

UNIVERSIDAD ALBERT EINSTEIN

DRA. H.C. ARQ. JUANA SALAZAR ALVARENGA DE PACHECO
RECTORA

ARQ. IVO OSEGUEDA JIMENEZ
SECRETARIO GENERAL

DR. H.C. ING. JOSE EDUARDO CASTILLO URRUTIA
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

MARZO DE 2005

ANTIGUO CUSCATLAN, LA LIBERTAD
EL SALVADOR, CENTROAMERICA

UNIVERSIDAD ALBERT EINSTEIN

MIEMBROS INTEGRANTES DEL JURADO EVALUADOR
DEL EXAMEN DEL GRADO, PREVIA OPCION AL TITULO DE

INGENIERO CIVIL

Ing. Carlos Demetrio Escobar
DIRECTOR ASESOR
IC-1929

Geólogo Carlos Aguilar
JURADO EVALUADOR

Geólogo Walter Hernández
JURADO EVALUADOR

Julio Antonio Espinoza

MARZO 2005
ANTIGUO CUSCATLAN, LALIBERTAD EL SALVADOR.

INDICE

	PAGINA
INTRODUCCIÓN	i
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	1
1.2 DIAGNOSTICO DE LA SITUACION ACTUAL	6
1.3 DELIMITACIONES	7
1.3.1 DELIMITACIÓN GEOGRAFICA ESPACIAL	7
1.3.2 DELIMITACIÓN SECTORIAL	9
1.3.3 DELIMITACIÓN TEMPORAL	9
1.3.4 DELIMITACIÓN ESPECÍFICA	9
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	10
1.5 OBJETIVOS DEL PROYECTO	12
1.5.1 OBJETIVO GENERAL	12
1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	12
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	13
2.1 MARCO TEÓRICO	13
2.1.1 FACTORES PRECURSORES DE CAMBIO EN LAS LADERAS DE LOS VOLCANES	15
2.1.2 ANTECEDENTES HISTORICOS DE DEFORMACIONES EN VOLCANES	16
2.1.3 FUNDAMENTOS DEL MONITOREO DE DEFORMACIONES VOLCANICAS	25
2.1.4 TÉCNICAS USADAS EN EL CAMPO	28
2.1.5 TÉCNICA USADA EN EL VOLCÁN DE SAN SALVADOR	33
2.7 GLOSARIO TECNICO	35

CAPÍTULO III

PROYECTO DE INVESTIGACION	38
3.0 ANALISIS DE METODOLOGIAS PARA MEDICION DE DEFORMACIONES	38
3.1 ANALISIS DE METODOLOGIA UTILIZADA POR EL SNET	39
3.2 ANALISIS DE OTRAS METODOLOGIAS	45

CAPÍTULO IV

PLANES PILOTO Y PLANTEAMIENTO DE PROPUESTA DE SOLUCION	52
4.1 PLAN PILOTO Nº 1	52
4.2 PLAN PILOTO Nº 2	78
4.3 PROPUESTA DE METODOLOGIA A USAR	101

CAPITULO V

GUIA DE PROCEDIMIENTOS PARA REALIZACION DE LAS MEDICIONES	108
5.1 CENTRADO DE APARATO	108
5.2 NIVELADO DE APARATO	109
5.3 ENCENDIDO DEL APARATO	111
5.4 CONFIGURACION DEL INSTRUMENTO	113
5.5 UTILIZACION DEL PROGRAMA DE COORDENADAS	115
5.6 MEDICION DE COORDENADAS TRIDIMENCINALES	118
HOJA DE CÁLCULO	119
CONCLUSIONES	120
RECOMENDACIONES	121
BIBLIOGRAFÍA	122

CAPÍTULO I

1.0 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes del Problema

Con el fin de complementar los datos obtenidos por técnicas de monitoreo como: el sísmico, geoquímico y el visual, ya desarrolladas parcialmente en los principales volcanes activos de El Salvador, el área de vulcanología del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), consideró necesario iniciar en Junio del año 2002, la vigilancia sistemática de las posibles deformaciones del volcán de San Salvador, específicamente en el área de emisión de lava de la última erupción en 1917 por el flanco noroeste, ya que presentaba condiciones adecuadas para este tipo de monitoreo.

La medición de deformaciones, forma parte del proyecto “Mitigación de los efectos multiamenazas en zonas de riesgo del volcán de San Salvador” (SNET, 2002). El proyecto de medir deformaciones en este volcán se ejecuto en dos fases por (SNET).

Aun con limitantes como la falta de experiencia en este tema y pocos recursos humanos e instrumentales, en la primera fase se trabajo en lo relativo a la definición de una técnica para trabajar deformaciones en el volcán y en la segunda se procedió a la instalación de la instrumentación necesaria y a la toma de datos para la puesta a punto de la técnica.

La metodología utilizada en esta primera prueba fue una nivelación altimétrica, para lo cual se usó una estación total y miras móviles para la colocación de prismas. Las miras con los prismas se instalan en bancos de marca construidos en el lugar (foto 1), estos son de concreto simple y su base fue nivelada para obtener mejores resultados. El número de bancos de marca construidos fue de nueve.



Fotografía 1. Banco de marca construido para la red de monitoreo Geodésico.

La zona de estudio tiene un área superficial de 4.14 Hectáreas es decir $5.0Mz + 9,235.12v^2$ y atraviesa la fractura de la erupción de 1917. (Figura 1).

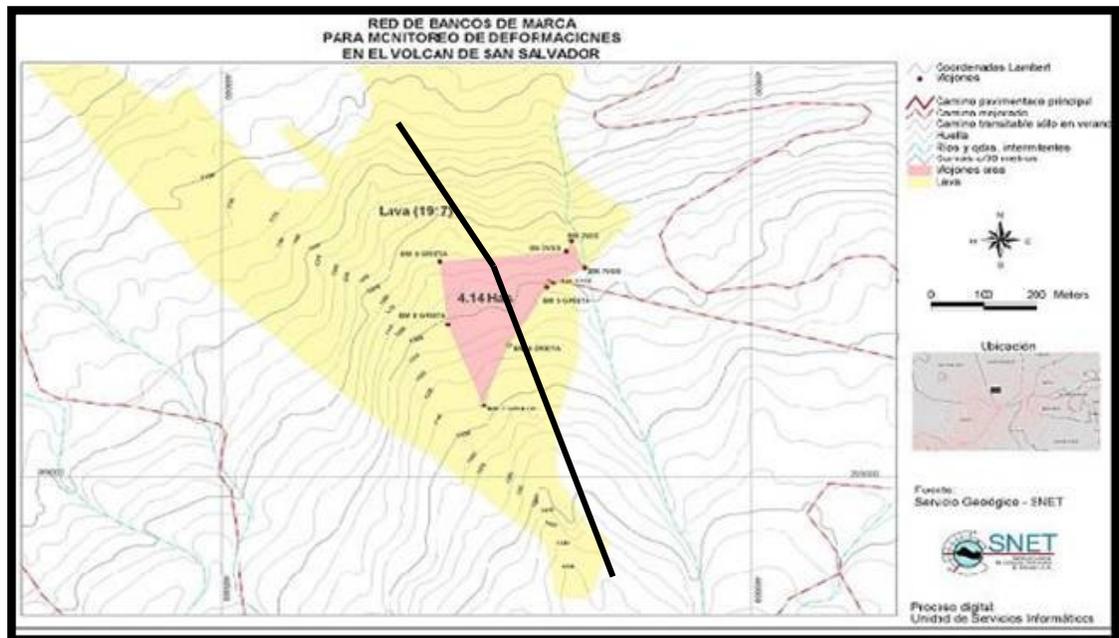


Figura 1. Plano de la red preliminar de Bancos de Marca, ubicada en el flanco Norte del Volcán de San Salvador, SNET, 2002

La metodología antes mencionada ha sido utilizada por los técnicos del SNET proporcionando datos poco precisos de elevación entre los bancos de marca, tal como se muestra en las Tablas 1 y 2.

ESTACION (TRANSITO)	Hi (TRANSITO)	BM	ANGULO	DISTANCI A HORIZON TAL (M)	DISTANCIA VERTICAL (M)	PRISMA (M)	ELEVACION (msnm)
Transito1		1					1,260.000
		2	312° 41' 10"	50.854	5.942	1.756	1,265.616
	HI1(media)						1,261.430
Transito 2		2					
		1	359° 57' 20"	50.807	-5.197	1.756	
		3	99° 13' 00"	29.063	8.128	1.756	1,273.321
	HI2 (media)						1,266.949
Transito 3		3					
		2	00° 07' 38"	29.018	-7.549	1.756	
		4	154° 50' 21"	71.574	16.820	2.752	1,288.884
	HI3 (media)						1,274.917
Transito 4		4					
		3	00° 00' 09"	71.592	-14.429	2.752	
		5	215° 42' 57"	11.243	4.593	4.725	1,290.371
	HI4 (media)						1,290.503
Transito 5		5					
		4	359° 59' 26"	11.266	0.776	3.723	
		6	156° 40' 03"	141.562	21.407	1.756	1,311.585
		9	230° 09' 04"	210.671	-33.783	2.752	1,255.399
	HI5 (media)						1,291.934
Transito 6		6					
		9	00° 00' 00"	217.728	-52.878	4.725	1,255.395
		5	67° 58' 51"	141.675	-20.890	1.756	
		7	236° 54' 38"	137.285	13.538	1.756	1,324.780
		8	328° 10' 11"	120.291	-25.855	1.756	1,285.387
	HI6 (media)						1,312.998

Tabla 1. Datos obtenidos en la Medición realizada el 02/07/02, SNET 2002.

ESTACION (TRANSITO)	Hi (TRANSITO)	BM	ANGULO	DISTANCIA HORIZONTAL (M)	DISTANCIA VERTICAL (M)	PRISMA (M)	ELEVACION (msnm)
Transito1		1					1,260.000
		2	309° 44' 31"	50.970	6.841	2.752	1,265.519
	HI1(media)						1,261.430
Transito 2		2					
		1	275° 38' 55"	50.916	-5.353	1.756	
		3	14° 58' 57"	29.074	8.972	1.756	1,274.165
	HI2 (media)						1,266.949
Transito 3		3					
		2	257° 31' 45"	29.020	-7.427	1.756	
		4	52° 20' 07"	71.551	16.921	2.752	1,289.086
	HI3 (media)						1,274.917
Transito 4		4					
		3	237° 22' 04"	71.598	-15.279	1.756	
		5	93° 28' 57"	11.268	3.740	3.723	1,290.520
	HI4 (media)						1,290.503
Transito 5		5					
		4	323° 05' 34"	11.452	0.939	3.723	
		6	119° 38' 50"	141.428	22.534	2.752	1,311.716
	HI5 (media)						1,291.934
Transito 6		6					
		9	230° 29' 38"	217.950	-52.891	4.725	1,255.382
		5	298° 30' 55"	141.680	-20.890	1.756	
		7	107° 27' 21"	137.257	13.600	1.756	1,324.842
		8	198° 41' 47"	120.312	-25.857	1.756	1,285.385
	HI6 (media)						1,312.998

Tabla 2. Datos obtenidos en la Medición realizada el 12/12/02, SNET, 2002.

Los datos topográficos mostrados son: rumbos y distancias de cada una de las líneas que conforman la poligonal, así como la elevación de cada uno de los bancos de marca o vértices de la poligonal.

El procedimiento para obtener esta información consiste en salir de un punto con un azimut asumido y de allí comenzar con la medición a través del método de la doble deflexión es decir que en cada cambio de rumbo de la poligonal se hace una vuelta de campana del telescopio para obtener el rumbo de la nueva línea.

Este método para fines de nivelación altimétrica de puntos es el de mayor aceptación en topografía, pero para fines de medición de deformaciones en laderas de volcanes no es práctico debido al consumo de tiempo que requiere realizar cada medición y a que los datos no son constantes en sus valores.

Por ejemplo, las diferencias de nivel (ΔY) reportadas entre los bancos de marca (ver tablas anteriores, en azul) en dos mediciones de campo realizadas en un mismo año, resultan diferencias de elevación entre 0.20 a 0.95 centímetros.

Entre las posibles causas de este error se menciona que el método requiere de muchas actividades manuales tales como: cambio de alturas de los prismas, cambios de posición y elevación de la estación y gran número de anotaciones durante el transcurso del levantamiento altimétrico, lo que influye en la falta de precisión que se señala.

Desde esta perspectiva se abordará el tema para mejorar y automatizar la técnica de análisis de deformaciones que utiliza el SNET actualmente, a través de utilizar al máximo la capacidad del equipo con que ellos cuentan, con el objetivo de minimizar errores disminuyendo los cálculos manuales y analizar un cambio en la ubicación de la red de monitoreo, con el propósito de salirse del área de la fractura del volcán y así evitar que un cambio en la elevación del suelo afecte a toda la red. Además de hacer más eficiente la técnica utilizando los mismos recursos.

1.2 DIAGNOSTICO DE LA SITUACION ACTUAL

El método de nivelación altimétrica explicado anteriormente y que ha sido utilizado por los técnicos del SNET en el volcán de San Salvador adolece de problemas técnicos los cuales se describen a continuación:

1. Problemas de precisión: Los datos proporcionados hasta el momento tienen grandes márgenes de error.
2. Problemas de ubicación: Debido a encontrarse dentro de la zona de influencia del volcán esta técnica no podría determinar con exactitud un cambio en la elevación del suelo.
3. Uso de instrumentos: Los instrumentos con que se cuentan actualmente están siendo subutilizados.
4. Técnica poco práctica: La realización de cada medición requiere de un procedimiento largo, complicado y propenso a errores manuales.

Por lo anterior, el área de vulcanología del SNET tiene interés en mejorar esta técnica con el fin de poder desarrollarla e implementarla en los programas de monitoreo volcánico, con énfasis en el volcán de San Salvador y otros volcanes activos del país como San Miguel, Izalco, Ilopango y Santa Ana, etc.

1.3 DELIMITACIONES

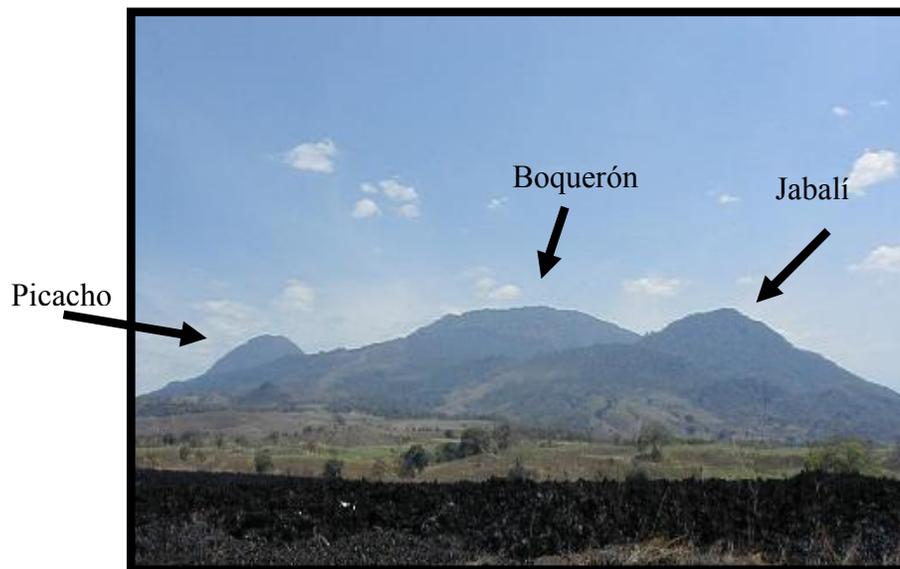
1.3.1 DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA ESPACIAL

En el flanco noroeste del volcán de San Salvador se realizaron las pruebas piloto necesarias para conocer la calidad de la propuesta y obtener experiencias de campo. Esta área se encontró a través de la selección e interpretación de mapas geológicos, topográficos y fotografía aéreas de la zona y sus antecedentes sísmicos y eruptivos.

Este análisis combinado con la información geológica ha permitido identificar áreas con debilidad estructural (fallas y fracturas) en los flancos del volcán, a través de los cuales ha tenido lugar actividad eruptiva magmática.

Finalmente, el área de emisión del flujo de lava de 1917 (posible abertura de hasta 12 bocas eruptivas¹), en el sector noroeste del volcán de San Salvador (Foto 2) se selecciono como el área de estudio, ya que constituye un área con antecedentes eruptivos y debilidad estructural del volcán. El criterio principal para esta elección fue que a través de esta fisura, se ha emitido lava, y ha existido actividad sísmica en el pasado, (Figura 2). Se concluye, por tanto, que ante una futura intrusión magmática este flanco es el más susceptible a sufrir deformaciones. Además el sitio cuenta con buena visibilidad durante todo el año y una calle de acceso para realizar las tareas de monitoreo y mantenimiento.

¹ “Los Volcanes Activos de Guatemala y El Salvador (América Central)”, Boletín N° 3, Helmut Meyer Abich, Pag. 71, Diciembre 1956.



Fotografía 2. Vista del flanco Noroeste del volcán de San Salvador, SNET, 2002.

Las coordenadas geodésicas de la zona de estudio del volcán en el sistema UTM son Latitud: N 13° 45' 42.5" y Longitud W 89° 17' 31.5" y su elevación oscila entre los 1260 y los 1315 metros sobre el nivel del mar.

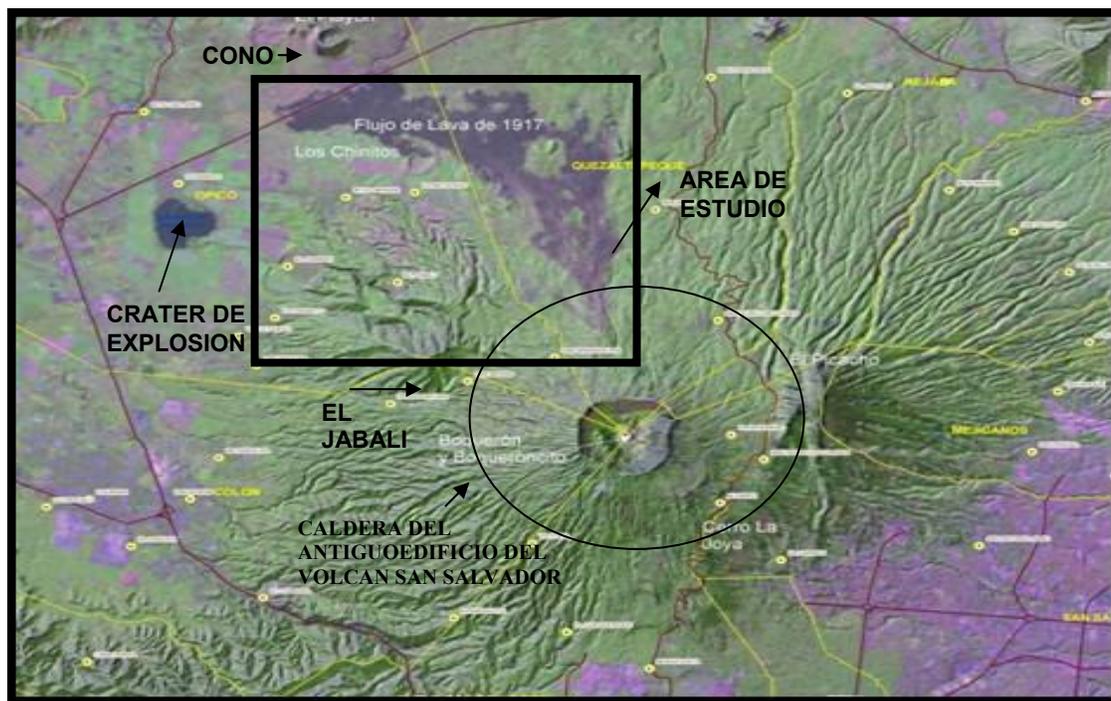


Figura 2. Cráteres, fracturas y conos adventicios del volcán San Salvador, SNET, 2004.

1.3.2 DELIMITACIÓN SECTORIAL

La realización de este proyecto beneficiara a instituciones como el SNET, universidades y al país, y por ende a la población del área metropolitana de San Salvador, debido a que los datos aportados por este monitoreo, junto a los obtenidos por otras técnicas de vigilancia volcánica implementadas, permitirán consolidar la base de datos sobre monitoreo volcánico y establecer una línea base de comportamiento global del volcán de San Salvador; lográndose obtener la información necesaria para dar alertas tempranas a la población en caso de actividad anómala en el edificio volcánico.

1.3.3 DELIMITACIÓN TEMPORAL

Este estudio se realizo en 10 meses a partir de febrero de 2004, finalizando en Diciembre del mismo año. El detalle de las actividades se describe en el cronograma anexo al presente documento.

1.3.4 DELIMITACIÓN ESPECÍFICA

En el presente estudio consistió en la evaluación y comparación de la metodología para de análisis de deformaciones que había iniciado el SNET y los resultados obtenidos con el método antes mencionado, además de hacer un análisis cualitativo de los equipos e instrumentos con que cuenta la institución.

También se investigará con profundidad acerca de otras técnicas utilizadas con éxito en otros países que cuentan con áreas volcánicas activas como Costa Rica, Japón, Estados Unidos, Filipinas, etc.

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

Este proyecto propone la implementación de una técnica que permita determinar cambios en la superficie de las laderas de los volcanes, de una forma integral, continua y sistemática proporcionando una herramienta más para el “Programa de vigilancia volcánica” del país; ampliando y mejorando los parámetros de análisis de las estructuras volcánicas en estudio.

Los estudios de deformación consisten en aplicar técnicas topográficas de altimetría y planimetría, que pueden ser análogas o digitales, y que permitan identificar cambios o variaciones en la superficie del suelo asociados a presión magmática. Los datos resultantes aplicados y analizados adecuadamente pueden proveer información sobre el tamaño y posible carácter de la erupción.

En El Salvador se ha hecho un intento por aplicar un método topográfico para determinar deformaciones de forma preliminar, pero no existen estudios de investigación acerca del tema, que sirvan de guía para el desarrollo de esta técnica, por lo que un trabajo acerca de este tema, aporta una propuesta para ampliar el monitoreo volcánico, a través de una metodología adaptada a la realidad del país que cumpla con los requerimientos materiales, técnicos y económicos con que se cuentan.

La razón que llevo a desarrollar una investigación acerca de este tema fue ampliar y colaborar en la investigación de los volcanes activos del país y así mejorar el grado de vigilancia y alerta temprana en caso de entrar en un período de actividad crítica. También se sentaría un precedente para el desarrollo de futuros trabajos de graduación que sirvan de apoyo a instituciones que se dediquen al estudio e investigación de los volcanes y áreas afines.

Los resultados que obtenidos con esta investigación, en cuanto a precisión de los datos, tiempos de instalación, uso del equipo y factibilidad de desarrollarla como parte del programa de vigilancia volcánica, permitirán conocer si la técnica para el monitoreo de deformaciones propuesto se puede aplicar a todos los volcanes activos de El Salvador o si sólo es para aquellos que presenten ciertas condiciones especiales, que permitan la instalación de redes de banco de marca y puntos de observación tal y como se realicen en las pruebas pilotos.

1.5 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una metodología que sea útil y práctica, para implementar la técnica de medición de deformaciones en laderas volcánicas como parte del programa de vigilancia volcánica, que realiza el SNET.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.** Crear una metodología para el análisis de deformaciones en las laderas de los principales volcanes activos de El Salvador.
- 2.** Ejecutar planes piloto que permitan obtener experiencia de campo y validar la metodología propuesta como resultado de la investigación acerca de las técnicas de medición de deformaciones.
- 3.** Desarrollar un procedimiento general para la identificación de sitios, instalación de bancos de marca e instrumentación de los mismos.

CAPÍTULO II

2.0 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1 MARCO TEÓRICO

Debido a que el país forma parte de una de las zonas más activas del mundo en cuanto a terremotos y erupciones volcánicas; contando además con un registro importante de catástrofes naturales ocurridas en tiempo histórico. Se hace necesario el desarrollo de investigaciones que ayuden en el conocimiento de las causas que provocan estos fenómenos.

Para el caso de los volcanes activos como el de San Salvador, San Miguel e Izalco es de gran importancia conocer cual es su comportamiento en períodos de reposo, ya que de esta manera se podrá determinar, si un cambio en alguno de los parámetros de estudio (temperatura de fumarolas, composición de gases volcánicos, sismicidad, cambios visuales o cambios en la inclinación o forma de las laderas), representa evidencia real y confiable de una posible reactivación y así poder dar información oportuna a la población apoyada con elementos técnicos y científicos.

Por lo tanto, es importante reconocer que la combinación integrada de las diversas técnicas de monitoreo constituye la mejor herramienta de vigilancia y predicción. En otras palabras una o varias de estas técnicas, en forma aislada solo aportan elementos, pero no es predictiva por si misma.

Una mejor vigilancia volcánica a través de la aplicación de técnicas de monitoreo (Tabla 3) es esencial en países como El Salvador, en donde muchas de sus poblaciones se encuentran alrededor de estas estructuras.

Técnicas de monitoreo en los principales volcanes activos de El Salvador realizadas por el SNET y la Universidad de El Salvador

Tabla 3. Programa permanente de vigilancia volcánica, Área de vulcanología del SNET. 2002

Monitoreo		Santa Ana	San Salvador	San Miguel	Izalco	San Vicente	Ilopango
Sísmico							
Geoquímico de gases (UES)	CO ₂						
	Radón						
Hidrogeoquímico							
Temperatura fumarolas							
Deformación							
Visual	Geomorfológico						
	Foto						
	Observadores locales						

Como se observa en la tabla anterior, la medición de deformaciones es la técnica menos desarrollada en el país, aunque los resultados de esta complementan de manera importante las otras técnicas de monitoreo presentadas.

Para el caso del volcán de San Salvador es al único al que se le realiza el monitoreo de deformaciones a través de la aplicación de un método topográfico para determinar cambios en la superficie de las laderas del mismo, pero de forma preliminar y el Área de Vulcanología del Servicio Nacional de Estudio Territoriales (SNET) tiene interés en desarrollar el estudio de las deformaciones, mejorando la técnica utilizada actualmente y ampliando el conocimiento sobre ella.

2.1.1 FACTORES PRECURSORES DE CAMBIOS EN LAS LADERAS DE LOS VOLCANES ACTIVOS

La deformación en los volcanes o dicho de otra manera los cambios morfológicos que se dan en la superficie de las laderas de los volcanes activos, se conocen como deformación del suelo volcánico. Estos cambios son a veces visibles a través de una simple inspección, pero algunas veces se dan de una manera tan sutil, que la única forma de determinar un cambio es a través de la implementación de una técnica de medición de deformaciones en la superficie. El hecho de que estos cambios puedan variar en magnitud se debe a factores internos o externos que influyen en los mismos y son llamados factores precursores de deformación, entre los cuales se mencionan:

1. Inflación o Deflación de la cámara magmática que alimenta al volcán.
2. Inyección de un dike² o sill³ el cual puede o no ser a través del conducto principal de erupción.
3. Hundimiento del suelo debido al peso de la lava, ajuste gravimétrico o a una expansión de todo el edificio volcánico.
4. Movimiento de la ladera del volcán causado por una pérdida de cohesión entre capas de diferente material o por variaciones en la presión del magma.

La combinación de estas causas frecuentemente ocurre para producir un patrón complejo de deformación. Y es aquí donde una técnica de análisis de deformación es imprescindible para determinar cual ha sido el cambio producido por estos factores y cuales son las posibles consecuencias.

² Ver definición en Glosario técnico

³ Ídem

2.1.2 ANTECEDENTES HISTORICOS DE DEFORMACIONES EN VOLCANES

El monitoreo de deformaciones es una técnica con más de 100 años de existencia, la cual a través del tiempo a mejorado su precisión y forma de realizarla debido tanto a los avances en agrimensura y geodesia como a la aparición de nuevos y mejores equipos. En la historia de la vulcanología se han dado mucho casos en los que el monitoreo de deformaciones a dado resultados muy buenos prediciendo cambios debidos a intrusión magmática o a hundimientos de estructuras volcánicas con mucha precisión.

Entre los casos históricos de deformación volcánica se conocen:

a) Volcán Sakurajima (Japón, 1914)

El volcán Sakurajima se encuentra ubicado al sur del Japón, su actividad desde 1972 ha sido intensa e ininterrumpida, pero con anterioridad se le conocen erupciones históricas en 1468-78, 1779-81, 1914 y 1946. Destacando de estas la erupción de Enero de 1914, donde grandes coladas de lava unieron Sakurajima, que hasta entonces era una isla, con la península de Ohsumi.

Después de esta gran erupción los bancos de marca que habían sido colocados alrededor del volcán en 1895, como parte del programa geodésico a nivel nacional en el Japón, fueron replanteados en junio de 1914.

Los resultados demostraron que, existía un área circular con un diámetro de 60 kilómetros alrededor del volcán, que presentaba un hundimiento de más de 1 metro respecto al nivel que se midió antes de la erupción.

Esta área no tenía como centro al volcán en si, pero era casi concéntrica a una antigua caldera llamada Kagoshima Bay (Figura 3).

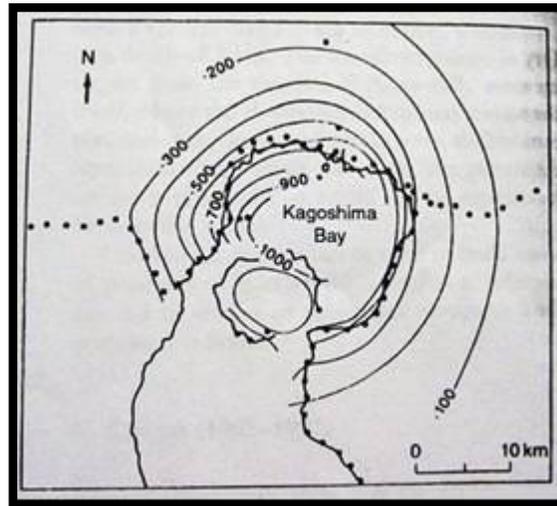


Figura 3. Caldera de Kagoshima Bay, Japón.

Estos resultados fueron analizados por el vulcanólogo japonés Kiyoo Mogi y encontró que al hacer un ploteo de datos que relacione la altura del hundimiento (ΔY), contra la distancia desde el centro del área circular hacia los bordes de la misma (radio del círculo, ΔX), se obtiene un gráfico (Grafico 1) bastante aproximado a la deformación elástica esperada causada por una cámara magmática y con estos resultados pudo desarrollar el modelo para predecir deformaciones conocido como el modelo de Mogi (Fotos 3 y 4).

$$\Delta d = \frac{3a^3Pd}{4\mu(f^2 + d^2)^{3/2}}$$

$$\Delta b = \frac{3a^3Pf}{4\mu(f^2 + d^2)^{3/2}}$$

Fotografía 3. Formula matemática para calcular el Modelo de Mogi.

where

- a = radius of the source sphere
- P = change in hydrostatic pressure in the sphere
- f = depth to the center of the sphere
- μ = Lamé's constant
- d = radial distance on the surface from point above source
- Δd = radial horizontal displacement of a point at the surface
- Δb = vertical displacement of a point at the surface

Mogi found that the Sakurajima data were consistent with a depth to source (f) of 10 ± 1 km

Fotografía 4. Variables de la Formula de

Mogi.

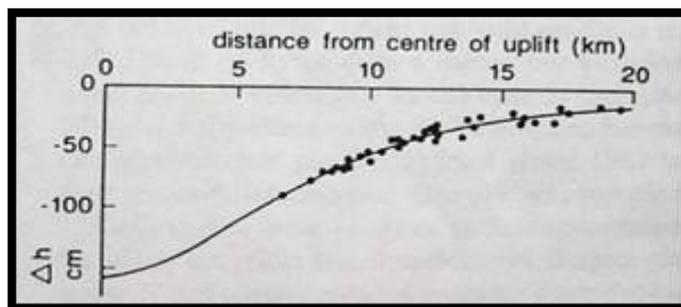


Gráfico 1. Relación profundidad de hundimiento contra distancia a la que se registra.

El problema para usar este modelo es que se debe tener estudios geofísicos que indiquen el espesor de la corteza terrestre, modelos de tamaño, profundidad y forma de cámaras magmáticas. Pero según los apuntes de Mogi⁴ su modelo permitiría obtener una guía teórica acerca de donde se esperarían las mayores deformaciones y poderlas comparar con los resultados obtenidos en mediciones de campo.

Este es el primer caso en el que se empezó a usar técnicas topográficas para determinar deformaciones en el suelo y también fue la primera vez que se utilizó esta técnica para complementar la vigilancia de un volcán.

b) Volcán Krafla (Islandia, 1978)

La erupción tipo fisural del volcán Krafla ocurrió en el norte de Islandia en Diciembre de 1975, después de 230 años de inactividad. El volcán tuvo nueve erupciones durante los siguientes nueve años.

⁴“Ground deformation, gravity and magnetics” John B. Murray, Pag. 1126, 2000

Los patrones de deformación mostraban secuencias de inflación y deflación y al igual que el caso estudiado por Mogi en Japón, estas deformaciones se encontraron en una antigua caldera de 9 kilómetros de ancho.

Al parecer cuando la cámara magmática se llenaba, producía la inflación del terreno y luego este estado de inflación era revertido por rápidos eventos de deflación, todos relacionados con cambios de presión en la cámara magmática. Durante estos eventos de deflación, grietas radiales atravesaban todo el ancho de la caldera en forma concéntrica y se llenaban con magma de la cámara, formando dikes que se extendían rápidamente a distancias de 50 kilómetros desde el centro de la caldera.

Una deformación característica del suelo puede ser esperada durante la formación de un dike⁵. En general, los puntos a ambos lados de la intrusión de magma se desplazan horizontalmente (ΔX) alejándose del dike perpendicular a su eje y el desplazamiento vertical (ΔY) se da más rápidamente alcanzando un valor máximo durante la intrusión para después regresar a un valor cercano al inicial al terminar el evento. La curva de desplazamiento de deformación depende de la profundidad, altura y ángulo de la pendiente del Dike.

Para el estudio de deformaciones en el volcán Krafla se utilizaron modelos matemáticos que describían patrones teóricos de desplazamiento pero estos tenían errores de aplicación ya que en teoría se aplicaban a dikes de longitud infinita y sección constante, localizados a una distancia constante respecto al plano de la superficie y a través de un medio elástico homogéneo.

En contraste, un verdadero dike tiene una distancia finita y una sección variable con un patrón casi curvo y a través de un medio heterogéneo de productos magmáticos. Todos estos factores influyen en el desplazamiento de un punto en los estados de inflación o deflación de un dike y son los causantes de desviaciones

⁵ Ver definición en Glosario técnico

respecto a al comportamiento de los patrones de deformación esperados, según el modelo teórico realizado (Grafico 2).

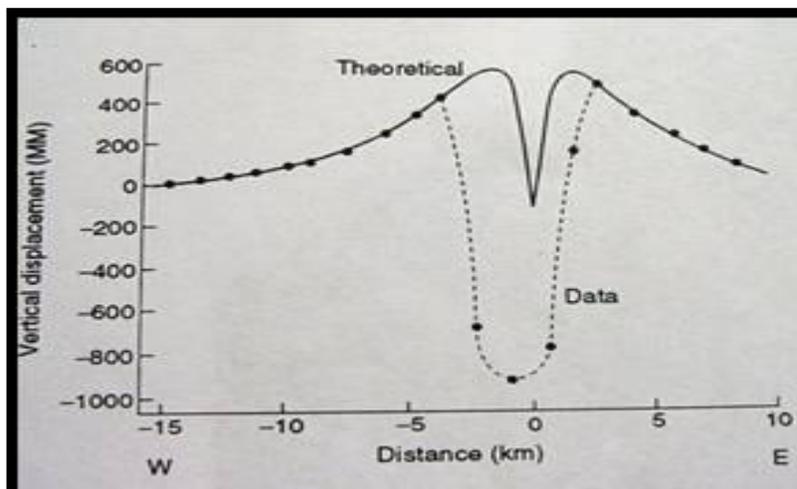


Gráfico 2. Comparación entre datos teóricos y datos obtenidos en campo.

En el caso del volcán Krafla se empezaron a usar modelos teóricos y se comparaban con los resultados obtenidos en campo con técnicas de nivelación, dando buenos resultados en el estudio de estructuras subterráneas y predicción de futuras erupciones.

c) Volcán Colima (México 1982-1997)

El peso, compactación o distorsión gravitacional de una acumulación de materiales volcánicos pueden causar subsidencia de más de un metro por año en casos extremos en algunos volcanes⁶.

En el caso del volcán Colima, la subsidencia o hundimiento de todo el volcán, determina los patrones de deformación al menos desde 1982 cuando la primer red de deformaciones fue instalada.

⁶“Ground deformation, gravity and magnetics” John B. Murray, Pag. 1127, 2000

El volcán Colima por décadas se ha mantenido en un continuo proceso de erupción tipo domo, sin embargo a pesar del crecimiento del mismo, mediciones de deformación demuestran una continúa subsidencia en el centro del cráter.

Estaciones de nivelación ubicadas entre 1 y 3 kilómetros del cráter proporcionan datos de subsidencia de 1 centímetro por año.

Mediciones realizadas entre 1994 y 1997 muestran mayores rangos de subsidencia, es decir, 2 centímetros por año cerca del centro del cráter y 5 centímetros por año en los bordes del domo.

La subsidencia ha continuado aún a través de periodos de rápido crecimiento del domo y flujos de lava en 1991, probablemente como resultado de la compactación y la elástica / plástica deformación del edificio volcánico.

En el caso del volcán Colima, se puede decir que la técnica utilizada en la medición de deformaciones, ha permitido determinar patrones de hundimiento, a pesar de, que se observan fenómenos que harían pensar lo contrario como lo son la formación del domo en el centro del cráter y coladas de lava en sus flancos.

d) Volcán Santa Elena (USA 1980)

Los volcanes crecen debido a la acumulación de lavas y piroclastos, formando laderas que progresivamente con el tiempo se vuelven más empinadas, convirtiéndose además en una estructura inestable.

Durante un proceso eruptivo continuo, se puede desencadenar una falla de la ladera del volcán, provocando el desprendimiento de una gran sección del edificio volcánico, deslizándose a través de la pendiente sobre un área llamada sector de colapso.

El ejemplo más famoso de este tipo de evento fue la erupción del 18 de mayo de 1980 del Monte Santa Elena, donde cerca de 3 Km³ de material de la ladera norte colapsó debido al empuje del magma debajo del volcán, provocando una gran erupción explosiva.

Eventos similares han ocurrido en otras zonas del planeta como el que ocurrió en el volcán Bezymianny, ubicado en la península de Kamchatka, Rusia, en 1956 o el de Japón en 1888, donde el volcán Bandai San tuvo un enorme deslizamiento en una de sus laderas pero sin ninguna erupción explosiva posterior.

Antes de que estos catastróficos eventos ocurran, la medición y análisis de los factores precursores de ellos, deben de ser capaces de indicarnos cuando y como sucederán.

Los cambios en las laderas de un volcán antes de una intrusión son tan perceptibles, que pueden ser detectados no solo con instrumentos sensibles, sino también con técnicas tan sencillas como las fotografías aéreas.

En el volcán Santa Elena, se tomaron fotografías antes y después de la erupción de 1980. Estas fotografías mostraron un hundimiento en la cima del cráter y además el crecimiento de un domo (Fotos 5, 6, 7 y 8) en centro del mismo.

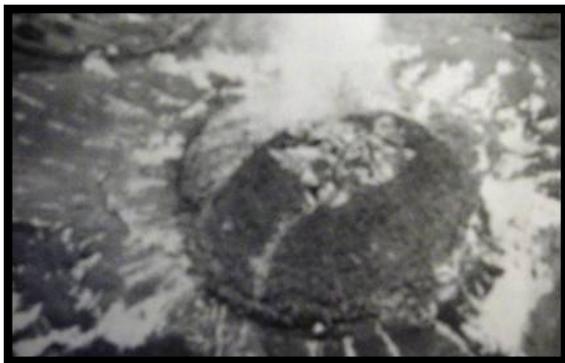


Fotografía 5. Domo en el cráter, USGS, 1980.



Fotografía 6. Domo en el cráter, USGS, 1980.





Fotografía 7. Domo en el cráter, USGS, 1980.

Fotografía 8. Domo en el cráter, USGS, 1980.

La medida total del hundimiento registrado fue de 70 metros para el 12 de Mayo de 1980 (Observatorio Nacional de las Cascadas, 1980), esta área formo un graben que se expandió al lado norte del cráter con una alineación Este-Oeste. El graben tenía 1.5 kilómetros de longitud y su ancho aumentó de 360 metros en Abril a 600 metros en Mayo de 1980. El domo creció en algunas áreas hasta una altura de 150 metros sobre el nivel de la topografía original, volviéndose obvio al ojo del observador debido a su gran tamaño.

Redes de nivelación topográfica (Trilateración) fueron colocadas para medir diferencias altimétricas durante el período de crisis y en algunos casos mostraron fluctuaciones en la inclinación de hasta 5° por hora en Abril de 1980 (Figura 4).

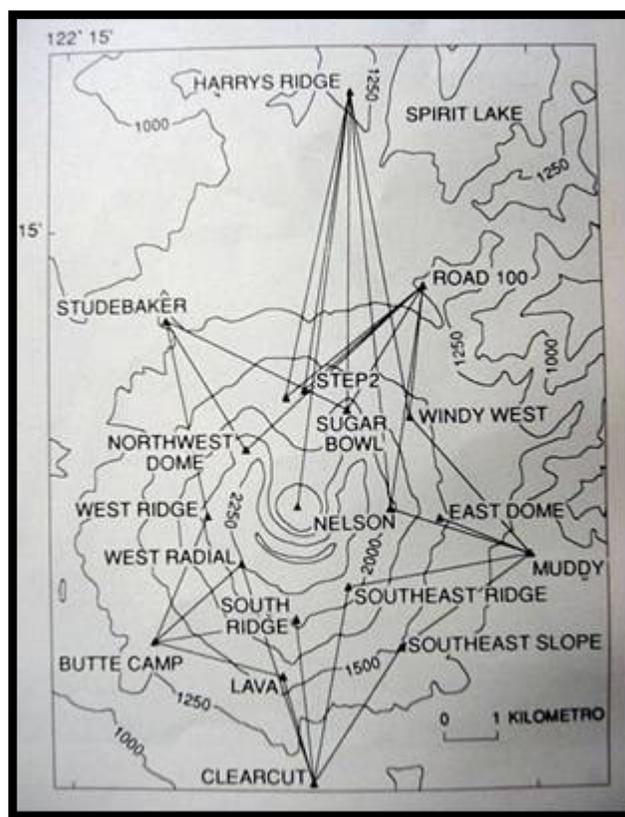
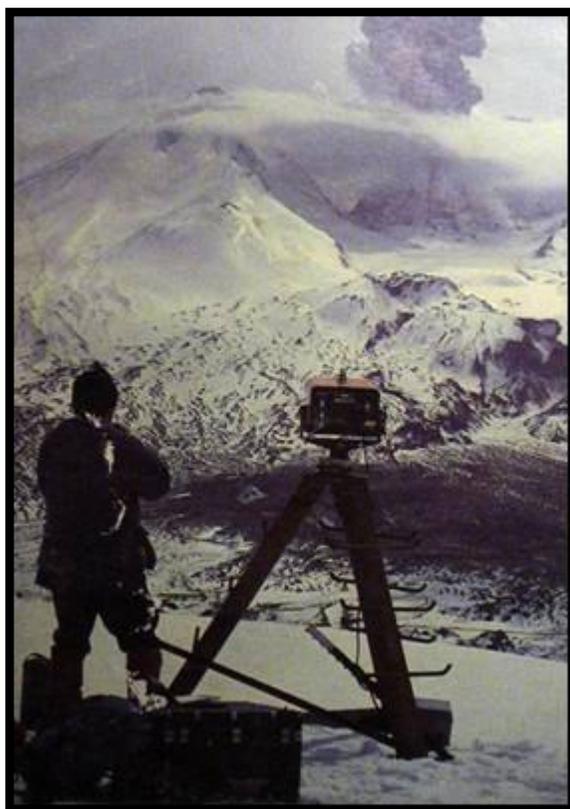


Figura 4. Red EDM, montada para medir deformaciones en el Volcán Santa Elena, USGS, 1980

Al mismo tiempo prismas reflectores fueron colocados para medir distancias (Foto 9) en la parte alta de las laderas, mostrando desplazamientos del domo de hasta 2.5m por día. Muchos de los prismas fueron movidos en dirección horizontal y a veces ligeramente hacia abajo, pudiendo determinarse la dirección probable que el colapso del domo tendría al momento de la erupción.



Fotografía 9. Medición de deformaciones en la ladera del volcán Santa Elena, USGS, 1980.

Ejemplos como el de Santa Elena nos demuestran la importancia que un monitoreo de deformaciones tiene en la prevención y predicción de erupciones, ya que a pesar de lo grande del evento, solo perdieron la vida 50 personas, muchas de

las cuales fueron alertadas, pero no quisieron hacer caso de las indicaciones de los expertos.

2.1.3 FUNDAMENTOS DEL MONITOREO DE DEFORMACIONES VOLCANICAS

Para muchos volcanes, la deformación del suelo es uno de los principales indicadores de su estado general y puede servir para predecir cualquier inminente erupción. El trabajo del científico japonés Kiyoo Mogi, publicados en 1958, marcan el inicio de los modernos estudios de deformaciones en volcanes.

Su modelo asume que una cámara magmática es una fuente puntual de esfuerzos y un cambio de volumen interno se refleja en la superficie a través de agrietamientos, fracturaciones, ocurrencia de derrumbes, inflaciones y deflaciones en la estructura volcánica.

La ley de Hook de esfuerzo-deformación (“stress-strain”) expresa la relación entre desplazamientos aplicados en un sector de un cuerpo elástico y los correspondientes desplazamientos ocurridos en otra parte del cuerpo. De esta manera las propiedades elásticas de la corteza terrestre son estimadas por tratarse de un cuerpo heterogéneo. Los modelos teóricos como el de Mogi no toman en cuenta la falta de homogeneidad de la corteza, por lo que se aceptan como aproximaciones y es por esto que a veces las mediciones en campo no se dan como se esperan en modelos teóricos.

Las deformaciones máximas se dan justo antes del inicio de la erupción. Una vez que los esfuerzos por abrir paso al magma ascendente cesan, la superficie volcánica tiende a retornar a la posición en que se encontraba antes de la erupción, es decir se da un proceso de deflación. Una inyección magmática no

necesariamente culmina con una erupción, pero si puede mostrar deformaciones apreciables en los flancos de un volcán.

Durante la década de los noventa, la medición de deformación ha sido realizada a través de métodos topográficos, entre los más utilizados se mencionan:

1. La nivelación: la cual proporciona diferencias de altura relativas entre bancos de marca.
2. Medición de distancias y ángulos: los cuales proporcionan cambios de posición horizontal y vertical, para conocer desplazamientos o inclinaciones de los flancos del volcán.

Recientemente el desarrollo del sistema de posicionamiento global o GPS (por sus siglas en ingles), ha sustituido a las mediciones de distancia y mediciones con teodolito debido a ser un método más rápido, confiable y preciso de medir cambios en la posición horizontal de los puntos de medición.

GPS no es recomendable para medir cambios en la altimetria de puntos de chequeo debido a su poca presión en este eje, esto se debe a que los satélites se encuentran sobre el receptor de la señal o GPS solamente de un lado, lo que hace imposible que se obtengan cambios en la elevación con gran exactitud.

Una vez que una red de deformaciones ha sido colocada en la ladera de un volcán, la detección de desplazamiento se obtiene de la comparación de las mediciones posteriores con respecto a las iniciales a través de sucesivas visitas a la red.

La deformación es usualmente expresada como un cambio en la distancia entre una estación de referencia y punto de chequeo o banco de marca. Normalmente la estación de referencia se encuentra ubicada fuera de las áreas activas del volcán y preferiblemente fuera del volcán en sí.

El trabajo con las redes de deformación usando métodos topográficos toma a veces horas o días, dependiendo de la disposición de la red y el método utilizado.

Los programas de visitas de campo a las redes de deformación se hacen usualmente una vez al mes, consideraciones logísticas y económicas a menudo alargan las visitas a una o dos por año.

Como una herramienta de pronóstico, el monitoreo de deformaciones proporcionan información confiable y efectiva que puede indicar cambios importantes en el comportamiento del volcán en estudio y así mejorar el conocimiento que se tiene del mismo.

2.1.4 TÉCNICAS USADAS EN EL CAMPO

Las técnicas en campo varían entre sí, dependiendo de los equipos utilizados y datos que se esperan obtener, a continuación se presentaran algunas de las técnicas utilizadas con éxito en otros países, desde la más sencilla hasta las sofisticadas que requieren de mayor inversión económica, además se presentara la técnica usada en el volcán de San Salvador por los técnicos del SNET como complemento de la investigación.

De estas técnicas presentadas se tomaran componentes que puedan ser adaptadas y usadas para los fines del proyecto, es decir que se puedan desarrollar durante los planes piloto, para poder dar una propuesta clara, sencilla y económica, que se viable de desarrollar y que pueda formar parte del programa de vigilancia volcánica de forma permanente.

2.1.4.1 Nivelación de Precisión.

La nivelación de presión es el más preciso de los métodos que buscan cambios en la elevación relativa de puntos de chequeo o bancos de marca en volcanes (Figura 5). Fue usado por primera vez en Japón, para investigar la erupción de 1910 del volcán Usu y en 1914 en la erupción del volcán Sakurajima, pero no se usó como un método de monitoreo de deformaciones convencional hasta 1965 en el volcán Kilauea de Hawai. De una manera simple la nivelación de precisión consiste en el uso de una regla vertical graduada llamada estadia y un nivel fijo de precisión,

con un telescopio con marcador central trifilar para leer la graduación vertical de la estadia con gran exactitud.

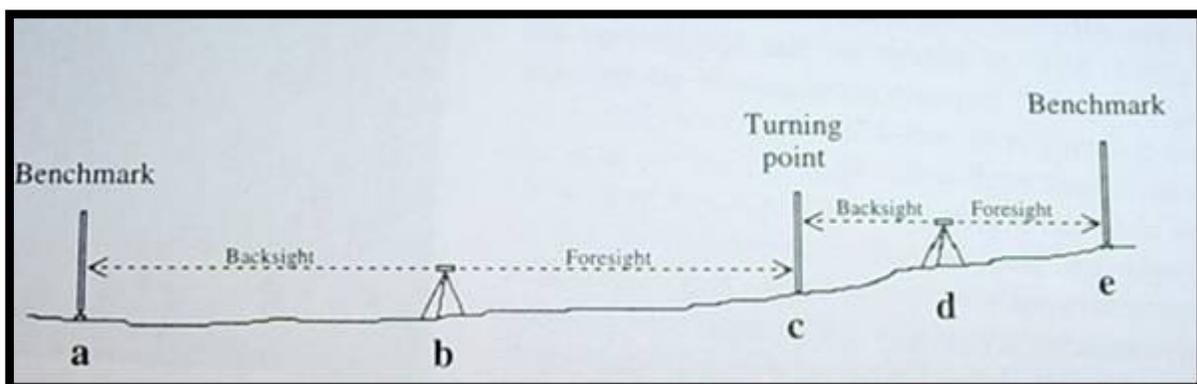
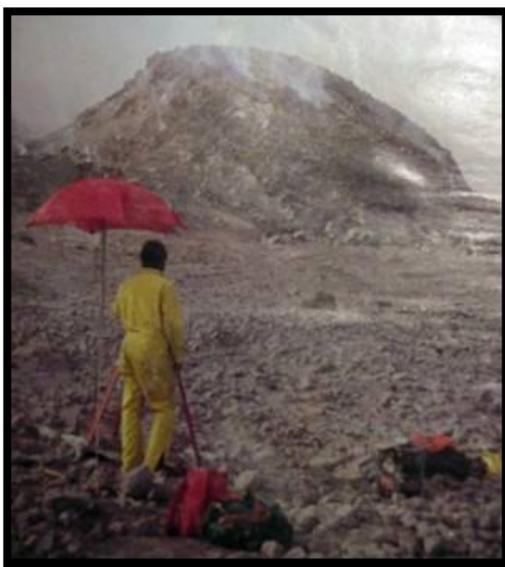


Figura 5. Nivelación de precisión usando nivel fijo.

2.1.4.2 Topografía Convencional.

Este método utiliza la combinación de nivelación trigonométrica y trilateración (determinación de ángulos entre dos bancos de marca), para medir cambios horizontalmente y en tres dimensiones en redes ubicadas en laderas de volcanes. Las distancias son medidas con EDM (Fotos 10 y 11) (Electronic Distance Measurement) y las alturas se determinan leyendo ángulos verticales o azimutales con un teodolito convencional.



Fotografía 10. Medición con EDM, USGS, 1980.

Fotografía 11. Medición con EDM, USGS, 1980.

2.1.4.3 Medición de Inclinación (Dry Tilt).

Es la técnica de medición de deformaciones que miden cambios en la inclinación del suelo utilizando instrumentos topográficos como el nivel fijo de precisión.

Este consiste en la instrumentación de un triángulo equilátero (Figura 6) con lados de 50 metros. El nivel (Fotografía 12) se ubica en el centro del triángulo y los bancos de marca en cada uno de los vértices del triángulo. Luego se mide la diferencia de altura relativa entre la estación y los bancos de marca. Teniendo este dato se procede a realizar visitas periódicas para revisar si ha habido cambios en las elevaciones relativas, es decir en la inclinación del terreno.

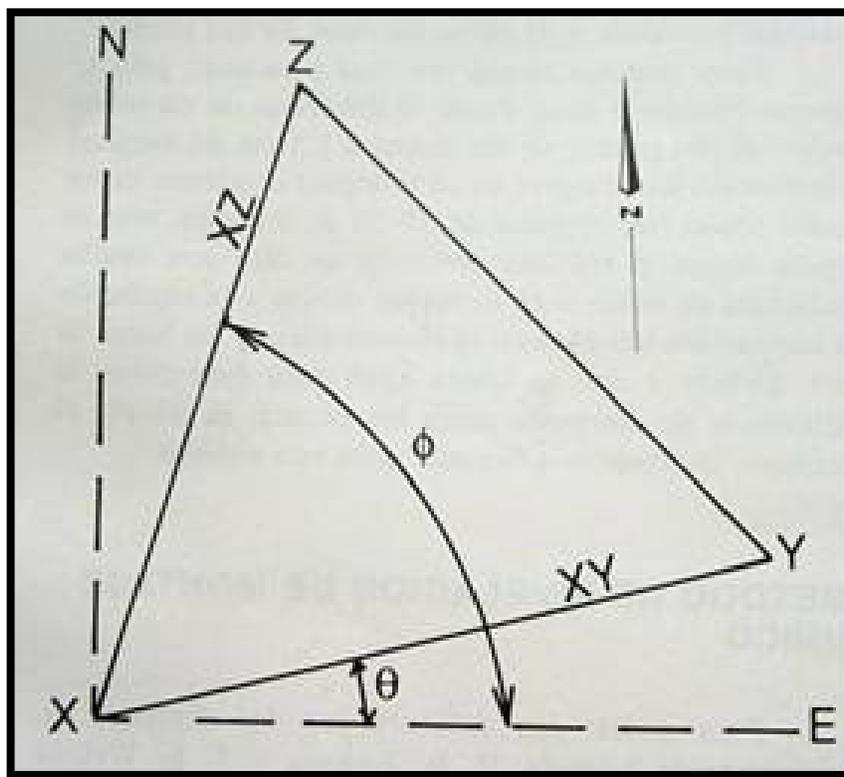


Figura 6. Triangulo equilátero instrumentado, John B. Murray, Ground Deformation, gravity and magnetics, 2000.



Fotografía 12. Medición con nivel fijo, USGS, 1980.

Esta técnica es utilizada como un método de segunda clase debido a que no proporciona cambios de elevación en grandes áreas del volcán, pero su gran ventaja es que es una técnica barata y rápida, que puede ser usada muchas veces al día en periodos de crisis ya que el tiempo necesario para realizar la medición es corto.

2.1.4.4 Inclínómetros

Varios tipos de inclinómetros han sido colocados en muchos volcanes, el primero de ellos fue un péndulo horizontal instalado en 1912 en el volcán Kilauea, el cual proveía una efectiva medición de la inclinación.

Actualmente existen inclinómetros más sensibles que ofrecen mejores resultados en la medición de deformaciones, pero uno de sus principales problemas es que estos se ven afectados por cambios de temperatura o por la lluvia y además

de proveer cambios de inclinación solo en el área en estudio, haciendo muy limitados los datos que ofrece. Debido a esto es que los inclinómetros se recomiendan como una ayuda a las redes de deformación y no como un sustituto de ellas.

2.1.4.5 GPS.

El GPS es el más preciso de los métodos para medir cambios horizontales. La señal se obtiene de una serie de satélites geoestacionarios (30 satélites) y es procesada por un receptor que determina la posición en la tierra del punto en estudio. Debido a que la señal es continuamente cambiada por razones militares, la posición absoluta es de un margen de 10 a 100 metros, pero si se usan dos receptores de doble frecuencia en la misma región, el cambio de posición es el virtualmente el mismo y la posición relativa entre los dos puede ser obtenida con pocos milímetros de error. La posición vertical nunca será tan precisa como la horizontal debido a que los satélites se encuentran solo de un lado del aparato receptor de la señal y debido a esto la configuración de la misma es muy pobre.

El GPS permite ser usado en cualquier clima, incluyendo lluvia, nieve, niebla y fuertes vientos, lo cual supera todos los métodos topográficos en cuanto a condiciones de uso. Para obtener excelente precisión en los datos el receptor de GPS debe dejarse trabajar por lo menos 24 horas continuas, pero problemas logísticos o la inaccesibilidad de algunos volcanes no permiten este tiempo de trabajo del receptor.

2.1.4.6 SAR Interferómetro.

Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferómetro a través de satélite, es la ultima técnica desarrollada hasta el presente, puede proveer información de deformación del suelo en cualquier punto sin la necesidad de desplegar ningún tipo de instrumento o red en el volcán.

Dos satélites de imágenes de radar toman desde diferentes orbitas una fotografía del mismo punto, en diferente momento y las compara. La diferencia de fase entre las dos imágenes produce bordes de interferencia, que representan la topografía de la superficie y cualquier cambio en esta durante el periodo de adquisición de las imágenes de radar, es visualizado en la fotografía.

Una de las desventajas de este método es que los resultados se ven afectados por cambios de presión, humedad, temperatura, etc. o por cambios en la vegetación o nieve en la zona de estudio. La precisión también tiene que ver con la longitud de onda utilizada, la máxima precisión que se ha obtenido es por debajo de los 3 cms.

Este método promete ser particularmente importante para aquellos volcanes en zonas remotas o de difícil acceso que no pueden ser monitoreados por métodos convencionales.

2.1.5 TÉCNICA USADA EN EL VOLCÁN DE SAN SALVADOR

La técnica de monitoreo de deformaciones usada en el volcán de San Salvador (Foto 13) en el año 2002, se puede definir como una nivelación altimétrica. Donde se mezclaron principios de la nivelación de precisión y de la nivelación trigonométrica.



Fotografía 13. Vista aérea del plano Noroeste del Volcán de San Salvador, SNET, 2002.

De la nivelación de precisión se utilizó el principio de medición de alturas relativas entre bancos de marca y la georeferenciación, y de la nivelación trigonométrica se tomaron los conceptos de medición de ángulos y distancias para determinar cambios en la posición de los bancos de marca.

El motivo por el cual esta técnica utilizada en el volcán de San Salvador, no puede ser llamada como ninguna de las dos técnicas antes expuestas, se debe a que para realizar una nivelación de precisión es indispensable el uso de un nivel fijo el cual no tiene ningún movimiento vertical en el telescopio, y una estadia o regla graduada para medir alturas; en cambio actualmente se está utilizando una estación total como nivel fijo lo cual es incorrecto desde el punto de vista técnico y metodológico.

Las diferencias de altura se obtienen de operaciones matemáticas entre los valores de alturas de miras y las diferentes alturas de aparato, estas operaciones algunas veces proporcionan datos imprecisos, si por un error involuntario se olvida restar o sumar una de estas alturas. Debido a lo anterior los resultados no serán congruentes con mediciones anteriores, proporcionando cambios de altura que no existen y que solo se deben a errores humanos.

En cuanto al uso de la estación como EDM, en la práctica se utiliza como un teodolito digital ya que el EDM de la estación es utilizado para determinar ángulos y distancias de una poligonal abierta, como se hace en los levantamientos topográficos de terrenos, dando como resultado que en cada medición cambie la figura planimétrica del área en estudio.

2.2 GLOSARIO TECNICO

1. AJUSTE GRAVIMETRICO: Cambio en la forma de una estructura volcánica debido al acomodamiento de los materiales que lo forman como resultado de cambios en sus densidades y pesos.
2. AZIMUT: Angulo directo que se mide desde el norte magnético hacia la línea de inicio de la medición.
3. CÁMARA MAGMATICA: Reservorio de roca fundida, que se encuentra abajo del volcán y es la principal fuente de energía que lo alimenta.
4. CAMBIOS MORFOLÓGICOS: Cambios en la forma o en la inclinación de las laderas de una estructura volcánica.
5. CALDERA: Depresión formada en la superficie de la tierra como consecuencia del colapso de uno o varios volcanes dentro de su cámara magmática la cual ha quedado vacía debido a una gran erupción de la estructura.
6. CUERPO HOMOGÉNEO: Es aquel que está formado por materiales con la mismas características físicas y químicas.
7. CUERPO HETEROGÉNEO: Es aquel que está formado por materiales con diferentes características físicas y químicas.

8. CURVA DE DESPLAZAMIENTO: Es el cambio en la posición de un punto respecto al tiempo.
9. DEFLACIÓN: Disminución en el volumen de un cuerpo.
10. DEFORMACIÓN ELASTICA: Deformación que se da dentro de un cuerpo homogéneo como consecuencia de cambios en los esfuerzos internos.
11. DIKE: Estructura vertical formada cuando material fundido atraviesa grietas o fisuras y luego se solidifica.
12. DOMO: Estructura volcánica de forma esférica que es compuesta por lavas muy viscosas.
13. ERUPCIÓN FISURAL: Erupción volcánica a través de una grieta o fisura de considerable longitud.
14. GRABEN: Porción de terreno que se hunde entre dos fallas normales.
15. INFLACIÓN: Aumento del volumen de un cuerpo.
16. INTRUSIÓN MAGMATICA: Inyección de material fundido a través del conducto principal de un volcán o a través de una grieta o fisura, directamente desde la cámara magmática.
17. LAVA: Roca fundida que se encuentra sobre la superficie.
18. MAGMA: Roca fundida que se encuentra bajo la superficie.

19. MODELOS MATEMÁTICOS: Son modelos calculados a través de métodos estadísticos, físicos o matemáticos, que utilizan variables teóricas, proporcionando patrones de deformación probables.
20. SILL: Estructura horizontal que se forma cuando material fundido atraviesa grietas o fisuras y luego se solidifica.
21. SUBSIDENCIA: Hundimiento de un área determinada de terreno respecto al nivel del suelo en las áreas vecinas.
22. TOPOGRAFÍA: Rama de la Ingeniería Civil que estudia la forma de la tierra, a través de métodos e instrumentos de precisión.
23. TRIÁNGULO EQUILÁTERO: Figura geométrica de lados y ángulos iguales.
24. TRILATERACIÓN: Medición de ángulos entre dos bancos de marca.
25. ΔX : Diferencia en la longitud horizontal.
26. ΔY : Diferencia en la longitud vertical.

CAPITULO III

PROYECTO DE INVESTIGACION

3.0 ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA MEDICIÓN DE DEFORMACIONES

La medición de deformaciones es uno de los principales tipos de estudios realizados en la investigación de volcanes, según el Hawaiian Volcano Observatory (HVO) estos estudios son:

1. El estudio de la actividad volcánica en el pasado.
2. El monitoreo de sismos.
3. El monitoreo de deformaciones.

Esta ultima técnica es la que nos ocupa en este capitulo y se analizarán cuáles son los componentes, herramientas y resultados que se obtienen y como se pueden adaptar a las limitantes de recursos que se tienen para desarrollarla en el país de una forma viable y efectiva.

A continuación se presentara el análisis de la metodología usada por los técnicos del SNET y también de aquellas que han sido utilizadas en otros países y sean útiles para el fin de este proyecto, es decir que aquellas técnicas que necesiten de grandes requerimientos económicos como el GPS o SARS Interferometry no serán consideradas debido a no poder implementarse en el país por lo antes expuesto.

3.1 ANÁLISIS DE METODOLOGÍA UTILIZADA POR EL SNET

El área de vulcanología del SNET ha estado realizando mediciones de manera experimental en el flanco noroeste del volcán de San Salvador desde el mes de Junio del año 2002 con la colaboración del personal del área de Hidrología.

La metodología utilizada como se menciona en el capítulo II consiste en una nivelación altimétrica y a continuación se describirá el trabajo efectuado desde la creación de la red de bancos de marca hasta la realización de las mediciones.

3.1.1 Construcción de la red de bancos de marca

Los bancos de marca se construyeron en el lugar, son de concreto simple es decir que están fabricados con cemento Pórtland, grava, arena, agua y no tiene acero de refuerzo que sirva de anclaje (Foto 14). Estos se colocaron en la zona de grietas donde se dio la colada de lava de la erupción de 1917.

Los
marca
promedio un
0.0225 m²
tiene por
centímetros



bancos de
tienen en
área de
es decir que
lado 15
y fueron

nivelados en la superficie para evitar errores en la nivelación.

Fotografía 14. Banco de marco utilizado para colocar la Estación total.

La disposición de los bancos de marca obedeció a criterios geológicos como por ejemplo el de cortar las grietas de forma transversal y así poder determinar algún cambio en el ancho de las mismas o conocer si la intrusión de magma en flanco del volcán produce una deformación en la superficie.

El área que cubre la zona donde se colocaron los bancos de marca es de 4.12 Hectáreas y no tiene una forma geométrica definida y a cada uno de los bancos de marca se le dio un nombre para facilitar la identificación de los mismos (Figura 7).

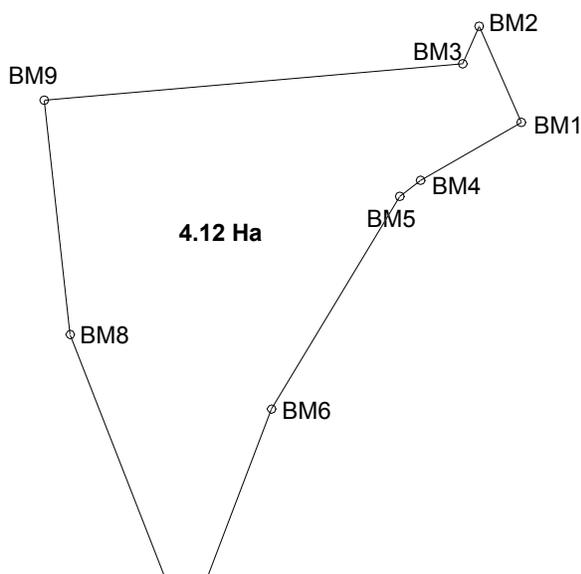


Figura 7. Forma y área de la red de bancos de marca.

3.1.2 Equipo de medición utilizado

El equipo de medición utilizado es una estación total marca SOKKIA modelo 500 SET de fabricación Japonesa (Foto 15), el año de fabricación es de 1995 y se encuentra en buen estado de funcionamiento. Además se utilizó un prisma reflectivo prismático modelo APX1 y bastones telescópicos con burbuja de nivelación para su colocación sobre los bancos de marca.



Fotografía 15. Estación Total SOKKIA SET500, propiedad del SNET.

3.1.3 Técnica de medición

La técnica de medición utilizada consiste en la nivelación alimétrica (Foto 16) de una poligonal cerrada (Figura 8) utilizando el método topográfico de la doble deflexión el cual consiste en realizar cuatro mediciones en cada cambio de rumbo para luego obtener el promedio del ángulo de deflexión y así calcular el rumbo de la línea. Este método proporciona el rumbo y la distancia de cada una de las líneas que compone la poligonal así como la elevación de cada uno de los bancos de marca.



Fotografía 16. Área De trabajo de medición, Área de vulcanología del SNET, 2002.

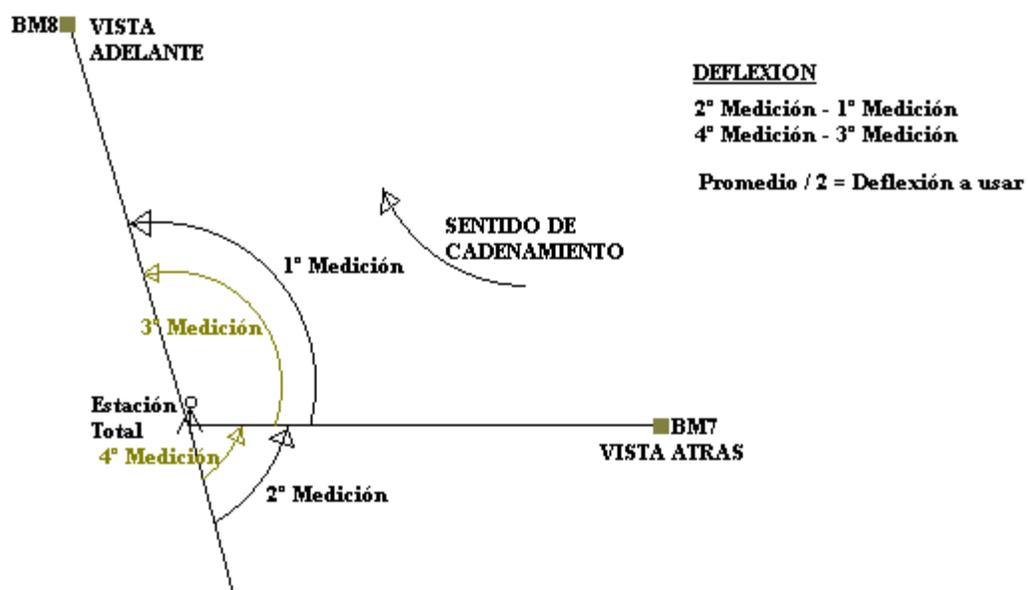


Figura 8. Diagrama esquemático del método de doble deflexión.

La metodología antes explicada ha sido la utilizada por los técnicos del SNET del 2 de Julio de 2002 al 20 de Mayo de 2003 y fue la base de estudio del presente proyecto.

3.1.4 Análisis del uso de los recursos

La metodología utilizada por los técnicos del SNET utiliza recursos logísticos y técnicos los cuales serán analizados a continuación para determinar cual es el grado de aprovechamiento de los mismos.

1. **Red de Bancos de Marca:** La red de bancos de marca no presenta problemas de construcción, pero su disposición dentro del flanco del volcán, sin ningún punto de amarre fuera del área de influencia del mismo es la mayor debilidad de la misma ya que un cambio pequeño en la zona no sería detectado con anticipación. Además la poligonal tiene una forma no geométrica lo que dificulta su medición y requiere de gran cantidad de tiempo y por lo menos de 3 personas para realizarlo.
2. **Equipo de Medición:** El equipo de medición es utilizado como un teodolito es decir que se usa solo para determinar los ángulos azimutales y zenitales. Es decir que el equipo es sub-utilizado haciendo uso únicamente del 25% de su capacidad digital.
3. **Metodología:** La metodología es muy exacta para levantamientos topográficos de mediana precisión, pero para los fines de monitoreo de deformaciones no es el más indicado debido a que en un 95% los cálculos son manuales y como se muestra en el capítulo I, en cada medición los resultados no son los mismos y acumulan errores.

3.1.5 Análisis de datos proporcionados

Los datos proporcionados por las mediciones realizadas en el Año 2002 ofrecen la siguiente información:

1. **Datos:** Los datos obtenidos muestran valores de altura de cada uno de los bancos de marca (BM), por lo que solo se puede controlar el vector (Z).
2. **Calidad de la información:** Al revisar los datos de campo se puede observar que los valores no son constantes y que existen cambios en las dimensiones de hasta un metro, pudiendo decir que la calidad de la información es pobre.
3. **Cantidad:** Las mediciones ofrecen una cantidad limitada de información de cada banco de marca, por lo que es difícil determinar algún movimiento en cualquiera de los otros vectores de movimiento tridimensional de los puntos de control.

3.1.6 Conclusiones y recomendaciones

Como resultado de la descripción y análisis de la técnica utilizada en el volcán de San Salvador se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- Hacer uso de la red de bancos de marca ya instalada en el flanco norte del volcán de San Salvador, considerando aquellos puntos que por su ubicación sean de mayor importancia.
- Mejorar los bancos de marca colocando tornillos de referencia para medir siempre sobre el mismo punto.

- Utilizar en mayor porcentaje las ventajas que los programas digitales de la estación total permite y así disminuir las operaciones manuales.
- Cambiar la metodología a otra que sea más viable, fácil de desarrollar y que proporcione mejores datos con una mejor precisión.
- Con el equipo con que se cuenta se puede trabajar en el desarrollo de otra metodología.

3.2 ANALISIS DE OTRAS METODOLOGIAS

A continuación se describirán y analizarán otras metodologías utilizadas con éxito en otros países y que son factibles de adaptar en nuestro país, ya sea por su economía o por la sencillez de su procedimiento, sin descuidar por supuesto la calidad de la información que proporcionan.

3.2.1 NIVELACION TRIGONOMETRICA, TRIANGULACION Y TRILATERACION

La mezcla de la nivelación trigonométrica, triangulación y la trilateración es conocida como topografía convencional, su uso fue implementado a principios de los años 80 por vulcanólogos de Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) y consiste en medir deformaciones en laderas de volcanes activos a través de equipo topográfico de precisión como el teodolito y el EDM (Electronic Distance Meter) y el uso de redes de deformación cuya disposición depende de la forma de las grietas, visibilidad o que clase de información se quiere obtener (vector de desplazamiento, porcentaje de inflación, grado de subsidencia, etc.)

A continuación se describirá cada una de las componentes de esta metodología:

3.2.1.1 REDES DE BANCOS DE MARCA

Las redes de banco de marca o redes de deformación (Figura 9) se establecen a partir de coordenadas tridimensionales (x , y , z) es decir, que se tienen las coordenadas de cada una de las componentes de la red, del punto de observación o instrumental y uno de referencia estos dos últimos se consideran nominalmente estables y fuera de influencia del volcán.

La disposición puede ser radial al cráter del volcán, tangente a la ladera o en forma irregular dependiendo como se dijo anteriormente de que clase de información se requiere, por lo general las redes de deformación tienen patrones triangulares con ángulos conocidos en sus vértices, para facilitar la medición de los mismos.

Los bancos de marca pueden ser construidos con materiales como concreto, varillas de acero estructural, tablas de madera o reflectores plásticos, dependiendo de la durabilidad y estabilidad que se requiera.

La construcción de las redes de banco de marca requiere de bastante trabajo de campo y personal para su construcción. La ubicación de la red es de gran importancia ya que esta nos proporciona información acerca de la zona que se desea estudiar y permite conocer el comportamiento planimétrico y altimétrico de la zona. En la mayoría de volcanes que se estudian a través de la técnica de medición de deformaciones utilizando métodos topográficos se han construido redes en sus flancos según requerimientos de los vulcanólogos.

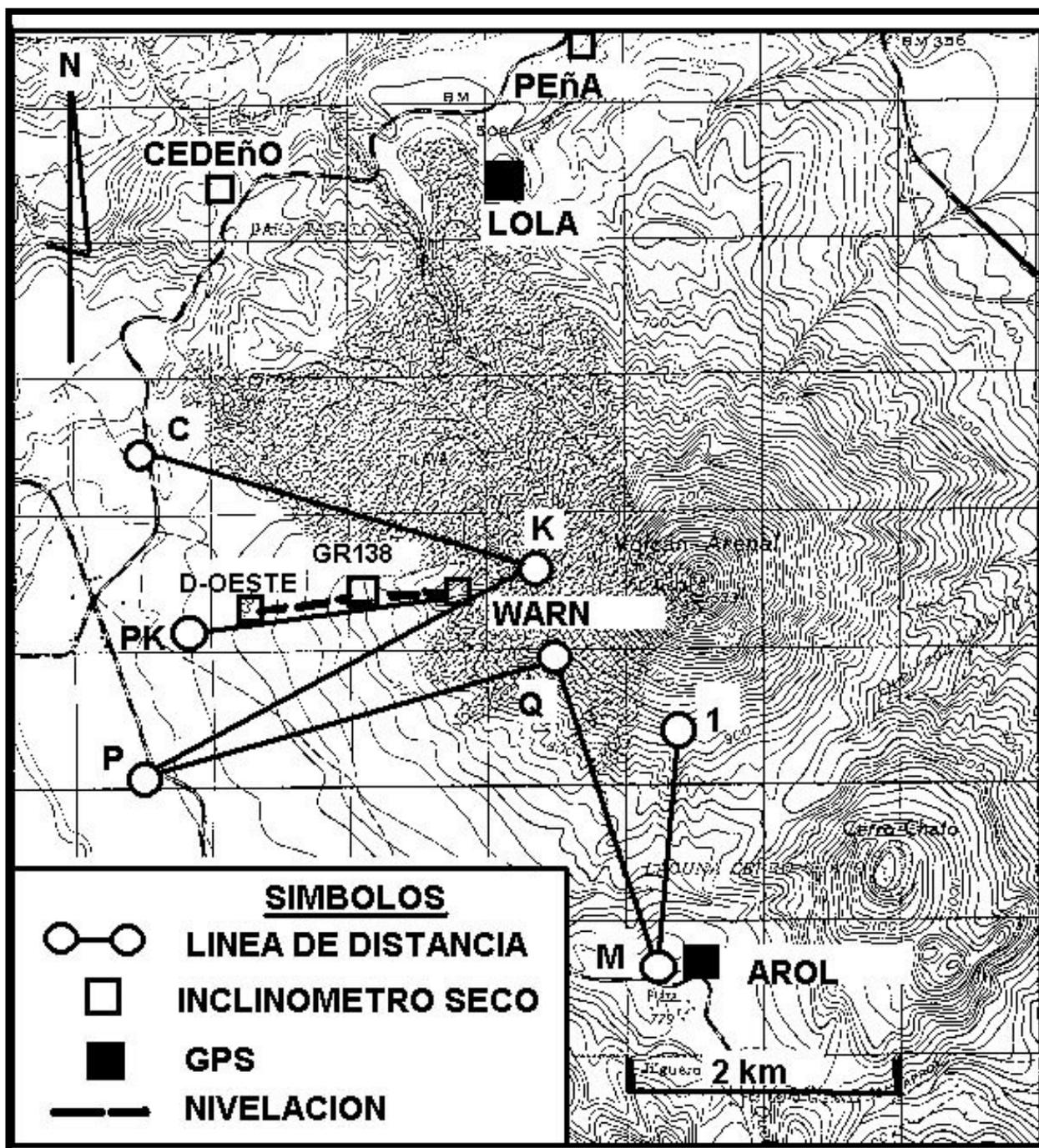


Figura 9. Ejemplo de Redes de Deformación, OVSICORI, 1992.

3.2.1.2 EQUIPO DE MEDICIÓN

Los equipos de medición más utilizados en las mediciones de deformaciones a través de métodos topográficos son el teodolito y el distanciómetro electrónico (EDM, por sus siglas en inglés). Estos equipos tienen funciones diferentes ya que el primero solo puede ser utilizado para determinar los ángulos horizontales y verticales entre dos puntos y el segundo nos proporciona la distancia directa entre dos puntos, la mezcla de estos dos equipos permite a través de fórmulas matemáticas determinar diferencias de altura y movimientos horizontales entre dos puntos (Figura 10).

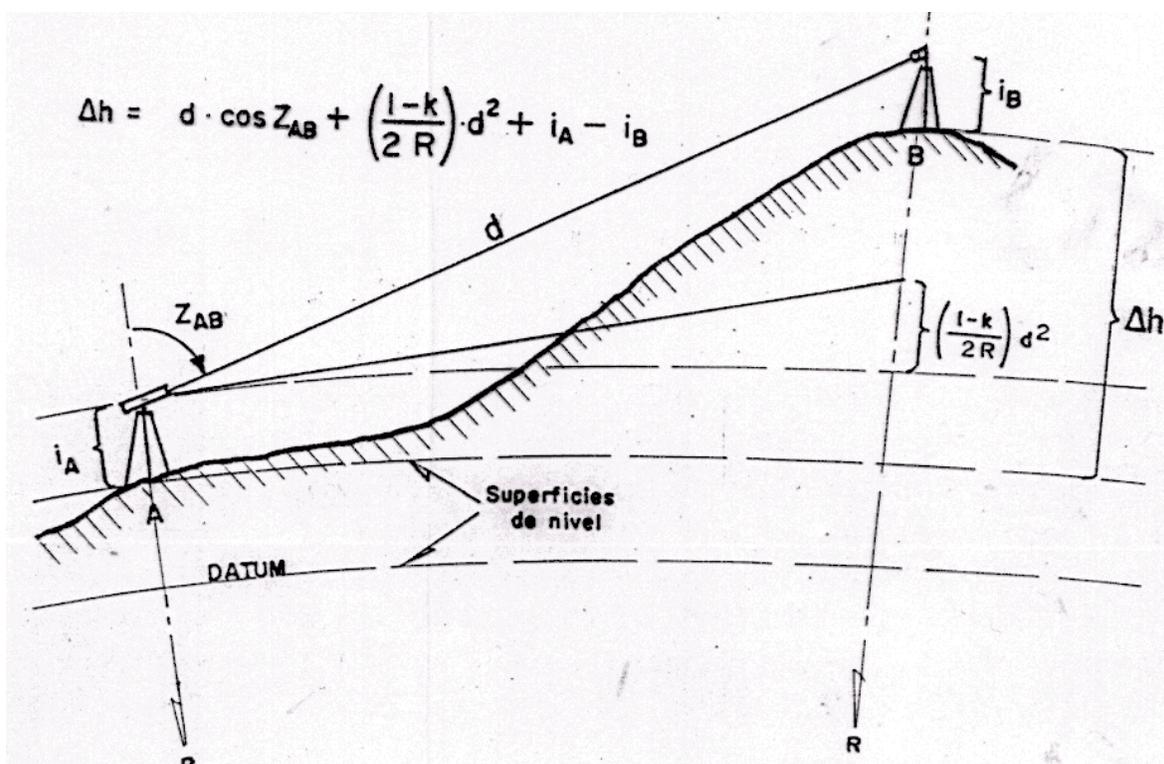


Figura 10. Fórmulas matemáticas para determinar deltas entre dos puntos.

3.2.1.3 TÉCNICA DE MEDICIÓN

La técnica de medición consiste en hacer disparos o vistas con los equipos hacia los bancos de marca instalados en las laderas del volcán, tomar nota de las lecturas proporcionadas y realizar los cálculos para determinar si hay cambios entre los puntos de control y los bancos de marca analizados (Figura 11).

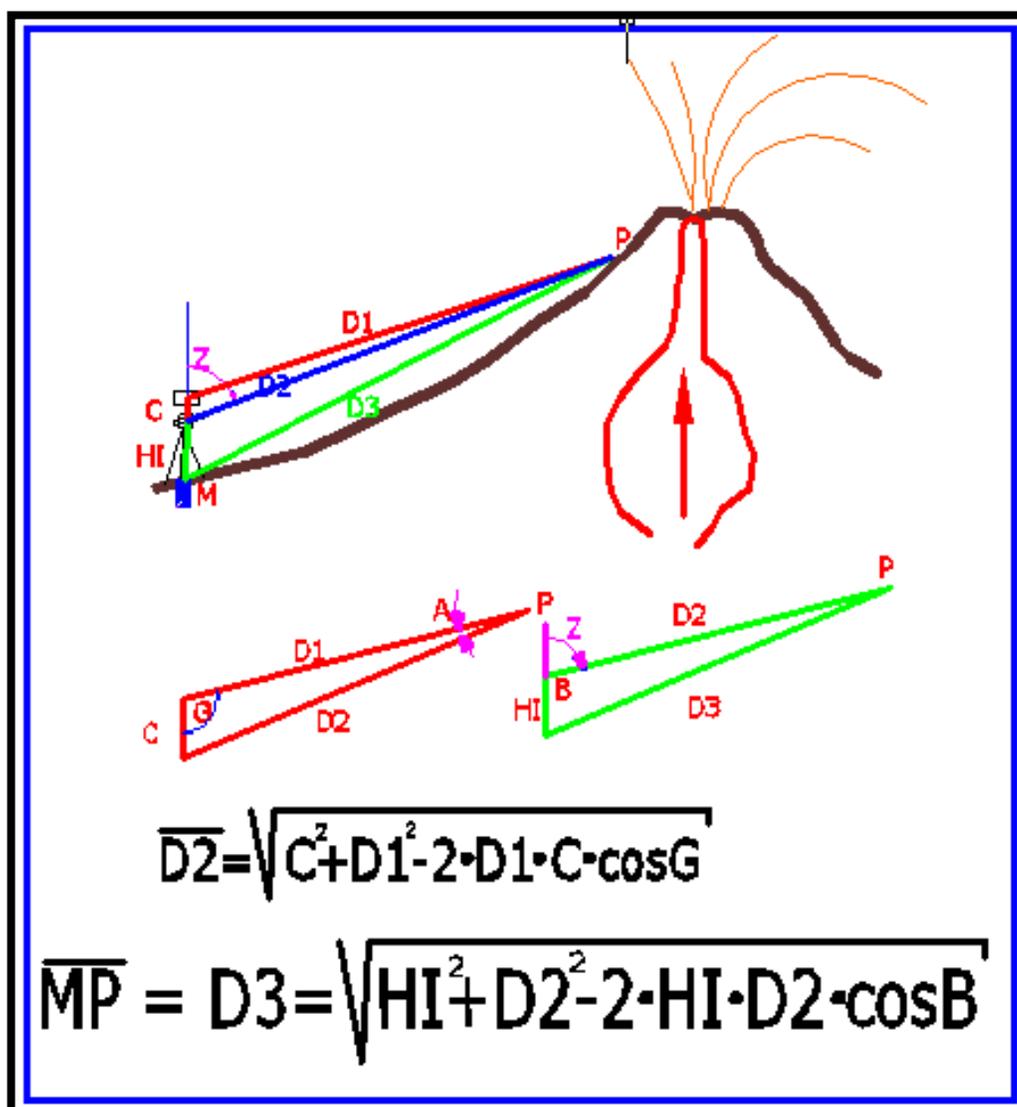


Figura 11. Medición de deformación a través de métodos topográficos

3.2.2 ANÁLISIS DEL USO DE LOS RECURSOS

La metodología de nivelación trigonométrica, triangulación y trilateración recursos logísticos y técnicos los cuales serán analizados a continuación para determinar cual es el grado de aprovechamiento de los mismos.

4. **Red de Bancos de Marca:** La red de bancos de marca que utiliza esta metodología es construida de acuerdo a los requerimientos de los técnicos y su ubicación y estabilidad proporcionan una buena herramienta de control.
5. **Equipo de Medición:** El equipo de medición es utilizado adecuadamente, asiendo uso de todas las herramientas que ofrecen los equipos.
6. **Metodología:** La metodología ha demostrado ser muy precisa en aquellos volcanes en que se ha utilizado con éxito como por ejemplo Santa Elena, Arenal, Colima, Kilahuea, etc.

3.2.3 Análisis de datos proporcionados

Los datos proporcionados utilizando la metodología de medición de deformaciones a través de métodos topográficos ofrecen la siguiente información:

1. **Datos:** Los datos obtenidos nos dan valores tridimensionales de cada uno de los bancos de marco, por lo que se puede controlar el desplazamiento en los tres vectores (X, Y, Z).

2. **Calidad de la información:** La información ofrecida es de buena calidad ya que este tipo de metodologías tiene pocos errores humanos.
3. **Cantidad:** Las mediciones ofrecen una gran cantidad de información como por ejemplo: rumbo de las líneas, ángulos azimutales, coordenadas, etc. Lo que facilita la interpretación de los datos.

3.2.4 Conclusiones y recomendaciones

Como resultado de la descripción y análisis de la técnica de medición de deformaciones utilizando métodos topográficos, se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- Este tipo de metodología es muy práctica y ofrece buena información respecto a área que se quiere investigar.
- Debido a que utiliza equipos de medición estándar la metodología puede ser adaptada a los requerimientos y capacidad instrumental que se posee.
- La eliminación de errores humanos mejora la calidad de los datos.
- Con el equipo con que se cuenta se puede trabajar en el desarrollo de una variable de esta metodología.
- Se recomienda tomar esta metodología como la base para desarrollar una metodología propia para la medición de deformaciones.

CAPITULO IV

4.0 PLANES PILOTO Y PLANTEAMIENTO DE PROPUESTA DE SOLUCIÓN

4.1 PLAN PILOTO N° 1

4.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Como ya se dijo anteriormente, el área de estudio, es el flanco noroeste del volcán de San Salvador. Este lugar es considerado el área tectónicamente activa del volcán, razón principal para definirla como la zona de investigación para el análisis de inflaciones y deflaciones asociadas a intrusión magmática entre otros.

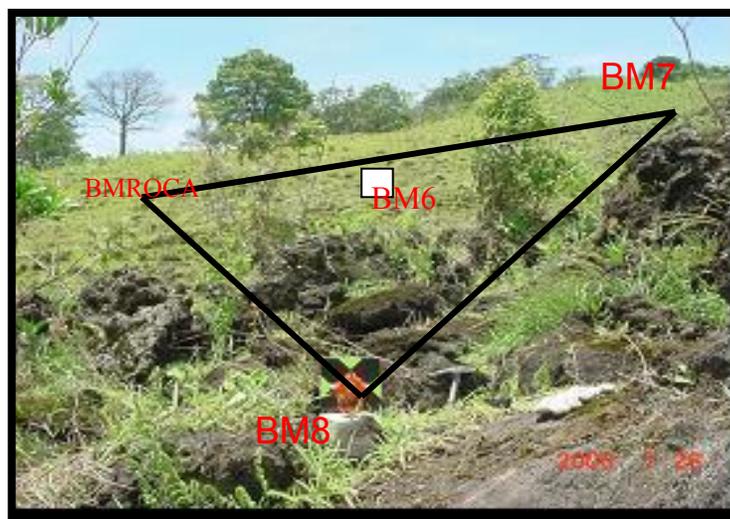
El sitio se localiza entre las longitudes 468000 y 469000 y las latitudes 293000 y 294000 en coordenadas Lambert, la altitud promedio es de 1.340 metros sobre el nivel del mar y existe camino de acceso vehicular (4x4) hasta el área de trabajo.

El plan piloto N° 1 tiene como propósitos conocer la capacidad del equipo, probar una metodología diferente a la utilizada antes y ganar experiencia de campo que permita retroalimentar la técnica y así poder avanzar hacia el objetivo de crear una propuesta de trabajo para la medición de deformaciones en los volcanes activos de El Salvador

4.1.2 TÉCNICA A DESARROLLAR

La técnica a usar será una nivelación trigonométrica tridimensional (NTT) la cual es una adaptación de la topografía convencional (Redes EDM y teodolito) usada en investigaciones de deformación por instituciones como el Observatorio Vulcanológico Las cascadas (CVO, por sus siglas en ingles) de los Estados Unidos de Norteamérica, el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, (OVSICORI) y el Observatorio Vulcanológico de Hawai (HVO, Por sus siglas en ingles) en la isla grande de Hawai.

Para el desarrollo de esta nueva técnica se utilizara una figura geométrica triangular (Fotografía 17) como la base para la realización de las mediciones y se colocara en cada uno de los vértices un banco de marca.



Fotografía 17. Figura triangular formada por los Bancos de Marca de la red de deformaciones del Plan Piloto I.

4.1.3 RED DE BANCOS DE MARCA

La red de bancos de marca a utilizar hace uso de cinco puntos (Figura 12), uno para la instalación del aparato (Estación Total) llamado Banco de Maca Base N° 1, uno para referenciar la medición respecto al norte magnético (Azimut) y los otros tres para realizar las mediciones.

Para la formación de la red de bancos de marca se hará uso de cuatro de los nueve bancos de marca que componen la red preliminar (Figura 7) utilizada por los técnicos del SNET. Estos serán BM5, BM6, BM7, BM8 y además se colocara un nuevo banco de marca llamado BM ROCA para finalizar el montaje (Figura 12).

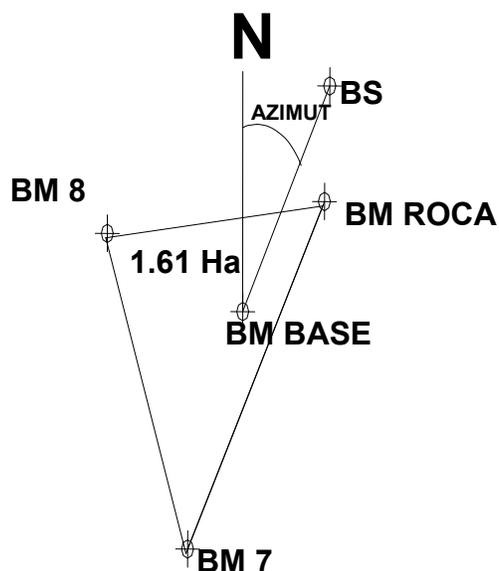


Figura 12. Forma y área de la nueva red creada para el desarrollo del Plan Piloto N° 1.

Los bancos de marca utilizados anteriormente no tenían punto de referencia, así que a los escogidos para formar parte de la nueva red de bancos de marca se les hicieron modificaciones las cuales son: Al banco de marca base (BM 6), así como al utilizado como referencia (Vista atrás, BM 5), se les colocó un tornillo metálico en el centro de la base de concreto para tener un punto de medición fijo (Fotografía 18). A los tres restantes incluyendo el construido en la roca fija, se les instaló en el centro un perno para luego enroscar el reflector (Fotografía 19).



Fotografía 18. Punto de referencia para centrar la Estación Total.



Fotografía 19. Banco de marca con prisma instalado.

Para la colocación de los tornillos y pernos se utilizo el siguiente equipo:

1. Taladro eléctrico inalámbrico de 12 voltios.
2. Broca para concreto de 1/16”.
3. Pegamento epoxico para unir concreto con acero.
4. Anclas plásticas.
5. Sierra para hierro.

El trabajo consistió en taladrar los bancos de marca en el centro del mismo y luego se coloco un ancla plástica donde se introdujo el tornillo con el uso de un destornillador phillips, para el caso de los pernos de acero, a estos se les corto la cabeza con la sierra, luego se taladro la base de concreto y se lleno el hueco con el pegamento epoxico, donde se coloco el perno verticalmente, dejando unos 10 centímetros del cuerpo del perno libres para enroscar el prisma.

4.1.4 EQUIPO UTILIZADO PARA LAS MEDICIONES

El equipo utilizado es:

1. Una estación total marca SOKKIA modelo SET500 la cual cuenta con: un distanciómetro digital con una capacidad máxima de 4.2 Kilómetros (según es fabricante y con una gran cantidad de prismas), una pantalla de cristal liquido, tarjeta de memoria, disco electrónico graduado con ángulos azimutales y zenitales, burbujas de nivelación y plomada óptica. (Fotografía 20)
2. Un prisma reflectivo triple modelo APS32 (Fotografía 21)
3. Un trípode metálico para colocar la estación (Fotografía 22)
4. Como equipo adicional se cuenta con dos radios de comunicación de 2 vías y con un alcance de 3.2 kilómetros, cinta métrica, termómetro y brújula.



Fotografía 20. Estación Total del SNET.



Fotografía 21. Prisma triple para la Estación Total.



Fotografía 22. Trípode de la Estación.

4.1.5 METODOLOGÍA

Con la red de Bancos de Marca instrumentada, se procedió a las mediciones, para ello se utilizó el programa de coordenadas (COORD) que trae de fabrica la estación en su software interno. El procedimiento para la colocación y orientación del equipo se detalla a continuación:

1. Obtención de coordenadas Lambert de los bancos de marca Base N° 1 y Vista atrás utilizando un GPS portátil marca Etrex de fabricación Americana. Se coloca el GPS, sobre los bancos de marca de interés y se les deja unos 15 minutos para que la información se estabilice y proporcione un valor correcto. De los restantes bancos de marca se obtienen las coordenadas a través de las mediciones que se harán.
2. Instalación y nivelación de la estación en el BM base N° 1, utilizando el procedimiento que se amplia en el Capitulo V.
3. Introducción de las coordenadas (sistema Lambert) del banco de marca base (x, y, z) así como la altura de aparato y la altura del prisma, haciendo uso del procedimiento que se amplia en el Capitulo V.
4. Introducción de coordenadas (sistema Lambert) del Banco de Marca que se utilizara para dar orientación a la estación (obtención del Azimut), este banco de marca era el BM 5 en el arreglo anterior, de ahora en adelante se le llamara (BS) que significa vista atrás por sus siglas en ingles (Back sight).
5. Obtención automática del ángulo Azimutal de trabajo con la ayuda de las coordenadas de los bancos antes mencionados y el software de la Estación Total.

6. Con la estación total nivelada y orientada se procedió a instalar los reflectores en cada perno de los bancos ubicados en cada vértice del triángulo.
7. Para obtener las coordenadas de cada vértice del triángulo se hacen disparos con la estación total (Fotografía 23) a cada uno de los prismas reflectores ubicados en los bancos de marca. Los disparos consisten en presionar un botón en el teclado de la Estación total, teniendo en la mira el Banco de Marca de interés y el equipo automáticamente disparara un haz de luz infrarrojo que se reflejara en el lente prismático y será devuelto al distanciometro de la Estación Total el cual procesara la Información y determinara el valor de las coordenadas requeridas.



Fotografía 23. Realización de disparos con la Estación total.

4.1.6 DATOS DE CAMPO

Con el plan piloto N° 1 se han realizado cuatro mediciones, dos en el año 2003 y dos en el año 2004, a continuación se presentaran los datos de campo obtenidos.

▪ PRIMERA MEDICION REALIZADA EL 16 DE JULIO DE 2003

DATOS DE ENTRADA

- Fecha: 16/07/03
- Hora de Inicio: 10:27 AM
- Hora de Finalización: 11:35 AM
- Temperatura Ambiente: 26°C
- Presión Atmosférica: 970 mmhg.
- Constante de Prisma (PC): -30
- Factor de Corrección (PPM): 22
- Unidades utilizadas: Sistema Métrico (SI)
- Altura de aparato: 1.515 m
- Coordenadas BM BASE N° 1: X = 468542.45
Y = 293280.71
Z = 1375.00
- Coordenadas de (BS): X = 468614.89
Y = 293403.54
Z = 1350.00

BANCO DE MARCA ROCA

- Coordenadas (Lambert): X = 468610.46
Y = 293340.75
Z = 1364.59
- Distancia directa (Slope): 90.72 m
- Distancia Horizontal: 91.31 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -10.41m
- Angulo Directo (Azimutal): 48° 33' 33"
- Rumbo: N 48° 33' 33" E
- Angulo Zenital (Vertical): 97° 25' 46"
- Delta X = +68.00 m
- Delta Y = +60.04 m
- Delta Z = -10.41 m

BANCO DE MARCA N° 7(BM7)

- Coordenadas (Lambert): X = 468496.60
Y = 293151.315
Z = 1388.181
- Distancia directa (Slope): 137.81 m
- Distancia Horizontal: 137.91 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: +13.18m
- Angulo Directo (Azimutal): 199° 30' 41"
- Rumbo: S 19° 30' 41" W
- Angulo Zenital (Vertical): 85° 06' 21"
- Delta X = - 45.85 m
- Delta Y = - 129.40 m
- Delta Z = + 13.18 m

BANCO DE MARCA N° 8 (BM8)

- Coordenadas (Lambert):
X = 468429.91
Y = 293323.28
Z = 1348.787

- Distancia directa (Slope): 123.47 m
- Distancia Horizontal: 123.15 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -26.21m
- Angulo Directo (Azimutal): 290° 43'08"
- Rumbo: N 69° 16' 52" W

- Angulo Zenital (Vertical): 102° 55' 34"
- Delta X = -112.54 m
- Delta Y = + 42.57 m
- Delta Z = - 26.21 m

▪ **SEGUNDA MEDICION REALIZADA EL 16 DE OCTUBRE DE 2003**

DATOS DE ENTRADA

- Fecha: 06/10/03
- Hora de Inicio: 9:50 AM
- Hora de Finalización: 11:25 AM
- Temperatura Ambiente: 26 °C
- Presión Atmosférica: 960 mmhg.
- Constante de Prisma (PC): -30
- Factor de Corrección (PPM): 24
- Unidades utilizadas: Sistema Métrico (SI)
- Altura de aparato: 1.50 m
- Coordenadas BM BASE N° 1: X = 468542.45
Y = 293280.71
Z = 1375.00
- Coordenadas de (BS): X = 468614.89
Y = 293403.54
Z = 1350.00

BANCO DE MARCA ROCA

- Coordenadas (Lambert): X = 468610.46
Y = 293340.75
Z = 1364.59
- Distancia directa (Slope): 90.72 m
- Distancia Horizontal: 91.31 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -10.41m
- Angulo Directo (Azimutal): 48° 33'33"
- Rumbo: N 48° 33' 33" E
- Angulo Zenital (Vertical): 97° 24' 56"
- Delta X = +68.00 m
- Delta Y = +60.04 m
- Delta Z = -10.41 m

BANCO DE MARCA N° 7(BM7)

- Coordenadas (Lambert): X = 468496.60
Y = 293151.315
Z = 1388.181
- Distancia directa (Slope): 137.81 m
- Distancia Horizontal: 137.91 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: +13.18m
- Angulo Directo (Azimutal): 199° 30'41"
- Rumbo: S 19° 30' 41" W
- Angulo Zenital (Vertical): 85° 09' 11"
- Delta X = - 45.85 m
- Delta Y = - 129.40 m
- Delta Z = + 13.18 m

BANCO DE MARCA N° 8 (BM8)

- Coordenadas (Lambert):
X = 468429.91
Y = 293323.28
Z = 1348.787
- Distancia directa (Slope): 123.47 m
- Distancia Horizontal: 123.15 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -26.21m
- Angulo Directo (Azimutal): 290° 43'08"
- Rumbo: N 69° 16' 52" W
- Angulo Zenital (Vertical): 102° 52' 24"
- Delta X = -112.54 m
- Delta Y = + 42.57 m
- Delta Z = - 26.21 m

▪ **TERCERA MEDICION REALIZADA EL 14 DE FEBRERO DE 2004**

DATOS DE ENTRADA

- Fecha: 14/02/04
- Hora de Inicio: 10:28 AM
- Hora de Finalización: 11:40 AM
- Temperatura Ambiente: 20 °C
- Presión Atmosférica: 1015 mmhg.
- Constante de Prisma (PC): -30
- Factor de Corrección (PPM): -87
- Unidades utilizadas: Sistema Métrico (SI)
- Altura de aparato: 1.41 m
- Coordenadas BM BASE N° 1: X = 468542.45
Y = 293280.71
Z = 1375.00
- Coordenadas de (BS): X = 468614.89
Y = 293403.54
Z = 1350.00

BANCO DE MARCA ROCA

- Coordenadas (Lambert): X = 468610.45
Y = 293340.75
Z = 1364.59
- Distancia directa (Slope): 90.72 m
- Distancia Horizontal: 91.31 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -10.41m
- Angulo Directo (Azimutal): 48° 33' 33"
- Rumbo: N 48° 33' 33" E
- Angulo Zenital (Vertical): 97° 21' 56"
- Delta X = +68.00 m
- Delta Y = +60.00 m
- Delta Z = -10.41 m

BANCO DE MARCA N° 7(BM7)

- Coordenadas (Lambert): X = 468496.60
Y = 293151.315
Z = 1388.181
- Distancia directa (Slope): 137.81 m
- Distancia Horizontal: 137.91 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: +13.18m
- Angulo Directo (Azimutal): 199° 30' 41"
- Rumbo: S 19° 30' 41" W
- Angulo Zenital (Vertical): 85° 03' 04"
- Delta X = - 45.85 m
- Delta Y = - 129.40 m
- Delta Z = + 13.18 m

BANCO DE MARCA N° 8 (BM8)

- Coordenadas (Lambert):
X = 468429.90
Y = 293323.26
Z = 1348.846
- Distancia directa (Slope): 123.47 m
- Distancia Horizontal: 123.15 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -26.16m
- Angulo Directo (Azimutal): 290° 43'08"
- Rumbo: N 69° 16' 52" W
- Angulo Zenital (Vertical): 102° 53' 05"
- Delta X = -112.54 m
- Delta Y = + 42.57 m
- Delta Z = - 26.16 m

- **CUARTA MEDICION REALIZADA EL 28 DE FEBRERO DE 2004 (DEBIDO AL ENJAMBRE SISMICO EN FLANCO SURESTE DEL VOLCAN DE SAN SALVADOR)**

DATOS DE ENTRADA

- Fecha: 28/02/04
- Hora de Inicio: 10:00 AM
- Hora de Finalización: 11:30 AM
- Temperatura Ambiente: 18 °C
- Presión Atmosférica: 1015 mmhg.
- Constante de Prisma (PC): -30
- Factor de Corrección (PPM): -90
- Unidades utilizadas: Sistema Métrico (SI)
- Altura de aparato: 1.521 m
- Coordenadas BM BASE N° 1: X = 468542.45
Y = 293280.71
Z = 1375.00
- Coordenadas de (BS): X = 468614.89
Y = 293403.54
Z = 1350.00

BANCO DE MARCA ROCA

- Coordenadas (Lambert): X = 468610.48
Y = 293340.75
Z = 1364.59
- Distancia directa (Slope): 90.72 m
- Distancia Horizontal: 91.31 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -10.41m
- Angulo Directo (Azimutal): 48° 33'33"
- Rumbo: N 48° 33' 33" E
- Angulo Zenital (Vertical): 97° 21' 56"
- Delta X = +68.00 m
- Delta Y = +60.03 m
- Delta Z = -10.41 m

BANCO DE MARCA N° 7(BM7)

- Coordenadas (Lambert): X = 468496.60
Y = 293151.315
Z = 1388.163
- Distancia directa (Slope): 137.81 m
- Distancia Horizontal: 137.92 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: +13.16 m
- Angulo Directo (Azimutal): 199° 30'41"
- Rumbo: S 19° 30' 41" W
- Angulo Zenital (Vertical): 85° 07' 13"
- Delta X = - 45.85 m
- Delta Y = - 129.40 m
- Delta Z = + 13.16 m

BANCO DE MARCA N° 8 (BM8)

- Coordenadas (Lambert): X = 468429.90
Y = 293323.26
Z = 1348.787
- Distancia directa (Slope): 123.47 m
- Distancia Horizontal: 123.15 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -26.21 m
- Angulo Directo (Azimutal): 290° 43'08"
- Rumbo: N 69° 16' 52" W
- Angulo Zenital (Vertical): 102° 56' 53"
- Delta X = -112.54 m
- Delta Y = + 42.57 m
- Delta Z = - 26.21 m

4.1.7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Los datos a comparar entre las mediciones realizadas son las diferencias de altura entre los bancos de marca y la estación total es decir (ΔZ) (ver figuras de casos 1 y 2 en páginas 63 y 64), las cuales se han tabulado en una tabla de datos (Tabla 4).

	16-Jul-03	06-Oct-03	14-Feb-04	28-Feb-04
BM7	13.2	13.2	13.2	13.2
BMB	26.2	26.2	26.2	26.2
ROCA	10.4	10.4	10.4	10.4

Tabla 4. No se presento variación en las mediciones, indicando ausencia de actividad volcánica.

Al elaborar un gráfico de los valores antes presentados se obtiene un patrón de deformaciones (Gráfico 3), el cual nos presentara cual es la situación del área en estudio, para el caso de las mediciones realizadas durante este primer plan piloto, los datos además de ser constantes, demuestran que no se han presentado cambios de elevación en la red de deformaciones utilizada.

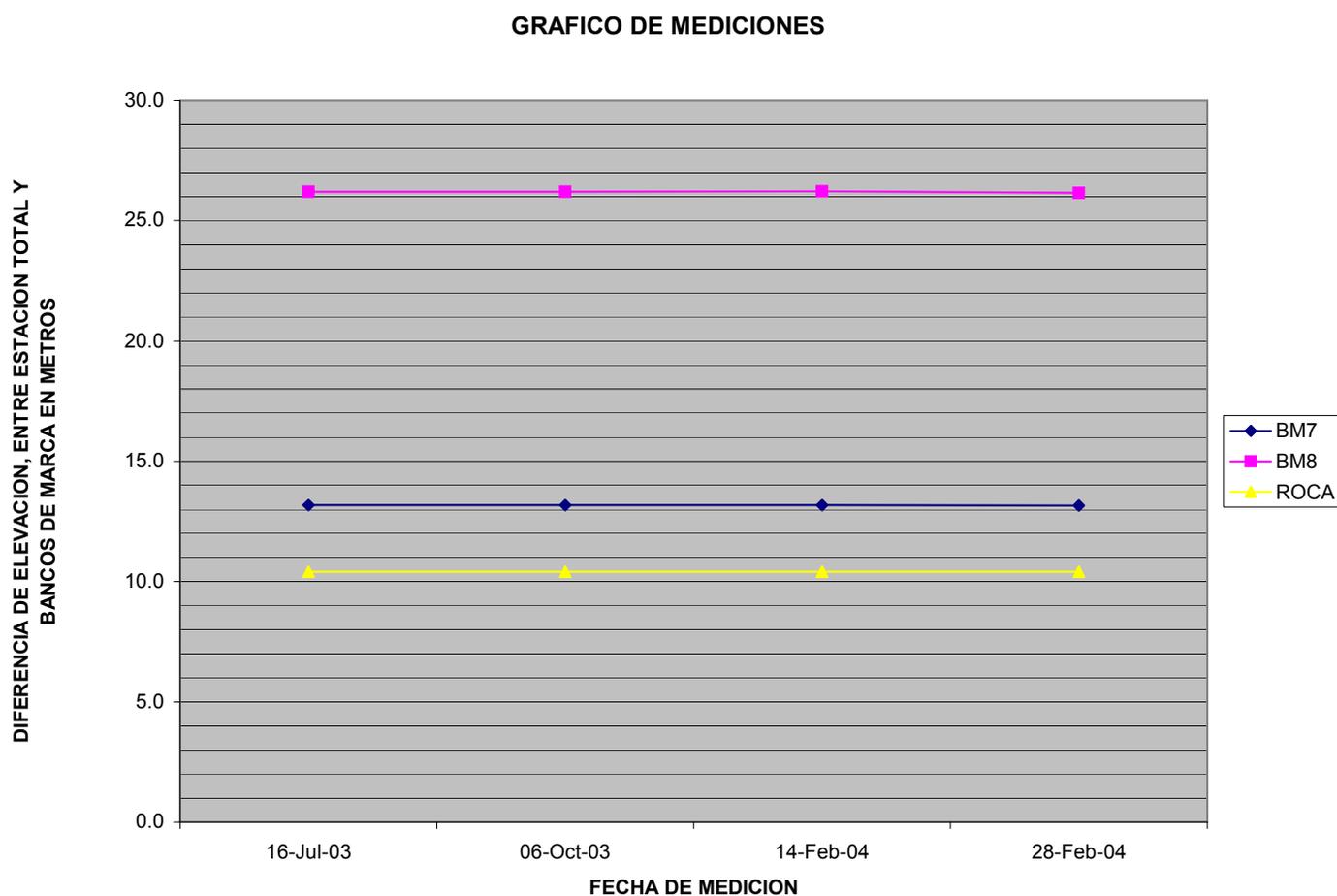


Gráfico 3. Comparación de resultados obtenidos en las diferentes mediciones realizadas en el Plan Piloto N° 1

Además de las diferencias de altura entre los vértices del triángulo y la estación total, es importante hacer notar otros datos como por ejemplo los ángulos azimutales o ángulos directos obtenidos, los cuales fueron constantes en las cuatro mediciones y permiten determinar la ubicación de los puntos en un plano XY de referencia (Figura 14).

ANGULOS AZIMUTALES OBTENIDOS

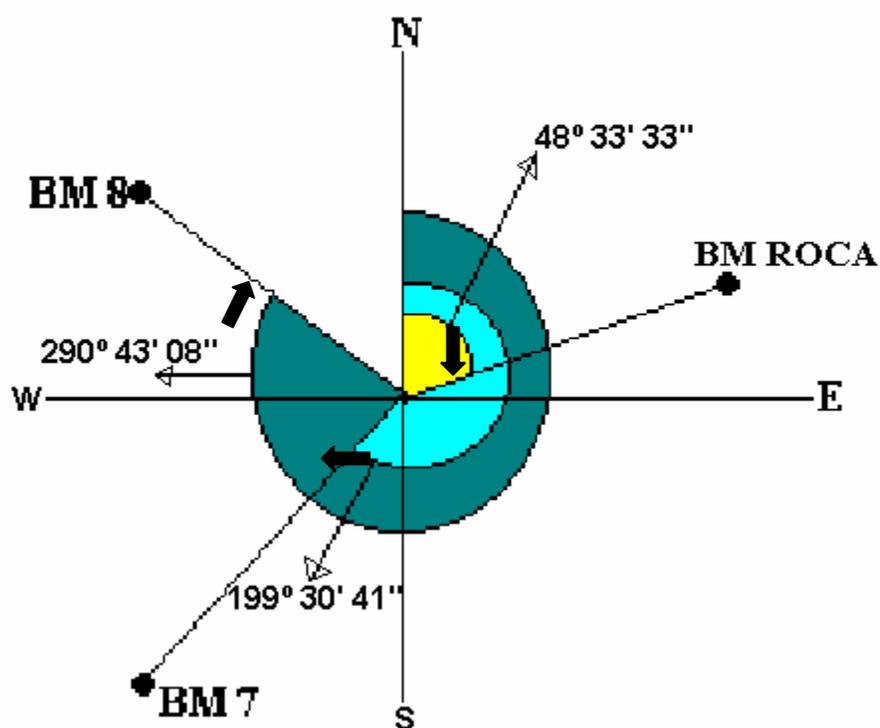


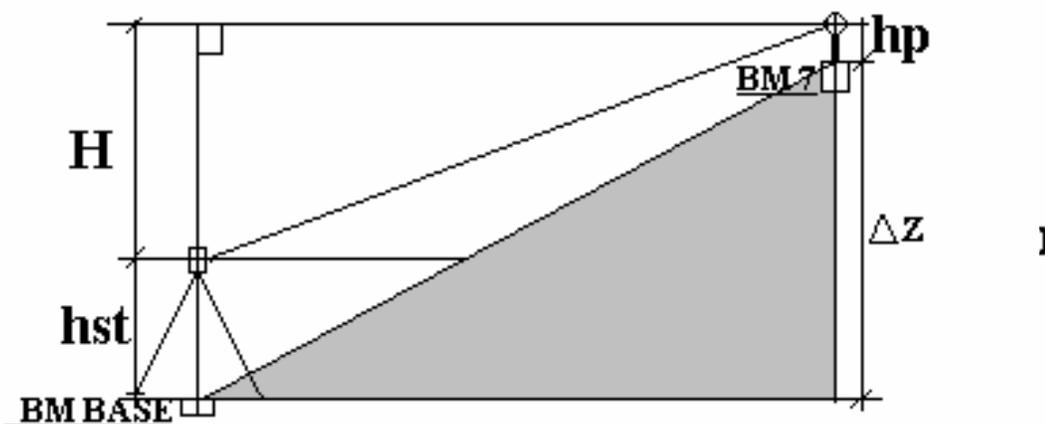
Figura 14. Ángulos azimutales obtenidos.

Debido a que se trata de una nivelación trigonométrica tridimensional (NTT), para el cálculo de las diferencias de altura (ΔZ) existen dos casos uno cuando el prisma se encuentra bajo el nivel de la estación total y otro cuando el prisma se encuentra sobre el nivel de la estación.

La estación total calcula automáticamente las diferencias de altura (ΔZ) independientemente que esta se encuentre arriba o abajo del prisma, pero para efectos de conocimiento general se presenta a continuación la formula matemática para el calculo manual de los datos.

CASO 1: Cuando el prisma se encuentra abajo del

CASO 2: Cuando el prisma se encuentra sobre el nivel de la estación total.



FORMULA: $\Delta Z = H + h_{st} - h_p$

DONDE:

ΔZ = Diferencia de altura entre bancos de marca

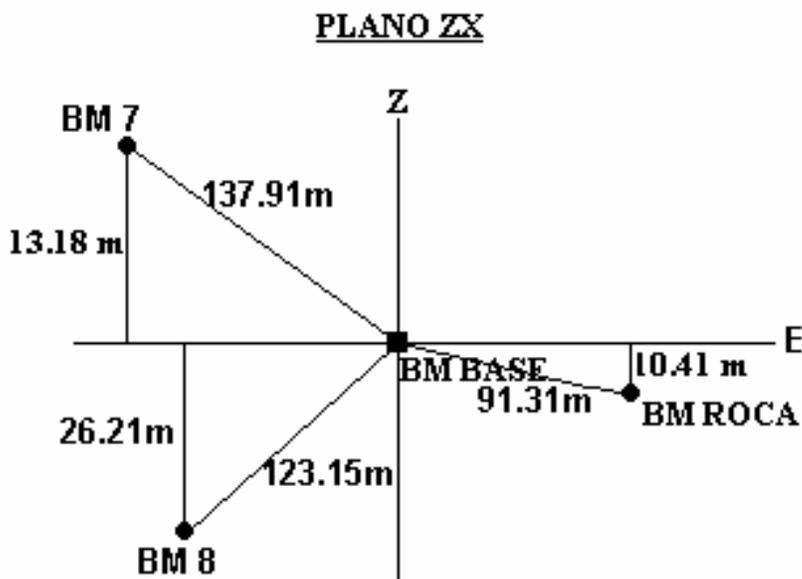
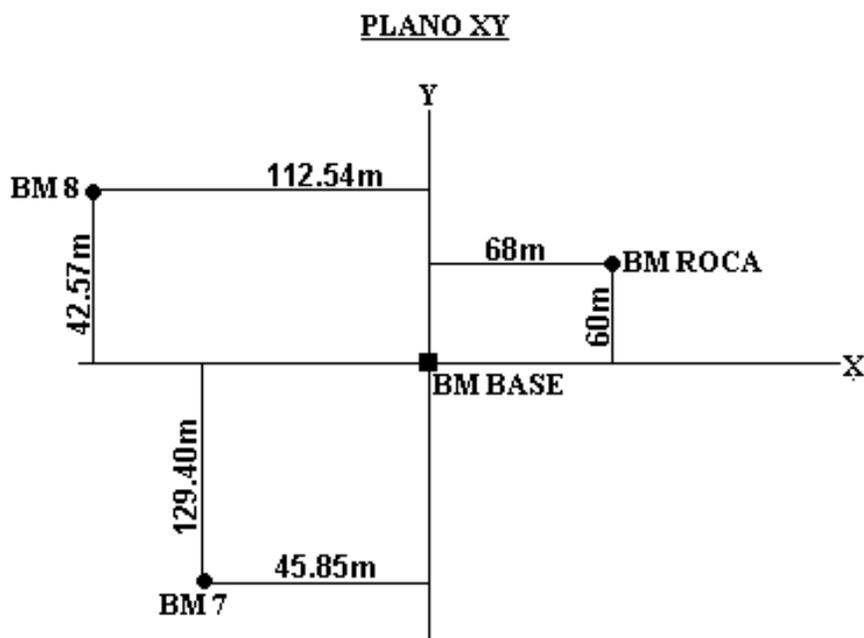
h_{st} = Altura de aparato

h_p = Altura de prisma

H = Diferencia de altura entre prisma y estación total

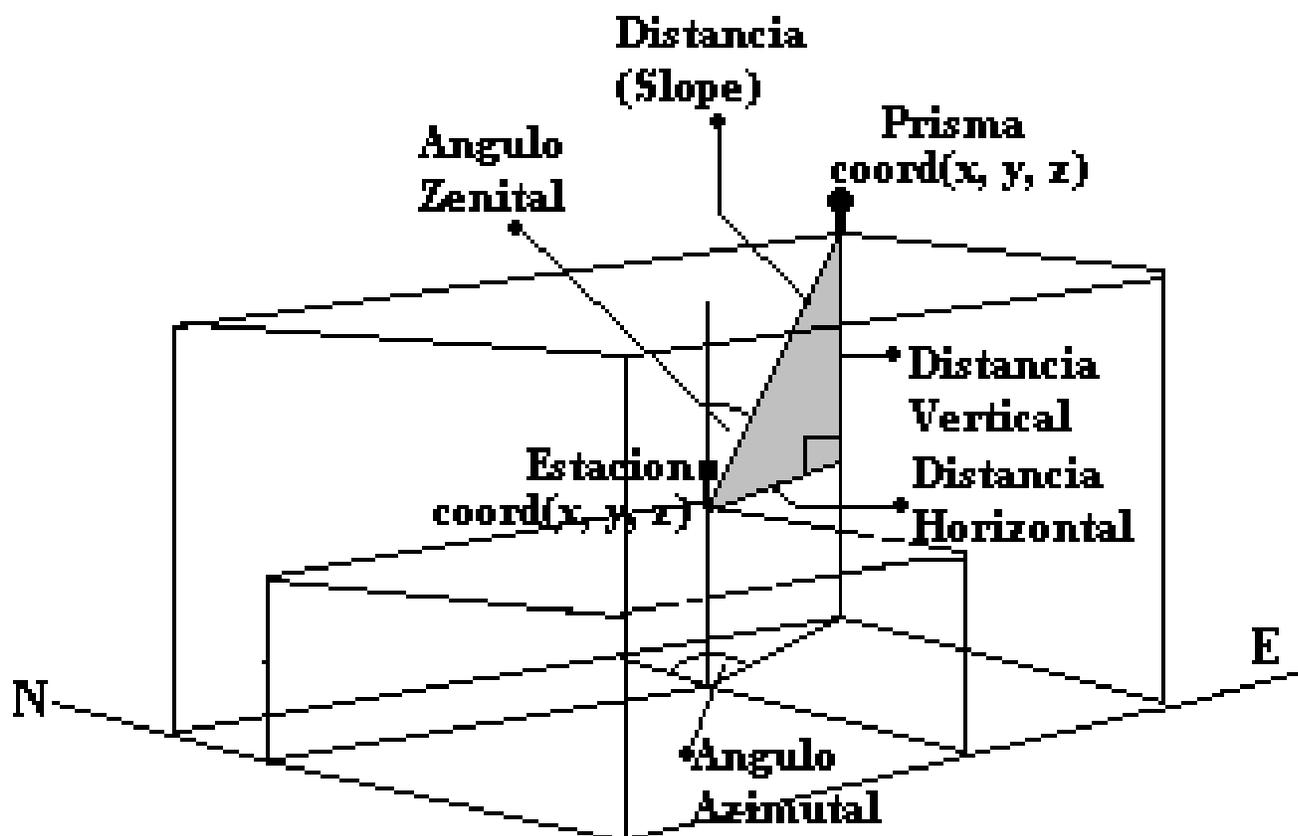
Otros datos importantes a considerar son las distancias horizontales entre la estación y los prismas (ΔX y ΔY), estos permiten conocer la posición de los puntos respecto al punto de medición proporcionando una idea bidimensional de la figura geométrica.

A continuación se presentan dos gráficos bidimensionales creados a partir de los datos de las mediciones.



Otra componente de la metodología son las coordenadas tridimensionales de cada prisma, que se obtienen con esta metodología, estos datos los proporciona de forma automática la estación total, pero para conocer como se obtienen las coordenadas y cual es la base de su cálculo se presenta un esquema explicativo y formula para el cálculo manual.

La formula para encontrar manualmente las coordenadas (X, Y, Z) de los



prismas son las siguientes:

$X = \text{coord. en } x \text{ de estación} + \text{distancia (slope)} \times \text{Sin (Angulo azimutal)} \times \text{Sin (Angulo Zenital)}$.

$Y = \text{coord. en } y \text{ de estación} + \text{distancia (slope)} \times \text{Sin (Angulo azimutal)} \times \text{Cos (Angulo Zenital)}$.

$Z = \text{coord. en } z \text{ de estación} + \text{Altura de aparato} + \text{distancia (slope)} \times \text{Cos (Angulo Zenital)} - \text{altura de prisma}$.

COMENTARIOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

- El equipo utilizado (Estación Total, prisma, trípode, etc.) funciona adecuadamente, no se tuvieron problemas de instrumentos durante las mediciones.
- Utilizando coordenadas Lambert se obtienen resultados lógicos y constantes.
- La eliminación de operaciones manuales en los cálculos mejoro la calidad de los datos y aumento su precisión, ya que de tener errores entre 20 y 120 centímetros con la metodología anteriormente utilizada por los técnicos del área de vulcanología del SNET actualmente se han tenido diferencias máximas de 5 milímetros.
- Se ha disminuido el tiempo de ejecución de la medición, ya que con la NTT el tiempo efectivo de trabajo es de una hora con cuarenta y cinco minutos (1h 45 min), y antes era de aproximadamente 6 Horas.
- Esta metodología no es definitiva, ya que esta sujeta a cambios, pero se trata del inicio para ir desarrollando una metodología acorde a los requerimientos económicos existentes y a la capacidad del equipo en uso.
- La disposición de la red de bancos de marca (Triangular) y la metodología de medición (Trigonométrica Tridimensional) forman una figura espacial muy estable, por lo que algún cambio en su forma podría determinarse a través de mediciones.
- El plan piloto N° 1 ha demostrado que supera la metodología anterior y da la pauta para continuar en la investigación y desarrollo de un plan piloto N° 2, para poder con esta información hacer una propuesta seria, económica, útil y factible de incorporar al programa de vigilancia volcánica del área de vulcanología del SNET.

4.2 PLAN PILOTO N° 2

4.2.1 DESCRIPCION DEL PROYECTO

El plan piloto N° 2 se desarrolló en la misma zona de primer plan piloto, pero se hicieron cambios en cuanto a la disposición de la red y la ubicación del Banco de Marca base N° 2. Esto con el objeto de mejorar la red y colocar el equipo en una zona alejada del área activa (Fractura).

El equipo utilizado será el mismo a diferencia del prisma reflectivo que se cambiara de un prisma sencillo a un prisma triple (Fotografías 24 y 25).



Fotografía 24. Prisma Triple usado con la Estación.



Fotografía 25. Prisma Sencillo usado con la Estación.

4.2.2 ZONA DE TRABAJO

Debido a que se pretende salir del área activa, se busco un lugar que proporcionara las condiciones adecuadas para colocar el aparato (Estación Total). El cual se llamara Banco de Marca Base N° 2. Este lugar debía de cumplir lo siguientes requisitos:

1. **Visibilidad:** El lugar escogido debe de poseer una amplia cobertura visual de la zona de las bocas eruptivas de la erupción de 1917.
2. **Accesibilidad:** Debido a lo delicado del equipo, el lugar debe de contar con buena vía de acceso. Transitado con vehículo rústico 4 X 4.
3. **Estabilidad:** El lugar a escoger debe de ser estable respecto a la zona de estudio.

En base a los criterios antes expuestos se escogió un lugar en la hacienda granadillas ubicado a 1.5 Kilómetros del área de estudio, desde el cual se puede observar el área de la fractura, este lugar cuenta con calle de acceso con tramos balastados y de concreto, transitado con todo tipo de vehículo rústico y se encuentra al pie sur del cerro el jabalí el cual parte del antiguo edificio del primer volcán San Salvador. (Figura 13).

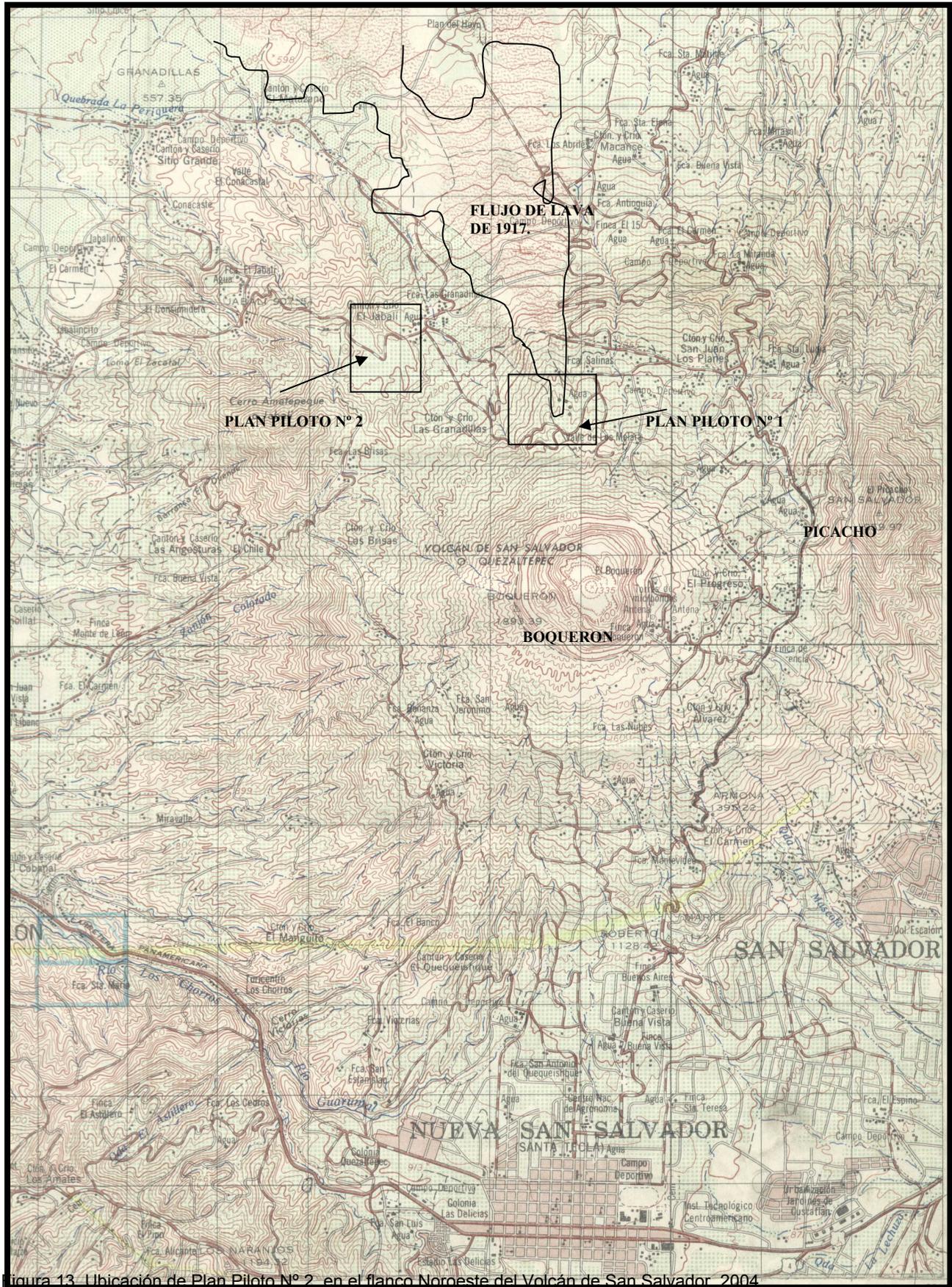


Figura 13. Ubicación de Plan Piloto N° 2 en el flanco Noroeste del Volcán de San Salvador. 2004

4.2.3 RED DE DEFORMACIONES

Debido a que se cambió de posición la estación, fue necesaria la construcción de una red de bancos de marca. Para la construcción de esta nueva red se formaron dos grupos, uno que se dedicó a la construcción de la misma y el otro se encargó de dirigir la ubicación procurando que estas sean visibles desde el punto de control.

La nueva red se construyó en la misma zona donde está la red del primer banco de marca (Figura 14).

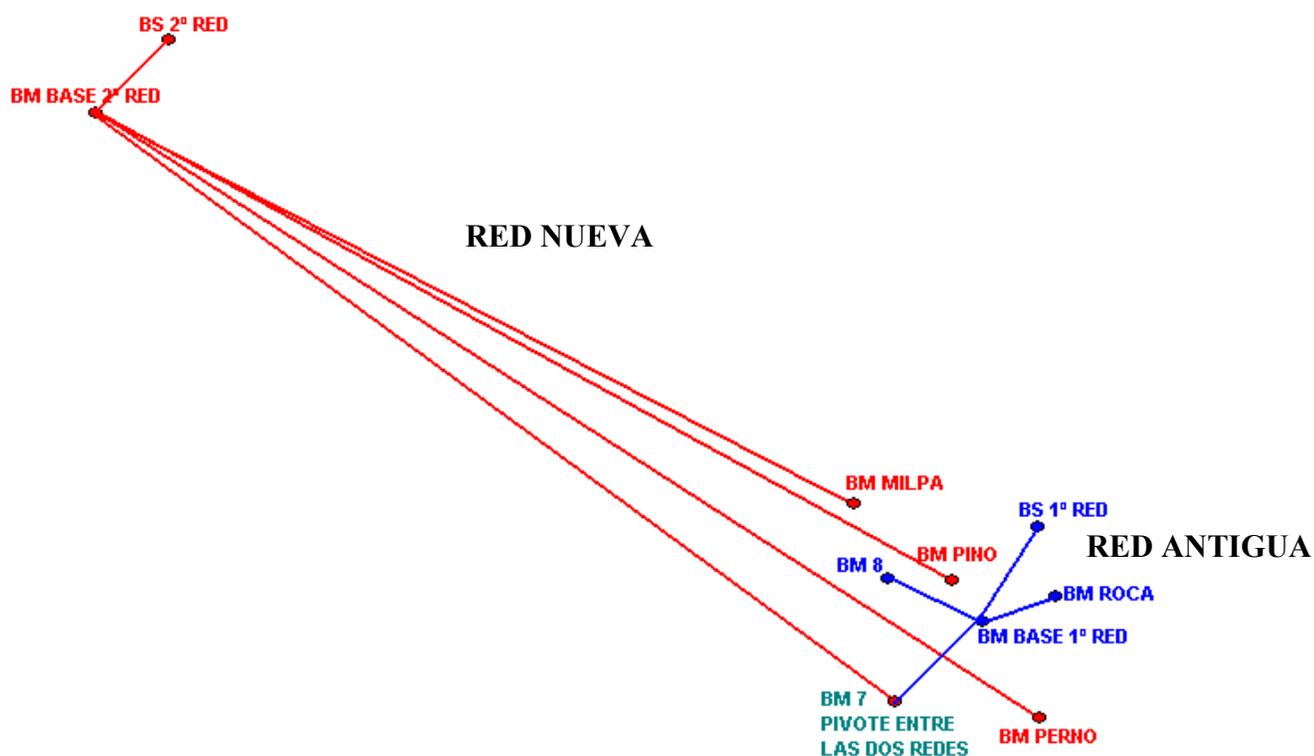


Figura 14. Nueva Red de Bancos de Marca construida para el desarrollo del Plan Piloto N° 2

Los nuevos bancos de marca se construyeron de concreto simple y se colocaron en el lugar manualmente (Fotografías 26 y 27).



Fotografía 26. Banco de marca Milpa.



Fotografía 27. Banco de marca Pino.

Para la construcción de estos bancos de marca se utilizaron los siguientes materiales: Agua, Cemento Pórtland, Arena y Grava. Además se utilizaron herramientas como: Pala, chuzo, nivel de caja, cincel, almádana y cuchara de albañil. Todos lo bancos de marca fueron colados en el lugar. Existe un banco de marco que es una roca de la colada de lava de 1917 a la cual se le coloco un perno para enroscar el prisma utilizando un pegamento epoxico de secado instantáneo.

4.2.4 METODOLOGIA DE MEDICIÓN

Con la red de Bancos de Marca instrumentada, se procedió a las mediciones, para ello se utilizó el programa de coordenadas (COORD) que trae de fabrica la estación en su software interno. El procedimiento para la colocación y orientación del equipo se detalla a continuación:

1. Obtención de coordenadas del Banco de Marca N° 2 y del Banco de marca para realizar la vista atrás o (Back Sigth). Utilizando un GPS portátil marca Etrex de fabricación Americana. Las coordenadas se utilizan en sistema Lambert ya que son las utilizadas por el Centro Nacional de Registros.
2. Instalación y nivelación de la estación en el BM base N° 2.
3. Introducción de las coordenadas (sistema Lambert) del banco de marca base N° 2 (x, y, z) así como la altura de aparato y la altura del prisma.
4. Introducción de coordenadas (sistema Lambert) del banco de marca para realizar la vista atrás, que servirá para dar orientación a la estación (obtención del Azimut).
5. Obtención automática del ángulo Azimutal de trabajo con la ayuda de las coordenadas de los bancos antes mencionados y el software de la Estación Total.
6. Con la estación total nivelada y orientada se procedió a instalar los reflectores en cada perno de los bancos ubicados en cada vértice del triángulo.
7. Realización de disparos con la estación total (fotografías 26 y 27) a cada uno de los reflectores.



Fotografía 26. Medición hecha con la Estación Total, 2004.



Fotografía N° 27. Medición hecha con la Estación Total, 2004

4.2.4 DATOS DE CAMPO

Durante el segundo plan piloto se han realizado tres mediciones todas en el año 2004, a continuación se presentaran los datos de campo obtenidos.

▪ PRIMERA MEDICION REALIZADA EL 17 DE JULIO DE 2004

DATOS DE ENTRADA

- Fecha: 17/07/04
- Hora de Inicio: 9:27 AM
- Hora de Finalización: 11:35 AM
- Temperatura Ambiente: 25°C
- Presión Atmosférica: 760 mmhg.
- Constante de Prisma (PC): -30
- Factor de Corrección (PPM): 9
- Unidades utilizadas: Sistema Métrico (SI)
- Altura de aparato: 1.68 m
- Coordenadas BM BASE N° 2: X = 467450.077
Y = 293886.468
Z = 1122.133
- Coordenadas de (BS): X = 467470.823
Y = 293901.806
Z = 1121.133

BANCO DE MARCA PINO (BMP)

- Coordenadas (Lambert): X = 468534.948
Y = 293315.797
Z = 1362.219
- Distancia Horizontal: 1249.07 m
- Angulo Directo (Azimutal): 117° 46' 52"
- Rumbo: S 62° 13' 08" E
- Angulo Zenital (Vertical): 78° 54' 44"
- Delta X = +1084.466 m
- Delta Y = - 571.317 m
- Delta Z = + 240.212 m

BANCO DE MARCA MILPA (BMM)

- Coordenadas (Lambert): X = 468395.718
Y = 293394.327
Z = 1328.305
- Distancia Horizontal: 1085.79 m
- Angulo Directo (Azimutal): 117° 29' 38"
- Rumbo: S 62° 30' 22" E
- Angulo Zenital (Vertical): 79° 03' 15"
- Delta X = + 945.638 m
- Delta Y = - 492.141 m
- Delta Z = + 206.172 m

BANCO DE MARCA PERNO (BMPE)

- Coordenadas (Lambert): X = 468576.285
Y = 293192.709
Z = 1399.734
- Distancia Horizontal: 1322.742 m
- Angulo Directo (Azimutal): 121° 38' 01"
- Rumbo: S 58° 21' 59" E
- Angulo Zenital (Vertical): 78° 08' 51"
- Delta X = + 1126.208 m
- Delta Y = - 693.759 m
- Delta Z = + 277.601 m

BANCO DE MARCA N° 7 (BM7)

- Coordenadas (Lambert): X = 468496.647
Y = 293151.72
Z = 1388.118
- Distancia Horizontal: 1306.309 m
- Angulo Directo (Azimutal): 125° 05' 13"
- Rumbo: S 54° 54' 47" E
- Angulo Zenital (Vertical): 78° 14' 55"
- Delta X = + 1046.523 m
- Delta Y = - 735.153 m
- Delta Z = + 266.048 m

BANCO DE MARCA ROCA

- Coordenadas (Lambert): X = 468610.48
Y = 293340.75
Z = 1364.59
- Distancia directa (Slope): 90.72 m
- Distancia Horizontal: 91.31 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -10.41m
- Angulo Directo (Azimutal): 48° 33' 33"
- Rumbo: N 48° 33' 33" E
- Angulo Zenital (Vertical): 97° 21' 56"
- Delta X = +68.00 m
- Delta Y = +60.03 m
- Delta Z = -10.41 m

BANCO DE MARCA N° 8 (BM8)

- Coordenadas (Lambert): X = 468429.90
Y = 293323.26
Z = 1348.787
- Distancia directa (Slope): 123.47 m
- Distancia Horizontal: 123.15 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -26.21 m
- Angulo Directo (Azimutal): 290° 43' 08"
- Rumbo: N 69° 16' 52" W
- Angulo Zenital (Vertical): 102° 56' 53"
- Delta X = -112.54 m
- Delta Y = + 42.57 m
- Delta Z = - 26.21 m

▪ **SEGUNDA MEDICION REALIZADA EL 9 DE SEPTIEMBRE DE 2004**

DATOS DE ENTRADA

- Fecha: 09/09/04
- Hora de Inicio: 12:42 PM
- Hora de Finalización: 1:45 PM
- Temperatura Ambiente: 26°C
- Presión Atmosférica: 712 mmhg.
- Constante de Prisma (PC): -30
- Factor de Corrección (PPM): 27
- Unidades utilizadas: Sistema Métrico (SI)
- Altura de aparato: 1.66 m
- Coordenadas BM BASE N° 2: X = 467450.077
Y = 293886.468
Z = 1122.133
- Coordenadas de (BS): X = 467470.823
Y = 293901.806
Z = 1121.133

BANCO DE MARCA PINO (BMP)

- Coordenadas (Lambert): X = 468534.948
Y = 293315.797
Z = 1362.219
- Distancia Horizontal: 1249.07 m
- Angulo Directo (Azimutal): 117° 46' 52"
- Rumbo: S 62° 13' 08" E
- Angulo Zenital (Vertical): 78° 54' 44"
- Delta X = +1084.466 m
- Delta Y = - 571.317 m
- Delta Z = + 240.212 m

BANCO DE MARCA MILPA (BMM)

- Coordenadas (Lambert): X = 468395.718
Y = 293394.327
Z = 1328.305
- Distancia Horizontal: 1085.79 m
- Angulo Directo (Azimutal): 117° 29' 38"
- Rumbo: S 62° 30' 22" E
- Angulo Zenital (Vertical): 79° 03' 15"
- Delta X = + 945.638 m
- Delta Y = - 492.141 m
- Delta Z = + 206.172 m

BANCO DE MARCA PERNO (BMPE)

- Coordenadas (Lambert): X = 468576.285
Y = 293192.709
Z = 1399.734
- Distancia Horizontal: 1351.56 m
- Angulo Directo (Azimutal): 121° 38' 01"
- Rumbo: S 58° 21' 59" E
- Angulo Zenital (Vertical): 78° 08' 51"
- Delta X = + 1126.208 m
- Delta Y = - 693.759 m
- Delta Z = + 277.601 m

BANCO DE MARCA N° 7 (BM7)

- Coordenadas (Lambert): X = 468496.647
Y = 293151.72
Z = 1388.118
- Distancia Horizontal: 1306.309 m
- Angulo Directo (Azimutal): 125° 05' 13"
- Rumbo: S 54° 54' 47" E
- Angulo Zenital (Vertical): 78° 14' 55"
- Delta X = + 1046.523 m
- Delta Y = - 735.153 m
- Delta Z = + 266.048 m

BANCO DE MARCA ROCA

- Coordenadas (Lambert):
X = 468610.48
Y = 293340.75
Z = 1364.59
- Distancia directa (Slope): 90.72 m
- Distancia Horizontal: 91.31 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -10.41m
- Angulo Directo (Azimutal): 48° 33' 33"
- Rumbo: N 48° 33' 33" E
- Angulo Zenital (Vertical): 97° 21' 56"
- Delta X = +68.00 m
- Delta Y = +60.03 m
- Delta Z = -10.41 m

BANCO DE MARCA N° 8 (BM8)

- Coordenadas (Lambert):
X = 468429.90
Y = 293323.26
Z = 1348.787
- Distancia directa (Slope): 123.47 m
- Distancia Horizontal: 123.15 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -26.21 m
- Angulo Directo (Azimutal): 290° 43' 08"
- Rumbo: N 69° 16' 52" W
- Angulo Zenital (Vertical): 102° 56' 53"
- Delta X = -112.54 m
- Delta Y = + 42.57 m
- Delta Z = - 26.21 m

▪ **TERCERA MEDICION REALIZADA EL 6 DE NOVIEMBRE DE 2004**

DATOS DE ENTRADA

- Fecha: 06/11/04
- Hora de Inicio: 11:55 AM
- Hora de Finalización: 12:40 PM
- Temperatura Ambiente: 25°C
- Presión Atmosférica: No disponible.
- Constante de Prisma (PC): -30
- Factor de Corrección (PPM): No disponible.
- Unidades utilizadas: Sistema Métrico (SI)
- Altura de aparato: 1.687 m
- Coordenadas BM BASE N° 2: X = 467450.077
Y = 293886.468
Z = 1122.133
- Coordenadas de (BS): X = 467470.823
Y = 293901.806
Z = 1121.133

BANCO DE MARCA PINO (BMP)

- Coordenadas (Lambert): X = 468533.85
Y = 293313.703
Z = 1362.099
- Distancia Horizontal: 1249.083 m
- Angulo Directo (Azimutal): 117° 51' 22"
- Rumbo: S 62° 08' 38" E
- Angulo Zenital (Vertical): 78° 55' 26"
- Delta X = +1083.77 m
- Delta Y = - 572.765 m
- Delta Z = + 239.97 m

BANCO DE MARCA MILPA (BMM)

- Coordenadas (Lambert): X = 468394.756
Y = 293392.479
Z = 1328.225
- Distancia Horizontal: 1085.78 m
- Angulo Directo (Azimutal): 117° 36' 21"
- Rumbo: S 62° 23' 39" E
- Angulo Zenital (Vertical): 79° 03' 30"
- Delta X = + 944.679 m
- Delta Y = - 493.989 m
- Delta Z = + 206.092 m

BANCO DE MARCA PERNO (BMPE)

- Coordenadas (Lambert): X = 468574.95
Y = 293190.53
Z = 1399.666
- Distancia Horizontal: 1351.55m
- Angulo Directo (Azimutal): 121° 44' 04"
- Rumbo: S 58° 15' 20" E
- Angulo Zenital (Vertical): 78° 09' 01"
- Delta X = + 1124.873 m
- Delta Y = - 695.938 m
- Delta Z = + 277.533 m

BANCO DE MARCA N° 7 (BM7)

- Coordenadas (Lambert): X = 468495.55
Y = 293149.72
Z = 1389.56
- Distancia Horizontal: 1306.648 m
- Angulo Directo (Azimutal): 125° 10' 21"
- Rumbo: S 54° 49' 39" E
- Angulo Zenital (Vertical): 78° 11' 24"
- Delta X = + 1045.473 m
- Delta Y = - 736.748 m
- Delta Z = + 267.427 m

BANCO DE MARCA ROCA

- Coordenadas (Lambert): X = 468610.48
Y = 293340.75
Z = 1364.59
- Distancia directa (Slope): 90.72 m
- Distancia Horizontal: 91.31 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -10.41m
- Angulo Directo (Azimutal): 48° 33' 33"
- Rumbo: N 48° 33' 33" E
- Angulo Zenital (Vertical): 97° 21' 56"
- Delta X = +68.00 m
- Delta Y = +60.03 m
- Delta Z = -10.41 m

BANCO DE MARCA N° 8 (BM8)

- Coordenadas (Lambert): X = 468429.90
Y = 293323.26
Z = 1348.787
- Distancia directa (Slope): 123.47 m
- Distancia Horizontal: 123.15 m
- Diferencia de altura entre Bancos de marca: -26.21 m
- Angulo Directo (Azimutal): 290° 43' 08"
- Rumbo: N 69° 16' 52" W
- Angulo Zenital (Vertical): 102° 56' 53"
- Delta X = -112.54 m
- Delta Y = + 42.57 m
- Delta Z = - 26.21 m

4.2.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Los datos a comparar entre las mediciones realizadas son las diferencias en los tres vectores de desplazamiento (X, Y, Z), entre el banco de marca base y los bancos de marca de la red EDM, (Tabla 5).

PLAN PILOT N° 1

PLAN PILOTO N° 2

ΔX		17-Jul-04	04-Sep-04	06-Nov-04			17-Jul-04	04-Sep-04	06-Nov-04
	BM7	45.9	45.9	45.9		BM7	1046.5	1046.5	1045.5
	BM8	112.5	112.5	112.5		MILPA	945.6	945.6	944.7
	ROCA	68.0	68.0	68.0		PERNO	1126.2	1126.2	1124.9
					PINO	1084.5	1084.5	1083.8	

ΔY		17-Jul-04	04-Sep-04	06-Nov-04			17-Jul-04	04-Sep-04	06-Nov-04
	BM7	129.4	129.4	129.40		BM7	735.2	735.2	736.7
	BM8	42.6	42.6	42.60		MILPA	492.1	492.1	494.0
	ROCA	60.0	60.0	60.0		PERNO	693.8	693.8	695.9
					PINO	571.3	571.3	572.8	

ΔZ		17-Jul-04	04-Sep-04	06-Nov-04			17-Jul-04	04-Sep-04	06-Nov-04
	BM7	13.2	13.2	13.2		BM7	266.1	266.1	267.4
	BM8	26.2	26.2	26.2		MILPA	206.2	206.2	206.1
	ROCA	10.4	10.4	10.40		PERNO	277.6	277.6	277.5
					PINO	240.2	240.2	240.0	

Tabla 5. Comparación de resultados obtenidos durante las mediciones del Plan Piloto N° 2.

Al elaborar un grafico de los valores antes presentados se obtiene un patrón de deformaciones en los tres vectores (X, Y, Z) (Gráficos 4, 5 y 6), lo que proporciona información acerca de cual es la situación del área en estudio.

Para el caso de las mediciones realizadas durante el segundo plan piloto, en las primera dos mediciones los datos son constantes y no presenta variaciones, pero la tercera medición muestra cambios en los valores, sobre todo en los ejes X y Y.

Respecto a lo anterior, se revisaron los datos de campo y el procedimiento realizado y el cambio en los valores se atribuye a que durante la tercera medición no se contó con el valor de la presión atmosférica ya que esta fue asumida y debido a que las distancia medidas son grandes, cualquier cambio en el ambiente que no se considere afecta directamente la medición. Además se observa que el cambio en el valor del ángulo azimutal es constante con un valor de $06'39''$, lo que podría deberse también a que la estación se referenció mal al momento de estar introduciendo los datos de campo.

Se concluye que el cambio mostrado en la tercera medición se debe a error del aparato de medición y no a cambio de la ladera del volcán y se mantiene la misma condición de estabilidad de la ladera mostrada a través de todas las mediciones realizada desde el año 2002.

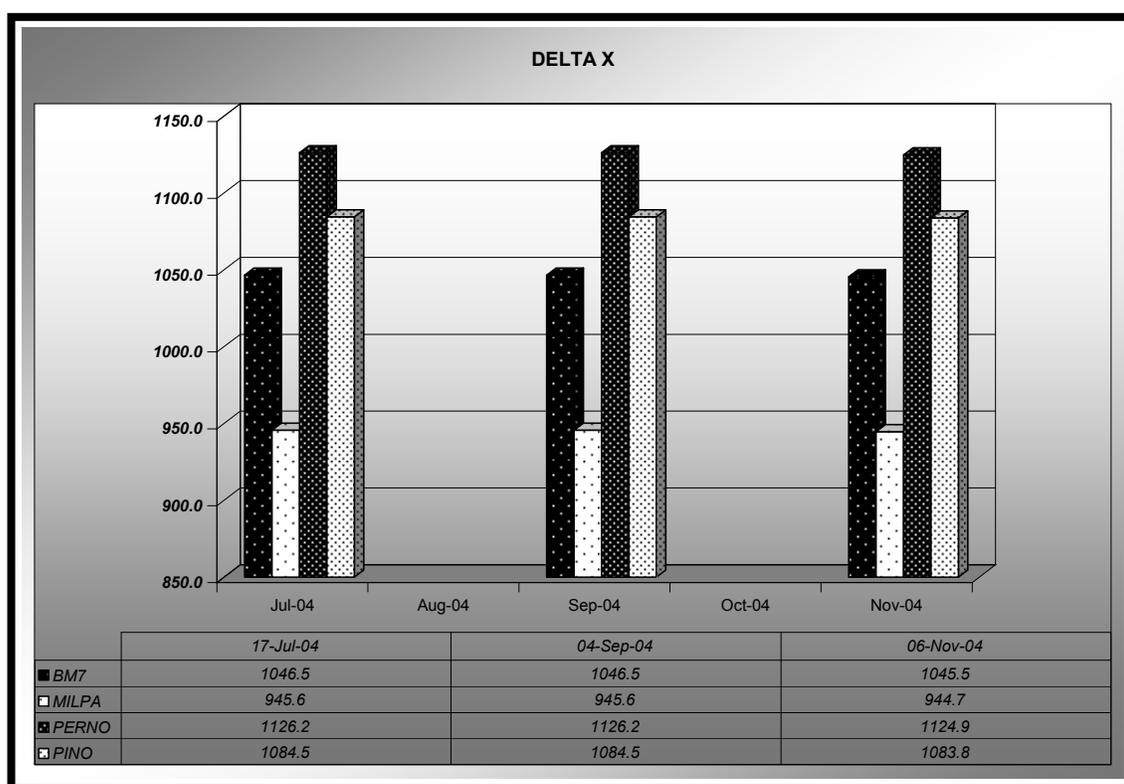


Grafico 4. Comparación de datos en vector "X"

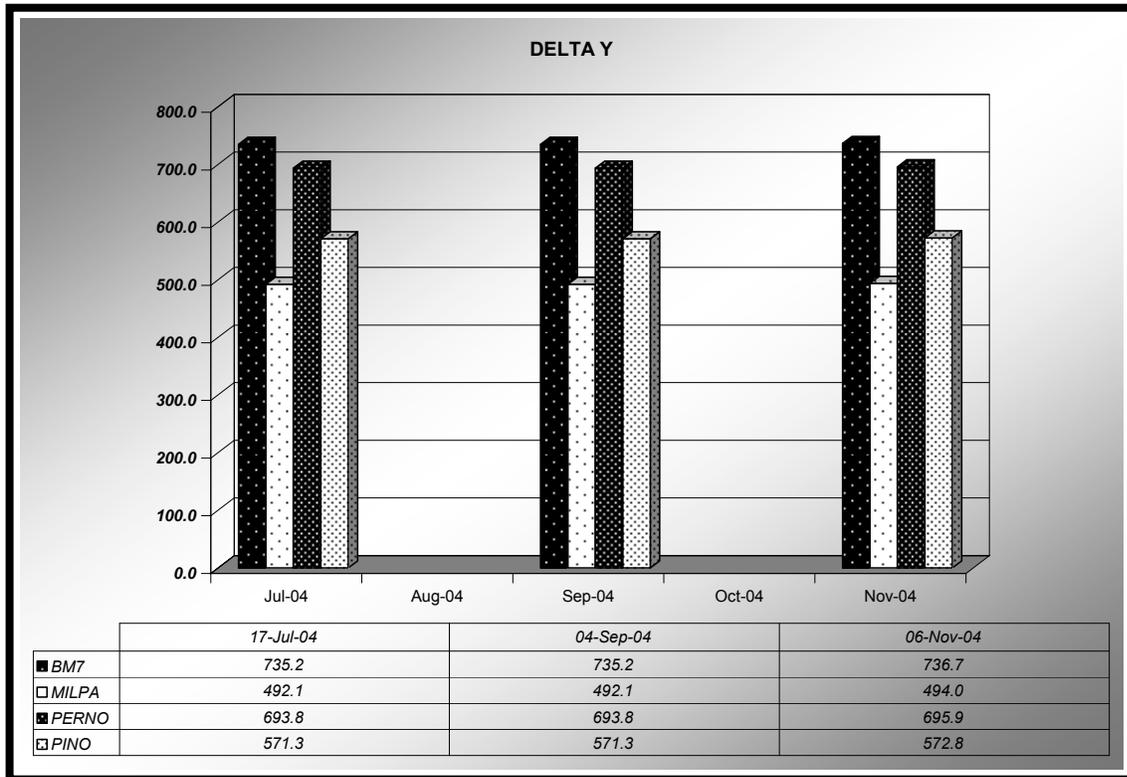


Grafico 5. Comparación de datos en vector "Y"

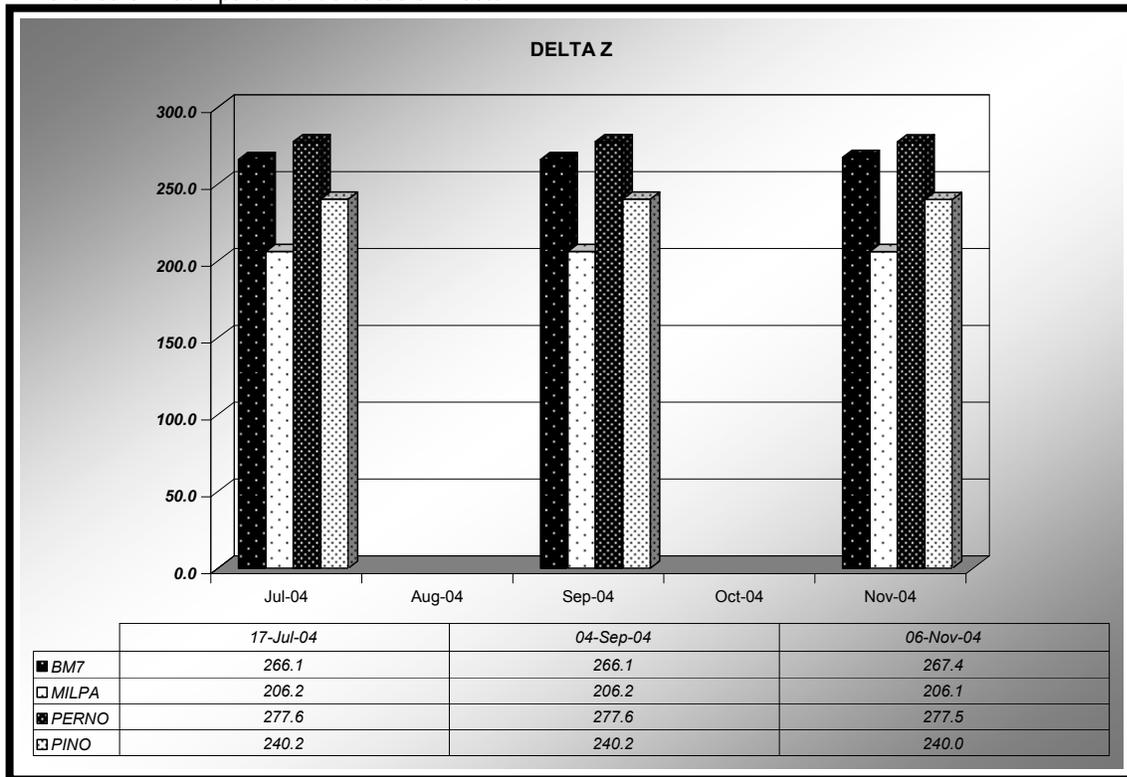


Grafico 6. Comparación de datos en vector "Z"

Se puede observar en los gráficos que los valores son constantes en las mediciones realizadas, excepto la última medición que presenta algunos cambios de lo cual ya se habló anteriormente.

Para poder tener un verdadero patrón de deformaciones se necesitan de mayor cantidad de mediciones para poder ir comparando y revisando aquellos casos en que se presente cambios.

4.2.6 COMENTARIOS GENERALES

- E plan piloto N° 2 ha servido para confirmar y sustentar que la metodología utilizada en el plan piloto N° 1 es efectiva en cuanto a calidad y cantidad de información, uso de los recursos y tiempo utilizado para la medición.
- Los datos continúan siendo constantes y estables, en todas las mediciones.
- El equipo ha funcionado adecuadamente aun cuando se ha aumentado la distancia de los disparos, aunque se debe de tener mayor cuidado con los datos del ambiente ya que estos influyen en la calidad de los datos.
- El lugar donde se ha instalado la estación cuenta con buena vía de acceso y es un lugar estable, el único inconveniente lo representa el echo de que el lugar es la cancha de fútbol de la finca Granadilla y el punto topográfico ha sido objeto de vandalismo por parte de los vecinos, ya que un tornillo de 1.0 m de longitud que se instalo en el lugar fue sacado a los pocos días de haber sido colocado, por lo que actualmente se ha dejado trompos de madera con un clavo en el lugar el cual no ha sido movido hasta el momento.
- Con la finalización de los dos planes pilotos se procederá a hacer la propuesta de trabajo para el área de vulcanología del SNET.

4.3 PROPUESTA DE METODOLOGIA A USAR

4.3.1 DESCRIPCION DE LA PROPUESTA

Después de realizar la investigación de metodologías aplicadas con éxito en otros países y el análisis de la metodología utilizada por lo técnicos del SNET, se procedió a efectuar dos planes pilotos para obtener experiencia de campo y aplicar aquellas técnicas que se podían adaptar y eran factibles de realizar con el equipo y recursos con que se cuenta.

Estos planes pilotos nos dan la pauta para hacer una propuesta de trabajo al área de vulcanología del SNET para que la técnica de medición de deformaciones sea incorporada al programa permanente de vigilancia volcánica del país.

Se le propone al SNET utilizar la Metodología de Nivelación trigonométrica tridimensional (NTT) con el uso de una estación total a través de un programa de coordenadas y una red de bancos de marca (red EDM).

Se ha comprobado en los planes pilotos que esta metodología cumple con los requerimientos de economía, factibilidad y facilidad de realizar, claridad de datos y adecuada a los recursos y equipo con que se cuenta.

En el siguiente capítulo se presentara una guía de procedimientos detallada para que esta metodología pueda ser utilizada por cualquier persona.

4.3.2 DETALLES GENERALES

Para el desarrollo de la metodología propuesta se necesita de requerimientos mínimos de personal y equipo, para que se desarrolle adecuadamente. Estos requerimientos son:

1. **Requerimientos de equipo:** Para la correcta realización de la medición se necesita llevar al campo el siguiente equipo y herramientas:
 - a. Vehículo 4 X 4.
 - b. Estación Total con baterías cargadas.
 - c. Trípode en buen estado.
 - d. Bastón para prisma con nivel de burbuja.
 - e. Prisma sencillo para mediciones cortas y Prisma triple para mediciones de mayor distancia.
 - f. Termómetro manual.
 - g. 2 Radios de comunicación.
 - h. 2 Cintas métricas.
 - i. Brújula manual (No indispensable)
 - j. Libro de campo para anotaciones.
 - k. Corvo.
 - l. Cámara fotográfica.
 - m. Celular.

2. **Requerimientos de personal:** La metodología requiere de cuatro personas para realizar las mediciones, dos encargadas de la estación y dos de la colocación de los prismas en los bancos de marca. Además se requiere de seguridad de la PNC debido a que las áreas volcánicas son propensas a los asaltos y el equipo con se cuenta en especializado y de alto costo económico.
3. **Requerimientos computacionales:** Para el procesamiento de los datos se pueden realizar en el programa AUTOCAD 2005 o cualquier otro programa que trabaje con archivos del tipo (.dwg). En el presente trabajo todos los datos fueron procesados en autocad.
4. **Construcción de la red EDM:** Para la construcción de la red se necesitan de los requerimientos de materiales y de personal:
 - a. Cemento (Cantidad depende del numero de bancos de marca)
 - b. Arena (Cantidad depende del numero de bancos de marca)
 - c. Grava (Cantidad depende del numero de bancos de marca)
 - d. Agua (Cantidad depende del numero de bancos de marca)
 - e. Chuzo
 - f. Cuchara duplex
 - g. Taladro inalámbricos.
 - h. Pegamento epoxico.
 - i. Tornillos de ½" pulgada para enroscar los prismas.
 - j. El número mínimo de personas para construir una red de 4 bancos de marca en un día es de 3 a 4 personas.

4.3.3 RESULTADOS ESPERADOS

Los requerimientos antes descritos forman la base principal para desarrollar una metodología de deformaciones (NTT). Con esta metodología se podría desarrollar una agenda anual de mediciones para ir formando un archivo de datos que permita hacer valoraciones en caso de crisis.

La red se puede mejorar o cambiar de posición, esto depende si se tiene acceso a un equipo con mayor alcance o equipos mas sofisticados, que permita obtener mayor precisión en las mediciones.

4.3.4 RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir utilizando las redes EDM construidas en la ladera noroeste del volcán de San Salvador, pero queda a criterio de los técnicos del SNET continuar con las mediciones periódicas. Estas redes se construyeron y mejoraron durante el desarrollo de los planes pilotos y están debidamente niveladas e instrumentadas, además de encontrarse en una zona con actividad volcánica reciente como es el área de la erupción fisural de 1917 (Figura 15).

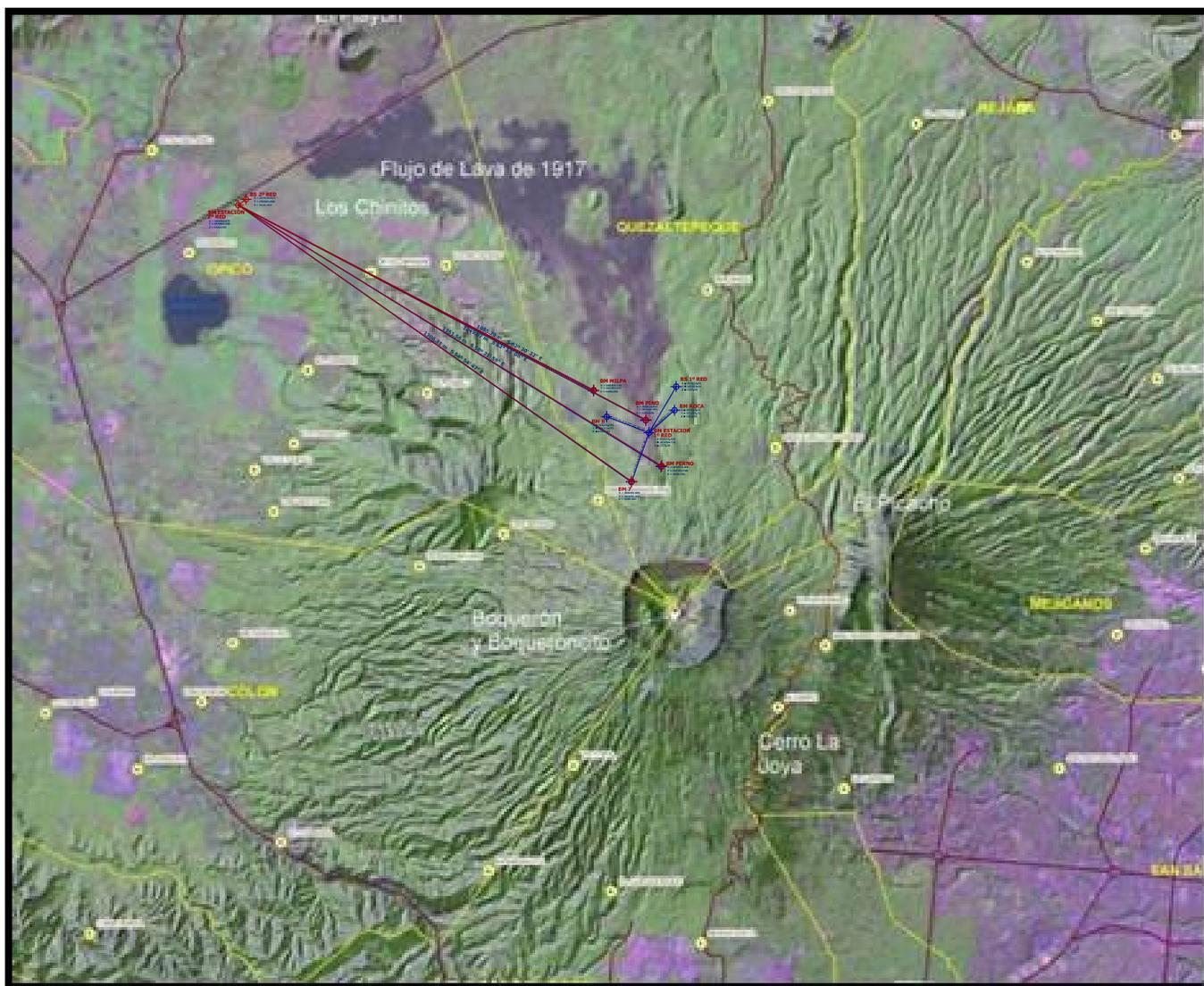


Figura 15. Plano de ubicación de las redes geodésicas. Al norte se observa flujo de lava de 1917.

Si bien es cierto que ambas redes son pequeñas, la verdad es que aportan buenos datos. De hecho no son las ideales, ya que solo se encuentra en un lado del volcán, además el trabajo comprendía la creación de una metodología y no la construcción de la mejor red para la medición de deformaciones.

Una red ideal debería de tener puntos de control en los cuatro flancos del volcán, pero para esto se necesita de equipo de mayor capacidad es decir, que pueda medir distancia de por lo menos 6 Kilómetros y además se debe de contar con una mayor cantidad de prismas reflectivos. A manera de ejemplo se muestra como debería de configurarse una red ideal para monitorear las deformaciones en el volcán de San Salvador (Figura 16).

La función principal de las redes de deformación es cubrir la mayor cantidad de área de la estructura volcánica, por eso es que sus dimensiones son del orden de varios kilómetros, esto se debe a que cuanto mayor sean el área medida y la distancia que se aleja el equipo del volcán, mejor es la calidad de la información ya que puede proporcionar cambios en cualquier dirección y también permite conocer si el volcán presenta cambios no solo debido a intrusión magmática sino también a ajustes gravitatorios de los materiales que los forman o movimientos de grandes masas de roca. La red construida y utilizada en los planes piloto no cubre un área representativa del volcán, ya que su propósito como se mencionó anteriormente era la de proporcionar un lugar para probar una metodología y desarrollarla, pero es probable que debido a encontrarse dentro de un área con reciente actividad efusiva desde el punto de vista geológico, podría proporcionar información puntual acerca de la zona.

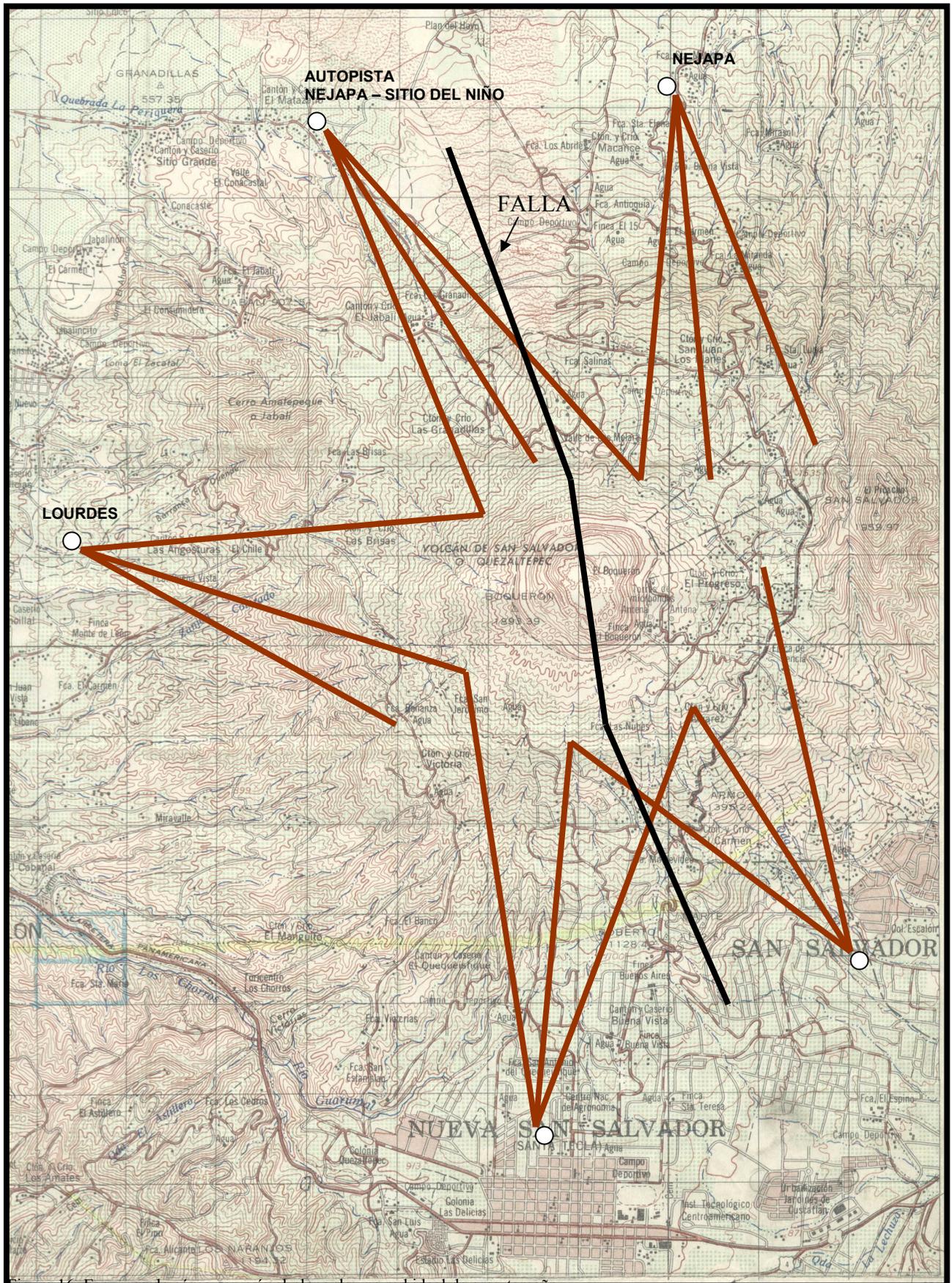


Figura 16. Esquema de cómo se vería el plano de una red ideal de gran tamaño.

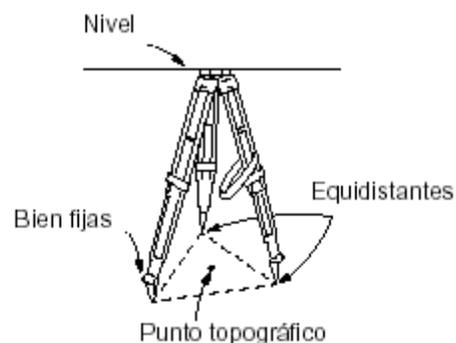
CAPITULO V

5.0 GUÍA DE PROCEDIMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE MEDICIONES

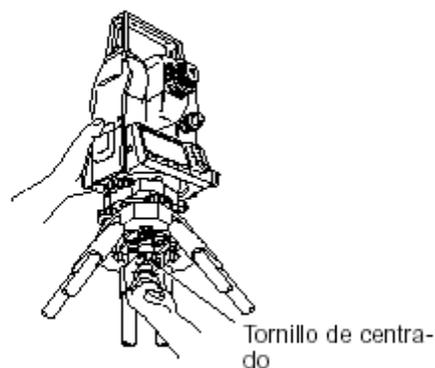
A continuación se describe paso por paso los procedimientos a seguir para realizar una medición de manera satisfactoria, por lo que se incluye gráficos e imágenes para su mejor comprensión.

5.1 CENTRADO DEL APARATO

1. **Monte el trípode:** Compruebe que las patas están separadas por igual y que la cabeza del trípode esté más o menos nivelada. Coloque el trípode de forma que la cabeza esté colocada encima del punto topográfico. Confirme que las patas del trípode estén bien fijadas en el suelo.



2. **Instale el instrumento:** Ponga el instrumento en la cabeza del trípode. Sujetándolo con un mando, apriete el tornillo de centrado de la parte inferior de la unidad para confirmar que está firmemente atornillado al trípode.



3. **Enfoque del punto topográfico:** Mirando por el ocular de la plomada óptica, gire el ocular para enfocar el retículo.

Enfoque del punto topográfico

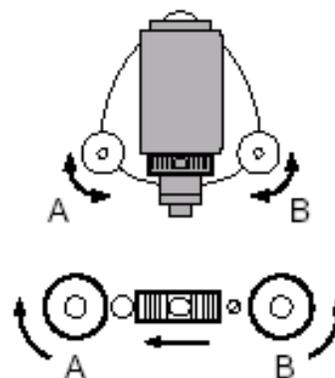
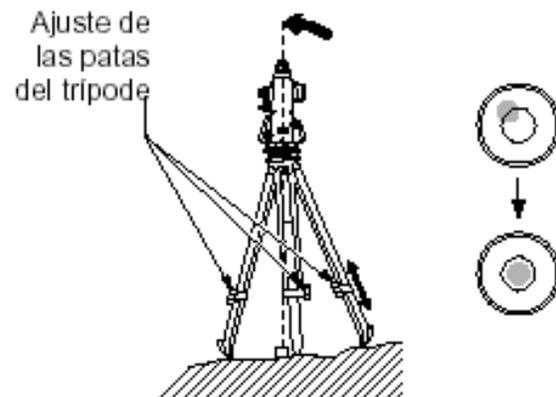


5.2 NIVELADO DEL APARATO

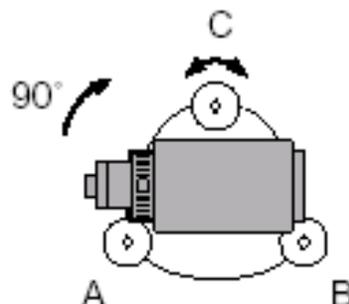
1. **Centre el punto topográfico en el retículo:** Ajuste los tornillos de nivelación del pie para centrar el punto topográfico en el retículo de la plomada óptica.

2. **Centre la burbuja en el nivel circular:** Centre la burbuja del nivel circular bien acortando la pata del trípode más próxima a la burbuja, bien alargando la pata más alejada de la burbuja. Ajuste una pata más para centrar la burbuja.

3. **Centre la burbuja en el nivel tubular:** Afloje el tornillo de apriete horizontal para girar la parte superior del instrumento hasta que el nivel tubular esté paralelo a una línea situada entre los tornillos A y B de nivelación del pie. Centre la burbuja de aire mediante los tornillos A y B de nivelación del pie. La burbuja se mueve hacia el tornillo que se gire en sentido horario.



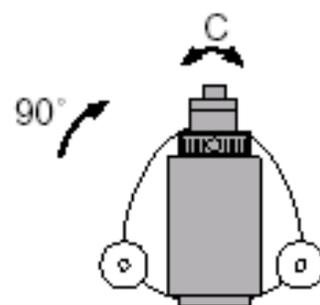
4. **Gire 90° y centre la burbuja:** Gire 90° la parte superior del instrumento. La base de nivelación estará ahora perpendicular a una línea situada entre los tornillos A y B de nivelación del pie. Utilice el tornillo C de nivelación del pie para centrar la burbuja.



5. **Gire otros 90° y revise la posición de la burbuja:** Gire la parte superior del instrumento otros 90° y compruebe que la burbuja está en el centro del nivel tubular. Si la burbuja está descentrada, proceda como sigue:

a. Gire los tornillos A y B de nivelación del pie por igual y en direcciones opuestas hasta eliminar la mitad del desplazamiento de la burbuja.

b. Gire la parte superior otros 90° y use el tornillo C de nivelación del pie para eliminar la mitad restante de desplazamiento en esa dirección.



6. **Compruebe que la burbuja está en la misma posición en cualquier dirección:** Gire el instrumento y compruebe que la burbuja de aire está en la misma posición en todas las direcciones. Si no es así, repita el procedimiento de nivelado.

7. **Centre el SET sobre el punto topográfico (SET500):** Afloje ligeramente el tornillo de centrado. Mirando por el ocular de la plomada óptica, deslice el instrumento sobre la cabeza del trípode hasta que el punto topográfico esté exactamente centrado en el retículo. Vuelva a apretar bien el tornillo de centrado.

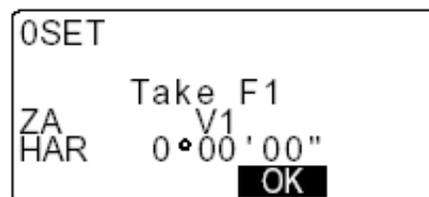
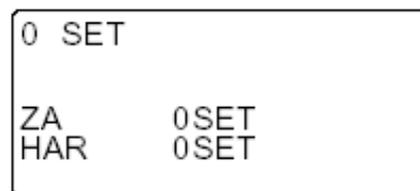
5.3 ENCENDIDO DEL APARATO

1. Encendido Pulse {ON} (ENCENDER):

Primero cerci3rese de que la bater3a esta instalada en la estaci3n. Al encender la estaci3n, se ejecuta una revisi3n para confirmar que el instrumento funciona correctamente. Terminada la revisi3n, en la pantalla se indica que el instrumento est3 preparado para la indexaci3n del c3rculo vertical y del horizontal.

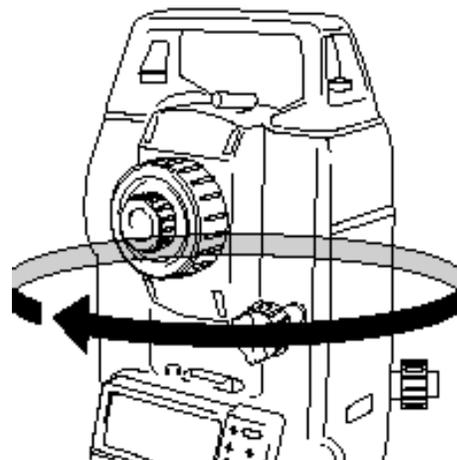
- Si la opci3n "H indexing" (indexaci3n horizontal) est3 configurada como "manual", no aparecer3 la l3nea "HAR 0 Set" (Configurar 3ngulo horizontal derecho).

- Si la opci3n "V indexing" (indexaci3n vertical) est3 configurada como "manual", el aspecto de la pantalla ser3 el de la ilustraci3n de la derecha.

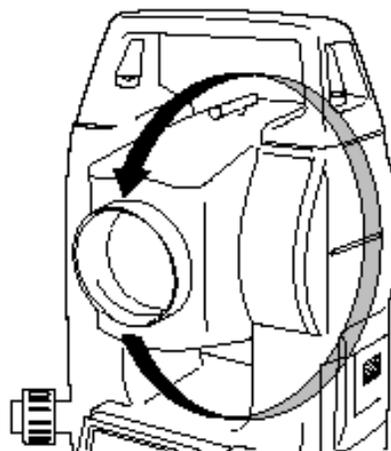


2. Indexaci3n del c3rculo horizontal y del c3rculo vertical:

Afloje el tornillo horizontal y gire la parte superior del instrumento hasta que el SET emita el pitido de la indexaci3n horizontal.



Afloje el tornillo vertical y bascule el antejo. La indexación tiene lugar cuando la lente del objetivo atraviesa el plano vertical en la cara 1. Terminadas la indexación horizontal y la vertical, aparece la pantalla del modo Meas (Medición). Lo cual indica que la estación esta lista para iniciar el procedimiento de entrada de datos relativos al clima, tipo de prisma y coordenadas utilizadas.

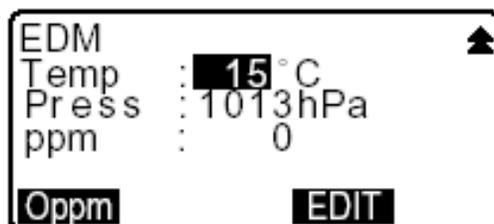
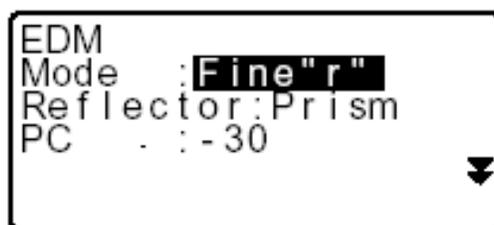


Meas	PC	-30
	ppm	0
S		
ZA	80°30'15"	
HAR	120°10'00"	P1
DIST	SHV	OSET COORD

5.4 CONFIGURACION DEL INSTRUMENTO (Introducción de parámetros base)

A continuación, se explica los valores de configuración EDM y los modos de configuración en el modo Meas (Medición). Esta pagina aparece después de haber realizado el procedimiento de Indexación, horizontal y vertical. Se pueden modificar todos los elementos para adaptarlos a la medición.

En la página del modo Meas (Medición), pulse [EDM].



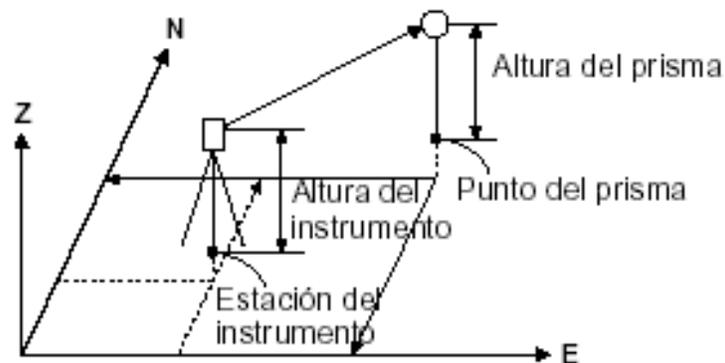
- Presionar [EDIT] para configura los elementos.
- El factor de corrección atmosférica (PPM) se calcula y configura automáticamente a partir de los valores de temperatura y presión atmosférica introducidos. Se debe de conocer la presión atmosférica y la temperatura en el lugar al momento de la medición.
- Mode: Este elemento se configure en Fine "r" (Precisa) para obtener el máximo rendimiento de la estación.

- Reflector: Se selecciona "Prism" ya que se esta trabajando con prismas reflectivos.
- PC (Constante del prisma): La constante de prisma o PC es de -30 para el tipo de prisma que se esta utilizando.
- Temp. (Temperatura): Se debe de introducir la temperatura al momento de la medición en grados centígrados °C.
- Press. (Presión atmosférica): Se debe de introducir la presión atmosférica en **mmhg** el momento de la medición.

Una vez realizados todos estos pasos se puede considerar configurada la estación y esta lista para configurar el programa de coordenadas (COORD).

5.5 UTILIZANDO EL PROGRAMA DE COORDENADAS

Mediante la medición de coordenadas, se pueden obtener las coordenadas tridimensionales del prisma a partir de las coordenadas del punto de estación, la altura del instrumento, la altura del prisma y de los ángulos azimutales de la estación de referencia, previamente introducidos.



- **INTRODUCCION DE COORDENADAS DEL BANCO DE MARCA BASE A LA ESTACION:**

1. En primer lugar, mida la altura existente desde el banco de marca base hasta el nivel del aparato con una cinta métrica, el nivel es una línea gris horizontal marcada en la estación.

NO := Y	0.000		
E0 := X	0.000		
Z0 := Z	0.000		
Inst.h:	1.400m		
Tgt.h:	1.200m		
1	2	3	4

2. En la primera página de la pantalla del modo Meas (Medición), pulse **[COORD]** y aparecerá la línea <Coord.>.

NO := Y	370.000		
E0 := X	10.000		
Z0 := Z	100.000		
Inst.h:	1.400m		
Tgt.h:	1.200m		
1	2	3	4

3. Seleccione "Stn data" (Datos de la estación). Utilizando el cursor y Pulse **[EDIT]** (EDITAR), y luego introduzca las

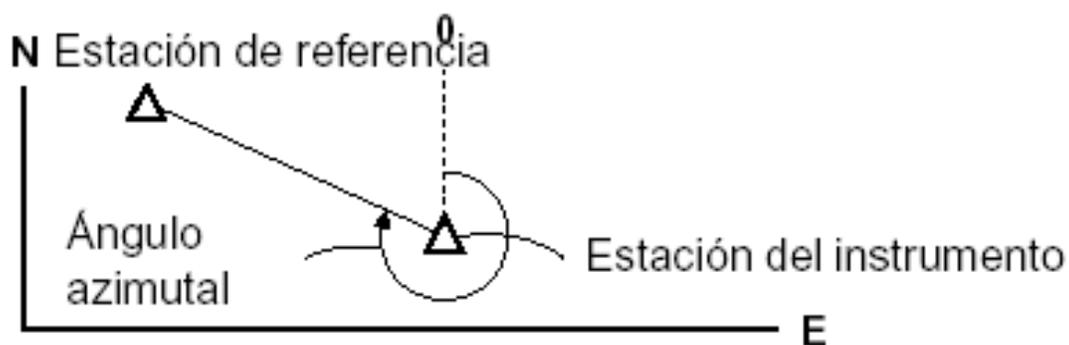
coordenadas del banco de marca base, la altura del instrumento y la altura del primer prisma que se medirá.

Es importante en este punto no introducir la altura del prisma en el bastón utilizado para hacer la vista atrás (Back sight), ya que la primera medición dará error porque la estación asume que la altura introducida es la del primer banco de marca.

4. Pulse **[OK]** (ACEPTAR) para establecer los valores introducidos. Volverá a aparecer <Coord> en pantalla.

- **CONFIGURACION DEL ANGULO AZIMUTAL**

El ángulo azimutal de la estación de referencia se calcula a partir de las coordenadas de la estación del instrumento y las coordenadas de la estación de referencia ya configuradas.



PROCEDIMIENTO:

1. **En <Coord>**: Seleccione "Set H angle"
(Configurar ángulo horizontal).

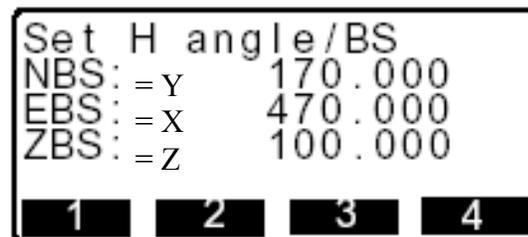
2. **Seleccione "Back sight"**

(Referencia): Pulse **[EDIT]** e introduzca las coordenadas del banco de marca utilizado para Back Sight.

3. **Pulse [OK] (ACEPTAR)**: Aparecen las coordenadas de la estación del instrumento. Chequear y verificar que estén correctas.

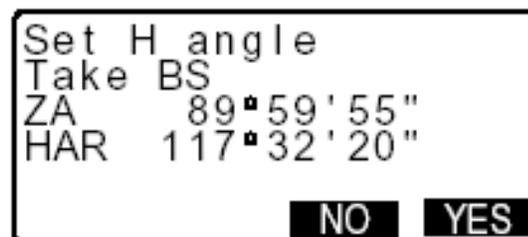
4. **Pulse [OK] (ACEPTAR)**: De nuevo para configurar las coordenadas del aparato.

5. **Observe la estación de referencia y pulse [YES] (SÍ)**: Para configurar la estación de referencia. Aparece de nuevo la pantalla <Coord>.



Set H angle/BS
NBS: = Y 170.000
EBS: = X 470.000
ZBS: = Z 100.000

1 2 3 4



Set H angle
Take BS
ZA 89° 59' 55"
HAR 117° 32' 20"

NO YES

5.6 MEDICIÓN DE COORDENADAS TRIDIMENSIONALES

PROCEDIMIENTO:

1. Observe el prisma en el punto topográfico.

2. En <Coord>, seleccione "Observation" (Observación) para empezar a medir. Aparecen en pantalla las coordenadas del prisma. Para salir de la medición, pulse **[STOP]** (DETENER).

N	240.490
E	340.550
Z	305.740
ZA	89° 42' 50"
HAR	180° 31' 20"
OBS	HT
	REC

- Si desea volver a establecer la altura del prisma, pulse **[HT]** (ALTURA). Cuando la altura del prisma del próximo punto sea distinta, vuelva a introducirla antes de comenzar la observación.

3. Para empezar la medición, observe el prisma siguiente y pulse **[OBS]** (OBSERVAR). Repita este paso hasta que haya medido todos los prismas.

5.6.1 MANEJO DE LA INFORMACION

Debido a que la estación es utilizada por el área de Hidrología del SNET, los valores de las mediciones no se pueden guardar en la memoria del aparato.

Es por esto que se diseñó una hoja para la recolección de datos de campo, los cuales se pasan después a AUTOCAD para obtener toda la información necesaria de cada banco de marca.

El formato de la hoja de recolección de datos se muestra a continuación.

HOJA DE DATOS			
TÉCNICO:			
INSTITUCIÓN:		COORDENADAS ESTACIÓN	
FECHA:		X	467450.077
HORA:		Y	293886.468
TEMPERATURA AMBIENTE:	°C	Z	1122.133
PRESIÓN ATMOSFÉRICA:	mmhg	COORDENADAS VISTA ATRÁS	
ALTURA DE APARATO:	mts.	X	467470.823
CONSTANTE DE PRISMA:	PC	Y	293901.806
FACTOR DE CORRECCIÓN:	PPM	Z	1121.133

2° RED

BANCO DE MARCA:		PINO	H. DE PRISMA		mts.
DATUM		1° MEDICIÓN		2° MEDICIÓN	
E = X	468534.543	X		X	
N = Y	293315.151	Y		Y	
Z	1362.345	Z		Z	

BANCO DE MARCA:		MILPA	H. DE PRISMA		mts.
DATUM		1° MEDICIÓN		2° MEDICIÓN	
E = X	468395.715	X		X	
N = Y	293394.327	Y		Y	
Z	1328.305	Z		Z	

BANCO DE MARCA:		PERNO	H. DE PRISMA		mts.
DATUM		1° MEDICIÓN		2° MEDICIÓN	
E = X	468576.285	X		X	
N = Y	293192.709	Y		Y	
Z	1399.734	Z		Z	

BANCO DE MARCA:		BM 7	H. DE PRISMA		mts.
DATUM		1° MEDICIÓN		2° MEDICIÓN	
E = X	468496.600	X		X	
N = Y	293151.315	Y		Y	
Z	1388.181	Z		Z	

CONCLUSIONES

- Ambos planes piloto ejecutados demostraron que la técnica NTT, cumple con los estándares requeridos, es decir, es factibles de realizar, económica y puede ser aplicada para ampliar el programa de vigilancia volcánica en El Salvador.
- La implementación de la técnica NTT para el monitoreo de deformaciones volcánicas, será una herramienta útil para recabar información a partir de mediciones sistemáticas, logrando con ello definir una línea base de datos en el actual periodo de reposo, en este caso del volcán de San Salvador.
- Desde el punto de vista topográfico, aun con las limitantes, ambas redes geodesicas resultan viables para el monitoreo de deformaciones del flanco noroeste del volcán de San Salvador
- La ejecución de los planes pilotos antes mencionados resulto valioso para la validación de la metodología planteada para el análisis de deformaciones volcánicas.
- El procedimiento para la identificación de nuevos sitios permitió satisfactoriamente la instalación de otros bancos de marca y la instrumentación de los mismos.

RECOMENDACIONES

- Es importante comenzar a recabar datos de mediciones para poder ir definiendo la línea base de comportamiento en periodos de calma del volcán de San Salvador, esto se obtendrá en la medida en que se continúe con las mediciones realizadas a la fecha.
- Las redes ya construidas se recomienda que sigan siendo utilizadas para aprovechar el esfuerzo y tener aunque sea a pequeña escala datos geodésicos de una de las laderas del volcán de San Salvador.
- Continuar con la investigación en deformaciones ya que es una de las principales herramientas en la determinación del comportamiento de los volcanes y es un excelente complemento de la técnica de análisis sísmico.
- Complementar esta investigación con otra de GPS, que permita mezclar la técnica NTT y la medición diferencial, para poder tener mejores resultados. Este nuevo estudio podría ser el tema de otro trabajo de graduación y daría continuidad a la investigación que se inicio con el presente estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- ARAÑA Saavedra Vicente y otros. VOLCANOLOGIA.
Editor Editorial Rueda. Edición 1984. España
- ARAÑA Saavedra Vicente y otros. VULCANISMO.
Editor Ediciones Istmo. Edición 1980. España
- DECKER Robert and Barbara. VOLCANO WATCHING.
Editor Hawaii Natural History Association.
Edicion 1997. USA
- D. CRANDELL, D. Mullineaux, C. Miller. VOLCANIC HAZARD
STUDIES IN THE CASCADES RANGE OF THE
WESTERN UNITED STATES. Editor Academic Press.
Edición 1979. USA
- DIXON Dougal. THE PRACTICAL GEOLOGIST.
Editor Raymond Bernor. Edicion 1992. USA
- EWERT and Swanson. VIGILANDO VOLCANES: TECNICAS
Y ESTRATEGIAS. Editor USAID-OFDA, Edición 1990.
USA.
- FISHER, Heinken and Hulen. VOLCANOES.
Editor PRINCETON. Edición 1998. USA

- HERNANDEZ Sampieri Roberto y otros. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION, 2º Edición, Editor Mcgrawhill, 1998. México.
- KIOUS W. Jacqueline and Robert Tilling. THIS DINAMIC EARTH. Editor USGS. Edicion 1996. USA.
- KRAFFT Maurice. VOLCANOES: FIRE FROM THE EARTH. Editor HARRY N. ABRAMS. Edición 1993. USA.
- LAMBERT David. THE FIELD GUIDE TO GEOLOGY. Editor Diagram Group, Edición 1998, USA.
- MEYER-ABICH Helmut. LOS VOLCANES ACTIVOS DE GUATEMALA Y EL SALVADOR. Anales del Servicio Geológico, 1956. El Salvador.
- MURRAY John B. GROUND DEFORMATION, GRAVITY AND MAGNETICS. Editor Academic Press, Edición 2000. USA.
- ORTIZ Ramón. INSTRUMENTACION EN VOLCANOLOGIA I Editor CSIC, Edición 1994. España
- PETER Francis. VOLCANOES. Editor Oxford University Press. Edicion 1993. USA.

- TILLING Robert. VOLCANIC HAZARDS AND THEIR MITIGATION: PROGRESS AND PROBLEMS. Editor Reviews Geophysics, Edición 1989. USA
- VAN DER LAAT Rodolfo. GENERALIDADES DE DEFORMACION VOLCANICA. Editor OVSICORI, Edición 1993. Costa Rica.
- VAN DER LAAT Rodolfo y otros. IX CURSO INTERNACIONAL DE POSGRADO SOBRE METODLOGIAS DE VIGILANCIA VOLCANICA CON ENFASIS EN DEFORMACION. Editor OVSICORI, Edición 2003. Costa Rica
- WILSON T. MANTE PLUMES AND PLATE MOTION. Editor Tecnophysics. Edicion 1973. CANADA