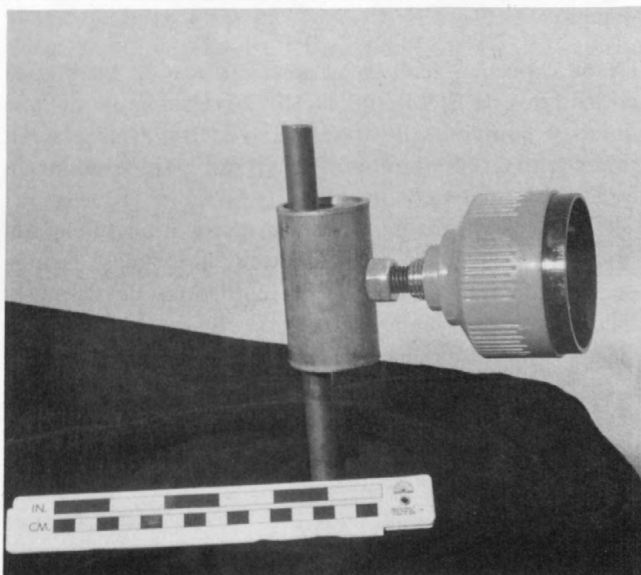
A



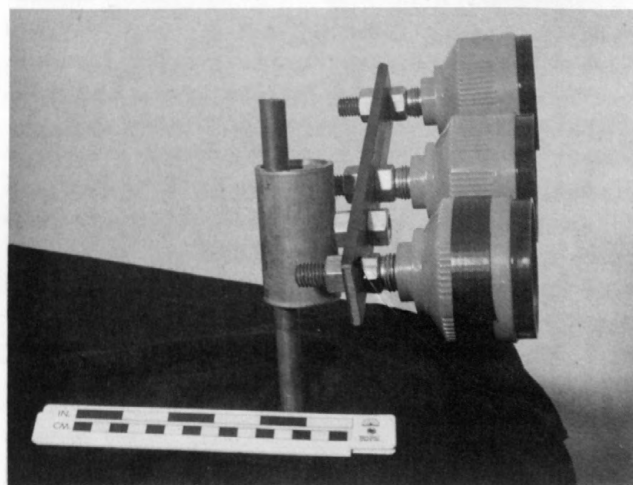
B

## EVALUACION DE LA ESTABILIDAD DE LOS HITOS

La estabilidad de un hito debe ser continuamente evaluada después de su instalación. Un movimiento estacional del suelo alrededor del hito puede dar una impresión falsa de una deformación relacionada a volcanismo. Algún método para evaluar la estabilidad de los hitos debe ser incorporado a las redes de deformación. Los visuales de espalda, líneas medidas hacia afuera del volcán a áreas presumiblemente más



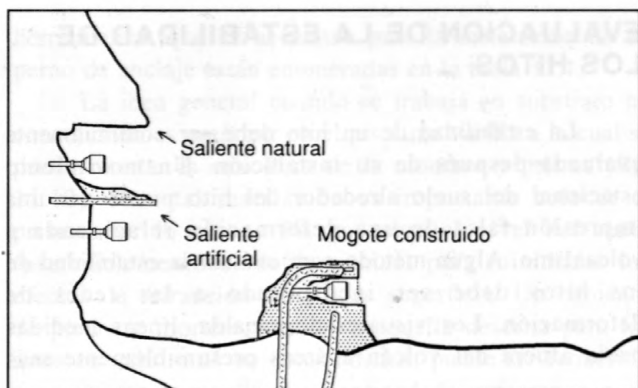
C



D

**Figura 11.13.** Ensamblajes sencillos y de múltiples prismas. A, Prisma sencillo en una estación de roca. B, Ensamblaje de múltiples prismas en una estación de roca. C, Prisma sencillo en terreno no consolidado. D, Ensamblaje de múltiples prismas en terreno no consolidado.





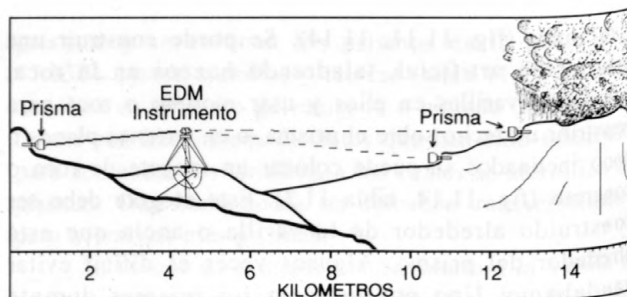
**Figura 11.14.** Tres clases de esquemas para proteger el prisma.

estables, pueden ser usadas para verificar la estabilidad de los hitos de EDM (fig. 11.15). Nivelación de montaje único y conjuntos de nivelación de travesías pueden tener hitos redundantes que sirvan para evaluar la estabilidad relativa de los hitos.

La instalación de reflectores puede estar sujeta a la inestabilidad causada por efectos ambientales. Hemos encontrado que una selección cuidadosa del sitio, la incorporación de tanta redundancia como sea práctica en las redes de deformación y la medición de las redes lo más frecuente posible son las mejores maneras de eliminar incertidumbres en lo que se está midiendo.

## REFERENCIAS CITADAS

Banks, N.G., Tilling, R.I., Harlow, D.H., and Ewert, J.W., 1989, Volcano monitoring and short-term forecasts, *en* Tilling, R.I., ed., Volcano hazards: Washington D.C., American



**Figura 11.15.** Posición relativa de la estación de EDM con reflector en la estación mira hacia atrás (izquierda).

Geophysical Union, Short Course in Geology, volume 1, p. 26-80.

Chadwick, W.W., Jr., Iwatsubo, E.Y., Swanson, D.A., and Ewert, J.W., 1985, Measurement of slope distances and vertical angles at Mount Baker and Mount Rainier, Washington, Mount Hood and Crater Lake, Oregon, and Lassen Peak, California, 1980-1984, U.S. Geological Survey Open-File Report 85-205, 96 p.

Floyd, R.P., 1978, Geodetic bench marks: National Oceanic and Atmospheric Administration Manual NOS NGS 1, 52 p.

Iwatsubo, E.Y., Topinka, L., and Swanson, D.A., 1988, Measurements of slope distances and zenith angles at Newberry and South Sister Volcanoes, Oregon, 1985-1986: U.S. Geological Survey Open-File Report 88-377, 51 p.

Swanson, D.A., Lipman, P.W., Moore, J.G., Heliker, C.C., and Yamashita, K.M., 1981, Geodetic monitoring after the May 18 eruption, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.R., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 157-168.

Sylvester, A.G., 1985, Shortcomings of monitoring volcano deformation by dry tilt surveying [abs]: Eos, v. 66, no. 46, p. 854.

# 12. Nivelación Geodésica como Herramienta para Estudiar Volcanes Intranquilos

Por Daniel Dzurisin

## Abstracto

Aunque pendientes fuertes, acceso difícil, condiciones peligrosas, y personal limitado muchas veces desaniman a los vulcanólogos hacer campañas de nivelación geodésica en volcanes intranquilos, la nivelación tiene varias ventajas, incluyendo: (1) mayor precisión para desplazamientos verticales que virtualmente cualquier otro método que mide distancias horizontales de por lo menos 100 km; (2) aplicaciones que van desde nivelación de montaje unico travesías cortas diseñadas para medir la inclinación del suelo local y travesías largas para medir desplazamientos verticales sobre amplias áreas; (3) suficiente redundancia lograda con procedimientos de campo y un gran número de hitos a lo largo de una travesía típica para virtualmente eliminar errores de medidas e hitos inestables como fuentes incertidumbre; (4) procedimientos bien establecidos, equipo relativamente económico, procesamiento directo de datos (5) la utilización de datos de desplazamiento vertical como base para modelos numéricos de la fuente de deformación. Algunas de las desventajas son (1) la necesidad de muchas personas para medir las travesías largas; (2) problemas logísticos debido al equipo que es difícil de transportar a volcanes remotos y usar en áreas de vegetación densa; (3) el paso relativamente lento de la nivelación de travesías comparado con otras técnicas de nivelación. Un equipo con experiencia en nivelación de primer orden de cuatro a seis personas puede medir 3-6 km por día en pendientes promedios de 10 grados o menos, o 1-2 km por día en pendientes de 10-30 grados. Alternativamente, un equipo de nivelación puede medir varias travesías cortas o más de una docena de conjuntos de nivelación de montaje unico en un día. La desviación estándar de desplazamientos verticales determinadas de campañas sucesivas de nivelación de primer orden clase II es  $1 \text{ mm/km}^{1/2} \times L^{1/2}$ , donde L es la distancia a lo largo de una línea de nivelación (que es,  $\pm 3.2 \text{ mm/10 km}$  o  $10.0 \text{ mm/100 km}$ ). En volcanes de composición máfica, en los flancos inferiores de estratovolcanes, en grandes calderas y en terrenos entre volcanes a lo largo de arcos volcánicos, travesías de nivelación largas pueden proporcionar información importante sobre deformación de suelo a gran escala. En virtualmente cualquier terreno y particularmente durante emergencias volcánicas, travesías cortas son herramientas

útiles para determinar rápidamente tasas de deformación a corto plazo.

## INTRODUCCION

### Alcance

La nivelación geodésica es una técnica vieja usada para medir las diferencias de elevación entre hitos sucesivos y, mediante campañas repetidas, para medir cambios de elevación (desplazamiento vertical) en función de tiempo. La nivelación ha sido usada como un sistema de medida geodésica por más de un siglo (Vanícek y otros, 1980), y ha mostrado su utilidad en varios volcanes activos (por ejemplo, Wilson, 1935; Mogi, 1958). Sin embargo, innovaciones recientes en geodesia de precisión esconden algunas veces las ventajas considerables y duraderas de la nivelación como una herramienta para la vigilancia volcánica, hasta el punto que la nivelación es pasado por alto en situaciones donde podría hacer una contribución única.

Los objetivos de este capítulo son (1) discutir las ventajas y desventajas de la nivelación en volcanes intranquilos, (2) desechar algunas de las concepciones equivocadas sobre la posibilidad de nivelar en terrenos volcánicos, (3) ilustrar la utilidad de campañas de nivelación mediante dos ejemplos, (4) incitar a vulcanólogos a considerar la nivelación como un elemento principal de cualquier programa de vigilancia volcánica. El capítulo complementario por Yamashita y Kaiser (capítulo 13) describe los procedimientos y equipos usados para campañas de nivelación de primer orden, clase II. Los estándares y especificaciones detallados de campañas de nivelación para varios órdenes y clases están descritos en manuales publicados por el Servicio Geodésico Nacional (Schomaker y Berry, 1981) y Federal Geodetic Control Committee (1974, 1975, 1984).

## Terminología

Para la nivelación geodésica convencional, se usa un nivel de burbuja (de aire) u otra clase de instrumento de nivelación (la mayoría de los niveles son autoniveladores y no incluyen un nivel de aire) y un par de miras de nivelación graduadas (típicamente 3 m de largo, graduadas cada 0.5 ó 1.0 cm) para medir la diferencia de elevación entre hitos permanentes mediante la acumulación de diferencias de elevación entre una serie de puntos temporales de giro. El punto de giro hacia el frente (relativo a la dirección de la travesía) se llama visual de frente y el punto de giro hacia atrás se llama visual de espalda. Típicamente, hay 1–3 km entre los hitos y 20–100 m entre los puntos de giro (dependiendo de la inclinación del terreno). Puntos de giros adyacentes limitan un montaje e hitos adyacentes una sección; medidas de una serie de secciones constituye un levantamiento.

Los trabajos de nivelación pueden servir dos propósitos diferentes, aunque complementarios. Las travesías largas (típicamente de 10 km o más) miden desplazamientos verticales casi absolutos en relación con un hito distante o un grupo de hitos que se asumen ser estables. Las travesías cortas (típicamente 1 km o menos) miden desplazamientos verticales relativos entre un grupo pequeño de hitos, normalmente con el propósito de determinar la inclinación del suelo local. La nivelación de montaje único es un caso especial en el cual los desplazamientos verticales relativos dentro de un pequeño grupo de hitos son medidos desde un solo arreglo instrumental para determinar la inclinación del suelo local (particularmente útil cuando las tasas de deformación son altas o el tiempo para realizar las medidas es muy limitado) (Yamashita, 1981; capítulo 14). Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y desventajas, las que determinan cual es el más apropiado para una aplicación específica, como se discute a continuación. Una estrategia efectiva es medir periódicamente segmentos cortos de una travesía larga y sólo medir la travesía completa cuando se observan cambios significativos.

## VENTAJAS DE NIVELACION GEODESICA

### Precisión

A pesar de los avances recientes en levantamientos por satélite y otros métodos modernos, la nivelación convencional sigue siendo la técnica más exacta disponible para medir desplazamientos verticales sobre distancias horizontales de hasta por lo menos 100 km. Tales dimensiones son de interés especial en vulcanología, porque pueden ser aplicadas a la mayoría de los procesos que

afectan volcanes activos (excepto tectónica de placas y otros procesos tectónicos regionales). Por lo tanto, si no hay una razón compulsoria para escoger otro método (como seguridad o logística), la nivelación es la técnica preferida para medir desplazamientos verticales en volcanes intranquilos.

A diferencia de nuevas técnicas para las cuales todavía se están evaluando las incertidumbres, la exactitud empírica de las campañas de nivelación ha sido bien establecida durante décadas de levantamientos y su comparación con otros métodos. Los errores de nivelación generalmente están clasificados como desatinos, errores sistemáticos y errores al azar. Desatinos (errores grandes de lectura, movimiento de la mira durante una medición, errores de registro) son fáciles de detectar, particularmente en campañas que se realizan con corridas dobles con varillas de escala doble (Vanícek y otros, 1980).

El error sistemático es proporcional a la distancia, elevación y gradiente de elevación. Ciertos tipos de errores sistemáticos, como aquellos asociados con el ajuste del instrumento, pueden ser virtualmente eliminados mediante el seguimiento estricto de los procedimientos de campo prescritos. Mientras otros errores, como en la longitud de la mira, pueden ser fuertemente controlados mediante una combinación de procedimientos de campo y laboratorio, incluyendo calibración frecuente con un estándar no variante (calibraciones disponibles en la Oficina Nacional de Estándares de los EE.UU.). Dos clases de errores sistemáticos han recibido considerable atención recientemente, el error de refracción (Strange, 1981; Stein, 1981; Holdahl, 1982) y el error magnético (Rumpf y Meurisch, 1981; Packard y MacNeil, 1983). El error de refracción puede ser corregido usando datos de gradiente-temperatura recolectados durante la campaña de nivelación o estimados de modelos climáticos. El error magnético afecta solamente los instrumentos autoniveladores, y puede variar entre instrumentos o en función del tiempo con un instrumento. Puede ser eliminado mediante la instalación de un protector magnético (disponible opcionalmente del fabricante).

El error al azar es introducido por observaciones inexactas, imperfecciones no sistemáticas en el equipo, y eternas incertidumbres en cuanto a las condiciones atmosféricas. El error al azar generalmente puede ser reducido mediante redundancia, como aquella que se logra mediante corridas dobles y con el uso de miras de escala doble (Vanícek y otros, 1980).

La desviación estándar de una diferencia de elevación observada (OED-Observed elevation difference) atribuida al error al azar está dada por

$$\sigma(h) = \sigma_0 L^{1/2}$$

donde  $\sigma(h)$  es una desviación estándar en la OED entre dos puntos cualquiera,  $\sigma_0$  es un constante para cada tipo (orden y clase) de campaña de nivelación, y  $L$  es la



distancia de la travesía de nivelación. Actualmente el valor de  $\sigma_0$  es 0.7 mm/km<sup>1/2</sup> para levantamientos de primer orden, clase II, 1.3 mm/km<sup>1/2</sup> para levantamientos de segundo orden, clase II y 2.0 mm/km<sup>1/2</sup> para levantamientos de tercer orden (Vanícek y otros, 1980).

Para segmentos corridos dos veces, un estimado de  $\sigma_0$  puede ser obtenido de las discrepancias entre medidas de OED hacia adelante y hacia atrás usando

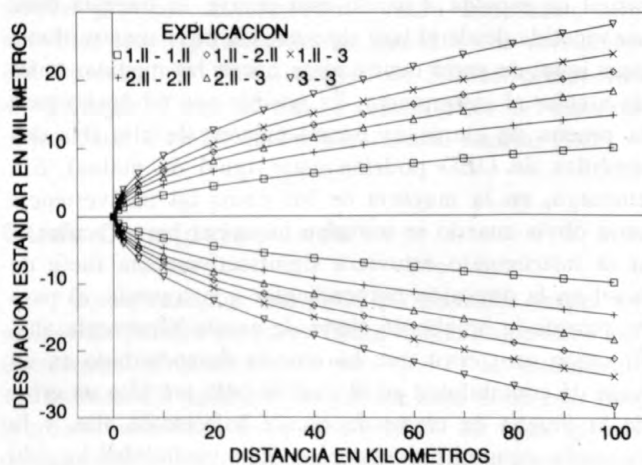
$$\sigma_0^2 = \frac{1}{2m} \sum_{i=0}^m \frac{\delta h_i^2}{l_i}$$

donde  $m$  es el número de segmentos corridos dos veces,  $h_i$  es la discrepancia entre las medidas de OED hacia delante y hacia atrás para la sección  $i$ , y  $l_i$  es la longitud de la sección  $i$  (Pelton y Smith, 1982). La precisión empírica de cualquier levantamiento de nivelación puede ser estimada midiendo dos veces un número representativo de secciones y computando  $\sigma_0$  de la ecuación de arriba. Si el valor computado excede el estándar deseado, se deben revisar los procedimientos de campo y repetir el levantamiento. La experiencia del Servicio Geológico de los Estados Unidos y el Servicio Geodésico Nacional demuestra que los errores al azar asociados con la nivelación geodésica (por lo tanto, el valor de  $\sigma_0$ ) son funciones del orden, año y la naturaleza del levantamiento. Por ejemplo, procedimientos de nivelación de primer orden en los Estados Unidos actualmente son tales que  $L$  es dada en kilómetros, la desviación estándar en la OED entre dos marcas cualquiera para levantamientos de clase 1 y clase 2 es alrededor de 0.5 mmL<sup>1/2</sup>, respectivamente. Sin embargo, la experiencia demuestra que, en general la desviación estándar para una nivelación de primer orden (clase 1 o clase 2) fue alrededor de 2.5 mmL<sup>1/2</sup> antes de 1901, alrededor de 2.0 mmL<sup>1/2</sup> durante el período 1917–1955, y alrededor de 1.5 mmL<sup>1/2</sup> durante el período 1956–1974 (Vanícek y otros, 1980). En la práctica, la desviación estándar también depende de la naturaleza del levantamiento; eso es, levantamientos en terrenos montañosos tienen una desviación estándar más grande que aquellos en terrenos más planos, parcialmente porque se requieren de más montajes para atravesar la misma distancia en terrenos pendientes y, por lo tanto, el error al azar se acumula más rápido. El mejor método es medir  $\sigma_0$  empíricamente midiendo dos veces un número representativo de secciones y usar la ecuación para  $\sigma_0$  dada arriba. Para levantamientos que son medidos íntegramente una sola vez, los valores para  $\sigma_0$  tales como los que están citados arriba deben ser considerados como los límites inferiores de las desviaciones estándares probables en la mayoría de los casos.

La desviación estándar de un desplazamiento vertical (cambio en la OED entre puntos) medida entre

dos levantamientos cualesquiera,  $\sigma(\delta h)$ , es igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones para cada levantamiento. La desviación estándar de velocidad vertical correspondiente,  $\sigma(V)$ , es igual la  $\sigma(\delta h)$  dividida por el intervalo de tiempo entre los levantamientos (Pelton y Smith, 1982).

La figura 12.1 muestra el error al azar de desplazamientos verticales determinado de levantamientos contemporáneos de varios órdenes y clases como función de la distancia a lo largo de una ruta de nivelación. La desviación estándar de un desplazamiento vertical entre dos hitos con separación de 1 km es 1.0 mm si se determina de levantamientos sucesivos de primer orden, clase II, 1.8 mm para levantamientos de segundo orden, clase II, y 2.8 mm para levantamientos de primer orden. Los valores correspondientes son 3.2 mm, 5.8 mm, y 8.9 mm para una separación de 10 km; y 10.0 mm, 18.4 mm y 28.3 mm para una separación de 100 km. Para levantamientos sucesivos de primer orden, clase II, esto corresponde a una precisión de  $1.0 \times 10^{-6}$ ,  $3.2 \times 10^{-7}$  y  $1.0 \times 10^{-7}$  sobre distancias de 1 km, 10 km y 100 km, respectivamente. Comparativamente, la desviación estándar de observaciones repetidas de GPS sobre distancias de hasta 11 km es  $4-6 \times 10^{-7}$  (horizontal) y  $1-2 \times 10^{-6}$  (vertical). La desviación estándar de medidas de GPS solo aumenta lentamente con distancia, tal que a 225 km la precisión aumenta a  $3-5 \times 10^{-8}$  (horizontal) y  $2 \times 10^{-7}$  (vertical) (Prescott y otros, 1989).



**Figura 12.1.** La desviación estándar de desplazamientos verticales medidos por parejas de levantamientos geodésicos de varios órdenes y clases como función de distancia. La explicación indica las clases de levantamientos para cada pareja: 1.II-1.II refiere a sucesivos levantamientos de primer orden, clase II; 1.II-2.II refiere a un levantamiento de primer orden, clase II y un levantamiento de segundo orden, clase II, etc. Los estándares para varias clases de levantamientos se tomaron de la tabla 1 de Vanícek y otros (1980).

## Redundancia

Otra ventaja de nivelación es la redundancia incorporada que sirve para minimizar las dos fuentes de incertidumbre que atormentan las otras técnicas. La primera fuente comprende las equivocaciones en las mediciones, que como se observó arriba, son fáciles de detectar y virtualmente se pueden eliminar con una estricta adherencia a los procedimientos establecidos. Cuando se usan miras de escalas dobles, las diferencias de elevación entre visuales de frente y de espalda se miden dos veces en cada montaje. Aunque el procedimiento para hacer las lecturas depende del tipo de instrumento que se usa, el concepto es igual. La secuencia de lecturas (visuales de espalda de pequeña escala, visuales de frente de pequeña escala, visual de frente de gran escala y visual de espalda de gran escala) incluye la verificación del cierre de la estabilidad del punto de giro y del instrumento (eso es, la diferencia entre medidas de OED de pequeña escala y gran escala en cada montaje debe ser menor que un valor específico: 0.30 mm para levantamientos de primer orden, clase II).

Nuestra experiencia con este sistema durante los últimos siete años nos ha indicado que las equivocaciones casi nunca pasan desapercibidas. La equivocación mas común es el movimiento de la mira para el visual de frente, normalmente por viento, después que la mira para el visual de espalda e instrumento de nivelación hayan sido movidos al próximo punto pero antes de que la mira movida haya sido medida como visual de espalda. Cuando esto ocurre, la travesía debe ser repetida desde el hito anterior. Un error menos obvio, pero igual de serio ocurre si se hacen las medidas antes de nivelar el instrumento. Es posible que tal hecho pase la prueba de cierre de escala baja/escala alta (las dos medidas de OED podrían estar igual de malas). Sin embargo, en la mayoría de los casos tal inadvertencia sería obvia cuando se mirarían las miras por el ocular, o si el instrumento estuviera significativamente fuera de nivel en la dirección perpendicular a la travesía, el paso no pasaría la prueba de cierre de escala baja/escala alta. El único otro error que ha pasado desapercibido es un error de contabilidad en el cual se pasa por alto un error de la prueba de cierre de escala baja/escala alta, y la campaña sigue al próximo paso. Esta posibilidad ha sido prácticamente eliminada mediante la programación de un aparato de grabación para que emita un tono audible y un mensaje de texto cuando no se cumple con el criterio de cierre de escala baja/escala alta (Yamashita, 1989).

Una segunda fuente de incertidumbre que virtualmente está eliminado por la redundancia en la nivelación geodésica es la inestabilidad de los hitos. Excepto para conjuntos de montajes únicos, la mayoría de las redes de nivelación incluyen un gran número de hitos con espaciamiento relativamente pequeño, por lo

tanto el movimiento anómalo de un hito estable generalmente puede ser reconocido y descontado. Este punto se discute a continuación. En casos raros, el movimiento de un solo hito puede indicar un movimiento real del terreno (como fallamiento local), por lo tanto es importante considerar el contexto geológico de cada señal antes de descontar sus movimientos como anómalos.

Aunque se pueden reconocer los hitos inestables, es importante que las instalaciones sean de la más alta calidad posible para asegurar resultados confiables. Esto es particularmente importante para travesías con un pequeño número de marcas, y para cualquier tipo de levantamiento en terrenos pendientes o inestables. El Servicio Geodésico Nacional clasifica y proporciona especificaciones para varias clases de instalaciones de hitos (Floyd, 1978; Federal Geodetic Control Committee, 1974, 1975, 1984). Es imperativo que si uno no tiene experiencia, lea cuidadosamente estas publicaciones antes de colocar los hitos. La práctica normal es colocar, a intervalos de 1- a 3-km, hitos en roca, estructuras estables hechas por el hombre (preferiblemente con la base en roca), y postes de concreto, o asegurar los hitos a postes que han sido enterrados lo más profundo posible (o hasta a un estrato estable) con un martillo perforador o maza. A veces se usan peñones grandes enterrados y fundiciones sin base sobre rocas duras, pero cada travesía también debe incluir un número adecuado de hitos de alta calidad en roca dura o señales de varillas (preferiblemente una cada 5 km para travesías largas, y una en cada esquina de una travesía corta o conjuntos de montaje único).

## Oportunismo

Una tercera ventaja de la nivelación sobre técnicas más sofisticadas como GPS, es que la nivelación proporciona resultados oportunos que pueden ser interpretados inmediatamente en el campo e incorporados para el asesoramiento de los peligros volcánicos. Para maximizar la exactitud de las observaciones de nivelación, es necesario hacer una serie de correcciones que requieren de una computadora (Balazs y Young, 1982; Yamashita y Kaiser, capítulo 13), pero para la mayoría de las aplicaciones en vigilancia volcánica, estas correcciones son pequeñas en comparación con la señal de deformación. Por ejemplo, la corrección total más grande que se ha hecho a lo largo de una travesía de nivelación de 43 km en la caldera de Yellowstone, que ha sido medida anualmente desde 1983, es típicamente 2-3 mm, mientras que la señal tiene un promedio de 20-30 mm. En un caso más severo a lo largo de una vuelta de nivelación de 193 km en el volcán Medicine Lake, que incluía más de 600 m de diferencia en

elevación y condiciones atmosféricas que producían grandes correcciones por refracción, la corrección total fue de 43 mm, comparada con el error de cierre de 19 mm y una subsidencia máxima de  $389 \pm 43$  mm desde 1954 hasta 1989. Por lo tanto, excepto en terrenos con mucha pendiente o bajo condiciones atmosféricas extremas, las correcciones observadas en desplazamientos verticales sobre distancias de 1–100 km pueden ser ignoradas para las evaluaciones preliminares de peligro volcánico.

## DESVENTAJAS DE NIVELACION (REALES Y PERCIBIDAS)

La nivelación geodésica, especialmente de travesías largas, es comúnmente usada para evaluar la intranquilidad volcánica en el mundo entero (Newhall y Dzurisin, 1988). En parte esto se puede deber a un concepto erróneo sobre la posibilidad de nivelar en terrenos volcánicos. Admisiblemente, travesías largas requieren esfuerzos de varias personas por un período extendido. Una cuadrilla típica de cuatro a seis personas (jefe de cuadrilla, dos portamiras, un registrador y hasta dos personas para dirigir el tránsito) promedia 1–6 km de nivelación de primer orden por día, dependiendo del terreno. Solo el jefe de la cuadrilla tiene que tener experiencia; los otros miembros de la cuadrilla requieren solo unas pocas horas de entrenamiento para ser efectivos. Esto es un compromiso sustancial, pero debe ser considerada conjuntamente con la precisión y cobertura lograda mediante unas travesías largas. Si hay poco personal o en tiempos de rápida deformación o aumento de la peligrosidad, travesías cortas o conjuntos de montaje único son alternativas razonables a las travesías largas. Esto es especialmente cierto cuando la deformación es tan rápida que no se puede obtener un cierre en travesías largas.

Otra desventaja de la nivelación es el acceso limitado en la mayoría de los volcanes activos del mundo: una carretera a la cumbre de un volcán intranquilo es un lujo poco común. Sin embargo, se puede nivelar a lo largo de senderos o a través de campos abiertos si el equipo puede ser transportado a la vecindad del volcán. Cuando no hay carreteras o senderos, la vegetación densa puede ser un obstáculo grave, particularmente en volcanes en el trópico o subtropical. El apoyo de helicópteros es una gran ventaja siempre y cuando las miras puedan ser transportadas con seguridad. Hasta en lugares remotos con vegetación densa y sin acceso de carreteras, travesías cortas o conjuntos de montaje único normalmente ofrecen alternativas viables a travesías largas.

El tiempo es otra consideración que muchas veces pesa contra travesías largas en volcanes intranquilos. Las

travesías largas son maratónicas y requieren resistencia, mientras que las travesías cortas son como carreras cortas y rápidas que están caracterizadas por velocidad. ¡Es cierto que una cuadrilla de nivelación puede medir varias travesías cortas o hasta 15–20 conjuntos de montaje único en un día, pero también es verdad que a la misma cuadrilla le puede tomar una o dos semanas dar la vuelta completa alrededor o sobre el volcán!

Como ejemplo, dos cuadrillas del Observatorio Vulcanológico de los Cascades (CVO-Cascades Volcano Observatory), cada uno comprendiendo un jefe de cuadrilla experimentado y cuatro personas adicionales (algunos sin experiencia previa), midieron una travesía de nivelación de 193 km en el Volcán Medicine Lake al norte de California a estándares de primer orden, clase II en nueve cuadrillas-semanas durante Julio-Agosto, 1989 a una tasa de 3.5 km/día de trabajo/cuadrilla. La mayoría de la ruta es sobre carreteras pendientes no pavimentadas, con más de 600 m de ganancia o pérdida de elevación. En la caldera Yellowstone, donde la topografía es relativamente plana, las cuadrillas del CVO promedian unos 5 km/día/cuadrilla, y la línea de 43 km a través de la caldera puede ser medida por una cuadrilla en menos de 10 días. Hasta en pendientes fuertes de estratovolcanes como Pacaya y Fuego en Guatemala, una cuadrilla de nivelación puede cubrir alrededor de 1 km/día (J. Marso y J.W. Ewert, comun. escrita, 1989). Cuando la precisión es un requisito menos importante que velocidad, levantamientos de segundo orden pueden ser una buena opción. En el volcán Kilauea en Hawaii, donde grandes movimientos están asociados con actividad eruptiva frecuente, las cuadrillas de nivelación del Observatorio Vulcanológico de Hawaii promedian alrededor de 7 km/día para levantamientos de segundo orden, clase II (K.M. Yamashita, comun. escrita, 1989).

## Otras Consideraciones

Como cualquier maratón, las travesías largas de nivelación pueden provocar fatiga humana que debe ser correctamente administrada para que el levantamiento sea exitoso. La fatiga no solamente baja el ánimo, sino también aumenta la probabilidad de que pasen desapercibidas las equivocaciones. Nuestra experiencia en Medicine Lake, acampando y trabajando en un área remota, es que 2–3 semanas de nivelación ininterrumpida es el período más largo que aún asegura un buen ánimo y máximo desempeño. Para levantamientos más largos, miembros de las cuadrillas o la cuadrilla entera debe ser rotada ocasionalmente, o el programa de trabajo debe incluir tiempo adecuado para descanso y relajamiento.

El costo y disponibilidad del equipo es otro asunto que hay que considerar. Un instrumento de nivelación de primer orden cuesta \$4,000 a \$6,000, un par de miras



Invar y dispositivos para sujeción cuestan alrededor de \$5,000, y el equipo misceláneo incluyendo un sistema de registro y sensores de temperatura cuestan unos \$1,000 a \$2,000 adicionales. El costo total de \$10,000 a \$13,000 es sustancial, pero generalmente no prohibitivo para los proyectos de vigilancia volcánica que tienen apoyo gubernamental. Debido a su utilidad en aplicaciones generales de agrimensura e ingeniería, el equipo de nivelación está disponible en la mayoría de los países del mundo.

Los requisitos de procesamiento de datos también deben ser considerados, pero no son más fuertes para nivelación que para la mayoría de las otras técnicas de agrimensura (considerablemente menos fuerte que para los levantamientos de GPS). Los datos registrados en el campo pueden ser automatizados usando una computadora de mano programada para registrar lecturas de miras y de temperatura, hacer una comparación de escala baja/escala alta en cada montaje, y calcular la diferencia entre las estaciones del visual de frente/visual de espalda, distancia entre estaciones y diferencias observadas de elevación en cada montaje (Yamashita, 1989). Las correcciones para la escala de la mira, temperatura, refracción y otros efectos (Balazs y Young, 1982; Yamashita y Kaiser, capítulo 13) se pueden hacer al final del levantamiento, o diariamente en el campo usando registradores modernos de datos o computadoras.

## **VENTAJAS RELATIVAS DE TRAVESIAS LARGAS, TRAVESIAS CORTAS Y CONJUNTOS DE MONTAJE UNICO**

Las travesías largas ofrecen varias ventajas únicas sobre travesías cortas y arreglos de montaje único, pero la última clase de medida a veces es factible cuando no es posible medir travesías más largas. Quizás la ventaja más importante de las travesías largas es la posibilidad que ofrece de poder determinar desplazamientos verticales casi absolutos en relación a una referencia fuera del área de deformación (también posible con medidas de ángulos-verticales o GPS). La selección de una referencia es generalmente arbitraria, pero la incertidumbre resultante puede ser minimizada si se extiende el levantamiento fuera del área de intranquilidad como se hace para otros tipos de observaciones (normalmente sismicidad) y considerando el patrón espacial de los desplazamientos verticales. Para la mayoría de los propósitos, un punto adecuado puede ser seleccionado entre los hitos que (1) están localizados fuera de la zona de intranquilidad y (2) no se movieron en relación unos a otros durante el período entre los levantamientos.

Una segunda ventaja de las travesías largas es la redundancia inherente en el gran número de hitos. Las

travesías cortas son casi tan buenas en este aspecto, pero los conjuntos de montaje único son susceptibles a errores grandes si no se miden hitos redundantes en cada lugar. Considere el caso de un conjunto de montaje único de dos hitos con 40 m de separación. Si una de esas marcas fuera a moverse 0.5 mm verticalmente en relación a la otra debido a algún proceso externo (expansión o contracción termal, cambios en el nivel de agua subterránea, disturbios sociales), el cambio de inclinación resultante estaría dado por  $0.5 \text{ mm} / (40 \times 10^3 \text{ mm}) = 12.5$  microradianes. Por el otro lado, si el mismo desplazamiento de 0.5 mm fuera a ocurrir en una de las marcas delimitando una travesía de nivelación, el cambio de inclinación indicado sería de solo 0.5 microradianes. Además, los movimientos anómalos de varios milímetros o más normalmente pueden ser detectados y descontados si el hito inestable es uno de varias señales localizadas cercanamente la una a la otra. Las tres lecciones de este ejemplo son (1) las travesías largas son menos afectadas por hitos inestables, que las travesías cortas, (2) mientras más hitos están localizados a lo largo de una travesía, mayor será la probabilidad de reconocer hitos inestables, y (3) siempre se deben incluir hitos redundantes en los conjuntos de montaje único.

La tercera ventaja de las travesías largas sobre las travesías cortas o conjuntos de montaje único es la utilidad de datos espaciales coherentes para modelos numéricos de fuentes de deformación. En teoría, tales modelos trabajan igualmente bien con medidas de desplazamientos verticales o cambios de inclinación. En la práctica, sin embargo, las medidas de inclinación son más susceptibles a efectos externos de pequeña escala que las medidas de desplazamiento vertical que cubren un área mucha más grande.

La ventaja principal de las travesías cortas y conjuntos de montaje único es la rapidez con la cual se pueden tomar las medidas. Esto es particularmente importante cuando el tiempo para el levantamiento está limitado o las tasas de deformación son altas, como durante emergencias volcánicas. En tales momentos, la información de travesías largas quizás no sea lo suficientemente oportuna y el cierre quizás no sea posible, y puede ser prudente limitar la exposición de las cuadrillas de campo a los peligros volcánicos. Las travesías cortas o conjuntos de montaje único pueden ser medidos rápidamente con la precisión adecuada para evaluar los peligros durante una crisis; las travesías más largas pueden ser medidas después cuando sea apropiado.

## **EJEMPLOS DE LEVANTAMIENTOS DE NIVELACION EN TERRENOS VOLCANICOS**

Los siguientes dos ejemplos fueron escogidos para ilustrar la utilidad de los levantamientos de nivelación en

terrenos volcánicos como una herramienta para estudiar procesos magmáticos y tectónicos activos. Las travesías individuales varían en longitud desde 196 km en el volcán South Sister hasta 193 km en el volcán Medicine Lake. La medición de la red de cuatro travesías cortas en South Sister requiere una o dos cuadrillas-días, mientras que la travesía de Medicine Lake requiere de unas nueve cuadrillas-semanas. Las dos redes fueron establecidas como parte de un esfuerzo del CVO obtener medidas geodésicas de líneas de base en cada uno de los volcanes potencialmente activos en la Cordillera Cascades.

### Volcán South Sister: Una Red de Travesías Cortas para Determinar los Cambios de Inclinación

El Volcán South Sister está localizado a lo largo de la cadena volcánica Cascades en el Three Sisters Wilderness Area en la parte central-occidental de Oregon. La zona ha sido el lugar de vulcanismo silicio durante tiempos Pliocénicos y Cuaternarios. La tephra riódacítica, los domos de lava y los flujos de lava han sido emitidos durante el tiempo Holocénico tardío desde más de 20 puntos de emisión ubicados en los flancos del volcán (Scott, 1987).

En 1985, el CVO estableció una red de cuatro travesías de nivelación lineal con longitudes que varían desde 196 m a 317 m en South Sister (Yamashita y Doukas, 1987). El propósito de la red es proporcionar información geodésica de líneas de base para comparar con futuros levantamientos, especialmente durante períodos de intranquilidad volcánica. Conjuntos triangulares o en forma de L hubieran sido preferibles, pero no se escogieron estas configuraciones debido a la inclinación del terreno. Los flancos del volcán tienen poca vegetación, por lo tanto el obstáculo más grande para las travesías más largas era la fuerte pendiente de los flancos. Las travesías fueron localizadas en elevaciones de 2,200 a 2,500 m a lo largo de riscos radiales en los flancos septentrionales, orientales, australes y occidentales del volcán (fig. 12.2). Aunque hay numerosos montajes cortos (10 m o menos) requeridos por el terreno, se puede medir la red dos veces en uno o dos días con el apoyo de un helicóptero.

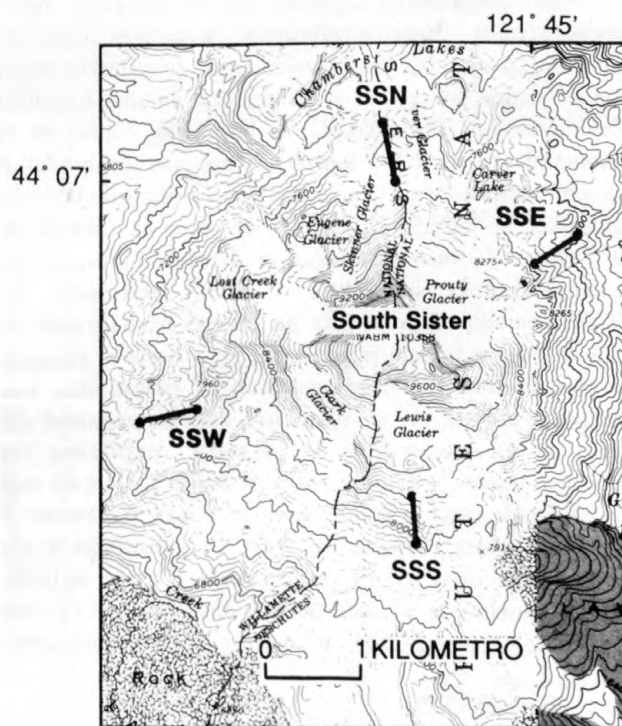
La red South Sister fue medida nuevamente en 1986 para verificar las observaciones iniciales y determinar si había ocurrido deformación desde que se estableció la red. Los cambios de inclinación medidos variaron desde 0.8 a 6.5 microradianes. Los cambios no mostraban ningún patrón aparente, que se pudiera atribuir a error de medida. Se podía mejorar la precisión (1-2 microradianes) de las travesías más largas (alrededor de 1 km), pero paralelamente aumentaría el tiempo requerido para hacer las medidas. Se piensa que

la red existente es una buena solución intermedia, suficientemente buena para detectar la deformación precursora en el caso de una reactivación volcánica.

### Volcán Medicine Lake: Una Travesía para Determinar Deformación Regional

El Volcán Medicine Lake es un volcán tipo escudo del Pleistoceno y Holoceno localizado en el nororiente de California alrededor de 50 km al este de Mount Shasta, cerca del margen occidental de la provincia tectónica Basin y Range. El Monumento Nacional Lava Beds está localizado en el flanco septentrional del Volcán Medicine Lake y comprende principalmente lavas basálticas y algunas andesíticas. Más arriba en el volcán, casi no hay lava basáltica, domina el andesita y pequeños volúmenes de riolita y dacita, existen estas últimas principalmente cerca de la caldera de Medicine Lake que mide  $7 \times 12$  km (Donnelly-Nolan, 1988).

Una travesía de 20 km a través del área de la cumbre del volcán Medicine Lake fue medida durante Agosto de 1988. El levantamiento de primer orden, clase II fue una repetición del levantamiento de segundo orden hecho en 1954 por el Servicio Geodésico Nacional (NGS-National Geodetic Survey). Después de reconocer



**Figura 12.2.** Las localizaciones de las cuatro travesías cortas de nivelación en los flancos del Volcán South Sister en el centro oeste de Oregon, de Yamashita y Doukas (1987).

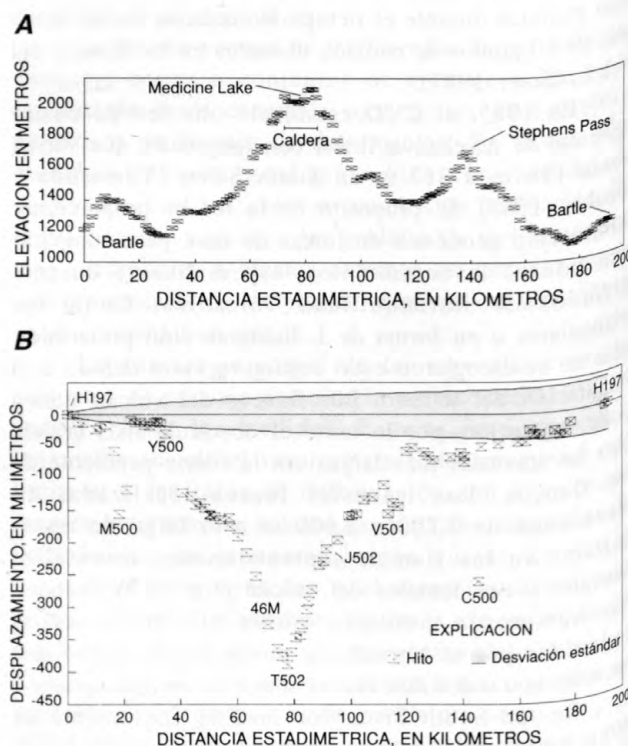
que había ocurrido una subsidencia sustancial entre los dos levantamientos y que el campo de deformación se extendía más allá de la travesía de 1988, se estableció un programa de nivelación mucho más ambicioso en el verano de 1989. El levantamiento de 1989 atravesó el volcán Medicine Lake y el área de Stephen Pass, donde ocurrieron unos enjambres sísmicos intensos en 1978 y 1981. El cierre para el levantamiento de 1989 fue de 19 mm en un circuito de 193 km, muy por debajo de los requisitos del NGS para levantamientos de primer orden, clase II<sup>1</sup> ( $5 \text{ mmL}^{1/2} = 69 \text{ mm}$ ; Vanícek y otros, 1980). Aproximadamente 80% de los hitos de 1954 a lo largo de la ruta fueron recuperados y reemplazados para mantener un espaciamiento de 1.5 km.

El rasgo más obvio de los datos de desplazamiento (figs. 12.3–12.5) es un área de subsidencia pronunciada (máximo 389 ± 43 mm de T502, correspondiente a un tasa promedio anual de 11 mm/año) en el área de la cumbre del volcán Medicine Lake, cerca del centro de la caldera de Medicine Lake. La subsidencia se extiende más allá del borde de la caldera y a través del edificio volcánico entero. Además, hay evidencia en varios sitios a lo largo de la ruta de nivelación de fallamiento local, presuntamente asociado con la extensión histórica de la corteza en la parte occidental de la provincia tectónica Basin and Range (por ejemplo, cerca de M500, Y500, V501 y C500).

La correlación aparentemente inversa entre topografía y desplazamientos verticales crea la posibilidad que los desplazamientos calculados estén contaminados por un error sistemático en uno o ambos levantamientos. Por ejemplo, si las miras usadas en el levantamiento de 1954 fueron pobremente calibradas o las correcciones para las miras fueron incorrectamente aplicadas, se hubiera acumulado un error en función de elevación. Como resultado la diferencia entre los levantamientos de 1954 y 1989 indicaría un desplazamiento dependiente en altura. Actualmente se está investigando esta posibilidad, pero hasta el presente se piensa que los desplazamientos calculados son correctos porque (1) se requeriría que la magnitud del error de la corrección de la mira explicara los desplazamientos y esto es poco probable ( $389 \pm 43 \text{ mm}$  en 500 m de cambio de elevación es aproximadamente  $6 \times 10^{-4}$ ); (2) la correlación entre la topografía y los desplazamientos se interrumpe en detalle, particularmente en el área de Stephens Pass; y (3) una correlación general entre topografía y desplazamientos

verticales tiene sentido si los desplazamientos están causados por deflación magmática, u otro proceso volcánico.

El área de subsidencia local cerca de C500 (alrededor de 20 cm con respecto a los hitos cercanos) está dentro del área epicentral del enjambre sísmico de 1978 en Stephens Pass, que estuvo acompañado por rupturas en la superficie (Cramer, 1978; Bennett y otros, 1979). Aunque solo está involucrado un hito, su apariencia no perturbada y la proximidad a los epicentros de 1978 sugiere que el desplazamiento fue causado por un fallamiento antes que por una inestabilidad del hito o disturbio cultural. Desafortunadamente, varios hitos cercanos fueron destruidos por un trabajo de carretera durante el período entre los levantamientos. El rasgo tipo graben cerca de V501 probablemente está asociado con el enjambre de sismos someros que ocurrió justo al norte de Tennant en 1981. No se ha identificado ninguna sismicidad que podría correlacionar con el área de fallamiento localizado cerca de M500 y Y500, pero el área está cortada por muchas fallas jóvenes que limitan



**Figura 12.3.** La topografía (A) y los desplazamientos verticales (B) a lo largo de la ruta a través del Volcán Medicine Lake y Stephens Pass, California. Los desplazamientos fueron calculados comparando los resultados de un levantamiento de segundo orden en 1954 y un levantamiento de primer orden, clase II de 1989. Se consideró al hito H197 cerca de Bartle como fijo. El área en sombra en B indica la desviación estándar de  $\pm 1$ .

<sup>1</sup>Una fuente común de confusión es la diferencia entre la desviación estándar de una OED,  $\sigma(h)$ , la desviación estándar de un cambio de OED,  $\sigma(\delta h)$  y el cierre máximo de circuito permitido, C, para levantamientos de un determinado orden y clase. Para levantamientos de primer orden, clase II,  $\sigma(h)=0.7 \text{ mmL}^{1/2}$ ;  $\sigma(\delta h)=1.0 \text{ mmL}^{1/2}$ ; y C =  $5.0 \text{ mmL}^{1/2}$  (Vanícek y otros, 1980).



las Montañas Whitehorse y el terreno de horst-y-graben al oeste.

La causa de la subsidencia entre 1954 y 1989 en el volcán Medicine Lake todavía está bajo investigación, pero casi seguramente el problema tiene aspectos tectónicos y volcánicos. El adelgazamiento de la corteza debido al Basin y Range, la carga isostática por el peso de la pila volcánica, y procesos dentro de una posible cámara magmática debajo del área de la cumbre (Evans y Zucca, 1988) pueden jugar un rol importante en el fenómeno.

## RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones generales están basadas principalmente en experiencias personales en levantamientos de nivelación en el Volcán Kilauea en Hawaii, en varios volcanes en la Cordillera Cascades, y en las calderas Yellowstone y Long Valley. Las aplicaciones específicas en otros volcanes pueden requerir de modificaciones para acomodar condiciones y limitaciones locales.

1. Considere la nivelación como una "técnica de primer recurso." ¿Hay razones específicas por las cuales una travesía larga de nivelación no es posible o apropiada? Si cierto, ¿es una travesía corta o una red de montaje única una alternativa viable? ¿Qué tipo de información se puede obtener de una travesía larga, que

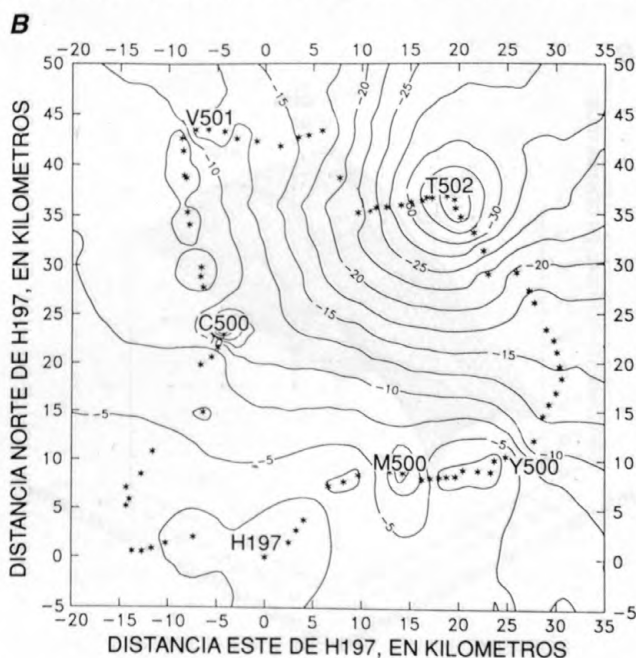
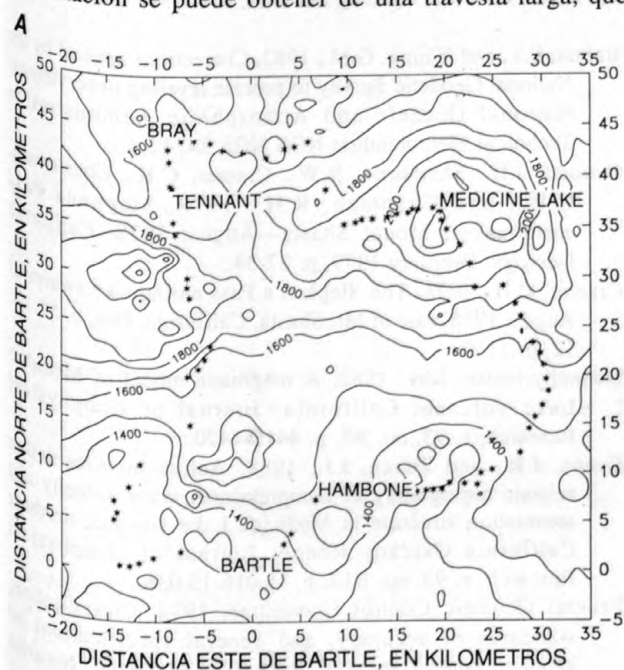
de otra manera no estaría disponible? Considere el esfuerzo adicional y el tiempo de levantamiento contra las ventajas de mayor precisión y cobertura de área.

2. Siga meticulosamente los procedimientos establecidos. Las desviaciones estándar calculadas para un levantamiento de un determinado orden y clase de nivelación aplican estrictamente, solamente si se siguen los procedimientos y especificaciones apropiados. Cortando esquinas puede ahorrar un poco de tiempo y puede parecer inofensivo en el campo, pero mantén en mente, que eventualmente se compararán los resultados con levantamientos conducidos muchas décadas después por otros investigadores con otros requisitos y objetivos.

3. Equivócase en cuanto a la precisión. Los procedimientos de campo deben estar de acuerdo con los requisitos del levantamiento individual para evitar complicaciones innecesarias, pero el tiempo y esfuerzo adicional para cumplir con los estándares de primer orden es una inversión que puede ser muy provechoso en el futuro.

4. Medir los segmentos dos veces para verificar los procedimientos. Es tentador medir una vez una distancia doble, pero mida por lo menos dos veces el 10 por ciento de cada travesía para verificar que se está obteniendo la precisión deseada.

5. Nunca sea mezquino con los hitos. Ninguna cantidad de precisión de medida puede compensar el efecto de hitos inadecuados. Siga los procedimientos establecidos para instalar todos los hitos (Floyd, 1978).



**Figura 12.4.** La topografía suavizada (A) y los desplazamientos verticales entre 1954 y 1989 (B) en la región de Medicine Lake en el norte de California. El centro de la caldera de Medicine Lake está cerca al hito T502 (B, superior derecha). Los intervalos de los contornos son 100 m en A y 2.5 cm en B. Los desplazamientos son relativos al hito H197 cerca de Bartle. Los desplazamientos negativos grandes cerca de los hitos M500, Y500, V501 y C500 pueden indicar fallamiento local, aunque la distribución espacial de estos movimientos no está bien determinada.

Diseñe travesías cortas y conjuntos de montaje único con suficiente redundancia como para eliminar la inestabilidad de hitos como una fuente potencial de error.

6. Combine levantamientos de nivelación con otras clases de medidas geodésicas. Lo más probable es que ningún conjunto individual de datos sea definitivo. La combinación de desplazamientos verticales de travesías largas de nivelación, cambios de inclinación de travesías cortas y conjuntos de montaje único, y desplazamientos

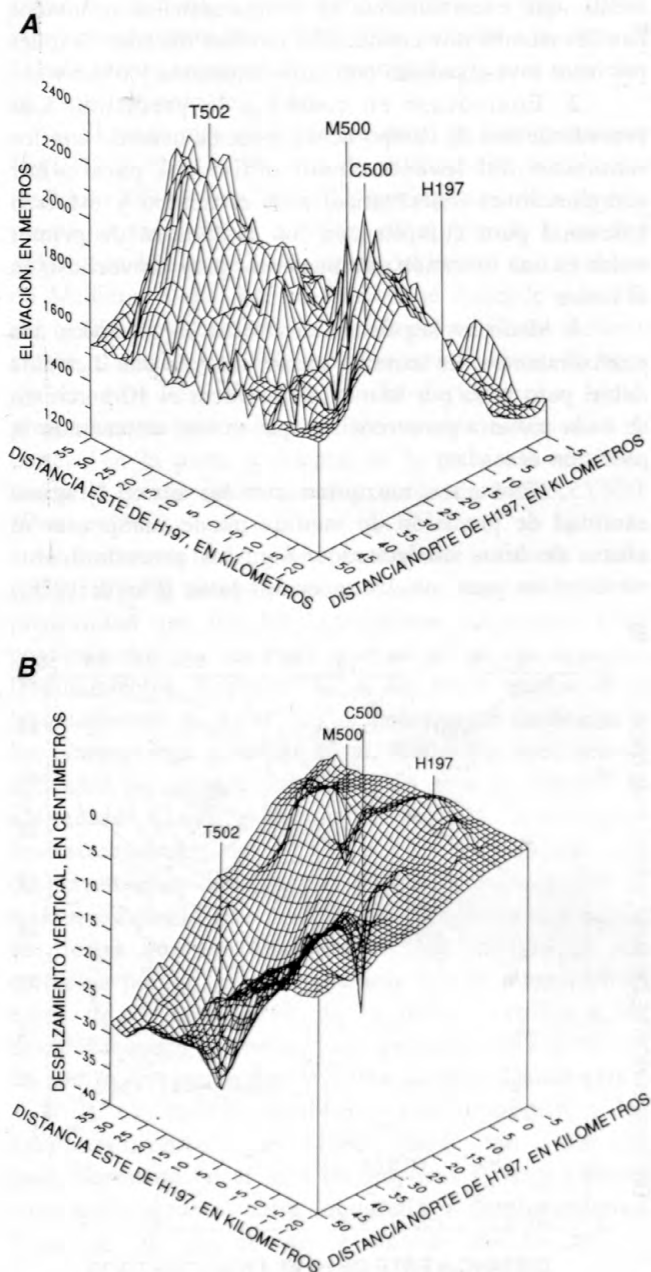
horizontales de medidas de EDM o GPS proporcionarán una limitación particularmente poderosa para los modelos de la fuente de deformación y la evaluación de los peligros asociados.

## AGRADECIMIENTOS

El jefe de la cuadrilla es el corazón de toda cuadrilla de nivelación y el CVO es particularmente afortunado al contar con los servicios de Ken Yamashita. En muchas ocasiones en los pasados 10 años, Ken ha convertido una colección de estudiantes, maestros, empresarios y amigos sin experiencia en una sólida cuadrilla de nivelación en un tiempo admirablemente corto, algunas veces bajo condiciones extraordinarias. Otras personas han servido admirablemente como jefes temporales de cuadrilla para proyectos especiales incluyendo John Estrem, Gene Iwatsubo, Jack Kleinman y Dave Schneider, sus esfuerzos considerables son profundamente agradecidos. También se agradecen los esfuerzos de todas las personas que cargaron miras, registraron datos y dirigieron tránsito desde Yellowstone a Newberry Crater y desde Mount Baker a Lassen Peak.

## REFERENCIAS CITADAS

- Balazs, E.I., and Young, G.M., 1982, Corrections applied by the National Geodetic Survey to precise leveling observations: National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum NOS NGS 34, 12 p.
- Bennett, J.H., Sherburne, R.W., Cramer, C.H., Chesterman, C.W., and Chapman, R.H., 1979, Stephens Pass earthquakes, Mount Shasta—August 1978: California Geology, February 1979, p. 27-34.
- Cramer, C.H., 1978, The Stephen's Pass earthquake swarm of August 1978, east of Mt. Shasta, California: Eos, v. 59, no. 12, p. 1130.
- Donnelly-Nolan, J.M., 1988, A magmatic model of Medicine Lake volcano, California: Journal of Geophysical Research, v. 93, no. B5, p. 4412-4420.
- Evans, J.R., and Zucca, J.J., 1988, Active high-resolution seismic tomography of compressional wave velocity and attenuation structure at Medicine Lake volcano, northern California Cascade Range: Journal of Geophysical Research, v. 93, no. B12, p. 15,016-15,036.
- Federal Geodetic Control Committee, 1974, Classification, standards of accuracy, and general specifications of geodetic control surveys: Rockville, Maryland, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- 1975, Specifications to support classification, standards of accuracy, and general specifications of geodetic control surveys: Rockville, Maryland, National Oceanic and Atmospheric Administration.



**Figura 12.5.** La presentación en tres dimensiones de la topografía (A) y desplazamientos verticales entre 1954 y 1989 (B) en la región de Medicine Lake. Los desplazamientos son relativos al hito H197 cerca de Bartle. Vista es hacia el sureste.

- 1984, Standards and specifications for geodetic control networks: Rockville, Maryland, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Floyd, R.P., 1978, Geodetic bench marks: National Oceanic and Atmospheric Administration Manual NOS NGS 1, 52 p.
- Holdahl, S.R., 1982, Recomputation of vertical crustal motions near Palmdale, California, 1959-1975: *Journal of Geophysical Research*, v. 87, no. B11, p. 9374-9388.
- Mogi, K., 1958, Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them: *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, v. 36, p. 94-134.
- Newhall, C.G., and Dzurisin, D., 1988, Historical unrest at large calderas of the world: *U.S. Geological Survey Bulletin* 1855, 1, 108 p.
- Packard, R.F., and MacNeil, J.H., 1983, A direct comparison of spirit and compensator leveling: *Geophysical Research Letters*, v. 10, no. 9, p. 849-851.
- Pelton, J.R., and Smith, R.B., 1982, Contemporary vertical surface displacements in Yellowstone National Park: *Journal of Geophysical Research*, v. 87, p. 2745-2761.
- Prescott, W.H., Davis, J.L., and Svarc, J.L., 1989, Global positioning system measurements for crustal deformation: Precision and accuracy: *Science*, v. 244, p. 1337-1340.
- Rumpf, W.E., and Meurisch, H., 1981, Systematische Änderungen der Ziellinie eines präzisions Komensator-nivelliers—Insbesondere des Zeiss Ni 1—Durch Magnetische Gleich- und Wechselfelder, paper presented at 16th International FIG Congress, Montreux, Switzerland, 26 p.
- Scott, W.E., 1987, Holocene rhyodacite eruptions on the flanks of South Sister volcano, Oregon, *en* J.H. Fink, ed., The emplacement of silicic domes and lava flows: Geological Society of America Special Paper 212, p. 35-53.
- Schomaker, M.C., and Berry, R.M., 1981, Geodetic leveling: Rockville, Maryland, National Oceanic and Atmospheric Administration Manual NOS NGS 3.
- Stein, R.S., 1981, Discrimination of tectonic displacement from slope-dependent errors in geodetic leveling from southern California, 1953-1979, *en* Simpson, D.W., and Richards, P.G., eds., *Earthquake prediction, an international review*: Washington, D.C., American Geophysical Union (Maurice Ewing Series v. 4), p. 441-456.
- Strange, W.E., 1981, The impact of refraction correction on leveling interpretations in southern California: *Journal of Geophysical Research*, v. 86, no. B4, p. 2809-2824.
- Vanfcek, P., Castle, R.O., and Balazs, E.I., 1980, Geodetic leveling and its applications: *Reviews of Geophysics and Space Physics*, v. 18, no. 2, p. 505-524.
- Wilson, R.M., 1935, Ground surface movement at Kilauea Volcano, Hawaii: University of Hawaii Research Publication 10, 56 p.
- Yamashita, K.M., 1981, Dry tilt: A ground deformation monitor as applied to the active volcanoes of Hawaii: *U.S. Geological Survey Open-File Report* 81-523, 21 p.
- Yamashita, K.M., 1989, Using the "HP-71B" hand-held computer for data entry while running first-order class II level surveys: *U.S. Geological Survey Open-File Report* 89-179, 21 p.
- Yamashita, K.M., and Doukas, M.P., 1987, Precise level lines at Crater Lake, Newberry Crater, and South Sister, Oregon: *U.S. Geological Survey Open-File Report* 87-293, 32 p.





# 13. El Uso de Procedimientos de Nivelación Geodésica de Primer Orden, Clase II para Vigilar Desplazamiento Vertical

Por Kenneth M. Yamashita y William P. Kaiser

## ABSTRACTO

Se han usado niveles para vigilar volcanes desde los comienzos de los 1900's. El personal del Observatorio Vulcanológico Cascades usan procedimientos de nivelación de primer orden, clase II, tal como lo define el Federal Geodetic Control Committee para vigilar el desplazamiento vertical en volcanes activos o potencialmente activos. A continuación se definen y describen el equipo requerido, instalación y separación de los hitos, adquisición y procedimientos de reducción de datos. Los procedimientos de campo y las especificaciones técnicas para el equipo están resumidos y consolidados para proporcionar una guía para aquellos interesados en usar niveles geodésicos como un método para vigilar desplazamiento vertical.

## ANTECEDENTES

El uso de niveles y otros instrumentos de agrimensura para vigilar el desplazamiento vertical en áreas volcánicas activas no es una ciencia nueva. Se ha estado usando en Hawaii desde comienzos de los 1900's cuando R.M. Wilson, comparando los datos del nivel del mar con el Volcán Kilauea en 1926, determinó que "este gran error de cierre se puede atribuir en parte al movimiento del terreno" y pronunció que "La divergencia de la línea de 1926 probablemente representa una verdadera subsidencia de la superficie" (Wilson, 1935). Desde ese levantamiento, se han mejorado grandemente los instrumentos y métodos de nivelación.

En Octubre de 1983, miembros del Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO-Cascades Volcano Observatory) en Vancouver, Washington, ejecutaron un levantamiento geodésico de primer orden, clase II para vigilar el desplazamiento vertical en el Parque Nacional de Yellowstone, Wyoming (Dzurisin y Yamashita, 1986). Desde ese levantamiento inicial, la nivelación geodésica ha sido el método principal usado

en el CVO para vigilar el desplazamiento vertical en estudios vulcanológicos en el occidente de los Estados Unidos.

Los objetivos de este informe son (1) consolidar los muchos informes publicados sobre nivelación geodésica, (2) proporcionar una guía para aquellas personas interesadas en utilizar la nivelación para vigilar desplazamientos verticales y (3) dar un bosquejo de los procedimientos y técnicas usados por los miembros del CVO.

## NORMAS FEDERALES PARA LA NIVELACION GEODESICA

Las normas para coordinar la elaboración de mapas, cartografía, y actividades de vigilancia fueron establecidas en 1919 por las Agencias de Cartografía y Levantamiento Federal (FSMA - Federal Surveying and Mapping Agencies). La FSMA fue abolida en 1942 y sus funciones fueron transferidas a la Oficina de Presupuesto (Bureau of the Budget), quien en cambio transfirió su autoridad al Comité Federal de Control Geodésico (FGCC - Federal Geodetic Control Committee) cuando éste fue establecido en 1968.

En 1975 y 1984 el FGCC actualizó sus guías estableciendo estándares específicos y exactitudes para los levantamientos que estaban incluidos en la Red Nacional de Control Geodésico, entre los cuales la nivelación geodésica es una de las técnicas usadas para el control vertical. En estas guías, se imponen restricciones específicas en cuanto a procedimientos, exactitudes, precauciones y equipos que pueden ser usados para un determinado orden o clase de nivelación (Federal Geodetic Control Committee, 1975).

## NIVELACIONES DE PRIMER ORDEN, CLASE II

Las nivelaciones de primer orden, clase II son usadas principalmente para ingeniería regional y para medir el desplazamiento vertical. Una de las tareas principales del CVO es vigilar volcanes activos y potencialmente activos, en los cuales pueden ocurrir desplazamientos superficiales apreciables. Por lo tanto, las cuadrillas del CVO típicamente hacen levantamientos de primer orden, clase II. Este informe presenta un bosquejo de los procedimientos y estándares para tales levantamientos.

Además del error de cierre, los criterios impuestos para determinar el orden y la clase de un levantamiento de nivelación están gobernados por (1) equipo, (2) instalación y distancia entre hitos, (3) procedimientos de adquisición de datos y (4) procedimientos de reducción de datos.

### Equipo

#### Instrumento Para Nivelación

Para la nivelación de primer orden, el primer criterio es un instrumento con un micrómetro óptico con la capacidad de resolver 0.01 cm.

Si se usa un nivel spirit, el tubo del nivel debe ser lo suficientemente sensible y consistente para fijar la línea de vista dentro de 0.25 segundos de arco, y para niveles compensadores, el compensador también debe poder fijar la línea de vista dentro de 0.25 segundos de arco. El instrumento debe tener un lente objetivo con un diámetro de aproximadamente 50–70 mm y un telescopio de alrededor de 40 aumentos, y estar equipado con un retículo horizontal en forma de V.

Además de estos requisitos, se puede utilizar cualquier instrumento capaz de producir resultados clasificados como niveles de primer orden, clase II.

#### Instrumentación del CVO

Para los levantamientos de 1983 y 1984 en Yellowstone (Dzurisin y Yamashita, 1986; Dzurisin y otros, 1986) se usó el nivel preciso Wild N3. Para todos los otros levantamientos, el CVO ha usado el nivel compensador Wild NA2.

La información técnica proporcionada con el Wild NA2 indica que el NA2 tiene un telescopio opcional de 25, 32 o 40 aumentos. La apertura del objetivo es de 45 mm, y el compensador tiene una sensibilidad de  $\pm 0.3$  segundo de arco. La placa paralela del micrómetro se puede leer al 0.1 mm más cercano y se estima hasta 0.01 mm.

Aunque las especificaciones par el NA2 están justo afuera de los límites fijados por el FGCC, nuestros datos demuestran que siguiendo al pie de la letra los procedimientos de campo, el NA2 es capaz de producir una exactitud de primer orden, clase II (Dzurisin y Yamashita, 1987).

El nivel spirit N3 tiene la opción de usar 34, 45 o 46 aumentos y tiene un lente objetivo de 56 mm. El nivel tubular tiene una sensibilidad de 10 segundos y una exactitud de estacionamiento de la burbuja dividida de  $\pm 0.25$  segundos. El micrómetro paralelo es leído al 0.1 mm más cercano y estimado hasta 0.01 mm. Por lo tanto, el N3 satisface todos los requisitos fijados por el FGCC.

El CVO compró un nivel compensador reversible Jena NI 002 A en Enero de 1989. Este tiene un telescopio de 40 o 50 aumentos y una exactitud de estacionamiento del péndulo de  $\pm 0.05$  segundos. La escala del micrómetro se lee al 0.1 mm más cercano y se interpola hasta 0.01 mm. Por lo tanto, el Jena NI 002 A también cumple con los requisitos fijados por el FGCC.

### Miras de Nivelación

Las miras que se utilizan deben tener escalas de metal Invar y divisiones de 1.0 o 0.5 cm. Estas miras deben tener dos escalas paralelas, pero las escalas deben variar en valor por un mismo constante. La mira de nivelación debe tener un nivel esférico con una exactitud de hasta 10 minutos de arco y debe poder sostenerse por si solo, eso es con la ayuda de dispositivos para sujeción.

El CVO utiliza miras Invar de precisión Wild GPLE-3 y miras Invar Kern. Las dos tienen una cinta de metal Invar con divisiones de 1 cm, y las dos pueden ser sujetadas con abrazaderas para que sean autosostenibles.

Las miras son calibradas anualmente por la Oficina Nacional de Estándares (National Bureau of Standards) en Gaithersburg, Maryland, a una exactitud de 0.00005 m.

### Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura deben ser del tipo aspirante, donde los abanicos aspiran el aire en vez de impulsar el aire por el sensor de temperatura. Esto evita que el calor del motor del abanico pueda afectar la temperatura verdadera del ambiente. Los sensores de temperatura deben ser blindados de una exposición directa al sol y tener una exactitud de 0.1 °C o 0.2 °F.

Deben haber dos sensores de temperatura, localizados a 0.5 m y 2.5 m (Balazs y Young, 1982), o 0.3 m y 1.3 m (Schomaker y Berry, 1981), sobre la superficie del suelo. Los sensores de temperatura pueden ser sujetados con la mano o montados en una pata del trípode.



## Instalación y Distancia Entre Hitos

Los hitos colocados a lo largo de las rutas de nivelación de primer orden, clase II no deben tener una separación de más 3.0 km o tener una separación promedio de más de 1.6 km. Los hitos se clasifican en clase A, clase B, u otros (Floyd, 1978).

El CVO instala la mayoría de los hitos en roca dura, y por lo tanto son de clase A, o los coloca en varillas sin mangas, y por lo tanto son de clase B, de acuerdo con las clasificaciones establecidas por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA - National Ocean and Atmosphere Administration). Ver Floyd (1978) para detalles sobre la clasificación e instalación de hitos.

## Procedimientos a Seguir Durante la Recolección de Datos

La exactitud de los datos de campo dependen de un sinnúmero de factores, el más importante de los cuales son: (1) Ajuste del nivel, (2) ajuste de las burbujas de nivelación y (3) procedimientos de campo.

### Ajuste del Nivel

Se debe revisar el error de colimación del instrumento diariamente, excepto para los niveles compensadores reversibles que se revisan semanalmente (Federal Geodetic Control Committee, 1984).

#### Ajuste de Paralaje

Antes de que se tome una lectura con el instrumento, éste debe ser revisado para paralaje, para lo cual se mira por el ocular y se enfoca un objeto fijo, después se mueve la cabeza lentamente hacia arriba y abajo. El alambre horizontal no debe parecer desplazarse en relación con el objeto fijado. Si se mueve, existe paralaje, y éste tiene que ser removido.

Para remover el paralaje, enfoque el telescopio sobre un fondo raso, ajuste el enfoque del retículo y enfoque nuevamente el telescopio. Continúe enfocando y enfocando nuevamente el retículo y el telescopio. El movimiento del retículo debe ser mínimo cuando se remueve el paralaje.

#### Prueba de Clavija

El error de colimación del instrumento puede ser detectado y corregido mediante un procedimiento conocido como prueba de clavija (peg test). Pruebas conducidas por el Servicio Geodésico Nacional (NGS - National Geodetic Survey) han revelado que al hacer una prueba de clavija durante tiempos de aire

positivo—cuando la temperatura del suelo es menor que la temperatura del aire—puede causar errores de refracción que indican que el instrumento está desajustado cuando en verdad no lo es. Ahora se requiere que la prueba de clavija sea hecha solamente cuando la temperatura del aire es negativo. El procedimiento prescrito es hacer la prueba de clavija no antes de 2 ½ horas después del amanecer y no más de ½ hora antes del atardecer.

### Ajuste de los Niveles de Burbuja

El nivel esférico en los niveles compensadores puede ser revisado nivelando primero la burbuja y rotando el nivel 180 °C. Si la burbuja de nivelación está dentro de 0.2 mm del centro, se considera que el nivel está ajustado, si no necesita ser ajustado.

Para ajustar un nivel de burbuja, lleve la burbuja hasta que la mitad esté en el círculo de nivelación usando los tornillos nivelantes. Termine de nivelar el nivel de burbuja, ajustando los tornillos localizados justo debajo del nivel. Gire el instrumento 180° y repita el procedimiento hasta que la burbuja de nivelación esté dentro de 0.2 mm del centro cuando se gira.

El nivel de burbuja de las miras puede ser fácilmente verificado sujetando un nivel de carpintero a lo largo del filo y parte delantera de la mira. El nivel en la mira no puede ser revisado, o ajustado, girando la mira, como se hizo con el nivel. La mira se nivela utilizando un nivel de carpintero, no un nivel esférico. Si el nivel no está centrado se regresa la burbuja completamente al círculo usando los tornillos de ajuste, y no se rota la mira para nada.

Cuando se rota, el nivel de burbuja debe quedar dentro de 2 mm del centro o 10 minutos del vertical (Schomaker y Berry, 1981 p. 3-42).

### Procedimientos de Campo

Las instrucciones explícitas sobre los procedimientos de campo fueron dadas por el Federal Geodetic Control Committee (1984) para las diferentes clases de nivelación. Para nivelaciones de primer orden, clase II, los siguientes procedimientos de campo deben ser seguidos.

Se debe comenzar el levantamiento en un hito de nivelación permanente, esta establecido, y se deben incorporar, por lo menos, dos hitos "viejos" consecutivos en un levantamiento nuevo (Federal Geodetic Control Committee, 1984).

Antes de comenzar el levantamiento, el registrador debe anotar la fecha, el tipo de nivel que se está usando, y el número de serie del instrumento. La marca de la mira de nivelación, el número de serie, las unidades en las cuales se tomarán las medidas de temperatura

(Fahrenheit o centígrados), el área geográfica en la cual se hace el levantamiento, y el número de serie de la varilla que está en el hito también debe ser apuntado.

La mira se nivela con asas sobre el punto más alto del monumento. Entonces se coloca el nivel a una distancia conveniente de la mira de visuales de espalda, pero en un punto a no más de 60 m de distancia, de tal manera que la lectura más baja en la mira no esté a menos de 0.5 m porque las refracciones cerca al piso pueden causar errores apreciables (Whalen, 1981). La distancia se puede aproximar contando pasos, y la diferencia en elevación se puede medir con exactitud con un nivel de mano.

Se coloca la mira para el visual de frente a una distancia que es igual a la de la mira para el visual de espalda. Esto se puede hacer contando los pasos desde el nivel para el visual de espalda hasta el instrumento y la misma cantidad de pasos desde el instrumento a la posición de la mira para el visual de frente. La diferencia entre las dos distancias no puede ser mayor a 5.0 m, ni puede la lectura de la mira para el visual de frente ser inferior a 0.5 m (Federal Geodetic Control Committee, 1984).

El eje de giro está establecido mediante la colocación de una estaca de madera o una clavija metálica en el suelo, en una superficie dura, se debe usar una trébedes (trípode de pies fijos y muy cortos) o "tortuga". Nuevamente, cuente los pasos para establecer la distancia y use un nivel de mano para determinar la diferencia en altura.

Generalmente se toma primero la lectura a la mira del visual de espalda, escala baja, después en el hilo superior de la estadia, luego el hilo inferior de la estadia. Se rota el nivel hacia la mira del visual de frente, se toma la medida de escala baja, entonces se leen y se calculan las estadias. Si la diferencia entre las estadias es mayor a 5.0 m, el nivel o la mira del visual de frente debe ser movida hasta que la diferencia sea menor a 5.0 m.

Si se usa un nivel reversible compensador, la posición del compensador debe ser cambiado en este momento. Para niveles compensadores no reversibles, el nivel debe ser desnivelado y nivelado nuevamente (las cuadrillas del CVO, ni el grupo nacional de cartografía ha hecho esto) y se debe tomar una lectura en la mira del visual de frente, escala alta, entonces en la mira del visual de espalda, escala alta. Si la cuadrilla de campo está usando un nivel con un compensador reversible, como el Jena N1 002, consulte Poetzschke (1983), que contiene información valiosa y única para los niveles con un compensador reversible.

La diferencia entre las elevaciones calculadas de las escalas bajas y las escalas altas no puede ser mayor a 0.10 cm para niveles reversibles compensadores, o 0.03 cm para todos los otros tipos de niveles. Si la diferencia

es mayor, el montaje entero debe ser rechazado y leído nuevamente. Si las lecturas estadimétricas son aceptables, no hay que repetir la estadia.

Si se le informa a los portamiras la distancia verdadera según se determina con las lecturas estadimétricas esto les ayudará a ajustar con mayor exactitud sus pasos.

Si las lecturas son aceptables, las temperaturas se leen primero del sensor de temperatura superior y después de la inferior. Debe haber una aspiración, por lo menos, un minuto antes de tomar la lectura (Schomaker y Berry, 1981).

Cuando todas las lecturas y revisiones para el montaje son aceptables, se mueve la mira del visual de espalda y el nivel en forma de salto de rana hasta pasar la mira del visual de frente; balanceando nuevamente la distancia estadimétrica, y para no usar los 0.5 m inferiores de la mira de nivelación. Mientras se están cambiando de posiciones, el portamira de la mira de visual de frente debe girar la mira 180°, teniendo cuidado de no perturbar de ninguna manera el eje de giro. La mira anterior del visual de frente se convierte en la mira para el visual de espalda y la mira anterior para el visual de espalda es la nueva mira para el visual de frente.

Para colocar la mira para el nuevo visual de frente se cuentan los pasos entre la mira del visual de espalda y nivel y se coloca la mira para el visual de frente a la misma distancia del nivel.

El registrador debe fijarse siempre en la diferencia de elevación entre los visuales de frente y espalda y también la diferencia estadimétrica acumulativa, e informar a los portamiras estos valores para que ellos puedan mejorar cualquier diferencia. Se permite una diferencia de 5.0 m por montaje y 10.0 m entre secciones (típicamente 1 a 2 km entre hitos), (Federal Geodetic Control Committee, 1984).

La secuencia de salto de rana se sigue hasta alcanzar otro hito. Los estándares requieren que se usen dos miras y que se lea en forma alterna como mira de visual de frente y mira de visual de espalda.

Después de hacer cada lectura en el hito de visual de frente, se anota el número del hito conjuntamente con un código del viento y nubes.

Los códigos de nube son "0" si menos del 25% de las lecturas se tomaron bajo condiciones soleadas, "1" si 25 al 75% de las lecturas se tomaron bajo condiciones soleadas y "2" si más del 75% de las lecturas se tomaron bajo condiciones soleadas. Los códigos de viento son "1" si las velocidades del viento promedian menos de 5 mph (10 kph), "2" si las velocidades del viento promedian 5-15 mph (10-25 kph) y "3" si las velocidades del viento promedian más de 15 mph (25 kph) (Holdahl, 1985). Los códigos de viento y sol se usan para predecir

las temperaturas si éstas no se toman durante el levantamiento.

Antes de continuar con otra sección, los datos recolectados deben ser comparados con datos previos para asegurar que no hayan errores obvios. Los errores de cierre deben ser calculados y verificados para las rutas corridas dos veces o cerradas.

En el CVO, los datos se registran en una computadora de mano HP-71B (Yamashita, 1989), donde se hacen todas las revisiones y balances. Si se usa un sistema similar de recolección, los datos deben ser impresos o grabados en un registrador digital en este momento. La HP-71B tiene suficiente memoria para almacenar un día de datos de nivelación, pero hemos tenido problemas tipo "memoria perdida" con esta computadora y nos sentimos más seguros obteniendo una copia de los datos en cada hito.

Las cuadrillas del CVO han estado invirtiendo la dirección de la corrida después de cada hito. En otras palabras, si la dirección de la primera corrida entre hitos era de norte a sur, la próxima sería en la dirección opuesta, de sur a norte. Se recomienda la inversión de la nivelación entre la mañana y la tarde o cada otro día (Federal Geodetic Control Committee, 1984). El razonamiento es que mediante la inversión de la dirección entre corridas (para líneas corridas una vez), los errores cumulativos debidos al asentamiento de la aguja (acumulación de pequeños errores sistemáticos por el movimiento del eje de giro) pueden ser minimizados por cancelación.

## Fuentes de Error

Los errores están normalmente caracterizados como al azar o sistemáticos. Los errores al azar se atribuyen normalmente a las variaciones impredecibles que ocurren durante la nivelación. Estos errores pueden ser causados por el movimiento del trípode o los ejes de giro o por los efectos causados por longitudes de disparo desequilibrados. Los errores sistemáticos son aquellos que son inexactos pero consistentes, tales como los efectos del campo magnético de la Tierra en algunas clases de niveles compensadores (Rumpf y Meurisch, 1981) o errores que pueden ser introducidos usando instrumentos o miras de nivelación que están desajustadas o mal calibradas.

Algunos errores pueden ser atribuidos directamente por no seguir los procedimientos de campo aceptados, y pueden ser minimizados o eliminados siguiendo los procedimientos establecidos por el Federal Geodetic Control Committee (1984). Sin embargo, hay otras fuentes de error que son inherentes y están presentes a pesar de tomar todas las precauciones. Solamente durante la reducción de datos se pueden contabilizar estos errores y aplicar las correcciones respectivas.

Los errores que se incorporan durante el levantamiento pueden perjudicar la integridad del conjunto de datos y apreciablemente alargar y subir los costos del levantamiento, sin mencionar la frustración de tener que medir nuevamente las secciones. Siguiendo los procedimientos detallados a continuación se pueden minimizar estos errores:

1. Revisar frecuentemente el paralaje moviendo la cabeza hacia arriba y abajo mientras se mira por el retículo para ver si hay desplazamiento.

2. Hacer la prueba de clavija ("peg test") diariamente (pero solamente cuando las temperaturas son negativas), o cuando se sospecha que el instrumento ha derivado, por ejemplo, si el instrumento fue sacudido durante transporte o si hubo un número fuera de lo común de "no checks" entre lecturas de escala baja y escala alta.

3. Revisar el nivel de burbuja en el instrumento frecuentemente durante el día. Ojeando la burbuja de nivelación después de girar el instrumento entre los visuales de frente y espalda es suficiente para ver si hay un desajuste. El tubo de burbuja en la mira puede ser rápida y fácilmente revisada mientras se monta el instrumento para la prueba de clavija ("peg test"). Se deben ajustar los tubos de nivel antes de hacer esta prueba.

4. El portamira debe asegurar que no haya nada en la parte de abajo de la mira de nivelación antes de montarlo en el hito o eje de giro. Esto se puede hacer, limpiando la parte de abajo de la mira antes de colocarla sobre la marca, o rotando la mira de nivelación un poco de izquierda a derecha y escuchar si existe un ruido de engranaje que podría indicar la presencia de tierra. El portamira debe tener mucho cuidado para asegurar que la mira de nivelación no solo esté colocada sobre el hito sino sobre el punto más alto de la señal, y que ninguna parte de la mira esté tocando algo que no sea el hito. Es crítico que no se muevan los ejes de giro durante la transición de mira de visual de frente a mira de visual de espalda. Este es uno de los pocos pasos que no hay como revisar equivocaciones.

5. El operador del instrumento puede asegurar la estabilidad del trípode y que éste no se mueva entre lecturas, y que se siga la secuencia de lectura indicada anteriormente. Así se obtienen dos elevaciones independientes para el mismo montaje. Si no se ha movido el instrumento entre las lecturas de escala alta y baja, la diferencia en elevación debe ser igual hasta 0.03 cm. Si la línea de nivelación corre a lo largo de una carretera pavimentada con asfalto, la persona en el instrumento debe asegurar que por lo menos dos de las tres patas del trípode no estén en el pavimento debido a la posibilidad de que las patas se hundan en el asfalto.

6. El registrador es responsable de anotar correctamente toda la información requerida como el



número de serie del equipo, los códigos de viento y nubes, fecha, hora, números de identificación de los hitos. El registrador necesita asegurar que las revisiones entre las lecturas de escala baja y alta estén dentro de la tolerancia permitida para el orden y clase particular del levantamiento, y que la diferencia de elevación y distancia estadimétrica está actualizada. Es importante que la distancia estadimétrica esté balanceada y que cualquier diferencia sea corregida. Balanceando la distancia estadimétrica se va eliminar o, por lo menos, minimizar los errores introducidos por un instrumento desajustado y por los efectos de curvatura (donde la línea de vista no es paralela a la superficie equipotencial (Schomaker y Berry, 1981). Si los datos son registrados electrónicamente, el registrador necesita asegurar que estén correctamente almacenadas en otro medio electrónico para su transferencia a una PC u otro dispositivo de computación.

El jefe de campo de la cuadrilla y el registrador deben calcular los errores de corrida doble o cierre de rutas. Los datos de corrida sencilla deben ser comparados con aquellos de levantamientos anteriores y cualquier discrepancia debe ser resuelta antes de abandonar el lugar.

El jefe de campo de la cuadrilla debe asegurarse que se invierte la dirección de la corrida dos veces al día o, por lo menos, cada otro día.

## Reducción de Datos

Los datos tomados en el campo solo dan una aproximación cercana a las verdaderas diferencias de elevación entre los hitos; ellos tienen que ser corregidos por varios factores para maximizar su precisión.

Las correcciones por error en la escala de la mira, refracción del camino de la luz, cambios en la longitud del hilo Invar, efectos del campo magnético de la tierra, errores de cierre para las secciones corridas dos veces y los circuitos y las alturas ortométricas son algunos de los monstruos que afectan los datos. Hay que hacer estas correcciones. Las siguientes ecuaciones son para corregir estos factores.

### Cálculo del error de colimación

$$C = [(\Delta h_1 - \Delta h_2) - 0.27] / \Delta s_2$$

donde C es el error de colimación en mm/m,  $\Delta h_1$  es la diferencia de elevación en mm para el primer montaje desde el medio,  $\Delta h_2$  es la diferencia de elevación en mm para el segundo montaje, y  $s_2$  es la diferencia estadimétrica entre la mira y el instrumento.

La ecuación fue derivada de Schomaker y Berry (1981, p. 3-32). Los valores enumerados en la tabla de

refracción y curvatura (Schomaker y Berry, 1981, p. 3-31) no son correctos. El término (-0.27) en la fórmula de arriba fue tomada de Zilkoski y Ward (1989, vol. 1).

Si la diferencia de altura es mayor a  $\pm 10.0$  segundos o  $\pm 0.05$  mm/m (Federal Geodetic Control Committee, 1984), el instrumento debe ser calibrado.

$$CF = \text{estadia}^2 \cdot (C/100) \cdot 4$$

donde CF es el factor de corrección para ser sumada a la lectura de la mira distante,  $\text{estadia}^2$  es la distancia estadimétrica exacta desde el instrumento a la mira distante, C es el error de colimación derivada previamente, y 4 es el constante para todas las miras divididas en centímetros (8 para miras graduadas en centímetros dobles)

La ecuación fue modificada de Schomaker y Berry (1981, p. 3-33).

### Corrección de Refracción

$$R = -10^5 \cdot 70(S/50)^2 \cdot \delta(D/2)$$

donde R es la corrección de refracción, S es la distancia entre la mira y el instrumento en metros,  $\delta$  es la diferencia de temperatura en grados centígrados entre los dos sensores de temperatura, y D es la diferencia de elevación para el montaje

La corrección es sumada a la diferencia de elevación observada. Esta ecuación fue modificación de Balazs y Young (1982, p. 6).

### Corrección Ortométrica

$$C_o = -2h\alpha \sin 2p[1 + (\alpha - 2\beta/\alpha)(\cos 2p)] \sin dp$$

donde  $C_o$  es la corrección ortométrica, h es la altura promedia de la sección,  $\alpha$  es 0.02644,  $\beta$  es 0.000007, p es la latitud promedia de la sección, y dp es la diferencia de latitud entre los primeros y últimos puntos de la sección. dp es positiva cuando el punto final está al norte del primer punto.

Esta ecuación es de Balazs y Young (1982, p. 4). La ecuación como se publicó originalmente está incorrecta en que el seno de dp, no dp solo, debe aparecer al final (Emery Balazs, comun. escrita, 1989).

### Corrección para la Temperatura de la Mira

$$C_t = (t_m - t_s)DCE$$

donde  $C_t$  es la corrección para la temperatura de la mira (mismas unidades que D),  $t_m$  es la temperatura media observada del hilo Invar,  $t_s$  es 5 °C, D es la diferencia observada en la elevación entre los hitos, y CE es  $1 \times 10^{-6}$  por grado centígrado.

Esta ecuación es de Balazs y Young (1982, p. 4).

### Corrección para la Colimación del Nivel

$$C_c = -(e \cdot \text{SDS})$$

donde  $C_c$ =corrección para la colimación del nivel, en milímetros,  $e$  es el error de colimación, en radianes  $\times 1000$  o en mm/m, y SDS es la diferencia de elevación acumulada en las longitudes visuales para la sección, en metros.

La ecuación es de Balazs y Young (1982, p. 4).

### Ecuación para Calcular el Error Estándar para Segmentos Corridos Dos Veces

$$\sigma = \frac{1}{2n} \sqrt{\sum \left(\frac{d^2}{k}\right)}$$

donde  $\sigma$  es el error en milímetros,  $d$  es la diferencia entre las medidas de los visuales de espalda y de frente de una sección,  $k$  es la distancia en kilómetros, y  $n$  es el número total de secciones corridas dos veces

Esta ecuación es de Whalen y Balazs (1977, p.22).

### Ecuación para Calcular el Error de Cierre

Cuando la línea de nivel está cerrada al haber medido la ruta dos veces (corrida doble), la ecuación para calcular el error de cierre es

$$4\text{mm} \sqrt{k}$$

donde  $k$  es la distancia total nivelada en kilómetros (dos veces la distancia en una dirección).

Cuando la línea de nivelación está cerrada por un cierre de circuito o vuelta, la ecuación para calcular el error de cierre es

$$5\text{mm} \sqrt{k}$$

donde  $k$  es la distancia en kilómetros para el cierre del circuito

Estas ecuaciones fueron tomadas de NOAA (1980).

### Error Magnético

Se aplica una corrección lineal cuando se usa un nivel Wild NA2:

$$0.1 \cdot L_{mn} \text{ mm}$$

donde  $L_{mn}$  es el componente magnético norte de la distancia en kilómetros, a lo largo de la línea de nivel (Rumpf y Meurisch, 1981). El CVO tiene dos niveles compensadores, y ambos instrumentos han sido protegidos contra variaciones magnéticas por un blindaje instalado por el distribuidor.

C.T. Whalen (comun. escrita) informa que el error DC de 1 campo de tierra para el nivel NI 002 es 0.024

mm/km, y los errores inducidos son insignificante a 1–5 campos de tierra. Esto indicaría que el NI 002 no es muy susceptible a problemas magnéticos, y en líneas cortas seguramente no se necesita aplicar la corrección magnética.

El Nivel Wild N3 no tiene un compensador sino se nivela muy precisamente con un nivel de tubo largo y un nivel de imagen dividido. Dado que el problema magnético solo afecta los niveles compensadores, no se necesita aplicar una corrección.

### AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a Dale Benson de la División Nacional de Cartografía en Denver, Colorado y a Dan Dzurisin del Observatorio Vulcanológico Cascades por sus muchos comentarios y recomendaciones útiles.

### REFERENCIAS CITADAS

- Balazs, E.I., and Young, G.M., 1982, Corrections applied by the National Geodetic Survey to precise leveling observations: National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum NOS NGS 34, 12 p.
- Dzurisin, D., and Yamashita, K.M., 1986, Preliminary results of precise leveling and trilateration surveys in Yellowstone National Park, Wyoming, 1983–1984: U.S. Geological Survey Open-File Report 86-265-A, 24 p.
- \_\_\_\_\_, 1987, Vertical displacements at Yellowstone Caldera, Wyoming 1976–1986: Journal of Geophysical Research, v. 92, p. 13,753–13,766.
- Dzurisin, D., Yamashita, K.M., and Johnson, D.J., 1986, Preliminary results of precise leveling and trilateration surveys in Yellowstone National Park, Wyoming, 1985: U.S. Geological Survey Open-File Report 86-265-B.
- Federal Geodetic Control Committee, 1975, Specifications to support classification, standards of accuracy, and general specifications of geodetic control surveys: Rockville, Maryland, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- \_\_\_\_\_, 1984, Standards and specifications for geodetic control networks: Rockville, Maryland, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Floyd, R.P., 1978, Geodetic bench marks: National Oceanic and Atmospheric Administration Manual NOS NGS 1, 52 p.
- Holdahl, S.R., 1985, A model of temperature stratification for correction of leveling refraction: National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum NOS NGS 31, 28 p.
- NOAA, 1980, Classification standards of accuracy, and general specifications of Geodetic control surveys: National Oceanic and Atmospheric Administration Manual S/T 81-29, 12 p.
- Poetzschke, H., 1983, Variation of the line of sight in the NI 002 leveling instrument due to temperature changes:

- National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum NOS NGS 38, 13 p.
- Rumpf, W.E., and Meurisch, H., 1981, Systematische Änderungen der Ziellinie eines parisons Compensator-nivelliers-Insbesondere des Zeiss Ni 1—Durch Magnetische Gleich- und Wechselfelder: paper presented at 16th International FIG Congress, Montreux, Switzerland.
- Schomaker, M.C., and Berry, R.M., 1981, Geodetic leveling: National Oceanic and Atmospheric Administration Manual NOS NGS 3.
- Whalen, C.T., 1981: Results of leveling refraction tests by the National Geodetic Survey: National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Report NOS 92 NGS 22, 19 p.
- Whalen, C.T., and Balazs, E., 1977, Test results of first-order class III leveling: National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Report NOS 68 NGS 4, 30 p.
- Wilson, R.M., 1935, Ground surface movements at Kilauea Volcano, Hawaii: University of Hawaii Research Publication 10.
- Yamashita, K.M., 1989, Using the "HP-71B" hand-held computer for data entry while running first-order class II level surveys: U.S. Geological Survey Open-File Report 89-179, 21 p.
- Zilkoski, D.B., and Ward, R.B., 1989, Vertical control workshop notes, volume 1; Vertical Network Branch, National Geodetic Survey, Charting and Geodetic Services, National Ocean Services: National Oceanic and Atmospheric Administration, 281 p.



# 14. Nivelación de Montaje Unico para Vigilar el Desplazamiento Vertical (Inclinación) en los Volcanes de los Cascades

Por Kenneth M. Yamashita

## ABSTRACTO

Se han utilizado diferentes métodos para detectar la inclinación u otras manifestaciones de deformación del suelo en el Volcán Kilauea y otros volcanes en el mundo. Este capítulo (1) resume la evolución de la vigilancia de inclinación, (2) esboza las diferentes maneras para realizar nivelaciones de inclinación de montaje único y (3) presenta las ventajas y desventajas de los diferentes métodos usados en el Observatorio Vulcanológico Cascades para vigilar el desplazamiento vertical en los volcanes de la Cordillera Cascades.

## HISTORIA DE MEDICION DE LA INCLINACION

Las primeras medidas de inclinación en el Observatorio Vulcanológico de Hawaii (HVO-Hawaiian Volcano Observatory) fueron hechas mediante la observación del desplazamiento del estilógrafo de registro del sismógrafo de dos componentes Bosh-Omori en el Volcán Kilauea a principios del siglo veinte. Este sistema se mejoró suspendiendo una plomada desde un sismómetro y graficando su desplazamiento desde ese punto (The Volcano Letter, 1930).

La deformación del suelo asociada con procesos volcánicos activos fue reconocida por primera vez en Hawaii por Jaggar y Finch (1926), quienes observaron que un sismómetro con péndulo horizontal instalado en la bóveda Whitney cerca a la cumbre del Volcán Kilauea, Hawaii, registraba cambios a largo plazo en la inclinación del suelo. En 1936 se construyó un "clinoscopio" en el HVO. El clinoscopio era un aparato en forma de trípode que tenía una plomada pesada en forma de anillo, dentro de un cojín de aceite, centrado entre las patas. Cuando se inclinaba el suelo, el anillo movía un señalador en un disco, marcando la dirección y distancia desde el centro (The Volcano Letter, 1936).

En 1958, J.P. Eaton y el personal del HVO instalaron 10 inclinómetros de tubo de agua alrededor de la cumbre del Volcán Kilauea (Eaton, 1959). Cada estación consistía de unos pilotes triangulares de concreto enterrados a los cuales se conectaba un envase (olla). Estas ollas estaban conectadas mediante una manguera de agua y otra de aire. La manguera de agua se usaba para llenar las ollas desde tanques bajo presión y permitía que el agua fluyera libremente desde un recipiente a la otra olla hasta que se alcanzaba un equilibrio. La presión servía para sacar cualquier burbuja de aire del sistema y no para presionar el sistema. La manguera de aire aseguraba que la presión fuera la misma entre los recipientes.

Se usaba un micrómetro dentro del recipiente para medir la altura del agua en cada una de las ollas. Cuando se leían las alturas del agua simultáneamente, se podía calcular la diferencia de elevación entre los dos pilotes.

Estos aparatos fueron sencillos para usar, pero su uso se limitaba a áreas donde la diferencia de elevación entre los dos pilotes no era mayor a 1.5 cm (la longitud efectiva del micrómetro) en un triángulo equilátero cuyos lados tenían una longitud de 25-50 m. Además, sólo se podía lograr la máxima precisión en días con mucha cobertura de nubes o en la noche, debido a la expansión y contracción del agua en el sistema durante las horas de sol. Debido a que se usaba agua para determinar la diferencia de elevación entre los pilotes, se adoptó el término "inclinometría húmeda" para este sistema.

## METODO DE NIVELACION DE MONTAJE UNICO

Para evitar las dificultades del sistema de inclinometría húmeda, D. B. Jackson y T. L. Wright empezaron a desarrollar un sistema de nivelación precisa de inclinación en el HVO. Este procedimiento incluía la

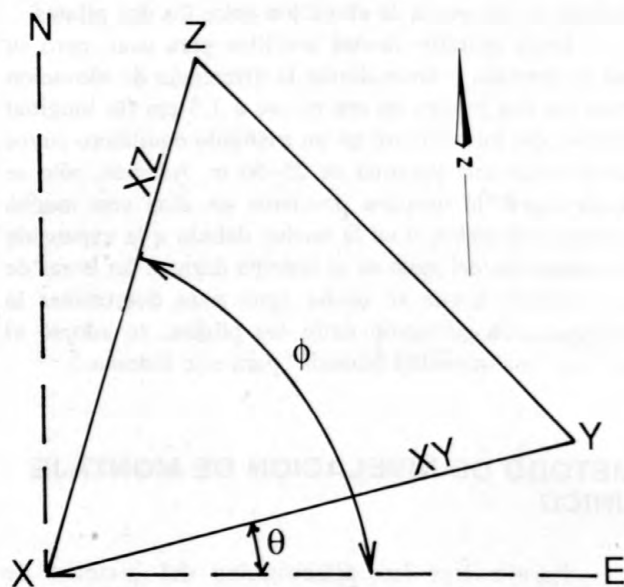
nivelación de precisión de un grupo de hitos usando un nivel Zeiss NI-2 y miras Invar. Dado que no se usaban fluidos, rápidamente se adoptó el término "inclinometría seca" (Yamashita, 1981).

El término "inclinometría seca" no es exacto y ha habido controversia en cuanto a su uso, así que se decidió (por comité) que el nuevo nombre que se usará para designar este método para vigilar el desplazamiento vertical será "nivelación de montaje único" (SSL—single setup leveling).

Las primeras pruebas demostraron que se podía detectar una significativa inclinación del suelo mediante la medición de parejas de hitos con una separación de 150–200 m. Para acortar la base y todavía resolver vectores significativos, se adquirió un nivel de precisión Wild N-3 y miras precisas de nivelación Invar en 1969 (Kinoshita y otros, 1974). Según experiencias en el HVO, la exactitud de este método, cuando se usan conjuntos triangulares con lados de 40 m, es de aproximadamente 10 microradianes ( $\mu\text{rad}$ ).

## Selección del Sitio

La configuración de las estaciones de inclinación SSL usada en el CVO es casi un triángulo equilátero con lados de 30–40 m (fig. 14.1). Para establecer los vértices del triángulo, se marca un punto aproximadamente en el centro del sitio donde se va instalar la estación de inclinometría. Se coloca un tránsito con una plomada sobre este punto y se toma el rumbo hacia el sur; el



**Figura 14.1.** Configuración de una estación de montaje único.

rumbo exacto depende del terreno y la óptima orientación geológica del triángulo.

Se mide una distancia de 23.1 m (para un triángulo equilátero de 40 m) desde el instrumento a lo largo de este rumbo y se marca el punto resultante. Los otros dos vértices son localizados a 23.1 m del punto central girando en ángulos sucesivos de  $120^\circ$  desde el primer punto marcado. Después de establecer todos los vértices, se toma y se anota la longitud de cada uno de los lados del triángulo resultante. Cada lado debe ser de más o menos 40 m. También se miden las alturas de los vértices para asegurar que la diferencia de altura entre los vértices no sea mayor a la altura de las miras. Idealmente, se deben usar sólo los 2.5 m superiores de una mira, debido a que la refracción cerca al suelo puede causar errores apreciables (Whalen, 1981).

Un método alternativo es colocar el tránsito sobre uno de los vértices, establecer una dirección para uno de los lados del triángulo, medir una distancia de 40 m a lo largo de este eje y marcar el punto. El tránsito es "puesto en cero" a lo largo de este acimut y se mide un ángulo de  $60^\circ$  con uno de los puntos finales. Entonces se mide una distancia de 40 m a lo largo de esta línea y se marca el punto. La distancia a lo largo de la tangente tomada a partir del ángulo de  $60^\circ$  debe ser medida para verificar la exactitud del ángulo. La distancia debe ser de 40 m. El punto sobre el cual colocar el instrumento se establece bisectando el ángulo de  $60^\circ$  y midiendo una distancia de 23.1 m.

Cuando se logra una configuración apropiada, se coloca un hito en cada vértice y se marca la estación central del instrumento con un clavo o barra. Se identifican los vértices como X, Y y Z empezando en el punto más septentrional y en sentido de las manecillas del reloj.

Un triángulo equilátero de 40 m no es un requisito rígido para una configuración de inclinación, tampoco es crítico el tamaño y forma para medir la inclinación. Conjuntos triangulares, cuadrados y hexagonales han sido usados con éxito. De igual manera, el esquema de orientación y nombramiento descrito arriba es estandarizada por conveniencia, pero puede ser modificada dependiendo de las instalaciones.

## Hitos

El tipo de hito que usa actualmente el CVO es de bronce rojo troquelado con un "pezón" de  $1.5 \times 2.0$  cm en el centro. El pezón asegura que la mira siempre esté colocada en la parte más alta del hito. Esto puede ser un problema si se usan hitos planos convencionales, especialmente si el hito no se coloca de manera totalmente horizontal durante su instalación. Los hitos establecidos por el CVO son cementados en roca dura o

asegurados a la parte superior de varillas enterradas lo más que se puede en el suelo.

Existe más información sobre instalaciones aceptables de hitos en Floyd (1978).

## Instrumentación

Se puede usar cualquier sistema de instrumentación capaz de producir datos de primer orden (Federal Geodetic Control Committee, 1980) para determinar la inclinación con una precisión de  $\pm 10 \mu\text{rad}$ . Actualmente, en el Observatorio Vulcanológico Cascades, se usan los instrumentos Wild N-3 y el Wild NA2 con una placa de micrómetro paralela. El Equipo de Asistencia durante Crisis Volcánicas (VCAT—Volcano Crisis Assistance Team) usa un teodolito electrónico Wild T-2000 y un distanciómetro electrónico DI-5.

## Sistema de Tres Miras

Si se usan tres miras, estas son identificadas como X, Y y Z y se nivelan sobre el hito correspondiente usando dispositivos para sujeción (fig. 14.2). Una vez que se nivelan las miras, se nivela el instrumento sobre la señal al centro del triángulo. El propósito de este esquema es medir la diferencia de elevación entre cada una de las diferentes parejas de hitos.

Una manera de hacer las lecturas (tabla 14.1) consiste en tomar la lectura inicial en la mira Y, seguida por las dos lecturas en la mira X, dos lecturas en la mira Y y una lectura final en la mira X. Si la diferencia

**Tabla 14.1.** Secuencia de lectura y ejemplo de datos de un triángulo de inclinación.

Lectura de la Mira	Diferencia	Lectura de la Mira
<u>Mira Y</u>	<u>Y-X</u>	<u>Mira X</u>
* <sup>1</sup> 108.273	-130.650	238.923 * <sup>2</sup>
* <sup>4</sup> 108.277	-130.649	238.926 * <sup>3</sup>
* <sup>5</sup> 108.268	-130.648	238.916 * <sup>6</sup>
<u>Mira X</u>	<u>X-Z</u>	<u>Mira Z</u>
238.916	33.301	205.615 * <sup>1</sup>
* <sup>3</sup> 238.914	33.301	205.613 * <sup>2</sup>
* <sup>4</sup> 238.914	33.302	205.612 * <sup>5</sup>
<u>Mira Z</u>	<u>Z-Y</u>	<u>Mira Y</u>
205.612	97.350	108.262 * <sup>1</sup>
* <sup>3</sup> 205.614	97.351	108.263 * <sup>2</sup>
* <sup>4</sup> 205.616	97.352	108.264 * <sup>5</sup>

\* Orden en que se toman las medidas

máxima entre los tres conjuntos de lecturas no es mayor a  $6 \times 10^{-3}$  cm, se puede medir el próximo conjunto X menos Z. Si la diferencia es mayor a  $6 \times 10^{-3}$  cm, se deben tomar lecturas adicionales de Y menos X hasta que sean consistentes. Bajo condiciones de mucho viento, quizás no sea posible lograr una diferencia de  $6 \times 10^{-3}$  cm o menos.

La última lectura tomada en la mira X es anotada como la primera lectura para el conjunto X menos Z. Se toman dos lecturas en la mira Z, después dos lecturas en la mira X, y finalmente se toma una lectura en la mira Z. Nuevamente, se permite una diferencia máxima de  $6 \times 10^{-3}$  cm. Para la determinación de la precisión de las



**Figura 14.2.** Esta estación típica de montaje único usa el sistema de tres miras.



**Tabla 14.2.** Cambios en la determinación de cierre entre levantamientos.

[El cierre es determinado de manera algebraica sumando las lecturas promedias de los tramos Y menos X, X menos Z, y Z menos Y. Cualquier error de cierre debe ser distribuido de manera uniforme entre los tres lados del triángulo]

Lado del triángulo	Diferencia promedia de la mira (cm)	Lectura ajustada	Cambio (cm)	Lectura anterior
		5/18/87		7/20/88
Y-X	-130.649	-130.650	-0.005	-130.645
X-Z	33.301	33.300	-0.010	33.310
Z-Y	97.348 <sup>1</sup>	97.350	+0.015	97.335
Z-Y	97.351 <sup>2</sup>			
	+0.003 <sup>3</sup>			

Por lo tanto, se resta 0.001 cm de cada pareja

<sup>1</sup> Valor calculado para el tramo de cierre

<sup>2</sup> Valor observado para el tramo de cierre

<sup>3</sup> Error de cierre, en centímetros

lecturas, se lee de forma similar el lado de cierre Z menos Y (tabla 14.2).

Un error de cierre aceptable es de alrededor de  $6 \times 10^{-3}$  cm. Si el error de cierre es mayor, se determina cual de los tramos podría estar mal, y se repite el tramo hasta lograr un error de cierre aceptable. Las condiciones atmosféricas pueden ser un factor importante para determinar que es aceptable para un levantamiento en particular.

Los datos compilados durante los últimos 10 años, de 38 estaciones en los volcanes de la Cordillera Cascades, indican un cierre promedio de  $6 \times 10^{-3}$  cm con una desviación estándar de  $6 \times 10^{-3}$  cm.

## Sistema de Dos Miras

Si se están usando dos miras, estas se identifican como A y B. Se coloca la mira A en la estación Y y la mira B en la estación X. Las lecturas se toman casi de la misma manera que con el sistema de tres miras. Después de que se logra una lectura consistente de Y menos X, se mueve la mira de la estación Y a la estación Z, y se repite la secuencia de medidas. Si las lecturas son aceptables, la mira en la estación X es movida a la estación Y, y se lee el conjunto Z menos Y para el cierre.

Antes leíamos cada estación dos veces, invirtiendo las miras en cada lado del triángulo y leyéndolas dos veces. Por ejemplo, el tramo Y-X del triángulo se medía hasta obtener datos satisfactorios, entonces se intercambiaban las dos miras y se medía el tramo

nuevamente. La intención era eliminar cualquier inexactitud en las escalas de las miras.

Las miras del CVO son calibradas por el National Bureau of Standards en Gaithersburg, Maryland. Se ha encontrado que los errores en la escala de las miras son menores que la precisión de la lecturas individuales, y dado que tenemos una tabla de calibración, cualquier inexactitud en la escala de la mira puede ser corregida en la oficina. Por lo tanto, ya no intercambiamos las miras.

## Ecuación para Determinar el Vector de Inclinación

$$\tau(N) = \left[ \left( \frac{-\cos \phi}{XY} \sin(\phi - \theta) \right) \cdot \Delta(Y-X) - \left( \frac{\cos \theta}{XZ} \sin(\phi - \theta) \right) \cdot \Delta(X-Z) \right] \cdot 10,000$$

$$\tau(E) = \left[ \left( \frac{\sin \phi}{XY \sin(\phi - \theta)} \right) \cdot \Delta(Y-X) + \left( \frac{\sin \theta}{XZ \sin(\phi - \theta)} \right) \cdot \Delta(X-Z) \right] \cdot 10,000$$

En esta ecuación, una modificación de la de Eaton (1959),  $\tau$  es el cambio de elevación en microradianes en el componente septentrional y oriental.

XY y XZ son las distancias entre el hito X y los hitos Y y Z, respectivamente,  $\phi$  y  $\theta$  son los ángulos medidos en dirección opuesta a las manecillas del reloj desde la dirección oriental a las direcciones XY y XZ, respectivamente (fig. 14.1), y  $\Delta(Y-X)$  y  $\Delta(X-Z)$  son los cambios de altura de Y a X y de X a Z entre dos levantamientos (tabla 14.2).

## Solución para el Triángulo de Inclinación

La magnitud del vector de inclinación es calculada determinando la raíz cuadrada de  $(\tau_N^2 + \tau_E^2)$ .

El acimut del vector de inclinación es calculado determinando el tangente del arco de  $(\tau_E/\tau_N)$ .

Si la señal de  $\tau_N$  es positiva, el vector es hacia el norte, hacia abajo. Si la señal de  $\tau_N$  es negativa, el vector es hacia el sur y hacia abajo. Si la señal de  $\tau_E$  es positiva, el vector es hacia el este y hacia abajo. Si la señal de  $\tau_E$  es negativa, el vector es hacia el oeste y hacia abajo.

Cuando se grafica el desplazamiento vectorial, la longitud del vector corresponde a su magnitud en microradianes, y el acimut se mide desde el norte si  $\tau_N$  es positivo, o desde el sur si  $\tau_N$  es negativo, y desde el este si  $\tau_E$  es positivo, o desde el oeste si  $\tau_E$  es negativo.

Ejemplo: Si  $XY = 40.2$  m,  $XZ = 40.08$  m,  $\theta = 14.5^\circ$ ,  $\phi = 74.5^\circ$ ,  $\Delta(Y-X) = -0.005$  y  $\Delta(X-Z) = -0.010$  entonces

$$\tau(N) = [-0.0077 (-0.005) - 0.0279 (-0.010)] \cdot 10,000 = +3.18 \mu\text{rad}$$

$$\tau(E) = [0.0277 (-0.005) + 0.0072 (-0.010)] \cdot 10,000 = -2.11 \mu\text{rad}$$

Por lo tanto, la magnitud del vector de inclinación resultante,  $((3.18)^2 + (2.11)^2)^{1/2}$ , es  $3.8 \mu\text{rad}$  y el acimut,

$$\tan^{-1} \left( \frac{2.11}{3.18} \right) \text{ es } N 33.6^\circ W.$$

## Precisión

El personal del Observatorio Vulcanológico de Hawaii determinó que la exactitud de un sistema de inclinación SSL es de  $\pm 10 \mu\text{rad}$  (Kinoshita y otros, 1974). Savage y otros (1979) también han determinado que la precisión de una red de inclinación es de alrededor  $\pm 10 \mu\text{rad}$ .

Todavía no hay suficientes datos para determinar la precisión de nuestras estaciones de inclinación SSL en los volcanes de los Cascades, pero los datos de los conjuntos lineales en South Sister, Oregon (Yamashita y Doukas, 1987) sugieren que la repetitividad es de aproximadamente  $1-6.5 \mu\text{rad}$  en líneas menores a  $0.5$  km, alrededor de  $2 \mu\text{rad}$  en líneas de, por lo menos,  $1$  km y en promedio menor a  $1 \mu\text{rad}$  en líneas mayores a  $1$  km.

## ESTACIONES EN LOS CASCADES

En 1975, W.T. Kinoshita y D.A. Swanson (Frank y otros, 1977) instalaron tres estaciones de SSL en Mount Baker (fig. 14.3), en respuesta a un aumento de actividad termal en Sherman Crater en la cumbre del volcán. Se instalaron estaciones adicionales en el Mount Baker en 1981.

Desde entonces, se han instalado estaciones de SSL en Mount St. Helens, Mount Rainier (Dzurisin y otros, 1983), Mount Hood y Lassen Peak y Mount Shasta (Dzurisin y otros, 1982) (fig. 14.3).

Los conjuntos con bases largas (mayores a  $400$  m) fueron instalados en Crater Lake en 1983, conjuntos lineales fueron instalados en South Sister en 1986 y líneas de nivelación fueron establecidas en Newberry Crater en 1986 (Yamashita y Doukas, 1987).

## Resultados de los Levantamientos

Las dos décadas de datos en el Observatorio Vulcanológico de Hawaii han demostrado que la nivelación de montaje único es un método confiable para medir la deformación del suelo en volcanes tipo escudo en Hawaii, pero nuestra experiencia en los estratovolcanes de las Cascades no ha sido tan concluyente.

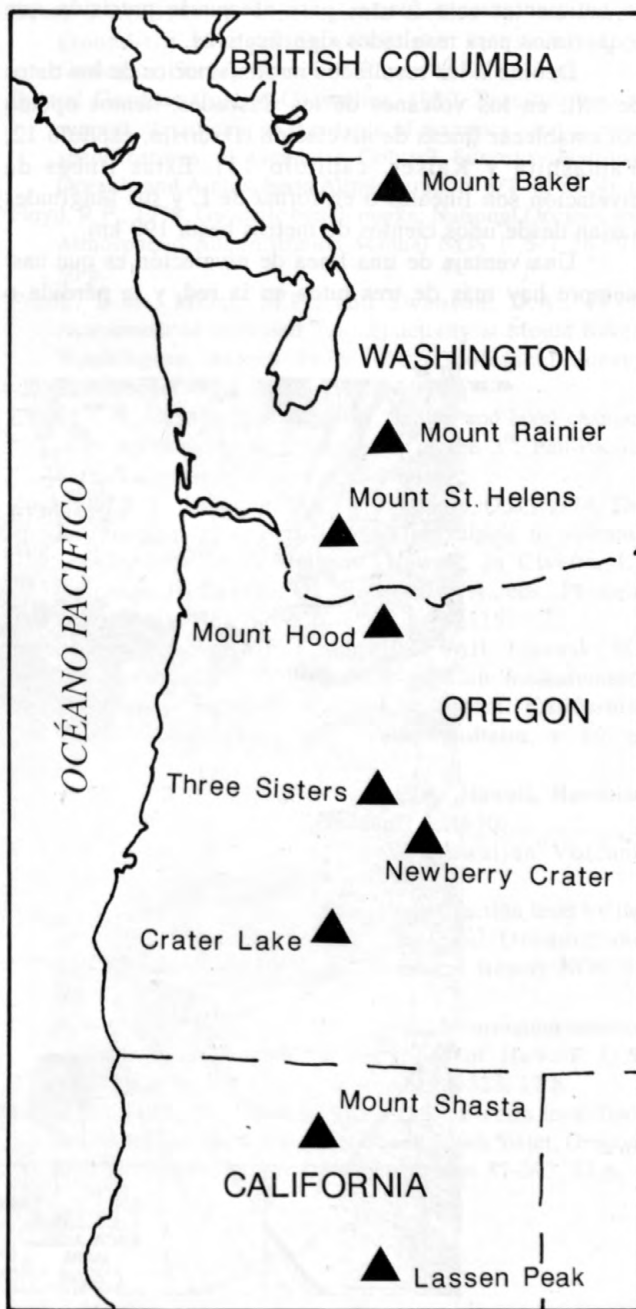


Figura 14.3. Ubicación de los volcanes de los Cascades con estaciones de inclinación.

Las estaciones de SSL en Lassen Peak, Mount Shasta y Mount Rainier han demostrado vectores de inclinación con una orientación al azar; sin embargo, los vectores de inclinación en Mount Hood (fig. 14.4) son más uniformes. Los patrones de inclinación al azar en algunos de los volcanes de los Cascades no pueden ser explicados con facilidad. Una explicación podría ser que, dado que todas nuestras estaciones de inclinación están a grandes elevaciones donde frecuentemente ocurren ciclos de congelamiento y descongelamiento, estas condiciones podrían estar afectando la estabilidad de los hitos y son lo suficientemente fuertes para afectar la precisión que requerimos para resultados significativos.

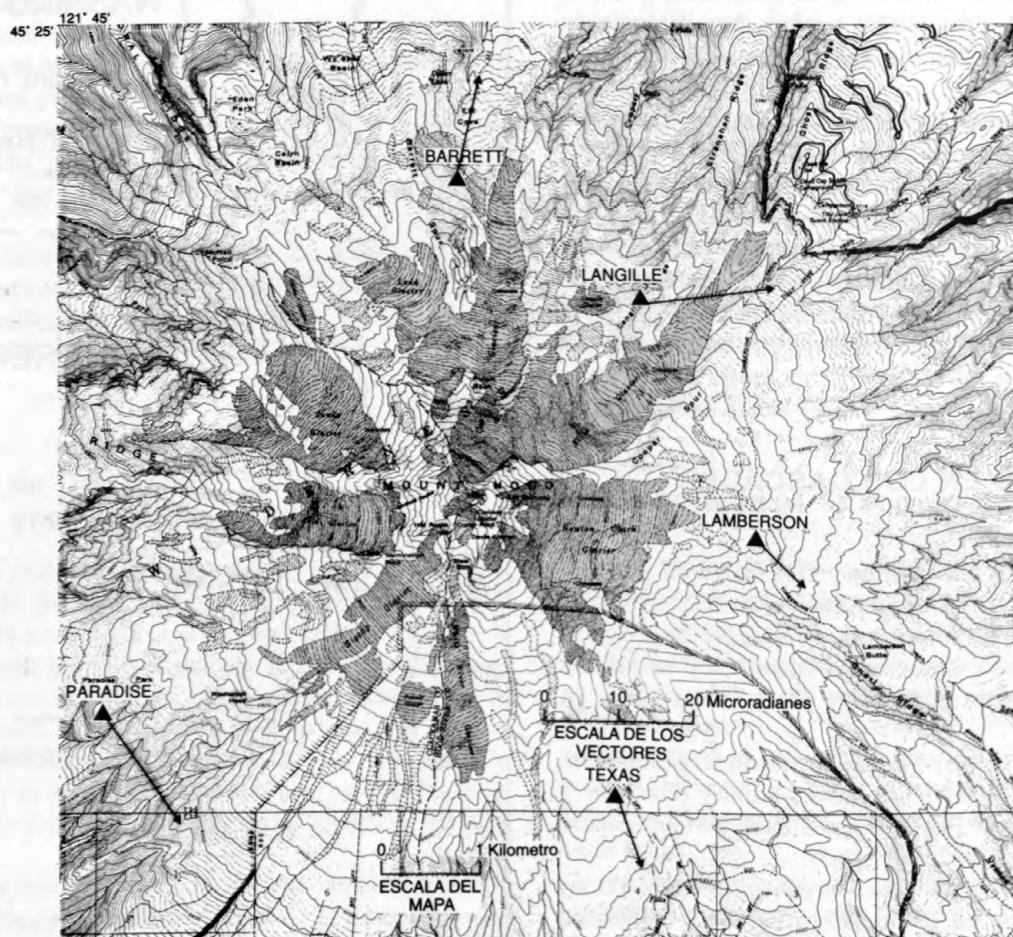
Debido a los resultados insatisfactorios de los datos de SSL en los volcanes de los Cascades, hemos optado por establecer líneas de nivelación (Dzurisin, capítulo 12; Yamashita y Kaiser, capítulo 13). Estas líneas de nivelación son lineales o en forma de L y sus longitudes varían desde unos cientos de metros hasta 190 km.

Una ventaja de una línea de nivelación es que casi siempre hay más de tres hitos en la red, y la pérdida o

inestabilidad de uno de los hitos no es crítica para la estabilidad del sistema. En el sistema SSL, si se pierde o se mueve un hito, la estación completa ya no se puede usar. También, una estación de SSL requiere un área suficientemente grande para acomodar una estación de SSL y suficientemente plana para no tener que usar la longitud entera de la mira de nivelación. La forma del terreno no es tan crítica para un arreglo lineal.

Otra ventaja de una línea de base más larga es la habilidad del sistema para tolerar pequeñas inestabilidades de los hitos. En una base de SSL de 40 m, un cambio de 0.05 cm daría un cambio de inclinación de  $12.5 \mu\text{rad}$ , mientras que en una línea de 1 km el cambio sería de  $0.5 \mu\text{rad}$ .

La desventaja de una línea de nivelación, en comparación con una estación de SSL, es que requiere de más trabajo. Dos personas pueden medir una estación de SSL en alrededor de 25 minutos, permitiendo así la medición de varias estaciones en un día. Por el otro lado, una línea de nivelación requiere de, por lo menos, cuatro personas y alrededor de 1-1/2 horas por kilómetro en



**Figura 14.4.** Desplazamientos verticales en las estaciones de inclinación en Mount Hood, Agosto 1983 a Agosto 1984.



terreno plano, más en un terreno inclinado. La cobertura que se logra a esta tasa es significativamente menor a aquella cubierta por el método SSL, pero los resultados son mucho más definitivos y, bajo ciertas circunstancias valen el tiempo y esfuerzo adicional.

Otra desventaja de los arreglos lineales es que algunas asunciones del sistema magnético del volcán tienen que ser hechas. Dado que no es posible calcular un componente de inclinación de un arreglo lineal, asumimos que cualquier deformación va ocurrir en el centro del volcán y, por lo tanto, todos nuestros conjuntos lineales están instalados radiales a la cumbre. La falacia de esta asunción es que la deformación puede y, de hecho, ocurre en los flancos, y dependiendo de la localización de la deformación en relación a los arreglos lineales, esta deformación puede pasar desapercibida o ser mal interpretada.

La mejor solución para este problema es correr una línea perpendicular a la línea radial, creando un arreglo en forma de cruz o L. Los arreglos de nivelación, tales como aquellos en Crater Lake (Yamashita y Doukas, 1987), son probablemente los más eficientes de las tres configuraciones diferentes.

## RESUMEN

Los datos de Hawaii han probado concluyentemente que la SSL es un método confiable y efectivo para vigilar deformación en volcanes de composición basáltica donde no hay problemas de congelamiento y descongelamiento; nuestra experiencia con la SSL, en los volcanes de los Cascades hasta ahora no ha sido concluyente. Por ahora, no tenemos planes de abandonar las estaciones existentes, y estas estaciones serán medidas nuevamente durante los próximos años, aunque nos hemos inclinado por instalar más arreglos lineales o en forma de L.

Idealmente, una combinación de arreglos de inclinación y líneas de nivelación, tales como aquellos usados en Kilauea tienen la ventaja de cubrir un área mayor en menos tiempo. Dependiendo de los resultados de los arreglos lineales, las líneas de nivelación pueden ser medidas para obtener resultados más cuantitativos.

Las ventajas y desventajas de los arreglos lineales y de SSL han sido discutidas anteriormente. El usuario debe determinar cual sistema cumple mejor con las necesidades de cada situación.

## REFERENCIAS CITADAS

- Dzurisin, D., Johnson, D.J., Murray, T.L., and Meyer, B., 1982, Tilt network at Mount Shasta and Lassen Peak, California: U.S. Geological Survey Open-File Report 82-670, 23 p.
- Dzurisin, D., Johnson, D.J., and Symonds, R.B., 1983, Dry-tilt network at Mount Rainier, Washington: U.S. Geological Survey Open-File Report 83-277, 9 p.
- Eaton, J.P., 1959, A portable water-tube tiltmeter: Seismological Society of America Bulletin, v. 49 p. 301-316.
- Ewert, J.W., 1989, A trigonometric method for monitoring ground-tilt changes on composite volcanoes: U.S. Geological Survey Open-File Report 89-223, 12 p.
- Federal Geodetic Control Committee, 1980, Specifications to support classification, standards of accuracy, and general specifications of Geodetic Control Surveys: National Oceanic and Atmospheric Administration S/T 80-98, 46 p.
- Floyd, R.P., 1978, Geodetic bench marks: National Oceanic and Atmospheric Administration Manual NOS 1, S/T 78-391, 50 p.
- Frank, D.M., Meier, M.F., and Swanson, D.A., 1977, Assessment of increased thermal activity at Mount Baker, Washington, March 1976: U.S. Geological Survey Professional Paper, 1022-A 49 p.
- Jaggar, T.A., and Finch, R.H., 1926, Tilting and level changes at Pacific volcanoes: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Pan-Pacific Science Congress, Tokyo, p. 672-686.
- Kinoshita, W.T., Swanson, D.A., and Jackson, D.B., 1974, The measurement of crustal deformation related to volcanic activity at Kilauea Volcano, Hawaii, *en* Civetta, L., Gasparini, P., Luongo, G., and Rapolla, A., eds., Physical volcanology: New York, Elsevier, p. 87-115.
- Savage, J.C., Prescott, W.P., Chamberlain, W.H., Lisowski, M., and Mortensen, C.E., 1979, Geodetic tilt measurements along the San Andreas fault in central California: Seismological Society of America Bulletin, v. 69, p. 1965-1981.
- The Volcano Letter 1930: National Park, Hawaii, Hawaiian Volcano Observatory, no. 288, July 3, 1930.
- \_\_\_\_\_, 1936, National Park, Hawaii, Hawaiian Volcano Observatory, no. 437, July 1936.
- Whalen, C. T., 1981, Results of leveling refraction tests by the National Geodetic Survey: National Oceanic and Atmospheric Administration, Technical Report NOS 92 NGS 22, 20 p.
- Yamashita, K.M., 1981, Dry tilt: A ground deformation monitor as applied to the active volcanoes of Hawaii: U.S. Geological Survey Open-File Report 81-523, 17 p.
- Yamashita, K.M., and Doukas, M.P., 1987, Precise level lines at Crater Lake, Newberry Crater, and South Sister, Oregon: U.S. Geological Survey Open-File Report 87-293, 32 p.



# 15. Un Método de Nivelación Trigonométrica de Montaje Unico para Vigilar Cambios en la Inclinación del Suelo

Por John W. Ewert

## ABSTRACTO

Estudios de nivelación geodésica del suelo han sido realizados desde la década del sesenta para vigilar actividad volcánica. El desarrollo de teodolitos más precisos y distanciómetros electrónicos (EDM's-electronic distance meters) livianos, compactos y de alta calidad en los últimos 10 años, ha resultado en un incremento sustancial de la nivelación geodésica para estudios de control vertical de alto orden. Un sistema para medir la inclinación del suelo trigonométricamente, empleando un teodolito, EDM y conjuntos de blancos/prismas ha sido desarrollado para ser usado en estudios vulcanológicos. Este sistema permite que se midan arreglos de hitos de montaje único hasta cuatro veces más grandes de lo que sería posible con un instrumento de nivelación en una estación de montaje único de un instrumento. El sistema es más compacto y, por lo tanto, más fácil de transportar en un terreno remoto o escabroso que el equipo utilizado para la nivelación clásica. Los cálculos son un poco más tediosos pero se simplifican si se usa una calculadora programable o computadora portátil. Una comparación de los dos métodos en el mismo triángulo demuestra que su habilidad para medir la deformación del suelo es aproximadamente equivalente.

## INTRODUCCION

La nivelación de montaje único (SSL-single-setup leveling) (conocida también como inclinación seca o nivelación de inclinación) ha sido realizada rutinariamente en el Observatorio Vulcanológico de Hawaii (HVO-Hawaiian Volcano Observatory) para medir y detectar cambios en la inclinación del suelo en los volcanes de Hawaii desde que la técnica fue desarrollada en 1968 (Kinoshita y otros, 1974). La SSL ha sido usada en el Mount St. Helens (Lipman y otros, 1981); en varios volcanes en la Cordillera Cascades, incluyendo Mount Shasta y Lassen Peak (Dzurisin y otros, 1983); en el volcán La Soufrière, Guadeloupe

(Fiske y Shepherd, 1990); en varios volcanes activos en la zona volcánica de Taupo, Nueva Zelandia (Otway y otros, 1984); y en el Volcán Karkar, Papua Nueva Guinea (McKee y otros, 1981). La técnica es usada actualmente en Costa Rica en el Observatorio de Volcanología y Sismología de Costa Rica (OVSICORI) en los volcanes Arenal y Poas y en Colombia por el Instituto de Geología y Minas (INGEOMINAS) en los volcanes Ruiz y Galeras. Una descripción completa de la técnica de nivelación spirit level se encuentra en Kinoshita y otros (1974). Yamashita (1981) también presenta una descripción detallada, y una traducción al Español de este artículo fue publicada por Van der Laat (1982). El método SSL también está descrito en el capítulo 14 de este volumen.

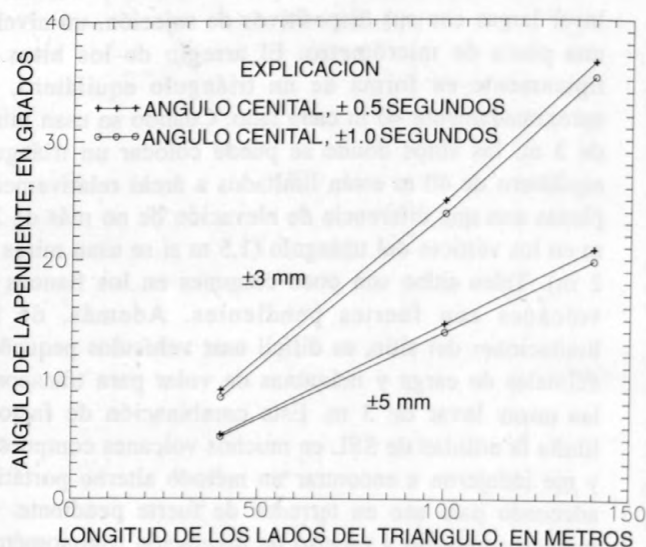
La técnica de SSL requiere de dos o tres miras Invar largas con sus dispositivos de sujeción, un nivel y una placa de micrómetro. El arreglo de los hitos es típicamente en forma de un triángulo equilátero, de aproximadamente 40 m cada lado. Cuando se usan miras de 3 m, los sitios donde se puede colocar un triángulo equilátero de 40 m están limitados a áreas relativamente planas con una diferencia de elevación de no más de 2.5 m en los vértices del triángulo (1.5 m si se usan miras de 2 m). Tales sitios son poco comunes en los flancos de volcanes con fuertes pendientes. Además, de las limitaciones del sitio, es difícil usar vehículos pequeños, animales de carga y máquinas de volar para transportar las miras Invar de 3 m. Esta combinación de factores limita la utilidad de SSL en muchos volcanes compuestos y me indujeron a encontrar un método alternativo portátil y adecuado para uso en terrenos de fuerte pendiente. Un método compacto y preciso de nivelación trigonométrica de montaje único (SSTL-Single-setup trigonometric leveling) fue desarrollado usando un teodolito, distanciómetro electrónico (EDM-electronic distance meter) y tres pares de blancos/prismas montados en postes tipo plomada.



## REQUISITOS PARA EL SISTEMA

Para determinar los requisitos instrumentales para el método SSTL para medir la inclinación del suelo, primeramente hay que decidir cual es el límite de detección de inclinación deseado. Las inclinaciones de suelo de varias decenas a varios cientos de microradianes ( $\mu\text{rad}$ ) son comunes antes de erupciones volcánicas (Newhall, 1984), y, por lo tanto, se decidió que un límite de detección de 7  $\mu\text{rad}$  era apropiado. Este valor de 7  $\mu\text{rad}$  representa un nivel de confianza de dos sigmas en medidas entre pares de puntos y es comparable, aunque menos sensible que las capacidades de detección de 2-3  $\mu\text{rad}$  de la técnica de SSL reportado por Kinoshita y otros (1974) y Sylvester (1978) para arreglos de hitos con pequeñas "aperturas" (40 m).

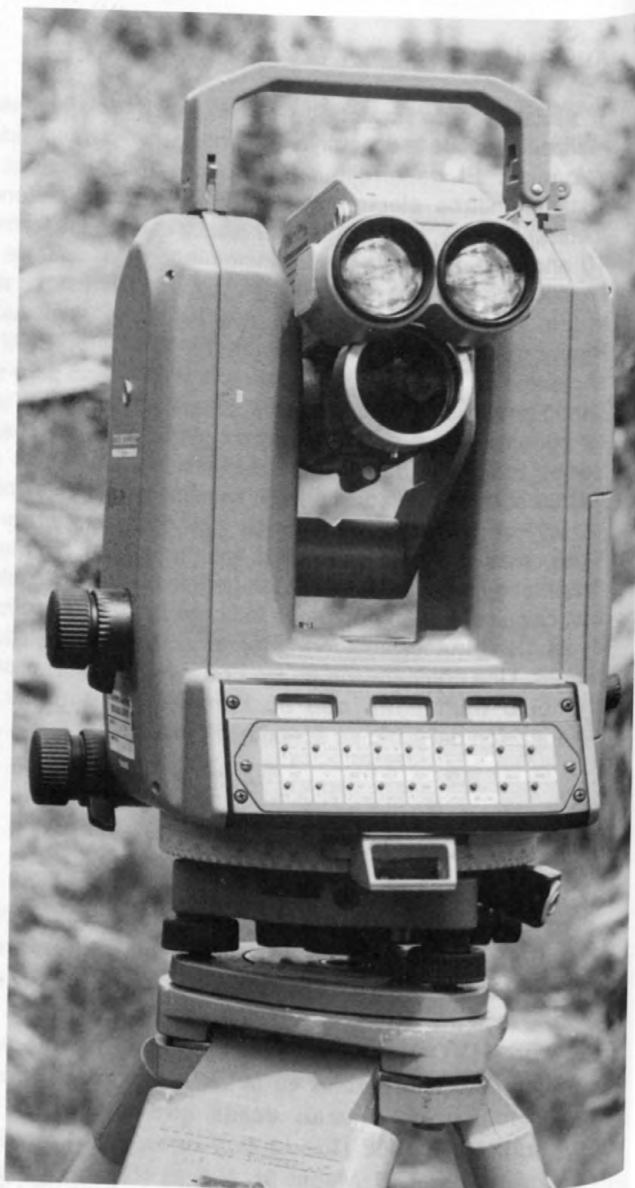
Para llenar este requisito de detección, se requiere un teodolito capaz de medir ángulos cenitales de por lo menos, 1 segundo de arco. Dependiendo del instrumento y operador, un teodolito con micrómetro de 1 segundo puede medir con exactitud ángulos de hasta  $\pm 0.7$  a  $\pm 1.4$  segundos de arco (Ruger y Brunner, 1982). Los teodolitos con micrómetros más precisos y algunos teodolitos electrónicos pueden medir ángulos de hasta  $\pm 0.5$  segundos (Whalen, 1984). Los fabricantes de EDMs reportan la exactitud de sus instrumentos en más o menos un número constante de milímetros (normalmente 1-5) más unas pocas partes por millón (ppm). En trabajos de alcance corto, como SSTL donde típicamente las medidas se hacen sobre distancias menores a 100 m, el número de ppm normalmente no es de consecuencia. Por



**Figura 15.1.** Pendiente máxima del suelo sobre la cual se puede medir la inclinación del suelo hasta aproximadamente 7  $\mu$ rad con EDM's con una exactitud de  $\pm 3$  mm y  $\pm 5$  mm y teodolitos que pueden medir ángulos cenitales de  $\pm 0.5$  y  $\pm 1.0$  segundos de arco.

lo tanto, un EDM con el menor posible error constante es deseable y actualmente es lo que limita la exactitud del método. Finalmente, se tiene que poder colocar a la pareja de blanco/prisma a una altura que puede ser reproducida hasta unas décimas de milímetro con cada nueva medida de la estación. Varios teodolitos, EDM's y sistemas de montaje de blancos/prismas cumplen con estos requisitos.

Los límites de trabajo de este método fueron determinados analizando los errores al azar de lectura y puntería que surgían de medidas de ángulos de diferente precisión, el error constante de los EDM's y una incertidumbre de 0.2 mm en el establecimiento de las alturas del blanco. Los cálculos se hicieron siguiendo los métodos señalados en Buckner (1983, p. 209) y Davis y



**Figura 15.2.** Teodolito electrónico T-2000 con un EDM DI-5 montado en un teodolito telescópico.

otros (1981, p. 124), usando como circuitos de nivelación a los triángulos equiláteros de inclinación con una estación instrumental al centro, y distribuyendo el error acumulado sobre los tres tramos. El límite de  $7 \mu\text{rad}$  fue usado para determinar la inclinación máxima aproximada del suelo sobre la cual se podía determinar trigonómicamente la inclinación del suelo. La Figura 15.1 ilustra la flexibilidad topográfica de este sistema.

## DESCRIPCION DEL SISTEMA

El sistema de nivelación trigonométrica que se usa actualmente consiste de un teodolito electrónico Wild T-2000, un EDM Wild DI-5 y tres conjuntos de blancos con trípode (figs. 15.2, 15.3). Las especificaciones del instrumento reportadas por Wild y confirmadas por Whalen (1984) indicaron que la media de los ángulos cenitales directos y reversos medidos por un T-2000 tienen una exactitud menor a  $\pm 0.5$  segundos de arco



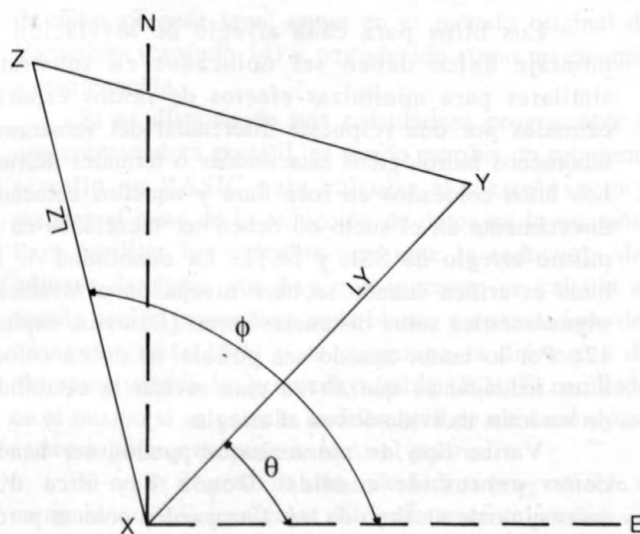
**Figura 15.3.** Sistema completo de blanco/reflector, montado sobre un perno de expansión (recuadro) en un flujo de lava. La cruz del blanco y prisma tienen la misma distancia vertical que la del teodolito telescópico y EDM.

(error estándar). Según los informes, el EDM DI-5 mide distancias exactas dentro de  $\pm 3 \text{ mm}$ , y  $\pm 2 \text{ ppm}$ . Los conjuntos de blancos para este sistema consisten de combinaciones de blancos/prismas inclinados, separadas por la misma distancia vertical que el telescopio del teodolito y EDM para anular la excentricidad. Estos conjuntos de blancos están montados en una varilla de aluminio con una plomada que es sujeta verticalmente por un trípode liviano. Cada conjunto de trípode y blancos es debidamente identificado y colocado en la misma configuración en todos los conjuntos de hitos triangulares.

## INSTALACION DE LA ESTACION

El arreglo ideal de los monumentos de SSTL es un triángulo equilátero lo más grande y práctico posible para obtener medidas exactas. La orientación exacta de un triángulo depende de la estructura geológica que se está estudiando. En volcanes con pendientes fuertes, primero se establece un lado del triángulo radial al punto de emisión o área de la cumbre, y el tercer monumento es colocado en el sitio más favorable. Aunque la configuración exacta del triángulo no es importante, las distancias a medirse deben ser aproximadamente iguales, y la inclinación del suelo debe ser casi uniforme entre el instrumento y los blancos para minimizar los errores de refracción.

El vértice más austral se denomina X, y los otros vértices se denominan Y y Z en orden de las manecillas del reloj (fig. 15.4). Para calcular el vector de inclinación, las distancias de pendiente del monumento X a Y y Z tienen que ser medidas (LY y LZ en la figura



**Figura 15.4.** Configuración física de una estación de inclinación representativa.

15.4). Esto se puede hacer directamente con una cinta de medir, si el triángulo no es muy grande, o indirectamente midiendo la distancia de pendiente y ángulo horizontal de una estación instrumental en el centro del triángulo a cada estación con un EDM y teodolito y resolviendo el triángulo. Las orientaciones desde el este, también tienen que ser tomadas con un compás desde X a Y y desde X a Z para orientar el triángulo ( $\Theta$  y  $\phi$  en figura 15.4). Se asume que los parámetros del triángulo no varían y son usados como constantes en cálculos posteriores de inclinación.

Las fórmulas para determinar los componentes del vector de inclinación y magnitud con un sistema SSTL son:

$$\tau(N) = \left[ \left( \frac{\cos \phi}{XY} \sin(\phi - \theta) \right) \cdot \Delta(Y-X) - \left( \frac{\cos \theta}{XZ} \sin(\phi - \theta) \right) \cdot \Delta(X-Z) \right] \cdot 10^6$$

$$\tau(E) = \left[ \left( \frac{-\sin \phi}{XY \sin(\phi - \theta)} \right) \cdot \Delta(Y-X) + \left( \frac{\sin \theta}{XZ \sin(\phi - \theta)} \right) \cdot \Delta(X-Z) \right] \cdot 10^6$$

Donde,  $LY$ ,  $LZ$ ,  $\Delta(Y-X)$  y  $\Delta(X-Z)$  están en metros y  $\tau(N)$  y  $\tau(E)$  están en microradianes (ecuaciones originales modificadas de Eaton, 1959). Compare estas ecuaciones con aquellas para el método SSL en Yamashita (capítulo 14). Los dos métodos para medir diferencias de elevación conducen a un cambio de signo en los primeros términos de cada ecuación.

## Hitos

Los hitos para cada arreglo de nivelación de montaje único deben ser colocados en substratos similares para minimizar efectos de ruidos espurios causados por una respuesta diferencial del substrato a fenómenos hidrológicos estacionales o termales diurnos. Los hitos colocados en roca dura y aquellos colocados directamente en el suelo no deben ser mezclados en un mismo arreglo de SSL y SSTL. La estabilidad de los hitos es crítica cuando se hace nivelación o nivelación trigonométrica sobre distancias cortas (Dzurisin, capítulo 12). Por lo tanto, cuando sea posible, se deben colocar hitos redundantes que sirvan para revisar la estabilidad de los hitos individuales en el arreglo.

Varios tipo de monumentos pueden ser usados como puntos de medida. Donde hay roca dura (normalmente un flujo de lava), se pueden colocar pernos de anclaje de acero inoxidable o hitos en los huecos taladrados en las rocas (Doukas y Ewert, capítulo 11).

Ha sido nuestra experiencia, que roca dura es el substrato más estable (y, por lo tanto, preferible) para la instalación de hitos. Si no hay roca dura, existen varios métodos para construir hitos. Estos incluyen (1) colocando una varilla verticalmente añadiendo más varillas hasta que no entre más y colocando un hito en la parte de arriba o justamente debajo del nivel del suelo, o (2) construyendo un mogote reforzado con piedras en el cual se puede colocar una señal (Floyd, 1978; Doukas y Ewert, capítulo 11).

## PROCEDIMIENTOS DE MEDIDA

Los conjuntos de blancos y varas con plomadas están enumerados del 1 al 3 y montados con la misma configuración en cada triángulo; 1 en X, 2 en Y y 3 en Z. Los trípodes para los blancos son nivelados y centrados sobre los hitos, y la pareja del teodolito/EDM es nivelada con precisión en el centro del triángulo. Se trata al triángulo como un circuito de nivelación empezando en el lado YX, con la lectura inicial en el blanco Y y una lectura final en X (tabla 15.1). Cada lectura consiste de medidas de ángulos cenitales directos y reversos y la distancia de pendiente. Se calcula el ángulo cenital para cada lectura y las sucesivas diferencias angulares de Y-X. Según nuestra experiencia, si el margen de las diferencias de los tres conjuntos es menor a 2 segundos, el tramo XZ puede ser leído. Si el margen es mayor a 2 segundos, se pueden tomar lecturas adicionales hasta lograr medidas consistentes. La última lectura en el blanco X es anotada como la primera lectura para el tramo X y Z, seguida por dos lecturas en el tramo X y, finalmente, una lectura en el blanco Z. Nuevamente, solo se permite un margen de hasta 2 segundos. Para revisar la exactitud de las lecturas tomadas, se mide el tramo de cierre ZY de manera similar.

Cuando los tres lados del triángulo han sido medidos, se suman los promedios de las diferencias angulares para determinar el "cierre de campo", que no es el cierre de las diferencias de elevación sino una medida de la consistencia de las medidas (tabla 15.1). Idealmente, las diferencias deben sumar cero. En la práctica, si la suma es menor o igual a 1.0 segundos, los datos se consideran como buenos. Si las lecturas suman un valor mayor, se debe medir el triángulo nuevamente.

Ha sido nuestra experiencia, que con el sistema T-2000/DI-5 se pueden medir distancias de hasta 130 m con buenos resultados si no hay reflejos de calor, pero que la medida de distancias menores a 100 m permiten mejor repetitividad de las medidas bajo amplias condiciones de medida.



**Tabla 15.1.** Ejemplo de lecturas sucesivas de los tramos de inclinación de un triángulo.

[Los ángulos son el promedio de las lecturas cenitales directas y cenitales reversas.]

Lecturas individuales de blancos		Lecturas individuales de blancos		Diferencia angular entre blancos
Lectura al blanco Y		Lectura al blanco X		
Angulo	Distancia	Angulo	Distancia	
1*90° 37' 10.7"	22.960 m	90° 39' 42.9"	22.943 m <sup>*2</sup>	Y1-X2 = -2' 32.4"
4*90° 37' 09.7"	22.960 m	90° 39' 42.7"	22.943 m <sup>*3</sup>	Y4-X3 = -2' 33.0"
5*90° 37' 10.4"	22.960 m	90° 39' 42.5"	22.943 m <sup>*6</sup>	Y5-X6 = -2' 32.1"
Promedio - Y = 90° 37' 10.3"		Promedio - X = 90° 39' 42.7"		Promedio Y-X = 2' 32.4"
				Margen = 1.2"
Lectura al blanco X		Lectura al blanco Z		
Angulo	Distancia	Angulo	Distancia	
90° 39' 42.5"	22.943 m	90° 25' 50.9"	23.043 m <sup>*1</sup>	X6-Z1 = 13' 51.6"
3*90° 39' 42.3"	22.943 m	90° 25' 51.9"	23.043 m <sup>*2</sup>	X3-Z2 = 13' 50.4"
4*90° 39' 42.2"	22.943 m	90° 25' 50.9"	23.043 m <sup>*6</sup>	X4-Z5 = 13' 51.3"
Promedio - X = 90° 39' 42.3"		Promedio - Z = 90° 25' 51.2"		Promedio X-Z = 13' 51.1"
				Margen = 1.2"
Lectura al blanco Z		Lectura al blanco Y		
Angulo	Distancia	Angulo	Distancia	
90° 25' 50.9"	23.043 m	90° 37' 10.2"	22.960 m <sup>*1</sup>	Z5-Y1 = -11' 19.3"
3*90° 25' 51.3"	23.043 m	90° 37' 09.2"	22.960 m <sup>*2</sup>	Z3-Y2 = -11' 17.9"
4*90° 25' 51.5"	23.043 m	90° 37' 09.2"	22.960 m <sup>*5</sup>	Z4-Y5 = -11' 17.7"
Promedio - Z = 90° 25' 51.5"		Promedio - Y = 90° 37' 09.5"		Promedio Z-Y = -11' 18.3"
				Margen = 1.6"

Cierre de campo = (Y-X)+(X-Z)+(Z-Y) = +0.4" Observe que 0.4" sobre una distancia medida de 23 m es aproximadamente igual a 0.000045 m.

\* Orden en el cual se tomaron las medidas.

## Determinación de Cierre del Error y Reducción de Datos

El registro y reducción de datos para el método SSTL de levantamientos de nivelación es un poco más engorroso que para el método SSL original. Se deben tomar las lecturas de la posición I y II (directo y reversa) y calcular el ángulo promedio. Las lecturas de temperatura y presión deben ser tomadas para corregir los datos de distancia. Dado que las líneas de vista son generalmente paralelas al suelo, las temperaturas se toman a la misma altura que el instrumento. Típicamente esta corrección sería muy pequeña, en el orden de décimas de milímetro, pero podría ser significativa bajo condiciones extremas.

Las diferencias de elevación entre el instrumento y los blancos son calculadas tomando el coseno del ángulo cenital y multiplicándolo por la distancia de la pendiente corregida (tabla 15.2). Una vez se obtienen las

diferencias de elevación entre los blancos, la reducción de datos procede igual como en el método original de Yamashita (capítulo 14) y reproducido como un ejemplo a continuación.

Si se dispone de una calculadora programable o una computadora portátil, se puede escribir un programa sencillo en BASIC para calcular el cierre exacto y realizar el resto de la reducción de datos en la estación. Para facilitar los cálculos mediante la reducción del número de datos que hay que ingresar, se calcula el ángulo cenital promedio a cada blanco para cada lado del triángulo (tabla 15.1) y se determina la diferencia de elevación usando los promedios (tabla 15.2). El resultado es el mismo si se calcula la diferencia de elevación para cada conjunto y después se toma el promedio.

Si no se dispone de una calculadora programable o computadora, los resultados del levantamiento pueden ser calculados en el mismo campo usando una calculadora sencilla, sin embargo este trabajo es laborioso.

## Ejemplo de Cálculo

En el siguiente ejemplo  $LY = 40.97$  m,  $LZ = 40.36$  m,  $\theta = 46.0^\circ$  y  $\phi = 102^\circ$ .

Diferencias del lado del triángulo (metros)

Y-X	0.01676 m
X-Z	-0.09169 m
Z-Y	0.07493 m (calculado)
Z-Y	0.07487 m (observado)
	-0.00005 m error de cierre

Este cierre es distribuido equitativamente sobre los tres tramos del triángulo. En este caso 0.00002 m sería añadido a este tramo.

Lectura Ajustada		Cambio (m)	Lectura Previa
6-Julio-88			30-Junio-88
Y-X 0.01678	$\Delta Y-X$	-0.00009	Y-X 0.01687
X-Z -0.09167	$\Delta X-Z$	0.00014	X-Z -0.09181
Z-Y 0.07489	$\Delta Z-Y$	-0.00001	Z-Y -0.07488

La versión reducida de ecuaciones de inclinación usando los valores de arriba:

$$\begin{aligned}\tau(N) &= (-0.0061(\Delta Y-X) - 0.0208(\Delta X-Z)) \cdot 10^6 \\ \tau(E) &= (-0.0288(\Delta Y-X) + 0.0215(\Delta X-Z)) \cdot 10^6 \\ \tau(N) &= (-0.0061(-0.00009) - 0.0208(0.00014)) \cdot 10^6 \\ &= -2.4 \\ \tau(E) &= (-0.0288(-0.00009) + 0.0215(0.00014)) \cdot 10^6 \\ &= +5.6\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{La magnitud en microradianes} &= \sqrt{N^2 + E^2} \\ &= \sqrt{-2.4^2 + 5.6^2} = 5.8\end{aligned}$$

$$\text{La orientación en grados} = \tan^{-1} \left( \frac{E}{N} \right) = \tan^{-1}$$

$$\left( \frac{5.6}{-2.4} \right) = 66.8$$

Si  $\tau N$  es positivo, el vector está en el norte, hacia abajo. Si  $\tau N$  es negativo, el vector está en la mitad del sur, hacia abajo. Si  $\tau E$  es positivo, el vector está en la mitad en oriental, hacia abajo. Si  $\tau E$  es negativo, el vector está en la mitad occidental, hacia abajo.

La orientación se mide de la abscisa en el cuadrante indicado.

Por lo tanto, la magnitud es 5.8  $\mu\text{rad}$  en una dirección S 66.8° E.

## Precisión

Para cuando se escribió este capítulo, el sistema SSTL basado en un T-2000, se ha estado usando como

**Tabla 15.2.** Las diferencias de elevación entre el instrumento y blanco calculadas multiplicando el coseno del ángulo cenital por la distancia de pendiente corregida.

[Ángulos cenitales y distancias de la tabla 15.1]

Diferencias de elevación	
Tramo Y-X	
Blanco Y	
(22.960 m) · cos(90° 37' 10.3")	= -0.24826 m
Blanco X	
(22.943 m) · cos(90° 39' 42.7")	= -0.26502 m
Y-X = 0.01676 m	
Tramo X-Z	
Blanco X	
(22.943 m) · cos(90° 39' 42.3")	= -0.26498 m
Blanco Z	
(23.043 m) · cos(90° 25' 51.2")	= -0.17329 m
X-Z = -0.09169 m	
Tramo Z-Y	
Blanco Z	
(23.043 m) · cos(90° 25' 51.2")	= -0.17329 m
Blanco Y	
(22.960 m) · cos(90° 37' 09.5")	= -0.24817 m
Z-Y = 0.07487 m	

por un año y medio. La figura 15.5 muestra una comparación de los componentes vectoriales de inclinación de un mismo triángulo, derivado de las medidas hechas con un sistema SSTL y un sistema SSL. Para poder tomar medidas frecuentes con el propósito de hacer comparaciones, se estableció un triángulo de inclinación en el estacionamiento del Observatorio Vulcanológico Cascades. En cuanto a la orientación y magnitud de la deformación aparente, los dos métodos dieron resultados bastante similares.

La precisión de este sistema, basado en teodolito, es un poco menor que la de un sistema basado en nivelación, pero como indicaron por Savage y otros (1979) y Sylvester (1978), los factores como inestabilidad de hitos y efectos topográficos hacen que la exactitud de las medidas de deformación de suelo con arreglos de hitos con aperturas pequeñas sean de sólo  $\pm 10 \mu\text{rad}$ , sin importar la precisión de la medida.

Hasta ahora, las pruebas de campo indican que, en un triángulo equilátero con lados de alrededor de 100 m, los resultados pueden ser reproducidos dentro de  $\pm 5 \mu\text{rad}$ .

**Tabla 15.3.** Las ventajas y desventajas relativas de los sistemas trigonométricos y de nivelación.

Sistema Trigonométrico	Sistema Basado en el Nivel
<b>Ventajas</b>	
Bien portátil	Fácil y sencillo para aprender
El mismo equipo puede ser usado para redes de EDM y triangulación	Equipo ampliamente disponible
Mayor flexibilidad en cuanto a la topografía	Equipo menos costoso
Arreglos más grandes de los hitos de los montajes únicos limitan los efectos de pequeñas inestabilidades de los hitos	El mismo equipo puede ser usado para nivelación geodésica de travesías largas
<b>Desventajas</b>	
Poco menos preciso	Arreglos con grandes aperturas requieren de más tiempo para medir en terrenos pendientes
Más caro por un factor de 2 a 3	Las miras de nivelación largas son difíciles para transportar.
Más difícil para comparar los datos de campañas anteriores en el campo	Sitios topográficamente aceptables son difíciles para encontrar en volcanes con pendientes fuertes y pueden no ser los más apropiados para propósitos de vigilancia
Reducción de datos un poco más complicada	Las aperturas más pequeñas de los arreglos de montaje único son más susceptibles a pequeñas inestabilidades de los hitos

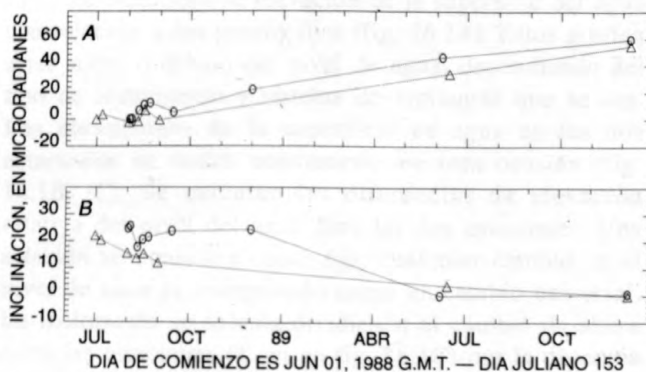
para cada uno de los componentes de inclinación sobre un período de meses. El sistema aún no ha sido probado en un volcán en el transcurso de una erupción, pero la precisión indicada está muy por dentro de la magnitud de la inclinación del suelo medida a menudo en volcanes activos. Por lo tanto, aunque un poco menos preciso que la instrumentación típicamente usada para nivelación geodésica, el sistema trigonométrico es apropiado para medir la inclinación del suelo en volcanes.

## RESUMEN

El sistema de nivelación trigonométrica de montaje único es una alternativa compacta para medir los cambios de inclinación del suelo en volcanes. Este sistema de nivelación permite a los vulcanólogos obtener datos de inclinación en sitios donde anteriormente no era factible y facilita mucho el trabajo en volcanes remotos donde el acceso es, a menudo, por jeep o a pie y el transporte de equipos grandes es difícil. Los arreglos triangulares de los hitos para SSTL pueden ser hasta cuatro veces más grandes que los arreglos de SSL, permitiendo así que se mida una línea de base más larga, e idealmente obteniendo una medida más precisa de la deformación vertical. Las ventajas y desventajas relativas del sistema trigonométrico y el sistema basado en nivel están enumeradas en la tabla 15.3.

El sistema descrito aquí también puede ser usado para medir líneas y redes pequeñas de trilateración (el EDM DI-5 puede medir 2.5 km a un solo prisma). Si se usa un EDM más poderoso, capaz de medir distancias de 10 km o más, conjuntamente con un teodolito de precisión, el resultado sería un sistema instrumental

capaz de desempeñar todas las tareas de vigilancia geodésica de volcanes. La desventaja más grande del sistema actual basado en un T-2000, o cualquier sistema de nivelación geodésica, es el costo. Los teodolitos de precisión son caros y un sistema completo, como que se describió aquí costó aproximadamente \$28,000 en 1986, mientras que un sistema SSL, como aquel descrito por Yamashita, costó \$10,000 en 1986. El costo mayor es parcialmente compensado por la versatilidad del sistema trigonométrico y el hecho que no se tienen que comprar instrumentos que solo sirven para medir la deformación vertical y horizontal.



**Figura 15.5.** Comparación de los componentes del vector de inclinación de un mismo triángulo, medida con métodos de nivelación y trigonometría. A, componente septentrional. B, componente oriental. Los triángulos representan el método SSTL, el círculo representa el método SSL.



## AGRADECIMIENTOS

El desarrollo del método de nivelación trigonométrica de montaje único se ha beneficiado de comentarios bien pensados y preguntas difíciles hechas por Dan Dzurisin (USGS/CVO) y Arnold Okamura (USGS/Observatorio Vulcanológico de Hawaii).

## REFERENCIAS CITADAS

- Buckner, R.B., 1983, Surveying measurements and their analysis: Rancho Cordoba, California, Landmark Enterprises, 275 p.
- Davis, R.E., Foote, F.S., Anderson, J.M., and Mikhail, E.M., 1981, Surveying theory and practice: New York, McGraw-Hill, 992 p.
- Dzurisin, D., Johnson, D.J., Murray, T.L., and Myers, B., 1983, Tilt networks at Mount Shasta and Lassen Peak, California: U.S. Geological Survey Open-File Report 82-670, 42 p.
- Eaton, J.P., 1959, A portable water-tube tiltmeter: Seismological Society of America Bulletin, v. 49, p. 301-316.
- Fiske, R.S., and Shepherd, J.B., 1990, Twelve years of ground-tilt measurements on the Soufriere of St. Vincent, 1977-1989: Bulletin of Volcanology, v. 52, p. 227-241.
- Floyd, R.P., 1978, Geodetic benchmarks: National Oceanic and Atmospheric Administration Manual NOS NGS 1, 55 p.
- Kinoshita, W.T., Swanson, D.A., and Jackson, D.B., 1974, The measurement of crustal deformation related to volcanic activity at Kilauea Volcano, Hawaii, *en* Civetta and others, eds., Physical volcanology: New York, Elsevier, p. 87-115.
- Lipman, P.W., Moore, J.G., and Swanson, D.A., 1982, Bulging of the north flank before the May 18 eruption — Geodetic data, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.R., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 143-155.
- McKee, C.O., Wallace, D.A., Almond, R.A., and Talai, B., 1981, Fatal hydroeruption of Karkar volcano in 1979: Development of a maar-like crater, *en* Johnson, R.W., ed., Cooke-Ravian volume of volcanological papers: Geological Survey of Papua New Guinea Memoir 10, p. 63-84.
- Newhall, C.G., 1984, Short-term forecasting of volcanic hazards, *en* Williams, M.E., and Kitzmiller, C., compilers, Proceedings, Geologic and Hydrologic Hazards Training Program: U.S. Geological Survey Open-File Report 84-760, p. 507-592.
- Otway, P.M., Grindley, G.W., and Hull, A.G., 1984, Earthquakes, active fault displacement and associated vertical deformation near Lake Taupo, Taupo volcano zone: New Zealand Geological Survey, Report 110, 73 p.
- Ruger, J.M., and Brunner, F.K., 1982, EDM-height traversing versus geodetic leveling: The Canadian Surveyor, v. 36, p. 69-88.
- Savage, J.C., Prescott, W.H., Chamberlain, W.H., Lisowski, M., and Mortensen, C.E., 1979, Geodetic tilt measurements along the San Andreas fault in central California: Seismological Society of America Bulletin, v. 69, p. 1965-1981.
- Sylvester, A.G., 1978, The dry tilt method of measuring crustal tilt, *en* Proceedings, Conference VII, Stress and Strain Measurements Related to Earthquake Prediction: U.S. Geological Survey Open-File Report 79-370, p. 544-568.
- Van der Laat V., R., 1982, El inclinometro seco: Un vigilante de la deformacion ligada al vulcanismo activo en Hawaii: Boletin de Vulcanologia de Universidad Nacional de Costa Rica, no. 12, p. 11-17.
- Whalen, C.T., 1984, Preliminary test results of precise trig-leveling with the Wild T200-DI5 system: American Congress on Surveying and Mapping Bulletin, December, p. 15-18.
- Yamashita, K.M., 1981, Dry tilt: A ground deformation monitor as applied to the active volcanoes of Hawaii: U.S. Geological Survey Open-File Report 81-523.

# 16. Vigilancia del Nivel de Agua en Lagos como Herramienta para Estudiar la Deformación de la Corteza

Por Jack W. Kleinman y Peter M. Otway<sup>1</sup>

## Abstracto

Un lago puede ser usado como un inclinómetro natural grande, mediante la medición del cambio en la elevación del agua superficial relativa a hitos estables colocadas en dos o más sitios cercanos. Los sistemas diferenciales de medida pueden ser portátiles o instalados permanentemente. La precisión de cualquiera de los dos sistemas es directamente proporcional al tamaño del lago; la resolución de inclinación aumenta con el tamaño del lago. Los sistemas permanentes pueden medir con exactitud el nivel de agua dentro de 0.5–1 mm, el equivalente de 0.5 a 1.0 microradián en un lago pequeño (1-km de ancho). Aunque el sistema portátil puede lograr una precisión similar en lagos más grandes, su precisión en un lago pequeño es de 1–3 microradianes, dependiendo de las condiciones ambientales del momento. Factores como condiciones de viento, seiches, precisión del instrumento, efectos barométricos y de temperatura y estabilidad de los hitos necesitan ser tomados en consideración cuando se toman datos de niveles de lagos.

## INTRODUCCION

La vigilancia de la deformación regional de la corteza puede servir para evaluar intranquilidad volcánica. Un lago localizado dentro del área de deformación de la corteza presenta una oportunidad única de vigilancia. Este capítulo presenta los principios de la vigilancia de los niveles del agua de los lagos para detectar la deformación de la corteza, describe varios tipos de sistemas y explica fuentes comunes de error asociadas con esta técnica. El propósito es dar un repaso para alguien interesado en iniciar un programa de

vigilancia de nivelación de lagos. Sin embargo, se debe enfatizar que cada lago es único; se tendrán que adaptar las técnicas de vigilancia a cada situación.

## PRINCIPIOS

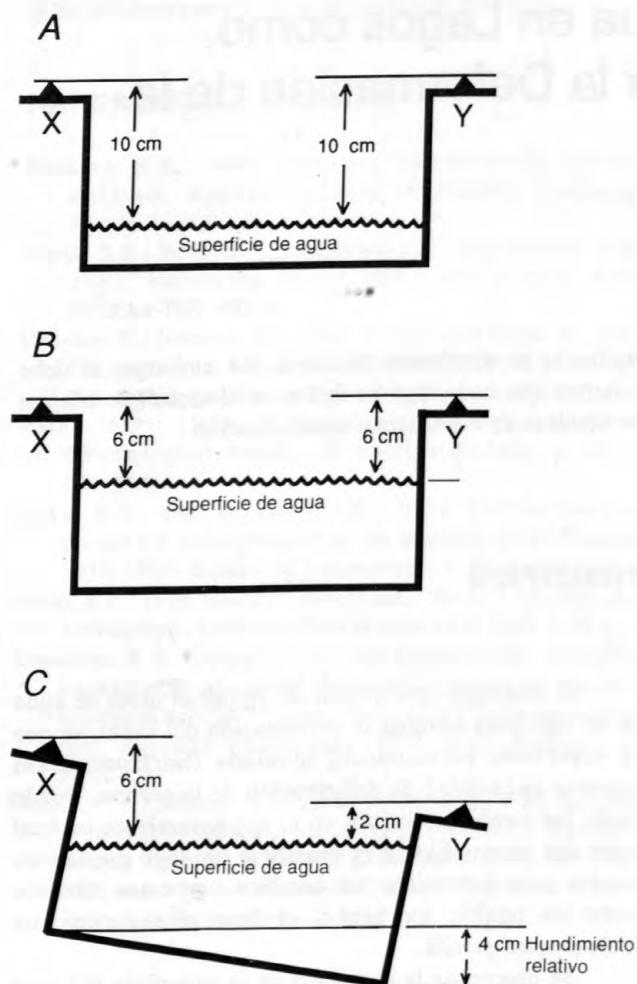
El principio operacional de vigilar el nivel de agua en un lago para estudiar la deformación del suelo, es que la superficie permanecerá nivelada (horizontal) sin importar la cantidad de deformación de la corteza. Por lo tanto, los cambios relativos en el desplazamiento vertical entre dos puntos fijos y la superficie del lago pueden ser usados para determinar los cambios verticales relativos entre los puntos. De hecho, el lago se usa como un inclinómetro grande.

Se determina la elevación de la superficie del agua con relación a dos puntos fijos (fig. 16.1A). Estos pueden estar sobre o debajo del nivel de agua, dependiendo del tipo de instrumento y sistema de vigilancia que se usa. Las elevaciones de la superficie de agua en las dos estaciones se miden nuevamente en otra ocasión (fig. 16.1B, C). Se calculan las diferencias de elevación relativa del nivel del agua para las dos estaciones. Una estación se considera como fija; cualquier cambio en el nivel de agua es interpretado como un cambio universal. La inclinación se calcula dividiendo el cambio de altura entre las estaciones (4 cm en fig. 16.1C) por la distancia entre las estaciones ( $1 \text{ mm/km} = 1 \text{ } \mu\text{rad}$ ).

Note que el desplazamiento en cualquier estación puede ser medido solamente relativo a otra estación en el mismo lago. Por lo tanto, una vigilancia del nivel de agua en lagos no puede detectar una deformación vertical que afecta a todo el lago de igual manera. En un lago

<sup>1</sup>New Zealand Geological Survey, Department of Scientific and Industrial Research, Private Bag, Taupo, New Zealand

grande con muchas estaciones instrumentales, se pueden reconocer áreas locales de levantamiento o subsidencia.



**Figura 16.1.** Diagrama idealizado ilustrando los principios de nivelación de lago. El fondo del lago es rectangular en perfil. Los triángulos X y Y representan dos puntos fijos de referencia en la orilla. A, medida inicial de la diferencia de elevación entre los puntos X y Y y la superficie del agua. Para este ejemplo, los dos son igual a 10 cm. B, Nueva medida en una fecha posterior revela que la diferencia de elevación entre los puntos X y Y ahora es de 6 cm, indicando una subida universal del nivel de agua de 4 cm. No ocurrió una inclinación que se pudiera detectar entre los puntos X y Y. C, Nueva medida en una fecha posterior revela 6 cm de diferencia de elevación en el punto X y 2 cm en el punto Y. Comparado con la medida inicial y usando la estación X como un punto de referencia fija, ha habido una subida universal del nivel del lago de 4 cm. En la estación Y, hay una diferencia de elevación de 8 cm, de los cuales 4 cm se deben a un cambio universal en el nivel de agua y 4 cm es debido a una subsidencia de Y en relación a X.

## LOCALIZANDO ESTACIONES PARA LA MEDICIÓN DEL NIVEL DE AGUA EN LAGOS

El tamaño y la forma de un lago, la precisión de medida requerida y la extensión de deformación esperada determinan la configuración óptima de la red. La consideración más importante es la distancia entre las dos estaciones. La exactitud de la medida del nivel de agua en un lago está limitada principalmente por la precisión con la cual se pueda medir el nivel medio de la superficie del agua. Un componente grande del error en la determinación del nivel relativo de agua es aproximadamente igual en todas las estaciones de medición; por lo tanto, mientras mayor sea la distancia entre las estaciones, mayor será la resolución de la inclinación del suelo. Por esta razón, los lagos más grandes son mejores para vigilar que los más pequeños.

La deformación de la corteza es más fácil detectar si la línea entre las estaciones está orientada radialmente a la sospechada fuente de deformación. Por esta razón, un lago grande y angosto orientado de manera tangencial con respecto al volcán u otra fuente de deformación no sería favorable para detectar inclinación, aún si la distancia entre las estaciones de medida fuera grande. Por ejemplo, si dos puntos se hunden o levantan de igual manera, esta inclinación pasaría desapercibida si no se medirían otras estaciones. Por lo tanto, las estaciones deben estar localizadas a distancias diferentes de la sospechada fuente de deformación.

El número de estaciones en un lago debe ser incrementado de acuerdo con la cantidad de deformación. Si está ocurriendo una inclinación a lo largo de un eje, dos o tres estaciones de medida bien separadas pueden ser suficiente. Si la escala de deformación es menor que el lago o bastante compleja, estaciones adicionales de medida facilitarían la detección de las áreas locales de deformación.

El Yellowstone Lake en Wyoming, USA, donde ha habido un programa de vigilancia del nivel de agua en un lago desde 1987, es un buen ejemplo de una configuración de red (fig. 16.2). El borde de la caldera Yellowstone cruza por la parte sur del Yellowstone Lake. Una de las estaciones de medición fue establecida fuera de la caldera. Cualquier deformación dentro de la caldera puede ser detectada haciendo comparaciones con la estación localizada fuera de la caldera.

Para calcular una inclinación sencilla en un lago largo y angosto, es suficiente tener dos estaciones de medida, una en cada extremo. En el San Andreas Lake en California (lugar donde ha habido un programa de vigilancia del nivel del lago desde 1979), que es un lago de ese tipo, hay dos estaciones solamente (Mueller y otros, 1989). Se podrían instalar estaciones adicionales



entre los puntos finales para ayudar a diferenciar entre inclinaciones regionales y locales.

Un tercer ejemplo es el Lake Taupo en Nueva Zelanda, donde existe, desde 1979, un programa de nivel de lago (Otway, 1986a, 1986b y 1989). En ese estudio, se vigilan 22 estaciones diferentes 4-8 veces por año (fig. 16.3). La deformación de la corteza que ocurre en la región es extensa y se pueden hacer hasta curvas de nivel dado el gran número de estaciones de medición (fig. 16.4).

Tanto en los lagos San Andreas y Taupo, se realizan los estudios principalmente para determinar la deformación de la corteza asociada con las zonas de fallas activas, aunque en Taupo se sospecha que existe una influencia magmática profunda. Las técnicas de vigilancia son igualmente aplicables a lagos localizados en áreas donde la deformación volcánica es la preocupación principal.

## TIPOS DE SISTEMAS DE MEDICION DE LAGOS

Hay dos tipos de sistemas generales que pueden medir la altura del agua para una vigilancia del nivel de lagos: permanentes y portátiles. Común a los dos es un medidor que permite la medida exacta del nivel de agua. En un sistema permanente, se monta el medidor en el lago y se registra regularmente el nivel de agua. En un sistema portátil, el medidor se instala en una estación, se registran los datos y después se lleva el medidor a otro lugar.

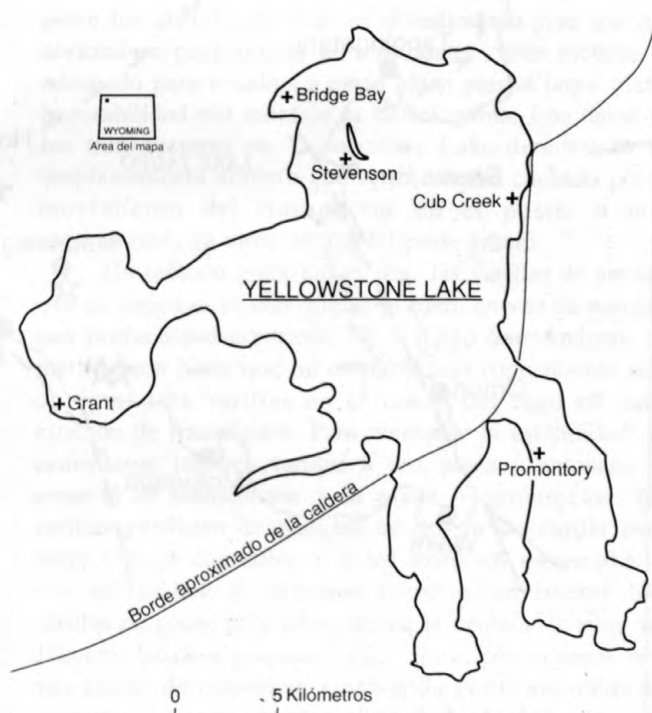
### Sistemas Permanentes

#### Instrumentación

Un instrumento comúnmente usado para medir el nivel de agua es un transductor de presión que mide la presión debida al peso de una columna de agua sobre ella. Está sujeto a errores causados por la falta de linealidad, variaciones de temperatura y derivas a largo plazo. Un transductor tiene que ser cuidadosamente seleccionado en base de las especificaciones del fabricante y probado bajo condiciones apropiadas para uso de campo. Otro instrumento es un sensor de ultrasonido, que está colocado en un pozo amortiguador para registrar la distancia vertical entre la cabeza del sensor y la superficie del agua.

La vigilancia de los lagos San Andreas y Yellowstone se realiza con sistemas permanentes. Para el estudio del Lago San Andreas se usan transductores de presión Paroscientific Modelo 8020 escogidos por su estabilidad y exactitud a largo plazo (Mueller y otros,

1989). Cada transductor tiene un alcance dinámico del nivel de agua de 20 m, el mismo que se necesita porque el Lago San Andreas es un reservorio artificial y puede sufrir grandes fluctuaciones de volumen. Actualmente, para el estudio de Yellowstone se usan transductores sumergibles de presión Validyne Modelo P307 que tienen un alcance dinámico de 3 m y una exactitud estimada en  $\pm 0.5\%$ . El personal del Cascades Volcano Observatory (CVO) planifica mejorar el sistema actual del programa de Yellowstone mediante la instalación de transductores de Paroscientific que tienen una exactitud de  $\pm 0.01\%$  y una repetitividad de  $\pm 0.0005\%$  (el equivalente de 1 mm de error cuando se miden 10 m de agua), similar a aquellos usados para el estudio del Lago San Andreas. Los transductores de presión para vigilar los niveles de lagos necesitan ser lo suficientemente buenos para dar medidas repetitivas y estables que tengan una exactitud de unos pocos milímetros. Varios transductores, bastante más baratas, con menor exactitud ( $\pm 2.0\%$  linealidad y  $\pm 0.15\%$  repetitividad, el equivalente de un error de 200 mm en una medida de 10 m) también han sido utilizados pero se estimó que no eran



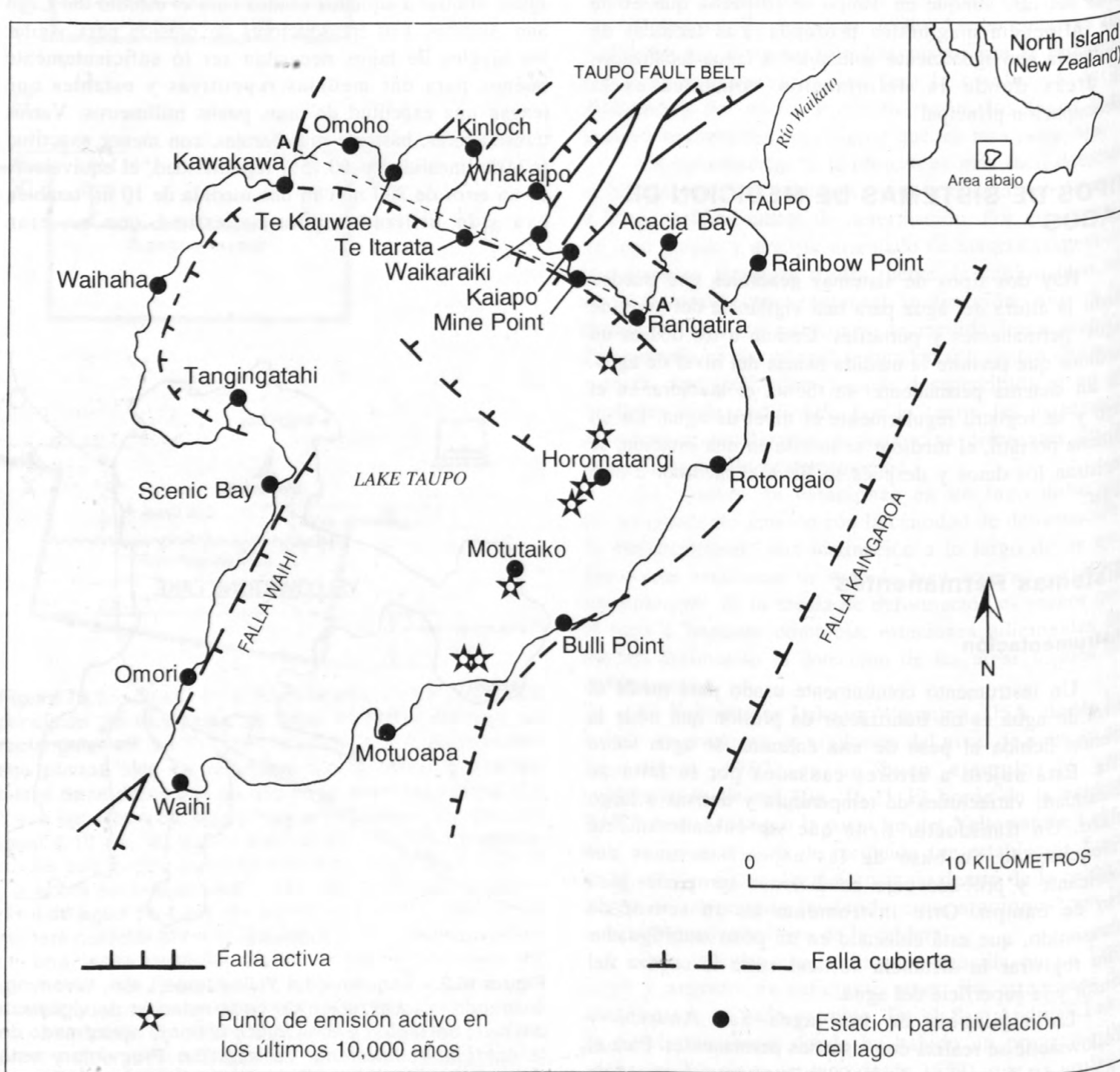
**Figura 16.2.** Esquema del Yellowstone Lake, Wyoming, ilustrando la localización de cada estación de vigilancia del nivel del lago. La línea indica el borde aproximado de la caldera Yellowstone. La estación Promontory está localizada fuera de la caldera y se usa como un punto de referencia para los cambios de elevación en las otras estaciones.

apropiados para la vigilancia de niveles de lago, aún después de una rigurosa calibración.

### Prueba y calibración

Los transductores deben ser probados antes de ser instalados. Después de colocar un transductor en el agua y leer la señal de salida, la profundidad debe ser alterada para que la diferencia resultante en la señal de salida corresponda al cambio de la profundidad del agua. Si es posible, se deben realizar pruebas diferenciales a lo largo

del alcance completo de profundidad del transductor y sobre el rango apropiado de temperatura para la aplicación del campo. Si se usa más de un transductor, todos deben ser probados al mismo tiempo. Si las curvas de salida varían mucho, uno o más de los transductores no está funcionando bien. Las pequeñas variaciones entre las curvas, pueden, sin embargo, ser calibradas y corregidas. La mayoría de los transductores de alta calidad vienen calibrados de fábrica, sin embargo este procedimiento es muy recomendado para confirmar que están funcionando correctamente.

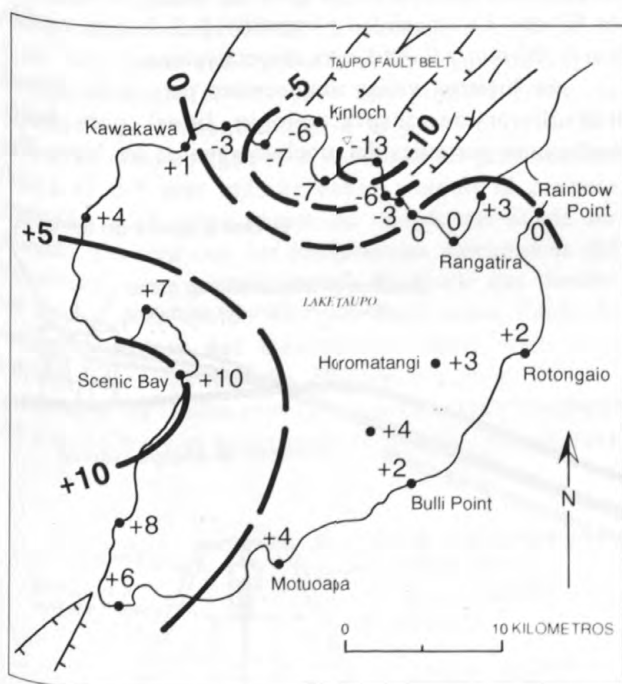


**Figura 16.3.** Lake Taupo, Nueva Zelandia, ilustrando la localización de las estaciones de vigilancia del nivel del lago como también el Taupo Fault Belt y otras fallas locales.

## Instalación

Después de escoger los sitios para las estaciones permanentes, el primer paso a seguir para el establecimiento de una instalación permanente de un programa de vigilancia del nivel del lago es instalar los transductores de presión. Los transductores seguramente se dejarán en la estación por largos períodos y por lo tanto, estarán sujetos a fluctuaciones estacionales en el nivel del lago. El nivel de agua del Yellowstone Lake, por ejemplo, fluctúa aproximadamente 1-2 m anualmente. El transductor de presión debe ser montado (1) para que permanezca debajo del agua durante el período de nivel bajo de agua, (2) debajo de la base de la ola para que no sea dañada por las olas cuando rompen, y (3) debajo de la profundidad común de congelamiento invernal para que no sea movido o dañado por el hielo. Los transductores en Yellowstone Lake están instalados alrededor de 1 m debajo del nivel de agua.

El método usado para conectar los sensores al fondo depende de las características de la pendiente y el material de la costa. Para los métodos descritos aquí no



**Figura 16.4.** Deformación vertical (en milímetros) alrededor del Lake Taupo, Noviembre 7, 1987, a Noviembre 9, 1988. Patrón anual de deformación "típica" en Lake Taupo indica que la parte central del Taupo Fault Belt se está hundiendo sin una sismicidad asociada a una tasa promedio relativo de casi 10 mm/año desde que ocurrió un enjambre sísmico grande y un evento de deformación en 1983 (fig. 6.11). La parte austral de la superficie del lago ha estado sometido a episodios frecuentes de deformación de corta duración desde ese tiempo, a veces asociada con una sismicidad pequeña.

se necesitan taladros hidráulicos, ni otra maquinaria pesada, que comúnmente es prohibitivo por su costo o intereses ambientales. Los transductores tienen que ser fijados y estar localizados de tal manera que no sean afectados por los fenómenos superficiales del agua. Los transductores son más estables si pueden ser sujetadas a roca dura a suficiente profundidad en el sitio escogido. Un sitio perfecto sería un acantilado vertical de roca dura en la costa donde se podrían perforar huecos bajo agua y colocar al transductor con pernos de anclaje. Si no se pueden taladrar huecos bajo agua, el transductor podría ser conectado al final de un pedazo de hierro en ángulo, y al otro lado (proyectando fuera del agua) podría ser conectado a roca dura. Otro método es cimentar el transductor a la roca dura. Un cemento de fraguado rápido trabaja mejor cuando se tira debajo de agua. Las grietas e irregularidades en la roca ayudan que se adhiera mejor el cemento a la roca. Como todos los sitios son diferentes, se necesita usar el sentido común e ingeniosidad. Los lagos localizados en áreas volcánicas pueden ser muy ácidos; los materiales para el anclaje y encerramiento de la instrumentación deben ser apropiados para las condiciones químicas del lago.

Comúnmente, los fondos de los lagos están cubiertos por sedimento, como en los lagos Yellowstone y San Andreas. En varios sitios en Yellowstone Lake, un poste fue introducido 2 m en el sedimento y se usó una abrazadera para sujetar el transductor. Este método es adecuado para estudios a corto plazo pero a largo plazo, la estabilidad del montaje es cuestionable. Los datos de los transductores en Yellowstone Lake demuestran un desplazamiento abrupto que se piensa fue causado por el movimiento del transductor en el poste, o más seguramente, un movimiento del poste entero.

Un método preferido es usar las varillas de anclaje que se entierran lo más que se pueden, en vez de escoger una profundidad arbitraria. En el Lago San Andreas, se martillaron hasta que no entraron más (típicamente más de 4 m) tres varillas en el fondo del lago en cada estación de transductor. Para aumentar la estabilidad, se cementaron las tres varillas a una placa y entonces se conectó el transductor a la placa. Comúnmente, las varillas consisten de pedazos de 1.5 m de varilla para tierra forrada con cobre con los extremos enroscados o tubo galvanizado de cualquier diámetro conveniente. Las varillas de cobre para tierra tienen la ventaja de tener un diámetro bastante pequeño (1.25 cm) y, por lo tanto, son más fáciles de introducir. Una varilla puede ser unida de un extremo a otro usando un acoplamiento de manguito enroscado (ver también Doukas y Ewert, capítulo 11).

La batería y registrador o el equipo para la telemetría del transductor se colocan en la orilla, y con un cable eléctrico y otro de datos se conectan al transductor (fig. 16.5). Todos los cables deben ser enterrados en un conducto para protegerlos de las olas,



escombros, animales y vándalos. Algunos transductores usan la presión atmosférica como referencia y pueden requerir una manguera de conducción "seca" que conecta el transductor a la atmósfera.

### Recolección de datos

Los datos de los sistemas permanentes de medición del nivel de lagos pueden ser recolectados usando un registrador en el terreno o pueden ser enviados por telemetría a una estación central de registro. Los sistemas de telemetría pueden aprovechar el satélite GOES para la telemetría (como se usa actualmente en el Lago San Andreas) o un receptor de discado (como se usa actualmente en el Lago Yellowstone). Una descripción más detallada de los sistemas de telemetría aplicables se encuentra en otros capítulos de este boletín.

### Sistemas Portátiles

Se presentan dos tipos de medidores portátiles, uno usado por los científicos del CVO y el otro usado en el Lake Taupo, Nueva Zelandia, que pueden ser usados para hacer una vigilancia portátil. El sistema del CVO está en la fase experimental y usa un sensor de posición electrónica lineal para medir los niveles de agua en los

lagos. El sistema que se usa en el Taupo depende principalmente de lecturas manuales.

### El Sistema del CVO

#### Instrumentación

El sistema portátil del CVO usa un transductor de desplazamiento lineal en vez de un sistema con transductores de presión usado en sistemas permanentes. El transductor de desplazamiento lineal de Temposonics reclama una linealidad de 0.05%, una repetitividad de 0.001% y ninguna deriva instrumental. El instrumento mide con precisión el intervalo de tiempo entre un pulso electromagnético interrogante transmitido por una varilla adjunta (el transductor de guía de ondas) y un pulso electromagnético de retorno generado por un imán permanente externo flotante (fig. 16.6). Este intervalo de tiempo correlaciona directamente con la posición del imán exterior a lo largo del transductor de guía de ondas. El alcance dinámico del instrumento depende de la longitud del transductor de guía de ondas, en este caso de 60 cm. La linealidad y repetitividad de este modelo son 0.305 mm y 0.0061 mm, respectivamente.

Se hicieron varias adaptaciones para poder usar el transductor de desplazamiento lineal para hacer mediciones portátiles del nivel de agua en los lagos (fig.

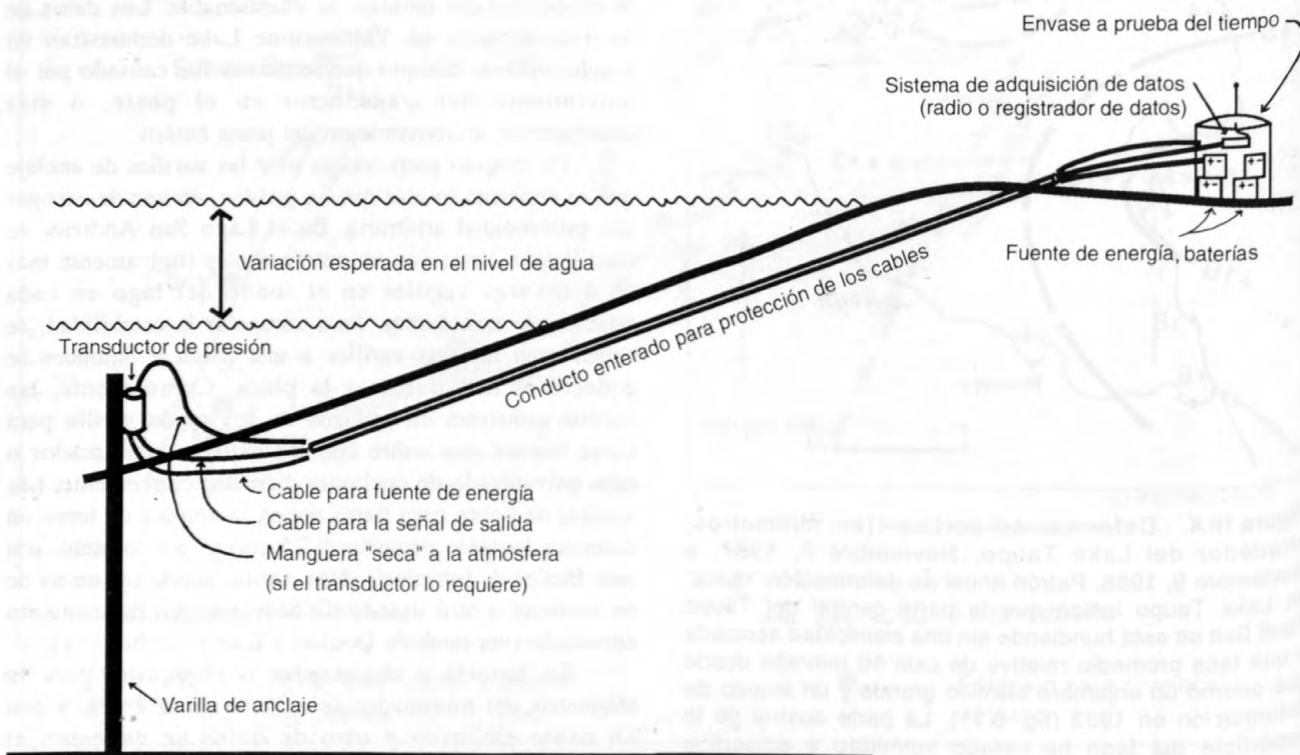
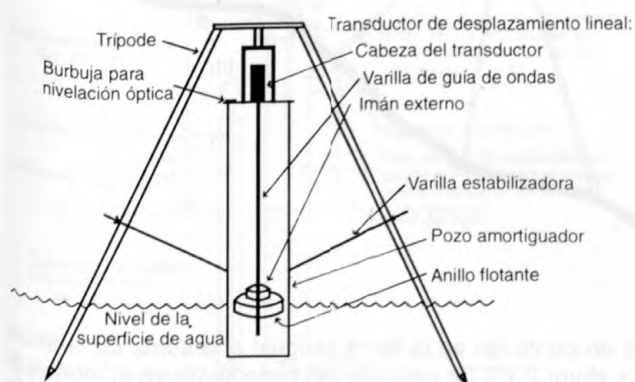


Figura 16.5. Esquema de un sistema de vigilancia de nivel de lago instalado permanentemente.

16.6). Para tener una referencia exacta del nivel de agua, se monta el imán exterior en un anillo flotante. Para minimizar los efectos de las olas, se añadió un pozo amortiguador alrededor de la varilla de guía de ondas del transductor. Se diseñó y fabricó una unidad para montar verticalmente el sistema completo (transductor de desplazamiento lineal, imán externo y pozo amortiguador) en un trípode estándar. Se tomó mucho cuidado para orientar el transductor verticalmente, porque una desviación de tan solo  $3-4^{\circ}$  podría causar un error de alrededor de un milímetro. Un trípode con una cabeza en forma de domo (el sistema Kern) fue usado para que el ensamblaje entero pudiera ser rotado y ajustado en la posición vertical deseada usando un nivel de burbuja atada a la placa horizontal de la base de la unidad de montaje.

### Calibración

El transductor de desplazamiento lineal, igual que el transductor de presión, debe ser calibrado antes y después de cada campaña de campo. Un método de calibración requiere de un envase alargado en el cual se pueden medir con exactitud los cambios en el nivel de agua. Mediante una tubería, el agua puede correr libremente entre el envase y una probeta graduada adjuntada permanentemente a la parte exterior del envase. El nivel de agua en el envase se lee precisamente (hasta el 0.5 mm más cercano) usando la probeta graduada, y el rango entero del transductor puede ser probado. La caja con los componentes electrónicos del transductor tiene potenciómetros de ajuste que pueden ser usados para ajustar el punto nulo y una salida de escala completa del transductor. Otra técnica de calibración es fabricar dos pedazos diferentes de tubo que pueden ser usados como espaciadores entre la cabeza del transductor y el anillo magnético. Todos los sensores



**Figura 16.6.** Instrumentación para el sistema portátil del CVO. Se usa un trípode estándar de agrimensura para sujetar el medidor.

usados en este estudio entonces pueden ser calibrados para tener la misma salida con cada espaciador.

### Procedimiento de medida

Como parte del procedimiento para determinar el nivel de agua en el lago con un sistema portátil, el trípode se estaciona y el transductor y pozo amortiguador son montados verticalmente usando la unidad de montura fabricada. La profundidad del agua no es crítica siempre y cuando la superficie del agua está dentro de los 60 cm del transductor de guía de ondas. Las tres varillas enroscadas (ver fig. 16.6) que conectan el extremo inferior del pozo amortiguador a las patas del trípode ayudan a estabilizar la unidad debajo del trípode.

Una batería de 12 voltios en la orilla alimenta el transductor. Se programa una computadora portátil para registrar los datos de salida del transductor y también puede regular la frecuencia de muestreo. Alternativamente, los datos de salida del transductor pueden ser registrados manualmente a intervalos regulares con un voltímetro. El tiempo que se necesita y el intervalo de muestreo usado para obtener una salida de voltaje del transductor que sea representativa del nivel del lago depende de la aplicación específica y del período de oscilación de los seiches. El nivel final del agua en el lago es un promedio de los valores de salida del transductor durante uno a tres períodos completos de seiches. Cuando se comienza un programa de vigilancia, las medidas iniciales deben ser hechas frecuentemente sobre largos períodos de tiempo hasta entender las dinámicas del lago lo suficientemente bien como para escoger el período de muestreo eficiente y la frecuencia requerida para una medida exacta.

Con este sistema portátil de vigilancia se tienen que hacer dos medidas diferentes. Se mide el nivel de la superficie del agua con un transductor de desplazamiento y se mide la posición vertical del transductor en relación con un punto de referencia en la orilla (fig. 16.7). La altura de la cabeza del transductor sobre la superficie de agua (el nivel del anillo del imán flotante) es la señal de salida promediada del transductor (1 en fig. 16.7). Hay una correlación entre el valor de salida del transductor de desplazamiento calibrado (promediado de uno a tres períodos de seiches como se discute arriba) y esta altura. La distancia vertical desde la cabeza del transductor hasta la parte arriba del trípode (2 en fig. 16.7) debe ser constante para cada montaje. Una sección de una varilla de nivelación de fibra de vidrio está montada en el trípode. Entonces, se pueden usar las técnicas de nivelación estándar para determinar la altura entre la parte superior del trípode y el punto de referencia (3 en fig. 16.7). Es más fácil tomar la medida si el punto de referencia, preferiblemente un hito cimentado en roca firme o en un peñón grande, está lo más cerca posible a

la costa y dentro del alcance de altura de la varilla de nivelación en el trípode.

Este procedimiento se repite en cada estación alrededor del lago. Idealmente cada estación tendría un medidor, para que los datos pudieran ser recolectados sincrónicamente en todas las estaciones. Alternativamente, se pueden usar dos conjuntos de equipos, uno operativo durante el período completo de medición y el otro que se movería a las diferentes estaciones. Con este método se minimizarían los errores debido a la alimentación y fogueo del lago durante el período de medición. Si límites presupuestarios o de personal impiden el uso de este método, los cambios en la alimentación del reservorio pueden ser verificados mediante una medida del punto de partida al comienzo y final de cada día de medición. Cualquier inclinación del suelo seguramente sería muy pequeña en un período tan corto de tiempo, y cualquier cambio del nivel de agua en el lado en la primera estación probablemente se pudiera atribuir a la entrada o salida de agua del lago. Sin embargo, se sacrificará exactitud cuando se lleva a cabo un programa de vigilancia con solamente un instrumento.

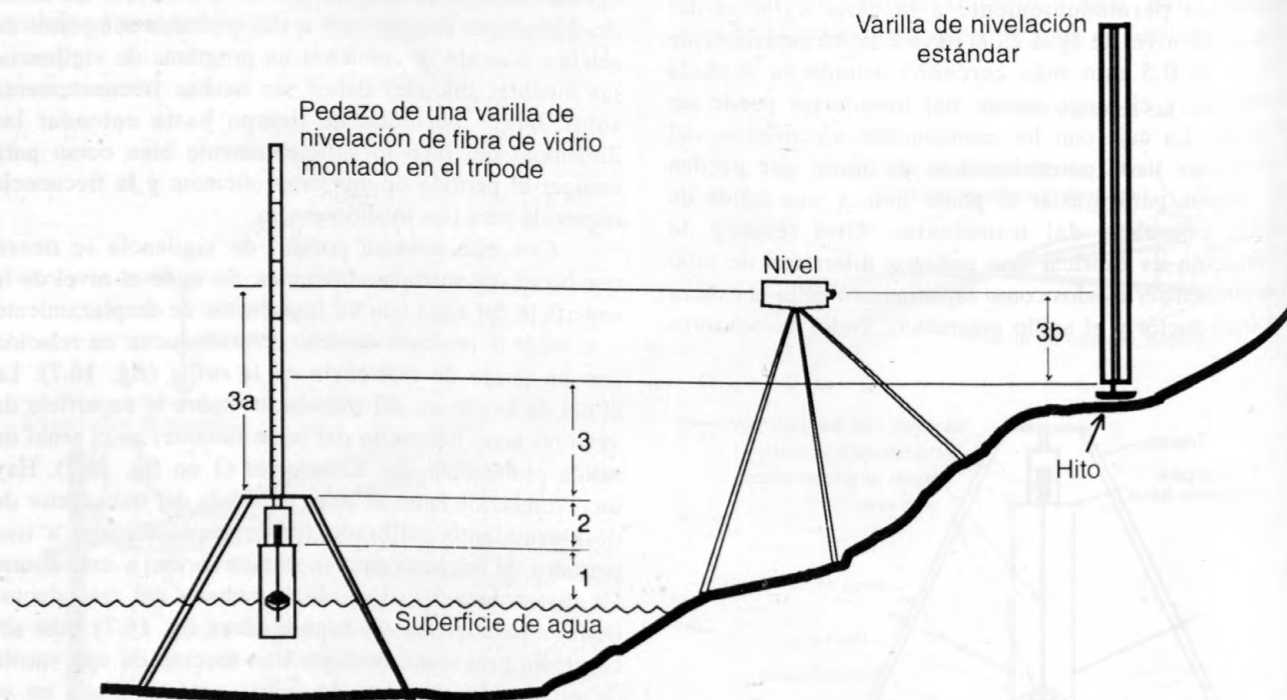
Muchas veces las medidas en sí pueden ser completadas por una persona equipada con una computadora personal mientras se registran la salida del

transductor o entre las lecturas manuales, para que el tiempo total en cada estación no sea mayor que aquel que se necesita para medir el nivel de agua. Dependiendo del número de estaciones, su acceso y la proximidad a los hitos, se puede completar una campaña en un tiempo que varía de uno a cuatro días transductores (eso es en menos días si se usan dos o más transductores concurrentemente).

## Sistema Taupo

### Instrumentación

El medidor del nivel de agua consiste en un cilindro de hierro galvanizado de 0.6 m de largo y 50 mm de ancho (fig. 16.8). El cilindro se cuelga verticalmente desde un gancho en una cadena y se llena con agua a través de un orificio de 1.5 mm, actuando efectivamente como un pozo amortiguador eliminando los efectos de olas normales (amplitud menor a 0.5 m). Cuando la válvula está cerrada, el medidor puede ser levantada y el nivel de agua al interior puede ser leído a nivel de los ojos dentro de 1 mm, por medio de un conjunto de tubos claros contra una escala localizada



**Figura 16.7** La elevación de la superficie del agua relativa a un punto fijo en la tierra es igual a la suma de la altura 1 (elevación de la superficie de agua relativa al transductor) y altura 2 y 3 (la posición del transductor en sí relativa al hito). La altura 1 es la altura de la salida medida por el transductor. Altura 2 es la longitud constante de la unidad de montaje. Altura 3 es la altura medida al hito usando técnicas estándares de nivelación. En este ejemplo, altura 3 es igual a la altura 3a (altura del nivel relativa a la varilla de nivelación montada en el trípode) menos la altura 3b (altura del nivel relativa a la varilla de nivelación en el hito).

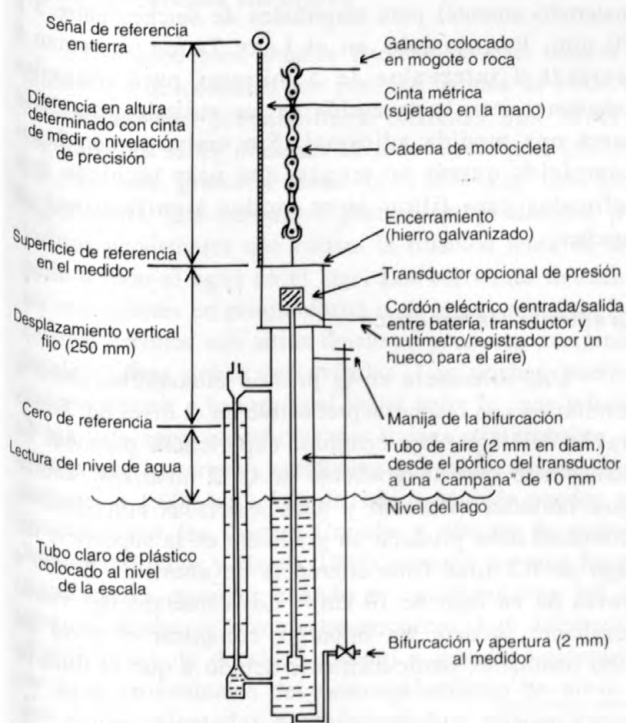


fuera del medidor. Para mejorar el sistema se montó un transductor de presión (Honeywell Switch 163PC) encima del medidor con un pórtilco extendiéndose debajo del nivel de agua y el otro abierto hacia la atmósfera; esto proporciona una lectura eléctrica capaz de ser registrada automáticamente.

Se conecta una cadena al medidor para colgar la unidad en cada estación. Una estación consiste de un gancho y una señal de referencia colocada en un muelle o puente o en un acantilado. También se puede usar un hito colocado en la orilla si el medidor se suspende de un trípode que se monta temporalmente en el agua somera, similar al montaje con el transductor de desplazamiento lineal.

## Procedimiento

El medidor se cuelga de un gancho localizado en cada estación o desde un trípode montado en agua somera. Se coloca el medidor en el eslabón apropiado de la cadena de suspensión para que quede aproximadamente medio sumergido. La válvula se abre y se deja que el medidor se establezca por varios minutos. Las lecturas se toman ópticamente cada 5 minutos o electrónicamente cada 2.5 minutos por un período de 30 minutos (un ciclo del seiche típico en el Lake Taupo). Las lecturas son revisadas para detectar anomalías obvias antes de proseguir a la próxima estación. La diferencia



**Figura 16.8.** Medidor portátil del nivel de agua usado en el Lake Taupo. Modificado de O'way (1989).

en altura entre la superficie horizontal en la parte superior del medidor y el punto de referencia en el monumento, roca o suelo superior se obtiene con una cinta métrica o mediante nivelación de precisión. La suma de las diferencias de altura y la lectura del medidor manual es igual a la diferencia de elevación entre la superficie de agua y el punto de referencia. Donde se puede, los puntos de referencia están enlazados con hitos cercanos mediante nivelación de precisión y se revisan periódicamente para detectar una posible inestabilidad.

Como con el sistema del CVO, el observador empieza y termina las observaciones en la estación de origen. Antes de la introducción de medidores de registro continuo en 1987, el medidor manual se usaba para determinar el nivel de agua al principio y final de cada día de trabajo. El nivel del lago a la hora de cada observación alrededor del lago se derivaba entonces mediante interpolación que asumía una respuesta lineal durante el día. Actualmente, se usa el medidor con registro continuo en el origen y el nivel del lago se calcula asumiendo una regresión lineal de los datos registrados.

## FUENTES POTENCIALES DE ERROR

Los datos de estudios actuales del nivel de agua en lagos demuestran una característica particular de los lagos; su nivel fluctúa continuamente. Además de las fluctuaciones naturales, los errores de medida resultan en estimados inexactos del nivel del lago. Con cuidado, paciencia y experiencia la mayoría de los errores pueden ser evitados o minimizados y las fluctuaciones de la superficie de agua pueden ser tomadas en consideración.

## Errores Naturales

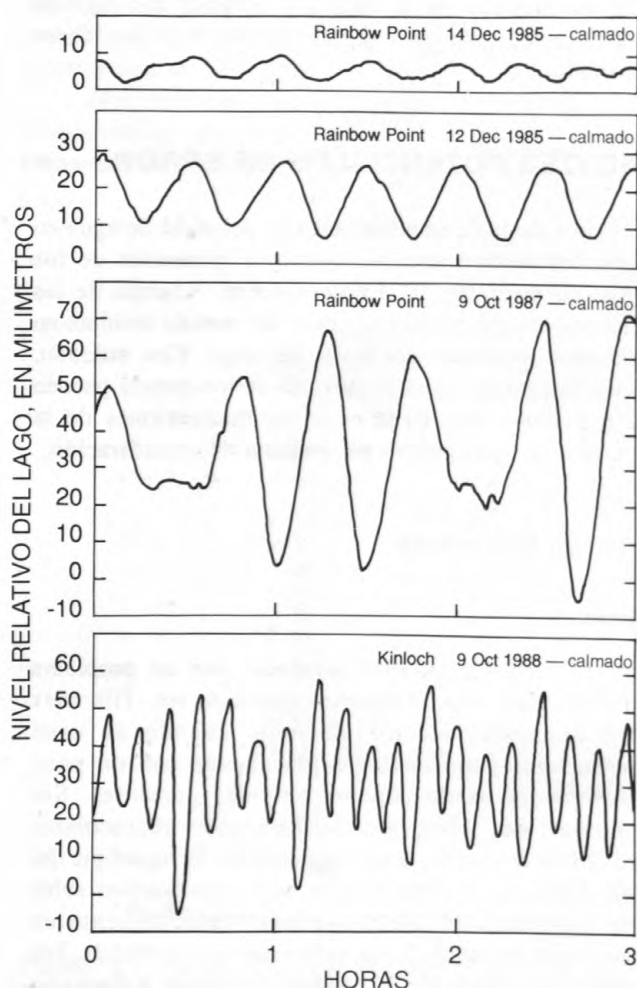
### Viento

El viento y las olas asociadas son un problema natural. Las olas pequeñas pueden ser filtradas adecuadamente, electrónicamente cuando se usan transductores permanentes o físicamente con un pozo amortiguador usado con los sistemas portátiles. Sin embargo, las olas grandes pueden obstaculizar mediciones confiables de la elevación de la superficie del agua. Las olas empujadas por el viento pueden subir apreciablemente el nivel del lago, especialmente en bahías someras; el efecto es menor en agua profunda. Por ejemplo, un viento de 12 nudos (empiezan a formarse cabrillas pequeñas) en el Lake Taupo, que tiene aproximadamente 40 km de largo y más de 100 m de profundidad, ha sido modelado y se ha observado la producción de una pendiente de superficie de  $0.07 \mu\text{rad}$ ,

o una altura diferencial de 3 mm a lo largo del lago en las caras de los acantilados o en las bahías profundas y protegidas. En aguas someras, el efecto es comúnmente mucho mayor por que los vientos fuertes causan que suba el nivel de agua en la orilla expuesta, que erróneamente podría ser interpretado como inclinación del suelo. Mueller y otros (1989) encontraron que los vientos fuertes también aumentaban la amplitud del seiche. Cuando los vientos son fuertes, la resolución de la inclinación de la corteza se pierde.

## Seiche

El seiche de un lago puede ser comparado con el efecto de agua inclinada en un platillo que toma la forma de una marejada pequeña y relativamente rápida, cuyas características espaciales y temporales pueden variar grandemente (fig 16.9). Normalmente, los seiches se



**Figura 16.9.** Registros del nivel de lago del Lake Taupo. El modo de seiche de 30 minutos es claramente visible en Rainbow Point, pero desarrolla una resonancia inusitada de 10 minutos en Kinloch.

forman cuando hay vientos fuertes o cambia repentinamente la presión, y pueden durar unos días antes de morir o ser sobrepasados por un nuevo seiche. Su amplitud y frecuencia dependen de las dimensiones, forma y profundidad del lago. La mayoría de los lagos, particularmente si tienen una forma compleja, pueden tener muchos diferentes modos de seiches; los seiches viajan a lo largo de varios ejes, todos con características diferentes. El seiche resultante en cualquier punto depende del grado de exposición a cada modo. En la práctica, el registro del nivel de agua en el lago en cada uno de los sitios propuestos puede ayudar a identificar los sitios donde hay un seiche anormalmente amplificado o complejo. La periodicidad de los modos más significativos puede ser determinado analizando los registros, y obviamente la exactitud aumentará mientras más datos se recolectan. A partir de este trabajo preliminar, se puede determinar el tiempo de observación y frecuencia de muestreo óptimo (si no se usa un sistema de registro continuo). El método más efectivo para filtrar un seiche puede ser derivado de experimentos y refinado con modelos matemáticos. Para el Lake Taupo, un lago grande en forma de corazón, el lago completo, excepto la parte austral, está influenciado por un modo con período de 30 minutos y 9 segundos. En la parte austral del lago predomina el modo de 35 minutos y 25 segundos (Gilmour y Butcher, 1987). Normalmente, calculando la media de estas lecturas tomadas a intervalos regulares por uno o más períodos completos de seiches produce datos confiables (dentro de 1 mm de la media modelada matemáticamente) para amplitudes de seiches entre 3 y 30 mm. Por ejemplo, en el Lake Taupo se toman 6 lecturas a intervalos de 5 minutos para todas las estaciones, con la excepción de las australes, donde se toma una medida adicional. Sin embargo, en lagos complejos quizás se tengan que usar técnicas más refinadas para filtrar otros modos significativos de seiches.

## Gradiente Barométrico

Una diferencia en la presión atmosférica debería resultar en una respuesta predecible en el nivel del lago a través del lago. Por ejemplo, experiencia personal ha demostrado que un gradiente de 0.02 mbar/km (común para latitudes medianas y altas asociadas con sistemas frontales) debe producir un gradiente en la superficie del lago de 0.2  $\mu$ rad (una diferencia de altura de 2 mm a través de un lago de 10 km)<sup>1</sup>. Los esfuerzos del viento resultante pueden, sin embargo, complicar el nivel del lago resultante, particularmente debido a que el flujo de

<sup>1</sup>Calculado con los aproximados de 1 mb  $\approx$  0.75 mm Hg = 10.2 mm H<sub>2</sub>O.

aire tiende estar a ángulos rectos al gradiente de presión debido al efecto Coriolis y fuerzas de fricción (Ahrens, 1982). Los efectos de sistemas atmosféricos locales, como tormentas eléctricas y aguaceros, con su células asociadas de presión baja y vientos repentinos se entienden mucho menos. Normalmente, es mucho más fácil tomar medidas durante sistemas atmosféricos inestables que calcular sus efectos.

### **Variaciones en las Tasas de Alimentación y Desfogue**

Las variaciones ocurren durante y después de aguaceros o cuando las estructuras para controlar los ríos son ajustados en lagos usados para almacenaje hidroeléctrica, irrigación y control de inundación. Los niveles de agua en los lagos pueden subir erráticamente durante y después de un aguacero, pero la mejor manera de determinar el tiempo mínimo de espera requerido para cualquier lago es mediante observaciones. Para los lagos controlados artificialmente tiene que haber una consulta entre el observador y las autoridades de control para determinar los períodos cuando la alimentación y desfogue serán más estables y si las tasas tienen que ser variadas durante este tiempo, el efecto que estas variaciones tendrán sobre el nivel del lago. Nuevamente, si posible, es mejor evitar tales variaciones en el nivel de agua.

### **Otras Influencias Naturales**

Las corrientes, seiches internos, mareas lunares y diferencias de densidad son posibles fuentes de error. Si se toman las precauciones básicas, sus efectos seguramente serán mínimos en todos los lagos, excepto en los más grandes (más de  $1,000 \text{ km}^2$  en área superficial). Las corrientes pueden ser producidas por vientos persistentes que causan la rotación lenta de una parte o todo el agua en el lago. Las corrientes tienden a ser más fuertes en promontorios o en aguas someras. Las caletas y bahías son sitios donde se producen corrientes locales y que deben ser evitadas. Los seiches internos pueden ocurrir a lo largo del límite entre la capa inferior densa y la capa superficial más liviana, sin embargo, se piensa que los errores resultantes son pequeños en lagos menores a  $1,000 \text{ km}^2$ . Los disturbios también pueden ser causados por las fuerzas Coriolis y efectos de mareas lunares (Gilmour y Heath, 1989), pero no son una fuente significativa de error cuando se comparan con los de vientos, seiches y efectos barométricos. Las diferencias significativas de densidad, debido a grandes volúmenes de agua provenientes del descongelamiento de nieve o por aguas calentadas geotérmicamente, pueden causar anomalías en el nivel de agua en el lago y deben ser evitadas. Es posible, que cambios grandes de gravedad

asociadas con actividad tectónica o magmática puedan tener efectos sobre el nivel de agua en el lago, pero este efecto no ha sido adecuadamente investigado o documentado. Por lo tanto, para trabajos más precisos se debe investigar más tales efectos, especialmente en los lagos más grandes. Hasta que no se sepa más, el observador debe estar atento a cualquier error sistemático raro.

## **Errores de Medida**

### **Calibración y Confiabilidad del Instrumento**

El instrumento para medir el nivel de agua, ya sea el que se lee ópticamente (por ejemplo un medidor manual), mecánicamente (como un anillo flotador del transductor de presión) o electrónicamente (como la salida de un transductor de presión) debe ser calibrado y ser capaz de generar los mismos datos. Cada lectura individual del nivel de agua debe tener una resolución y exactitud dentro de un máximo de 1 mm, y preferiblemente mejor.

### **Efectos Termale en el Equipo**

La exactitud de la medida del nivel de agua en el lago disminuye si hay grandes variaciones de temperatura entre (o durante) las lecturas. La salida electrónica y las dimensiones relativas de algunos materiales pueden variar debido a los cambios de temperatura. Se recomienda hacer una calibración sobre el rango de altura que se espera habrá durante el uso del equipo. La mayoría de los instrumentos electrónicos de precisión (incluyendo los transductores de presión y sensores de posición lineal) vienen con las especificaciones del fabricante para los efectos de temperatura. Los efectos de las variaciones de temperatura dependen del tipo de instrumentación y del clima en el cual se usa el sistema, por lo tanto, cada programa de vigilancia tendrá correcciones específicas para cada aplicación.

### **Montaje de los Instrumentos**

Obviamente, los errores asociados con el montaje de los instrumentos no son aplicables a instalaciones estables y permanentes, pero podrían causar problemas significativos en los sistemas portátiles. Cuando se usa un trípode para montar el medidor, se debe asegurar que las patas del trípode estén estables con respecto al fondo del lago. Si el trípode se hunde durante las medidas, el nivel del lago aparentará estar muy alto. El pozo amortiguador que está montado debajo del trípode debe estar suspendido verticalmente para asegurar que todas



las medidas se hagan a ángulos rectos a la superficie del agua.

### Errores de Nivelación y Medición con Cinta

Hay que ser cuidadoso y seguir procedimientos de auto chequeo para asegurar que los errores de nivelación entre el instrumento y el hito sean menores a 1 mm. Tales errores serán negligentes si se siguen estrictamente los procedimientos y estándares de nivelación de precisión. En el sistema portátil del CVO, el procedimiento de nivelación no cumple con los estándares de primer orden al usar una varilla de nivelación de fibra de vidrio de primer orden montada en el trípode en vez de una varilla Invar con una calidad de primer orden (Yamashita y Kaiser, capítulo 13). Los errores en la lectura de una varilla de nivelación de fibra de vidrio pueden ser mantenidos con facilidad debajo de 1 mm. De manera similar, se debe tener mucho cuidado y hacer varias medidas para reducir el error y no hacer equivocaciones cuando se usa una cinta para determinar la diferencia de altura entre el medidor y la señal de referencia justamente arriba.

### Inestabilidad del Hito

El hito permanente que se usa como una referencia para determinar la altura del instrumento tiene que ser confiable. Si hay cualquier duda sobre su estabilidad, la señal debe ser conectada mediante nivelación a, por lo menos, un hito adicional como chequeo. Cuando se usa un gancho como una señal de referencia sobre una estructura, de ser posible tiene que tener una referencia a un hito para verificar su estabilidad. Alternativamente, los ganchos y señales de referencia deben ser establecidos en dos estructuras independientes y cercanas.

## REDUCCION Y EVALUACION DE LOS DATOS

El método recomendado para analizar los datos de niveles de agua en lagos empieza con la selección de la estación de origen. Esta estación es considerada como "fija" (eso es, no sufre ningún desplazamiento vertical) durante el estudio. Cualquier cambio en el nivel de agua del lago encontrado durante una nueva medición de esta estación, así sea que se ocupe nuevamente más tarde en el día o después de un año como parte de un levantamiento anual, por convención, será atribuido a un cambio del volumen de agua en el lago, no a deformación.

La elevación de la superficie del lago, relativa al origen, tiene que ser determinada cuando se toman las

medidas en la otras estaciones alrededor de la orilla del lago. Para lograr esto, el efecto del seiche es removido del nivel promedio del lago mediante el cálculo de la media de las lecturas regulares sobre uno o más ciclos completos de seiche, como se describe arriba. Después, se ajusta una regresión lineal al registro (si se obtiene continuamente por medios electrónicos o mecánicos) o se usa una interpolación sencilla (si el nivel del lago en el origen es medido al comienzo y al final de cada día) para determinar el nivel del lago a la hora de la medida en otros sitios alrededor del lago. En cualquier caso, se asume que el nivel del lago responde linealmente al flujo continuo de alimentación y desfogue durante el día.

Entonces, se comparan los datos de las otras estaciones con aquellos del origen. Se escoge una elevación para el origen de manera arbitraria o mediante la nivelación a un hito. Entonces, se calcula la elevación de la superficie de agua relativa a esa señal. La diferencia de elevación entre el hito o la señal de referencia y la superficie de agua en cada estación es sumada a esta elevación de superficie de agua. Se determina la elevación de cada hito, relativa a la elevación escogida para el punto de origen. Esta elevación puede ser comparada a un conjunto anterior de datos para determinar la diferencia aparente de altura relativa al origen.

Solamente se miden los cambios relativos en la elevación de la superficie de agua. Por lo tanto, se pueden determinar los cambios en el nivel del lago debido a los cambios de volumen de agua en la cuenca, como la inclinación diferencial después de volver a tomar las medidas.

La confiabilidad de los resultados solo se puede evaluar después de pasar un tiempo considerable haciendo levantamientos frecuentes dentro de un programa de vigilancia de un lago en particular bajo una variedad de condiciones, para poder determinar las medias y las desviaciones estándar. Entonces, se puede derivar una fórmula empírica sencilla para estimar los errores estándares para las observaciones futuras que se hagan siguiendo métodos similares. Por ejemplo, la fórmula adoptada para calcular la desviación estándar en el Lake Taupo desde 1986, basada en observaciones iniciales repetidas y mejoradas usando observaciones repetidas más recientes en numerosas estaciones es:

$$1.2 + (0.1 \times d)$$

donde  $d$  es la distancia en línea recta en kilómetros, desde el origen. Para una estación a 4 km del origen, la desviación estándar es 1.6 mm (0.4  $\mu$ rad); para una estación a 40 km del origen, es 5.2 mm (0.13  $\mu$ rad). Esta fórmula provisional fue derivada usando datos del Lake Taupo solamente; puede servir como una guía útil, pero no aplica necesariamente a otros lagos porque cada uno tiene sus características especiales.

Como medida de precaución, las estaciones deben ser medidas nuevamente cuando las diferencias de elevación indican una posible deformación de la corteza. A pesar de las precauciones tomadas para minimizar el error, las influencias sistemáticas inesperadas relacionadas a gradientes de presión locales, viento, seiches internos y corrientes todavía pueden causar errores más grandes que los esperados. La mejor regla es estar atento y preparado para repetir observaciones cuando se observa una anomalía.

## EJEMPLOS DE RESULTADOS

### Yellowstone Lake

El programa de vigilancia del Yellowstone Lake es llevado a cabo por Wayne Hamilton del Research Office del Yellowstone National Park en cooperación con el Observatorio Vulcanológico Cascades. Se han instalado sistemas permanentes para medir el nivel de agua en el lago en cinco sitios alrededor del lago (fig. 16.2). La línea en la figura 16.2 corresponde al borde inferido de la caldera Yellowstone (Christiansen, 1984); la estación Promontory está fuera de la caldera. En la figura 16.10 están graficados los datos de las estaciones Stevenson y Promontory recogidos desde Mayo 1988 a Mayo 1989. En las dos curvas superiores, que demuestran la profundidad del transductor para las dos estaciones, la variación estacional del nivel de agua es aparente. Estos datos por si solos no ayudan a detectar la inclinación del suelo. La curva inferior en la figura 16.10 ilustra la diferencia de profundidad entre Stevenson y la estación de referencia Promontory. La diferencia neta en el año fue de alrededor de 1 cm. Esta diferencia está dentro del margen de error de los transductores usados para este estudio. Cualquier inclinación del suelo en el área del Yellowstone Lake durante el año fue más pequeño que el nivel de detección de los transductores. La amplitud de 4 cm en la curva diferencial aún no ha sido totalmente explicada. Quizás se deba a una pobre calibración de los dos instrumentos a diferentes profundidades de agua, corrientes de agua estacionales como un resultado de la actividad geotermal, o posiblemente a un patrón estacional de deformación de suelo.

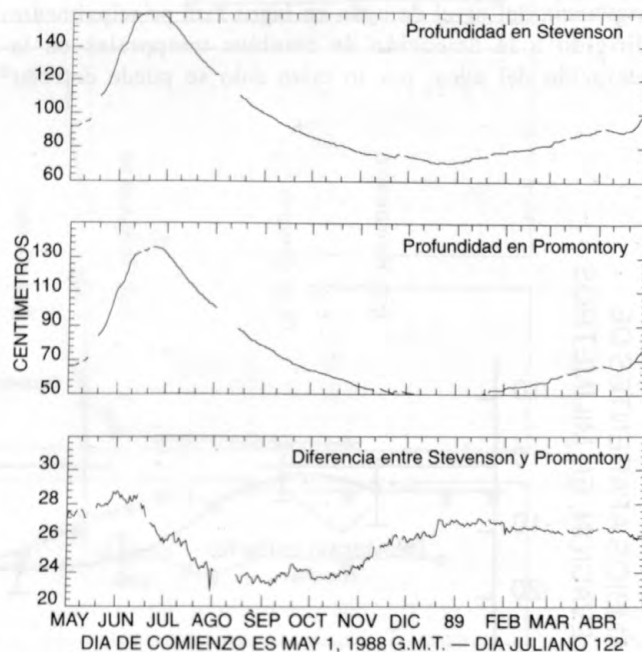
### San Andreas Lake

El programa de vigilancia del San Andreas Lake demuestra una tasa de inclinación a largo plazo de  $0.0200 \pm 0.08 \mu\text{rad/año}$  durante la última década (Mueller y otros, 1989). Esta inclinación está dentro de los errores de la instrumentación y significa que no se ha

identificado en el área ninguna inclinación de la corteza a largo plazo.

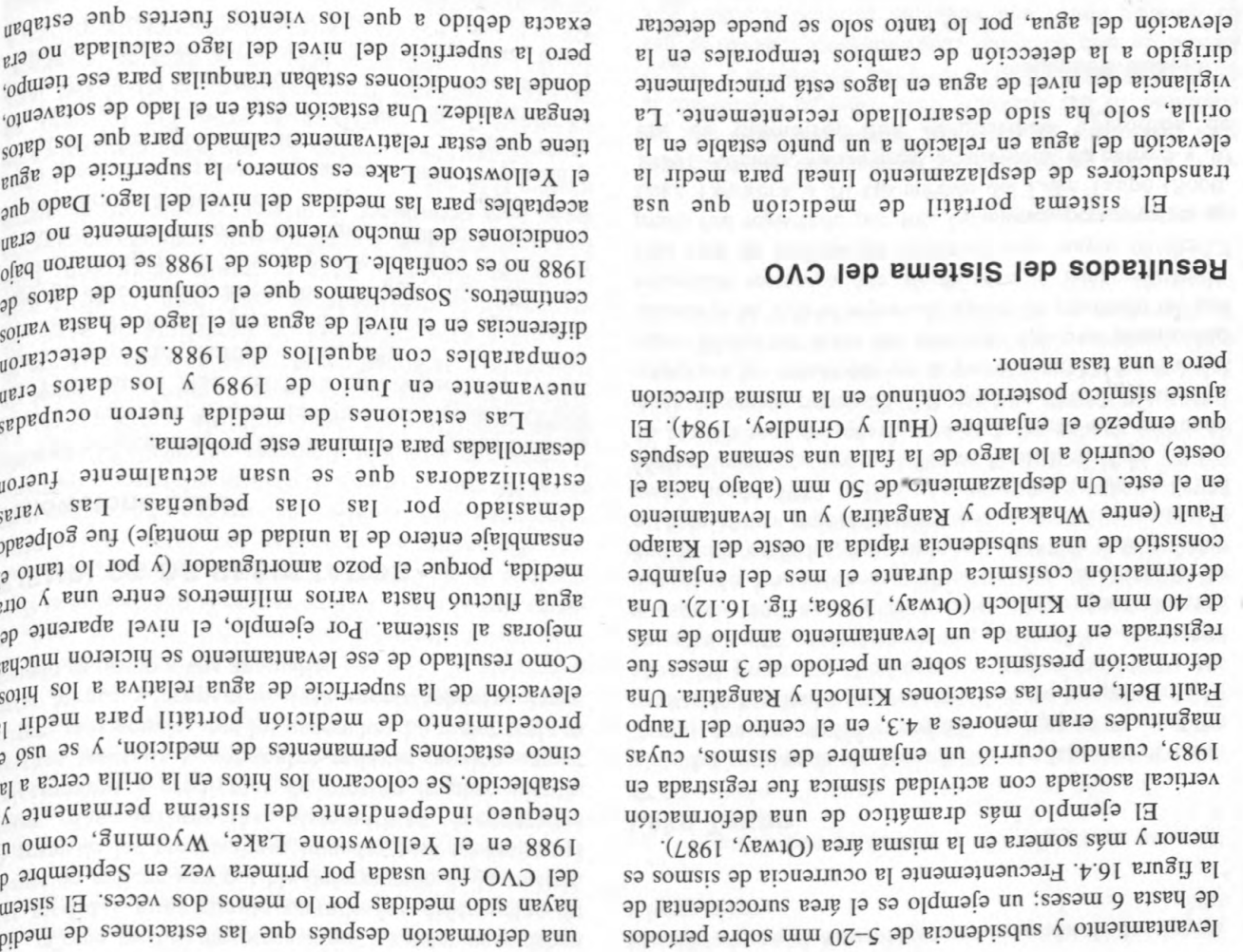
### Lake Taupo

La vigilancia de los niveles de lago en el Lake Taupo con un medidor portátil de lectura manual ha producido resultados interesantes durante los primeros 10 años del programa. Los cambios registrados entre los levantamientos generalmente son sistemáticos en tiempo y espacio con anomalías a corto plazo generalmente dentro de los valores estimados con la fórmula de desviación estándar, indicando que cambios más grandes a largo plazo probablemente son reales. La tendencia anual desde 1982 indica una subsidencia de la orilla septentrional, que cruza el Taupo Fault Belt (figs. 16.4 y 16.11). La tasa de subsidencia en la parte más profunda de la depresión promedió  $103 \text{ mm/año}$  ( $0.6 \pm 0.2 \mu\text{rad/año}$ ) relativa a las estaciones en la parte central y austral del lago. El movimiento ha ocurrido sin una sismicidad somera y ha sido interpretado como un resultado de una extensión tectónica que afecta toda la zona volcánica. Una tasa de inclinación tectónica aún mayor ( $0.90 \pm 0.2 \mu\text{rad}$ ) fue registrada por tres estaciones permanentes en Lake Tarawera, a 70 km noreste del Lake Taupo (Scott, 1989). Además, varias áreas adicionales, de entre 5 y 30 km de diámetro, han demostrado episodios de



**Figura 16.10.** Un año de datos de nivelación del nivel de lago de dos estaciones permanentes en Yellowstone Lake. Las dos gráficas superiores son de la profundidad del transductor; cambio estacional en la profundidad es claramente aparente. La gráfica inferior ilustra la diferencia entre las estaciones Promontory y Stevenson.

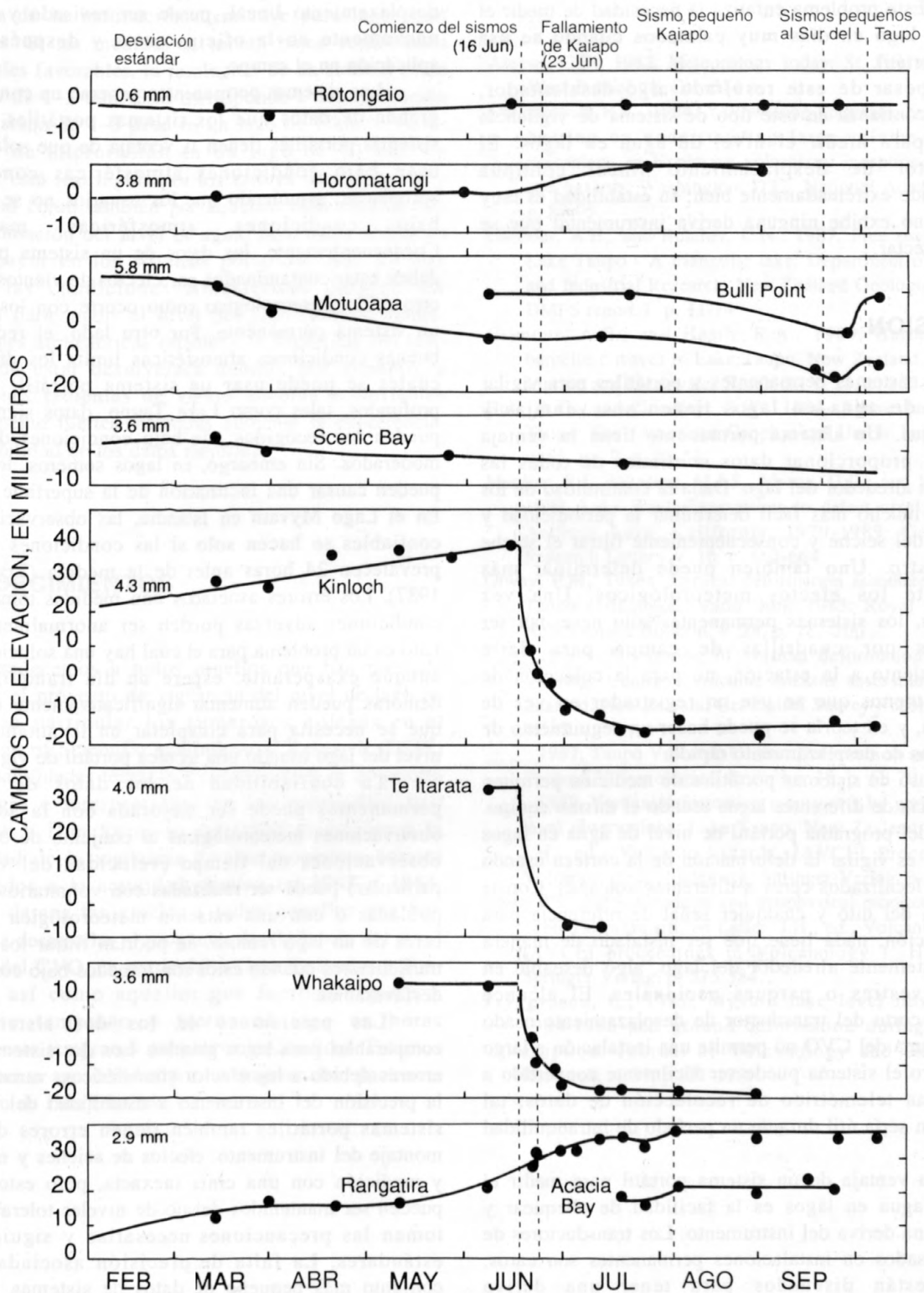
KILOMETROS DE LA ESTACION KAWAKAWA



levantamiento y subsidencia de 5-20 mm sobre periodos de hasta 6 meses; un ejemplo es el área suroccidental de la figura 16.4. Frecuentemente la ocurrencia de sismos es menor y más somera en la misma área (Otway, 1987). El ejemplo más dramático de una deformación vertical asociada con actividad sísmica fue registrada en 1983, cuando ocurrió un enfambre de sismos, cuyas magnitudes eran menores a 4.3, en el centro del Taupo Fault Belt, entre las estaciones Kinloch y Rangatira. Una deformación presísmica sobre un período de 3 meses fue registrada en forma de un levantamiento amplio de más de 40 mm en Kinloch (Otway, 1986a; fig. 16.12). Una deformación cosísmica durante el mes del enfambre consistió de una subsidencia rápida al oeste del Kaiapo Fault (entre Whakaipo y Rangatira) y un levantamiento en el este. Un desplazamiento de 50 mm (abajo hacia el oeste) ocurrió a lo largo de la falla una semana después que empezó el enfambre (Hull y Grindley, 1984). El ajuste sísmico posterior continuó en la misma dirección pero a una tasa menor.

pero a una tasa menor.





**Figura 16.12.** El registro de los cambios de elevación en la orilla septentrional del Lake Taupo, determinado por una nivelación del lago relativa a Rainbow Point desde Febrero a Septiembre de 1983 (ver figura 16.3 para localizaciones). Un ejemplo claro de la deformación presísmica, cosísmica y postsísmica está asociada con un gran enjambre sísmico localizado entre las estaciones Kinloch y Rangatira, que comenzó Junio 16, 1983.

ocurriendo en otros sitios estaban inclinando la superficie de agua. Este problema enfatiza la necesidad de medir el nivel de lago en días muy calmados cuando se usa equipo portátil.

A pesar de este resultado algo desalentador, tenemos confianza en este tipo de sistema de vigilancia portátil para medir el nivel de agua en lagos. El transductor de desplazamiento lineal continua funcionando extremadamente bien; su estabilidad es muy buena y no exhibe ninguna deriva instrumental que se pueda detectar.

## DISCUSION

Los sistemas permanentes y portátiles para vigilar el nivel de agua en lagos tienen sus ventajas y desventajas. Un sistema permanente tiene la ventaja obvia de proporcionar datos continuos de todas las estaciones alrededor del lago. Dada la continuidad de los datos, es mucho más fácil determinar la periodicidad y amplitud del seiche y consecuentemente filtrar el seiche del registro. Uno también puede determinar más fácilmente los efectos meteorológicos. Una vez instalados, los sistemas permanentes solo necesitan ser revisados por cuadrillas de campo para darle mantenimiento a la estación, no para la colección de datos, a menos que se use un registrador en vez de telemetría, y en teoría se puede hacer un seguimiento de los eventos de desplazamiento rápido.

El uso de sistemas portátiles de medición permiten la vigilancia de diferentes lagos usando el mismo equipo. La meta del programa portátil de nivel de agua en lagos del CVO, es vigilar la deformación de la corteza usando los lagos localizados cerca a diferentes volcanes. Con la excepción del hito y cualquier señal de referencia para cada estación, nada tiene que ser instalado de manera permanentemente alrededor del lago, algo deseable en áreas silvestres o parques nacionales. El alcance dinámico corto del transductor de desplazamiento usado en el sistema del CVO no permite una instalación a largo plazo, pero el sistema puede ser fácilmente convertido a un sistema telemétrico de recolección de datos; tal conversión sería útil durante un período de intranquilidad volcánica.

Otra ventaja de un sistema portátil para medir el nivel de agua en lagos es la facilidad de chequear y corregir una deriva del instrumento. Los transductores de presión usados en instalaciones permanentes son caros, porque están diseñados para tener una deriva instrumental pequeña, pero cualquier deriva instrumental podría ser interpretada equivocadamente como inclinación del suelo a menos que se sacara el transductor de la instalación permanente y se volviera a calibrar. El instrumento que se usa en un sistema portátil,

así sea un transductor de presión o un transductor de desplazamiento lineal, puede ser revisado y calibrado nuevamente en la oficina antes y después de cada aplicación en el campo.

Los sistemas permanentes generan un conjunto más grande de datos que los sistemas portátiles, pero los sistemas portátiles tienen la ventaja de que solamente se usan bajo condiciones atmosféricas conocidas y apropiadas, asumiendo que los usuarios no se arriesgan bajo condiciones atmosféricas marginales. Consecuentemente, los datos de un sistema portátil no deben estar contaminados por efectos de vientos fuertes u otro ruido meteorológico como ocurre con los datos de un sistema permanente. Por otro lado, el requisito de buenas condiciones atmosféricas limita los días en los cuales se puede usar un sistema portátil. En lagos profundos, tales como Lake Taupo, datos significativos pueden ser recogidos aún bajo condiciones de vientos moderados. Sin embargo, en lagos someros, los vientos pueden causar una inclinación de la superficie del lago. En el Lago Myvatn en Islandia, las observaciones más confiables se hacen solo si las condiciones calmadas prevalecen 24 horas antes de la medida (Tryggvason, 1987). Los errores asociados con medidas tomadas bajo condiciones adversas pueden ser anormalmente altos. Esto es un problema para el cual hay una solución simple aunque exasperante: espere un día tranquilo. Tales demoras pueden aumentar significativamente el tiempo que se necesita para completar un levantamiento del nivel del lago usando una técnica portátil de vigilancia.

La confiabilidad de los datos de sistemas permanentes puede ser mejorada con la adición de observaciones meteorológicas al conjunto de datos. Las observaciones del tiempo (velocidad del viento en particular) puede ser realizadas con voluntarios en áreas pobladas o con una estación meteorológica instalada cerca de un lago remoto. Se podrían filtrar los datos de transductores cuando estos son tomados bajo condiciones desfavorables.

Las precisiones de los dos sistemas son comparables para lagos grandes. Los dos sistemas tienen errores debido a los efectos atmosféricos, variaciones en la precisión del instrumento y estabilidad del hito. Los sistemas portátiles también tienen errores debido al montaje del instrumento, efectos de seiches y nivelación y medición con una cinta inexacta, pero estos errores pueden ser mantenidos debajo de niveles tolerables si se toman las precauciones necesarias y siguiendo los estándares. La falta de precisión asociada con un conjunto más pequeño de datos de sistemas portátiles disminuye mientras aumenta la experiencia. Los sistemas permanentes tienen una precisión de 0.1 a 1.0  $\mu$ rad, dependiendo de la aplicación en particular (tamaño del lago y forma) y la precisión del transductor. Los sistemas portátiles emulan los sistemas permanentes en lagos más

grandes (mayores a  $100 \text{ km}^2$  en superficie), aunque la precisión de la inclinación disminuye para lagos más pequeños. Si las medidas se toman bajo condiciones ambientales favorables, la resolución de un sistema es de alrededor de 1–3 mm. Esto corresponde a una resolución de inclinación de 1–3  $\mu\text{rad}$  en un lago de 1 km, o varias décimas de microradián en un lago de 10 km. La precisión está restringida por los errores de nivelación y estabilidad como también por aquellos relacionados con la determinación del nivel de agua, pero estos tienen un efecto mayor en los sistemas portátiles. Aún en días cuando las condiciones atmosféricas parecen ser perfectas para medir el nivel del lago (ningún viento, condiciones atmosféricas estables), la superficie del lago aún puede estar desnivelada debido, por ejemplo, a condiciones recientes de viento adversa o corrientes anormalmente fuertes. Mientras aumenta la experiencia, la confiabilidad de los datos mejorará.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos aquellos que han prestado ayuda en el proyecto de vigilancia del nivel de lago en Taupo, en particular los numerosos colegas en el Department of Scientific and Industrial Research (DSIR) por sus habilidades técnicas y científicas en el desarrollo del trabajo e interpretación de los resultados. Bill Chadwick y Don Swanson del CVO mantuvieron la continuidad de la vigilancia durante momentos críticos relacionados a la actividad sísmica en 1983 y 1984. También damos las gracias a todos aquellos que han ayudado a desarrollar el programa de vigilancia del nivel de lagos del CVO, en particular a Gene Iwatsubo y Tom Murray, así como aquellos que fueron forzados a levantarse temprano y fueron al lago en horas ridículamente tempranas para hacer las medidas. Estamos especialmente agradecidos por las sugerencias, paciencia y estímulo de Dan Dzurisin.

## REFERENCIAS CITADAS

- Ahrens, C.D., 1982, *Meteorology today*: St. Paul, Minnesota, West Publishing Co., 514 p.
- Christiansen, R.L., 1984, Yellowstone magmatic evolution: Its bearing on understanding large-volume explosive volcanism, *en* Explosive volcanism: inception, evolution, and hazards: Washington, D.C., National Academy Press, p. 84-95.
- Gilmour, A.E., and Butcher, C.N., 1987, Free oscillations in Lake Taupo - A triangular lake: Department of Scientific and Industrial Research, New Zealand Geological Survey, DMFS report 1, p. 11-14.
- Gilmour, A.E., and Heath, R.A., 1989, Barotropic and baroclinic waves in Lake Taupo, New Zealand: *Journal of Marine and Freshwater Research*, v. 21, p. 353-357.
- Hull, A.G., and Grindley, G.W., 1984, Active faulting near Taupo: *Eos (American Geophysical Union Transactions)*, v. 65, no. 7, p. 51-52.
- Mueller, R.J., Johnston, M.J.S., Myren, G.D., and Murray, T., 1989, Lake level observations to detect crustal tilt: San Andreas Lake, California, 1979-1989: *Geophysical Research Letters*, v. 16, p. 661-664.
- Otway, P.M., 1986a, Vertical deformation associated with the Taupo earthquake swarm, June 1983: *Royal Society of New Zealand Bulletin*, v. 24, p. 187-200.
- 1986b, Monitoring of vertical deformation in Taupo Volcanic Centre; Volcanic hazards assessment in New Zealand: *New Zealand Geological Survey Record*, v. 10, p. 41-47.
- 1987, Taupo Volcanic Centre: Deformation survey: *New Zealand Volcanological Record*, v.15, p. 68-70.
- 1989, Vertical deformation monitoring by periodic water level observations, Lake Taupo, New Zealand, *en* Latter, J.H., ed., Volcanic hazards, IAVCEI Proceedings in Volcanology 1: Heidelberg, Springer-Verlag, p. 561-574.
- Scott, B.J., 1989, Geodetic and geophysical monitoring of the 1886 Tarawera rift, *en* Latter, J.H., ed., Volcanic hazards, IAVCEI proceedings in Volcanology 1: Heidelberg, Springer-Verlag, p. 575-584.
- Tryggvason, E., 1987, Myvatn lake level observations 1984-1986 and ground deformation during a Krafla eruption: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 31, p.131-138.





# 17. Técnicas de Vigilancia Continua del Agua Superficial en Volcanes Activos: Ejemplos del Drenaje Loowit, Mount St. Helens y Kelut Crater Lake, Indonesia

Por Kenneth A. McGee, A. Jefferson Sutton, David E. Wieprecht y Mark E. Iven

## ABSTRACTO

El agua superficial asociada con volcanes activos o potencialmente activos puede exhibir cambios físicos y químicos relacionados con una reactivación volcánica. Las mediciones periódicas de las variaciones de parámetros tales como temperatura, pH, conductividad y nivel de agua pueden proporcionar claves sobre los procesos que podrían acompañar a la intranquilidad volcánica. Las instalaciones de vigilancia con telemetría continua en Loowit Creek, Mount St. Helens y Kelut crater lake, Indonesia, son ejemplos de técnicas y equipos que pueden ser usados para vigilar dos tipos distintos de agua superficial en volcanes.

## INTRODUCCION

Los manantiales, lagos y riachuelos asociados con volcanes activos pueden exhibir cambios físicos y químicos antes de una reactivación volcánica (Bercy y otros, 1983, Giggenbach, 1983). La vigilancia de parámetros específicos del agua, tales como temperatura, pH, conductividad, turbidez, concentración de gases disueltos y nivel de agua pueden proporcionar claves sobre los procesos que se esperan acompañen la intranquilidad o reactivación volcánica, especialmente cuando estos parámetros se correlacionan con observaciones sísmicas y otras observaciones geofísicas coincidentes.

Los lagos dentro de cráteres volcánicos pueden esconder muchas características físicas y termales de interés. Lo más seguro es que las fumarolas se descarguen directamente en los lagos cratéricos. Durante los días o semanas de intranquilidad que pueden anteceder un episodio eruptivo, la descarga de fumarolas y transferencia de calor al lago pueden aumentar y subir la temperatura del agua. Además, el pH seguramente caería debido al incremento de la descarga de gases

ácidos en el lago y la conductividad del agua del lago aumentaría debido a la presencia de más iones disueltos. El nivel de agua puede cambiar debido a una deformación del fondo del lago.

Los manantiales termales que se originan en un edificio volcánico podrían también demostrar cambios que reflejen la intranquilidad volcánica. La importancia de estos cambios depende de la envergadura con la cual el sistema hidrotermal se comunica con los manantiales subterráneos. Se puede esperar, como en el caso de lagos cratéricos, que cambios en la composición química del agua, pH, temperatura, conductividad y descarga de los manantiales, acompañen además a la intrusión del magma dentro de la corteza somera. Un programa comprensivo de vigilancia para los volcanes que tienen manantiales o lagos cratéricos debe incluir una vigilancia geoquímica e hidrológica de estos parámetros.

## DESCRIPCION DEL EQUIPO

En el verano de 1989, se estableció una estación de vigilancia de agua en Loowit Creek, localizado aproximadamente 2 km al norte del domo activo de lava en el Mount St. Helens. El Loowit Creek es un riachuelo pequeño cuya descarga a fines de verano es de aproximadamente 7 pies<sup>3</sup>/s y contiene las aguas superficiales del cráter del Mount St. Helens como también de las fuentes termales de por lo menos tres grupos de fuentes termales. La topografía pendiente y terreno inestable no permiten una vigilancia directa de las aguas termales, por eso se localizó la estación de vigilancia varias decenas de metros aguas abajo de la última fuente termal. La estación de vigilancia fue establecida para registrar cambios en la composición

química del agua que podrían correlacionarse con cambios o intranquilidad en el sistema volcánico.

Se colocaron sensores robustos para medir temperatura, pH y conductividad dentro de un tubo PVC perforado de 10 cm de diámetro que se suspendió sobre la quebrada de un cable (fig. 17.1). La señal de salida de cada uno de los sensores es transmitida a un instrumento de vigilancia de calidad de agua conocido como el "USGS Minimonitor." Este aparato, desarrollado por el Hydrologic Instrumentation Facility del Servicio Geológico de los Estados Unidos, está diseñado para medir y registrar varias propiedades de control de agua (Ficken y Scott, 1988). El minimonitor que se opera con una batería (12 voltios) comprende un reloj, condicionador de señal para cada parámetro y circuitos para la salida.

El condicionador de señal permite la medición de temperaturas de agua entre 0 y 50 °C (o 0 a 100 °C cambiándole la resistencia) y un pH entre 0 y 10 (o 2-12 unidades de pH cambiándole la regulación del interruptor). La conductividad puede ser medida en cualquiera de cuatro rangos que se seleccionan con un interruptor y varían entre 0-100 a 0-100,000 micromhos. Cada una de las lecturas del sensor son convertidas a valores de salida en el rango de 0-5 voltios.

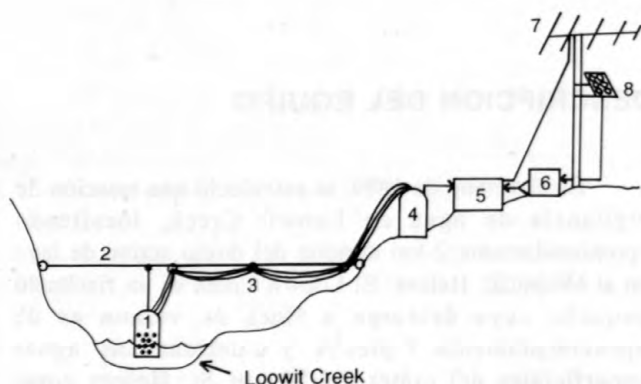
La salida del minimonitor está conectada a un sistema de telemetría de baja tasa de datos (Murray, 1988). Cada 10 minutos, el sistema de telemetría activa el minimonitor y rastrea las entradas del sensor y proporciona lecturas al sistema de telemetría. Entonces se transmiten estos datos vía radio VHF al Observatorio Vulcanológico Cascades para análisis. Aunque los autores de esta aplicación pudieron conseguir fácilmente el minimonitor, se puede usar cualquier aparato capaz de

leer las salidas de los sensores de calidad de agua y convertir estos valores a voltajes que pueden ser transmitidos por el sistema de telemetría que se usa. Algunos datos típicos de la estación de vigilancia en Loowit Creek están ilustrados en la figura 17.2.

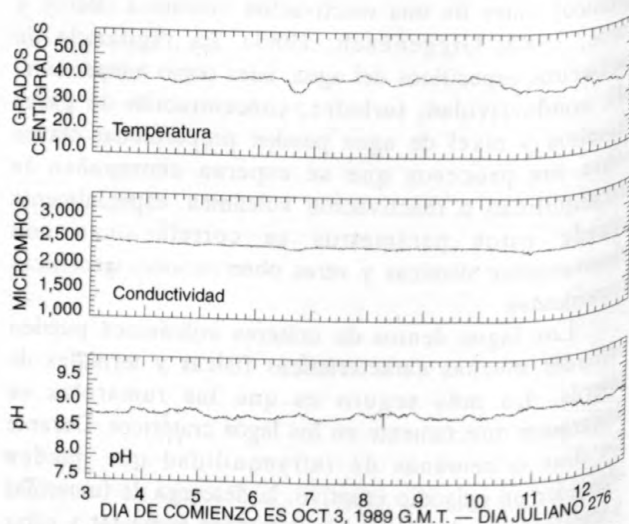
## VIGILANCIA DE LAGOS

Las erupciones del Volcán Kelut en Java oriental, Indonesia se caracterizan por emitir agua de su lago cratérico causando lahares destructivos (Suryo y Clarke, 1985). Dado ese comportamiento y la gran cantidad de fumarolas que actualmente están descargando sus aguas al lago, el Kelut fue escogido como un lugar de prueba para desarrollar técnicas y tecnologías para vigilar lagos crátericos.

En Julio de 1986, una estación con telemetría de vigilancia de agua fue instalada en Kelut (Sutton y otros, 1987). Se suspenden los sensores de temperatura, pH y conductividad de una plataforma flotante hasta una profundidad de 2.5 m (fig. 17.3). La plataforma está localizada a 4 m del borde del lago y es estabilizada con alambres para evitar su movimiento alrededor del lago. La profundidad del lago debajo de la plataforma es de 5-6 m. El nivel del lago es vigilado con una técnica descrita en detalle en la próxima sección. Al igual que para la instalación en Loowit Creek, las señales de los sensores en Kelut son transmitidas a un minimonitor que acondiciona la señal. Cada 10 minutos, se transmiten estos datos por telemetría radial a una repetidora y de ahí entran al Observatorio Margomulyo, localizado 6 km al oeste y que es operado por el Servicio Vulcanológico de Indonesia. Una computadora pequeña registra los datos



**Figura 17.1.** Dibujo esquemático de la estación de vigilancia de agua en Loowit Creek: 1, ensamblaje para el sensor de temperatura, pH y conductividad en un encerramiento de PVC; 2, cable de suspensión; 3, cables para conexión eléctrica; 4, minimonitor; 5, caja de telemetría radial; 6, batería; 7, antena; 8, panel solar opcional



**Figura 17.2.** Datos representativos de la estación de vigilancia en Loowit Creek.

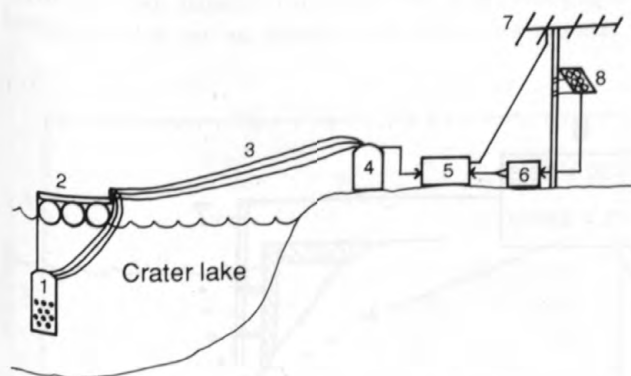


transmitidos y calcula cada hora y diariamente los promedios de todos los parámetros vigilados. Estos promedios son impresos y grabados en un cinta de cassette. Se usan paneles solares para alimentar a la estación de vigilancia, repetidora y estación receptora. Los datos representativos del Kelut están ilustrados en la figura 17.4.

## UNA TECNICA SENCILLA PARA MEDIR EL NIVEL DEL AGUA

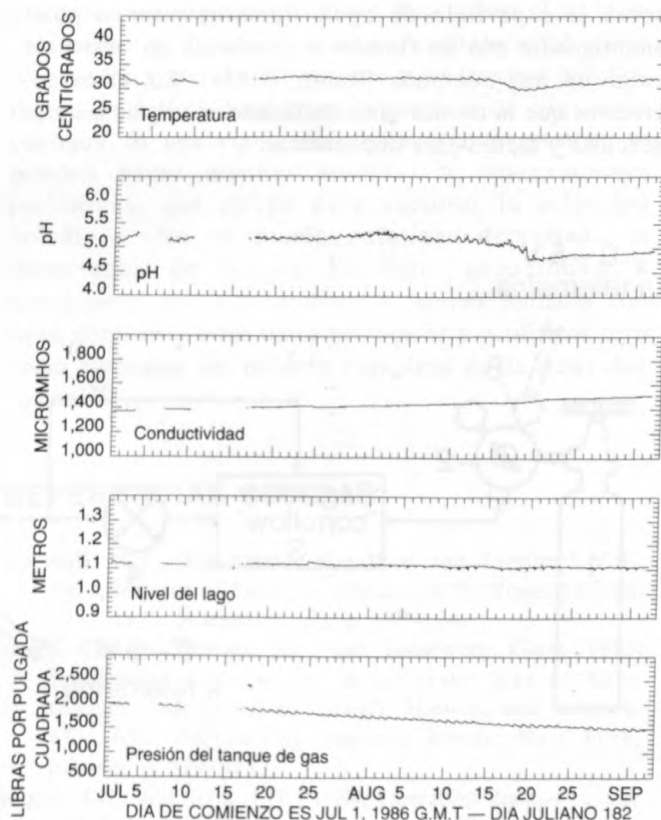
A veces es necesario vigilar el nivel de agua en un lago cráterico o quebrada. La profundidad del agua puede cambiar en respuesta a la actividad volcánica como también a otros factores, como precipitación. El fondo del lago cráterico Kelut, por ejemplo, ha cambiado increíblemente durante los episodios eruptivos (Hadikusumo, 1974). Aunque la deformación del piso de un cráter cubierto por agua es difícil de detectar directamente, un programa de vigilancia del nivel del lago puede proporcionar información sobre este problema. Sin embargo, se deben interpretar los datos de niveles de agua en lagos cuidadosamente, debido a que puede haber evaporación en lagos crátericos calentados sobre la temperatura del ambiente como en el caso del lago cráterico en el Volcán La Soufrière en St. Vincent en 1971-72 (Aspinall y otros, 1973).

Describimos a continuación algunas técnicas sencillas que se pueden usar para vigilar el nivel de agua en un lago cráterico u otro cuerpo de agua. El sensor es similar al sensor tipo burbuja descrito por Rantz (1982a), con la excepción de que el manómetro de mercurio es



**Figura 17.3.** Dibujo esquemático de la estación de vigilancia de agua en el Volcán Kelut: 1, ensamblaje para el sensor de temperatura, pH y conductividad en un encerramiento de PVC; 2, plataforma flotante; 3, cables para conexión eléctrica; 4, minimonitor; 5, caja de telemetría radial; 6, batería; 7, antena; 8, panel solar opcional. El aparato para medir el nivel de agua está ilustrado en la figura 17.5.

reemplazado por un transductor de presión. El aparato consiste de un cilindro de gas comprimido ( $O_2$ ,  $N_2$  o aire) con un regulador estándar, un regulador de flujo constante, una válvula de aguja, un transductor de presión de 0-2000 kPa (0-30 psi) con una salida de 0-5 voltios y un pedazo de tubería de teflón fijada a una profundidad fija en el agua (fig. 17.5). Hay un flujo lento y constante del gas en forma de burbujas por una tubería en el agua. Los cambios en el nivel de agua son reflejados por cambios de presión medidos por el transductor de presión. Por ejemplo, mientras sube el nivel de agua, sube la presión de fondo y sube la lectura del transductor de la presión. El sistema puede ser calibrado antes de ser instalado mediante la inserción de un extremo del tubo de teflón a diferentes profundidades en una tubería con agua y leyendo la salida del transductor de presión. El sistema puede ser normalizado a un cero conveniente después de su instalación en el lago. El sistema que mide el nivel de lago en Kelut puede detectar de hasta 1 cm y tiene un rango absoluto sobre 6 m. Una curva de calibración típica para un transductor de presión está ilustrada en la figura 17.6. Otros transductores de presión, con diferentes



**Figura 17.4** Datos representativos del lago cráterico en el Volcán Kelut. Los datos del nivel del lago están corregidos para oscilaciones en el voltaje de la batería debidas a la carga y descarga del panel solar.

características de respuesta, pueden ser usados para adaptar el sistema a otras profundidades y resoluciones. En áreas donde hay grandes cambios diurnos o estacionales de temperatura, se debe seleccionar cuidadosamente un transductor de presión con un coeficiente de baja temperatura. Si un panel solar alimenta la estación de vigilancia, se puede usar un regulador de voltaje para minimizar el ciclado de la salida del transductor de presión mientras los ciclos de carga y descarga de la fuente de energía del panel solar provocan oscilaciones en el voltaje de la fuente de energía.

Para instalaciones telemétricas de vigilancia a largo plazo, un transductor con un tanque de presión con una salida de 0-5 voltios puede ser instalado paralelo al tanque del medidor de presión. Los datos sobre la cantidad de gas que queda en el cilindro entonces pueden ser transmitidos por un sistema de telemetría para reducir el número de visitas que hay que hacer a la estación de campo (fig. 17.4).

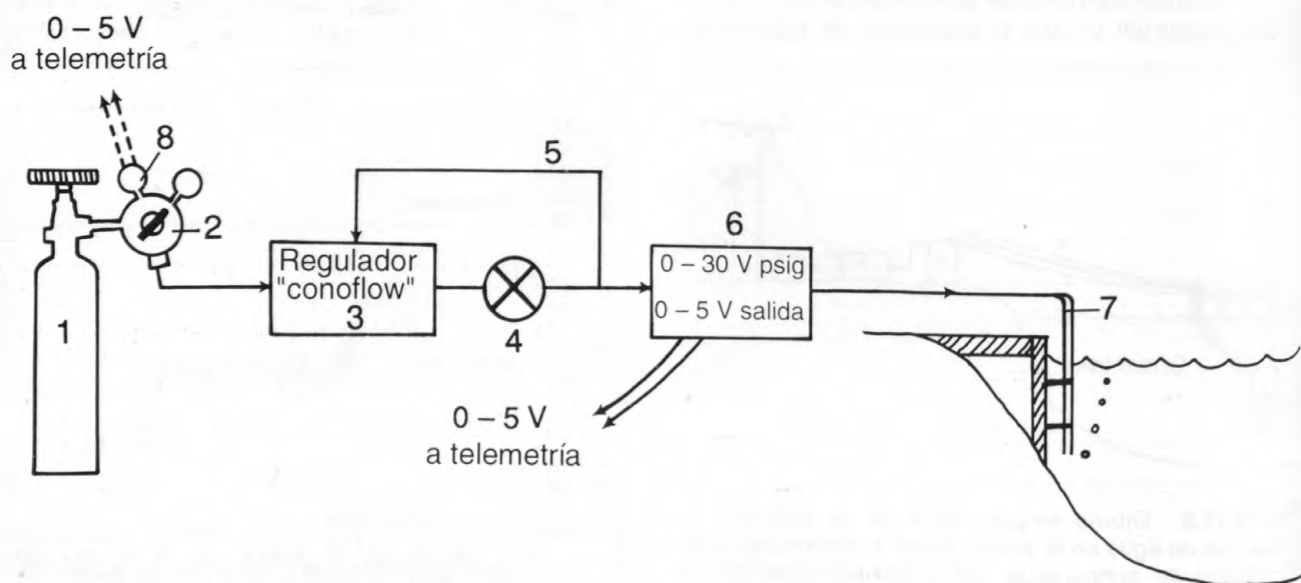
Además de las técnicas descritas aquí, se pueden usar muchas otras técnicas para medir el nivel de agua. Estos incluyen la suspensión de un transductor de presión directamente en el agua desde un punto fijo (Kleinman y Otway, capítulo 16), montando un aparato de ultrasonido sobre la superficie de agua, construyendo un pozo amortiguador con un flotador o instalando un sensor de carga en una quebrada (Rantz, 1982a). Sin embargo, creemos que la técnica presentada aquí es una de las más sencillas y fáciles para implementar.

## DISCUSION

Además de la actividad volcánica, otros factores que seguramente tendrán un efecto sobre las quebradas que drenan áreas de fuentes termales o lagos cratéricos son precipitación y derretimiento de nieve. Para los lagos cratéricos, una precipitación significativa tenderá a enfriar el lago, empujar el pH a neutro y subir el nivel del lago. La magnitud del efecto de la lluvia sobre los parámetros vigilados depende de la cantidad de lluvia y del tamaño del sistema de drenaje que se descarga dentro del lago, como también de la relación entre el volumen de precipitación y volumen del lago. No se conoce bien el efecto de la precipitación sobre la conductividad. El aumento de agua pura de lluvia en el lago hará bajar la conductividad; sin embargo un aumento en el flujo de agua sobre materiales solubles en el sistema de drenaje podría aumentar la cantidad de iones disueltos presentes en el lago y podría fomentar que se mezcle el agua, alterando los gradientes termales y químicos de densidad preexistentes.

El efecto de lluvia o nieve derretida sobre quebradas que drenan áreas de fuentes termales es similar a aquel en lagos. Dependiendo de las condiciones subterráneas locales, el efecto directo de lluvia sobre manantiales calientes sería de menor magnitud y no tan inmediata.

En cualquier caso, la precipitación debe ser medida y registrada regularmente cuando se vigila un lago cratérico u otra superficie de agua asociada con un



**Figura 17.5:** Dibujo esquemático del aparato para medir el nivel de agua: 1, cilindro de gas comprimido; 2, tanque regulador; 3, regulador de flujo constante; 4, válvula de agua; 5, circuito de retroalimentación; 6, transductor de presión; 7, tubería de teflón o de otro material inerte fijado al pilote en el agua; 8, transductor de tanque-presión, opcional. La tubería que va del cilindro al transductor de presión (6) es de cobre y tiene un diámetro de 6.35 mm (1/4 pulgada).

volcán para mejorar la interpretación de los datos de las propiedades del agua. La precipitación puede ser registrada continuamente con un medidor de lluvia tipo balde basculante conectado al sistema de telemetría, o puede ser medida una vez al día con un medidor estándar de lluvia. En muchas áreas, los datos de precipitación están disponibles de otras fuentes como agencias meteorológicas, radios y estaciones locales de televisión y agencias forestales.

La medida de la descarga de las quebradas es otra herramienta que puede proporcionar información sobre el impacto de lluvia sobre datos de vigilancia de agua. Las medidas de descarga son una indicación directa de la cantidad de agua que fluye por un punto en particular y son útiles en el asesoramiento de los efectos de dilución y otros parámetros que se están vigilando. Las medidas de descarga son particularmente importantes para quebradas que drenan cráteres o áreas con fuentes termales, como también para quebradas que fluyen hacia y desde los lagos cratéricos. Las técnicas para medir la descarga son bien conocidas y Rantz (1982a, 1982b) las describe detalladamente.

Las condiciones que pueden dañar el equipo o interrumpir los datos tienen que ser consideradas cuando se instala una estación de vigilancia de agua. La tephra volcánica y depósitos que pueden ser erosionados con facilidad contribuyen a que grandes cantidades de sedimento suspendido en quebradas puedan dañar o destruir los sensores. Las aguas termales generalmente contienen algas que pueden crecer sobre los sensores y afectar su funcionamiento. Los precipitados químicos también pueden formarse en los sensores bajo algunas circunstancias. El equipo electrónico y de telemetría deben estar localizados sobre terrenos altos lejos de áreas amenazadas por lahares o inundaciones. Los relámpagos también pueden ser un problema en estaciones remotas.

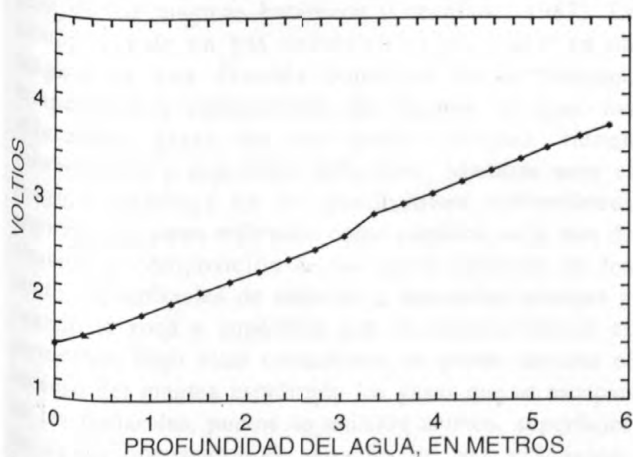


Figura 17.6. Salida del transductor de presión contra profundidad de agua para un sensor de nivel de lago.

Los equipos sensibles deben ser puestos bien a tierra y blindados para minimizar los daños por relámpagos (ver Lockhart y otros, capítulo 3).

Muchas otras observaciones y medidas pueden ser hechas conjuntamente con, o en vez de, estaciones telemétricas de vigilancia continua. La medición manual más frecuente posible de la temperatura, muestreo para análisis químico del agua, usando instrumentos portátiles para medir pH y conductividad, estudios de los depósitos alrededor de fuentes termales, la toma periódica de fotografías desde puntos establecidos son solo algunas de las cosas que pueden ser hechas para ayudar a proporcionar un vistazo de la actividad o inactividad actual. Lo importante es ser un buen observador y documentar todos los cambios.

## CONCLUSIONES

La vigilancia de fuentes termales y lagos cratéricos para detectar cambios que pueden acompañar una intranquilidad o reactivación volcánica es una tarea importante y retardora. Se pueden establecer sistemas de vigilancia relativamente simples para vigilar pH, temperatura, conductividad y el nivel del lago, usando equipos que están ampliamente disponibles. Los lagos cratéricos y fuentes termales comúnmente están localizados a grandes elevaciones y en terrenos difíciles, donde es difícil establecer estaciones de vigilancia continua. Si una vigilancia continua no es posible, se pueden hacer muchas medidas u observaciones periódicas, que sirven para asesorar la actividad volcánica. No se puede enfatizar demasiado la importancia de integrar los datos geoquímicos e hidrológicos del lago cratérico y fuentes termales con datos sísmicos y otros datos geológicos y geofísicos para poder construir un modelo completo de la actividad volcánica.

## REFERENCIAS CITADAS

- Aspinall, W.P., Sigurdsson, Haraldur, and Shepherd, J.B., 1973, Eruption of Soufrière volcano on St. Vincent Island, 1971-1972: *Science*, v. 181, p. 117-124.
- Bercy, Claude, Sabroux, J.C., and Suparwoto, Gatot, 1983, Underwater noise survey in the crater lake of Kelut volcano (Indonesia), *en* Tazieff, Haroun, and Sabroux, J.C., eds., *Forecasting volcanic events*: New York, Elsevier, p. 529-543.
- Ficken, J.H., and Scott, C.T., 1988, Operating manual for the U.S. Geological Survey minimonitor, 1988 revised edition; punched-paper-tape model: U.S. Geological Survey Open-File Report 88-0491, 76 p.
- Giggenbach, W.F., 1983, Chemical surveillance of active volcanoes in New Zealand, *en* Tazieff, Haroun, and



- Sabroux, J.C., eds., *Forecasting volcanic events*: New York, Elsevier, p. 311-322.
- Hadikusumo, D., 1974, The rise and drop of Mt. Kelut crater bottom after paroxysmal eruptions, *en* Green, R., ed., *Recent crustal movements and associated seismic and volcanic activity*: Tectonophysics, v. 23, p. 341-347.
- Murray, T.L., 1988, A system for telemetering low-frequency data from active volcanoes: U.S. Geological Survey Open-File Report 88-201, 41 p.
- Rantz, S.E., 1982a, Measurement and computation of streamflow: Volume 1; Measurement of stage and discharge: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2175, p. 1-284.
- \_\_\_\_\_, 1982b, Measurement and computation of streamflow: Volume 2; Computation of discharge: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2175, p. 285-631.
- Suryo, I., and Clarke, M.C.G., 1985, The occurrence and mitigation of volcanic hazards in Indonesia as exemplified at the Mount Merapi, Mount Kelut and Mount Galunggung volcanoes: *Quarterly Journal of Engineering Geology* London, v. 18, p. 79-98.
- Sutton, A.J., McGee, K.A., Sutawidjaja, I.S., Pardyanto, L., and Casadevall, T.J., 1987, A monitoring system for active volcanoes with crater lakes: *Hawaii Symposium on How Volcanoes Work*, Hilo, 1987, abstracts, p. 245.

# 18. Técnicas Fundamentales para el Estudio de Gases Volcánicos: Un Acercamiento Integral a la Vigilancia

Por A. Jefferson Sutton, Kenneth A. Mc Gee, Thomas Casadevall y J. Barry Stokes

## ABSTRACTO

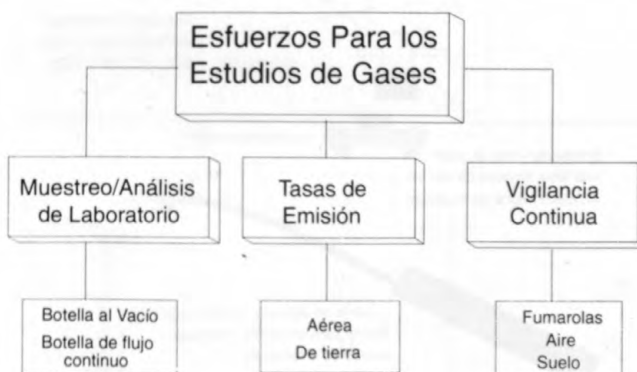
Los métodos fundamentales para el estudio de gases para la vigilancia volcánica incluyen el muestreo en el campo con análisis de laboratorio, medidas de las tasas de emisión de los penachos volcánicos y vigilancia continua en sitio. El muestreo de campo con los análisis de laboratorio proporciona una información geoquímica detallada sobre un sitio en particular en un momento dado. Las medidas de emisión de gas revelan comúnmente una emisión promedio de  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}_2$ , mientras que una vigilancia continua permite un entendimiento de los cambios temporales en las concentraciones de gases. Cada método tiene sus ventajas y desventajas, y un estudio comprensivo de gases para propósitos de vigilancia incluye la aplicación de los tres acercamientos, conjuntamente con los métodos convencionales de vigilancia geofísica.

## INTRODUCCION

Los gases disueltos en el magma son una fuerza impulsor importante de un episodio eruptivo, aunque generalmente comprenden menos del 5 por ciento por peso de los magmas más silíceos, y 0.5 por ciento por peso de los magmas basálticos (Greenland, 1987). La solubilidad de un gas volcánico en particular en un magma es una función compleja de la presión, temperatura y composición del magma, es mas, los diferentes gases en un mismo magma tienen solubilidades y reacciones diferentes. Mientras sube el magma, cambios en las condiciones subterráneas seguramente serán reflejados como cambios en la tasa de emisión o composición de los gases saliendo de los puntos superficiales de emisión y fumarolas, siempre y cuando la roca y superficie que el magma intruye es permeable. Bajo estas condiciones, se puede detectar el ascenso del magma estudiando los gases que se escapan en las fumarolas, puntos de emisión activos, superficies de suelo porosas y el penacho de gas volcánico. Recientemente, Tilling (1989) citó que los estudios geoquímicos son un área promisoría de la vigilancia

volcánica y predicción de erupciones, aunque todavía están en la etapa de experimentación. Los estudios de gases volcánicos en los Estados Unidos se remontan al comienzo del siglo XX en Hawaii (Jaggard, 1940). Los trabajos más recientes sobre vigilancia volcánica, que incluyen técnicas de estudios de gases se encuentran en un volumen de UNESCO (1972), y un tomo especial del Bulletin Volcanologique sobre gases volcánicos (volumen 45, no. 3, 1982). Los datos recopilados mediante estudios geoquímicos de gases requieren de una cuidadosa interpretación y evaluación (Casadevall y otros, 1987; Giggenbach, 1989). En este capítulo sugerimos que las técnicas actuales de estudios volcánicos para propósitos de vigilancia están divididas de manera lógica en tres clasificaciones. Enfatizamos la importancia de cada técnica y como la síntesis de un esfuerzo comprensivo de vigilancia de gases abarca el uso de estos tres métodos de manera conjunta.

Los estudios de gases volcánicos para propósitos de vigilancia son conducidos de varias maneras (fig. 18.1). El muestreo de campo de las fumarolas con los respectivos análisis de laboratorio proporcionan



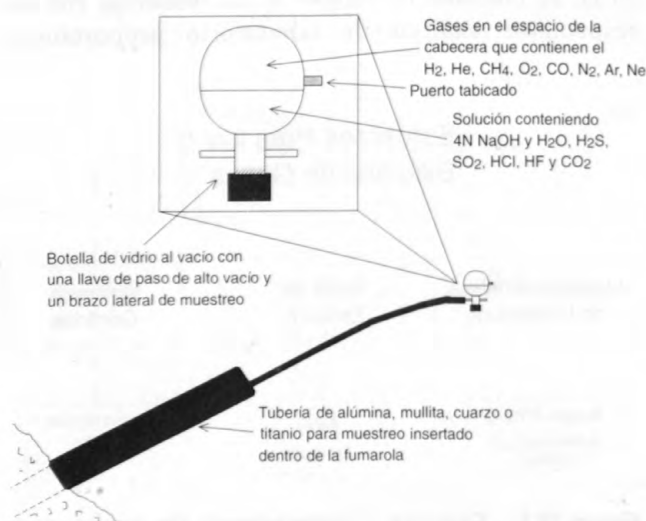
**Figura 18.1.** Estudios fundamentales de gases para propósitos de vigilancia volcánica deben incluir investigaciones integradas de campo y laboratorio que incluyan muestreos periódicos y continuos y medidas de tasas de emisión.

información detallada sobre la composición de los gases en el punto de emisión. Los estudios de las tasas de emisión de gases como  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}_2$  pueden proporcionar estimados sobre la tasa de abastecimiento y otras características del sistema magmático. La vigilancia continua en sitio con sensores de gas proporcionan información muy valiosa sobre los cambios temporales en la composición del gas en y alrededor de las fumarolas, fisuras y suelos volcánicos porosos. A continuación discutimos cada una de estas técnicas y como ellos se relacionan con los otros métodos de vigilancia volcánica.

## TECNICAS PARA ESTUDIAR GASES

### Muestreo De Campo Con Análisis De Laboratorio

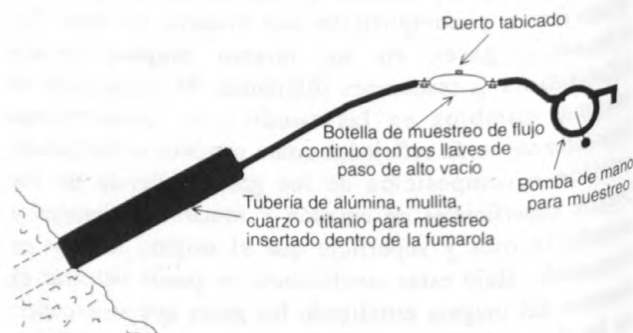
Se usan dos métodos principales para tomar y analizar gases de fumarolas; botellas al vacío y botellas de flujo continuo. El método que usa botellas al vacío fue estandarizado por Giggenbach (1975; Giggenbach y Goguel, 1988). Este método tiene la ventaja de proporcionar un análisis detallado de los gases usando una cantidad mínima de equipo. Ha sido usado para estudiar muchos tipos de volcanes y sistemas geotérmicos. En la práctica, se coloca un tubo de muestreo de titanio, alúmina, mullita o sílice (químicamente inerte y físicamente durable) en la



**Figura 18.2.** Esquema para el muestreo con botella al vacío, ilustrando el tubo de muestreo y la botella para la muestra.

fumarola y se deja calentar hasta que la condensación en el tubo alcanza un equilibrio, normalmente 5 minutos o menos (fig. 18.2). Un flujo visible de gas en la salida del tubo de muestreo indica que se ha alcanzado un equilibrio. El gas de la fumarola pasa por un pedazo corto de tubería de teflón antes de entrar en el frasco, que consiste de una botella de vidrio de borosilicato con una llave de paso de alto vacío. La botella que ha sido vaciada y pesada se llena parcialmente con un hidróxido de sodio acuoso concentrado (4N). La llave de paso se abre y el gas entra a la botella mediante la solución alcalina. El agua,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  y  $\text{HF}$  se disuelven en la fracción acuosa, mientras que el  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{He}$  y  $\text{Ne}$  burbujan por la solución y se juntan en el espacio en la parte superior de la botella. Se pueden recolectar muchos litros de gas de las fumarolas en una sola botella, debido a que el gas volcánico típicamente está compuesto principalmente por agua y gases ácidos condensables. Este método concentra los gases en la solución y en el espacio de la cabecera, facilitando así una mejor precisión analítica. Los gases "permanentes" en el espacio de la cabecera son analizados mediante cromatografía de gases en una columna de cedazo molecular con detección de conductividad termal y gas portador de argón. Los gases disueltos son analizados mediante técnicas químicas húmedas y gravimétricas, en el caso de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{HCl}$ , mientras que para  $\text{HF}$  se usa una metodología de electrodos selectivos de iones. Otras técnicas de muestreo y análisis para las cuales se usan botellas al vacío están descritos por Piccardi y Cellini-Legitimo (1983) y Greenland (1986).

Con botellas de flujo continuo se pueden tomar las muestras más rápidamente que con las botellas al vacío y se usan cuando no es necesario hacer un análisis completo del gas, o donde las condiciones de campo son demasiadas peligrosas para tomar las muestras con botellas al vacío. El montaje del tubo de muestreo es similar al de la botella al vacío, pero tiene dos llaves de paso (fig. 18.3). Se usa una bomba de mano para limpiar



**Figura 18.3.** Esquema para el muestreo de flujo continuo, ilustrando la tubería de muestreo, botella para la muestra y bomba.



mediante una descarga y llenar la botella con gas. Las muestras son analizadas con un cromatógrafo de gas para los gases indicados en el párrafo anterior, con la excepción de agua, HCl y HF. Los gases sulfúricos presentes en las muestras de flujo continuo son estables por unas 6 horas solamente, por lo tanto los análisis de estos gases tienen que ser completados rápidamente después del muestreo. Los otros gases presentes son estables por meses. Las excepciones son hidrógeno y helio, debido a su pequeño tamaño molecular y alta coeficiente de difusión. Los gases permanentes son analizados igual como se describió arriba. Los gases ácidos también son analizados en un segundo cromatógrafo usando un portador de helio y un polímero poroso como Poropak-Q o Chromosorb 107 con una gelatina de silicio de precolumna para eliminar la interferencia de vapor de agua durante la cromatografía. Este método, discutido por Greenland (1984), se usa en Hawaii para determinar las relaciones de carbón/azufre en los gases de las fumarolas en la cumbre de Kilauea. Estas relaciones han demostrado un comportamiento compatible con las intrusiones de magma inferidas y con los cambios en las tasas de abastecimiento de magma (Greenland y otros, 1985).

## Estudios de Tasas de Emisión

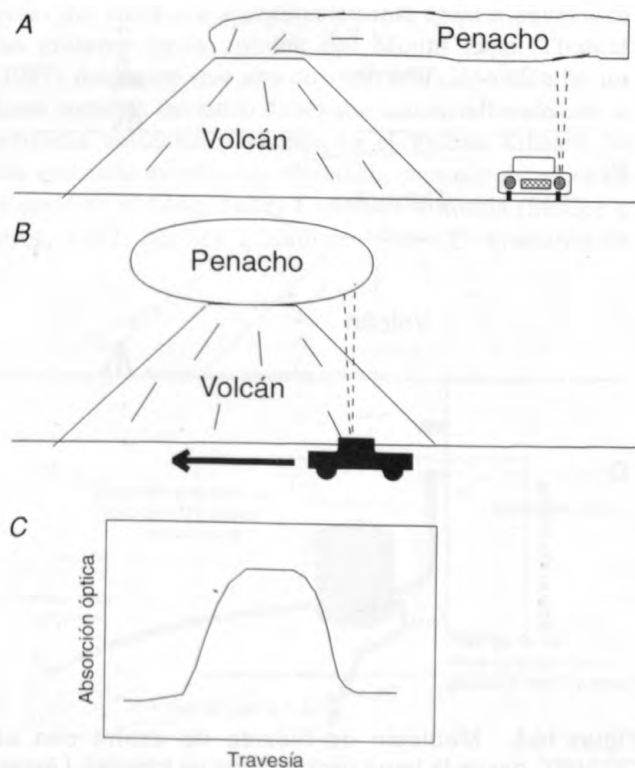
Se estudian las tasas de emisión de gases para estimar la cantidad de  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}_2$  que están siendo emitidos por un volcán y son realizados tomando medidas del penacho volcánico. Las tasas de emisión de dióxido de azufre han sido usadas para inferir el volumen de magma que se está desgasificando (Casadevall y otros, 1983) y las tasas de abastecimiento del magma (Casadevall y otros, 1987). Las medidas de dióxido de azufre y dióxido de carbono son reportados como flujos con unidades en toneladas métricas por día, aunque se miden de diferente manera los dos gases.

El dióxido de azufre se mide remotamente con un espectrómetro de correlación (COSPEC- correlation spectrometer) (Barringer Research Ltd., Canada). La energía ultravioleta solar de una longitud de onda específica es absorbida proporcionalmente a la concentración de  $\text{SO}_2$  y espesor del penacho. El COSPEC mide esta absorción, en unidades de concentración por distancia recorrida, y se calibra con una absorción estándar del gas  $\text{SO}_2$  en el instrumento. Multiplicando el perfil de absorción del penacho por la velocidad del viento se obtiene la tasa de emisión de  $\text{SO}_2$ . La técnica ha sido descrita por Casadevall y otros (1981; 1983; 1987), Stoiber y otros (1983), y Millan y otros (1976). Este método se usa rutinaria y mundialmente para hacer medidas de  $\text{SO}_2$  volcánico. Las medidas se pueden hacer desde el suelo o en el aire. Para

las medidas hechas desde la tierra, se determina la velocidad del viento con un anemómetro manual. Para las medidas de  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}_2$  que se toman en el aire se usa la velocidad del viento medida con un sinnúmero de métodos, incluyendo aquellas reportadas por aeropuertos locales. Alternativamente, la velocidad del viento se puede determinar comparando la verdadera velocidad del aire, volando en y contra del viento, con la verdadera velocidad en la tierra. La determinación exacta de la velocidad del viento es crítica para determinar confiadamente las tasas de emisión (Casadevall y otros, 1987). Las medidas aéreas de  $\text{SO}_2$  tienden a ser más confiables que las medidas tomadas en la tierra, porque la velocidad del viento es determinada en el mismo sitio que se toma la medida.

Las medidas tomadas con el COSPEC desde el suelo pueden ser hechas desde un vehículo cruzando debajo del penacho mientras apunta el instrumento hacia el mismo (fig. 18.4). Alternativamente, el COSPEC puede ser montado en un trípode cerca del punto de emisión (Chartier y otros, 1989) para rastrear el penacho vertical- o horizontalmente (fig. 18.5).

Las medidas aéreas de  $\text{SO}_2$  se hacen volando justo debajo y a ángulos rectos a la trayectoria del penacho (fig. 18.6). Las medidas de las múltiples travesías, tomadas desde la tierra o en el aire, se promedian para



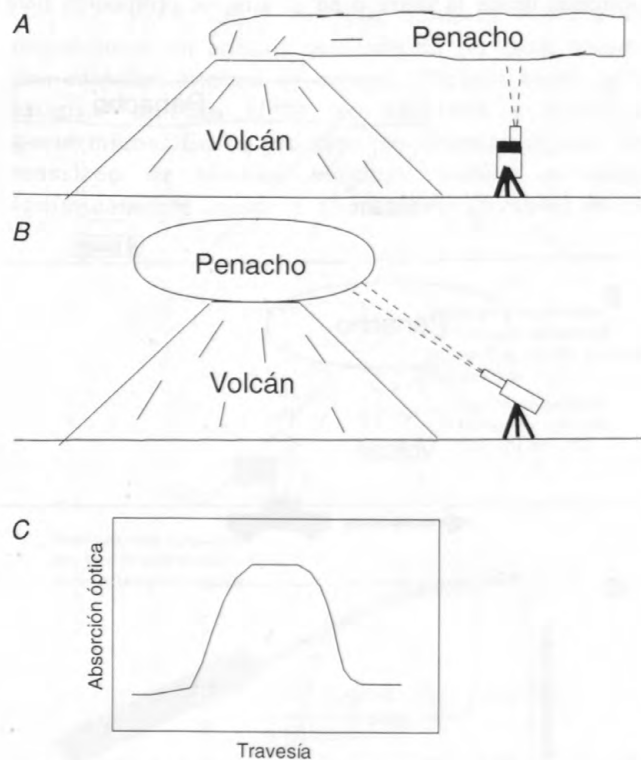
**Figura 18.4.** Medición de dióxido de azufre con el COSPEC desde la tierra (montado en un vehículo). A, Vista lateral. B, Vista frontal. C, Datos típicos.

calcular las tasas de emisión, que luego se convierten a una tasa diaria.

Las medidas de dióxido de carbono también se hacen mediante espectroscopía, pero requieren de medidas tomadas dentro del penacho. Esto se hace volando repetidamente por el penacho en ángulo recto a su trayectoria (fig. 18.7). Las medidas de absorción infrarroja (IR) se hacen bombardeando el gas del penacho con un espectrofotómetro Miran IR entonado espectroscópicamente (Foxboro Company, Foxboro, Massachusetts) y que está montado en una avioneta de ala fija. Este método genera un perfil de concentración para el penacho y se usa conjuntamente con la velocidad del viento para calcular las tasas de emisión de  $\text{CO}_2$ . El método, discutido por Harris y otros (1981), ha sido usado para tomar medidas en Mount St. Helens y Hawaii (Casadevall y otros, 1983, Greenland y otros, 1985).

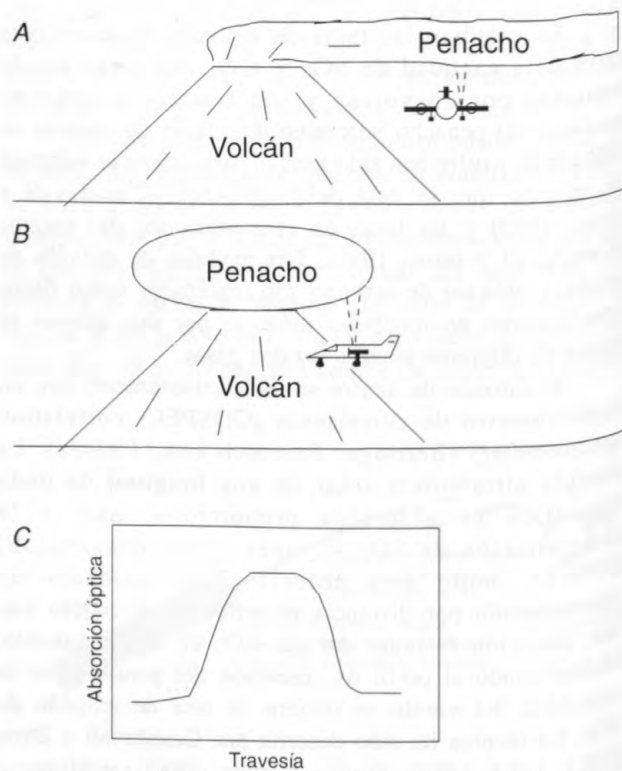
## Vigilancia Continua de Gases

Algunos eventos eruptivos tienen duraciones tan cortos como unos minutos, y por lo tanto quizás no sean detectados por las técnicas de recolección y análisis que



**Figura 18.5.** Medición de dióxido de azufre con el COSPEC desde la tierra (montado en un trípode). Líneas de puntos representan el campo de vista para el ángulo fijo del COSPEC. A, Vista lateral. B, Vista frontal. C, Datos típicos.

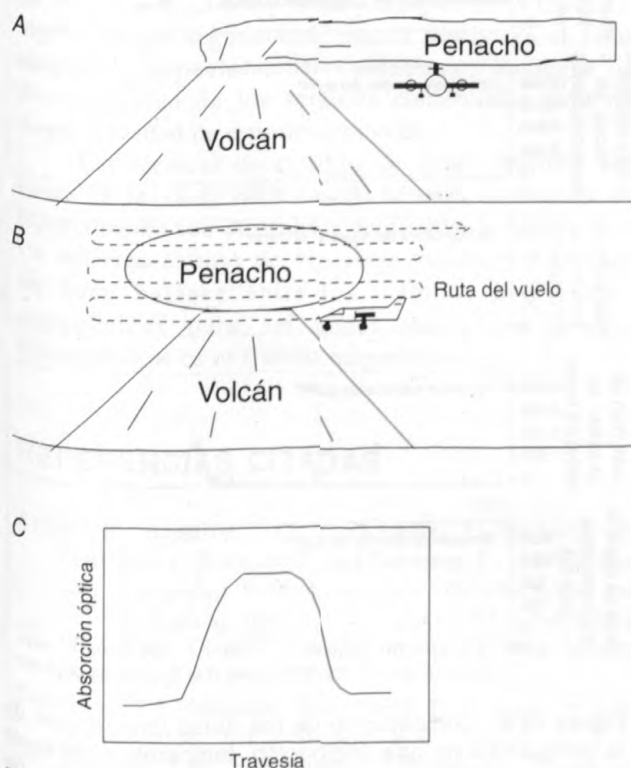
envuelven un muestreo periódico o medidas de tasas de emisión. Las medidas continuas, sin embargo, pueden seguir los cambios cortos de concentraciones. La vigilancia continua de gases comprende la utilización de uno o más sensores que miden la concentración del gas en sitio. La técnica fue originalmente desarrollada y probada a mediados de los años 1970 por Sato y sus colegas (Malone y Frank, 1975; Sato y otros, 1976) para vigilar la actividad del Mount Baker, Washington (Frank y otros, 1977). Típicamente, los datos son tomados de los sensores cada 10 minutos y enviados por telemetría de radio, satélite o teléfono a un centro de recepción donde están disponibles en tiempo casi real (McGee y otros, 1987). Para los estudios continuos de vigilancia de gases en sitio por científicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos se ha usado un sensor con una célula electroquímica, desarrollado por el USGS, que es sensible a los gases reductores incluyendo  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{HCl}$  y  $\text{HF}$ . El sensor, que resiste condiciones de campo duras y corrosivas, fue descrito por Sato y McGee (1981). Más recientemente, estudios detallados de este sensor fueron reportados por Sutton y McGee (1989) y McGee y Sutton (1990). Hasta recientemente, era difícil conseguir sensores de gas que sirvieran para medir diferentes especies, fueran fuertes y estuvieran comercialmente disponibles. Las técnicas de detección de



**Figura 18.6.** Medición de dióxido de azufre con el COSPEC desde el aire. A, Vista lateral. B, Vista frontal. C, Datos típicos.

gases y sensores potencialmente útiles, disponibles comercialmente fueron resumidos por Sutton (1990). Ahora se consiguen sensores comerciales que miden  $H_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO$ ,  $COS$ ,  $HCl$  y  $HF$ . Casi todos estos sensores requieren de algunas modificaciones antes que puedan ser utilizadas en ambientes volcánicos, y la selectividad de especies es un problema frecuente que requiere de una instalación más cuidadosa. Por ejemplo, un sensor de  $SO_2$  puede demostrar una sensibilidad cruzada con  $H_2S$ . Mediante la instalación de un sensor de  $H_2S$  que no tiene ninguna sensibilidad a  $SO_2$ , conjuntamente con el sensor de  $SO_2$  original, se pueden vigilar los dos gases y construir un algoritmo de corrección de interferencia para la salida del sensor de  $SO_2$ .

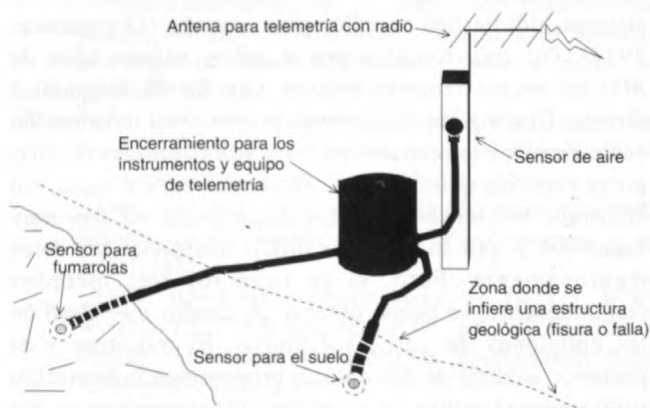
Las medidas continuas de gas pueden ser hechas en fumarolas, desde el aire cerca a una fumarola activa y en el suelo cerca a rasgos estructurales (fig. 18.8). Las medidas continuas de fumarolas se hacen mediante la colocación de sensores de gas directamente en el punto de emisión. Un evento grande de gas en el Volcán Kilauea, Hawaii, fue detectado antes de una erupción del East Rift usando sensores de gas instalados en fumarolas de baja temperatura (McGee y otros, 1987). Este modo de instalación es útil cuando se piensa que las fumarolas tienen una buena comunicación con el conducto principal del sistema magmático.



**Figura 18.7.** Medición aérea del dióxido de carbono con el instrumento Miran. A, Vista lateral. B, Vista frontal. C, Datos típicos.

La vigilancia desde el aire es llevada a cabo mediante la instalación de sensores de gas a 1 a 2 m sobre el nivel del suelo, en postes de madera localizados estratégicamente cerca de áreas donde continuamente se está emitiendo. Este método de instalación de sensores tiene algunas ventajas sobre la vigilancia de fumarolas individuales. Evita el posible error de escoger una fumarola sin raíz y proporciona una señal integral de emisión de gas para varios puntos de emisión dentro del área, aunque está sujeto a lecturas anómalas de sensores mientras cambia la dirección del viento. Además, la vigilancia aérea permite el uso de una mayor variedad de sensores, dado que hay muchos sensores que no resisten las condiciones rigurosas de las fumarolas. La vigilancia aérea en el flanco sur del Mount St. Helens fue descrita por Sato y McGee (1981) y actualmente se está realizando una vigilancia aérea del domo activo de lava en el Mount St. Helens (McGee y otros, 1986).

Para la vigilancia continua de gases en el suelo se entierra el sensor, por lo menos, un metro en un área donde se sospecha que hay alguna falla o en otras zonas permeables al gas. Los lugares favorables para la vigilancia de gases en el suelo pueden ser identificados con otros métodos de vigilancia. Por ejemplo, Allard y otros (1989) usaron un detector de  $CO_2$  infrarrojo portátil para obtener información sobre una estructura geológica en el edificio volcánico del Mount Etna, Sicilia. Ellos determinaron que la emisión de  $CO_2$  integrado en los gases del suelo era aproximadamente igual a aquella en los cráteres en la cumbre del Mount Etna. Thomas (1987) determinó que una concentración de radón en los gases someros del suelo cambiaba sustancialmente con la actividad volcánica y sísmica en el Volcán Kilauea. Se han realizado estudios de vigilancia continua de gases en el suelo en el Long Valley Caldera, California (McGee y otros, 1982; McGee y Sutton, 1990). El muestreo de



**Figura 18.8.** Vigilancia continua de gas con sensores para el aire, fumarola y suelo. La telemetría puede ser de tipo convencional con radio, satélite o teléfono.



**Tabla 18.1.** Las ventajas y desventajas generalizadas de las diferentes técnicas fundamentales de estudios de gases volcánicos.

	Muestreo/ Análisis	Tasas de Emisión	Vigilancia Continua
Ventajas	Muy específico. Muchos datos para un solo sitio y hora.	Técnica remota. Emisión global de SO <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> . Se puede calcular la tasa de suministro del magma.	Control temporal excelente de la desgasificación. Conjunto continuo de datos. Verdadera vigilancia.
Desventajas	Vacíos temporales y espaciales. Laborioso y potencialmente peligroso.	Para sólo dos gases. Requiere una salida al campo para cada dato.	Pequeño número de sensores selectivos y duraderos. Requiere telemetría.

gases del suelo y la vigilancia continua del helio han sido descritos por Friedman y Reimer (1987).

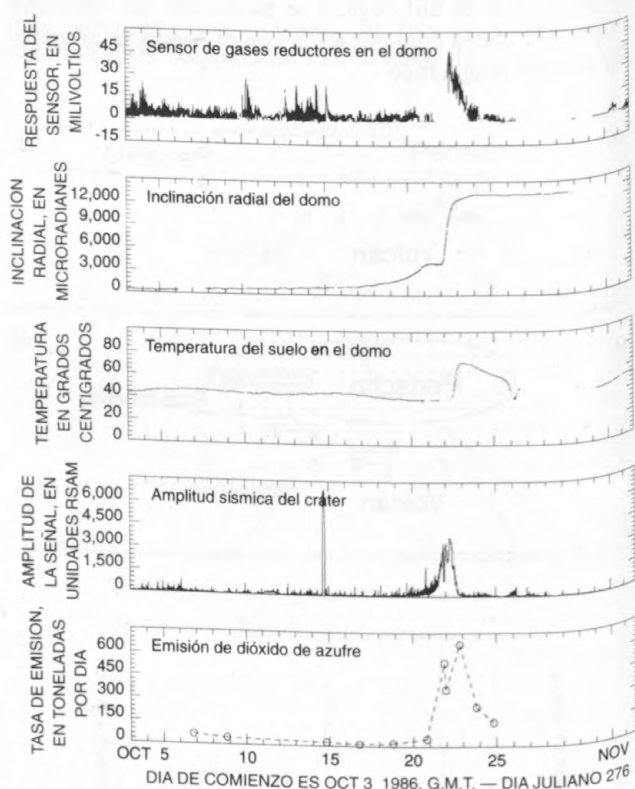
## DISCUSION

Cada una de las técnicas fundamentales para vigilar actividad volcánica tiene sus ventajas y desventajas que han sido resumidas en la tabla 18.1. El muestreo de fumarolas con análisis de laboratorio da información química detallada, pero solo de un punto de emisión de gas en particular para ese momento específico. Los estudios de tasas de emisión revelan la emisión total de gas para un determinado volcán durante un período de medición, pero con las técnicas existentes solo para dos gases, SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Más aún, unos valores altos de emisión de SO<sub>2</sub> para ciertos volcanes en proceso de reactivación pueden indicar un escape de gases de origen magmático que se han acumulado dentro de un sistema hidrotermal amplio, pero somero (Giggenbach, 1989). Por eso, tomados por si solos, valores altos de SO<sub>2</sub> no necesariamente indican una fuente magmática directa. Una vigilancia continua proporciona información sobre cambios temporales en las concentraciones de unas pocas especies químicas para fumarolas, aire y suelo; sin embargo, los sensores usados actualmente no son muy selectivos y, por lo tanto, es difícil interpretar los datos rigurosamente. Pero, si se usan los tres métodos conjuntamente, se puede obtener un cuadro más claro de las emisiones de gases volcánicos. El muestreo y el posterior análisis de laboratorio proporciona información fundamental sobre la composición completa y las relaciones de fase del gas y verifica la exactitud de estudios de vigilancia continua. Los estudios de tasas de emisión enfocan las tasas globales de emisión de gas,

que pueden ser verificados cualitativamente con una vigilancia continua y con muestreo y análisis de laboratorio.

Otros métodos para estudiar los gases directamente, que no han sido descritos aquí, incluyen cromatógrafos portátiles de gas para hacer análisis en sitio de los gases (LeGuern, 1982), y estudios isotópicos potencialmente útiles para determinar si las especies de gas son de origen meteórico o magmático (Evans y otros, 1981). Métodos indirectos para estudiar gases incluyen estudios de lixiviados de ceniza, que son útiles cuando no es posible hacer un muestreo directo de los gases (Williams y otros, 1986; Hinkley, 1987). La vigilancia química y los parámetros físicos de lagos crátericos y quebradas pueden indicar una reanudación del movimiento del magma dentro de estos sistemas (McGee y otros, capítulo 17).

Los resultados de los estudios de gases pueden ser utilizados conjuntamente con otros datos de tiempo-serie para ayudar a evaluar la actividad volcánica. La figura 18.9 ilustra los datos de vigilancia de la actividad de construcción del domo en el Mount St. Helens en Octubre de 1986. Un sensor de gases reductores,



**Figura 18.9** Comparación de los datos telemétricos de la geoquímica de gas, inclinación, temperatura de suelo y RSAM y datos intermitentes tomados en el aire de dióxido de azufre para el período de tiempo incluyendo la erupción con construcción del domo de Mount St. Helens el 22 de Octubre de 1986.

inclinómetro, sensor de temperatura del suelo y sismómetro localizados en el cráter registraron el episodio de construcción del domo en tiempo real. Las tasas de emisión de dióxido de azufre fueron medidas intermitentemente y muestran un patrón similar.

## CONCLUSIONES

Para fines de vigilancia volcánica, se usan tres técnicas básicas para estudiar gases: muestreo de fumarolas con análisis de laboratorio para los especies volátiles principales y secundarios, la medida de las tasas de emisión de SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> y la vigilancia continua en sitio de los gases usando sensores químicos. Las técnicas de muestreo de fumarolas y análisis están bien establecidas y proporcionan la información más completa sobre las composiciones específicas de los puntos de emisión. Tales técnicas han sido usadas también para inferir las composiciones de los gases magmáticos y la cantidad de volátiles (Gerlach y Casadevall, 1986; Gerlach y Graeber, 1985). Similarmente, las medidas de las tasas de emisión de SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> están bien establecidas y pueden registrar cambios en las tasas del suministro de magma y del nivel general de actividad de un volcán. La vigilancia continua establece un registro sin interrumpido de las especies seleccionadas de gases en las fumarolas, aire y suelo y también es la técnica de vigilancia que seguramente crecerá mucho en el futuro cercano, especialmente mientras aumenta la disponibilidad de los sensores comerciales para una mayor variedad de especies químicas.

Las técnicas de estudios de gases descritas aquí tienen su máximo valor cuando se usan conjuntamente, especialmente con otros datos geofísicos de tiempo serie. Un esfuerzo exitoso de vigilancia volcánica debe tener un buen balance entre los métodos geofísicos y geoquímicos para así poder medir los cambios físicoquímicos en el sistema magmático.

## REFERENCIAS CITADAS

- Allard, P., Baubron, J.C., Carbonelle, J., Dajlevic, D., LeBronec, J., Robe, M.C., and Zettwoog, P., 1989, Diffuse soil degassing from volcanoes: Geochemical and volcanological implications: IAVCEI Continental Magmatism General Assembly, Santa Fe, New Mexico, abstracts p. 3.
- Casadevall, T.J., Johnston, D.A., Harris, D.M., Rose, W.I. Jr., Malinconico, L.L., Stoiber, R.E., Bornhorst, T.J., Williams, S.N., and Woodruff, Laurel, and Thompson, J.M., 1981, SO<sub>2</sub> emission rates at Mount St. Helens from March 29 through December, 1980, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.L., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 193-200.
- Casadevall, T.J., Rose, W.I., Jr., Gerlach, T.M., Greenland, L.P., Ewert, J., Wunderman, R., and Symonds, R., 1983, Gas emissions and the eruptions of Mount St. Helens through 1982: *Science*, v. 221, p. 1383-1385.
- Casadevall, T.J., Stokes, J.B., Greenland, L.P., Malinconico, L.L., Casadevall, J.R., Furukawa, B.T., 1987, SO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> emission rates at Kilauea Volcano, 1979-1984, *en* Decker, R.W., Wright, T.L., and Stauffer, P.H., eds., Volcanism in Hawaii: U.S. Geological Survey Professional Paper 1350, p. 771-780.
- Chartier, T.A., Rose, W.I., Stokes, J.B., 1988, Detailed record of SO<sub>2</sub> emissions from Pu'u 'O'o between episodes 33 and 34 of the 1983-86 eruption, Kilauea, Hawaii: *Bulletin of Volcanology*, v. 50, p. 215-228.
- Evans, W.C., Banks, N.G., and White, L.D., 1981, Analyses of gas samples from the summit crater, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.L., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 227-232.
- Frank, David, Meier, M.F., and Swanson, D.A., 1977, Assessment of increased thermal activity at Mount Baker, Washington, March 1975-March 1976: U.S. Geological Survey Professional Paper 1022-A, 49 p.
- Friedman, I.F., and Reimer, G.M., 1987, Helium at Kilauea Volcano, in Decker, R.W., Wright, T.L., and Stauffer, P.H., eds., Volcanism in Hawaii: U.S. Geological Survey Professional Paper 1350, p. 809-820.
- Gerlach, T.M., and Casadevall, T.J., 1986, Fumarole emissions at Mount St. Helens volcano, June 1980 to October 1981: Degassing of a magma-hydrothermal system: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 28, p. 141-160.
- Gerlach, T.M., and Graeber, E.J., 1985, Volatile budget of Kilauea volcano: *Nature*, v. 313, p. 273-277.
- Giggenbach, W.F., 1975, A simple method for the collection and analysis of volcanic gas samples: *Bulletin Volcanologique*, v. 39, p.132-145.
- \_\_\_\_\_, 1989, The El Ruiz magmatic-hydrothermal system: IAVCEI Continental Magmatism General assembly, Santa Fe, New Mexico, abstracts, p. 106.
- Giggenbach, W. F., and Goguel, R. L., 1988, Methods for the collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas samples: New Zealand Department of Scientific and Industrial Research, Chemistry Division, report no. CD 2387, 53 p.
- Greenland, L.P., 1984, Gas composition of the January 1983 eruption of Kilauea volcano, Hawaii: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 48, p. 193-195.
- \_\_\_\_\_, 1986, Gas analyses from the Pu'u O'o eruption in 1985, Kilauea volcano, Hawaii: *Bulletin of Volcanology*, v. 48, p. 341-348.
- \_\_\_\_\_, 1987, Hawaiian eruptive gases, *en* Decker, R.W., Wright, T.L., and Stauffer, P.H., eds., Volcanism in Hawaii: U.S. Geological Survey Professional Paper 1350, p.759-770.
- Greenland, L.P., Rose, W.I., Stokes, J.B., 1985, An estimate of gas emissions and magmatic gas content from Kilauea volcano: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 49, p. 125-129.

- Harris, D.M., Sato, Motoaki, Casadevall, T.J., Rose, W.I. Jr., and Bornhorst, T.J., 1981, Emission rates of CO<sub>2</sub> from plume measurements, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.L., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 201-207.
- Hinkley, T.K., ed. 1987, Chemistry of ash and leachates from the May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1397, 64 p.
- Jaggard, T.A., 1940, Magmatic gases: American Journal of Science, v. 238, p. 313-353.
- LeGuern, G., Gerlach, T.M., and Nohl, A., 1982, Field gas chromatograph analyses of gases from a glowing dome at Merapi Volcano, Java, Indonesia, 1977, 1978, 1979: Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 14, p. 223-245.
- Malone, S.D., and Frank, David, 1975, Increased heat emission from Mount Baker, Washington: Eos, v. 56, p. 679-685.
- McGee, K.A., Casadevall, T.J., Sato, Motoaki, Sutton, A.J., and Clark, M.D., 1982, Hydrogen gas monitoring at Long Valley Caldera, California: U.S. Geological Survey Open-file Report 82-930, 12 p.
- McGee, K.A., and Sutton, A.J., 1990, A detailed study of the USGS reducing-gas sensor with field tests at Long Valley, California: U.S. Geological Survey Open-File Report 90-61, 68 p.
- McGee, K.A., Sutton, A.J., and Sato, Motoaki, 1987, Use of satellite telemetry for monitoring active volcanoes, with a case study of a gas-emission event at Kilauea volcano, December 1982, *en* Decker, R.W., Wright, T.L., and Stauffer, P.H., eds., Volcanism in Hawaii: U.S. Geological Survey Professional Paper 1350, p. 821-825.
- McGee, K.A., Sutton, A.J., and Sato, Motoaki, 1986, Continuous gas monitoring in volcanic systems: IAVCEI workshop on volcanic gases, Utsunomiya, Japan, June 1985, abstracts, p. 10.
- Millan, M.M., Gallant, A.J., and Turner, H.E., 1976, The application of correlation spectroscopy to the study of dispersion from tall stacks: Atmospheric Environment, v. 10, p. 499-511.
- Piccardi, G., and Cellini-Legittimo, P., 1983, A sampling and chemical analysis procedure for fumarolic gases: Mikrochimica Acta [Wien], v. 11, p. 159-167.
- Sato, Motoaki, Malone, S.D., Moxham, R.M., and McLane, J.E., 1976, Monitoring of fumarolic gas at Sherman Crater, Mount Baker, Washington: Eos, v. 57, p. 88-89.
- Sato, Motoaki, and McGee, K.A., 1981, Continuous monitoring of hydrogen on the south flank of Mount St. Helens, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.L., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 209-219.
- Stoiber, R.E., Malinconico, L.L., and Williams, S.N., 1983, Use of the correlation spectrometer at volcanoes, *en* Tazieff, H., and Sabroux, J.C., eds., Forecasting volcanic events: Amsterdam, Elsevier, p. 425-444.
- Sutton, A.J., 1990, Chemical sensors for volcanic gases with a compilation of commercial availability: U.S. Geological Survey Open-File Report 90-44, 27 p.
- Sutton, A.J., and McGee, K.A., 1989, A multiple-species volcanic gas sensor—Testing and applications: IAVCEI Continental Magmatism General assembly, Santa Fe, New Mexico, abstracts, p. 262.
- Thomas, D.M., 1987, An interpretation of the response of ground-gas radon concentration to seismic and volcanic activity at Kilauea volcano: Hawaii Symposium on How Volcanoes Work, abstracts, p. 251.
- Tilling, R.I., 1989, Volcanic hazards and their mitigation: Progress and problems: Reviews of Geophysics, v. 2, p. 237-269.
- UNESCO, 1972, The surveillance and prediction of volcanic activity, a review of methods and techniques: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Earth Sciences v. 8, 166 p.
- Williams, S.N., Stoiber, R.E., Garcia, P. N., Londono, C. A., Gemmel, J.B., Lowe, D.R., and Connor, C.B., 1986, Eruption of the Nevado del Ruiz volcano, Colombia, on 13 November 1985: Gas flux and fluid geochemistry: Science, v. 133, p. 964-967.



# 19. Videovigilancia en Volcanes Activos con Televisión de Rastreo Lento

Por Bruce T. Furukawa, Thomas L. Murray y Kenneth McGee

## ABSTRACTO

La videovigilancia con televisión de rastreo lento ha probado ser una herramienta de vigilancia muy valiosa en el Mount St. Helens. El sistema proporciona un registro permanente en video de los eventos en el volcán y también ayuda a planificar la logística y las operaciones de campo. Este sistema es particularmente valioso en volcanes remotos, donde de otra manera no sería posible hacer observaciones continuas.

## INTRODUCCION

La videovigilancia del Volcán Mount St. Helens con televisión de rastreo lento (SSTV—Slow-scan television) empezó el 4 de Septiembre de 1987. El sistema consistía de una videocámara, convertidor de rastreo, transmisor de radio y sistema energético localizados en un risco 8.5 km al norte de Mount St. Helens; una repetidora de radio en un punto alto al oeste del volcán; y un convertidor de rastreo, videomonitor, y equipo de grabación en el Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO—Cascades Volcano Observatory) en Vancouver, Washington (fig. 19.1). Después de varios meses de operación, para ahorrar energía, el sistema fue modificado para que se apagara durante la noche y se prendiera nuevamente por la mañana. Una mejora posterior incluyó la capacidad de controlar remotamente varias funciones adicionales, tales como el zoom y el giro de la cámara.

La videovigilancia de volcanes activos tiene varios beneficios atractivos. Primero, existe la posibilidad de reducir el costo de la vigilancia volcánica. Las condiciones atmosféricas, como condiciones de vapor y polvo pueden ser observadas y consideradas al planificar las actividades diarias de campo. Segundo, se reduce la necesidad de realizar vuelos de observación aérea. Tercero, un sistema de video confiable puede reducir significativamente las amenazas al personal durante períodos antes y después de una actividad eruptiva,

suplementando las observaciones hechas por el personal en el campo. Un zoom de potencia variable a control remoto permite que el personal se mantenga a una distancia segura de la actividad. Cuarto, la información de video disponible durante las horas de luz se puede correlacionar fácilmente con otros datos de vigilancia telemétrica para evaluar las condiciones del momento. En la noche, un sistema de vigilancia SSTV puede utilizar una cámara infrarroja para vigilar puntos calientes. También, se puede conectar una grabadora de videocasete (VCR) en la salida de la videocámara en paralelo con la salida del convertidor de rastreo, que puede ser programado para prenderse en respuesta a una señal de control en una estación base o una señal de un aparato de vigilancia en el campo, tal como un sismómetro o alambre de disparo, para poder continuamente grabar eventos tales como penachos eruptivos, avalanchas de escombros o lahares para un análisis posterior detallado. Hasta es posible diseñar un sistema SSTV portátil que podría ser rápidamente instalado en volcanes que amenazan con erupcionar. Finalmente, la información de video puede ser almacenada en cinta magnética para su análisis posterior.

El primer sistema de video en Mount St. Helens consistió de un sistema de televisión de circuito cerrado instalado en Julio de 1980 en respuesta al comienzo de una actividad eruptiva anterior durante ese año (Miller y Hoblitt, 1981). Este sistema fue extremadamente valioso para los científicos que vigilaban la actividad eruptiva que estaba ocurriendo, pero fue ensamblado apuradamente bajo condiciones de emergencia y funcionó por menos de un año antes de sucumbir a los problemas relacionados con la compleja tecnología de microondas y gran consumo energético. En Enero 1984, se presentó una idea para usar una videocámara digital con microprocesador y modem de radio para obtener imágenes del Mount St. Helens, pero no se tomó ninguna acción. En el invierno de 1985-86, el CVO consideró seriamente una propuesta para establecer un enlace de microonda que transmitiría las señales de telemetría y

video de las estaciones de vigilancia en el campo. Luego se abandonó la idea debido al alto costo de los equipos y mantenimiento del sistema. Finalmente, en 1986, el CVO se puso como meta la operación de una televisión de rastreo lento para videovigilancia en el Mount St. Helens. El sistema descrito en este capítulo es el resultado.

La televisión de rastreo lento, desarrollada primeramente por experimentadores amateurs de radio en los 1950's, es un sistema mediante el cual las imágenes de video son convertidas línea por línea a tono variable para la transmisión por un sistema radial de banda estrecha. La televisión convencional requiere de un ancho de banda de 6 MHz para la transmisión de señales de video, mientras que un SSTV requiere de un solo canal estándar de voz de 3 kHz. Esta diferencia crítica en los requisitos de espectro RF resulta en ventajas significativas del SSTV sobre sistemas convencionales de televisión (menor costo y requisitos energéticos más pequeños, sistemas de telemetría radial menos complejas, y facilidad de dar servicio). Además, dada la estrechez

de la banda, las imágenes SSTV pueden ser almacenadas en cintas magnéticas estándares de audio en vez de videocintas. Una desventaja del SSTV es que la información de video no es continua, porque está presentado como series en tiempo de las fotos de video. Sin embargo, observatorios vulcanológicos que tienen que vigilar uno o varios volcanes sobre un período de años, el sistema de televisión de rastreo lento pudiera ser el método escogido.

## DESCRIPCION DEL SISTEMA

El sistema actual de televisión de rastreo lento en el Mount St. Helens consiste de una cámara, convertidor de rastreo y controlador en la estación de campo; un convertidor de rastreo, control remoto, monitor de TV y grabadora en el Observatorio Vulcanológico Cascades; y un sistema radial, incluyendo una repetidora, para transmitir el video y las señales de control (fig. 19.1). En

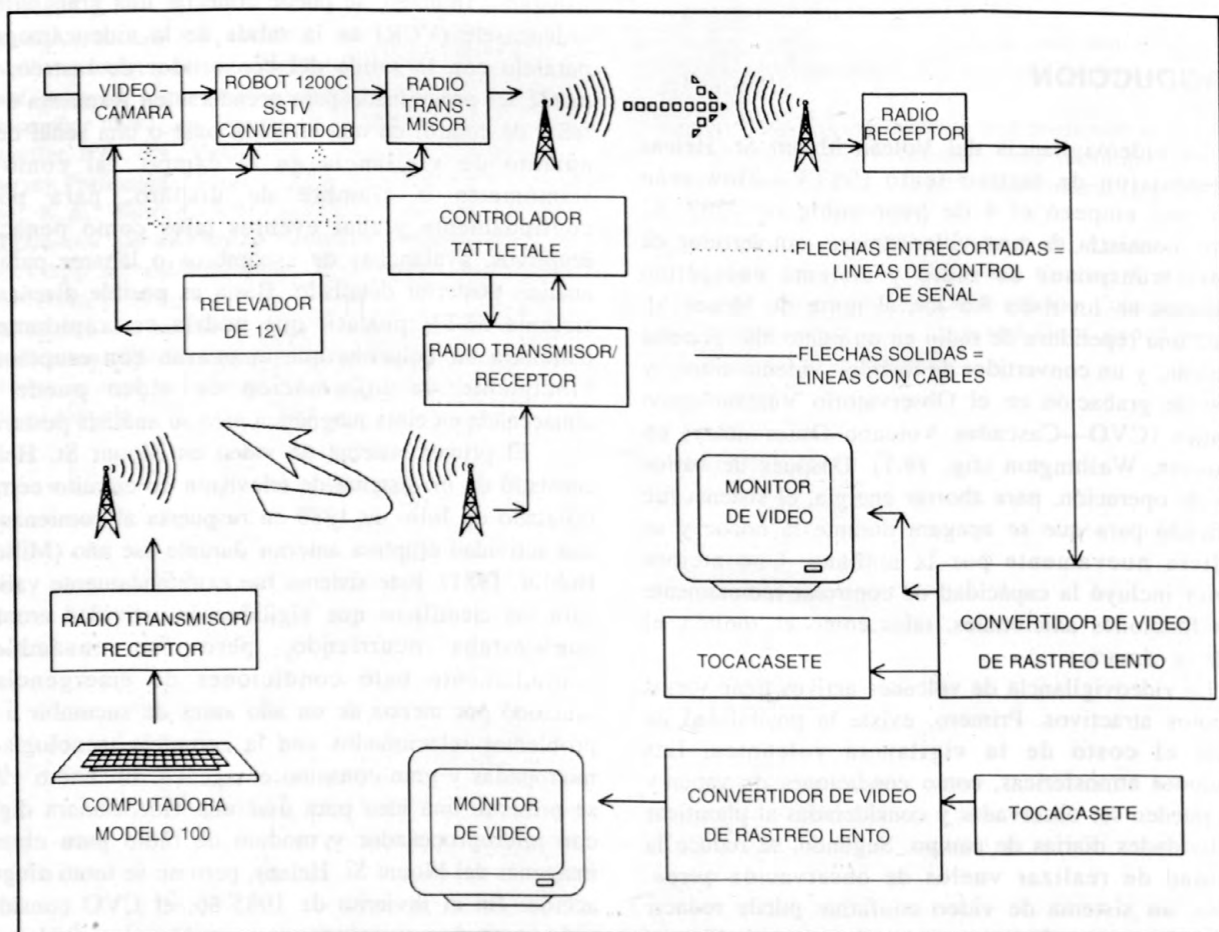


Figura 19.1. Diagrama de flujo ilustrando los componentes del sistema SSTV del CVO.

el apéndice 1 están enumerados los equipos usados por el CVO.

Cualquier videocámara buena con un voltaje operativo de 12 voltios DC, o con especificaciones similares a esas enumeradas en el apéndice 1, puede ser usada para esta aplicación. La cámara del CVO, localizada a 8.5 km al norte del Mount St. Helens, tiene una opción de zoom para observar de cerca el interior del cráter o para alejarse y ver el edificio volcánico completo y terrenos cercanos mediante el uso del sistema de control remoto descrito a continuación. La cámara está montada en un panoramizador y unidad de inclinación servocontrol. Cuando totalmente implementado, esta unidad de giro-inclinación permite a la cámara girar 150 grados a la izquierda y derecha del centro e inclinarse 30 grados hacia arriba o abajo de la horizontal.

La salida de video de una cámara es pasada directamente al convertidor de colores del video de rastreo lento que ha sido modificado para operar con una fuente de energía de 12-V DC. En la actualidad, el convertidor de color SSTV es un transmisor/receptor capaz de transmitir o recibir imágenes mediante cualquier enlace de comunicación para voces. El convertidor digitaliza la señal de video de una cámara y, después de la conversión a tonos audio, transmite en 72 segundos línea por línea la imagen usando un proceso llamado componente de color múltiplex en el tiempo. En la opción de mayor resolución, el convertidor puede producir una imagen digitalizada compuesta de 61,440 elementos en una matriz de 256 pixel por 240 líneas. Cuando se opera remotamente una estación de campo, las funciones del convertidor SSTV pueden ser controladas con una computadora mediante un puerto serial RS-232. A continuación se describen los dos sistemas de control que se han desarrollado en el CVO.

La señal de video digitalizada y codificada por el convertidor SSTV es pasada a un transmisor de telemetría radial, VHF o UHF, de bajo consumo energético. El uso de transmisores radiales estándares, similares a aquellos utilizados para la telemetría de datos de baja frecuencia, representa una de las ventajas más grandes del SSTV sobre los otros tipos de transmisión de video. Las antenas usadas en todo el sistema son yagis de cinco elementos con una ganancia de 10 dB, tipo estándar con protección de radomos y de banda UHF,

Todo el equipo en la estación de campo, con la excepción de la cámara y antena, se coloca dentro de una caseta. La carga para el equipo es proporcionada por dos conjuntos de baterías. Un conjunto consiste de cuatro baterías Delco 2000 ciclo profundo con capacidad de 125 amperios-hora (Ah) diseñadas para ser usadas con paneles solares. El otro conjunto consiste de seis baterías Modelo KCP-SZ-13 de 2-V 560-Ah de alta capacidad y con células húmedas fabricadas por C & D Batteries,

Plymouth Meeting, Pennsylvania, EE.UU.AA. Los dos conjuntos se recargan simultáneamente durante las horas de luz solar por un conjunto de dos paneles solares de 30 vatios.

La información de video de la estación de vigilancia en el campo es recibida en el observatorio mediante una repetidora estándar localizada al oeste del Mount St. Helens. En el CVO, la salida audio del radio receptor SSTV es introducida directamente a otro convertidor SSTV, donde se decodifica la señal, y se introduce a un monitor estándar a color para ser visto. El convertidor también pasa una señal a una grabadora estándar de audio. Un convertidor separado de SSTV con un tocadiscos y monitor a color está disponible para revisar fuera de línea las cintas.

En 1990, cuando se escribió este capítulo, se llevaba tres años operando un sistema de televisión de rastreo lento en el Mount St. Helens. La primera versión operó de manera continua. Debido al consumo energético excesivo, se le añadió un controlador para poder apagarlo de noche. Sin embargo, el consumo energético seguía siendo un problema serio, y el programa se cambió posteriormente a transmitir un solo imagen cada 15 minutos mientras había luz del sol. Estos eran soluciones temporales marginalmente aceptables. Finalmente, se desarrolló e instaló un control remoto que permite que todas las funciones sean controladas desde el CVO.

## CONTROLADOR SSTV

Se han utilizado dos controladores en el sistema SSTV. El primero, una computadora a batería, prendía y apagaba el sistema a horas programadas (fig. 19.2).

Típicamente, la computadora activaba el sistema cada 15 minutos para transmitir una sola imagen con una duración de 2 minutos. Prendiendo y apagando el sistema de esta manera se reducía dramáticamente el consumo energético y permitía que los paneles solares sustituyeran el generador termoelectrónico a propano.

El segundo controlador, desarrollado en el CVO, permite a los usuarios controlar remotamente el sistema emitiendo los comandos desde el CVO al controlador mediante un enlace radial (fig. 19.1). Esta técnica permite prender y apagar el sistema, controla la resolución de la imagen, vigila el voltaje de la batería y ajusta el zoom, giro e inclinación de la cámara.

### Controlador de Computadora Alimentada con Batería

La figura 19.2 ilustra como una pequeña computadora en la estación de la cámara se conecta con el sistema como un controlador. El pin 4 (RTS) del



puerto serial de la computadora controla el relevador que prende y apaga la carga al convertidor, cámara y radiotransmisor de la SSTV. Los comandos son transmitidos desde el puerto serial de la computadora al puerto de entrada de gráficos en el convertidor de la SSTV.

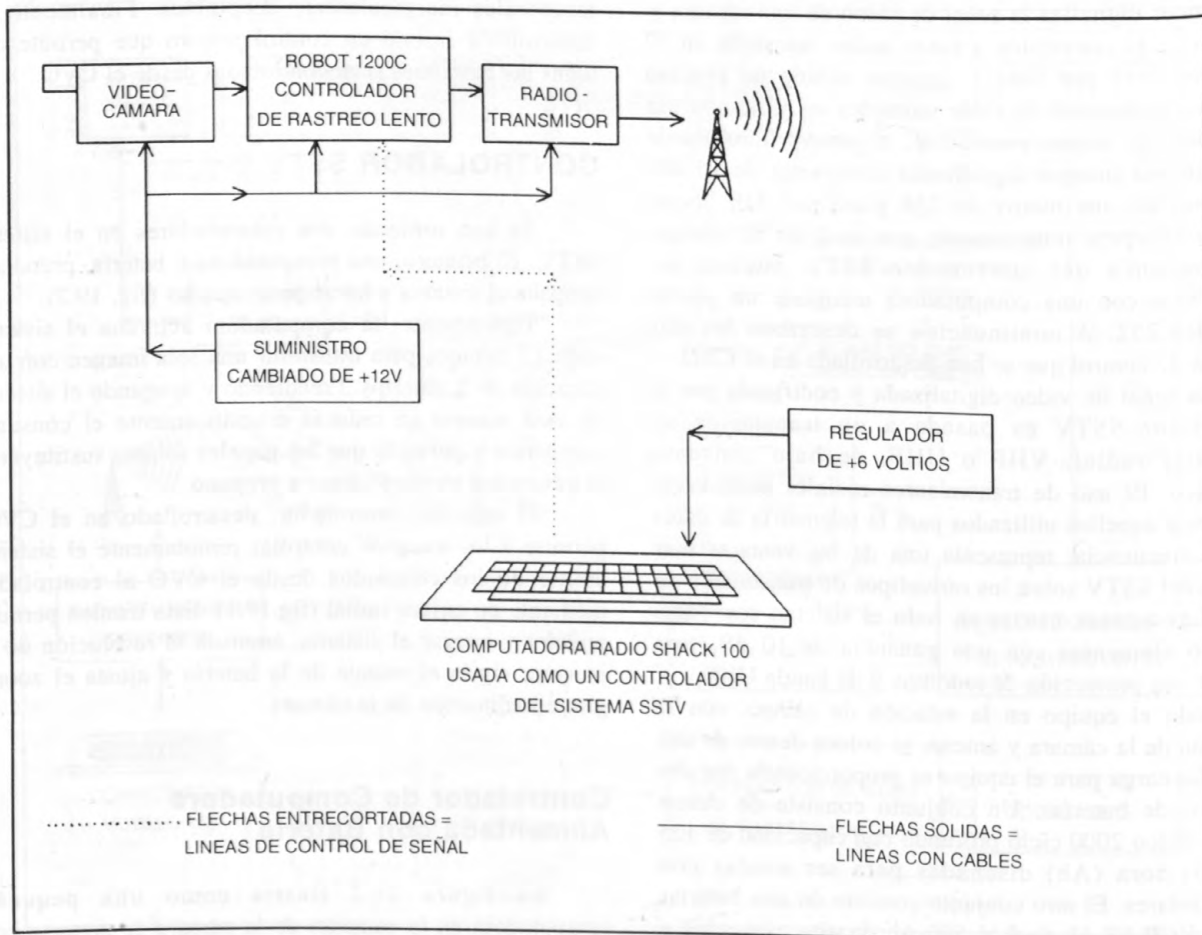
Un programa en BASIC, que corre en la computadora, controla la secuencia de eventos y horas de transmisión. Un programa típico está en el apéndice 2. Con este programa, la computadora prende el sistema cada 15 minutos entre las 0600 y 2000 horas, envía los comandos mediante el pórtico serial al controlador para transmitir una sola imagen a la más alta resolución, espera 2 minutos (suficiente tiempo para que la imagen pueda ser transmitida), y después apaga el sistema. Trece minutos más tarde se repite el proceso.

De los dos controladores, la que usa una computadora a batería es el más sencillo y menos costoso. Su desventaja principal es que no se pueden hacer cambios al programa remotamente; es necesario visitar la estación para modificar el programa. En estaciones accesibles por carro esto quizás no sea un problema, y este sistema puede ser suficiente.

## Sistema de Control Remoto

El sistema de control remoto permite a los usuarios controlar el sistema SSTV desde el observatorio. Un programa controlado con menús corriendo en una computadora portátil permite a los usuarios enviar mensajes por radio al controlador en el campo (apéndice 3). Los mensajes instruyen que el controlador ejecute cualquiera de las opciones deseadas, por lo tanto no es necesario visitar la estación.

El personal del observatorio corre el programa controlado con menús para indicar la acción que desea que ejecute el controlador. Las entradas por parte del usuario inicializa la computadora que genera el comando de instrucción apropiado para la acción deseada del controlador. Este mensaje es enviado al circuito de interfaz de radio mediante el puerto serial RS-232. El circuito de interfaz lee el comando, pone el radio en modo de transmisión, pone el modem en el modo de originate y transmite el mensaje en el formato estándar Bell 103. Después que se envía el comando, el radio regresa al modo de recepción, y el modem al modo de contestación. Entonces recibe la computadora los



**Figura 19.2.** Esquema de controlador de la SSTV original del CVO.



## APENDICE 1

### Lista de Equipos

Videocámara	Videocámara a color JVC, Modelo TK-860U, con un Autofocus de TV de Sanyo, f 1.2, objetivo zoom motorizado con una longitud focal de 12.5 a 75 mm.
Controlador de panoramizador y unidad de inclinación giro/inclinación	Daiwa, Modelo MVH-2D, con giro de 150 grados a la izquierda y derecha del centro e inclinación de 30 grados del horizontal hacia arriba y abajo.
Convertidor de video	Robot Color Scan Converter Modelo 1200C, de rastreo lento modificado para operar con una fuente de energía de 12 VDC.
Radios de telemetría	Radiotransmisor de telemetría Monitron T40F-1 UHF.  Radorreceptor Monitron R40F UHF.  Radio transmisor/receptor Synthex Modelo LM4400.
Computadoras	Radio Shack Modelo 100 (o 102).
Controlador de campo	Controlador de una sola tarjeta Modelo III de Onset Computer Tattletale.
Antenas	SCALA, modelo RA5-450, protegido para radomos, yagi de cinco elementos, con una ganancia de 10 dB.

## APENDICE 2

### Programa típico en BASIC para el Radio Shack Modelo 100

El programa para el Radio Shack Modelo 100 para controlar el sistema de video de rastreo lento. El programa transmite una imagen cada 15 minutos entre las 0600 y 2000 horas.

ponga las corridas de este programa en automático en reset

```

20 IPL "SLOSCN.BA"
21 PRINT "El SLO-SCAN se prenderá cada"
22 PRINT "15 minutos (XX:00, XX:15, XX:30 Y XX:45) Y"
23 PRINT "TRANSMITA UN IMAGEN, HORA ACTUAL ES"
24 PRINT TIME$ : FOR I=1 TO 2000: NEXT I
26 'siempre transmita una imagen en start-up
30 GOSUB 200

    ahora haga loops mientras espera la marca de 15 minutos entre
    las 06:00 y 20:00
40 IF (MID$(TIME$,1,2)<"06") OR (MID$(TIME$,1,2)>"19") THEN GOTO 40
41 IF (MID$(TIME$,4,2)="00") OR (MID$(TIME$,4,2)="30") THEN GOSUB 200
42 IF (MID$(TIME$,4,2)="15") OR (MID$(TIME$,4,2)="45") THEN GOSUB 200
45 GOTO 40
50 'las subrutinas para demoras entre comandos (una corta y una larga)
180 FOR I=1 TO 2000:NEXT I:RETURN
185 FOR I=1 TO 300:NEXT I:RETURN
190 'la subrutina de encendido
191 'abriendo el puerto comprende el relevador para cargar el sistema
200 BEEP:PRINT "CARGA ENCENDIDA": OPEN "COM:77N2D" FOR
    OUTPUT AS I
205 prender demora
210 GOSUB 180 :GOSUB 180
215 'emitir los comandos para poner la configuración correcta

```

```

216 'transmitir 1 (una) imagen
220 PRINT "36/72" : CALL 28210,25 : GOSUB 180
230 PRINT "TRANSMITIR" : CALL 28210,16 : GOSUB 180
235 'presione dos veces el botón "cámara"
240 PRINT "CAMARA" : CALL 28210,42 :GOSUB 185 : CALL 28210,42 :
    GOSUB 180
245 'Espere 2 minutos más y apagar, El apagador tiene return.
250 SC$=MID$(TIME$,7,2)
251 MN$=CHR$(48+((2+VAL(MID$(TIME$,5,1))) MOD 10))
252 IF (MID$(TIME$,5,1)=MN$) AND (MID$(TIME$,7,2)>=SC$) THEN
    GOTO 300
255 'regrese al loop de espera
260 GOTO 252
270 'la subrutina para apagar
275 'cerrando el puerto desactiva el relevador que carga el sistema
300 BEEP:PRINT "CARGA APAGADA A LAS"+TIME$:CLOSE
305 regrese
320 RETURN

```

## APENDICE 3

### Comandos disponibles para el Programa de Computación en la Estación Base

#### Instrucciones para el control de transmisión de la imagen

- Apagar el sistema
- Transmitir un solo mensaje
- Transmitir continuamente
- Transmitir una imagen a intervalos de 5, 10, 15, 30 o 60 minutos
- Ajustar la resolución de la imagen

#### Instrucciones misceláneas

- Ajustar el reloj del Tattletale
- Transmitir el voltaje de la batería

#### Instrucciones para controlar la cámara

- Zoom con acercamiento/alejamiento de la posición actual
- Zoom a una posición absoluta
- Girar a la izquierda o derecha de la posición actual
- Girar a una posición absoluta
- Inclinar hacia arriba o abajo relativo a la posición actual
- Inclinar hasta una posición absoluta

Nota: La posición del zoom, giro e inclinación se mide en cantidad de tiempo (centésimas de segundos) que está activado el motor. Por ejemplo, una posición absoluta de zoom de 125 indica que el zoom fue sacado completamente y después entrado por 1.25 segundos. Un zoom relativo de 25 significa que el zoom es activado por 0.25 segundos. Las posiciones de giro e inclinación son medidas de la misma manera.



## 20. Fotografía Básica en el Mount St. Helens y Otros Volcanes de la Cordillera Cascades

Por Lyn Topinka

### ABSTRACTO

Durante la pasada década, los investigadores del Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO) en Vancouver, Washington, han tomado miles de fotografías del Mount St. Helens y áreas circundantes y cientos de otras en otros volcanes de la Cordillera Cascades. Han usado muchos tipos de cámaras fotográficas. Las cámaras son una de las herramientas más versátiles y útiles disponibles para documentar cambios alrededor de los volcanes. Las cámaras fijas toman una foto a la vez y se pueden clasificar según el tamaño de la película en formato pequeño, mediano y grande. También hay una cámara fija instantánea que produce una imagen en 30 segundos o menos. Las cámaras cinematográficas y de video son usadas para muchas de las mismas aplicaciones que las cámaras fijas y son especialmente útiles para la fotografía oblicua y terrestre. La documentación cinematográfica y en video tiene mucho valor cuando se están estudiando eventos dinámicos tales como columnas de ceniza o flujos piroclásticos, o para calcular la velocidad de lahares o inundaciones. La fotografía aérea vertical y oblicua, fotografía terrestre repetida e ilustrativa y fotografía de lapso de tiempo son algunas de las técnicas disponibles para documentar cambios que ocurren en o alrededor de volcanes. Las fotografías y el metraje pueden ser usadas para hacer interpretaciones, como ilustraciones para publicaciones, charlas científicas y proyecciones públicas de diapositivas, medidas cuantitativas y documentación histórica de procesos volcánicos.

### INTRODUCCION

Los volcanes activos son capaces de producir grandes cambios en ellos mismos y en el paisaje circundante. Para ilustrar, documentar y entender mejor estos cambios se deben guardar registros fotográficos.

El 18 de Mayo de 1980, sobre 400 m del Mount St. Helens colapsaron en una serie de grandes

deslizamientos, liberando presión que produjo una columna pliniana de ceniza de 20 km de altura y dejando atrás un cráter 1.5 km de ancho y 600 m de profundidad. Sobre 650 km<sup>2</sup> de terrenos de recreación, forestales y privadas sufrieron daños. Aproximadamente 60 km<sup>2</sup> del valle del Toutle River fueron enterrados por 2.8 km<sup>2</sup> de escombros del cono que se colapsó (Tilling, 1984). La magnitud del cambio se puede apreciar claramente si se comparan las fotografías tomadas desde un punto 10 km al noroeste del Mount St. Helens, el 17 de Mayo de 1980, el día antes de la erupción devastadora (fig. 20.1.A), y desde el mismo punto el 10 de Septiembre, cuatro meses después (fig. 20.1.B). La foto que se tomó desde el mismo punto el 30 de Marzo de 1987 ilustra los cambios que todavía están ocurriendo en el paisaje después de 7 años de crecimiento del domo y erosión del canal del río (fig. 20.1.C).

Durante la pasada década, el personal del Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO) ha tomado miles de fotografías del Mount St. Helens y área circundante, y cientos de otros volcanes de los Cascades. Estas fotografías son usadas para ilustraciones en publicaciones, charlas científicas y proyecciones públicas de diapositivas, medidas cuantitativas e interpretación y documentación histórica de los procesos volcánicos. Se usan muchos tipos de cámaras incluyendo cámaras fijas, videocámaras y cámaras cinematográficas. Se emplean muchas técnicas incluyendo fotografía aérea y oblicua, fotografía terrestre repetida e ilustrativa y fotografía de lapso de tiempo. El tipo de equipo y el propósito para el cual se usa el equipo o técnica depende principalmente de las necesidades científicas, limitaciones de presupuesto, accesibilidad y preferencia personal del científico. Este capítulo cubre las posibles combinaciones de cámaras y técnicas y da ejemplos de lo que ha sido útil en el Mount St. Helens y otros volcanes de la Cordillera Cascades. No hay ninguna manera correcta, ni universal de tomar fotos; la cantidad y la calidad dependen de los variables únicos de cada volcán y los respectivos científicos.



**A**



**B**

**Figura 20.1.** Mount St. Helens visto 10 km al noroeste, ilustrando el desarrollo del domo de lava y los canales de drenaje. A, Un día antes de la erupción devastadora del 18 de Mayo. B, Cuatro meses después de la erupción del 18 de Mayo. C, Siete años después de la erupción del 18 de Mayo.

## CAMARAS FIJAS DE FOTOGRAFIA

Las cámaras son una de las herramientas más útiles y versátiles disponibles a los científicos que están vigilando volcanes, y entre estas, las cámaras fijas son las que más se usan. Las cámaras fijas toman una fotografía a la vez proporcionando imágenes positivas o negativas y pueden ser subdivididas en base al tamaño de la película en formato pequeño, mediano y grande. También existe la cámara fija instantánea que produce una imagen dentro de 30 segundos. Los científicos del CVO usan las cuatro.

### Cámaras de Formato Pequeño

Las cámaras más comunes de formato pequeño usan un rollo de película de 35 mm, que tienen 12–36 exposiciones por rollo. Estas cámaras están ampliamente disponibles, son económicas, convenientes para usar y ofrecen una gran variedad de objetivos y accesorios. Hay muchos tipos y velocidades de película y el procesamiento es rápido y algunas películas pueden ser procesadas en la misma oficina. Sin embargo, para un estudio científico detallado, las imágenes pequeñas quizás no tengan suficiente resolución para ilustrar los

detalles que se necesitan para comparar los cambios en el paisaje, y las ampliaciones de alta calidad a veces son difíciles y muy costosas para obtener. Los dos estilos de cámaras de pequeño formato usados en el CVO son el objetivo/obturador de 35 mm y la cámara reflex con un objetivo (SLR-single lens reflex) de 35 mm.

En la cámara objetivo/obturador el usuario mira por un visor, no el objetivo, y el resultado es que la fotografía está un poco descentrada de lo que en realidad se mira. Normalmente, las cámaras objetivo/obturador usadas en el CVO se cargan automáticamente y tienen foco y bobinado automático y a menudo se les conoce como los "apunte y dispere." Los objetivos tienen una distancia focal fija o zoom entre dos distancias focales. Generalmente, las cámaras son pequeñas y livianas y son fáciles de cargar en los bolsillos o mochilas. Dado que generalmente estas cámaras son más baratas que las SLR's, a menudo son consideradas como cámaras desechables y se usan cuando se está trabajando en quebradas, haciendo levantamientos de canales de drenaje, durante trabajos en áreas con mucho polvo y ceniza o mientras se desarrollan actividades donde hay una posibilidad que la cámara o científico caiga a un río o se cubra con polvo y ceniza.

La cámara SLR de 35 mm es la que más se usa en el CVO. En la SLR, la imagen que pasa por el objetivo es reflejada al visor por un espejo a un prisma, para que el usuario pueda ver exactamente lo que registra la



C

Figura 20.1. Continuación



película. Estas cámaras son relativamente compactas y livianas y tienen una gran variedad de objetivos y accesorios intercambiables. Se usan diferentes marcas de SLR's, dado que cada investigador compra según sus necesidades científicas, límites presupuestarios del proyecto y preferencia. Por ejemplo, muchos usan la Olympus OM2 o el Nikon FE, y ambas han resultado ser confiables en ambientes con mucha ceniza en el Mount St. Helens. Otros usan la Minolta X700 con su dorso de datos (data back) opcional con varias funciones programables. Este dorso de datos puede registrar las horas, minutos y segundos en la película, una opción valiosa cuando se están documentando eventos dinámicos tales como columnas de ceniza, flujos piroclásticos, lahares e inundaciones. El dorso de datos de la Minolta también puede ser programado para disparar la cámara cada segundo hasta por 99+ horas, o un motor opcional puede ser programado para tomar 2 o 3.5 marcos por segundo, opciones que han sido importantes para las secuencias de fotografías con lapsos de tiempo.

La distancia focal estándar de 50 mm es la que más se usa con las SLR's. Este objetivo es ideal, dado que proporciona aproximadamente la misma amplificación que el ojo humano. El objetivo de ángulo ancho de 28 mm también es popular y toma una imagen del sujeto que tiene aproximadamente la mitad del tamaño que aquella tomada con un objetivo estándar.

Solo unos pocos científicos usan objetivos telefoto de alcance mediano (longitudes focales de 100 a 300 mm), telefoto de alcance largo (longitudes focales de 300 a 1000 mm) u objetivos zoom, dado que estos objetivos son costosos y ocupan mucho espacio. En el campo, la mayoría de los científicos cargan solo un cuerpo de cámara y un objetivo, dado que cuerpos y lentes adicionales ocupan espacio y representan un peso adicional; además es imprudente y difícil cambiar los objetivos cuando hay mucha ceniza, polvo y durante el invierno. Ocasionalmente, las cuadrillas de campo llevan una variedad de cámaras y objetivos, el resultado siendo fotografías a escalas diferentes del mismo sujeto el mismo día, algo conveniente cuando se están escogiendo fotografías para publicación o proyecciones de diapositivas. Por ejemplo, un miembro del equipo de deformación del CVO rutinariamente usa un Nikon con un objetivo de 28 mm, mientras otro usa un Nikon con un objetivo de 50 mm.

El fotógrafo del CVO usa un Nikon FE con un objetivo Vivitar de 17 mm y objetivos Nikkor de 28 mm, 55 mm y 200 mm. El objetivo de 17 mm con ángulo super ancho y un campo de visión de 100° (medido de esquina a esquina) es útil cuando se toman fotografías de científicos trabajando (fig. 20.2A). El objetivo de 28 mm de ángulo ancho con un campo de visión de aproximadamente 75° es útil cuando se están haciendo tomas aéreas del cráter o domo (fig. 20.2B). El objetivo

estándar de 55 mm tiene un campo de visión de aproximadamente 45° y es un excelente objetivo y buena para muchos tipos de fotografía (fig. 20.2C). El objetivo de 200 mm es un objetivo telefoto de alcance mediano con un campo de visión de aproximadamente 12° y es útil cuando se está fotografiando el domo de lejos (fig. 20.2D). Durante períodos críticos, el fotógrafo de planta carga una Minolta X700 con su dorso de datos con horas-minutos-segundos, un motor y un objetivo zoom MD 50-135 mm o un cuerpo Nikon FE adicional y objetivos zoom de Nikkor de 35-105 mm y 100-300 mm. El uso de cámaras múltiples permite la utilización simultánea de varios tipos de película y proporciona una cámara adicional en el caso que se dañe la cámara principal.

Existe una gran variedad de películas para aquellas personas que usan cámaras de pequeño formato de 35 mm. En el CVO, la mayoría de los científicos dan charlas científicas y exhibiciones de diapositivas y, por lo tanto, prefieren películas para transparencias a color o para negativos en blanco y negro. Las transparencias son económicas, fáciles de ver, convenientes para almacenar y para la mayoría de las aplicaciones pueden ser pasadas a fotos a color o blanco y negro. Generalmente se usa la marca Kodak, entre las cuales las películas de transparencias Kodachrome 64 y Ektachrome 200 son las más populares. Ambas películas proporcionan buen color y demuestran poco grano. La película de transparencia de mayor velocidad, Ektachrome 400, se usa a menudo cuando se está fotografiando bajo condiciones nubladas o lluviosas.

Los investigadores del CVO usan muy poca película blanco y negro, dado que normalmente cargan una sola cámara que tiene película a color. Sin embargo, el fotógrafo de planta, carga rutinariamente dos cámaras, una cargada con película a color para diapositivas y la otra con película blanco y negro de grano fino. La película en blanco y negro se usa cuando se están tomando fotos para una publicación en especial o documentación histórica. Las películas en blanco y negro son muy importantes para los archivos históricos. Según la compañía Eastman Kodak (1979, p. 32):

Quando los negativos en blanco y negro de película con una base en acetato o poliéster son procesados correctamente, y se protegen contra los efectos de calor, humedad, gases oxidantes y materiales de almacenamiento reactivos, son artículos extremadamente estables. Ellos sobrevivirán a la mayoría de los otros registros históricos y, dado que pueden ser duplicados con una pérdida muy pequeña de calidad mediante un proceso comparativamente simple, ellos constituyen el mejor material para archivo.

## Cámaras de Formato Mediano

Las cámaras de formato mediano típicamente usan películas en rollos de 120 mm, producen 12–15 cuadros por rollo y proporcionan transparencias o negativos de 57 mm (2 ¼ pulgadas) cuadrados o rectangulares de 60 × 70 mm. Estas cámaras ofrecen conveniencias de manejo similares a aquellas de las cámaras de 35 mm, algunas tienen objetivos intercambiables y dorsos de películas, y con la película más grande el detalle de la imagen es sustancialmente mejor. Sin embargo, las cámaras de formato mediano son generalmente más costosas, grandes, pesadas y no existe un gran surtido de objetivos y películas que estén ampliamente disponibles.

En el CVO se usan pocas cámaras de formato mediano. Uno de los científicos usa una Pentax 6 × 7 con un objetivo Takumar de 105 mm. El fotógrafo de planta usa una Hasselblad 500C con un objetivo estándar Planar de 80 mm y un objetivo Distagon de ángulo amplio de 50 mm. Dado que la mayoría de fotografías de formato

mediano son usadas para publicaciones o documentación histórica, generalmente se usan películas blanco y negro de grano fino. Se lleva un segundo dorso de película Hasselblad cargado con película para diapositivas o negativos a color.

## Cámaras de Formato Grande

Las cámaras de formato grande típicamente usan un pliegue de película de 102 × 127 o 203 × 254 mm (4 × 5 o 8 × 10 pulgadas) o rollos de película de 241 mm (9 ½ pulgadas), que son pesadas (algunas pesan más de 130 kg), grandes y difíciles de conseguir. Las cámaras requieren de un trípode o son montados dentro de una aeronave, y generalmente se usan para tomar fotografías aéreas verticales. El procesamiento de la película es especializado y costoso, pero la resolución es excelente. El tamaño de rollo de 241 mm también tiene la ventaja



**A**

**Figura 20.2.** Fotografía del Mount St. Helens utilizando objetivos con diferentes distancias focales. *A*, Un objetivo de 17 mm fue usado para fotografiar a los investigadores tomando medidas en el domo. *B*, Un objetivo de 28 mm fue usado para fotografiar una vista aérea del cráter y domo del Mount St. Helens. *C*, Un objetivo de 55 mm fue usado a 8 km para fotografiar un pequeño pulso de vapor y ceniza. *D*, desde el mismo sitio, un objetivo de 200 mm fue usado para fotografiar un domo de lava con vapor y remanentes de un deslizamiento de rocas por su lado septentrional.



**B**



**C**

**Figura 20.2.** \* *Continuación*



de tener más de 300 cuadros por rollo, aunque se pueden conseguir rollos más pequeños.

En el CVO, las cámaras de formato grande se usan para tomar fotografías aéreas verticales y para la mayoría de los requisitos se contratan compañías profesionales de fotografía aérea. En 1985, el CVO intentó tomar fotografías aéreas de formato grande con una cámara Fairchild que se tomó prestada. Se contrató una compañía local de aviones y se cortó una ventana para la cámara en la panza del avión. Sin embargo, el proyecto se abandonó después de poco tiempo debido a la baja calidad de la cámara y las fotografías que se tomaron.

### **Cámaras de Procesamiento Instantáneo**

Las cámaras de procesamiento instantáneo que se utilizan en el CVO son las cámaras instantáneas Polaroid SX-70. Cuando se colapsa la cámara Tierra Polaroid SX-70, Modelo 2 ocupa un espacio de aproximadamente  $100 \times 200 \times 40$  mm y es conveniente para cargar. El tamaño de las fotos finales es de  $80 \times 80$  mm. Para algunos usuarios, aunque la película es cara, la ventaja de poder ver las fotos entre 30 segundos y 8 minutos (dependiendo de la película que se usa) tiene mayor peso

que la desventaja de su costo. Las imágenes instantáneas permiten a los científicos el lujo de fotografiar un afloramiento o sección estratigráfica y dentro de minutos poder escribir apuntes sobre la estructura en la misma foto. Después se asegura la foto en la libreta de campo y esta se convierte en una parte de los registros de campo. Polaroids, como otras fotografías a color, se opacan con el tiempo.

### **CAMARAS CINEMATOGRAFICAS Y DE VIDEO**

Las cámaras cinematográficas y de video son usadas para muchas de las mismas aplicaciones que las cámaras fijas y son especialmente útiles para fotografía terrestre oblicua e ilustrativa. La documentación cinematográfica o en video es valiosa cuando se están estudiando eventos dinámicos como columnas de ceniza o flujos piroclásticos, o para calcular la velocidad de lahares e inundaciones. Cuando se muestran los videos o películas en charlas o seminarios, la comunidad científica y público en general se sienten como si estuvieran en un volcán activo.



**D**

**Figura 20.2.** *Continuación*

El CVO ha usado de manera limitada las cámaras cinematográficas y de video como una herramienta ilustrativa, y se han perdido numerosas oportunidades de educación pública simplemente porque no se llevaron las cámaras cinematográficas y de video para tomar la documentación apropiada del cráter, domo o científicos trabajando. Sin embargo, tales cámaras han sido y están siendo usadas en proyectos científicos individuales. Un proyecto fue el sistema de circuito cerrado de televisión/video instalado en Harrys Ridge (Miller y Hoblitt, 1981), y un proyecto similar actualmente en uso utiliza un sistema de video de rastreo lento para transmitir imágenes en tiempo real a las oficinas en el CVO (Furukawa y otros, capítulo 19). Desde 1986 a 87, un sistema de televisión/video de poca luz fue instalado en el Toutle River para observar el canal del río durante lahares o inundaciones (Jon Major, comun. oral, 1990), y desde 1981-86, se ha usado un sistema con visibilidad nocturna consistiendo en cámaras fijas y de video para vigilar los cambios en el sistema de grietas calientes en el domo de lava (Robin Holcomb, comun. oral, 1990). Una cámara cinematográfica de 16 mm fue usada entre 1981-83 para estudiar los flujos de escombros que se originaban desde el glaciar Shoestring en el Mount St. Helens (Tom Pierson, comun. oral, 1990), y en 1988 y 1989, se usaron cámaras cinematográficas de 8 mm para vigilar las inundaciones provocadas por un desprendimiento glacial que se originó en el glaciar South Tahoma en Mount Rainier (Joe Walder, comun. oral, 1990). Las cámaras cinematográficas también se usaron exitosamente para fotografiar secuencias de crecimiento activo del domo durante los episodios de crecimiento del domo de 1982 y 1986 en el Mount St. Helens.

Las videocámaras están disponibles en formatos con cintas de 1,  $\frac{3}{4}$  y  $\frac{1}{2}$  pulgada y 8 mm. Estas cámaras son muy convenientes; el material tomado en video puede ser instantáneamente revisado y estudiado al regresar a la oficina, facilitando así una interpretación y respuesta rápida a posibles amenazas. Se puede obtener una imagen de un marco de video, una técnica que ha sido utilizada para comparar las grietas calientes en el domo antes de un episodio eruptivo. Sin embargo, tales imágenes generalmente tienen mucha menos resolución que aquellas de imágenes fijas o cinematográficas. La mayoría de las cámaras de video también registran el sonido simultáneamente con el video, así el fotógrafo puede narrar la escena y describir exactamente lo que está observando.

Entre los muchos tipos de cámaras de video disponibles, no hay un sistema de video ideal; el costo y preferencia personal son los factores principales cuando se decide cual cámara comprar. Un diseño popular de video es el "camcorder", un sistema en el cual la cinta se monta dentro del cuerpo de la cámara. En 1989, los

cuatro sistemas de camcorder que se utilizaban en el CVO eran: Panasonic AG-160 ProLine VHS, JVC GF-S550 Super VHS y JVC GR-S77 SuperVHS "Compact" de  $\frac{1}{2}$  pulgada y un sistema Handycam "Environmental Quality" de Sony de 8 mm. Sistemas de VHS y Super VHS de media pulgada son económicas, ampliamente disponibles y ofrecen imágenes de buena calidad; sus cintas pueden ser compradas en casi cualquier tienda de cámaras y supermercado (algo útil cuando uno está trabajando en el campo). El JVC "Compact" de  $\frac{1}{2}$  pulgada y los sistemas de Sony "EQ" de 8 mm son lo suficientemente pequeños y livianos para ser acomodados fácilmente en una mochila. El camcorder "EQ" de Sony es a prueba de agua y ceniza. Sus cintas de 8 mm no se consiguen tan fácilmente como las de  $\frac{1}{2}$  pulgada. A los científicos les gusta este tipo de cámara por que no ocupa mucho espacio y pueden disfrutar las escenas inmediatamente cuando regresar a la oficina.

El CVO utiliza dos formatos de cámaras cinematográficas, un formato de 16 mm y otro de 8 mm. El de 16 mm ofrece mejor calidad, pero el de 8 mm es liviana, económica y conveniente para usar. En 1989, los tres tipos de cámaras cinematográficas que se usaban en el Mount St. Helens eran una Canon Scoopic de 16 mm, una Canon Auto Zoom 518 Super 8 y tres cámaras cinematográficas Eumig 128 XL Super 8 de 8 mm, modificadas para lapso de tiempo por Timelapse, Inc. Las Eumigs se colocan en estuches ambientalmente seguros que fácilmente pueden ser montadas en un trípode, y el elemento de lapso de tiempo se puede programar para que tome desde un marco cada 0.5 segundos a un marco cada 99.5 minutos.

El CVO ha utilizado cámaras cinematográficas para obtener documentación "única". El 18 de Mayo de 1980, un geólogo del CVO tomó 700 pies de película de 16 mm de la columna eruptiva del Mount St. Helens. Esta documentación ha sido solicitada frecuentemente por compañías cinematográficas y de video y por productores de televisión durante los últimos 10 años. Para seguridad y protección contra daños a la película, el original se mantiene bajo llave y se guarda una copia del negativo en archivo. Se mandan copias de las películas y videocintas a usuarios potenciales, y todas las reproducciones de la documentación se hacen del negativo archivado. Este proceso se recomienda fuertemente a cualquier persona que obtiene documentación irremplazable. En 1982 y 1986, se tomó una documentación única de la erupción del domo usando las cámaras cinematográficas modificadas de Eumig de 8 mm. Con las cámaras se documentó el crecimiento de los lóbulos emergentes en el domo de lava.

Desafortunadamente, cada día es más difícil encontrar y usar los formatos para cámaras cinematográficas, debido a la popularidad de los sistemas

de videocámaras con el público en general. Algunas compañías que fabricaban cámaras cinematográficas simplemente ya no las hacen, y algunos laboratorios fotográficos también están dejando de procesar este tipo de película.

## TECNICAS

La fotografía aérea vertical y oblicua, fotografía terrestre repetida e ilustrativa y fotografía de lapso de tiempo son técnicas para documentar los cambios que ocurren en y alrededor de volcanes. Cualquiera y todos los tipos de cámaras pueden ser usadas. Para asegurar un viaje fotográfico exitoso, preste atención a cuatro puntos principales.

### Protección de la Cámara

Las cenizas y gases volcánicos destruyen las cámaras. La ceniza raya los objetivos y película de la cámara y pueden trabar los mecanismos internos de la cámara, mientras que los gases volcánicos pueden corroer el cuerpo de la cámara y los delicados circuitos de las cámaras electrónicas. Para proteger la cámara de ceniza y gas, manténgalo en un estuche o bolso de cámara cuando no se está usando y carga la película en un ambiente protegido. Use filtros claros (tales como filtros "UV" o "Skylight") para proteger la superficie del objetivo. Los filtros son más económicos para reemplazar que el objetivo de la cámara. Lleve la cámara regularmente a limpiar. Tenga mucho cuidado cuando se están usando sistemas de video cuando hay mucha ceniza, dado que la mínima cantidad de ceniza puede afectar las cabezas de grabación.

### Fotografía a Baja Temperatura

La actividad volcánica ocurre tanto en meses fríos de invierno como en meses cálidos de verano, creando un problema con la operación de la cámara durante tiempos helados. Las cámaras que están continuamente expuestas a temperaturas heladas operan más lentamente y el tiempo de reacción mecánica aumenta (aumenta la abertura relativa del obturador). La película se congela y se vuelve quebradiza, y las baterías de la cámara pierden su eficiencia a bajas temperaturas. Para aliviar estos problemas, mantenga la cámara y película adicional calientes cargándolas cerca al cuerpo, debajo de la

vestimenta exterior, y si es posible, instale unas batería frescas de óxido de plata o litio, antes de salir al campo. Las baterías de óxido de plata y litio trabajan mejor a temperaturas frías que las más comunes de alcalino (Gillsater, 1985, p. 33). Siempre lleve baterías adicionales. Las películas que se guardan en el congelador deben ser descongeladas por lo menos una hora antes de usarse.

### Cobertura de Exposiciones

Cuando se está fotografiando volcanes, normalmente la película es el factor más económico envuelto, por lo tanto, tome muchas exposiciones del mismo sujeto usando diferentes graduaciones de exposición. Tome una exposición con las indicaciones que da el fotómetro, entonces encierre las exposiciones subiendo la exposición (sobreexposición) y bajando la exposición (subexposición) para las próximas tomas. Bajo condiciones extremas, aumente o disminuya la exposición por uno o dos stops, dependiendo del sujeto. Por ejemplo, la exposición correcta para objetos oscuros (como el domo del Mount St. Helens) rodeado por nieve muy clara generalmente será una o dos graduaciones de diafragma mayor a lo que indica el fotómetro. De igual manera, las fotos de un pico cubierto de nieve circunscrito por cielo azul o bosque verde a menudo están opacadas si se toman con la exposición que indica el fotómetro. Por lo tanto, disminuya la exposición por uno o dos graduaciones de diafragma para exponer correctamente la cumbre con nieve. La ceniza, lodo y nieve son sujetos difíciles para fotografiar, dado que tienen poco color y contraste inherente, y bajo estas condiciones los fotómetros de las cámaras tienen dificultad para indicar la exposición correcta. Si se toman fotos con diferentes exposiciones, se puede obtener la exposición correcta, que no necesariamente es la que indica el fotómetro. Para tener una cobertura de exposiciones con cámaras instantáneas, use el "botón de compensación de exposición" y ajuste hacia el lado positivo para incrementar la exposición y hacia el lado negativo para disminuir la exposición.

### Anotaciones Exactas

La toma de anotaciones exactas puede ser el aspecto más importante de fotografía volcánica, además de la toma misma de la foto. Anote las cámaras, lentes y filtros usados, tipo de película, exposición, fecha y hora, condiciones atmosféricas y de luz, la altura del trípode, el sujeto siendo fotografiado y el sitio desde donde se



tomó la foto. Anote todo y cualquier cosa que pueda ser importante, dado que pueden ser útiles años después.

## FOTOGRAFIA AEREA VERTICAL

Las fotografías aéreas verticales (figs. 20.3, 20.4) se toman cuando el eje óptico de la cámara está apuntando hacia abajo; dentro de  $20^\circ$  de la vertical (Ray, 1960, p. 2). Las cámaras (generalmente de formato grande, ocasionalmente de formato mediano y raramente de formato pequeño) son montadas en la panza de un avión y disparadas por un pórtilo hecha para la cámara. El avión vuela en líneas rectas hacia atrás y delante sobre un área, siguiendo líneas de vuelo predeterminadas. Una línea de vuelo consiste en tres o más fotografías tomadas en una sucesión determinada, con cada fotografía sobrepasando la adyacente un 30 a 60 por ciento. Grandes áreas pueden ser fotografiadas en unos pocos minutos. Las líneas de vuelo en el Mount St. Helens fueron diseñadas para documentar el impacto de las erupciones volcánicas en la cumbre y los cambios subsecuentes que ocurrieron dentro del cráter y valles de ríos circundantes después de la erupción del 18 de Mayo.

La escala fotográfica de las fotografías aéreas verticales varían y se determina dividiendo la distancia focal del objetivo por la altura del avión sobre el suelo, expresado como una relación. Mientras menor sea la altura o mayor la distancia focal, mayor la escala fotográfica y mayor será el detalle de la fotografía (figura 20.3).

A lo más, la escala fotográfica es solo una aproximación, mientras que el relieve topográfico del terreno fotografiado y la inclinación del eje óptico de la cámara son dos factores que provocan variaciones en la escala (Miller y Miller, 1961, p. 8). Por ejemplo, una línea de vuelo sobre el cráter del Mount St. Helens hacia el norte a Spirit Lake es volada a una altura de 7.6 km (25,000 pies). Se usa un lente con distancia focal de 152 mm (6 pulgadas), y se toman aproximadamente 6 marcos. En un solo marco puede caber el domo completo, el cráter y los flancos del volcán (fig. 20.3A). La escala fotográfica de ese marco varía de 1:42,000 alrededor de los flancos del volcán a 1:40,000 a través del piso del cráter a 1:34,000 en el filo del cráter. Otra línea de vuelo se lleva a cabo a una altura de aproximadamente 2.7 km (9,000 pies) y se toman fotografías usando el mismo objetivo. En un solo marco cabe el domo (fig. 20.3B). Estas fotografías tienen una escala mayor que la de la fotografía previa (por lo tanto, se pueden ver más detalles), y sus escalas varían desde aproximadamente 1:8,000 en la base del domo a 1:6,000 en la parte arriba del domo.

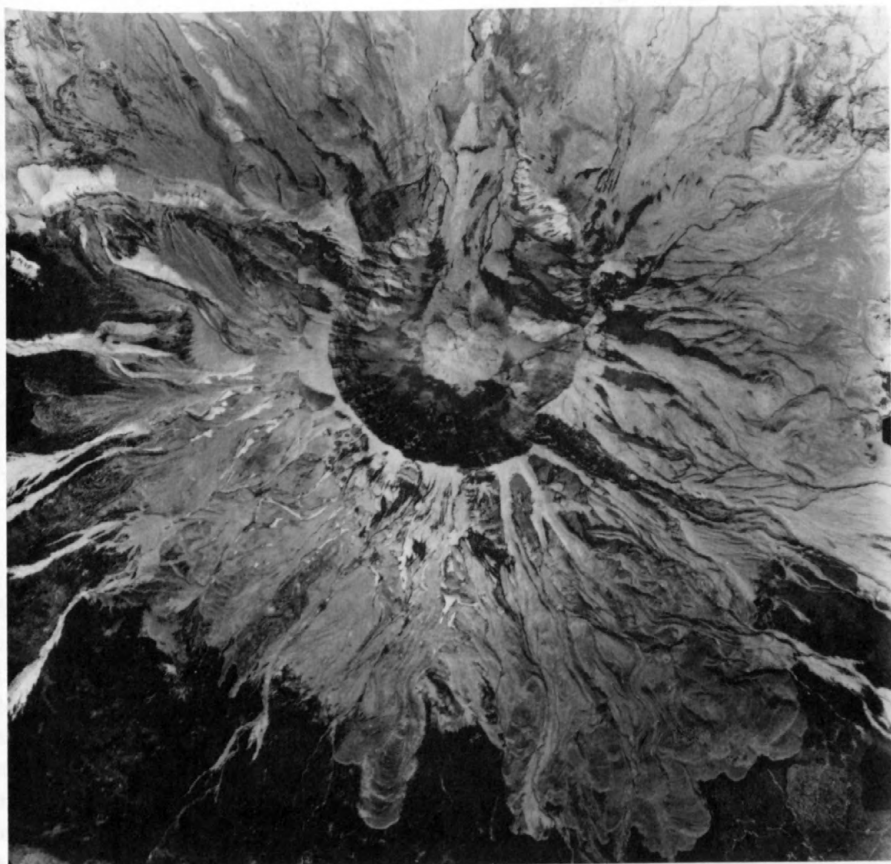
Hasta 1990, la línea de vuelo sobre el cráter y domo del Mount St. Helens había sido fotografiada más de 150 veces. Para todas las fotografías se contrataron

compañías profesionales de fotografía aérea, las alturas y escalas fotográficas variaron, y se usó película en blanco y negro y a color. En Junio de 1980, se establecieron sobre 100 líneas de vuelo específicamente diseñadas para documentar el desarrollo de los canales de drenaje alrededor del Mount St. Helens (fig. 20.4), y estas líneas de vuelo fueron fotografiadas anualmente durante la temporada de aguas bajas y después de eventos hidrológicos importantes. La escala fue de 1:9,600 y se usó película en blanco y negro (ocasionalmente se usó película a color en 1980). Las líneas de vuelo variaron en longitud de 3 a más de 20 marcos, dependiendo de la longitud en línea recta del drenaje. Típicamente, para los drenajes grandes habían varias líneas de vuelo, mientras que los drenajes más pequeños fueron cubiertos por una línea de vuelo (fig. 20.5).

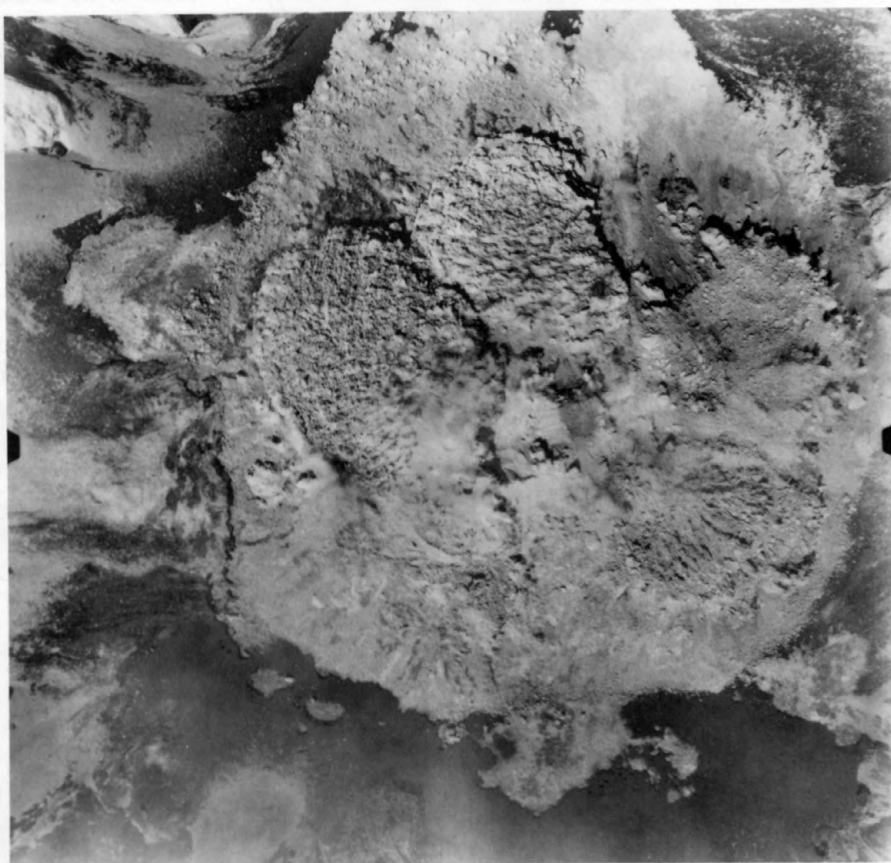
Las fotografías individuales de líneas de vuelo pueden ser pegadas y leídas como un mapa. Las áreas sobrepuestas de dos fotografías adyacentes forman parejas estereoscópicas que pueden ser usadas para ver directamente las diferencias de elevación en el terreno fotografiado. Con el equipo correcto, las parejas estereoscópicas pueden ser usadas para hacer mapas topográficos con líneas de nivel. En el Mount St. Helens, se ha usado la fotografía tomada después de cada episodio de construcción de domo o eventos hidrológicos grandes para producir varios mapas topográficos del cráter, domo y avalanchas de escombros.

El valor de la fotografía vertical aérea fue comprobada en el Mount St. Helens en 1980 (Moore y Albee, 1981). Se elaboró un mapa topográfico a partir de las fotografías que se tomaron del volcán el 12 de Abril, 23 días después que comenzó el actividad sísmica. Este mapa fue comparado con el mapa topográfico publicado en 1958 (basado en fotografías de 1952) y se observaron cambios topográficos significativos. Para eliminar los cambios que posiblemente podrían ser atribuidos a actividad glaciaria de los 28 años entre los mapas, se "preparó apresuradamente" un nuevo mapa con las fotografías de Agosto 15, 1979, y se comparó con el mapa de Abril 12, 1980. Las diferencias en elevaciones del graben e hinchamiento en la cumbre en el lado septentrional del volcán eran obvios. De acuerdo a Moore y Albee (1981, p. 127):

Los datos fotogramétricos \*\*\* conjuntamente con las medidas geodésicas del suelo \*\*\* fueron de importancia primordial para el entendimiento de los procesos actuando dentro del volcán y para el asesoramiento de los peligros debidos a la sobre inclinación del flanco septentrional. Mirando para atrás, el conjunto de datos fotogramétricos fue adquirido con un riesgo mínimo, y consecuentemente debe ser un elemento importante para la vigilancia de actividad futura de volcanes potencialmente activos de tipo similar.

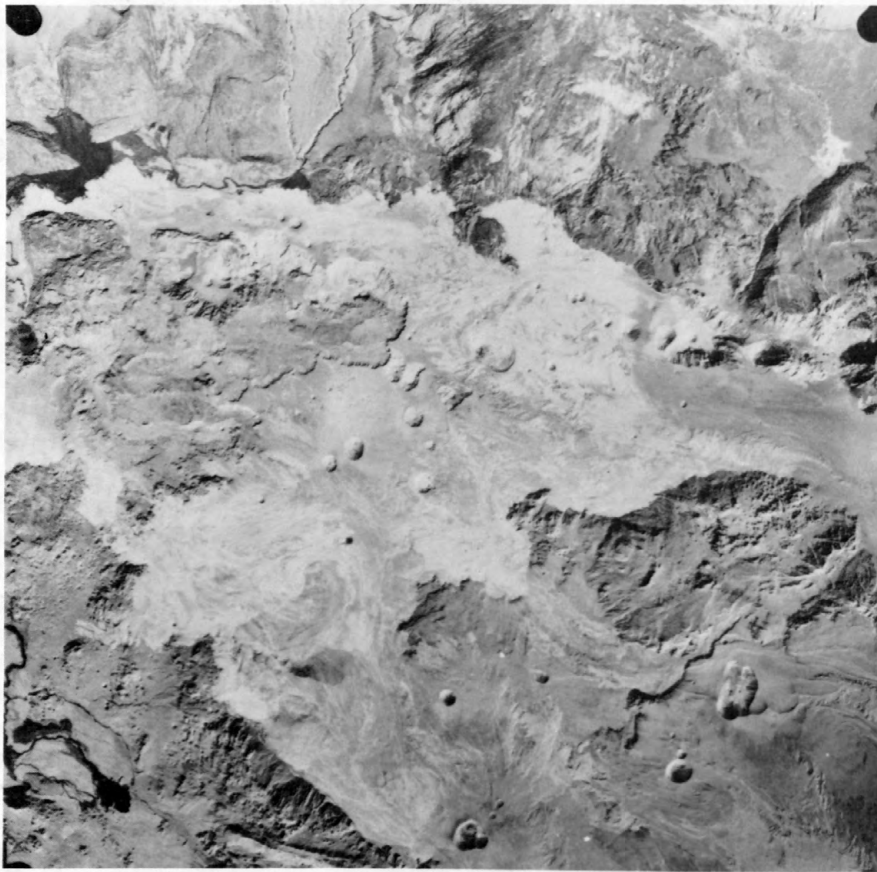


A

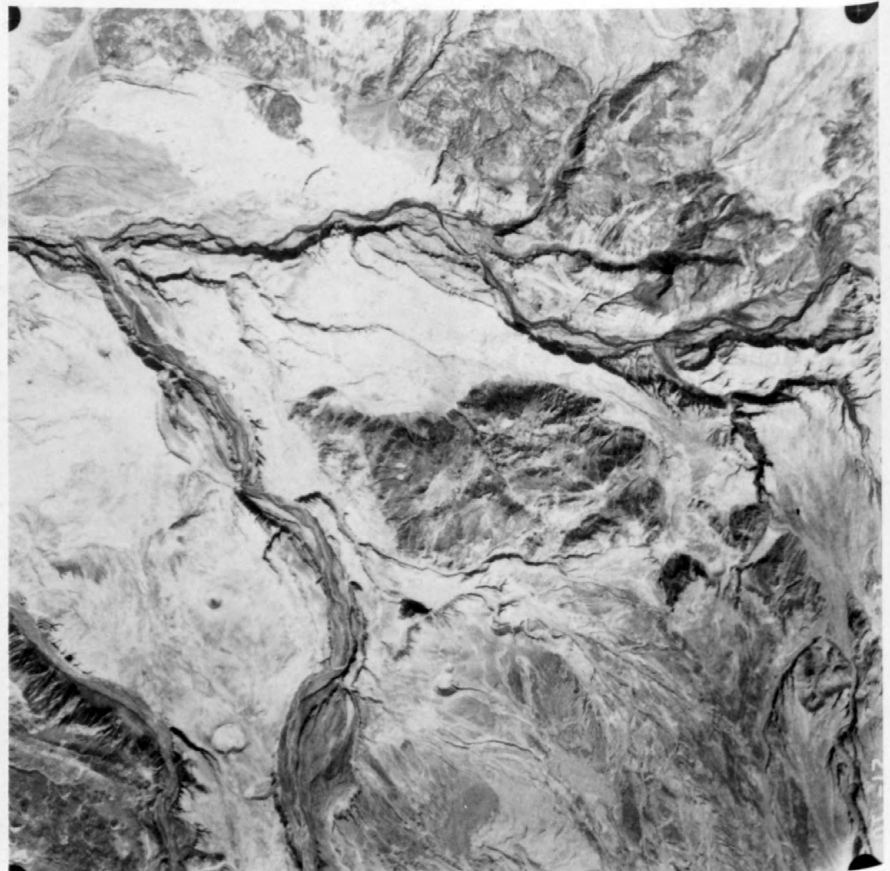


B

**Figura 20.3.** Fotografías aéreas verticales de formato grande reducidas un 50 por ciento, ilustrando las diferentes escalas fotográficas. A, El cráter y domo del Mount St. Helens fotografiados a 7.6 km (25,000 pies), ilustrando el piso del cráter a una escala aproximada de 1:40,000. B, Domo de lava fotografiado a 2.7 km (9,000 pies), ilustrando la parte superior del domo a una escala de aproximadamente 1:6,000.



A



B

**Figura 20.4.** Fotografías aéreas verticales de formato grande reducidas un 50 por ciento, ilustrando el desarrollo de los canales de drenaje alrededor del Mount St. Helens. A, Sección de la avalancha de escombros fotografiada el 15 de Septiembre de 1985, demuestra la ausencia de un canal de drenaje. B, Misma área fotografiada el 28 de Septiembre de 1985, ilustra el establecimiento de importantes canales de drenaje.



## FOTOGRAFIA AEREA OBLICUA

Las fotografías aéreas oblicuas (fig. 20.2B) son tomadas cuando el eje óptico de la cámara está considerablemente inclinado con relación al vertical, generalmente  $20^\circ$  o más (Ray, 1960, p.2). Krimmel y Post (1981, p. 31) creen que esta técnica es una de las técnicas fotográficas más útiles usadas en los volcanes:

Para la documentación de eventos volcánicos, las fotografías aéreas oblicuas ofrecen muchas ventajas sobre las fotografías verticales; estos incluyen una perspectiva más natural, una mayor cobertura aérea a elevaciones más bajas, mayor flexibilidad para maniobrar las aeronaves, cobertura de localidades específicas durante períodos de obscurecimiento parcial por nubes o ceniza y menor costo.

Las cámaras fotográficas de formato pequeño de 35 mm cargadas con película para diapositivas a color son el formato de cámara y película más común usado en el CVO para tomar fotografías aéreas oblicuas de los volcanes de los Cascades. El fotógrafo de planta también usa una cámara de formato mediano cargada con película en blanco y negro. (Aunque no común, una cámara de formato grande también puede ser usada para tomar fotografías aéreas oblicuas; ver Krimmel y Post, 1981). Ocasionalmente, se usan las cámaras cinematográficas y de video. Siempre se sujetan las cámaras en la mano (excepto la cámara de formato grande usada por Krimmel y Post, que se monta dentro del avión). Los objetivos más útiles para la fotografía aérea oblicua son el estándar y el de ángulo amplio, dado que el objetivo de telefoto magnifica las vibraciones del aeroplano, dificultando que se use con éxito completo.

A continuación se presentan algunos puntos útiles que son bueno recordar cuando uno está fotografiando desde un avión:

1. Fije el enfoque de la cámara en el infinito. Dado que virtualmente todas las fotografías aéreas se toman al infinito, fije con cinta adhesiva el anillo de enfoque al infinito antes que se despegue el aeroplano. Esto asegurará que el enfoque no se moverá accidentalmente debido a la emoción de la fotografía volcánica. La cinta eléctrica de vinilo trabaja bien, y se saca fácilmente sin romperse o dejar residuos.

2. La abertura relativa del obturador de la cámara usada en la fotografía aérea debe ser de, por lo menos,  $1/250$  segundo, y preferiblemente  $1/500$  o  $1/1000$  segundos. Una abertura relativa más lenta puede introducir movimiento y las fotografías pueden salir borrosas. Movimientos durante la exposición es uno de los problemas principales de una buena fotografía aérea y se debe a que la cámara se sujeta en la mano, la velocidad de la aeronave hacia adelante y la vibración mecánica de la aeronave y la suavidad del vuelo relativo

a la cantidad de turbulencia que hay en el aire (Eastman Kodak Company, 1985, p. 8). Para reducir los efectos de movimiento, se debe usar la mayor abertura relativa posible del obturador y no dejar que la cámara haga contacto con la aeronave. Si el día está nublado, use una película más rápida, en vez de una abertura relativa del obturador más pequeña (en el CVO, se usan películas de 200 o 400 en días nublados). Para obtener la más grande abertura relativa del obturador con cámaras automáticas, use la película más rápida posible.

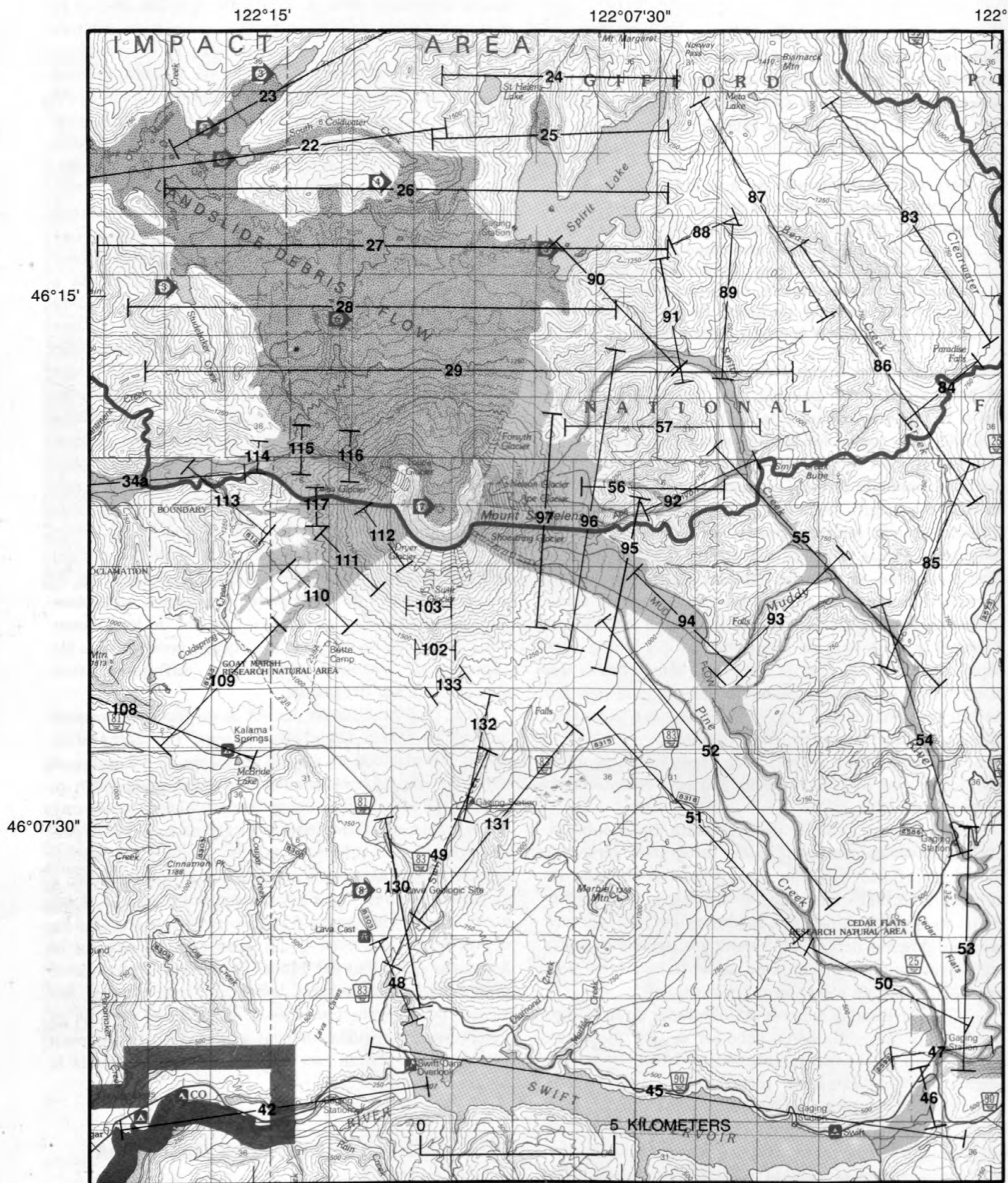
3. Tome la fotografía a través de ventanas abiertas o saque la puerta antes de despegar. Las ventanas de los aviones tienen curvas distorsionantes y cientos de rasguños, consecuentemente disparando a través de ventanas de plástico severamente limita la calidad de las fotografías. Si es posible, dispare por una ventana abierta o pídale al piloto del helicóptero que remueva las puertas, dejando así una vista libre. Si tiene que tomar las fotografías por una ventana, sujete la cámara lo más cerca y perpendicular a la ventana posible. Esto va a minimizar la posibilidad de reflejos desagradables de las ventanas. Con cámaras de enfoque automático, es imprescindible tomar las fotos por una ventana abierta, dado que muchas cámaras de enfoque automático pueden enfocar la ventana en vez del volcán.

4. Mantenga las alas del avión y los hélices del helicóptero fuera de vista. Las fotografías con alas de aviones y hélices de helicópteros son menos agradables que aquellas sin esos elementos. Las alas de los aviones y los hélices de los helicópteros pueden provocar que las cámaras de enfoque automático enfoquen estos elementos en vez del paisaje.

5. La localización del sol es un factor importante cuando se toman fotografías aéreas. Las fotografías aéreas tomadas con un ángulo de sol de  $20-30^\circ$  sobre el horizonte son las más satisfactorias (Hackman, 1967, p. B157); las fotografías que se toman cuando el sol está  $10^\circ$  o menos sobre el horizonte producen sombras largas. En áreas de alto relieve, como los terrenos volcánicos, las sombras de elementos topográficos grandes pueden, a menudo, obscurecer una gran cantidad de área si el sol no está apreciablemente sobre el horizonte. Se ha comprobado que esto es un problema grande en la fotografía del domo del Mount St. Helens, dado que el cráter arroja una sombra sobre el domo durante los meses de invierno, temprano y tarde en el día. En el verano, las fotografías tomadas a medio día tienen poca sombra y demuestran casi ningún relieve, dificultando la observación de detalles.

## FOTOGRAFIA TERRESTRE REPETIDA

Las fotografías terrestres repetidas son tomadas sobre un período de tiempo desde una señal permanente



y son útiles para documentar cambios en el paisaje a largo plazo, tales como desarrollo biológico (fig. 20.6), erosivo (fig. 20.7) y geológico (figs. 20.1, 20.8) alrededor de los volcanes. Las fotografías repetidas pueden ser combinadas para hacer un diagrama compuesto para ilustrar años de evolución cumulativa en el paisaje (fig. 20.9). Desde 1980, más de 100 estaciones terrestres de fotografía (estaciones de fotos) han sido establecidas en el Mount St. Helens y otros volcanes de los Cascades.

Idealmente, las fotografías terrestres repetidas son tomadas desde un mismo punto, usando la misma cámara y objetivo (o por lo menos con una cámara con el mismo formato de y un objetivo con la misma distancia focal), con la cámara a la misma altura sobre el suelo y apuntada en la misma dirección. Esto resulta que se tome la fotografía siempre sea de lo mismo. En el Mount St. Helens, no se ha alcanzado esta meta totalmente. Muchas estaciones fotográficas son visitadas esporádicamente por diferentes personas con diferentes combinaciones de cámaras, objetivos y películas y que se paran en sitios un poco diferentes. Harrison (1974, p. 469) expresó: "La recuperación de información de fotografías de estructuras geológicas será encarecida si las fotografías son tomadas del mismo sitio. Reocupando exactamente el mismo sitio quizás no sea esencial, pero facilitaría la interpretación de las fotografías." El resultado en el CVO es una colección de fotografías que no son de vistas perfectamente repetidas, sin embargo documentan los cambios alrededor del volcán (fig. 20.7).

Cuando se establece o se ocupa nuevamente una estación fotográfica, se deben tener un sin número de ideas en mente:

1. Se deben establecer numerosas estaciones fotográficas. De acuerdo a Veatch (1969, p. 51), "es mejor establecer demasiadas, antes que muy pocas, estaciones fotográficas. Siempre se pueden abandonar algunas estaciones, pero una vez que se pierda cualquier registro fotográfico, este se pierde para siempre." Durante los años de trabajo en el Mount St. Helens, se han establecido muchas estaciones fotográficas, muchas veces al alcance visual la una de la otra, pero no todas las estaciones han sobrevivido. Algunas han sido destruidas por actividad volcánica y migración de cauces de ríos; las localizaciones de otras han sido olvidadas. Unas pocas fueron establecidas para proyectos de corto

plazo, ocupadas por unos pocos días, semanas o meses, o hasta años, y después abandonadas cuando se terminó el proyecto. Algunas estaciones han resultado ser buenas y han sido ocupadas muchas veces durante los últimos 10 años, mientras otras, desde el punto de vista visual e informativo son buenas, pero no han sido consistentemente ocupadas nuevamente debido al costo o dificultad de acceso.

2. Cada estación fotográfica debe tener una señal permanente en el suelo. Las señales permanentes deben ser establecidas para que los fotógrafos sepan exactamente donde deben colocar el trípode para repetir



A



B

**Figura 20.5.** (página opuesta) Sección de un mapa de localizaciones ilustrando la disposición de las líneas de vuelo sobre los canales de drenajes al sureste del Mount St. Helens. Los números de las líneas de vuelo están catalogados en la librería de fotografías del CVO. Los números circulados dentro de las flechas en negrilla refieren a los elementos interpretativos descritos en el mapa original base (U. S. Geological Survey, 1981).

**Figura 20.6.** Dos fotografías repetidas del Lassen Peak ilustran el desarrollo biológico que puede ocurrir alrededor de los volcanes. A, Lassen Peak después de la explosión de Mayo 22, 1915. Fotografía B.F. Loomis, cortesía del Loomis Museum Association, Mineral, California (Loomis, 1926). B, Vista de la misma localidad 69 años después.



las fotografías. En el Mount St. Helens, los postes de verjas, torres de acero, rocas grandes, soportes de puentes, hitos establecidos por el USGS y como último recurso, puntos en el suelo localizados a un número determinado de pasos de un objeto permanente han sido usados como señales permanentes. Durante un episodio de construcción de domo, se utilizó un tanque de 55 galones como una señal permanente a corto plazo para montar la cámara (fig. 20.10). Las señales permanentes a largo plazo en otros volcanes de los Cascades a menudo son hitos establecidos por el CVO (fig. 20.11).

3. Es imperativo usar un trípode. Es más fácil apuntar la cámara si se usa un trípode, también ayuda asegurar que la cámara esté correctamente alineada sobre una señal permanente, y es necesario para maximizar la agudeza mediante la reducción de las vibraciones de la

cámara. Muy pocas personas pueden sujetar una cámara lo suficientemente quieta durante una exposición de más de 1/60 segundo. El movimiento de la cámara resulta en fotografías borrosas. En el CVO se usan trípodes "profesionales" Bogen 3020 con cabezas que se pueden inclinar en tres direcciones Bogen 3025 "3-D" o 3028 "Super 3-D." En otros volcanes en los Cascades, el fotógrafo de planta usa un trípode Bogen 3058 "Super Pro" de construcción reforzada con un panoramizador con inclinación en tres direcciones o se monta la cabeza en el trípode Kern usado para la red de deformación (Iwatsubo y Swanson, capítulo 10).

4. Lleve una copia de las fotos tomadas anteriormente en la estación de fotografía para ayudar a enmarcar con exactitud la misma escena.



**B**

**Figura 20.7.** Aunque tomadas en posiciones un poco diferentes, las dos fotografías repetidas del Upper Muddy River en el Mount St. Helens ilustran la erosión que ocurre alrededor de los volcanes. A, Octubre 1980, cinco meses después de la erupción de Mayo 18, 1980. B, Misma área fotografiada un año después.



**A**



**B**

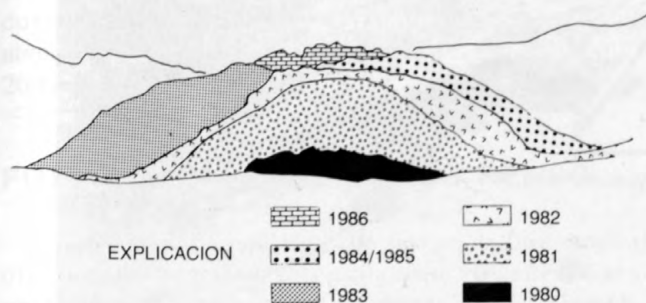
**Figura 20.8.** Fotografías repetidas del domo del Mount St. Helens ilustrando la importancia de escoger el objetivo con la distancia focal correcta. A, En 1981, el domo fue fotografiado usando un objetivo estándar de 55 mm desde una estación de fotografía a aproximadamente 1 km de distancia. B, Cuando fotografiado 4 años después, el domo había rebasado los límites del objetivo de 55 mm.

5. Para asegurar una fotografía repetida exitosa, anote exactamente las cámaras y objetivos usados, tipo de película, fecha y hora, altura del trípode, ángulo de inclinación de la cámara si no está nivelada y acimut de la cámara. Haga descripciones detalladas de como llegar a la estación de fotografía e identificar la señal permanente. Estas anotaciones serán muy importantes cuando se tomen las próximas fotografías. Si la estación fotográfica no puede ser ocupada en una visita en particular, anote la razón.

6. Tome una fotografía del montaje de la cámara en la estación fotográfica. Esto es una gran ayuda cuando se ocupa nuevamente el sitio y tiene un valor incalculable para la próxima persona enviada a ocupar el sitio. Muchas de las estaciones fotográficas en otros volcanes de los Cascades son hitos oficiales del Servicio Geológico de los Estados Unidos que no sobresalen de la superficie del suelo. Las fotografías que demuestran donde está el trípode e incluyen vistas de rocas, vegetación y afloramientos cercanos (fig. 20.11), han ahorrado mucho tiempo cuando se ha estado buscando la estación.

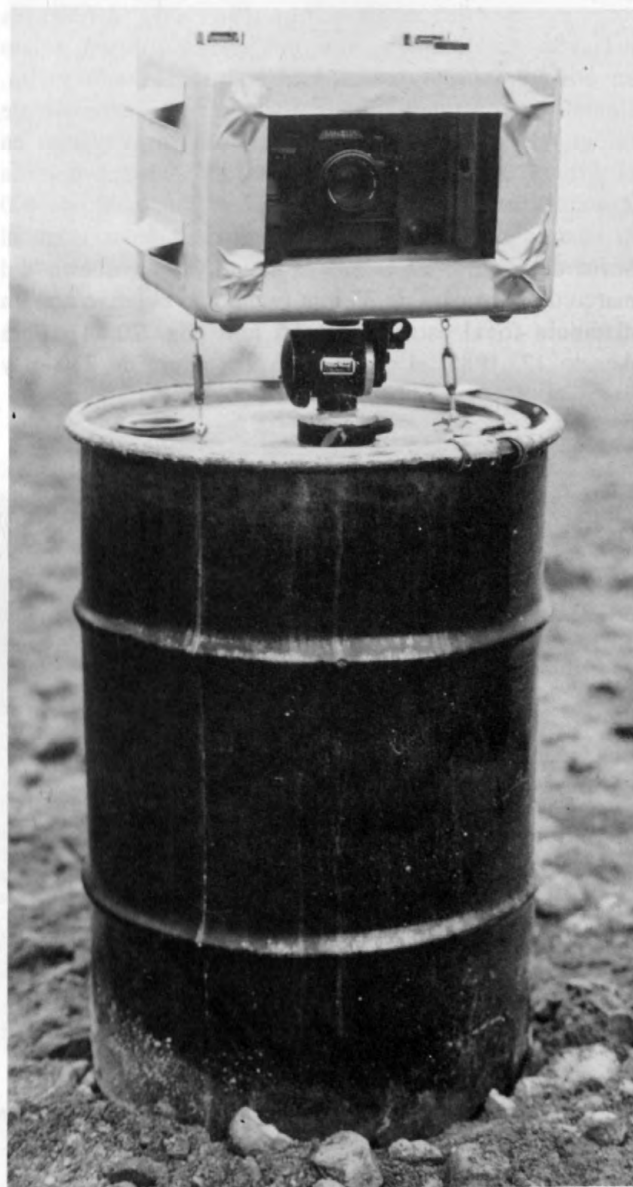
7. Tome de la escena una diapositiva a color y una foto en blanco y negro, para tener de la misma escena diapositivas para charlas y conferencias y fotografías en blanco y negro para las publicaciones y archivo histórico. Aunque las imágenes en blanco y negro pueden ser derivadas de diapositivas a color, su calidad no es tan buena como de una imagen original en blanco y negro y por lo tanto no tan deseable para propósitos históricos.

8. Si posible, use un objetivo con la misma distancia focal cada vez que se ocupa la estación fotográfica. Esto facilita la comparación de las imágenes sin tener que manipular las fotografías, pero no es absolutamente necesario. De acuerdo con Malde (1973, p. 198) "vistas hechas con cámaras a diferentes distancias focales desde la misma posición del objetivo siempre se parecerán exactas, siempre y cuando se



**Figura 20.9.** Un diagrama compuesto del crecimiento del domo, basado en seis años de fotografía terrestre repetida, tomadas desde una estación de fotografía a aproximadamente 1 km al norte del domo.

imprimen y recortan al mismo tamaño." Sin embargo, durante erupciones e inundaciones, no hay tiempo para imprimir y cortar fotografías. También, cuando hay diferentes personas ocupando nuevamente las estaciones fotográficas, teniendo a la disposición una "cámara de proyecto" para dar a las cuadrillas de campo resulta en fotografías más consistentes. Por ejemplo, muchas de las estaciones fotográficas del CVO fueron establecidas en puntos de levantamientos de cortes transversales a lo



**Figura 20.10.** Un tanque de 55 galones relleno de rocas fue usado para montar la cámara y como señal permanente para una estación de fotografía de corto plazo. El tanque fue relleno de rocas para estabilidad, la cabeza del trípode fue asegurada a la tapa, y el estuche metálico protector fue adjuntada a la cabeza del trípode.

largo de drenajes de quebradas. La fotografía repetida se toma aguas arriba, aguas abajo y a través del drenaje mientras se sujeta la cámara en la mano y se está parado al filo del canal cerca de la señal del corte transversal, o cerca del filo sobre la estaca del instrumento. Raras veces, las cuadrillas de campo que están haciendo el levantamiento (y fotografía) son las mismas. Mediante la eliminación de una variable, la de los diferentes campos de visión de diferentes cámaras y objetivos, ha sido más fácil para los investigadores estudiar las imágenes resultantes.

9. Se deben usar objetivos con diferentes distancias focales para tomar imágenes del mismo sujeto en cada estación de fotografía durante cada visita. Usando una sola distancia focal en una estación de fotografía puede resultar en dificultades irreversibles en el futuro. El 22 de Agosto de 1981, el domo tenía aproximadamente una altura de 163 m y un ancho de 400 m cuando se fotografió desde una estación a 1 km al norte del domo. El domo cabía muy bien dentro del marco de la cámara de 35 mm usando un objetivo con un distancia focal estándar de 55 mm (fig. 20.8A). Para Agosto 12, 1985, el domo tenía una altura de 230 m y

aproximadamente 800 m de ancho, y ya no cabía en el marco (fig. 20.8B). Desafortunadamente ya era muy tarde para capturar la escena de 1981 con el objetivo de ángulo más ancho de 28 mm.

10. Cuando posible, las fotografías deben ser tomadas más o menos a la misma hora y fecha cada año. "De esta manera, dado que las sombras y rasgos salientes son reproducidas fielmente, las fotografías viejas y nuevas pueden ser comparadas con mayor facilidad" (Rogers y otros, 1984, p. xxvi). En el Mount St. Helens, esto a menudo no es posible; muchas de las estaciones de fotografía solamente se ocupan nuevamente después de una erupción o inundaciones, sin importar la fecha. Otras estaciones de fotografía, que se visitan varias veces durante un año, ofrecen mejores oportunidades para casi siempre tomar las fotografías el mismo día y a la misma hora.

11. Si las condiciones atmosféricas o de luz no son perfectas, tome la fotografía de toda manera. Dado que la película es barata, en comparación al costo de llegar a una estación fotográfica, un gran número de fotografías son tomadas en las estaciones de fotografía en el Mount St. Helens aún si las condiciones atmosféricas



**Figura 20.11.** El montaje del trípode en el Volcán South Sister facilita la relocalización del sitio años después. En el South Sister, se usa el mismo trípode para la estación de fotografía y los instrumentos para calcular la deformación.



y de luz no son perfectas. De esta manera, si la estación no puede ser ocupada nuevamente cuando, por alguna razón, las condiciones han mejorado, por lo menos se ha registrado algo. En otros volcanes de los Cascades, siempre se toman fotografías cuando se ocupa nuevamente la estación fotográfica porque pueden pasar años hasta que se vuelva a visitar.

12. Considere el futuro. Trate de imaginar como se va a ver la estación fotográfica en los próximos años. ¿Habrán pequeños árboles en el primer plano que algún día crecerán y taparán la vista (fig. 20.6)? ¿Está la estación tan cerca al filo de un cauce activo que pueda ser erosionada? ¿Está la estación directamente en el camino de lahares potenciales, flujos piroclásticos o avalanchas de rocas? Si la contestación es afirmativa, considere establecer otra estación fotográfica en un punto más seguro.

## FOTOGRAFIA TERRESTRE ILUSTRATIVA

La fotografía terrestre ilustrativa es quizás la técnica fotográfica que más usan los científicos. Las fotografías terrestres ilustrativas (figs. 20.2A, B, D y 20.12) son tomadas a nivel del suelo de cualquier sujeto, sin ningún plan para ocupar esa estación nuevamente, y sin ningún otro propósito excepto documentar e ilustrar un elemento natural o humano. Cada año se toman cientos de fotografías terrestres ilustrativas del cráter, domo, canales de drenaje, erosión, caídas de rocas, nueva vida vegetal, equipos de científicos, investigadores trabajando y de otros temas.

Ocasionalmente, coloque una "regla" en la escena cuando se están fotografiando de cerca a sujetos e incluya un objeto reconocible en la escena cuando se está fotografiando un sujeto lejano. Entonces se pueden calcular de la fotografía, o por lo menos se puede obtener una idea general de la escala de la imagen. Los martillos geológicos, palas, picos de hielo, tapas de objetivos de cámara o cajas de película son útiles cuando se están fotografiando sujetos de cerca (fig. 20.12A), y compañeros(as) de investigación, helicópteros y automóviles funcionan bien para vistas más amplias (fig. 20.12B).

## FOTOGRAFIA CON LAPSO DE TIEMPO

La fotografía con lapso de tiempo es otra técnica útil cuando se están fotografiando volcanes. Para propósitos de este informe, la fotografía de lapso de tiempo se define como fotografía terrestre repetida tomada en un período corto de tiempo con cámaras programables. Las cámaras están programadas para fotografiar un evento geológico o hidrológico mediante

el disparo de un rollo de película en intervalos de tiempo predeterminados. En el Mount St. Helens, la fotografía de lapso de tiempo ha sido utilizada con éxito para fotografiar el crecimiento del domo durante episodios de



A



B

**Figura 20.12.** "Reglas" ayudan a ilustrar el tamaño en las fotografías. A, la caja de película (circulada) ilustra el tamaño relativo del peñón. B, Dos científicos (circulados) ilustran el tamaño relativo de los árboles devastados Mayo 18, 1980.

crecimiento de domo y flujos de escombros que se originan en el Shoestring Glacier.

En Agosto 1982, se instaló una cámara cinematográfica Eumig de 8 mm, modificada para lapso de tiempo, en una estación fotográfica localizada a aproximadamente 1 km del domo y usada para fotografiar un lóbulo de lava emergente. Se tomó una imagen cada 5 minutos, y después de casi 5 días de crecimiento del lóbulo se obtuvo un rollo de película de 50 pies. En Octubre de 1986, la cámara fue colocada encima del domo y enfocó a un lóbulo que estaba siendo activamente emitido. La cámara estaba programada para tomar una imagen cada 10 segundos, resultando en un

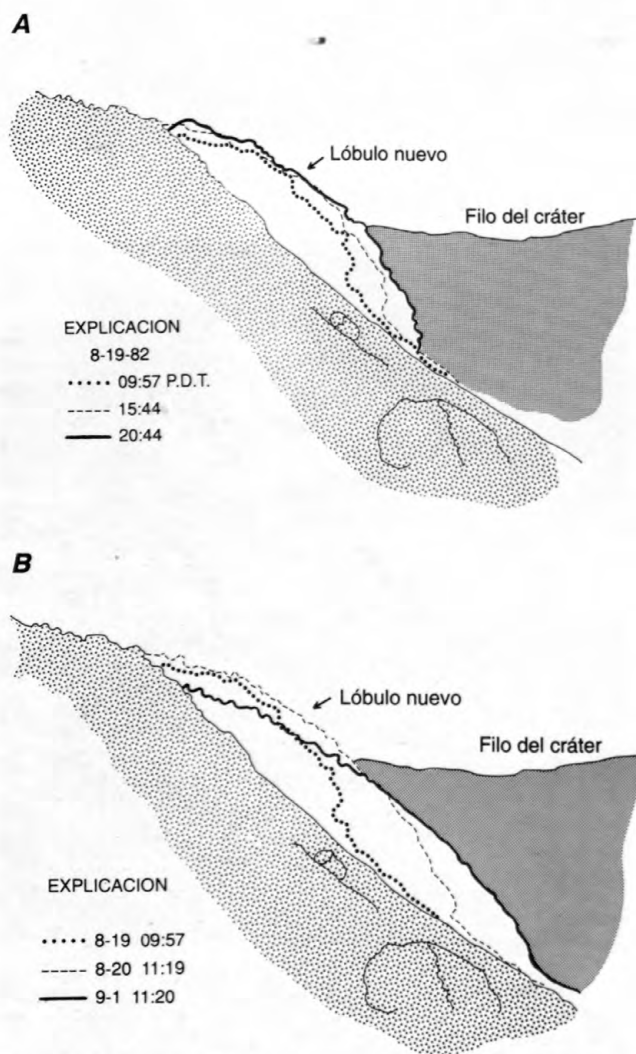
rollo de documentación espectacular del centro activo de esparcimiento del lóbulo.

Las cámaras Minolta X700 con dorsos de datos programables también fueron usadas en los dos episodios eruptivos. En Agosto 19, 1982, se montó una cámara en un trípode dentro de una caseta a aproximadamente 0.5 km al norte del domo. Durante los próximos dos días, se tomaron cinco rollos de película, a diferentes intervalos de tiempo. El sitio fue ocupado y fotografiado esporádicamente durante las próximas dos semanas. La Figura 20.13A demuestran dibujos hechos del lóbulo de lava de Agosto 19 para los cuales se usaron los marcos de lapso de tiempo, y la figura 20.13B ilustra trazos de un nuevo lóbulo del 19 y 20 de Agosto y 1 de Septiembre.

En Octubre 21, 1986, se instalaron dos Minoltas X700's a 8 km al norte del domo con la intención de fotografiar un lóbulo que se predijo iba a ser emitido durante la noche. Se programó una cámara para tomar una exposición de 10 minutos cada 2 horas, y la otra cámara fue programada para tomar una exposición de 20 minutos cada hora. La exposición de 20 minutos tomada a las 0500 horas (hora local) la mañana del 22 de Octubre no demuestra un lóbulo ardiente mientras que la próxima imagen tomada a las 0600 horas claramente demuestra un brillo de un domo caliente. La cámara documentó la emisión del lóbulo, y fue consistente con la interpretación de los registros sísmicos (Elliot Endo, comun. oral, 1986). La próxima noche, Octubre 22, se programaron las cámaras para que tomaran exposiciones de 30 minutos del nuevo lóbulo (fig. 20.14).

Entre 1981-83, se utilizó la cámara Minolta X700 para fotografiar secuencias de flujos de escombros que se originaron en el Shoestring Glacier. El accionador motorizado de la cámara fue preparado para tomar 3.5 imágenes por segundo cuando se activaba mediante una luz infrarroja (Tom Pierson, comun. oral, 1990). Este montaje tuvo éxito tres veces.

Las cámaras de lapso de tiempo dejadas en estaciones fotográficas acarean un nuevo conjunto de problemas fotográficos. La lluvia, nieve, hielo y ceniza pueden tapar los objetivos de la cámara o ventanas de la caseta, las nubes pueden oscurecer las vistas, el viento puede tumbar las cámaras y las erupciones, lahares o inundaciones pueden destruir las cámaras. Las baterías de las cámaras pueden morir sin aviso; las temperaturas bajas son la razón principal de los fracasos. Los diferentes intentos de fotografiar lóbulos emergentes en el domo han fracasado debido a la ceniza que sopla en el aire durante el verano, frío, nieve y hielo durante el invierno y nubes oscureciendo la vista en cualquier época durante el año. Las intenciones de fotografiar el desarrollo de canales de drenaje durante tormentas grandes no han tenido éxito debido al viento y lluvias. Una de las cámaras cinematográficas Eumig de 8 mm fue



**Figura 20.13.** Entre Agosto 19 y Septiembre 1, 1982, una cámara programable de lapso de tiempo de 35 mm fue usada para fotografiar el crecimiento del domo. Luego se utilizaron las fotografías resultantes para hacer ilustraciones del crecimiento. A, Trazos del lóbulo durante Agosto 19. B, Trazos del lóbulo en Agosto 19 y 20 y Septiembre 1.

arrasada por una inundación causada por un outburst de un glaciar en Mount Rainier.

Para asegurar las mejores oportunidades posibles de obtener buena fotografía de lapso de tiempo de volcanes, monte las cámaras en sitios seguros en un estuche hermético diseñado para cámaras, mantenga la cámara caliente durante los meses más fríos y proporcione suficiente carga al sistema para que el sistema se mantenga operativo. En el Mount St. Helens, se usa una caja de plexiglás y una caja metálica, ambas sin calefacción, con una ventana de vidrio insertada (fig. 20.10) para proteger las Minoltas X700's. Las cámaras cinematográficas Eumig tienen su propio estuche a prueba de agua que todavía tiene que ser sellado con cinta de ducto para evitar que entre ceniza al sistema (fig. 20.15). Todas las cámaras están generalmente montadas cerca al suelo, y se colocan rocas y fundas de arena a su alrededor para proporcionarles estabilidad cuando hay mucho viento (que pueden exceder 100 km/hr). Aunque las cámaras cinematográficas Eumig no han sido calentadas, generalmente se han mantenido operativas durante el invierno. Sin embargo, el hielo a menudo se forma encima de ellas dañando el tiraje. Las

Eumigs operan con una batería de linterna de 6 voltios y han sido modificadas para aceptar un montaje de baterías en paralelo. Cuando hace calor, a 20°C, una batería de litio de (3 voltios) alimenta una Minolta X700 por aproximadamente 6 horas de exposición.

Las Minolta X700's, usadas para fotografiar durante la noche una escena de un lóbulo nuevo que está creciendo (fig. 20.14), fueron montadas dentro de un edificio de observación sin calefacción, con huecos para la cámara cortados en las paredes. En el invierno se han registrado temperaturas en el edificio tan bajas como -15°C, obligando la búsqueda de un método económico para mantener las cámaras calientes. Se ideó un sistema de calentamiento de la cámara usando medias eléctricas (como aquellas usadas por cazadores y pescadores). Las medias eléctricas tienen un elemento de calefacción cosidas dentro del dedo de la media y son cargadas por una batería de célula "D" de 1.5 voltios. Las medias fueron modificadas para aceptar hasta cuatro baterías en paralelo, proporcionando así más de 30 horas de calefacción. Se usaron dos medias por cámara. Las medias se viran al revés y los elementos de calefacción se colocan al lado de la cámara, dorso de datos y las



**Figura 20.14.** Una cámara programable de lapso de tiempo de 35 mm fue usada para tomar esta exposición nocturna de 30 minutos del crecimiento del domo de Octubre 22, 1986 resultando en esta vista con luz de luna del lóbulo después 15 horas.



baterías del motor. El resto de la media se envolvió alrededor de la cámara para proporcionar aislamiento adicional, y el montaje entero fue cubierto con un nilón a prueba de agua. Solamente la parte delantera del objetivo de la cámara se deja expuesto.

## MEDIDAS CUANTITATIVAS

Una de las aplicaciones importantes de fotografías es poder usarlas para hacer medidas cuantitativas. Con este fin, los investigadores en el CVO han utilizado las fotografías aéreas verticales y ocasionalmente las fotografías terrestres o aéreas oblicuas. Rutinariamente se usan fotografías para calcular las dimensiones del domo (Swanson y otros, 1987).

Las medidas cuantitativas y cálculos están basados en cuatro variables:  $h$ , el tamaño del sujeto;  $h'$ , el tamaño de la imagen (tamaño del sujeto medido en el negativo o transparencia);  $F$ , la distancia focal del objetivo; y  $v$ , la distancia entre el objetivo y el sujeto (Blaker, 1976, p. 343). Su relación es:

$$h'/F = h/v$$

Esta fórmula puede ser usada no solo para obtener medidas de fotografías, sino también para determinar la distancia focal del objetivo que se necesita, o que tan lejos tiene que estar una estación de fotografía para que el sujeto llene el marco.

Típicamente se obtienen las medidas de fotografías aéreas verticales de formato grande. La distancia focal del objetivo y la distancia entre el objetivo y sujeto



**Figura 20.15.** Para proteger la cámara de ceniza se usó una cinta para pegar los bordes de esta cámara cinematográfica y se colocaron fundas de arena encima del trípode para protegerlo del viento.

(altura del avión sobre la superficie del suelo) son registradas rutinariamente, el tamaño de la imagen es medido fácilmente en el negativo grande o transparencia, y entonces se calcula el tamaño del sujeto. El tamaño de la imagen también puede ser determinado de una impresión fotográfica si se conoce la relación entre la impresión y el negativo o transparencia original (cantidad del aumento o reducción). Entonces se calcula el tamaño de la imagen como si fuera medida del negativo o transparencia.

Si se conoce la escala de una fotografía aérea vertical, se pueden deducir dos variables. Dado que una escala es representada como una relación contra 1, el tamaño de la imagen ( $h'$ ) es "1", y el tamaño del sujeto ( $h$ ) es el otro número. Si se conoce la altura del avión o la distancia focal del objetivo, se puede calcular el otro variable. Esto es útil cuando se está determinando a que altura debe volar un avión para obtener la escala deseada. Si se desea una fotografía del domo con una escala de 1:10,000 y la cámara tiene un objetivo de 152 mm (6 pulgadas), el avión tendrá que volar a aproximadamente 1.5 km (5,000 pies) sobre la cumbre del domo para obtener la escala deseada:

$$1/152 = 10,000/v = 1,520,000 \text{ mm} = 1.5 \text{ km.}$$

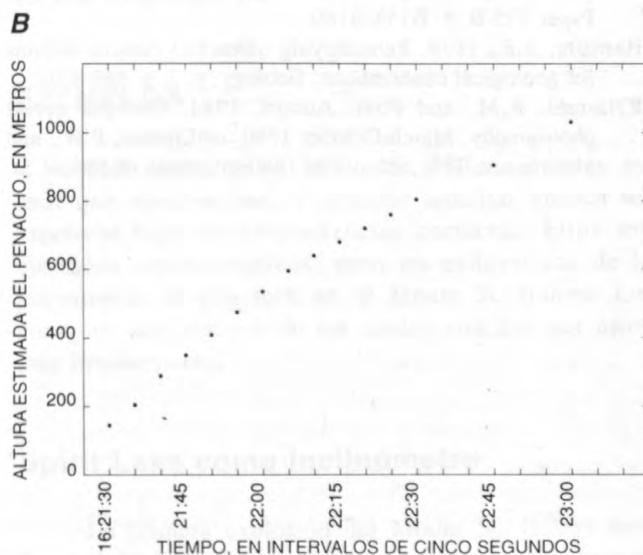
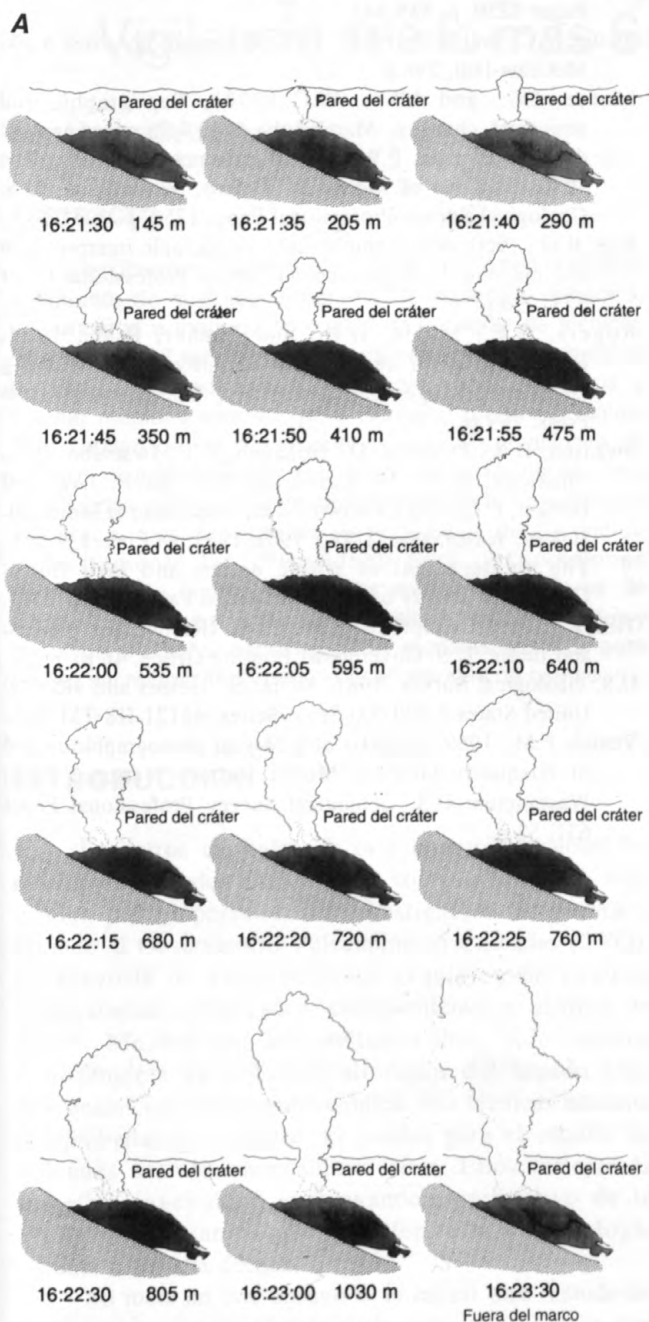
Las medidas también pueden ser obtenidas de fotografías aéreas o terrestres, aunque el proceso es más difícil y no tan exacta. En una fotografía oblicua las distancias en la foto generalmente aumentan desde abajo (más cerca a la cámara) hacia arriba (más lejos de la cámara), dificultando el cálculo del tamaño del sujeto. Se puede obtener fácilmente el tamaño de la imagen de los negativos o transparencias, y la distancia focal debe ser anotada. Desafortunadamente, el tamaño del sujeto y la distancia entre el objetivo y sujeto son variables a través de la película y muchas veces no se conocen. Se necesita obtener una de estas medidas para completar la ecuación.

Un método fácil para obtener la distancia entre el objetivo y sujeto para los cálculos de fotografía terrestre es medir la distancia entre la estación fotográfica y el sujeto usando mapas topográficos o fotografía vertical. Otro método es usar el equipo para levantamientos y medir con exactitud la distancia entre la cámara y sujeto. Cuando no se puede hacer un levantamiento, se puede estimar la distancia entre el objetivo y sujeto si se obtienen las distancias de, por lo menos, dos objetos (puntos de control) más o menos en el mismo plano que el sujeto principal. La distancia al sujeto original puede ser estimada geométricamente entre los puntos de control. La ecuación también puede ser resuelta si se conoce o se puede medir o estimar el tamaño del sujeto o puntos de control, dejando para el cálculo la distancia entre el sujeto y objetivo. El levantamiento o medida de los puntos de control no tienen que ser hechos cuando se

establece originalmente la estación fotográfica, ni tampoco cada vez que se toma una foto, siempre y cuando se haga alguna vez durante la vida de la estación (Malde, 1973, p. 197).

Una vez que se conocen las distancias hacia, o tamaño de los puntos de control, las distancias y tamaños de cualquier elemento dentro de la fotografía pueden ser calculados, sin embargo, la exactitud de los cálculos

depende del número y localización de los puntos de control. Mientras mayor sea el número de puntos de control medidos, más exacto será el tamaño del objeto calculado. El tamaño aproximado aún puede ser determinado si solo se tiene un punto de control, y a menudo esta estimación es suficiente para ilustrar un punto. Por ejemplo, en Abril 16, 1983, se utilizaron fotografías de 35 mm tomadas en una estación de fotografía para calcular la tasa de levantamiento de una pequeña columna de vapor y ceniza (fig. 20.16). Esta estación fotográfica en particular fue escogida por su localización, tiene aproximadamente la misma elevación que el domo y, por lo tanto, proporciona una vista casi perpendicular del domo, convirtiéndolo en un punto de control. La estación fotográfica también estaba lo suficientemente cerca para poder medir las imágenes de la columna en una película de 35 mm, pero lo suficientemente lejos para minimizar el efecto de variaciones de distancia entre las columnas y la cámara. Se programó una cámara Minolta X700 con un accionador motorizado y dorso de datos para tomar una foto cada 5 segundos y se prendía manualmente cuando primero se veía una columna. Para esta situación, se conocía la distancia focal del objetivo, el tamaño de la imagen fue medido para cada cuadro. La distancia entre el objetivo y sujeto desde el punto de control al centro del domo fue medida en mapas topográficos. Entonces se calculó la variable desconocida y la altura de la columna y se graficó la tasa de la subida.



**Figura 20.16.** Fotografía con lapso de tiempo ayuda ilustrar la tasa de ascenso de un penacho pequeño de vapor y ceniza. A, Altura del penacho ascendente dibujado y calculado de fotografías oblicuas. B, Altura del penacho graficada contra tiempo.

## CONCLUSIONES

El personal del Observatorio Vulcanológico Cascades ha usado diferentes cámaras y técnicas para documentar cambios y eventos en el Mount St. Helens y otros volcanes de los Cascades. La selección del equipo fotográfico ha dependido principalmente de las necesidades científicas, limitaciones de presupuesto y preferencia personal. La fotografía fija, especialmente en formato pequeño, ha sido la que más se ha utilizado, mientras que las fotografías cinematográficas y de video han sido subutilizadas. Una variedad de técnicas han sido utilizadas, incluyendo fotografía terrestre y aérea, y se han establecido numerosas estaciones fotográficas. Los productos de las fotografías han sido usados para publicaciones, transparencias para presentaciones con diapositivas, mapas hechos de fotografías aéreas verticales y diagramas hechos de fotografías terrestres repetidas o fotografía con lapso de tiempo. Hemos aprendido que es mejor tener algunas fotografías, no importa su formato, que ninguna.

## REFERENCIAS CITADAS

- Blaker, A.A., 1976, Field photography, beginning and advanced techniques: San Francisco, W.H. Freeman, 451 p.
- Eastman Kodak Company, 1979, Preservation of photographs: Rochester, Eastman Kodak Company, 61 p.
- , 1985, Photography from light planes and helicopters: Rochester, Eastman Kodak Company, 33 p.
- Gillsater, S., 1985, Antarctica: Photomethods, v. 28, no. 11, p. 33.
- Hackman, R.J., 1967, Time, shadows, terrain, and photointerpretation: U.S. Geological Survey Professional Paper 575-B, p. B155-B160.
- Harrison, A.E., 1974, Reoccupying unmarked camera stations for geological observations: *Geology*, v. 2, p. 469-471.
- Krimmel, R.M. and Post, Austin, 1981, Oblique aerial photography, March-October 1980, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.R., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 31-51.
- Loomis, B.F., 1926, The pictorial history of Lassen Volcano: Mineral, California, Loomis Museum Association, 96 p.
- Malde, H.E., 1973, Geologic bench marks by terrestrial photography: U.S. Geological Survey Journal of Research, v. 1, p. 193-206.
- Miller, C.D., and Hoblitt, R.P., 1981, Volcano monitoring by closed-circuit television, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.C., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 335-341.
- Miller, V.C., and Miller, C.F., 1961, Photogeology: New York, McGraw-Hill, 248 p.
- Moore, J.G., and Albee, W.C., 1981, Topographic and structural changes, March-July 1980—Photogrammetric data, *en* Lipman, P.W., and Mullineaux, D.C., eds., The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 123-134.
- Ray, R.G., 1960, Aerial photographs in geologic interpretation and mapping: U.S. Geological Survey Professional Paper 373, 230 p.
- Rogers, G.F., Malde, H.E., and Turner, R.M., 1984, Bibliography of repeat photography for evaluating landscape change: Salt Lake City, University of Utah Press, 179 p.
- Swanson, D.A., Dzurisin, D., Holcomb, R.T., Iwatsubo, E.Y., Chadwick, W.W., Jr., Casadevall, T.J., Ewert, J.W., and Heliker, C.C., 1987, Growth of the lava dome at Mount St. Helens, Washington (USA), 1981-1983, *en* Fink, J.H., ed., The emplacement of silicic domes and lava flows: Geological Society of America Special Paper 212, p. 1-16.
- Tilling, R., 1984, Eruptions of Mount St. Helens: Past, present, and future: U.S. Government Printing Office, 46 p.
- U.S. Geological Survey, 1981, Mount St. Helens and vicinity: United States 1:100,000-Scale Series, 45121-H8-TM-100.
- Veatch, F.M., 1969, Analysis of a 24-year photographic record of Nisqually Glacier, Mount Rainier National Park, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 631, 52 p.



# 21. La Importancia de las Observaciones de Campo Para Vigilar Volcanes, y el Planteamiento que "La Vigilancia sea lo más Sencillo y Práctico Posible"

Por Donald A. Swanson

## ABSTRACTO

Las observaciones geológicas de campo son una parte importante de cualquier programa de vigilancia volcánica, sin embargo a menudo no consta en las listas de técnicas de vigilancia. Tales observaciones proveen la oportunidad de integrar inmediatamente diferentes tipos de datos y diseñar medidas sencillas para examinar preguntas claves que resultan de las observaciones. Las observaciones de campo complementan los equipos y técnicas más sofisticados para formar un sistema completo de vigilancia volcánica. Los programas de vigilancia deben incluir explícitamente las previsiones para observaciones geológicas de campo e inculcar en los trabajadores de campo, científicos y técnicos, la necesidad de ser flexibles y creativos al diseñar experimentos y medidas sencillas para probar allí mismo importantes observaciones de campo.

## INTRODUCCION

Los otros capítulos de este boletín describen los diferentes métodos para vigilar volcanes que han sido usados por el personal de investigación de planta y afiliado al Observatorio Vulcanológico Cascades (CVO). La mayoría de estos métodos requieren de equipos relativamente sofisticados, entrenamiento, o análisis de datos. Muchos de los métodos han sido usados exitosamente en volcanes alrededor del mundo bajo diferentes condiciones ambientales. Son técnicas bastante comprobadas que pueden ser usadas para el estudio de volcanes activos en cualquier sitio. Ellos reflejan la increíble ingenuidad y el avance significativo de la vigilancia volcánica que caracteriza la vulcanología durante la pasada década.

Mi meta en este ensayo es enfatizar otro método de vigilancia y que es el más viejo que vulcanólogos han tenido disponible, sin embargo es uno de los más olvidados cuando se establece un programa de vigilancia volcánica. No puede tomar el sitio de las técnicas más

sofisticadas pero las puede complementar y servir de guía en su aplicación. Es la única manera que permite una integración casi inmediata de un sinnúmero de parámetros que caracterizan el volcán, y una revaluación instantánea de esa integración. Aunque es anticuado, sigue siendo actual, es aplicable en todos los ambientes, excepto los más extremos, y es tan duradera como la increíble máquina que la corre. El medio comprende observaciones directas de campo, y la máquina es el observador mismo.

La sencillez de las observaciones geológicas de campo aumenta su significado, y a continuación presento tres ejemplos para ilustrar esta aseveración. También trato de realzar el punto, que hasta medidas hechas en base de observaciones pueden ser suficientes, y que hacer medidas más sofisticados que aquellas requeridas, no mejoran necesariamente su valor—y de hecho pueden socavar su utilidad.

## EJEMPLOS

Tres ejemplos de Mount St. Helens ilustran mi tesis que observaciones y medidas sencillas pueden ser efectivas bajo las circunstancias correctas. Ellos son ejemplos representativos, pero no exhaustivos de la importancia de esta tesis en el Mount St. Helens. Los ejemplos son algunos de los cuales con los que estoy más familiarizado.

### Spirit Lake como inclinómetro

La primera explosión del Mount St. Helens tuvo lugar el 27 de Marzo de 1980, e inmediatamente después los vulcanólogos empezaron a pensar si un cuerpo de magma estaba subiendo debajo del volcán y, si era cierto, cual era su profundidad y volumen. El volcán

estaba cubierto por una capa muy gruesa de nieve, pero era posible manejar hasta la base y subir un poco por el flanco noreste. Por lo tanto, rápidamente se hicieron planes para empezar a tomar medidas de inclinación con nivelación de montaje único e instalar inclinómetros electrónicos. Pero, iba a tomar tiempo adquirir el equipo necesario, esperar que los nuevos hitos, que se estabilizaran y obtener datos. Mas aún, la capa gruesa de pómez en la base del volcán cerca de Spirit Lake dificultaba la tarea de encontrar sitios estables para los instrumentos y los hitos.

¿Por qué no usar Spirit Lake como un enorme nivel de carpintero? Esta idea tenía varias ventajas. El lago estaba suficientemente lejos del pie del volcán para ser un monitor efectivo de cambios profundos debajo del volcán. El eje más largo del lago estaba orientado radial al volcán y cálculos rápidos revelaron que las inclinaciones en el orden de 2  $\mu$ rad serían detectables con procedimientos razonablemente cuidadosos. El lago estaba cubierto por hielo, así que olas relacionadas con el viento serían amortiguadas. Los muelles de los botes y troncos parcialmente sumergidos servían como sitios para instalar los equipos de medición.

¿Pero, qué equipos se iban a poder obtener rápidamente? El tiempo no nos alcanzaba como para obtener e instalar sensores convencionales para medir niveles de agua. Una alternativa económica y disponible se hizo aparente inmediatamente. Una visita a un depósito de madera resultó en un regalo: varias cintas métricas, que fácilmente se podían clavar a los muelles y troncos. Dentro de un día el nivel del lago fue vigilado por individuos que visitaban cada lugar, leían el nivel del lago en la cinta parcialmente sumergida, registraban la hora de su visita y referían su observación a la estación escogida como punto de referencia. Más tarde usamos varios observadores con relojes sincronizados, pero los resultados eran iguales: la orilla de Spirit Lake *no* se estaba inclinando. De esto pudimos concluir que un gran volumen de magma no estaba intruyendo el volcán, así que pudimos concentrar nuestra atención sobre el propio edificio volcánico (Lipman y otros, 1981).

### Protuberancia del flanco norte

A mediados de Abril, 10–12 días después del comienzo de la vigilancia del lago, varios geólogos observaron que la parte superior del flanco septentrional aparentemente se había deformado en relación a su estado pre-1980. Los sismos registrados en los sismógrafos portátiles fueron localizados debajo del flanco norte, así que parecía razonable que la deformación estaba relacionada a una intrusión superficial de magma en el edificio. Pero, la observación resultaba obvia solamente en los glaciares, que

aparentemente se estaban abollando y tenían protuberancias hacia arriba. ¿Estaba confinada a los glaciares la deformación? ¿Era esto el resultado de avances rápidos relacionados a fusión sub-glacial o también estaba siendo deformada la parte subyacente del edificio?

La manera obvia de comprobar la deformación del edificio era tomar medidas repetidas a blancos en partes del volcán sin nieve. Rápidamente se obtuvo un teodolito estándar, que usan los agrimensores, y se midieron los ángulos a estructuras naturales prominentes en el volcán. Los datos sugirieron un movimiento hacia afuera del flanco septentrional, pero era difícil apuntar a las estructuras naturales y esto conllevaba un error considerable. Dentro de uno o dos días llegó un distanciómetro electrónico (EDM-electronic distance meter) y se colocaron reflectores en la montaña. El EDM es un instrumento sofisticado; pero los blancos eran solo reflectores plásticos de carretera atornillados a tablas que estaban amarrados a postes de verjas martilleados en el piso. La combinación de medidas del teodolito y el EDM a estos blancos indicaron rápidamente que el flanco norte se estaba moviendo hacia el norte a un paso constante, así que claramente el edificio volcánico se estaba deformando en respuesta a una intrusión de magma (Lipman y otros, 1981). Las medidas con teodolito a los blancos de madera proveían suficiente información por su cuenta para definir un desplazamiento de hasta 2.5 m/d. Los datos del EDM eran complementos útiles a las medidas de teodolito, pero no fueron de ninguna manera necesarios para trazar los movimientos, sino en los blancos menos sensibles.

### Medidas de grietas y fallas de cabalgamiento para predecir el crecimiento del domo

Los geólogos observaron por primera vez las grietas en el piso del cráter a mediados de Septiembre de 1990. ¿Se continuarían expandiendo o se habían formado en respuesta a algún evento desconocido de corta duración? Las medidas sencillas proporcionaron la respuesta. Se martillaron estacas cortas de varillas de construcción de acero en el terreno a cada lado de varias grietas, y se midieron las distancias entre las grietas con una cinta métrica metálica de carpintero. Las medidas repetidas demostraron que algunas de las grietas se ensanchaban con tiempo, y que la tasa de ensanchamiento se aceleró antes del evento del 16–18 de Octubre y del evento de crecimiento del domo del 27 de Diciembre de 1980–3 de Enero de 1981 (Swanson y otros, 1981).

Durante el evento de Diciembre-Enero, los geólogos se sorprendieron al encontrar dos fallas de

cabalgamiento en el piso del cráter al norte y noroeste del domo. Las fallas de cabalgamiento estaban dirigidas hacia afuera del domo. Las mismas preguntas surgieron con estas fallas como con las grietas: ¿todavía se estaban moviendo y si era cierto, podrían dar indicios sobre futura actividad eruptiva? Nuevamente se metieron estacas de varilla en las placas superiores e inferiores de la falla y se midió la distancia entre las dos con una cinta métrica. La distancia entre las parejas de estacas se acortaba con el tiempo e indicaban que la placa superior se estaba moviendo sobre la placa inferior. Medidas repetidas de los cabalgamientos y de las grietas radiales pronto empezaron a demostrar un patrón distintivo. Las tasas de desplazamiento eran lentos después de un episodio de crecimiento de domo pero, aumentaban casi exponencialmente con el acercamiento de un evento de crecimiento de domo (Chadwick y otros, 1983). Este patrón y varios detalles adicionales del proceso entero de deformación del piso del cráter fueron nítidamente trazados con un método sencillo de varilla y cinta métrica y formó la base para una serie de predicciones de crecimiento de domo en 1981–1982 (Swanson y otros, 1983). Además, las medidas sencillas con varilla y cinta métrica proveyeron los datos primarios para dos publicaciones de cómo y por qué se deformaba el piso del cráter (Chadwick y otros, 1988; Chadwick y Swanson, 1989).

## DISCUSION

Cada uno de estos tres ejemplos ilustran el valor de las observaciones en sitio y la aplicación de técnicas sencillas de medición para contestar preguntas importantes y estimular una interpretación significativa. Dentro de horas a unos cuantos días las preguntas básicas surgidas de cada conjunto de observaciones de campo fueron contestadas, aunque el refinamiento de los detalles fue mucho más lento. Las contestaciones vinieron rápidamente, en parte porque las preguntas eran fáciles (aunque muy importantes), pero en parte porque se pudieron tomar las medidas rápidamente dada la sencillez de los métodos utilizados. Más allá, los métodos sencillos fueron confiables y no dependían de una serie de equipo complejo, ni un eslabón que podía fracasar repentinamente. La confianza en equipos sofisticados puede "rebotar" si éstos no pueden ser reparados rápidamente. En general, una buena guía a seguir para el desarrollo de una metodología de vigilancia es "manténgalo lo más sencillo y práctico posible."

Desde 1980 se han mejorado notablemente los equipos portátiles de vigilancia electrónica, como se demuestra en varios capítulos de este boletín. Sin embargo, dadas las circunstancias, como en los tres

ejemplos, creo que se podrían conseguir contestaciones más rápidamente con métodos más sencillos, principalmente porque se necesita mucho tiempo para instalar y calibrar los equipos sofisticados. No hay duda que las técnicas más sofisticadas llenan vacíos importantes, porque la mayoría tienen la capacidad para adquirir datos en tiempo casi real, 24 horas al día bajo cualquier condición de tiempo. Pero una de las limitaciones principales de estas técnicas es una de las ventajas principales de las observaciones de campo y medidas sencillas: flexibilidad y habilidad para integrar varias observaciones en el momento y diseñar de una medida para comprobar esa integración. Las medidas continuas pueden sustituir observaciones en sitio, pero hasta las más amplias—monitores de televisión—son menos adaptables e ingeniosas que el observador humano en el campo.

No se puede enfatizar demasiado la flexibilidad que provee una observación geológica de campo. La mayoría de los sensores electrónicos están diseñados para detectar y reportar un parámetro, ya sea inclinación, desplazamiento, sismicidad o cambios en un especie particular de gas. Si algún parámetro que no está siendo vigilado cambia, el sensor, o no lo detecta o puede dar información errónea. Observaciones geológicas en sitio claramente no están restringidas a un solo parámetro, aunque obviamente *son* restringidas a lo que puede ser observado con los ojos, oídos y nariz. Cambios pequeños podrían pasar desapercibidos por los observadores en el campo, pero cambios grandes pueden pasar desapercibidos por los sensores electrónicos que no están vigilando el parámetro correcto. Solamente los observadores en sitio pueden evaluar rápidamente la situación y determinar cual de los parámetros probablemente va proveer información vital. Medir una cantidad no importante exactamente y usar equipo sofisticado continuamente puede ser un desperdicio de tiempo y dinero; es mucho mejor ir al corazón de la materia usando los mecanismos más sencillos.

Otro punto importante es que hasta las mejores técnicas de vigilancia remota requieren de una verificación mediante observaciones en sitio y la integración con otros datos. Por ejemplo, un inclinómetro electrónico puede indicar un cambio, pero este cambio podría reflejar un problema electrónico, una instalación inestable, o verdadera deformación del volcán. Solo con una información independiente se puede determinar cual de las interpretaciones es la más probable. Como regla, nunca se deben aceptar a ciegas los datos obtenidos hasta que se puedan ser verificadas en el campo. **¡No acepte ningún sustituto!**

Varios colegas enfatizan la importancia de equipos sofisticados y datos telemétricos durante tiempos cuando las condiciones ponen en peligro los trabajadores de campo; yo estoy de acuerdo con su razonamiento. Es



mucho mejor perder un pedazo de equipo que una vida. Ninguna persona razonable abogaría por un trabajo de campo bajo condiciones que el o ella sientan que ponen en peligro su vida. Pero hay muchos períodos de tiempo durante la actividad de un volcán cuando las condiciones no son tan peligrosas, y estos son los momentos propicios para hacer observaciones de campo que ciertamente serían beneficiosas. Mas allá, nosotros que estudiamos volcanes activos, tenemos que admitir que existen ciertos riesgos, tal como para bomberos y oficiales de la policía. Una parte integral de nuestro trabajo es evaluar esos riesgos y establecer guías personales para la conducta relativamente segura de nuestra investigación.

Yo no veo porque discutir más las ventajas y desventajas putativas de observaciones geológicas de campo vs medidas electrónicas. El punto verdadero es que no debemos pensar en esos términos (aunque muchos de nosotros lo hacemos), sino en términos de un esfuerzo integrado de vigilancia que incorpora lo mejor de todas las observaciones en interpretaciones unificadas. No hay ningún acercamiento inherentemente mejor. Cada trabajo tiene su herramienta, y el truco es encontrar la mejor herramienta o conjunto de herramientas, aunque sean observaciones de cerca, equipo complejo, sistemas sofisticados de telemetría, o una combinación de las tres.

No hay nada nuevo en esta discusión, pero el énfasis en datos sofisticados y telemétricos en este boletín, a mi parecer, requerían de un contrapunto, aunque este fuera obvio. Las observaciones de campo y medidas relacionadas son un componente vital de vigilancia volcánica, tal como son los sensores electrónicos, radios y equipos caros de agrimensura. De hecho, los dos planteamientos se unen continuamente. Por ejemplo, los EDM's sofisticados (y caros) miden simples tablas pintadas con reflectores plásticos atornillados—un verdadero matrimonio de la aristocracia con el proletariado!

Indonesia provee un ejemplo asombroso de como una combinación de sencillez y complejidad han salvado vidas. En 1988 hubieron siete erupciones explosivas en Indonesias y todos tuvieron precursores sísmicos. Como resultado de las advertencias y actividad eruptiva pequeña, preliminar y cercanamente observada, 33,000 personas fueron evacuadas de sus casas y solo se perdieron cuatro vidas (todas en Banda Api, donde los que murieron estaban conscientes de que estaban evadiendo órdenes de evacuación). (T.J. Casadevall, comun. escrita, 1989). Indonesia tiene como 150 volcanes activos y 50 observatorios volcánicos. Cada observatorio tiene entre dos y cuatro observadores, generalmente un sismómetro con un sismógrafo con un tambor ahumado y típicamente solo contacto radial (pocos tienen teléfono) con las oficinas centrales en Bandung. Sin embargo, los observadores están bien

entrenados para detectar cambios en sismicidad y muchos otros parámetros (como la presencia de nuevo material emitido, cambios en el comportamiento del penacho, temperaturas de fumarolas, características de las lagunas cratéricas y otros factores), son de la región del observatorio y conocen a la gente y tienen su confianza. Quizás hay lecciones aquí para todos. Una lección es que *el tipo de vigilancia y sistema de alerta más sencilla que funciona, es el mejor*; en este ejemplo, el instrumento más complejo del sistema de vigilancia, es el más sencillo — un solo sismómetro con un sismógrafo con un tambor ahumado, y el sistema de alerta involucra los observadores que están íntimamente familiarizados con los volcanes siendo vigilados y con la gente de la región. Otra lección, no pertinente al tema de este capítulo, pero de gran importancia, es que *la familiaridad (y hasta cercanía) de los observadores a la población local es una clave que debemos considerar más en nuestros esfuerzos por salvar vidas*.

Durante algunas crisis volcánicas, muchos científicos y técnicos convergen en el sitio (o en el observatorio de campo) pero pueden quedarse por solo períodos cortos de tiempo, regresando a sus tareas según sea requerido. Es difícil mantener la continuidad de las observaciones y unión de los datos con tal rotación de personal, especialmente para observaciones de campo que comúnmente involucran descripciones relativamente subjetivas. Una manera de minimizar tales problemas es desarrollar y usar una lista de los tipos de observaciones que deben ser hechas rutinariamente. Tal lista detallaría lo específico para cada volcán y sería susceptible a modificaciones si el volcán se reactivara. Otro elemento clave para mantener la continuidad de las observaciones de campo es por medio de la transferencia de datos entre los observadores entrantes y salientes, preferiblemente por medio de visitas conjuntas al volcán.

## CONCLUSIONES

Mi propósito al escribir este ensayo no era para minimizar de ninguna manera las técnicas modernas de vigilancia que ayudan a que los volcanes sean más seguros y mejor entendidos. Yo he usado muchas de las técnicas y he aplaudido su implementación. Simplemente, quería señalar que cualquier esfuerzo de vigilancia es incompleto si no hay observadores experimentados y si no se le da la oportunidad a estos observadores de influenciar la recopilación e interpretación de los datos adquiridos con técnicas sofisticadas. En mi opinión, un observatorio vulcanológico o programa de vigilancia de cualquier tipo empieza con su personal, y no con los equipos en los armarios o que se planifican comprar. Cada geólogo o geofísico que pasa tiempo en un volcán debe ser

entrenado para observar las condiciones de campo, pensar en esas observaciones mientras está en el campo, y ser flexible y astuto en el desarrollo de medidas sencillas que pueden ser hechas rápida y definitivamente una vez que se observan cambios. Esos científicos y técnicos no deben tener una visión limitada a su especialidad, sino que deben integrar toda la información disponible y estar listos para responder a cambios observables de cualquier parámetro significativo. A estos individuos se les debe dar el tiempo para estar en los volcanes activos, y de hecho tal tiempo debe ser una parte integral del programa de vigilancia. La naturaleza es demasiado compleja para aprender lo suficiente de un volcán mediante una vigilancia remota; también lo debemos observar y vigilar personalmente y de cerca.

Un volcán es demasiado complejo para ser entendido por personas trabajando aisladamente. La libre comunicación e intercambio de datos, observaciones e ideas *entre todo el personal* es esencial. La integración de las observaciones de campo con datos telemétricos es vital para la preparación de una evaluación íntegra del volcán y sus peligros. La apuesta es tan grande que los datos, observaciones y desarrollo de las interpretaciones, *tienen que ser* intercambiados en un ambiente de curiosidad intelectual y responsabilidad social, y no en un ambiente competitivo o uno de conflicto entre los científicos de nivel alto y mediano y los técnicos.

## REFERENCIAS CITADAS

- Chadwick, W.W., Jr., Archuleta, R.J., and Swanson, D.A., 1988, The mechanics of ground deformation precursory to dome-building extrusions at Mount St. Helens 1981–1982: *Journal of Geophysical Research*, v. 93, p. 4351–4366.
- Chadwick, W.W., Jr., and Swanson, D.A., 1989, Thrust faults and related structures in the crater floor of Mount St. Helens volcano, Washington: *Geological Society of America Bulletin*, v. 101, p. 1507–1519.
- Chadwick, W.W., Jr., Swanson, D.A., Iwatsubo, E.Y., Heliker, C.C., and Leighley, T.A., 1983, Deformation monitoring at Mount St. Helens in 1981 and 1982: *Science*, v. 221, p. 1378–1380.
- Lipman, P.W., Moore, J.G., and Swanson, D.A., 1981, Bulging of the north flank before the May 18 eruption—Geodetic data, *en* Lipman, P. W., and Mullineaux, D. R., eds., *The 1980 eruptions of Mount St. Helens*, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 143–155.
- Swanson, D.A., Lipman, P.W., Moore, J.G., Heliker, C.C., and Yamashita, K.M., 1981, Geodetic monitoring after the May 18 eruption, *en* Lipman, P. W., and Mullineaux, D. R., eds., *The 1980 eruptions of Mount St. Helens*, Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, p. 157–168.
- Swanson, D.A., Casadevall, T.J., Dzurisin, D., Malone, S.D., Newhall, C.G., and Weaver, C.S., 1983, Predicting eruptions at Mount St. Helens, June 1980 through December 1982: *Science*, v. 221, p. 1369–1376.









USGS LIBRARY - RESTON



3 1818 00151643 2

