

7. DESCRIPCION DE LOS VERTICES P

Los sitios escogidos como vértices P sobre el flanco norte del volcán son:

- Las Cruces (19.0350° N, 98.6193° W), con un árbol de 11 prismas.
- Tres Amigos (19.0372° N, 98.6319° W), con un árbol de 3 prismas
- Texcalco (19.0412° N, 98.6279° W), con un árbol de 3 prismas.
- Meseta (19.0415° N, 98.6397° W), con un árbol de 3 prismas
- La Cruz (19.0590° N, 98.6485° W), con un árbol de 3 prismas.

Las Cruces, Texcalco y Tres Amigos están construidos sobre flujos de lava del volcán el Fraile, datada aproximadamente en 3800 años. Los otros dos (Meseta y Cruz) están asentados sobre macizos rocosos que forman parte de la estructura del volcán Nexpayantla (Robin y Boudal, 1987). Los vértices son bases de concreto construidas todas ellas sobre roca maciza, con un tornillo de acero inoxidable de 1/2 x 3 1/4 de pulgada como centro. El tornillo se encuentra empotrado en la roca y la base es de forma más o menos cuadrada, de unos 20 cm de lado (Figura 7). El vértice está señalado físicamente por el centro geométrico del tornillo y los prismas se fijan a este. Dado que en el entorno que rodea a los vértices no existen detalles significativos que nos permitan ubicar estos monumentos mediante referenciación a puntos notables por rumbo y distancia, se optó por identificarlos con el nombre del paraje donde se encuentran. A continuación se da una descripción de la ubicación de los monumentos así como de la forma de llegar a estos lugares (ver Figura 6).

VERTICE CRUZ. Se ubica aproximadamente 5 m al SE de la cruz de concreto, de dos metros de altura, situada a unos 150 m al SW del albergue alpino Tlamacas. La roca es parte de la estructura del volcán Nexpayantla

VERTICE MESETA: Se encuentra sobre un macizo rocoso correspondiente a la estructura del volcán Nexpayantla. Dicho macizo tiene forma de meseta y se ubica al SE del parteaguas conformado en la parte superior o inicial de la barranca Nexpayantla, sobre la ruta más corta para ascender al volcán (ruta directa).

VERTICE TEXCALCO Se localiza en la parte superior de una estructura rocosa de unos 10 m de altura, ubicada en la parte sur del camino que conduce de Tlamacas a las Cruces. Este macizo está emplazado inmediatamente después de cruzar la primera morrera que atraviesa el camino. El punto se encuentra al NW de las ruinas del refugio "El Canario".

VERTICE TRES AMIGOS. Se halla a unos 10 metros al SE del camino a Las Cruces, sobre un cuerpo rocoso estable, en la segunda morrera del camino Tlamacas-Las Cruces, aproximadamente a la mitad de la distancia entre Texcalco y Las Cruces.

VERTICE LAS CRUCES. El monumento se ubica en un promontorio rocoso que se localiza al SW del camino que une a Tlamacas con las Cruces, inmediatamente al Sur de las cruces de hierro que dan nombre a esta zona

8. ESTABLECIMIENTO DE LA RED DE INCLINOMETROS

Los inclinómetros electrónicos que se han utilizado en el Popocatepetl son de la serie 700 de Applied Geomechanics, y han sido facilitados por el U S Geological Survey. El principio de su funcionamiento se basa en la detección electrónica de la posición de una burbuja en un nivel muy sensible. Los más pequeños desplazamientos de la burbuja son amplificados electrónicamente y la señal resultante es enviada por telemetría al centro de operaciones en el CENAPRED. Tienen un rango de inclinaciones de 1° en el transductor de alta ganancia y mayor a 10° en el transductor de baja ganancia. La resolución especificada para estos equipos es de 0.1 radianes para el transductor de alta ganancia. Dada la alta sensibilidad de estos equipos a los cambios de temperatura, es necesario enterrarlos de 1 a 2 metros bajo el suelo y llevar un control estricto de las temperaturas del instrumento, dato que se transmite

junto con las inclinaciones y el voltaje de la batería que los alimenta. Estas baterías son recargadas por paneles solares

Hasta el momento se han colocado tres inclinómetros en sitios cerca de o donde ya existen otros vértices o estaciones sismológicas. La instalación fue realizada por el grupo de Instrumentación del CENAPRED y personal del USGS. Los sitios donde se encuentran los inclinómetros electrónicos son: PIN (Nexpayantla) 19.0526° N, 98 6366° W; PIP (Canario) 19 0412° N, 98.6279° W y PIX (Chipiquixtle) 19.0088° N, 98.6566° W.

9. METODOLOGIA DE LAS OBSERVACIONES

Las mediciones repetitivas de triangulación sobre la red establecida en el flanco norte del volcán Popocatepetl se han realizado de manera persistente desde el mes de agosto de 1994. Se cuenta con ocho etapas completas de vigilancia geodésica hasta la fecha.

Para efectuar las observaciones se utiliza equipo de precisión geodésico: Las distancias inclinadas se miden con un distanciómetro electrónico (EDM) Leica Wild DI3000S, el cual emite un haz láser infrarrojo, que es reflejado en los sitios remotos por los prismas. Este equipo tiene un alcance máximo teórico de 19 km y una precisión de 3 mm + 1 ppm. Los ángulos horizontales y verticales se miden con un teodolito universal Leica T-2, con aproximación a la décima de segundo. Las correcciones barométrica y térmica son programadas in situ en el microprocesador del distanciómetro, a partir de las lecturas de un altímetro/barómetro digital Ultimeer, con resolución de 10m para las altitudes y de 0.1mm Hg para la presión atmosférica. Los prismas reflectores (un árbol de 11 prismas y cuatro árboles de tres prismas cada uno) son de las marcas Leica y Sokkisha respectivamente

Este equipo ha sido adquirido por el Instituto de Geofísica con financiamiento del CONACYT, a través del Proyecto CONACYT No 400323-5-1899-T9211 "Procesos Físicos en Volcanes Activos", del cual es responsable el primer autor de este artículo. Algunas de las componentes de este equipo (Sokkisha) han sido donadas por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA)

Desde los extremos de la línea base, correspondientes al monumento de Paso de Cortés y a la estación repetidora de Cerro Tlamacas se dirigen visuales hacia cada uno de los cinco monumentos ubicados en la cara norte del cono volcánico. Estos monumentos fueron bautizados genéricamente como vértices P, por ser los sitios donde se mantienen los prismas reflectores. Se miden series de ángulos para cada una de esas marcas permanentes. Una serie implica la lectura de un ángulo horizontal y uno vertical, registrando cinco series para cada marca visada. A continuación se efectúan las mediciones electrónicas de distancia (EDM), produciendo una muestra de 10 distancias inclinadas para cada marca visada. En total, se registran en promedio 40 lecturas de distancias inclinadas y 15 series de ángulos en cada marca permanente. Las mediciones electrónicas de distancia son corregidas en el momento mismo de la observación introduciendo datos de presión y temperatura. Internamente, el instrumento asigna la corrección en partes por millón a la distancia medida. Posteriormente se analizan estadísticamente todos los valores de distancias y ángulos y se obtienen promedios, desviaciones estándar y límites de confianza. Las sesiones de campo se repiten de acuerdo al nivel de actividad del volcán.

Los inclinómetros transmiten los datos de inclinación de dos componentes perpendiculares, orientadas de tal manera que la bisectriz del ángulo de 90° entre ellas se dirige radialmente al volcán, conjuntamente con datos de temperatura y voltaje de las baterías de alimentación. La información se recibe y procesa en el CENAPRED por medio del software denominado BOB, desarrollado en el USGS. Este permite obtener en pantalla los datos correspondientes a un número predeterminado de días (ver como ejemplo Figura 23)

10. RESULTADOS

Las Figuras 10 a 21 resumen en forma gráfica los resultados de todas las observaciones realizadas por los métodos de triangulación desde septiembre de 1994 hasta la fecha (31 de marzo de 1995). La Figura 10 muestra las medidas de distancia inclinada entre Tlamacas y Las Cruces. Las medias en cada una de cuatro etapas muestran desviaciones estándar de 1 cm. Esto representa una resolución efectiva mejor que 3 partes por millón. Sobre una distancia media de 3574.6931 se observan pequeñas fluctuaciones que, considerando los errores inherentes de medida, no son significativas como deformaciones entre esos dos puntos. Lamentablemente, el prisma de Las Cruces dejó de reflejar las señales del distanciómetro después de la 6a etapa, por lo que será necesario, cuando las condiciones de seguridad lo permitan, realinearlo.

La Figura 11 muestra las medidas de distancia inclinada entre Tlamacas y Tres Amigos. Se inician en la 5a etapa por ser esa la fecha en que se instaló ese vértice P. Los resultados observados sugieren nuevamente que las pequeñas diferencias entre los promedios de las distancias medidas pueden ser atribuidos a errores de medida en un rango menor a 3 ppm.

La Figura 12, que muestra las distancias inclinadas entre Tlamacas y Meseta con el mismo grado de resolución de las anteriores, indica un desplazamiento significativo de ese punto entre la 3a (18/Nov/94) y la 4a (3/Ene/95) etapas de medida. El desplazamiento observado corresponde a un acercamiento de 3.4 cm del vértice Meseta a Tlamacas. El desplazamiento parece ser irreversible. Antes y después de este, las distancias se mantienen inalterables dentro de los límites de error. El hecho de que el inicio de fase de mayor actividad se iniciara entre estas dos etapas (el 21/Dic/94) podría ser relevante a este cambio, como se discute en el párrafo de conclusiones.

La Figura 13 sugiere que la distancia entre los puntos Tlamacas y Cruz se mantiene estable, con un promedio de 1366.9148 m, y fluctuaciones no significativas que caen dentro de los límites de error.

La Figura 14 muestra el control entre los extremos de la línea base Tlamacas-Paso de Cortés. La distancia media medida de 2910.7082 presenta fluctuaciones aleatorias y no significativas, atribuibles al error inherente a las mediciones.

Las Figuras 15 a 17 muestran las distancias medidas entre el vértice-base auxiliar Tlamacas 1 y los vértices P Las Cruces, Tres Amigos y Texcalco. Como se menciona arriba, el árbol de prismas en Las Cruces probablemente ha cambiado su orientación por efectos del viento y no refleja desde la 6a etapa. Las distancias entre Tlamacas 1 y Tres Amigos y Tlamacas 1 y Texcalco muestran una fluctuación entre la 7a y 8a etapas que, aunque más grande que el nivel general de ruido, es poco probable que sea significativa, dado que no se detecta desde los otros vértices de referencia, pudiendo entonces ser debida a un error sistemático en el emplazamiento del distanciómetro en Tlamacas 1. Si este fuera el caso, la naturaleza de esta fluctuación se podrá determinar de etapas futuras, analizando si tiene carácter reversible.

La Figura 18 muestra las observaciones correspondientes a la línea más larga de la red: Paso de Cortés-Las Cruces. La distancia media de 6332.3070 m se mantiene estable, con fluctuaciones no-significativas atribuibles al error de medida. Otra línea de longitud comparable, Paso de Cortés-Tres Amigos, se empezó a medir desde la 5a etapa. Dado que durante la 7a y 8a etapas no fue posible obtener reflexiones desde ese punto, la Figura 19 muestra solamente los dos resultados obtenidos hasta el momento.

La línea Paso de Cortés-Texcalco representa uno de los brazos de la red geodésica con mejor control por la excelente visibilidad entre esos dos puntos. La Figura 20 muestra que la distancia media de 5351.2394 m presenta únicamente variaciones aleatorias, dentro de los límites de error.

Los resultados obtenidos en el brazo Paso de Cortés-Meseta, mostrados en la Figura 21, confirman los resultados

descritos en la Figura 12. Entre la 3a y la 6a etapas, se observa un cambio significativo en la distancia, que excede los errores de medición. La magnitud del desplazamiento observado es completamente consistente con el observado en la línea Tlamacas-Meseta. El mismo acercamiento de 3.4 cm de Meseta hacia Paso de Cortés es registrado aquí.

Es evidente la necesidad de extender esta red geodésica para cubrir otros sectores del volcán. Existe ya la monumentación para el control geodésico del sector SW. La distribución de los monumentos se muestra en la Figura 22. Para realizar las medidas sólo se requieren los recursos para adquirir los prismas reflectores adicionales que permitan efectuar estas medidas.

En lo que respecta a los inclinómetros electrónicos, estos toman varias semanas para estabilizarse. La Figura 23 muestra como ejemplo los resultados de los últimos 10 días. Nótese que mientras las lecturas de inclinación y temperatura de PIN (Nexpayantla) se mantienen muy estables, PIP (Canario) muestra una ligera deriva que se puede correlacionar con un gradual aumento en la temperatura, probablemente de carácter estacional, pues el flanco SW del volcán está más expuesto a las condiciones de calidez climática.

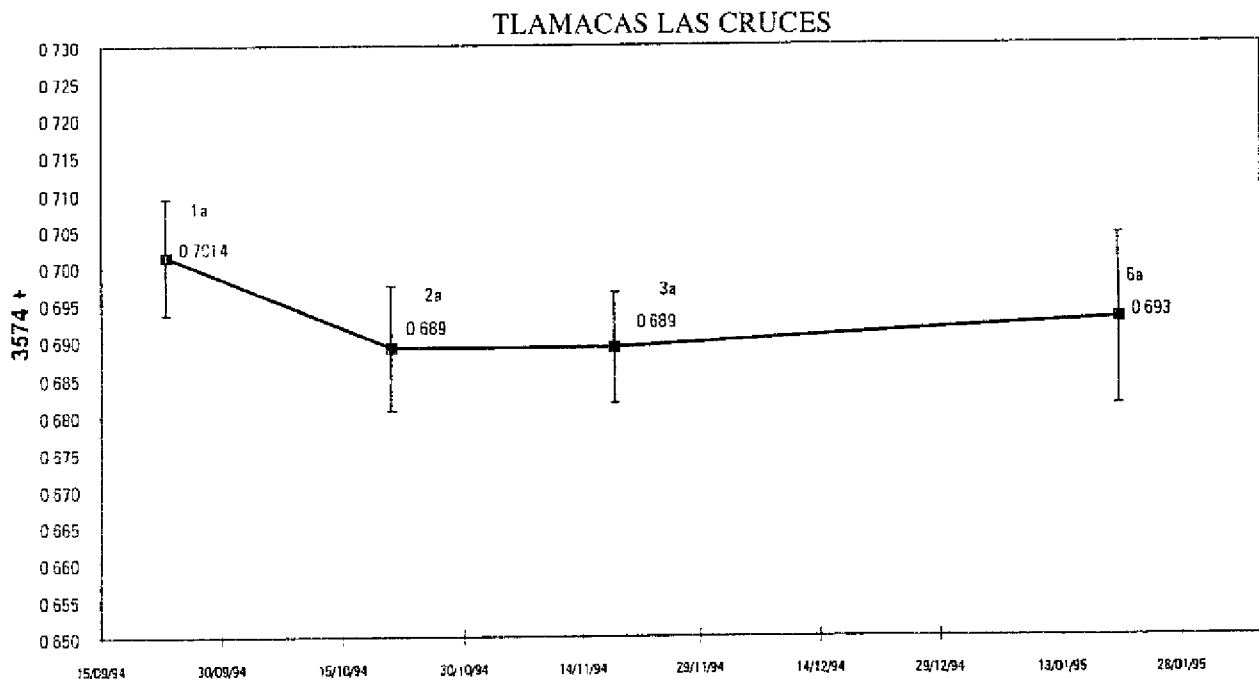


Figura 10

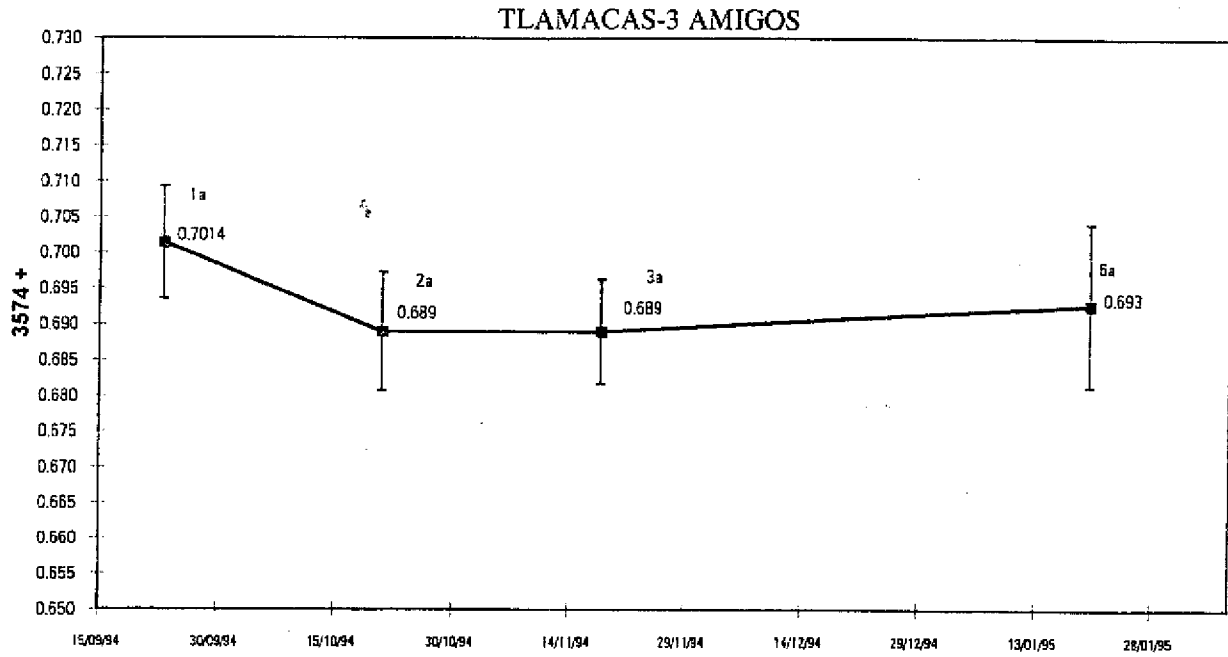


Figura 11

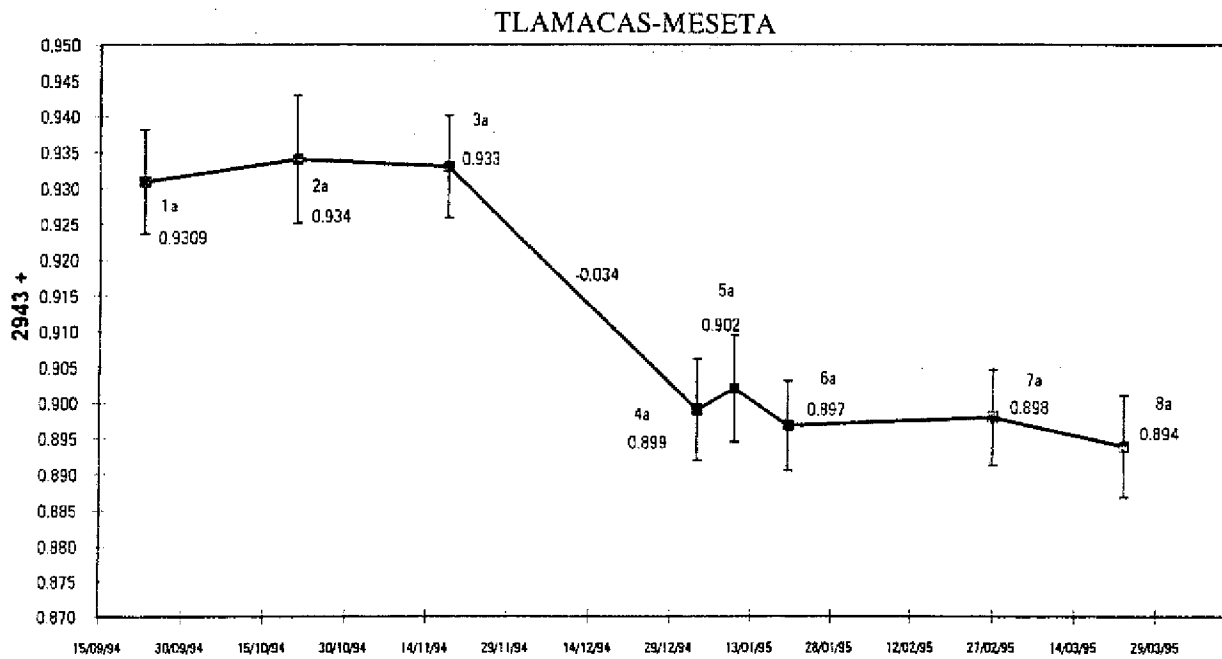


Figura 12

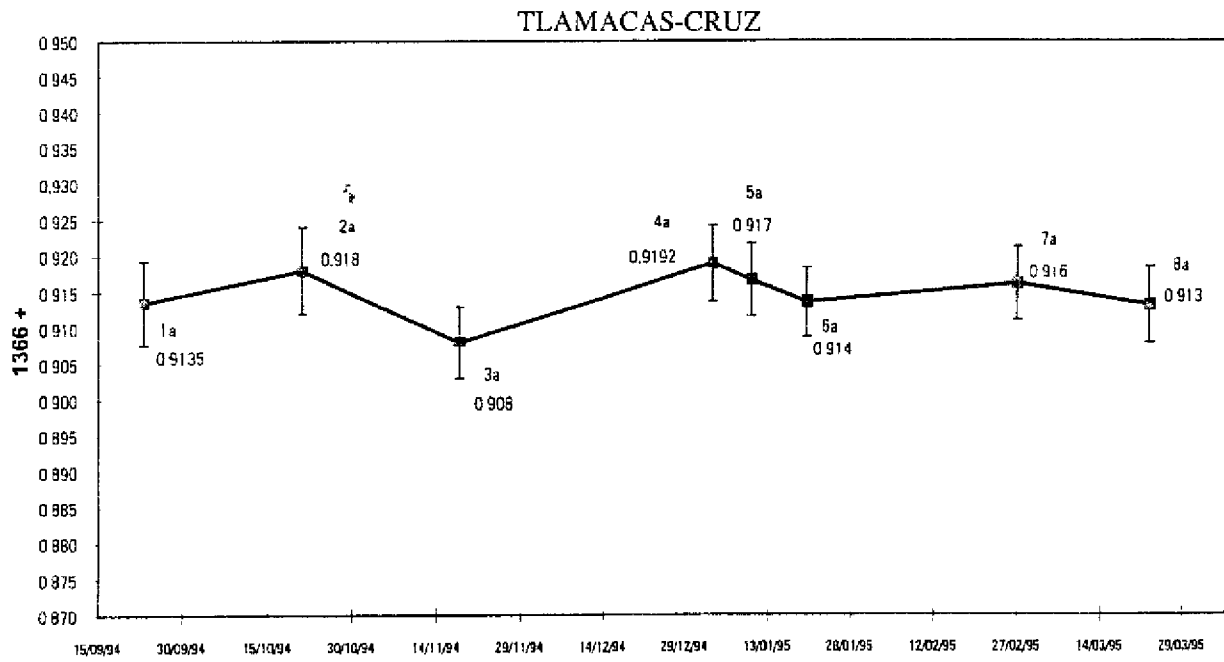


Figura 13

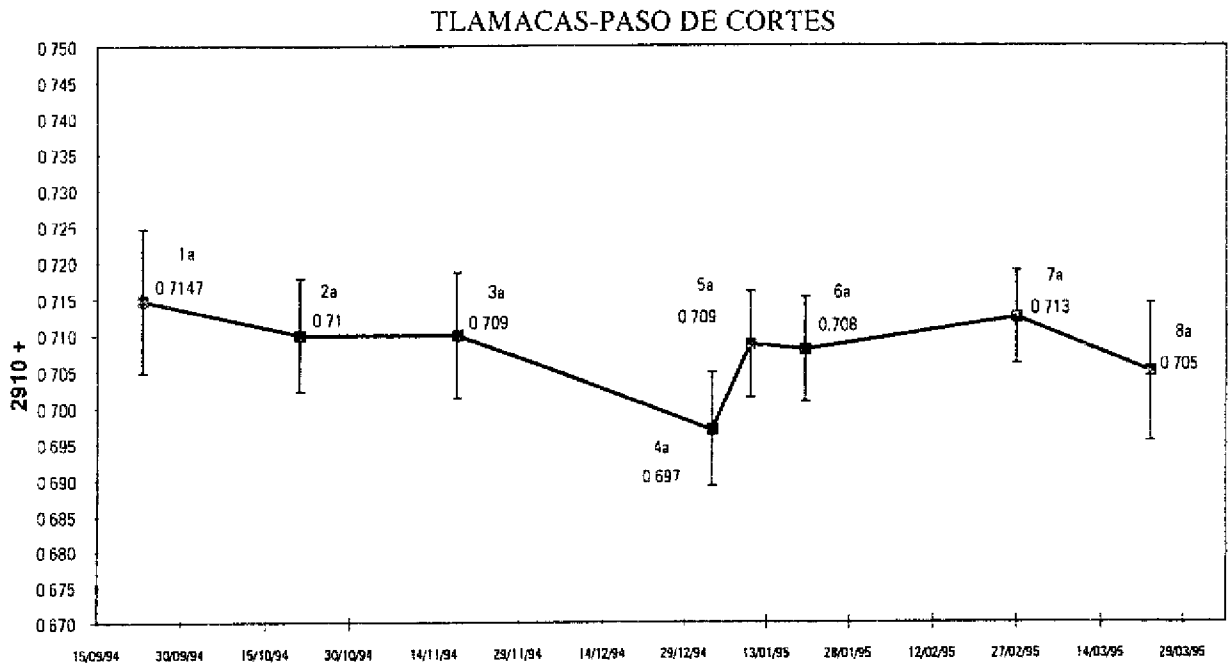


Figura 14

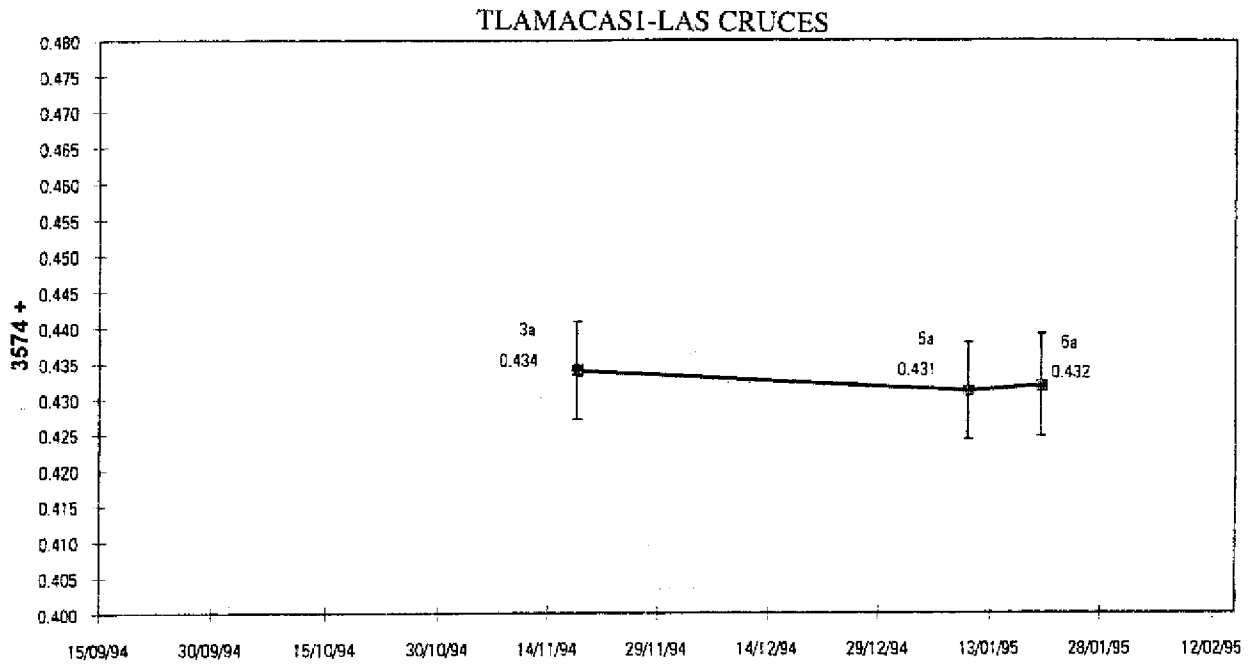


Figura 15

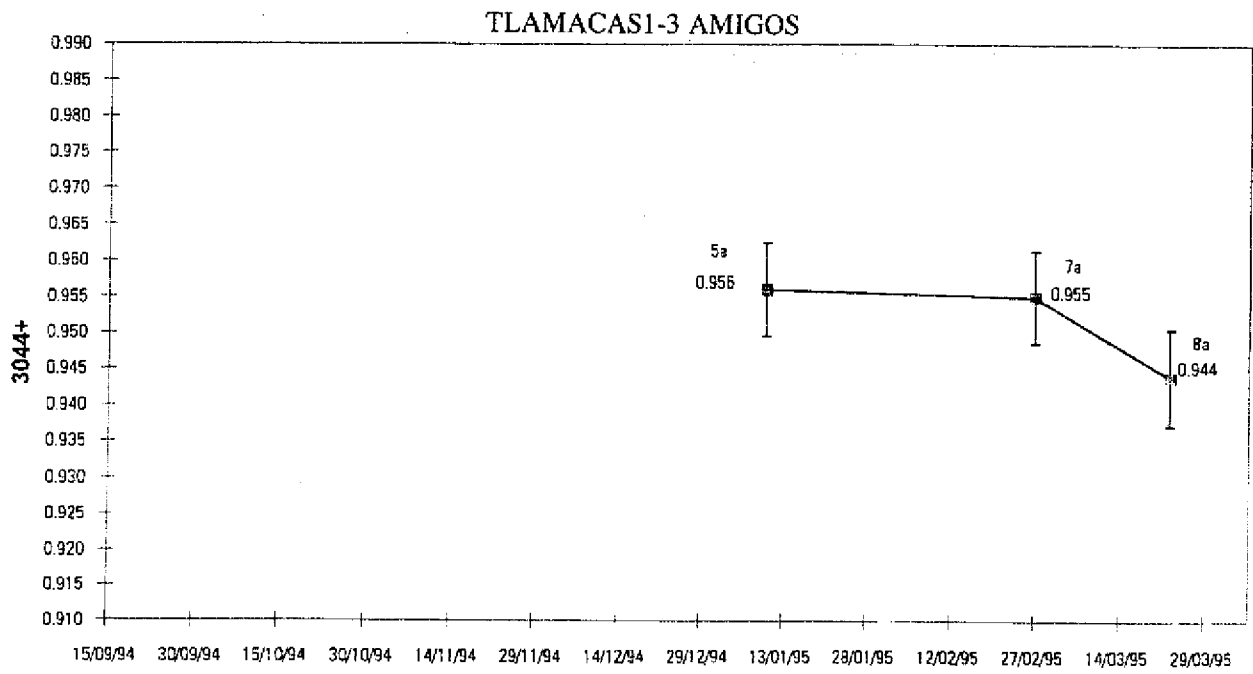


Figura 16

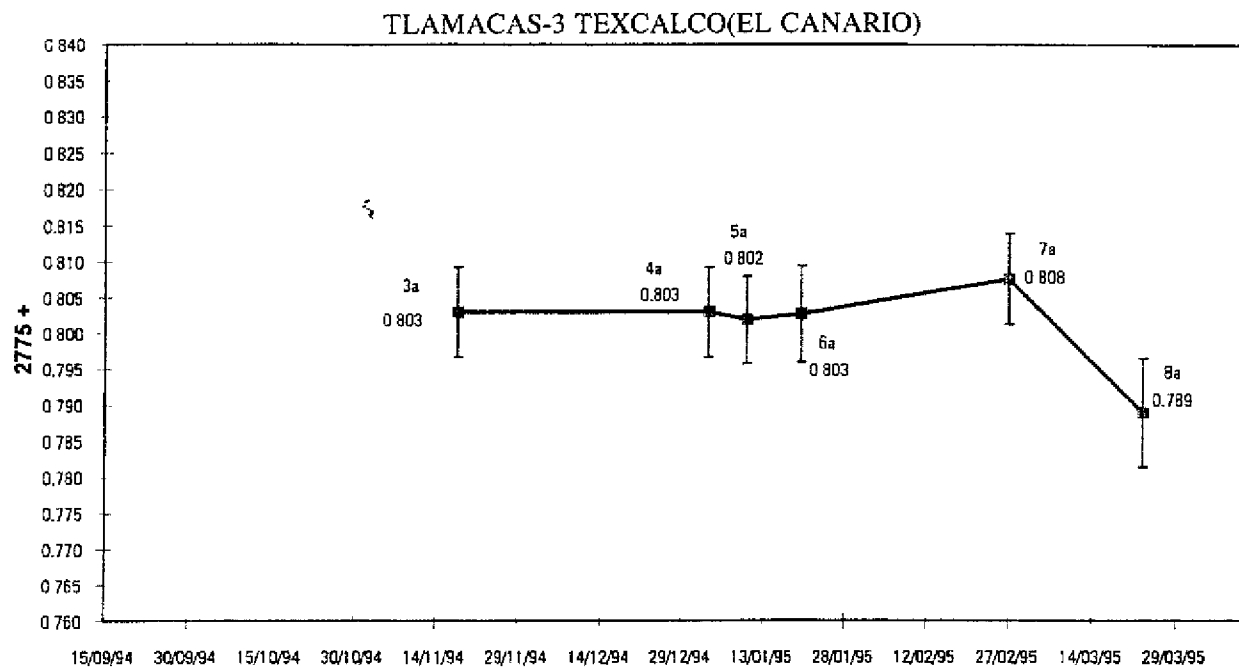


Figura 17

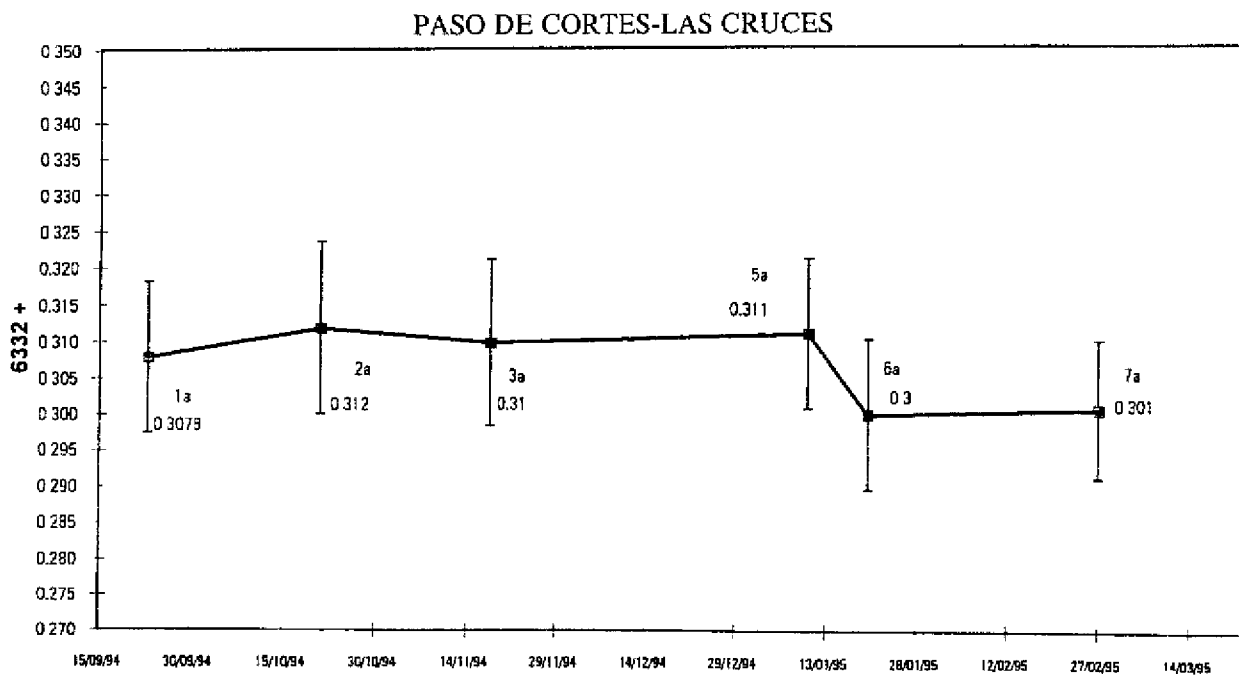


Figura 18

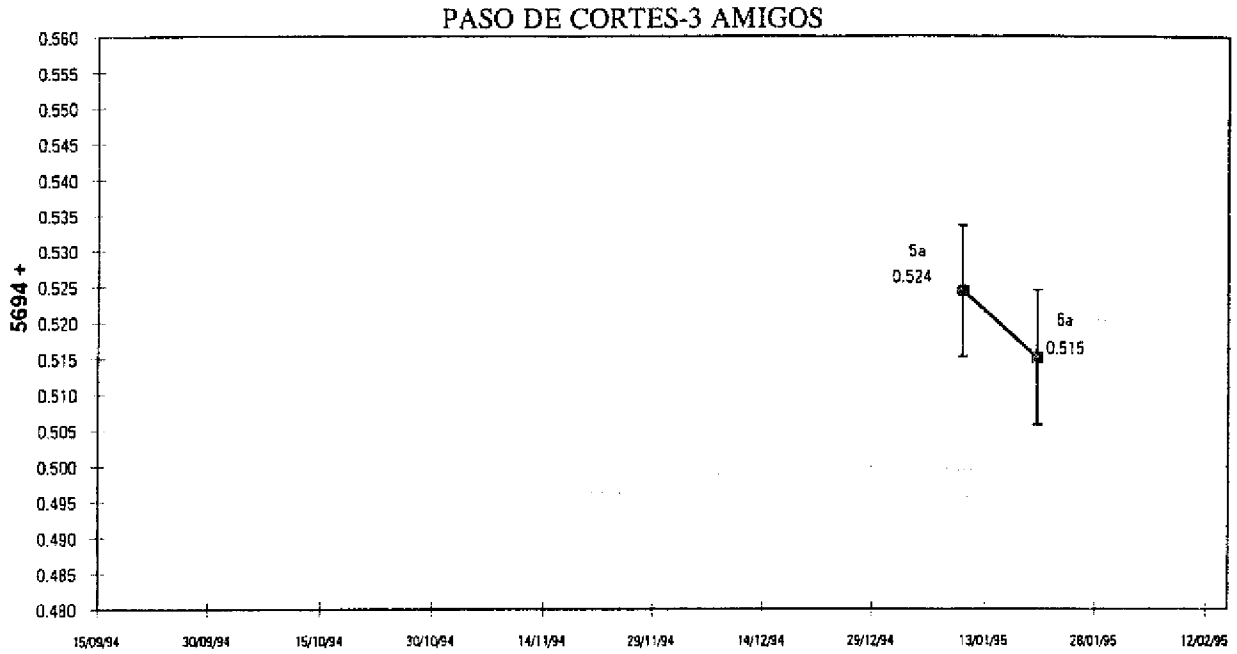


Figura 19

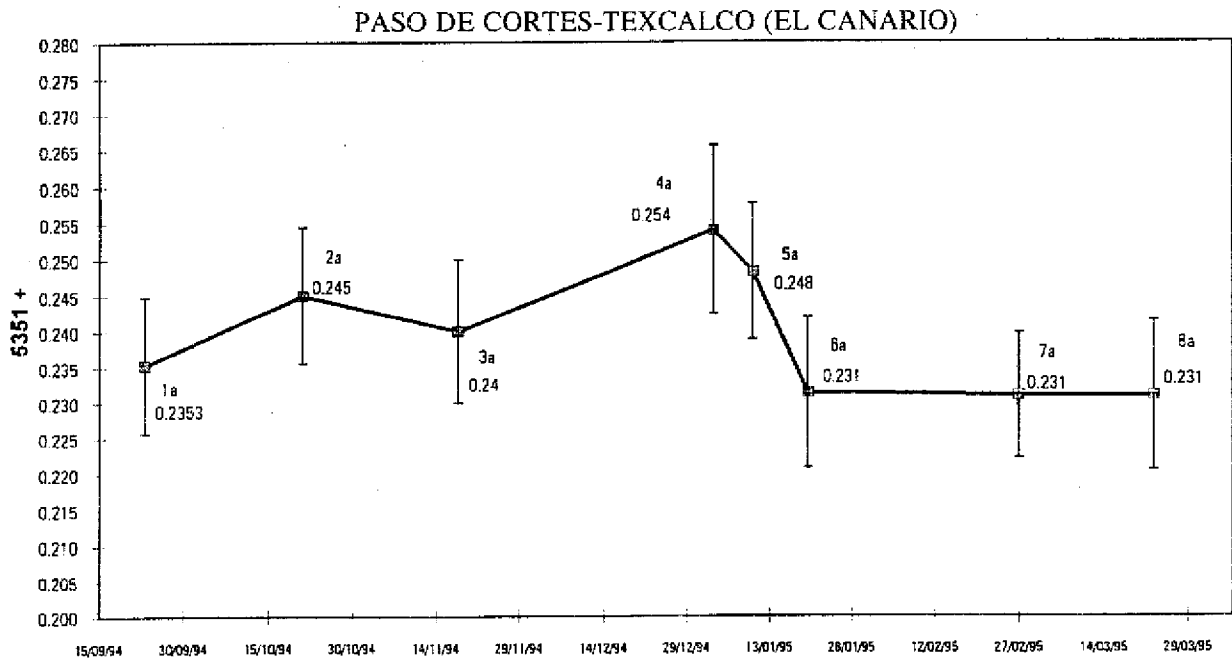


Figura 20

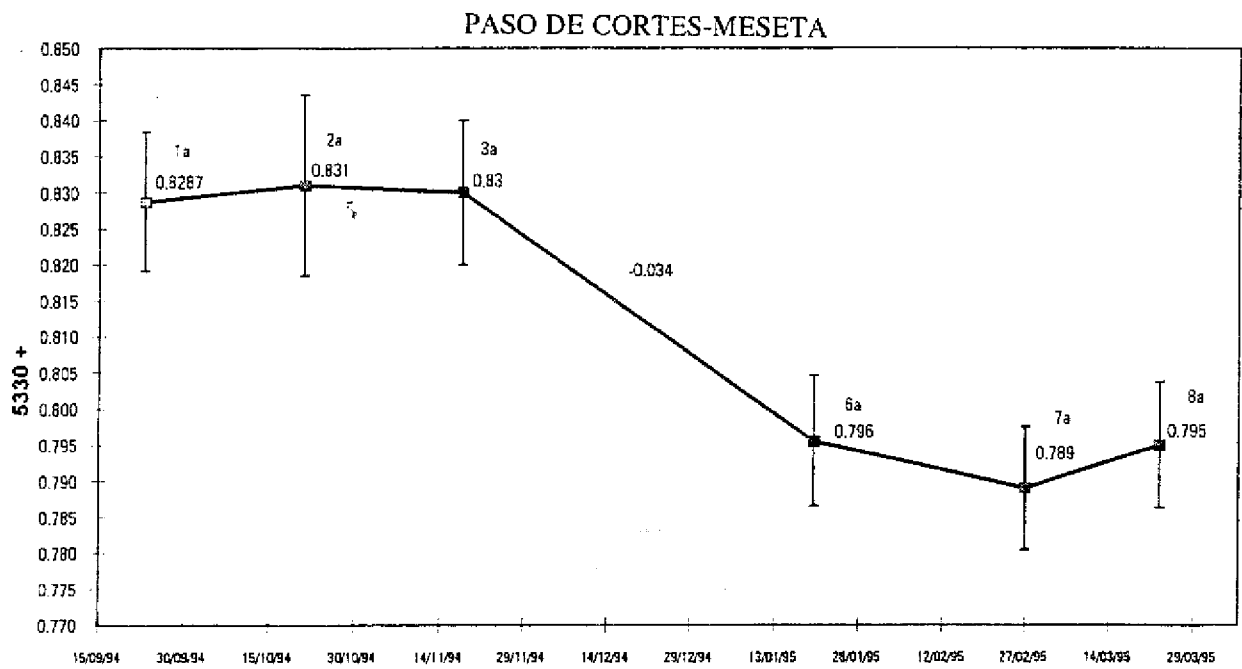


Figura 21

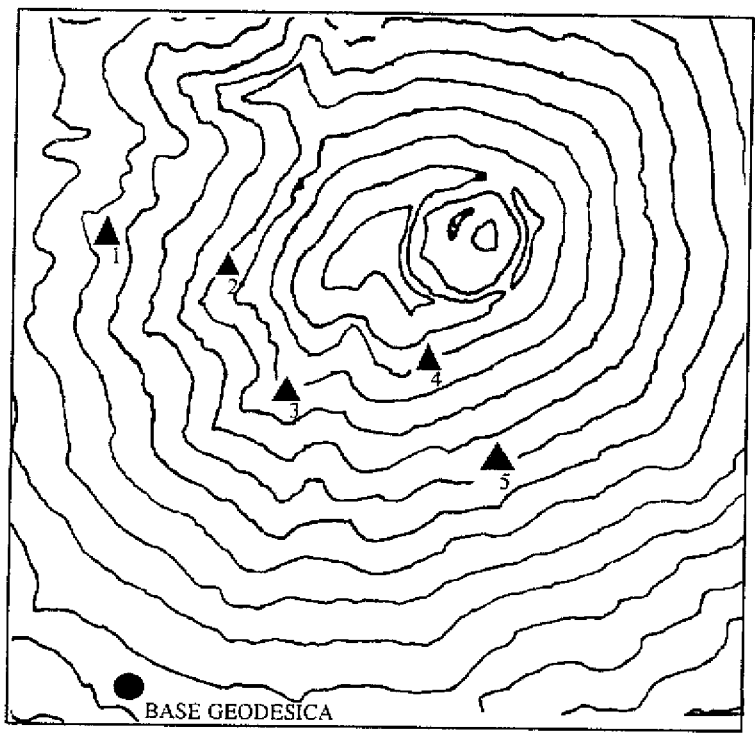


Figura 22

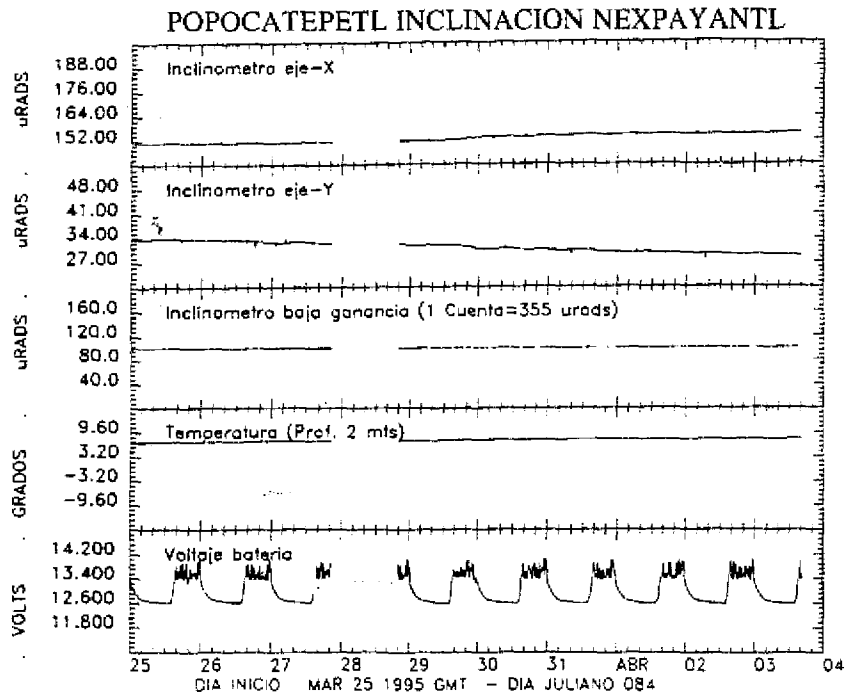


Figura 23 a

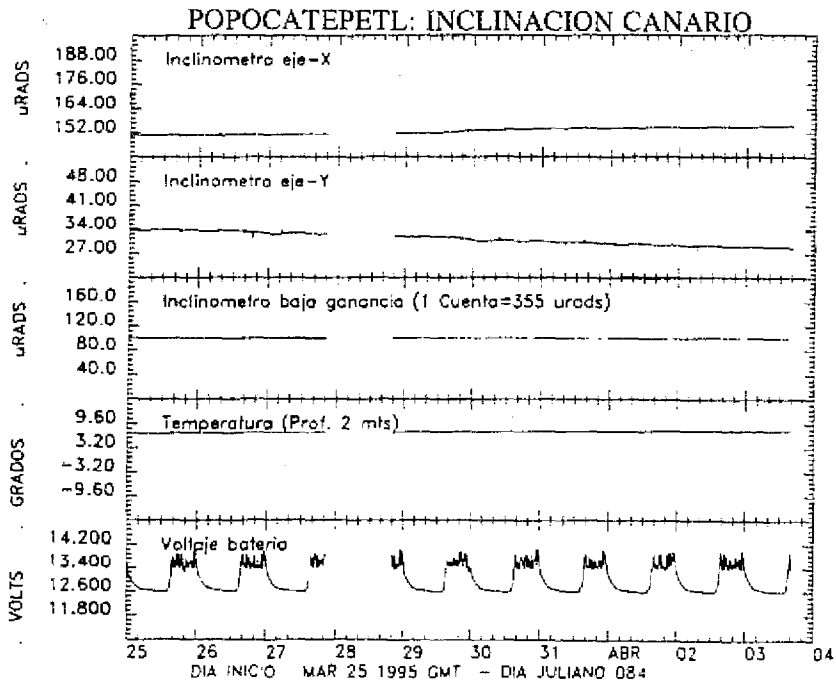


Figura 23 b

11. CONCLUSIONES

El análisis de los datos de deformación sugiere que la mayor parte de las variaciones observadas caen dentro de los límites de resolución de los instrumentos utilizados y por tanto no son significativas en términos de fuentes de presión internas al volcán. Una excepción es el cambio observado entre la 3a y 4a etapas en el vértice P correspondiente al sitio Meseta. Dos medidas independientes Tlamacas-Meseta y Paso de Cortés-Meseta confirman este desplazamiento en base a dos argumentos centrales:

- a) En ambos casos el desplazamiento observado está fuera de los límites de error de las mediciones.
- b) En ambos casos el desplazamiento observado presenta un carácter irreversible. Las lecturas hasta la 3a etapa son consistentemente mayores que las lecturas de la 4a etapa en adelante.

De todo esto puede concluirse que si existe una fuente de presión significativa para fines de la evaluación del riesgo (esto es, una cámara magmática con un volumen mayor de 0.5 km^3 y un exceso de presión de por lo menos 100 bar) dentro del volcán Popocatepetl.

1.- Si esta fuente se hubiera desplazado hacia la superficie, este desplazamiento no ha ocurrido durante el periodo septiembre 1994 - marzo 1995, o bien ha tenido lugar a profundidades mayores de 2.5 km bajo la cota de los 4000 m, esto es, a profundidades mayores de unos 4 km bajo la cumbre del volcán.

2.- El desplazamiento observado en la Meseta (situada sobre el borde de la barranca de Nexpayantla) es probablemente real y coincidente con los eventos de diciembre de 1994. Es posible que las actividades sísmica y freática desarrolladas en ese periodo hayan generado esfuerzos y desplazamientos sobre estructuras relativamente inestables, como podría ser la Meseta. Sin embargo, este desplazamiento no parece ser significativo desde la perspectiva de movimientos importantes de magma en el interior del volcán.

12. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer de manera especial al CENAPRED y en particular al grupo de Instrumentación: R. Quaas, E. Guevara, R. González, B. López y L. Gaytán, su apoyo en la obtención de muchos de los resultados reportados aquí. Así mismo, sin el apoyo de la UNAM, específicamente el Instituto de Geofísica y el Instituto y la Facultad de Ingeniería, hubiera sido imposible desarrollar este trabajo. La mayor parte del equipo utilizado en este estudio ha sido adquirido por el Instituto de Geofísica con financiamiento del CONACYT, a través del Proyecto No. 400323-5-1899-T9211 "Procesos Físicos en Volcanes Activos". (Responsable S. De la Cruz-Reyna). Algunas de las componentes del equipo (Prismas y distanciómetro Sokkisha) han sido donadas por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA). Los inclinómetros electrónicos han sido otorgados en préstamo por tiempo indeterminado al CENAPRED por el USGS. Espectales gracias también a Dan Dzurisin, John Ewart, Tom Murray, Robert Tilling y otros vulcanólogos del U.S. Geological Survey por sus valiosas discusiones, comentarios y sugerencias.

13. REFERENCIAS

- BARBERI, F., BLONG, R., DE LA CRUZ-REYNA, S., HALL, M., KAMO, K., MOTHES, P., NEWHALL, C., PETERSON, D., PUNONGBAYAN, R., SIGVALDASON, G., ZANA, D. (1990) Reducing volcanic disasters in the 1990's. *Bull. Volcanol. Soc. Japan.* 35: 80-95
- BOUDAL, C. AND ROBIN, C. (1989) Volcán Popocatepetl: Recent Eruptive History and Potential Hazards and Risks in Future Eruptions. En: *Volcanic Hazards, IAVCEI Proceedings in Volcanology 1.* J.H. Latter (Ed.). Springer-Verlag, Berlin, pp 110-128
- CAMACHO, H. (1925) Apuntes acerca de la actividad actual del Popocatepetl en relación con la sismología. *Anales del Instituto Geológico de México:* 38-60.
- DE LA CRUZ-REYNA, S., RAMOS, E. (1992) *Volcanes* Centro Nacional De Prevención de Desastres, Fascículo 4, Publicación del CENAPRED, 35 páginas.
- DZURISIN, D., ANDERSON, L. A., EATON, G. P., KOYANAGI, R. Y., LIPMAN, P. W., LOCKWOOD, J. P., OKAMURA, R. T., PUNIWAI, G. S., SAKO, M. K., YAMASHITA, K. M. (1980) Geophysical observations of Kilauea Volcano, Hawaii, 2. Constrains on the magma supply during november 1976-september 1977. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 7: 241-269
- ISHIHARA, K. (1990) Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano Sakurajima volcano. Japan. En: M.P. Ryan (editor), *Magma Transport and Storage.* J. Wiley and sons.
- MOGI, K. (1958) Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.* 36: 98-134,
- NOLASCO, H., DE LA CRUZ-REYNA, S., ESPINDOLA, V. H. (1993) Nivelación en el volcán de Fuego de Colima. primeras evaluaciones. *Rev. Ingeniería.* 63(1): 59-64
- NOLASCO, H., DE LA CRUZ-REYNA, S., ESPINDOLA, V. H., MENA, M., CORTEZ, A., NAVARRO, C. (1992) Reporte de la etapa de monumentación en el volcán de Colima con el fin de evaluar deformaciones de corteza terrestre. *Rev. Ingeniería.* 64(1/4): 43-60.
- ROBIN, C., BOUDAL, C. (1987) A gigantic Bezymianny-type event at the beginning of modern Volcán Popocatepetl. *J. Geophys. Geotherm. Res.* 31: 115-130
- SPP, DIRECCION GENERAL DE GEOGRAFIA. (1985) Normas Técnicas para Levantamientos Geodésicos. *Diario Oficial de la Federación* (1 de Abril, 1985), pp. 13-43.
- SUNDQUIST, U., TRYGGVASON, E. (1982) Deformation measurement in the Hengill Region, initial measurement in 1979. *Nordic Volcanological Institute*, 8204 University of Iceland, pp 2-10.
- TRYGGVASON, K. (1987) Myvatn lake level observations 1984-1986 and ground deformation during Krafla eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 31: 131-138.
- VAN DER LAAT, R. (1987) Primer curso regional sobre metodologías empleadas en vigilancia de actividad volcánica. apuntes sobre deformación volcánica UNESCO, *Obs. Vulcan. y Sismol. de Costa Rica.* 11 pp.

WAITZ, P. (1920) La nueva actividad y el estado actual del Volcán Popocatepetl". Mem. de la Soc. Científica Antonio Alzate. 37: 295-313

YOKOYAMA, I. (1971) A model for the crustal deformations around volcanoes ". Jour. Physics. Earth. 19(3). 199-207.

YOKOYAMA, I. (1974) Crustal deformations asociated with volcanic activities. Tectonophysics. 23: 349-360.

YOKOYAMA, I (1993) Vigilancia de volcanes activos En: La volcanología actual, J. Martí y V. Araña, Eds Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, pp 445-530.