

00323



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

58

FACULTAD DE CIENCIAS

"MALLADO TRIDIMENSIONAL PARA ELEMENTO FINITO DEL VOLCAN POPOCATEPETL, CORRELACIONADO CON LA SISMICIDAD"

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

F I S I C A

P R E S E N T A :

GRACIELA RAMIREZ OLVERA



FACULTAD DE CIENCIAS UNAM

DIRECTOR DE TESIS: DR. CARLOS VALDES GONZALEZ

DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES



2003

FACULTAD DE CIENCIAS SECCION ESCOLAR

A



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAGINACION DISCONTINUA



SECRETARÍA NACIONAL
DE EDUCACIÓN
PÚBLICA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: Ramírez Olvera Graciela

FECHA: 24 de Noviembre de 2003

FIRMA: [Firma]

DRA. MARÍA DE LOURDES ESTEVA PERALTA
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:
"Mallado tridimensional para elemento finito del volcán Popocatepetl, correlacionado con la sismicidad"

realizado por Ramírez Olvera Graciela con número de cuenta 8305432-1

quién cubrió los créditos de la carrera de Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario

Propietario Dr. Carlos Valdés González [Firma]

Propietario Dr. Marco Antonio Martínez Negrete [Firma]

Propietario Dr. Gerardo Jorge Vázquez Fonseca [Firma]

Suplente Dr. Jaime Yamamoto Victorio [Firma]

Suplente M. en C. Jaqueline Cañetas Ortega [Firma]

Consejo Departamental de Física

[Firma]

DRA. PATRICIA GOLDSPEIN MENACHE
Coordinadora de Licenciatura

SECRETARÍA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

3

Al Ser que lo ha hecho posible: ¡Gracias!

A mi esposo:

Cariño mio, gracias por tu sólido apoyo, tu comprensión y todo el amor que me has dedicado siempre y especialmente ahora, en el tiempo que fui haciendo nacer "la tesis". En parte es tuya también ¿sabes?, porque tu verdad me sostiene cuando flaqueo.

A mis padres:

¡Lo logramos!. Al fin las esperanzas, el apoyo, el cariño, la fortaleza que me han dedicado desde mi niñez, se ve recompensada con la llegada a esta meta. Gracias, los amo.

A mi querida hermana:

Dulce María: Gracias por ser mi hermana, gracias por el ejemplo de perseverancia que me has dado toda la vida. Gracias por creer en mí, eso me ha hecho más fácil librar los obstáculos.

A Anaís:

Pequeña, te dedico el sabor de un logro muy importante para mí. Crece y degusta muchos logros como este.

Al Dr. Miguel Bernal Sagahón:

Mi admiración por usted ha sido inspiradora para seguir adelante, tanto en lo académico como en lo personal. Gracias por su amistad y ejemplo.

A mi entrañable amiga Ana Lilia Maldonado Arellano:

La vida nos ha llevado por senderos distintos, pero siempre que nos vemos o nos escuchamos, ambas sabemos que seguimos estando juntas.

A mi entrañable amiga Ma. Guadalupe Cordero Tercero:

Gracias compartir alegrías, esperanzas e ilusiones en la "la carrera" y por obsesquiarne tu amistad desde entonces. Gracias por estar ahí en los momentos más duros. ... ¡por hacer brillar al ✨ !.

Agradecimientos

Deseo agradecer al M. en C. Luis Manuel León Rossano, a la M en C Ma Isabel Villaseñor, al Dr Jorge A. Montemayor por haber aceptado inicialmente participar como sinodales y al Dr. Marco Antonio Martínez Negrete, Dr. Gerardo J. Vazquez Fonseca, Dr Jaime Yamamoto Victorio y la M en C. Jaqueline Cañetas Ortega por haber leído y corregido el trabajo escrito.

Doy especiales gracias al Dr. Carlos Valdés por sugerir el tema de tesis, por su acertada guía, su gran paciencia y comprensión, por las frases de apoyo en los momentos más necesarios y por haberme brindado una oportunidad para lograr el sueño de titularme.

Sin el apoyo del Dr. Gonzalo Alduncin González el desarrollo de este trabajo habría sido imposible. Agradezco su aprobación para el empleo del equipo de computo del proyecto MODULEF, a su cargo en este Instituto y por la importante introducción a su empleo.

Agradezco infinitamente al M en C. Norberto Vera por el apoyo recibido en el empleo del paquete modulef, por la solución a dudas que me guiaron a encontrar la piedra roseta en momentos clave.

Debo agradecer al Mat. Adolfo Ramírez que durante el proceso de este trabajo me facilitó bibliografía y materiales que fueron cruciales para llegar a la meta.

Agradezco al Fis. Pablo Aguilar por los comentarios sobre el paquete que fueron de gran utilidad.

Al Mtro. Guillermo Hernández por apoyarme con bibliografía y en el proceso de acceso al equipo de computo del proyecto modulef.

Agradezco muy especialmente a los bibliotecarios de la Unidad de Bibliotecas del C.I.C. H. por su eficiencia, su gran comprensión y apoyo en la obtención de los materiales bibliográficos.

Finalmente agradezco al Instituto de Geofísica de la UNAM y al CENAPRED por las facilidades brindadas.

INDICE

Introducción

1. Antecedentes

- 1.1 El volcán Popocatépetl
- 1.2 Breve revisión histórica de modelos físicos y estructurales para volcanes
- 1.2.1 Categorías según Chevallier y Verwoerd (1988)
- 1.2.2 Una categoría distinta propuesta por Chevallier y Verwoerd (1988)

2. Identificación de un paquete para la resolución de problemas físicos, mediante elemento finito en cuerpos tridimensionales

3. Desarrollo del mallado tridimensional del volcán Popocatépetl, restringido con datos topográficos

- 3.1 El modelo topográfico
- 3.2 Correlación entre el modelo y la sismicidad
- 3.3 Desarrollo del mallado tridimensional del Popocatépetl
 - 3.3.1 Descripción general
 - 3.3.2 Obtención de las estructuras de datos de los puntos elegidos, mediante EMC2
 - 3.3.3 Construcción de mallados bidimensionales horizontales
 - 3.3.4 Mallados tridimensionales
 - 3.3.5 El mallado final

4. Prueba simplificada del mallado

- 4.1 Planteamiento del problema
- 4.2 Resultados
- 4.3 Análisis de resultados

5. Correlación de la prueba con la sismicidad y conclusiones

- 5.1 Correlación de los resultados de la prueba simplificada del mallado con la sismicidad
- 5.2 Conclusiones
- Apéndice 1
- Apéndice 2
- Bibliografía

	1
	1
	1
	8
	8
	11
	14
	16
	16
	19
	20
	20
	21
	22
	26
	27
	30
	30
	31
	48
	52
	52
	60
	62
	64
	69

Introducción

El Popocatepetl es un volcán con un largo historial de actividad (S. De la Cruz-Reyna et al, 1995), su nombre náhuatl, "cerro que humea", es indicador de su comportamiento. Cualquier volcán activo es un hermoso y temible fenómeno, digno de nuestra admiración y estudio, sin embargo, cuando éste se encuentra en la periferia de una de las ciudades más grandes del mundo, como es el caso del Popocatepetl, su peligrosidad se torna inquietante, motivo por el cual se deben impulsar investigaciones que permitan determinar los riesgos originados por tal situación y preparar las acciones necesarias para mitigarlos a tiempo.

En la actualidad, el Popocatepetl es monitoreado y estudiado por diversas instituciones y desde distintas perspectivas. Las principales, en este rubro, son el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y varios institutos de la UNAM. Se realiza monitoreo sísmico, inclinométrico, de emisión de gases, etc. También se cuenta con una página en internet, (www.cenapred.unam.mx), que informa sobre diferentes aspectos del monitoreo al público en general, y a los investigadores en particular. El departamento de Vulcanología y Sismología del Instituto de Geofísica de la UNAM es el marco del presente trabajo de tesis.

Importancia de este trabajo

Es de esperarse que el Popocatepetl siga presentando actividad moderada como hasta ahora, pero hay estudios que han revelado la existencia de, al menos, 4 depósitos de escombros de avalancha enormes, extendidos por 600Km² (Siebe et al 1995). Estos estudios han conducido a los investigadores a esperar que, en su futuro geológico, el volcán manifieste nuevamente una erupción de grandes proporciones (Siebe et al. 1995). Cualquiera de los dos casos puede hacer fallar el edificio en regiones débiles, por tal motivo, es deseable determinarlas. Con esto en mente, se pensó construir un modelo computacional del volcán, porque sobre él puede efectuarse el ensayo de diferentes situaciones mecánicas, que podrían arrojar luz sobre este aspecto. El presente trabajo consiste en el desarrollo de un mallado tridimensional del Popocatepetl, para el empleo del Método de Elemento Finito, con el propósito de su empleo posterior, en el propósito arriba señalado. El desarrollo y valoración del mallado están correlacionados con los datos sísmicos.

El Método de Elemento Finito

Existen varias herramientas matemáticas computacionales para simulación de fenómenos físicos. Una de estas es el método de elemento finito (MEF), que ya ha sido aplicado con éxito, en varios casos, para el estudio del comportamiento mecánico de volcanes (Chevallier y Verwoerd 1988). El MEF se emplea en la solución de ecuaciones diferenciales que surgen, por ejemplo, en problemas físicos. Para ser utilizado requiere de la elaboración de una estructura básica, conocida como *mallado*, que se obtiene a partir de la construcción de un modelo de la forma del objeto, el cual es dividido en un número determinado de fragmentos no uniformes, llamados elementos. Sobre cada elemento se eligen puntos, conocidos como *nodos*. La idea general del método consiste en aproximar el cambio de la variable dependiente, dentro de cada elemento, mediante una función de interpolación, apoyada en sus nodos. El significado de la ecuación diferencial es transformado a una forma integral que conjunta las funciones de interpolación y el problema original se traduce en un conjunto de ecuaciones algebraicas sobre cada nodo (Akin, 1986).

La correlación con la sismicidad

El modelo geométrico de la forma del edificio del volcán se desarrolló con base en los datos topográficos, brindados por el CENAPRED, a esto se le llamó *modelo topográfico*. Para aproximar la *estructura interna* del volcán se utilizó el registro sísmico. Los sismos de origen volcánico son utilizados para obtener información sobre lo que ocurre en el interior de los volcanes. Estudios que se han realizado sobre ellos han permitido clasificarlos y relacionarlos con situaciones físicas específicas. Uno de ellos, conocido Volcano - Tectónico (VT), esta relacionado con los cambios de esfuerzos en el interior de los volcanes (J.C. Lahr et al, 1993). El departamento de Sismología y Vulcanología facilitó la información de este tipo de eventos. Un modelo, de la estructura interna para volcanes, que se utiliza con frecuencia consiste en la existencia de una región profunda, donde hay una densidad alta de material magmático, que recibe el nombre de *cámara magmática*, unida a un conducto vertical que emerge en el cráter del volcán y lleva el material a la superficie, llamado *chimenea* (Chevallier y Verwoerd 1988, Valdés et al, 1995). Según este modelo, la sismicidad de la cámara magmática debe ser muy baja, porque el magma es relativamente fluido, así no presenta fracturamientos. Arriba de ella el material es rígido y se fractura con los esfuerzos producidos con el movimiento del magma. Al acercarse a la superficie la sismicidad disminuye de nuevo, porque el camino para el magma es más libre (Valdés y González 1994). Con base en esta información se determinó una estructura interna para el mallado. Después de haberlo elaborado se realizó una prueba simplificada con el paquete de elemento finito MODULEF, que permitió relacionar la situación de esfuerzos obtenida en el modelo con la sismicidad. El propósito de la prueba fue conocer el alcance del mallado y las posibilidades de su empleo para los fines señalados arriba.

Descripción breve de los capítulos

En el primer capítulo se exponen los antecedentes de este trabajo. Se habla sobre características generales del Popocatepetl, luego se hace una breve revisión histórica de modelos mecánicos y trabajos previos basados en el MEF para volcanes.

En el segundo capítulo describe el paquete computacional utilizado, MODULEF.

El tercero explica, paso a paso, la construcción del mallado. Su forma externa se basa en las curvas de nivel del volcán y evoca a una pirámide escalonada. Su altura máxima es de 5200m, su profundidad de 4600m bajo el nivel del mar. En su interior solamente se encuentra una estrecha fisura vertical, no considera la cámara magmática, si no la parte superior a ella. La base de la fisura es cuadrangular de 50m x 20m, ubicada en la región que, en el modelo topológico corresponde al lugar donde emerge el magma en el cráter.

El cuarto expone una prueba simplificada del mallado, que consiste en la aplicación de una fuerza ascendente en las paredes de la fisura vertical. Se analizan las gráficas de desplazamientos horizontales y verticales ocasionados por la fuerza en cuatro cortes verticales del mallado que atraviesan la fisura. Los cortes tienen dirección Oeste - Este, Suroeste - Noreste, Sur - Norte y Sureste - Noroeste.

En el quinto capítulo se discute sobre la correlación de la sismicidad con el mallado, en relación con la prueba del capítulo anterior y se dan las conclusiones en relación con su utilidad posterior.

1 Antecedentes

1.1 El volcán Popocatépetl

Ubicación y altura

Nuestro país cuenta con una gran variedad orográfica, con diversos tipos de estructuras geológicas. Uno de los más imponentes esta constituido por los volcanes. A lo largo del paralelo 19° se localiza una región con gran densidad de ellos, conocida como Eje o Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), el Popocatépetl pertenece a esta región, se localiza a 55km al sureste de la ciudad de México y a 45km al este de la ciudad de Puebla. Es el segundo volcán más alto del país con 5452m sobre el nivel del mar.

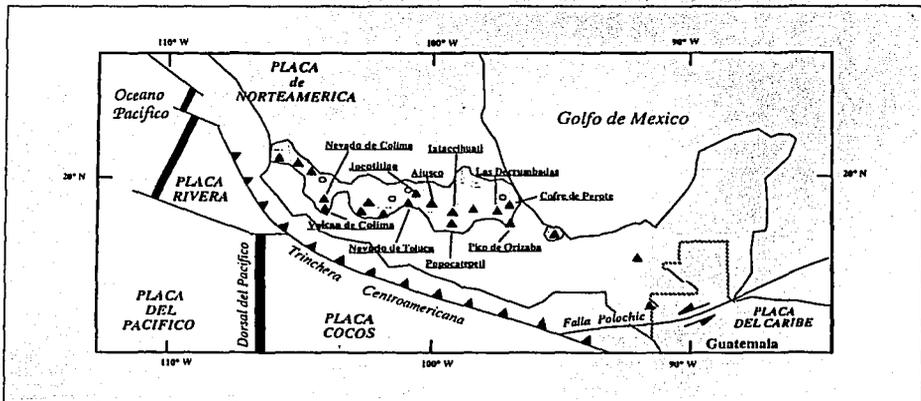


Fig. 1.1.1 Las placas tectónicas sobre las cuales se asienta nuestro país y el cinturón volcánico mexicano con sus principales volcanes

Como se formó

Como se indicó arriba este volcán forma parte del CVM, el origen y estructura de esta región se encuentra bajo estudio, pero se debe a la intensa actividad tectónica del país (Medina, 1997). México está asentado sobre 5 placas tectónicas: la de Norteamérica, la de Rivera, la del Pacífico, la de Cocos y la del Caribe. La constante movilidad entre ellas genera varios fenómenos, entre estos están los sismos y el vulcanismo (Medina, 1997). Dentro del CVM se encuentra un conjunto de volcanes muy altos, ubicados al sureste de la ciudad de México, en sentido Norte - Sur, conocidos como Sierra Nevada o complejo Iztaccihuatl - Popocatépetl. El Iztaccihuatl es una estructura de varios volcanes previa al Popocatépetl (Siebe et al, 1995), mismo que se encuentra al final del complejo, en el extremo sur. Se tiene conocimiento de que del Popocatépetl no es el primer cono ubicado ahí, al parecer, violentas erupciones explosivas han volado conos previos (Siebe et al, 1995). La última erupción de este tipo ocurrió hace aproximadamente 23 000 años (Siebe et al, 1995). Después de esta cataclísmica erupción ha tenido muchas más, de menor magnitud, que han ido acumulando materiales, poco a poco, hasta dar la forma actual del volcán (www.cenapred.unam.mx, 2003).

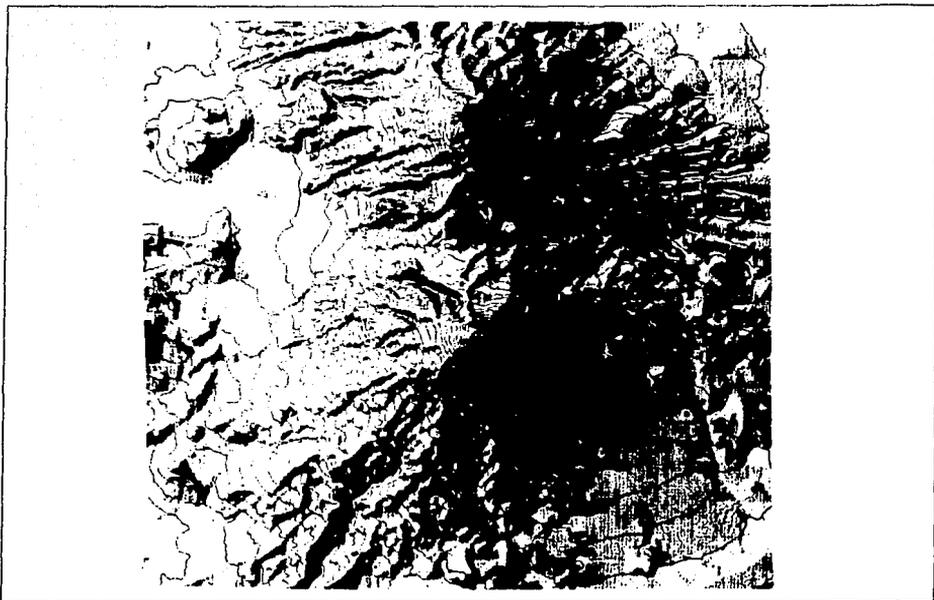


Fig. 1.1.2 Fotografía de satélite con líneas de topografía superpuestas de la sierra nevada. Tomado de J. L. Macías et al 1995.

Tipo de volcán

Por el tipo de edificio

El edificio del Popocatepetl se ha ido construyendo a partir de los productos de sus múltiples erupciones, por ello se le clasifica como *estratovolcán* (Medina, 1997).

Por los materiales que lo conforman

Los minerales que lo constituyen le catalogan como de tipo *andesítico - dacítico*. Ambos son minerales formados a partir de lavas que fluyen lentamente y de temperaturas consideradas bajas de 800 – 1150 °C (Spera, 2000).

Por el tipo de erupciones

El Popocatepetl ha presentado diversos tipos de erupciones y no se le puede ubicar en una de ellas, de manera exclusiva, pero se pueden mencionar los siguientes:

- *Actividad fumarólica y emisiones de ceniza:* Consistente en la emisión intermitente de vapor de agua, gases y / o ceniza en cantidades moderadas. Puede emitirse uno solo de estos elementos o varios a la vez. Es la actividad más leve que ha manifestado este volcán.
- *Erupción vulcaniana:* Consistente en la formación de domos de lava muy viscosa, dentro del cráter, después de haber alcanzado un tamaño crítico el domo de lava es lanzado por los aires, junto con rocas y ceniza. Esto sucede porque mientras se formó se estuvo acumulando presión,

como si se tratara de una olla express, a la que se le tapó la válvula. Estas explosiones no son muy violentas porque permiten liberar la presión constantemente, después de la formación de cada domo. Junto con el anterior, éste es el tipo predominante de actividad que presenta actualmente el volcán.

- *Erupción Pliniana*: Consistente en la producción de grandes columnas de ceniza y fragmentos de rocas, conocidos como bombas. Una característica de este tipo de erupción es la producción de nubes ardientes o flujos piroclásticos, en los que la columna de materiales que emite el volcán se colapsa por la gravedad, formando un flujo que desciende por las laderas a velocidades de doscientos o trescientos Km/h, carbonizando todo a su paso (www.edomexico.gob.mx, basada en Espindola J. M., 1992). Esta actividad ha sido de explosividad media, según el Índice de Explosividad Volcánica. VEI, véase tabla 1.2.1
- *Erupción tipo Sta. Helena*: La última ocurrió hace 23 000 años. Ocasionó una explosión tan grande que el edificio volcánico perdió una porción considerable de su masa, quedando en su lugar un enorme cráter. Cicatrices de esta erupción se pueden observar en el flanco noroeste del volcán en una enorme barranca conocida como Nexpayantla que muestra la región que quedó del cono previo. (Siebe et al, 1995) Los fragmentos del edificio generaron una avalancha inmensa que se extendió a más de 70 Km, en sentido horizontal del volcán y viajó a enormes velocidades (Siebe et al, 1995). Esta actividad ha sido de muy alta explosividad. Véase tabla 1.2.1

Nota: Existen diversas clasificaciones para las erupciones de volcanes y sus nombres pueden variar según el autor, pero sus características, se mantienen en general.

"VEI"	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Descripción de la erupción	No explosiva	Pequeña	Moderada	Moderada grande	Grande	Muy grande			
Volumen de Piroclastos(m ³)	<10 ⁴	10 ⁴ - 10 ⁶	10 ⁶ - 10 ⁷	10 ⁷ - 10 ⁸	10 ⁸ - 10 ⁹	10 ⁹ - 10 ¹⁰	10 ¹⁰ - 10 ¹¹	10 ¹¹ - 10 ¹²	10 ¹² - 10 ¹³
Altura de la columna (Km)*	<0.1	0.1 - 1	1 - 5	3 - 15	10 - 25	>25			
Clasificación	Estromboliana			Pliniana					
Duración(horas de explosiones continuas)	Hawaiana		Vulcaniana			Ultra - Pliniana			
	< 1		1 - 6			> 12			
			6 - 12						
Inyección a la Troposfera	Despreciable	Menor	Moderada	Substantial					
Inyección a la Estratosfera	No	No	No	Posible		definitiva significativa			
Erupciones ^b	443	361	3108	720	131	35	16	1	0

* para VEI 0-2, la altura está dada en Km sobre el borde del cráter, para VEI 3 - 8, la altura está dada en Km sobre el nivel del mar
^b número de erupciones totales en el catálogo de volcanes activos

Tabla 1.1.1 Índice de Explosividad Volcánica, Esquema de clasificación de Newhall y Self (1982). Tomado de Delgado et al, 1995.

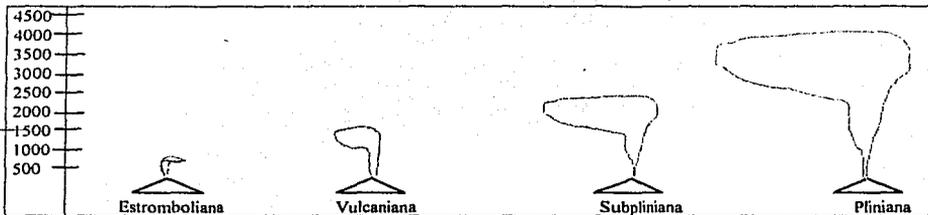


Fig. 1.1.2 Altura de columnas eruptivas de acuerdo al índice de explosividad VEI. (Delgado et al 1995).

Historia eruptiva

El Popocatepetl tiene una compleja historia eruptiva, que va desde erupciones efusivas con derrames de lava, hasta erupciones muy explosivas, alternando periodos de actividad y clama (Delgado et al, 1995)

AÑO	BREVE HISTORIA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL
23,000a	Gran erupción tipo Sta. Helena destruye el edificio volcánico previo
14,000a	Gran erupción pliniana produce lluvias de ceniza y pómez sobre el Valle de México
14,000-5,000 a	Ocurren varias erupciones menores y al menos cuatro grandes erupciones
3,000 b	Erupción grande
200 b	Erupción grande
800 c	Erupción grande
800 c-	Después de la última erupción explosiva, la actividad del Popocatepetl ha sido moderada. A lo largo de los últimos 1200 años se han presentado numerosos episodios de actividad similar a la actual. Algunos están documentados.
1354 c	Erupción menor
1363 c	Fumarolas
1512 c	Fumarolas
1519 c	Erupción moderada seguida de actividad fumarólica
1530 c	Termina actividad fumarólica
1539-1549 c	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez
1571 c	Emisiones de ceniza
1592 c	Fumarolas y emisiones de ceniza
1642 c	Fumarolas y emisiones de ceniza
1663 c	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez
1664 c	Emisiones de ceniza
1665 c	Emisiones de ceniza
1697 c	Fumarolas
1720 c	Erupción leve y actividad fumarólica
1804 c	Fumarolas leves
1919 - 1927 c	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Se forma un pequeño domo de lava en el fondo del cráter. Hubo algunas víctimas en el interior del cráter al realizar trabajos de explotación de azufre
1994-1997	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Se forma un domo de lava en el fondo del cráter que alcanza el 20% de su capacidad. 5 personas perecieron cerca del borde del cráter durante una explosión ocurrida en mayo de 1996.

(a) Años atrás (b) Antes de Cristo (c) Después de Cristo

Tabla 1.1.2 Historia eruptiva de los últimos 23 000 años del Popocatepétl. Tomada de www.cenapred.unam.mx.

Los eventos de mayores dimensiones tienden a presentarse con menor frecuencia que los de menor magnitud. A continuación se muestra la información de la tabla anterior en escala de tiempo:

Miles de años atrás	Miles de años respecto de Cristo	Tipo de actividad
23-24	21-22 AC	Erupción tipo santa Helena
22-23	20-21 AC	
21-22	19-20 AC	
20-21	18-19 AC	
19-20	17-18 AC	
18-19	16-17 AC	
17-18	15-16 AC	
16-17	14-15 aC	
15-16	13-14 aC	
14-15	12-13 aC	Gran erupción pliniana
13-14	11-12 AC	4 grandes erupciones y varias menores
12-13	10-11 AC	
11-12	9-10 AC	
10-11	8-9 AC	
9-10	7-8 AC	
8-9	6-7 AC	
7-8	5-6 AC	
6-7	4-5 AC	
5-6	3-4 AC	Erupción grande
4-5	2-3 AC	
3-4	1-2 AC	Erupción grande
2-3	0-1 DC	
1-2	2-1 DC	Erupción grande
0-1	1-2 DC	Al menos: 4 Erupciones moderadas, 1 erupción menor, 1 erupción leve, 7 periodos de fumarolas, 4 periodo de explosiones moderadas, 9 periodos de emisiones de ceniza, (4 acompañados de piedra pómez), 2 formaciones de domos hasta entre 1994 y 1997

Tabla 1.1.3 Erupciones de los últimos 23 000 años en escala temporal. Se observa mayor frecuencia de actividad hacia años recientes, pero de menor magnitud.

Así se tiene para los últimos 23 000 años:

Tipo de actividad	Número de veces registrada	# de veces en por periodo de tiempo	Frecuencia aproximada	Todas las erupciones
Erupción tipo Sta Helena	1	1 en 23 000 a		15 erupciones en 23000 a
Gran erupción Pliniana	1	1 en 14 000 a		
Grandes erupciones	4	4 en 14 000 a	1 cada 3500 a	
Erupciones grandes	3	3 en 2 200 a	1 cada 730 a	
Erupciones moderadas	4	4 en 1200 a,	1 cada 300 a	
Erupciones menores	1	1 en 640 a		
Erupciones leves	1	1 en 280 a		
Fumarolas, emisiones de ceniza	Incontables	En los últimos 1000 años	Muy grande	1 cada 1530 a

Tabla 1.1.4 Análisis de la frecuencia de ocurrencia de erupciones en los últimos 23 000 años. Las menores tienen un periodo menor que las mayores.

Peligrosidad

La peligrosidad de un volcán esta determinada por dos factores principales: la violencia de sus erupciones y la población que puede ser afectada por ellas. De esta manera se puede tener un volcán que presenta erupciones muy violentas pero muy lejos de cualquier población, entonces su peligrosidad será baja, en cambio, un volcán con erupciones moderadas, pero con la posibilidad de afectar a una gran población tendrá una peligrosidad mayor. El Popocatepetl es un volcán cuya historia eruptiva presenta desde una actividad muy leve hasta erupciones de las más violentas y alberga en sus faldas muchos poblados, además se encuentra cerca de dos ciudades grandes, esto lo convierte en un volcán de alto riesgo. Los principales peligros que representa son (Macías et al (1)):

1. Peligros por eventos que involucran el flujo de materiales volcánicos

A. Lavas

- a. Derrames de lavas
- b. Domos de lava

B. Corrientes piroclásticas de densidad

- a. Flujos piroclásticos
- b. Oleadas piroclásticas "surges"
- c. Explosiones dirigidas "blast"

C. Flujos de lodo y sus transformaciones (lahars)

D. Derrumbes gigantes (avalanchas de escombros)

2. Peligros por eventos de caída libre

A. Caída de material piroclástico

B. proyectiles balísticos

Tabla 1.1. Principales peligros del volcán Popocatepetl. (Tomado de J.L. Macías et al, 1995).

Uno de los riesgos de mayor alcance que presenta es el de derrumbes gigantes, que pueden o no estar acompañados por una erupción. "Al menos cuatro derrumbes pre-históricos de dimensiones gigantes en los flancos del complejo Iztaccihuatl-Popocatepetl produjeron extensos depósitos de avalanchas de escombros ... El depósito más pequeño aparentemente se originó en la parte sur del Iztaccihuatl y cubre un área de aproximadamente 50km² hacia el sureste. Los tres depósitos más grandes se traslapan formando un extenso abanico que cubre un área de 600km² al sur del actual Popocatepetl. Se estima que el depósito más grande viajó a más de 70km de distancia horizontal del volcán y tiene un volumen mínimo de 9km³, lo cual lo coloca entre los más grandes del mundo. ... Se están haciendo estudios para determinar las fechas de los derrumbes gigantes, (Siebe et al, 1995), determinaron que el derrumbe gigante más joven estuvo asociado a una erupción tipo Sta Helena y lograron fecharlo entre 22 000 y 23 655 años... Esta edad equivale a la edad del actual cono del Popocatepetl. La presencia de y características de depósitos piroclásticos de flujo y caída que sobreyacen directamente a este depósito indican que este derrumbe gigante estuvo asociado a una erupción de gran magnitud que cambió por completo el escenario de la región en un radio de más de 50 km. La gran altura del cono actual Popocatepetl es prueba de su madurez. Probablemente ya alcanzó en términos geológicos la etapa de culminación de su existencia. Debido a la función de sostén que ejerce el Iztaccihuatl sobre el flanco norte, el próximo derrumbe gigante probablemente ocurrirá nuevamente hacia el sur en el futuro geológico del volcán." (Siebe et al, 1995).

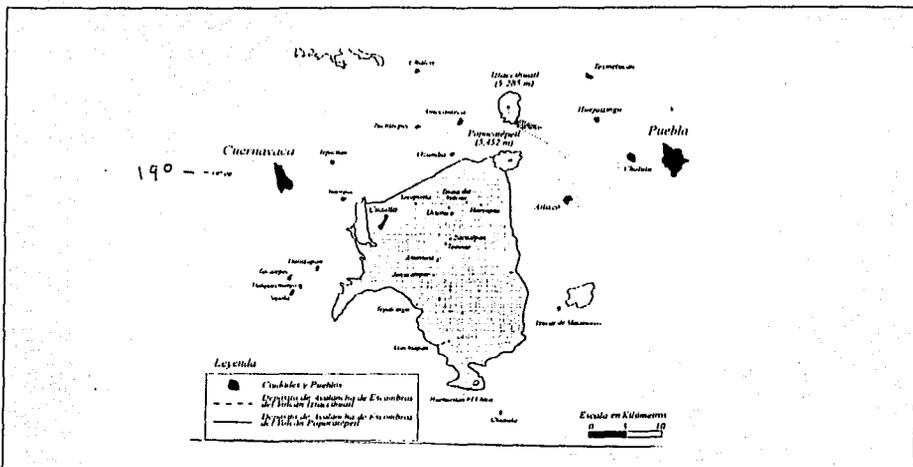


Fig. 1.1.5 Esquema de los principales depósitos de derrumbes gigantes(Siebe et al, 1995)

Monitoreo

A partir de la reanudación de su actividad en 1993 y la crisis de 1994-1995, se ha impulsado la vigilancia y el estudio de éste volcán. En la actualidad se cuenta con 25 estaciones remotas y una estación central de adquisición y procesamiento en el CENAPRED. Los principales tipos de monitoreo son explicados por Quaas et al 1995:

Monitoreo visual

“ Es la apreciación por medio visuales y mediante registro frecuente de las condiciones físicas del volcán, tales como emanación de gases y cenizas, deformaciones, derrumbes o deslaves, flujos de lodo, actividad magmática, ruidos o cualquier manifestación anómala que indica un cambio perceptible de su estado de actividad. Esta se lleva a cabo, entre otras, mediante observaciones a simple vista, con ayuda de binoculares, registros fotográficos o inclusive mediante sistemas de monitoreo con cámaras de video” (literalmente de Quaas et al, 1995).

Monitoreo Sísmico

Es la medición local o remota de la actividad microsísmica, que permite localizar la fuente de energía e inferir la estructura interna del volcán, así como cambios de la misma. Para ser efectiva debe contar con tres o más sismógrafos instalados sobre y en torno del volcán. Existe una gran variedad de estos instrumentos con diferentes tecnologías, medios de registro y respuesta de sus sensores. Con frecuencia se utilizan sismógrafos portátiles y digitales que permiten medir los niveles de ruido y características de los sitios donde se instalará una estación permanente. En los lugares donde se instala una estación definitiva se utilizan técnicas de telemetría vía radio. Tanto analógicas como digitales para registrar y monitorear la actividad en forma remota y segura desde el centro de observación y procesamiento, (Quaas et al, 1995).

Monitoreo Geodésico

Se miden las deformaciones que el edificio volcánico sufre a consecuencia de los esfuerzos ejercidos desde el interior del volcán. Se han instalado redes monumentadas, puntos de observación e inclinómetros de diversos tipos. Las medidas pueden hacerse por métodos convencionales (nivelación, triangulación, Trilateración, inclinometría seca, etc.), por gravimetría y por otros métodos electrónicos como radiotelemetría y mediante sistemas de posicionamiento global, GPS (Quaas et al, 1995).

Monitoreo Geoquímico

"Se refiere al análisis químico de concentrados y elementos en gases de fumarolas. Manantiales. Composición de cenizas. Lavas u otros productos del volcán que son una manifestación de su actividad. Otras variables asociadas y que también son monitoreadas son vientos, temperatura, precipitación, pH y emanación de gas radón, entre otras la utilización de equipos de espectrometría de correlación, COSPEC es fundamental para medir la concentración de gas SO₂ emitido" (literalmente de Quaas et al, 1995).

1.2 Breve revisión histórica de modelos físicos estructurales para volcanes

1.2.1 Categorías según Chevallier y Verwoerd (1988)

En relación con los trabajos que se han desarrollado en torno al comportamiento mecánico de volcanes se han utilizado tanto herramientas analíticas como métodos numéricos. Chevallier (1), los cataloga de la siguiente manera:

- a) Los avocados a la distribución de esfuerzos dentro de un edificio volcánico.
- b) Problemas relacionados con la propagación de fracturas
- c) Problemas relacionados con la deformación del terreno en torno de volcanes activos.

a) Distribución de esfuerzos dentro de un edificio volcánico

1. Anderson(1935)

"Los primeros estudios arrancan con Anderson (1935) sobre el origen de placas cónicas y diques en el Ardnamurchan en Escocia. El derivó, mediante una aproximación analítica, las ecuaciones de las componentes de desplazamiento debidas a la dilatación radial de un punto de presión vertical actuando en un semi-espacio, semi-infinito, elástico e isotrópico (figura 1.2.1). Él concluyó que las capas cónicas se relacionan con fracturas de tensión y los diques con fracturas de corte" (Chevallier y Verwoerd 1988).

2. Jeffrys (1935)

"Jeffrys (1935) criticó la suposición de Anderson de que la forma completa de la fractura pueda ser directamente inferida de la distribución de esfuerzos antes de la fractura, de hecho la forma de la fractura depende tanto del campo original de esfuerzos como de los cambios introducidos en el desarrollo de la fractura" (Chevallier y Verwoerd 1988).

3. Robson y Barr (1964)

"En este punto la aproximación de Robson y Barr(1964) que compara la distribución de esfuerzos con la resistencia de la roca es más realista y les conduce a conclusiones casi opuestas a las de Anderson. Su método analítico utiliza la función de esfuerzos para un sólido infinito en el cual está

contenido un agujero horizontal infinitamente largo. Estas ecuaciones de esfuerzo fueron calculadas para un campo de desviación con P_{\max} vertical (presión litostática), P_{\min} horizontal (presión regional) y P_{int} (presión hidrostática). Combinando estas ecuaciones con el criterio de Coulomb-Navier para fallas de corte, ellos desarrollaron parámetros críticos a los cuales la falla de corte o la falla de tensión ocurriría (figura 1.1.2). De acuerdo a su modelo las capas cónicas se desarrollan a lo largo de planos de corte inmersos dentro mientras los diques centralmente introducidos se propagan a lo largo de fracturas de tensión verticales. Otra de sus conclusiones es que las fallas de corte ocurren solamente cuando el cuerpo de magma está a una suficiente profundidad de 4.7 Km" (Chevallier y Verwoerd 1988).

4. Philips (1974)

"Philips (1974) en su aproximación dinámica apoyó los resultados de capas cónicas formadas a lo largo de fallas de corte planas" (Chevallier y Verwoerd 1988).

b) Problemas relacionados con la propagación de fracturas

1. Pollard (1973)

"Para modelar estas fracturas Pollard (1973) derivó las ecuaciones de esfuerzo y desplazamiento alrededor de un agujero elíptico presurizado en un sólido homogéneo isotrópico. Él mostró (1973b) que grandes diferencias del esfuerzo principal y grandes gradientes de esfuerzo están concentrados en la terminación de la fractura figura 1.2.3. Él definió mecanismos de propagación (extensión, ductibilidad, fragilidad), criterios de propagación (la presión del magma debe solamente levemente exceder el esfuerzo normal a lo largo de la fisura) y factores que influyen en la dirección de propagación como la orientación del esfuerzo regional" (Chevallier y Verwoerd 1988).

2. Tsunakawa (1983)

"La influencia del campo de esfuerzos regional sobre la orientación de un dique también ha sido modelada por Tsunakawa (1983)". (Chevallier y Verwoerd 1988).

3. Nakamura (1977) y Muller (1986)

"Ejemplos geológicos de la influencia del campo de esfuerzos regional sobre la orientación de un dique han sido dados por Nakamura (1977) y Muller (1986). Este último autor reconstruyó con un modelo de elemento finito la paleo-dirección de las componentes del campo de esfuerzos regional durante el emplazamiento de los diques del Pico Español". (Chevallier y Verwoerd 1988).

c) Problemas relacionados con la deformación del terreno en torno de volcanes activos.

En la tercera categoría de Chevallier se encuentran los problemas de la relación de la deformación del terreno, en torno de volcanes activos, con el campo de deformación producido por fuentes idealizadas de presión y desplazamiento.

1. Mogi (1958)

"Estos modelos datan de Mogi (1958), quien utilizó la expresión para desplazamientos verticales y horizontales causados por el cambio de presión hidrostática en una pequeña esfera (situada mucho más profundo que la dimensión de la cavidad) en un sólido elástico semi-infinito y de éste obtuvo la superficie de deformación (figura 1.2.4). Él estimó la profundidad de la cámara para los volcanes Kilauea y Sakurajima. Su método, el cual es muy simple, porque solo utiliza un parámetro (la

profundidad de la cámara), ha sido ampliamente usado (Eaton en 1962, Fiske y Kinoshita en 1969, Jackson et al en 1975). Sin embargo la simplicidad del modelo (geometría de la fuente, distribución de presión y características del medio), ha sido causa de discrepancias entre la deformación calculada y la observada y una sobreestimación de la profundidad de la cámara". (Chevallier y Verwoerd 1988).

2. Yokoyama (1971)

"El modelo desarrollado por Yokoyama (1971) es una alternativa a la suposición de Mogi teniendo una distribución variable sobre la pared de la esfera (figura 1.2.5). Los resultados obtenidos son similares a los del modelo de Mogi". (Chevallier y Verwoerd 1988).

3. Walsh y Decker

"Walsh y Decker desarrollaron un modelo más realista, los desplazamientos verticales y horizontales, así como la inclinación de la superficie se derivan de una fuente lineal inmersa (un tubo) que se extiende en la profundidad. El modelo emplea un semiespacio elástico e isotrópico y la aproximación es analítica (figura 1.2.6). La aplicación de este modelo al Kilauea muestra que el campo teórico para una fuente vertical a 1.5 Km se compara favorablemente con los desplazamientos observados durante diferentes periodos de actividad. Sin embargo, diferentes parámetros (longitud, profundidad, intensidad) pueden dar el mismo campo de desplazamientos, así que el modelo falla en la unicidad". (Chevallier y Verwoerd 1988).

4. Pollard y Holzhausen (1979)

"En 1979 Pollard y Holzhausen utilizaron una fractura llena de fluido (figura 1.2.7). El problema es más complejo y necesita la superposición de dos soluciones analíticas. Interesantes conclusiones han sido obtenidas tal como la diferencia de concentración de esfuerzos en ambos extremos de la ranura y la fuerte asimetría del campo de desplazamiento cuando la fractura se encuentra cerca de la superficie" (Chevallier y Verwoerd 1988)..

5. Pollard et al en 198

"Pollard et al en 1983 propusieron éste modelo como una solución para estimar los parámetros geométricos y físicos de diques introducidos en zonas de grietas volcánicas. Su aproximación analítica, la cual también considera esfuerzos, permitió a los autores asociar la distribución de fracturas abiertas sobre la superficie con el estado del desarrollo de esfuerzos por el dique. Este modelo ha sido utilizado con éxito por Bonazia et al en 1984 para interpretar las deformaciones del terreno en los campos Phlegreanos. En adición a esto, los esfuerzos son aproximadamente consistentes con la sismicidad de 1983" (Chevallier y Verwoerd 1988).

6. Ryan et al en 1983

"El modelo desarrollado por Ryan et al en 1983 representa una aproximación original. Éste da el campo de deformación tridimensional generado por el retiro de magma de un compartimiento de almacenaje con forma de pretil (figura 1.2.8). El método es semi - analítico, es decir, combina una solución general analítica para las componentes de desplazamiento con una aproximación computacional de paso punto a punto. El medio es considerado anisotrópico con diferentes parámetros elásticos para las direcciones vertical y horizontal. El modelo ha sido aplicado a la deformación y eventos eruptivos del volcán Kilauea. La cuantificación de la localización, dimensión y localización del cuerpo de magma con forma de pretil es entonces combinada con un modelo tridimensional de la estructura interna del Kilauea, deducido de los hipocentros de los eventos sísmicos". (Chevallier y Verwoerd 1988).

7. Davis de 1983

"El modelo de Davis de 1983 es también tridimensional, pero completamente analítico. El campo de desplazamientos es producido por una dislocación rectangular profunda, con presión de fluido, en un semiespacio elástico uniforme (figura 1.2.9). El método efectivamente determina intrusión y orientación seguida de profundidad, longitud, alcance y amplitud en orden de incertidumbre creciente. El modelo no ha sido aplicado a ningún volcán, pero provee un conveniente punto de partida para la interpretación de deformación de terreno. Un buen ajuste se obtiene con el análisis de Pollard y Holzhausen en 1979. (Chevallier y Verwoerd 1988). (figura 1.2.10) .

8. Dieterich y Decker (1975)

"Dieterich y Decker (1975) fueron los primeros en usar el método de elemento finito, permitiéndoles probar un amplio espectro de formas y profundidades para un cuerpo de magma inmerso en un semiespacio isotrópico y elástico. Este modelo ha sido utilizado en el Kilauea, donde mediante un conducto vertical en forma de cigarro a .7 km de profundidad reproduce muy apropiadamente la deformación superficial. Modelando las intrusiones de la zona de grietas del este sugerido la presencia de capas profundas hacia el sur." (Chevallier y Verwoerd 1988).

9. Bianchi et al 1984

"Bianchi et al 1984 desarrollaron un modelo de elemento finito para deformaciones del suelo observados en los campos Phlegreanos. El sistema magmático está compuesto por una cámara oblata esférica (cuyo volumen se deriva de un análisis térmico), y una intrusión vertical. Los resultados están de acuerdo con los largos y rápidos levantamientos observados en estos campos". (Chevallier y Verwoerd 1988).

10. Paul et al. (1987)

"Un modelo numérico llamado "Bloc" ha sido utilizado por Paul et al y aplicado al deslizamiento del monte Santa Helena en 1980. Este modelo derivado del método de elemento finito es adaptado para el comportamiento de un medio anisotrópico y fracturado compuesto por la yuxtaposición de bloques con 3 grados de libertad: dos traslacionales y un rotacional. Se ha modelado para un medio lineal elástico, no lineal elástico y elastoplástico. Con ello se han obtenido buenos resultados aunque no se tiene una solución única". (Chevallier y Verwoerd 1988).

1.2.2 Una categoría distinta propuesta por Chevallier y Verwoerd (1988).

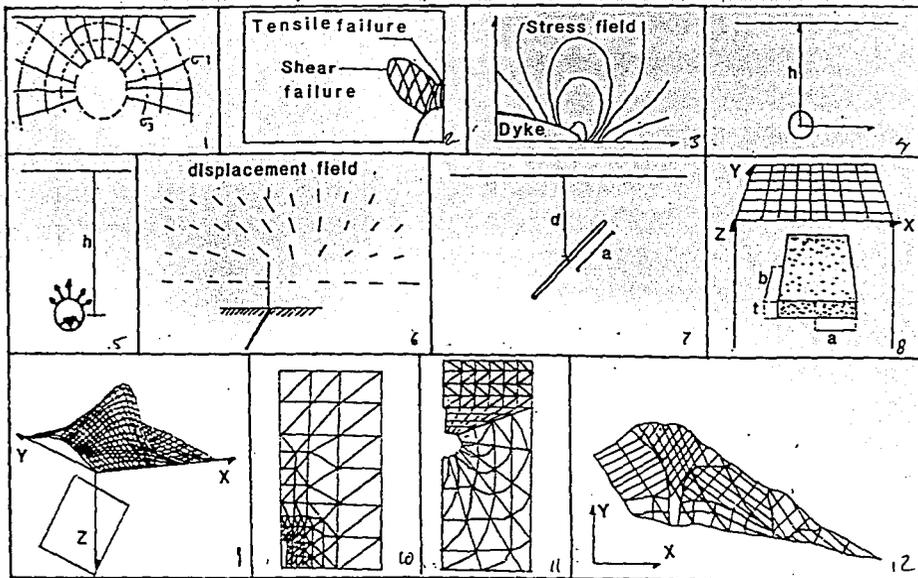
a) Chevallier y Verwoerd 1988

Chevallier y Verwoerd señalan que este trabajo constituye una nueva aproximación hacia el entendimiento del comportamiento mecánico de volcanes. Primero postulan un modelo geológico de la estructura interna de los volcanes, y después una simulación axisimétrica mediante el método de elemento finito. Ello les permitió considerar tipos de fracturamientos a varias profundidades en términos del estado de esfuerzos en condiciones específicas de carga. Su modelo geológico está basado en estudios de campo comparativos de 3 volcanes activos de islas (Marion, Tristan da Cunha, y Reunion) y uno durmiente (Gough). Su modelo contiene una cámara poco profunda de magma (3km) con 3 secciones: piso, pared y techo. Una columna de magma emerge de la cámara hacia el cono central. Dependiendo del nivel estructural donde se origina, se producen diferentes patrones de diques y

fracturas. Para la simulación numérica se supone un medio lineal elástico, continuo e isotrópico. Aplican diferentes combinaciones de carga, cambiando presión hidrostática y magmática en la cámara y presión externa. Encuentran que niveles estructurales del modelo geológico pueden ser explicados adecuadamente por variaciones en la distribución, intensidad y trayectorias de los esfuerzos principales. Concluyen que la forma de la fuente de magma es el principal factor en el patrón de esfuerzos. Consideran el efecto de la presión ($P_{\max} - P_{\text{ext}}$) sobre la orientación de los esfuerzos principales. Encuentran que la pendiente de la superficie del edificio volcánico causa rotación local del campo de esfuerzos. Finalmente, analizan la evolución del campo de esfuerzos, en niveles sucesivos estructurales en un modelo eruptivo dinámico. Utilizan el programa ABACUS que emplea elementos cuadrangulares.

b) El presente trabajo

El trabajo que se desarrolla en esta tesis toma la idea de Chevallier y Verwoerd 1988 en el sentido de generar primero un modelo geológico para el volcán, luego, a partir de éste, se genera un mallado para elemento finito que represente este modelo. Sin embargo, a diferencia del trabajo de Chevallier, el mallado se realiza de manera tridimensional, no bidimensional. Esto permite una mejor aproximación a la forma del volcán. Por otro lado este trabajo se desarrolla para un volcán en particular mientras que Chevallier y Verwoerd intentan desarrollar un modelo que funcione para 4 volcanes, y otros similares a los que señalan en su artículo.



<p>Fig 1.2.1 Anderson 1935. Origen de placas y diques del Ardnamuchan, Método analítico</p>	<p>Fig 1.2.2 Robson y Barr 1964. Distribución de esfuerzos en relación con la resistencia de la roca. Método analítico</p>	<p>Fig 1.2.3. Pollard 1973. Propagación de fracturas sólido infinito con agujero horizontal infinitamente largo. Método analítico</p>	<p>Fig 1.2.4 Mogi 1958 Sólido elástico semi infinito con esfera pequeña profunda. Desplazamientos verticales por cambio de presión hidrostática. Método analítico</p>
<p>Fig 1.2.5 Yokoyama 1971. Lo mismo que Mogi pero con distribución variable en la pared de la esfera. Método analítico</p>	<p>Fig 1.2.6 Walsh 1971 y Decker. Desplazamientos verticales y horizontales e inclinación de la superficie debidos a una fuente lineal que se extiende en la profundidad. Método analítico.</p>	<p>Fig 1.2.7 Pollard y Holzhausen. Lo mismo que el anterior, pero con una fractura más cerca de la superficie. Método analítico</p>	<p>Fig 1.2.8 Ryan et al 1983. Campo de deformación tridimensional debido al retiro de magma de un compartimiento con forma de pretil. Medio anisotrópico. Semi-analítico</p>
<p>Fig 1.2.9 Davis 1983 Campo de desplazamientos producido por una dislocación rectangular profunda con presión de fluido, semiespacio elástico uniforme. Método analítico</p>	<p>Fig 1.2.10 Dietrich y Decker 1975. Cuerpo de magma inmerso en un semiespacio isotrópico y elástico. Probado en Kilauea. Método de elemento finito</p>	<p>Fig 1.2.11 Bianchi et al. 1984. Cámara oblata esferoidal e intrusión vertical. Probado en Campos Phelegranos. Método de elemento finito</p>	<p>Fig 1.2.12 Paul et al. 1987 Modelo numérico de bloc. Aplicado a Santa Helena. Método derivado del elemento finito</p>

2. Identificación de un paquete para la resolución de problemas físicos, mediante elemento finito, en cuerpos tridimensionales.

Introducción

Se buscaron paquetes para resolución de problemas físicos mediante el método de elemento finito, se encontraron algunos, por ejemplo el utilizado por Chevallier ABACUS, pero su costo es muy elevado. Se investigó entonces si en algún departamento del instituto de Geofísica se contaba con un paquete similar y si era posible que se permitiera su utilización, así se encontró en el Departamento de Recursos Naturales el paquete MODULEF y su empleo fue autorizado por el Dr. Alduncin.

Descripción general del paquete encontrado

El paquete, conocido como BIBLIOTECA COMPUTACIONAL MODULEF, es una colección de diversos programas con los cuales se aplica el método de elemento finito para la resolución de diferentes problemas físicos. Fue creado en 1975 por la compañía francesa INRIA y se actualiza constantemente. Contiene programas llamados módulos que permiten la solución de problemas de elasticidad lineal, no lineal, elastoplasticidad, flujo de calor, fluidos en movimiento, etc. La escritura de los programas correspondientes para el problema de interés se facilita con el empleo de programas conversacionales que escriben cada fase del programa deseado a partir de una serie de preguntas sobre el problema. En el caso de problemas que no cuenten con un módulo para su solución éste puede ser creado y añadido a la biblioteca computacional para poder utilizar otros elementos del paquete. También pueden diseñarse programas compatibles para utilizar sólo algunas partes del paquete o modificarlas. Todos los programas de MODULEF están escritos en fortran 77. En el departamento de recursos naturales se cuenta con la versión de 1997.

El mallado en relación con el paquete.

Como el problema que se desea resolver es la construcción de un mallado tridimensional del volcán que sea compatible con el método de elemento finito, se investigó sobre la manera en que se podía construir tal mallado para permitir el empleo posterior de los módulos del paquete. Se encontró que el mismo contiene programas, llamados malladores, que permiten la construcción de mallados para elemento finito de una gran variedad de estructuras geométricas. Tanto los malladores como los programas que simulan problemas físicos pueden ser utilizados para 2 y 3 dimensiones.

Visualización

El paquete cuenta con programas para la visualización de mallados bi y tridimensionales. Estos permiten observar distintos aspectos: la forma de cada elemento, su número, el número de cada nodo, las fronteras del mallado, su superficie externa, interna, etc. También tiene programas que permiten visualizar distintos aspectos de las soluciones obtenidas como isovalores, vectores de velocidad en cada nodo, etc.

Programas conversacionales

Para interactuar con los programas conversacionales se requiere un código de palabras clave, cada módulo tiene sus propias palabras clave. Al suministrar una palabra clave, el conversacional solicita la

asignación de valores para los diferentes parámetros que involucra. Los parámetros tienen, también, un nombre clave que queda asentado, en secuencias, junto con las de valores, en la impresión del programa obtenido del conversacional. Si el programa obtenido a través del conversacional es correcto éste corre y se puede pasar a la siguiente fase, si no es abortado con el mensaje de los parámetros equivocados. Cuando se tiene un error mínimo, el programa corre pero se obtiene una advertencia sobre el error.

El problema de elasticidad

El problema de elasticidad cuenta con varios módulos en el paquete: elasticidad, elastoplasticidad, elasticidad no lineal.

Para la utilización de los módulos es necesario pasar por varias fases que tienen los siguientes nombres:

- a) Determinación de datos para el mallado
- b) Mallado
- c) Interpolación
- d) Límites
- e) Cálculos
- f) Elasticidad, elastoplasticidad, o elasticidad no lineal
- g) Visualización

- La primera fase (a), se desarrolla fuera del paquete y consiste en determinar los puntos que se desea considerar, los límites físicos de la estructura, las regiones donde se asignarán valores a la frontera, las regiones que requieren de mayor precisión, etc.
- Se cuenta con un programa especial llamado preprocesador general TOUTXX que permite el acceso a las fases (b), (c), (d) y (e) con las 2 primeras iniciales. Cada fase cuenta con un conversacional.
 - b) Mallado:* Se construye a partir de los puntos elegidos
 - c) Interpolación:* En esta fase se estructura la información sobre el tipo de elemento finito que se utilizará
 - d) Límites:* Se estructuran los datos sobre las fronteras que permanecerán inmóviles durante la simulación
 - e) Cálculos:* Se estructuran los datos sobre las propiedades del material, módulo de Young, razón de Poisson y fuerza aplicada.
- La fase f) constituye el proceso de los datos y es necesario salir del preprocesador para acceder al módulo del problema que se desea resolver, es decir, elasticidad lineal, o elastoplasticidad, o elasticidad no lineal, esto también se logra con la palabra clave correspondiente.
 - f) Elasticidad:* Se utilizan las estructuras de datos que se obtuvieron en las fases anteriores para resolver del problema
- Una vez resuelto el problema se visualizan las soluciones con el preprocesador general TOUTXX.

3. Desarrollo del Mallado tridimensional del volcán Popocatépetl, restringido con datos topográficos

3.1 El Modelo topográfico

Características generales del Popocatépetl

El Popocatépetl es un estratovolcán Andesítico - Dacítico cuya localización es 19.02N 98.62 W. Tiene una altura de 5 452 metros sobre el nivel del mar. Su cráter es elíptico, cuyo diámetro mayor es de 900 metros y el menor de 600 metros, aproximadamente, su profundidad es de 150 metros desde el labio inferior que da hacia el lado sureste del volcán. Está situado en los límites de los estados de Puebla, México y Morelos. Posee una forma cónica y al norte se une al Iztaccihuatl por la región conocida como paso de Cortés, aproximadamente a 2500 msnm (Página www.cenapred.unam.mx)

El modelo topográfico

En primera aproximación la forma del Popocatépetl es un cono, sin embargo, cuando se estudia con mayor detenimiento se observan diversas irregularidades como rugosidades y barrancas. Además del lado norte del volcán se encuentra el Iztaccihuatl, una enorme estructura geológica anterior al nacimiento del Popocatépetl que ocasiona mayor altura en este lado del volcán y trunca el cono en la región de intersección. El camino que se siguió para considerar estos aspectos fue el empleo de curvas de nivel. Para ello se utilizó la impresión de un mapa digital proporcionado por el CENAPRED.

Curvas de nivel

Se obtuvo un mapa de curvas de nivel para cada 100 m a partir de un archivo de los datos topográficos del volcán.(CENAPRED). Al realizar un análisis de estas se observó lo siguiente:

- 1) El volcán presenta mayor extensión hacia el sur, debido a la presencia del Iztaccihuatl en el lado norte.
- 2) Las curvas son cerradas en torno al cráter hasta los 3600 m
- 3) a partir de los 3400 m las curvas se incluyen al Iztaccihuatl, del lado norte.
- 4) La barranca de Nexpayantla se curva hacia el Norponiente
- 5) Las curvas en la región Noreste del volcán muestran un pliegue curvado hacia el oriente, pero que alcanza una mayor extensión hacia el norte que la barranca de Nexpayantla.
- 6) Las curvas se rompen a partir de los 2500 m debido a diferentes montículos y valles
- 7) Hay una intersección entre el Popocatépetl y el Iztaccihuatl aproximadamente a los 2600 m en una región llamada Paso de Cortés
- 8) La superficie del volcán es rugosa de manera no uniforme

Selección de puntos para el modelo topográfico

Con base en las observaciones anteriores se eligieron 24 puntos de cada curva repartidos lo más uniformemente posible. Esto equivale a elegir un punto cada 15° aproximadamente. Como línea de referencia se tomó una recta en dirección N-S que pasará por el centro del cráter. (Fig 3.1.) Para seleccionar los puntos se consideraron los siguientes criterios:

- 1) Los puntos se tomaron de las curvas de nivel, con una separación de 10 – 20°, aproximadamente, 12 del lado Este y 12 del lado Oeste.

- 2) En los casos para los que el punto correspondiente estuviera junto a un detalle topográfico, que el siguiente punto ya no podría considerar, entonces la elección del punto se desplazó a un lugar más representativo, antes del siguiente punto, que también se reubicó, para mantener la uniformidad, en la medida de lo posible.

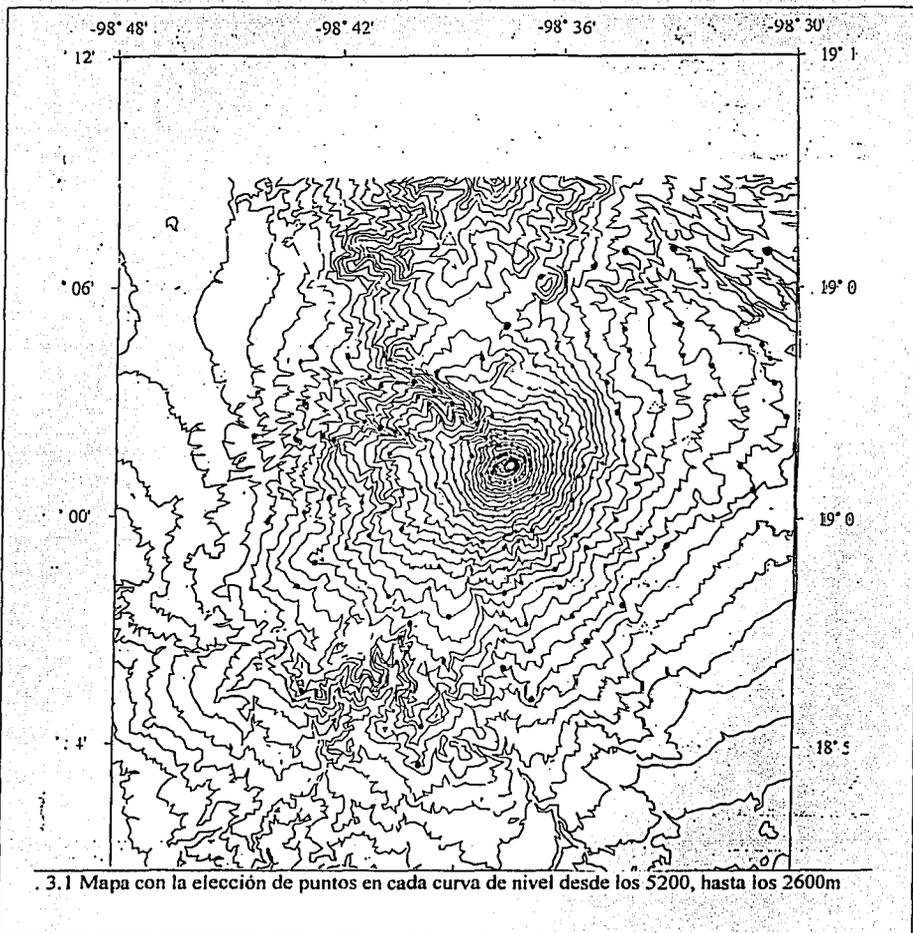


Fig. 3.1 Mapa con la elección de puntos en cada curva de nivel desde los 5200, hasta los 2600m

- 3) Hay regiones en las curvas de nivel muy rugosas o complejas con hendiduras y salientes no uniformes, en este caso se eligió un punto que mediara este comportamiento. En algunos casos estuvo fuera de la curva de nivel.
- 4) Esta manera de elegir los puntos determina que la separación entre ellos, para las curvas de nivel más altas y cercanas a centro del volcán, sea menor que la de las curvas más alejadas y bajas.
- 5) Si se siguen las líneas que contienen los puntos desde el centro hacia fuera se observa que estos "rayos" se curvan siguiendo las hendiduras más notables y los pliegues más grandes.

Límites topográficos del modelo

El modelo topográfico se limitó de la siguiente manera:

1) En sentido vertical:

Se eligieron curvas de nivel cada 200 m a partir de los 5200 m hacia abajo. Se limitó el modelo en la curva correspondiente a los 5200 m, hacia arriba y hacia abajo tuvo 10 Km. de profundidad a partir de esta altura. El motivo para elegir la curva de los 5200m fue que a partir de la de 5300 ya no se tiene una curva única debido a que el volcán es más elevado hacia el poniente el hacia el oriente y dentro del cráter tampoco hay uniformidad. Esto constituye una diferencia del 2% en la altura del modelo del volcán.

2) Límite a la redonda:

En torno del volcán se decidió no utilizar un círculo para delimitar el modelo, sino una curva de nivel, es este caso la curva correspondió a los 2 600 m de altitud. Esto se hizo con el fin de seguir la topografía lo mejor posible, los cual se pensó apropiado para facilitar la introducción de datos y la interpretación de resultados. De esta manera el límite a la redonda no es uniforme, el máximo es de aproximadamente 12 Km. y el menor de unos 7 Km.

Se eligió esta curva de nivel debido a que al norte del volcán se encuentra el Iztaccihuatl, al llegar a paso de Cortés las curvas de nivel se ya no son cerradas en torno del Popocatepetl, sino que rodean también a "la mujer dormida", entonces se tiene que determinar una zona en la que termina el Popocatepetl y comienza el Iztaccihuatl, la curva de nivel más apropiada para ello fue precisamente la correspondiente a los 2 600 m. Además a partir de los 2500 m las curvas se rompen por lo que se dificulta la elección de puntos correspondientes al volcán y puntos fuera de él.

3) En relación con el Iztaccihuatl:

El Iztaccihuatl es un enorme estructura geológica previa al Popocatepetl que en el sentido estructural hace las veces de contrafuerte al lado norte del edificio, entonces se decidió eliminar la región correspondiente a esta estructura, para obtener un cuerpo tridimensional para el Popocatepetl, diferenciado del resto de la orografía. Para ello se utilizaron los siguientes criterios:

- a. En la intersección del paso de Cortés se consideró el punto más bajo entre ambos edificios y ahí se puso el límite al modelo del Popocatepetl
- b. En el Norponiente del edificio volcánico se encuentra la notable barranca de Nexpayantla, la cual muestra una curvatura espiral hacia abajo y hacia el poniente. Este comportamiento puede considerarse como una zona donde el Iztaccihuatl opone rigidez. Entonces se limitó el modelo hasta esta región.
- c. En el lado Nororiente del volcán hay un pliegue con un comportamiento similar a Nexpayantla, pero más suave y que logra extenderse más hacia el norte. En esta región ese fue el límite para el modelo.

3.2 Correlación entre el modelo y la sismicidad

Sismos de origen volcánico

La información sísmica es de gran importancia para el estudio de los fenómenos que ocurren en el interior de la tierra, porque viene precisamente de donde se originan. Los sismos de origen volcánico pueden clasificarse de la siguiente manera (Lahr et al, 1997): Los volcano - tectónicos VT son atribuidos a las fallas por fragilidad en respuesta a cambios de esfuerzos, asociados con la actividad magmática, presentan período corto por lo que su frecuencia es alta (arriba de 5 Hz) . Los de período largo LP, asociados a la resonancia de fracturas o conductos llenos de fluido, inducida por presiones transitorias en los fluidos . y los Híbridos, con características de ambos, y que pueden ser resultado de la fragilidad en zonas de debilidad que intersectan fracturas llenas de fluido y así tienen ambos comportamientos. Para el problema que nos ocupa se utilizará la información de los sismos volcano-tectónicos porque ellos están relacionados con las regiones de cambios de esfuerzos.

Registro sísmico

El Popocatepetl ha sido monitoreado desde hace mucho tiempo, pero se ha intensificado su estudio a partir de 1994, año en que salió de su último letargo y recomenzó actividad fumarólica importante. La siguiente figura muestra una vista del volcán en el sentido N-S y en el sentido E-O, así como un vista en planta. En cada una se ubican los sismos de tipo VT ocurridos de Dic. 1994 a Dic. 2002 .

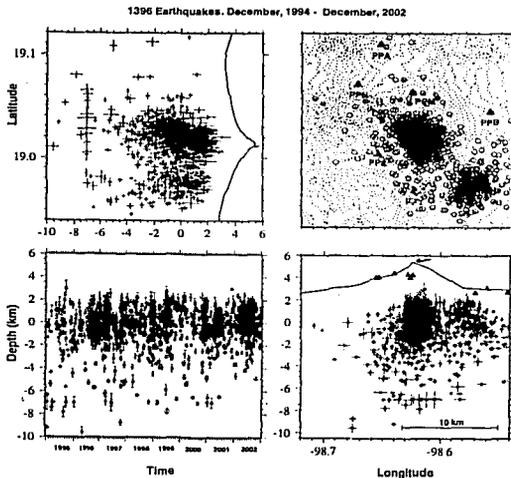


Fig. 4.1 Vista de la localización de los sismos en el mapa, (epicentros) y la localización de su profundidad conocida como hipocentro, de los sismos en el Popocatepetl, desde 1994 Gráficas proporcionadas por el departamento de Sismología y vulcanología del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Se observa un mancha difusa cuya mayor densidad se ubica entre los 2 y -2 km snm, aproximadamente. Hay que resaltar que arriba y debajo de esta mancha se reduce la densidad de sismos prácticamente a cero. De manera horizontal se observa una región acorazonada donde se encuentra la mayor densidad de sismos. La ubicación del cráter (marcada con una cruz) muestra que ésta región está desplazada hacia el sureste. Otra observación importante es la existencia de otras región de acumulación de sismos de menor tamaño y con menor densidad de sismos hacia el sureste del cráter centrada a unos 8 km de éste. En la región debajo de la mancha de sismos se observa una densidad casi nula de estos desde los -4600km snm se consideró que ésta debe corresponder a la región que nutre de magma al Popocatepetl porque dada la abundancia de magma la sismicidad debe reducirse drásticamente por tratarse de un material no rígido.

La región sobre la mancha de sismos también presenta un densidad casi nula a partir de los 2km aprox. Esto se puede deber a que a partir de esta profundidad la oposición que presenta el material es pequeña por lo tanto puede fluir con facilidad y así no presenta sismicidad.

Estructura interna del volcán

Aproximadamente a 10 km bajo el cráter, los sismos desaparecen casi por completo, se piensa que a esa profundidad se localiza la región que alimenta de magma al volcán, por que al poseer una alta densidad de magma su resistencia ante los esfuerzos desaparece, así que no debe producir sismos.

Sobre esta región debe nacer algún tipo de conducto lleve el material hasta el cráter, pero no se conoce su forma.

En este modelo se decidió proponer un ducto vertical muy delgado, localizado en el cráter, en la región donde brota el magma. Su forma es de prisma cuadrangular con base irregular, de 50m x 20 m aproximadamente.

3.3 Desarrollo del Mallado tridimensional del Popocatepetl

3.3.1 Descripción general

Estructura general del modelo

El modelo consiste en la estructura topológica del volcán, descrita en la sección anterior, con una fisura que parte del lugar del cráter donde emerge el material magmático, y se extiende hacia abajo verticalmente hasta los -4600m snm. Mediante la aplicación de una fuerza ascendente en esta fisura se propuso reproducir la región principal de sismos VT del volcán.

Estructura general del mallado

La forma del edificio del volcán, en el mallado, se asemeja a una pirámide de 14 escalones, donde cada escalón corresponde a una curva de nivel, la altura de estos escalones es de 200m. Se consideran las curvas de nivel desde 2600m snm, hasta 5200m. Hacia abajo, se mantiene la forma de la curva de nivel correspondiente a los 2600m, hasta 4600m de profundidad bajo el nivel del mar.

- 1) Se construyó una *base de datos* compatible con el paquete MODULEF, utilizando los puntos, de las curvas de nivel, elegidos en el capítulo anterior, con el mallador emc2.
- 2) Se elaboraron *anillos concéntricos* utilizando los puntos de *cada dos curvas de nivel* consecutivas. Estos anillos fueron mallados con 24 elementos cuadrangulares.
- 3) Mediante la utilización de los anillos se generaron *tubos tridimensionales*, constituidos por

pisos de 200 m cada uno. A estos tubos se les fue quitando un piso a medida que la curva de nivel utilizada correspondía a 200 m menos que la anterior. La base de todos los tubos se ubicó a la misma profundidad, 10km bajo el nivel del cráter. El tubo central, que corresponde al cráter tuvo 50 pisos y fue el más alto.

- 4) Estos tubos fueron construidos de manera "concéntrica" y se juntaron para obtener el mallado total.

Archivos relacionados con mallados en MODULEF

Los programas malladores tienen un programa conversacional que permite elaborar un archivo con terminación .MALLA, pero para poder visualizar el mallado construido es necesario ejecutar estos programas, lo que da por resultado la generación de un archivo con terminación .NOPO. Este último tipo de archivo se visualiza mediante el programa TRNOXX o con una opción en el preprocesador general TOUTXX.

3.3.2 Obtención de las estructuras de datos de los puntos elegidos, mediante EMC2

Cómo entrar al mallador EMC2

Se abre una consola en la computadora SUN, una vez que se tiene abierta se teclea emc2 con minúsculas, porque se ésta en ambiente U N Í X, se da ENTER y una vez que pregunta acerca de las opciones que se desean se da nuevamente enter para aceptar las condiciones por default. Después de hacer esto aparece una ventana con la zona para dibujar en el centro, con sus ejes, y en torno de ésta diversas opciones. Esta es una ventana interactiva en la que se utiliza tanto el ratón como el teclado. También aparece abajo una ventana que corresponde a la consola que se abrió para entrar a EMC2, en ella se irán registrando automáticamente todos los pasos que se realicen con la ayuda de la ventana interactiva.

Elección de escala

El mallador EMC2 permite dibujar diversas estructuras bidimensionales. Con el fin de obtener una figura con dimensiones apropiadas, para su fácil interpretación, se puede utilizar la función escala. Mediante el ratón se da un clic en botón que dice escala y utilizando el teclado o la parte de la pantalla dónde aparecen los números (utilizando también el ratón) se puede variar el tamaño de la figura de manera arbitraria. Esto permite, por ejemplo, ajustar con la unidad de éste mallador, una equivalencia con un metro o un Km. etc.

Función Point

Esta función se encuentra en el panel superior de la pantalla del mallador. Mediante ésta se puede dibujar cualquier punto en la pantalla, esto puede realizarse de dos maneras:

- 1) Mediante el ratón

Se da un clic con el ratón sobre la palabra POINT, luego se da un clic en el panel inferior sobre la palabra MAUSE. Después de esto se lleva el puntero del ratón a la pantalla y se da un clic en el lugar donde se desea colocar el punto. El punto elegido aparecerá como una cruz en la pantalla

- 2) Mediante las coordenadas

Se da un clic con el ratón sobre la palabra POINT, luego se da un clic en el panel inferior sobre el botón que dice XY/. Entonces, mediante el teclado, se dan las coordenadas del punto, primero la abscisa y luego la ordenada, después de cada coordenada se oprime la tecla igual. Una variante de este método, es utilizar los números del panel derecho de la pantalla: con el ratón se dan las coordenadas, primero la abscisa, luego un clic en el signo =, después la ordenada, luego un clic en el signo =. En este caso los puntos elegidos también aparecen marcados con una cruz.

La base de datos .bd_emc2

1) Elección de puntos en pantalla

Los puntos que se eligen en la pantalla pueden guardarse en una base de datos con terminación .bd_emc2. Para esto, una vez elegidos, se da un clic sobre la palabra SAUV en el panel izquierdo de la pantalla, en la parte inferior de la pantalla aparece un mensaje pidiendo el nombre con el que se desea guardar los datos. Se tecldea el nombre y se da ENTER. En esta base de datos se encuentra registrada la sesión con el panel interactivo, para cada punto se tienen sus coordenadas y son guardados en el orden en que fueron marcados sobre la pantalla. Además las coordenadas de cualquier punto puede cambiarse mediante un editor de texto.

2) Restauración de los puntos elegidos en pantalla.

La base de datos .bd_emc2 puede restaurarse en la pantalla volviendo a abrir el mallador y dando un clic en el panel izquierdo sobre la palabra RESTORE, luego en la parte inferior de la pantalla aparece un mensaje pidiendo el nombre del archivo que se desea restaurar, se da el nombre y el archivo generará los puntos que contiene, incluyendo los cambios que se le hayan efectuado

Precisión

El paquete MODULEF utiliza dos cifras para potencias de 10 en cada coordenada lo que se traduce en la posibilidad de una precisión de 99 cifras después del punto decimal, pero no es posible utilizar tantas cifras en este tipo de trabajo. Al utilizar el ratón para elegir puntos en la pantalla, la precisión depende del puntero del ratón, y del tamaño relativo de éste en relación con la escala del mapa. Una apreciación de la precisión con la que se efectuó la toma de datos es el tamaño de los cuadrángulos más pequeños, el lado menor de ellos es en promedio de aproximadamente 20m.

Obtención de datos

Los puntos elegidos sobre el mapa de curvas de nivel, en la sección anterior, se utilizaron para hacer las bases de datos mediante el mallador EMC2. Se sacó un acetato del mapa con los puntos elegidos, se pegó directamente en la pantalla del EMC2, se eligió una escala en la que una unidad fuera equivalente a 1 Km. Luego, se marcaron los puntos elegidos sobre la pantalla, con el ratón, mediante la función POINT. Este proceso se efectuó en orden descendente, curva por curva, de manera independiente la parte este del volcán y la oeste.

3.3.3 Construcción de mallados bidimensionales horizontales

El mallador APNOXX

El mallador EMC2 puede elaborar mallados sobre figuras cerradas generadas, pero en el caso del volcán no se cuenta con la simetría necesaria para obtener una malla uniforme. Además el tamaño de las celdas debe ser más fino cuanto más cerca se esta de la fuerza aplicada, por tal motivo se utilizó otro mallador bidimensional de MODULEF que permite elaborar mallados arbitrarios, el APNOXX.

Cuadrángulo

La pieza básica de todos los mallados elaborados fue el cuadrángulo, es decir, las bases de todos los mallados parciales están constituidas por piezas cuadrangulares irregulares. A continuación se describe el proceso para la obtención de un cuadrángulo mediante el mallador bidimensional APNOXX.

Como se mencionó en el capítulo 2 el mallador APNOXX tiene un conversacional que permite la elaboración del programa deseado, mediante la respuesta a un conjunto de preguntas y el empleo de palabras clave que a su vez solicitan la administración de un conjunto de parámetros y datos.

Para elaborar el cuadrángulo deseado se requieren los siguientes pasos:

- 1) Se abre una consola y se tecldea, en minúsculas, la palabra apnoxx, se da ENTER y aparece un cuadro solicitando las características con las que se desea trabajar el conversacional, para comodidad se eligen las condiciones por default dando nuevamente ENTER. Una vez dentro del conversacional se pide la utilización de mayúsculas.
- 2) A continuación el programa pregunta si uno desea información, se tecldea N y ENTER, para continuar sin la información. Después da 3 opciones de lo que uno desea hacer, se elige crear mediante la letra C y luego ENTER.
- 3) Entonces el programa solicitará un nombre para el trabajo que se va a realizar, después de escribirlo se vuelve a dar ENTER.
- 4) El programa solicita entonces un nombre para el archivo que se va a generar, en este caso al nombre se le anexa la terminación .MALLA y se da ENTER.
- 5) Entonces el programa solicita la palabra clave que se desea trabajar, se escribe la palabra POIN y se da ENTER.
- 6) Aparece una pregunta donde se piden los valores de los parámetros IMPRE, NPOINT, en respuesta se da un número entre 1 y 10 para el para IMPRE y el número de puntos que en este caso es 4. Estos dos valores se dan separados por un espacio y luego se da ENTER.
- 7) Luego el programa solicita un parámetro y las coordenadas del primer punto: NOREF ,X ,Y. El parámetro NOREF es una etiqueta para caracterizar un punto o un conjunto de puntos. Se da el valor elegido para NOREF, la abscisa y la ordenada del punto separados entre sí por un espacio y después ENTER.
- 8) Después el programa pregunta lo mismo para el punto número 2, se dan los valores correspondientes, y así sucesivamente para cada punto.
- 9) Una vez que se dieron los 4 puntos, el programa pregunta si se desea mantener en esta palabra clave. En caso de necesitar hacer alguna corrección, se responde Y y ENTER, el programa pregunta cual dato se desea corregir, se da el número correspondiente y el programa pide que se vuelvan a dar el NOREF y las coordenadas. En caso de que no haya necesidad de corregir se le da N y ENTER.
- 10) Luego el programa pregunta si se desea mantener en la misma palabra clave, se dan las letras Y P, separadas por un espacio y luego ENTER. Entonces aparece en la pantalla la serie de puntos que se dio.
- 11) El programa pregunta nuevamente si se desea mantener en la misma palabra clave, se le dice N ENTER, para salir de esta palabra clave. Entonces el conversacional pregunta por la siguiente palabra clave.
- 12) Se da la palabra clave LIGN, luego ENTER. Mediante esta palabra clave se construirán las líneas que unen los puntos introducidos mediante POIN.
- 13) A continuación el programa pregunta cuantas líneas se van a dibujar, se escribe el número y se

da ENTER.

- 14) Después de esto el programa pregunta los valores para los siguientes parámetros, para la primera línea: NOELIG, NEXTR1, NEXTR2, NOREFL, NFFRON y RAISON. El primero (NOELIG) es el número de puntos que deberá contener la línea, incluyendo los extremos, en este caso 3; el segundo (NEXTR1) es el número de punto a partir del cual será trazada la línea, el tercero (NEXTR2) es el número de punto al cual llegará la línea; el siguiente (NOREFL) es la etiqueta con la que se reconocerá esta línea (o un conjunto de líneas); El siguiente (NFFRON) solicita una función, si es que existe alguna entre los puntos dados, si no existe se da el valor 0; El último pregunta la proporción (RAISON) que se desea poner entre los puntos que contendrá la línea. Los valores se dan separándolos entre sí por un espacio y al final se da ENTER.
- 15) Lo mismo se preguntará para cada una de las líneas, al terminar de dar los valores para las 4 líneas, el programa pregunta si se desea permanecer en esta palabra clave, el procedimiento es el mismo que para POIN. (inciso 10)
- 16) El programa vuelve a preguntar si se desea permanecer en esta palabra clave, se da N y luego ENTER. El programa pregunta por la siguiente palabra clave, se le dice QUAC y se da ENTER. Con esta palabra clave se obtendrá una malla con elementos cuadrangulares para el cuadrángulo determinado por las líneas de la función LIGN.
- 17) El programa pide a continuación los valores para los siguientes parámetros: IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI NSIL. Para el primero (IMPRE) se da un número entre 1 y 10. El segundo (NIVEAU) es una etiqueta que se da a los mallados parciales y puede tomar un valor entre 1 y 35. El tercero (NUDSD) es una etiqueta que numera los subdominios que conforman el mallado total, el siguiente (NBRELI) es el número de líneas que forman el perímetro que se desea mallar. El siguiente (NSIL) determina el orden en que se organizan las líneas del contorno, en el sentido de las manecillas del reloj o al contrario, el primero se representa por el número 1 y el contrario por 0.
- 18) Después de dar los valores anteriores el programa pedirá uno por uno los números del orden de las líneas del contorno, después de dar 1, se da ENTER, después de dar 2, se da ENTER y así sucesivamente, (para este caso).
- 19) Después el programa pide valores para los parámetros IMAX y NQUAD, el primero (IMAX) pregunta sobre el número de puntos que contiene la primera línea del contorno incluyendo los extremos, el segundo (NQUAD) pregunta el tipo de elementos con los que se mallará el contorno, el valor 1 indica que se utilizarán cuadrángulos. Después de dar la pareja 2 1, separada por un espacio, se da ENTER.
- 20) El programa pregunta si se desea permanecer en la misma palabra clave, se procede como en 10). Se le da N y ENTER para salir de esta palabra clave.
- 21) El programa pregunta por la siguiente palabra clave que se desea utilizar, se escribe SAUV y se da ENTER. El programa pide los valores para los siguientes parámetros: IMPRE, NINOPO, NTNOPO. El primero (IMPRE) es un número entre 1 y 10, el segundo (NINOPO) es una etiqueta para el archivo de salida con formato NOPO, el tercer (NTNOPO) parámetro indica si se van a anexar tablas extra al archivo con formato NOPO, en este trabajo no se utilizó este parámetro por lo cual tuvo un valor de 0. Se dan los tres valores y luego ENTER.
- 22) Después el programa pregunta el nombre que se asignará al archivo que va a generar el conversacional con la sesión realizada. Se da, el mismo nombre que al archivo con terminación .MALLA, pero en este caso la terminación será .NOPO, luego ENTER.
- 23) El conversacional preguntará por la siguiente palabra clave, se le da F, luego ENTER. Con esto termina la sesión con el conversacional APNOXX para generar un cuadrángulo.
- 24) Para visualizar el mallado construido se utiliza el programa TRNOXX, el cual se abre de la

misma forma que EMC2, aparece también una ventana y en la parte inferior está la consola donde se pide el nombre del archivo que se desea visualizar. En esta consola se escribe el nombre con que se guardó la sesión con APNOXX, (por ejemplo CUAD.NOPO). En la ventana aparece entonces la figura de un cuadrángulo dividido en cuatro cuadrángulos.

25) Una vez que se indica la palabra clave FIN, el mallador brinda las 3 opciones del principio, de las cuales se elige ahora ejecutar, mediante la letra E y luego ENTER

A continuación se muestra el programa CUAD.MALLA, creado con el conversacional, APNOXX para el cuadrángulo:

```
'CUAD
'POIN
  1      4      $ IMPRE NPOINT $
$ NOP NOREF(NOP) X(NOP) . Y(NOP) . $
  1      1      - .122412E-01 - .812021E+00
  2      1      0 .307137E+00 - .599102E+00
  3      1      0 .253908E+00 - .386182E+00
  4      1      - .122412E-01 - .492643E+00
'LIGN
  1      4      $ IMPRE NDLM $
$ NOLIG NOELIG NEXTR1 NEXTR2 NOREFL NFFRON RAISON $
  1      3      1      2      1      0      0.100000E+01
  2      3      2      3      1      0      0.100000E+01
  3      3      3      4      1      0      0.100000E+01
  4      3      4      1      1      0      0.100000E+01
'QUAC
  1      1      1      4      1      $ IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI
NS1L
$ LIST OF THE CONTOUR LINES :
  1      2      3      4
  3      1
'SAUV
  1      1      0      $ IMPRE NINOPO NTNPOPO
CUAD.NOPO $ FILE NAME
'FIN
```

Fig. 4.2 El programa para generar un cuadrángulo

Semianillo

Para construir cada semianillo, cuyas fronteras son la mitad de dos curvas de nivel consecutivas, se pegan los mallados de cuadrángulos consecutivos mediante la palabra clave RECO. El programa se construye también con la ayuda del conversacional APNOXX. A continuación se muestra un programa generado con el conversacional APNOXX para la construcción del semianillo Este para la curva de nivel 34, del lado este. Para ver un ejemplo de este tipo de programa consulte el Apéndice.

Anillo

Mediante la palabra clave INTR se da el nombre de cada uno de los semianillos de un nivel, y se les

asigna un nivel, luego se da la palabra clave RECO y los niveles del semianillo este y oeste, se da la palabra clave SAUV, se asigna el nombre .NOPO y por último se da la palabra clave Fin para salir del programa, se da E para ejecutar y obtener el correspondiente archivo .NOPO correspondiente.

3.3.4 Mallados tridimensionales

Tubos concéntricos

Para realizar los mallados tridimensionales se utilizan los bidimensionales. Esto es posible mediante el preprocesador general TOUTXX. Para entrar a este programa, se procede de la misma manera que con los otros malladores. Se abre una consola, se teclea, en minúsculas la palabra toutxx, luego ENTER, después para aceptar las condiciones por default se vuelve a dar un ENTER. Luego, aparece el mensaje ofreciendo información, se escribe N, luego se da ENTER, para no aceptar la información. Después aparece un conjunto de opciones, se da MA enter, TR enter, C enter.

Elaboración del programa

- 1) Se solicita el nombre del trabajo, se da con terminación .MALLA
- 2) Se solicita una palabra clave, se da INTR, luego ENTER, esta palabra clave sirve para introducir un archivo .NOPO que contiene un mallado bidimensional. Se da el nombre del archivo que contiene el corte transversal de interés, luego ENTER, se pide el parámetro IMPRE y el nivel del mallado introducido.
- 3) Luego solicita una palabra clave, se le da MA23, pide entonces el nivel del mallado resultante y la cantidad de capas que se desea construir, se teclean ambos valores y se da ENTER.
- 4) Después pide nuevamente otra palabra clave, se le da TRAN, y solicita la coordenadas del vector de traslación para el mallado, en este caso se dan las coordenadas 0 0 200. con esto se genera un mallado tridimensional cuya base es el mallado bidimensional introducido previamente y la altura de cada capa es de 200 metros y tiene el número de pisos elegido.
- 5) Después el programa solicita nuevamente una palabra clave, se le da la palabra BASE, que solicita el parámetro ZIMINF y se le dice la coordenada z en la que se quiere colocar el mallado.
- 6) Se da la palabra clave SAUV, el nombre, .NOPO, la palabra clave FIN con lo que se sale del conversacional. Después se ejecuta para obtener archivo .NOPO.

Diferentes tubos

Se elaboró un tubo para cada par de curvas de nivel de manera que cada uno tubo una altura de 200m menor al anterior. El más alto, correspondiente a la cima, tubo 50 pisos y el más bajo 36.

A partir de los 3600m sobre el nivel del mar, hacia abajo, los tubos ya no fueron cerrados, debido a que las curvas de nivel se extienden hacia "la mujer dormida" y ésta fue amputada en el modelo topográfico.

La región central

El mallado del interior del cráter fue un tubo con una pequeña fisura cuadrangular de unos 50m x 20m, situada en la zona correspondiente a la emisión de magma. La ubicación de este tubo fue el centro del mallado tridimensional.

3.3.5 El mallado final

Procedimiento de pegado

Para obtener el mallado final se utilizaron nuevamente las palabras clave INTR y RECO, se pegaron todos los tubos descritos en la sección anterior y se asignó el nombre PCRI26, que significa Pisos del mallado base CRI26, mismo que está constituido por la unión de todos los anillos y es el equivalente a un mapa de curvas de nivel. A continuación se muestran diferentes aspectos del mallado final.

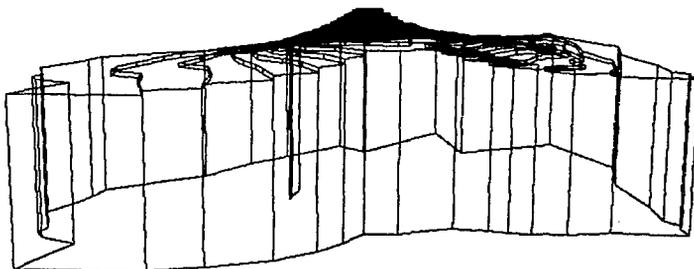


Fig. 4.3 Vista desde el Norte del mallado tridimensional
Punto de observación: (0km Este,50km Norte,3km snm) .

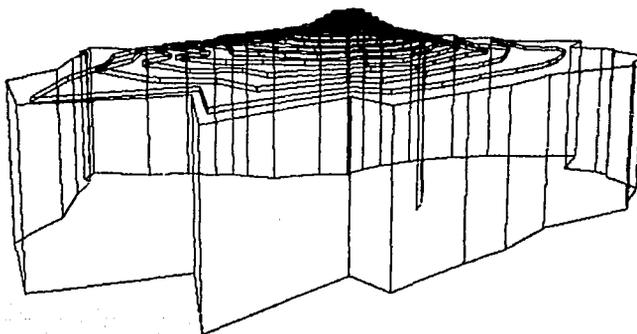
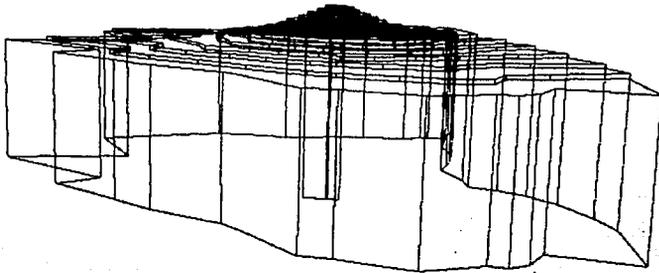


Fig. 4.4 Vista desde el Sur del mallado tridimensional
Punto de observación: (0km Este,50km Sur,3km snm)



4.5 Vista desde el Este del mallado tridimensional
 Punto de vista: (50km Este,0km Norte,3km snm)

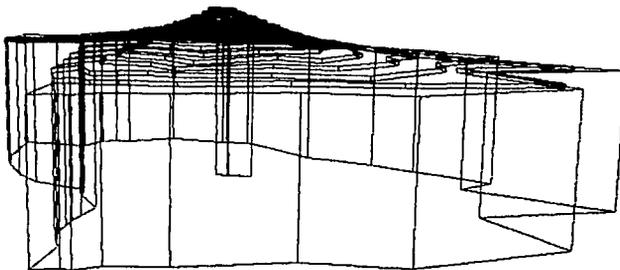


Fig. 4.5 Vista desde el Oeste del mallado tridimensional
 Punto de observación: (50km Oeste,0km Norte,3km snm)

Cortes del mallado

El primer corte consta del mallado horizontal, es decir, la estructura interna de la malla en sentido horizontal. Véase figura 4.6.

Se elaboraron otros cuatro cortes del mallado, separados 45° entre sí, pero en sentido vertical. Estos se utilizaron para la prueba simplificada y correspondieron a los siguientes sentidos: Norte – Sur, Oeste – Este, Sueste – Noroeste y Suroeste – Noreste. Dichos cortes se realizaron a mediante de planos en los sentidos señalados, pero que pasan a través de la fisura. Estos cortes permiten visualizar los resultados del capítulo 5.

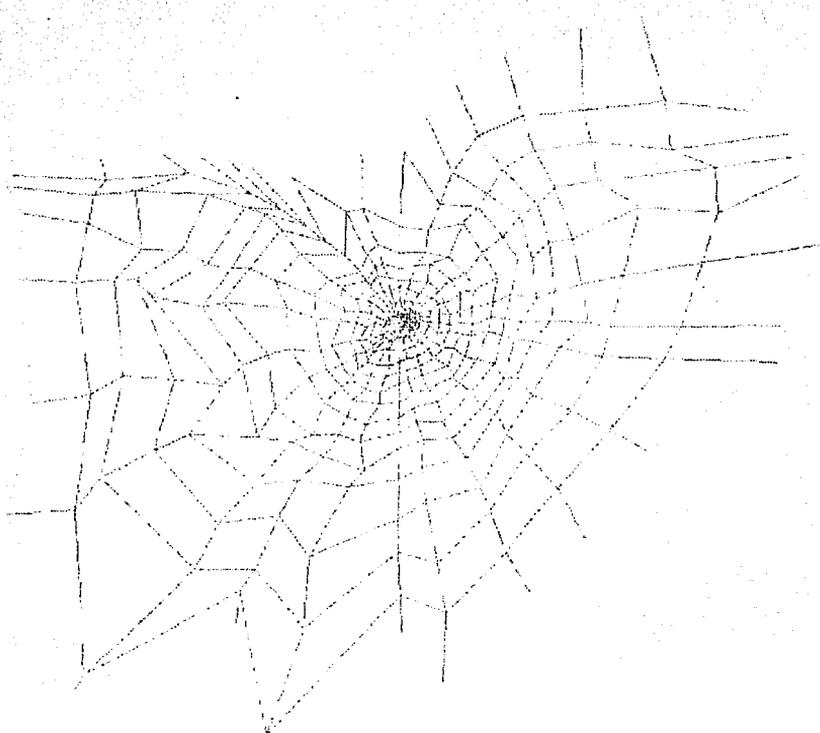


Fig. 4.6 Corte transversal del mallado tridimensional, se observa el menor tamaño de las celdas más cercanas a la fisura, en cambio, a mayor distancia de la fisura, las celdas son más grandes. Esto le da una apariencia de telaraña.
(archivo CRI_26)

4. Prueba simplificada del Mallado

4.1 Planteamiento del problema

Descripción general

La prueba simplificada del mallado consistió en el empleo de 4 cortes verticales, que pasan por la fisura del modelo, con un ángulo de 45° entre cada uno y cuyos sentidos fueron: Oeste – Este, Suroeste – Noroeste, Sur – Norte y Sureste Noroeste. Como resultado de cada corte se obtuvo un mallado bidimensional sobre el que se aplicó el módulo de elastoplasticidad, *elapxx*, pero dentro de sus límites elásticos. Para aplicar *Elapxx* se utiliza un programa conversacional que plantea el problema de un cuerpo elástico con un valor crítico en el esfuerzo, a partir del cual el material se torna plástico, este valor se conoce como umbral de plasticidad. Para acceder al conversacional de *elapxx* es necesario pasar por las fases señaladas en el capítulo 2 donde se generan los archivos de interpolación, límites y cálculos que determinan el tipo de elementos, las condiciones a la frontera y características elásticas del material. El conversacional de *elapxx* integra esta información y genera un programa para resolver el problema planteado, hecho esto se ejecuta el programa cuya solución es un conjunto de archivos para ser visualizados. (Véase figura 4.1.1)

Es importante aclarar que en la prueba realizada no se rebasó el límite elástico del material, así que se satisface la ley de Hooke, es decir, los desplazamientos son proporcionales a los esfuerzos. Por este motivo las deformaciones del mallado son muy pequeñas e inapreciables, por nuestros ojos, en las figuras. En este caso, el módulo *elapxx* permitió controlar la fuerza ascendente de manera que deformaciones fueran elásticas.

Propiedades físicas del material del modelo

El material del modelo es homogéneo con Modulo de Young = 60 Mpa, Razón de Poisson de 3 y Umbral de plasticidad de 0.8×10^9 Pa. Los datos del material elegidos son consistentes con los empleados por Chevallier et al y Verwoerd 1988, también con el Enciclopedia de volcanes de Academic Press.

Condiciones a la frontera

1. Una fuerza constante a lo largo de las paredes de la fisura cuyo valor es 0.8×10^4 N. Esta fuerza es la fuerza neta entre el peso del material y la fuerza hacia arriba que lo hace ascender. Se cuidó que esta fuerza no excediera el límite elástico del modelo evitando la aparición de plasticidad en los elementos.
2. En toda la orilla del volcán, la pared tiene la condición de permanecer inmóvil
3. El resto del mallado queda libre y sufre modificaciones sólo por las dos condiciones anteriores.

El siguiente diagrama muestra las diferentes fases para la solución del problema, utilizando el módulo elapxx.

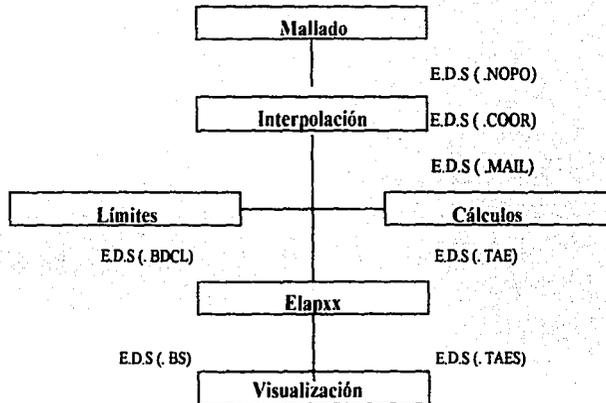


Fig. 4.1.1 Esquema general de resolución de un problema de elastoplasticidad (Sánchez, 1997) . En los rectángulos se están las fases. E.D.S. Significa estructura de datos de salida. Entre paréntesis se escribe la terminación del archivo de salida correspondiente a cada fase y que sirve de archivo de entrada para la siguiente fase.

4.2 Resultados

El acceso a los resultados del proceso se logra mediante la visualización, a través de gráficas para el desplazamiento horizontal y vertical. Esta fase es interactiva, se puede seleccionar el número de curvas en una gráfica, las curvas de desplazamiento extremo, el valor valores específicos que se desee observar. Las componentes horizontal y vertical se muestran por separado. A continuación se muestran 16 gráficas, 4 para cada corte, dos de desplazamiento horizontal y dos de desplazamiento vertical. Primero se muestra la distribución general de las curvas de isovalores, es decir con el mismo valor en el desplazamiento, y después se muestra un acercamiento a las regiones de interés, tanto en el sentido horizontal como vertical.

Isovalores de desplazamiento horizontal en el Corte Oeste – Este.

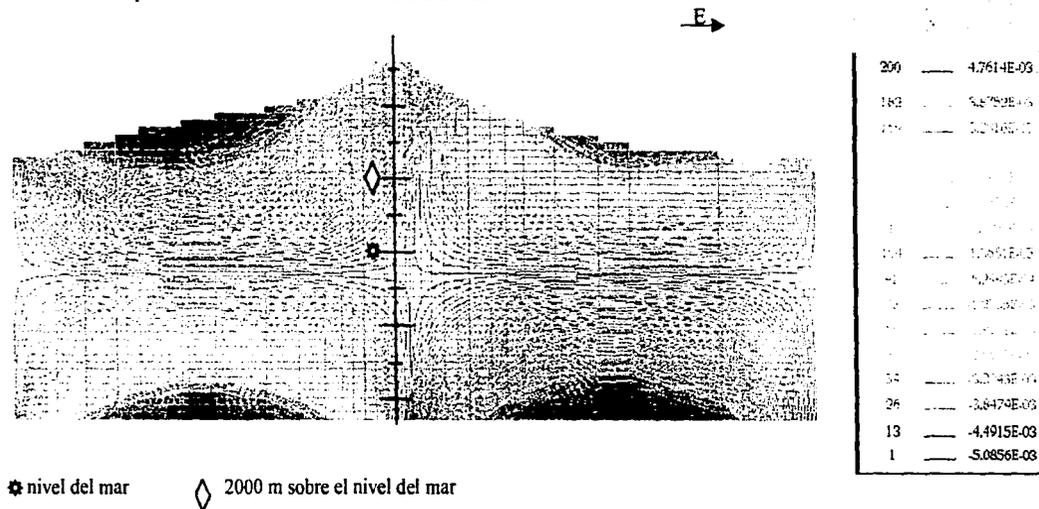


Fig. 4.2.1 Distribución de los desplazamientos horizontales ocasionados por la aplicación de una fuerza ascendente sobre la fisura del mallado, manteniendo los extremos verticales fijos. El valor del desplazamiento es mayor a medida se está más cerca de las regiones oscuras. Los movimientos hacia el Este se tienen en la zona inferior izquierda y la superior derecha, en cambio los movimientos hacia el Oeste se tienen en la zona superior izquierda e inferior derecha. De esta manera la zona inferior tiende a juntarse hacia el centro y la superior tiende a separarse. Al centro, (hacia los -800m snm, del lado Este) se observa una región donde las curvas cambian de sentido, lo cual corresponde a un cambio en el sentido de los esfuerzos internos. Las regiones donde se separan las curvas, en las fronteras verticales, carecen de sentido físico porque dependen de la extensión del mallado, es decir, si se hiciera un mallado más largo, aparecerían en los nuevos extremos. (archivo Vs2)

Isovalores de desplazamiento horizontal en el Corte Suroeste - Noreste

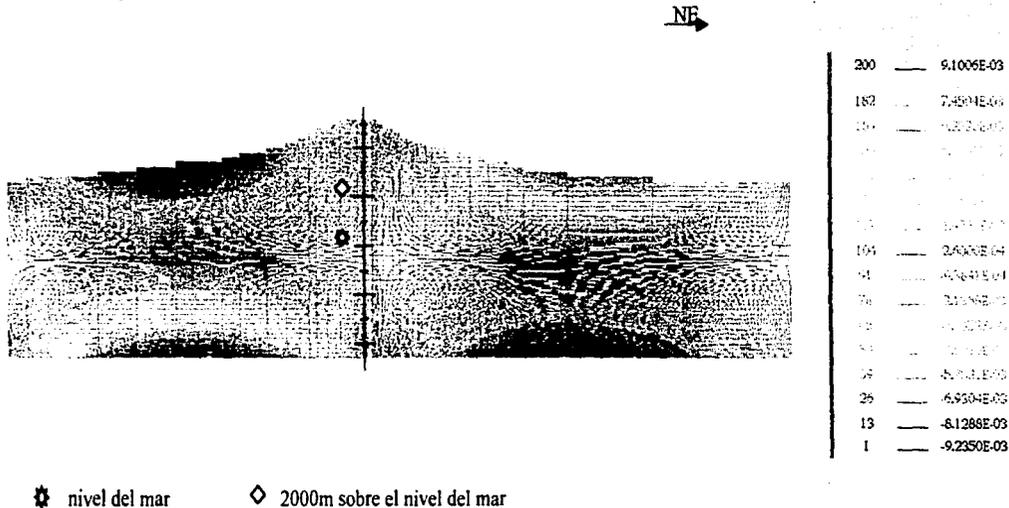
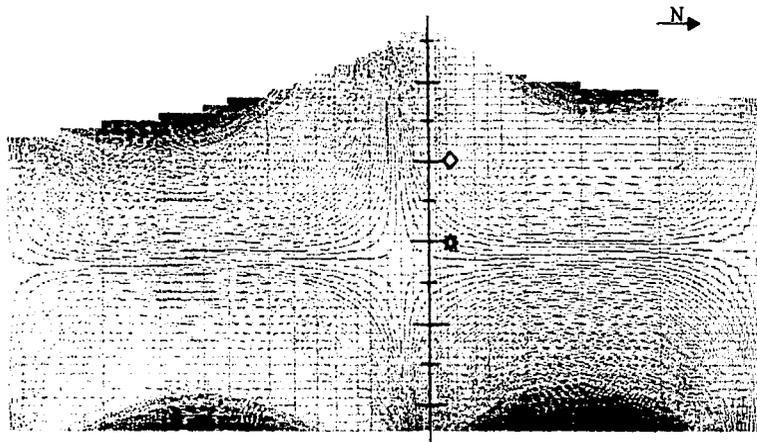


Fig. 4.2.2 Esta gráfica es análoga a la anterior. Véase explicación de la gráfica 4.2.1. Los **movimientos** hacia el **Noreste** se tienen en la **zona inferior izquierda** y la **superior derecha**, en cambio los movimientos hacia el **Suroeste** se tienen en la **zona superior izquierda e inferior derecha**. Se observa de nuevo la región central de transición, hacia los -500m snm, del lado Noreste (archivo Vse2)

Isovalores de desplazamiento horizontal en el Corte Sur - Norte



UNKNOWN: 1 MNEMONIC:VN	
200	3.3266E-03
182	3.7115E-03
164	4.0964E-03
146	4.4813E-03
128	4.8662E-03
110	5.2511E-03
92	5.6360E-03
74	6.0209E-03
56	6.4058E-03
38	6.7907E-03
20	7.1756E-03
2	7.5605E-03
1	-3.5185E-03

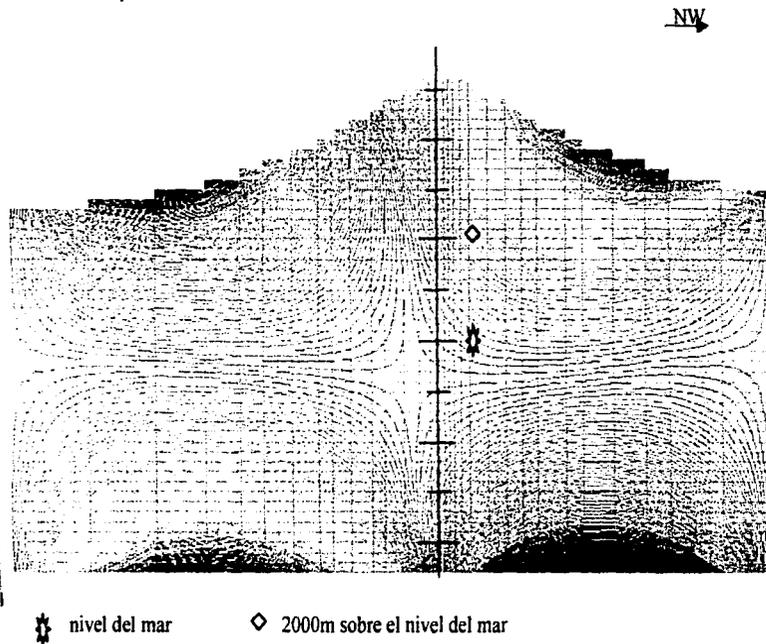
★ nivel del mar ◇ 2000m sobre el nivel del mar

Fig. 4.2.3 Esta gráfica es análoga a la anterior, véase explicación de la gráfica 4.2.1. Los movimientos hacia el Norte se tienen en la zona inferior izquierda y la superior derecha, en cambio los movimientos hacia el Sur se tienen en la zona superior izquierda e inferior derecha. Se observa de nuevo la región central de transición, hacia los -500m snm, del lado Sur. (archivo VE1)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Isovalores de desplazamiento horizontal en el Corte Sureste - Noroeste

TEJIS CON
 FALLA DE ORIGEN



1493 POINTS
 1493 NODES
 1411 ELEMENTS
 1411 QUADRANGLES

UNKNOWN: 1 MNEMONIC-VN

200 — 2.4938E-03

182 — 2.0444E-03

174 — 1.6749E-03

166 — 1.3054E-03

158 — 9.3590E-04

150 — 5.7126E-04

142 — 2.0662E-04

134 — -1.5898E-04

126 — -8.1170E-04

118 — -2.5054E-04

110 — -5.0126E-04

102 — -1.3140E-04

94 — -1.5486E-04

86 — -1.6730E-03

78 — -2.1984E-03

70 — -2.4996E-03

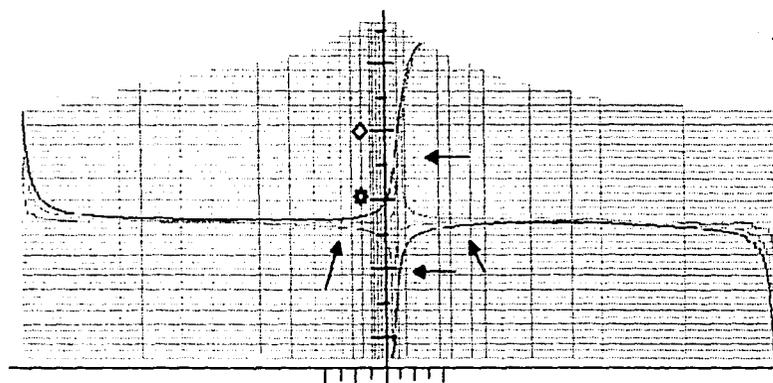
200 ISOVALUES

END :0

Fig. 4.2.4 Esta gráfica es análoga a la anterior, véase explicación de la gráfica 4.2.1.. Los movimientos hacia el Noroeste se tienen en la zona inferior izquierda y la superior derecha, en cambio los movimientos hacia el Sureste se tienen en la zona superior izquierda e inferior derecha. Se observa de nuevo la región central de transición, hacia los -650m snm, del lado Sur. (archivoVne1)

Región de transición en las curvas de isovalores de desplazamiento horizontal en el Corte Oeste – Este,

E →



UNKNOWN: 1 MNEMONIC: VN

3 -1.2657E-05

2 -1.7505E-05

1 -9.2000E-05

⊛ nivel del mar ⊠ 200 m sobre el nivel del mar ○ centro de la fisura ◻ 1000m hacia el O

Fig. 4.2.5 Curvas de isovalores en torno de la región de transición. Hay un cambio de comportamiento en las curvas de isovalores negativos: Al acercarse a la región de transición cambian de "cuadrante". Con esto se determinaron los límites de la región de transición, a partir del lugar donde se comienzan a separar los comportamientos. (archivoVsx4isotran)

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

Región de transición en las curvas de isovalores de desplazamiento horizontal en el Corte Suroeste - Noreste

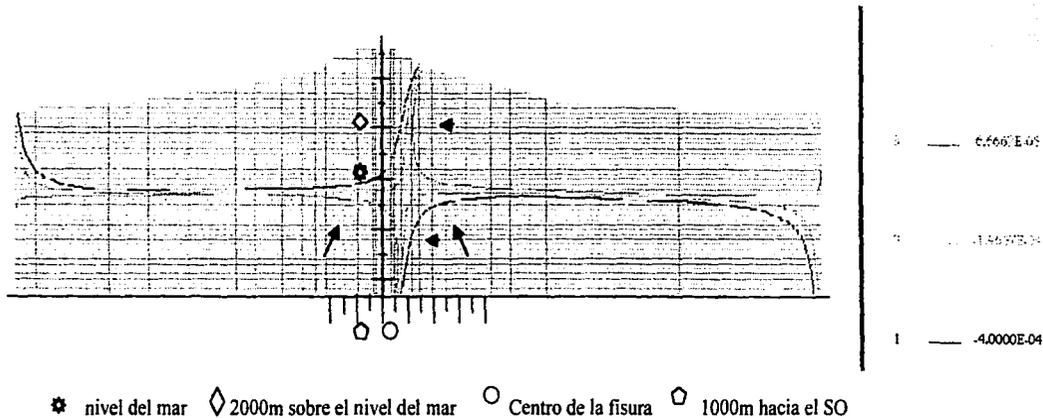


Fig. 4.2.6 Curvas de isovalores en torno de la región de transición. En esta gráfica se señalan los límites de la región de transición, en los brazos, a partir de que se comienza a separar la región de desplazamientos hacia la derecha de los desplazamientos a la izquierda. (archivo Vne4isotran) (archivo Vse2x4isotran)

T.T.S. C.I.N.
 FALLA DE ORIGEN

Región de transición en las curvas de isovalores de desplazamiento horizontal en el Corte Sur - Norte

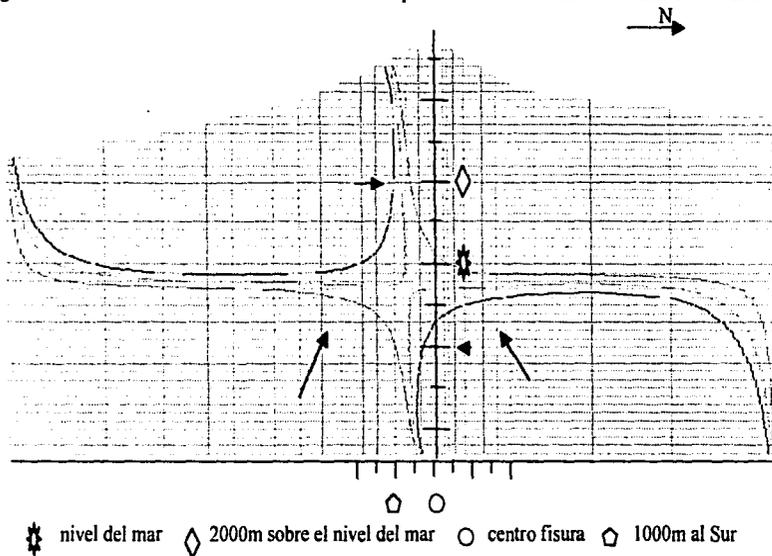
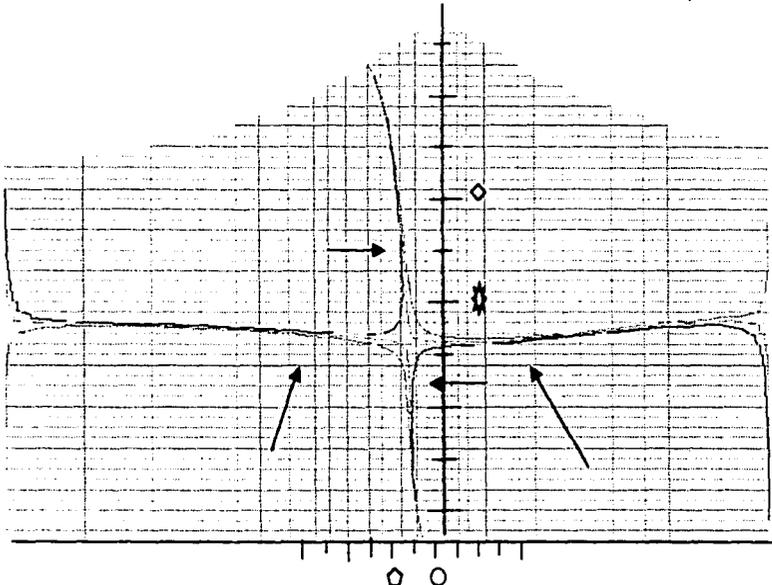


Fig. 4.2.7 Esta gráfica es análoga a la 4.2.5. Hay un cambio de comportamiento en las curvas de isovalores negativos: Al acercarse a la región de transición cambian de "cuadrante". Con esto se determinaron los límites de la región de transición, a partir del lugar donde se comienzan a separar los comportamientos. (archivo Vex4isotran)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Región de transición en las curvas de isovalores de desplazamiento horizontal en el Corte Sureste - Noroeste

NW
→



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

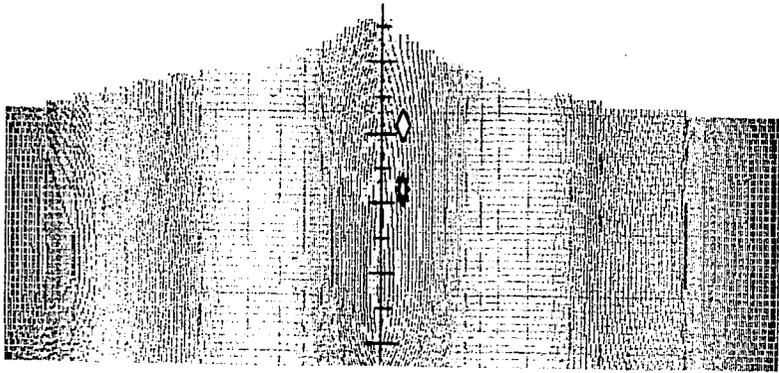
★ nivel del mar ◇ 2000m sobre el nivel del mar ○ Centro de la fisura ◻ 1000 m hacia el SE

Fig. 4.2.8 Curvas de isovalores en torno de la región de transición. En esta gráfica se señalan los límites de la región de transición, en los brazos, a partir de que se comienza a separar la región de desplazamientos hacia la derecha de los desplazamientos a la izquierda. (archivo Vne4isotran)

Isovalores de desplazamiento horizontal en el Corte Oeste - Este

FALDA DE ORIGEN
TESIS CON

E →



200	2.0112E-02
182	1.8302E-02
165	1.6683E-02
148	1.5254E-02
131	1.3915E-02
114	1.2666E-02
97	1.1507E-02
80	1.0438E-02
63	9.4599E-03
46	8.5610E-03
29	7.7371E-03
12	6.9882E-03
1	4.7385E-05

★ nivel del mar

◇ 2000 m sobre el nivel del mar

Fig. 4.2.9 Curvas de isovalores desplazamiento vertical (corte oeste - este). Todos los desplazamientos son hacia arriba pero son mayores hacia la región oscura central y menores hacia las regiones oscuras de los extremos. Hacia el Este los desplazamientos mayores se observan en una mayor extensión, que hacia el Oeste. (archivoVs2y)

Isovalores de desplazamiento horizontal en el Corte Suroeste - Noreste

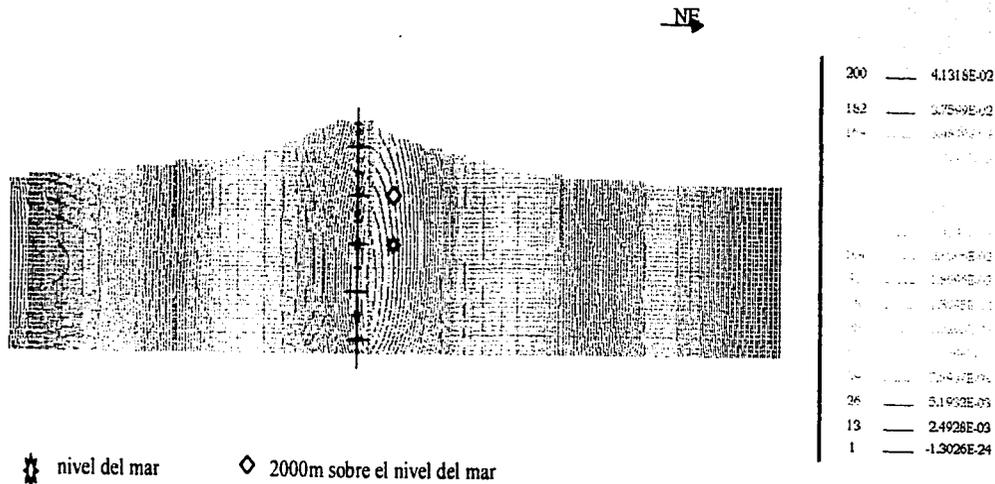
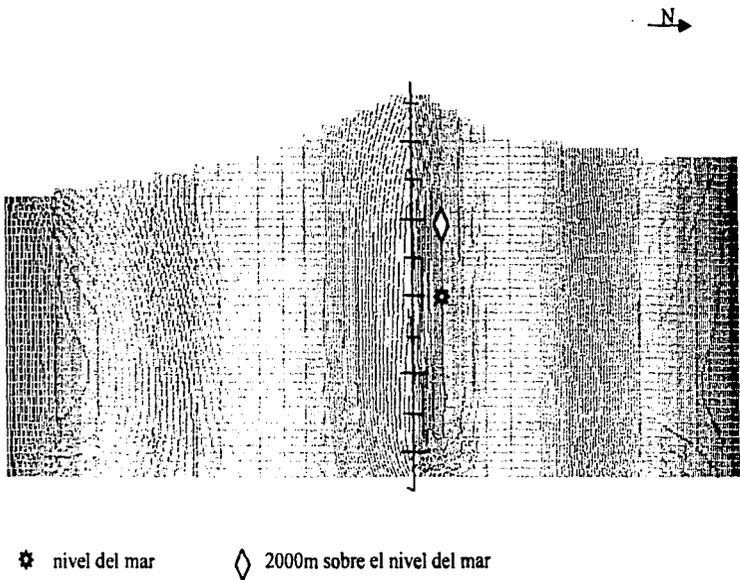


Fig. 4.2.10 Curvas de isovalores desplazamiento vertical (corte suroeste - noreste). Todos los desplazamientos son hacia arriba pero son mayores hacia la región central con curvas oscuras y menores hacia las regiones oscuras de los extremos. Hacia el Noreste los desplazamientos mayores se observan en una mayor extensión, que hacia el Suroeste. (archivoVse2y)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Isovalores de desplazamiento horizontal en el Corte Sur - Norte

TEJES CON
FALLA DE ORIGEN

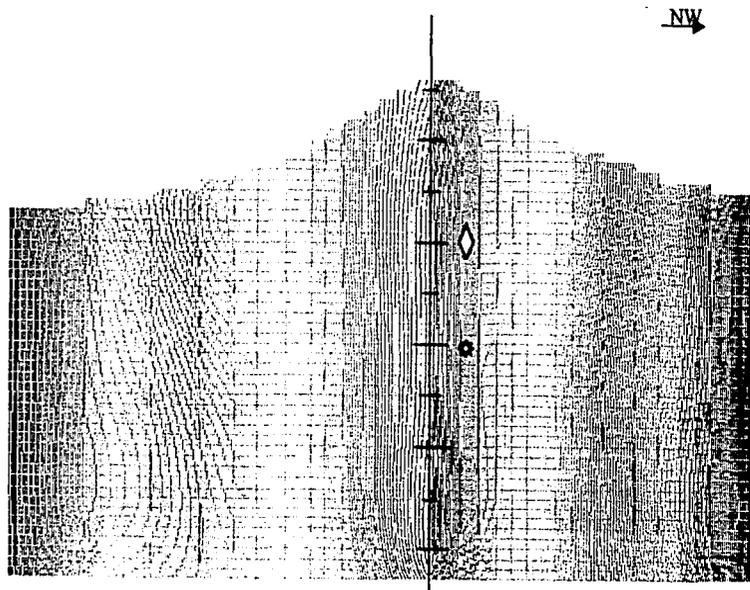


UNKNOWN: 2 MNEMONIC-VN	
200	1.3965E-02
182	1.207E-02
175	1.1374E-02
160	1.037E-02
145	9.365E-03
130	8.353E-03
115	7.341E-03
100	6.329E-03
85	5.317E-03
70	4.305E-03
55	3.293E-03
40	2.281E-03
25	1.269E-03
13	6.4244E-04
1	-1.2060E-25

☆ nivel del mar ◇ 2000m sobre el nivel del mar

Fig. 4.2.11 Curvas de isovalores desplazamiento vertical (corte sur - norte). Todos los desplazamientos son hacia arriba pero son mayores hacia la región central con curvas oscuras y menores hacia las regiones oscuras de los extremos. Hacia el Sur los desplazamientos mayores se observan en una mayor extensión, que hacia el Norte. (archivo Vey1)

Isovalores de desplazamiento horizontal en el Corte Sureste - Noroeste



1493	NODES
1411	ELEMENTS
1411	QUADRANGLES
UNKNOWN: 2 MNEMONIC:VN	
200	1.0141E-02
182	6.0237E-03
174	4.0172E-03
166	2.0107E-03
158	0.0042E-03
150	-1.9977E-04
142	-3.9912E-05
134	-5.9847E-06
126	-7.9782E-07
118	-9.9717E-08
110	-1.1965E-08
102	-3.1900E-09
94	-5.1835E-10
86	-7.1770E-11
78	-9.1705E-12
70	-1.1164E-12
62	-3.1600E-14
54	-5.1035E-16
46	-7.0470E-18
38	-9.0905E-20
30	-1.1034E-21
22	-3.0770E-23
14	-5.0205E-25
6	-7.0640E-27
200	ISOVALUES

⚙ nivel del mar ◇ 2000m sobre el nivel del mar

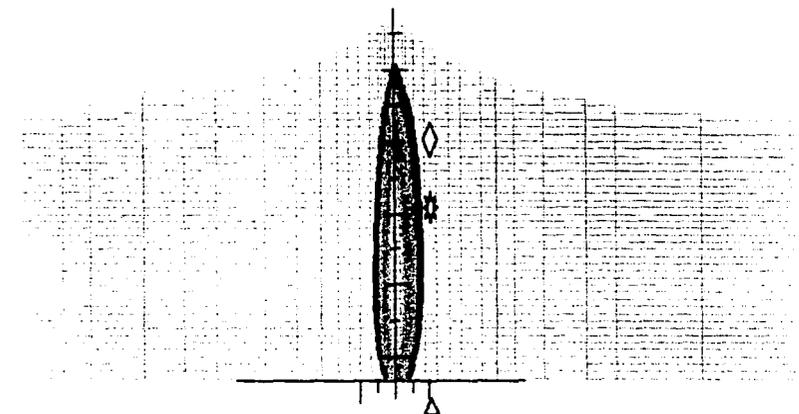
Fig. 4.2.12 Curvas de isovalores desplazamiento vertical (corte sureste - noroeste). Todos los desplazamientos son hacia arriba pero son mayores hacia la región central con curvas oscuras y menores hacia las regiones oscuras de los extremos. Hacia el Sureste los desplazamientos mayores se observan en una mayor extensión, que hacia el Noroeste (archivoVney1)

TESIS CON
TITULO COMPLETO

Isovalores de desplazamiento vertical en la región cercana a la fisura en el Corte Oeste - Este

E →

FALDA DE ORIGEN
 DE LAS
 FISSURAS CON



* nivel del mar ◇ 2000 m sobre el nivel del mar △ 1000m hacia el este de la fisura

UNKNOWN: 2 MNEMONIC:VN

200	2.0300E-02
182	2.1225E-02
164	2.2150E-02
146	2.3075E-02
128	2.4000E-02
110	2.4925E-02
92	2.5850E-02
74	2.6775E-02
56	2.7700E-02
38	2.8625E-02
20	2.9550E-02
2	3.0475E-02

Fig. 4.2.13 Distribución de isovalores de desplazamiento vertical, cerca de la fisura. Todos los desplazamientos son hacia arriba, pero los valores mayores se obtienen en la zona clara hacia el centro, el desplazamiento máximo se ubica hacia los 2500m bajo el nivel del mar. La distribución está ligeramente abombada hacia el Este. (archivo Vsy200isofis)

Isovalores de desplazamiento vertical en la región cercana a la fisura en el Corte Suroeste - Noreste

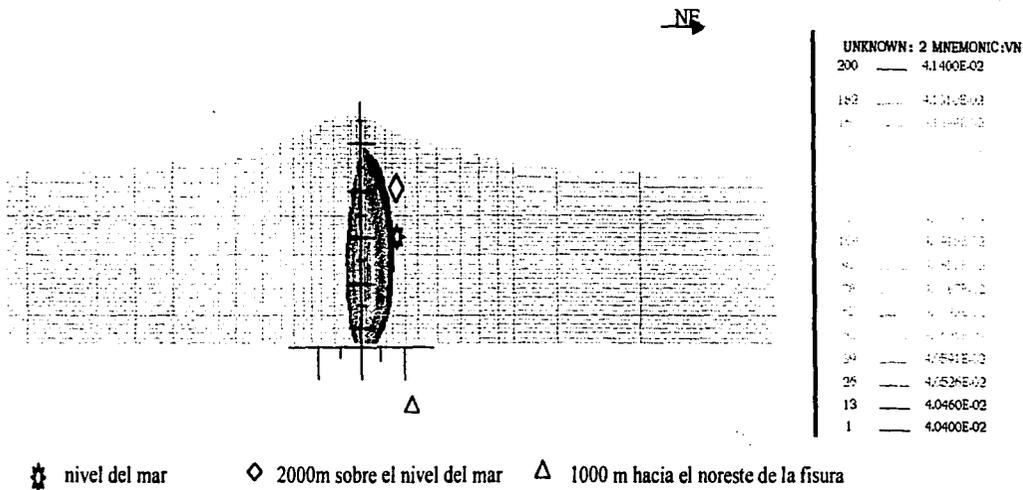
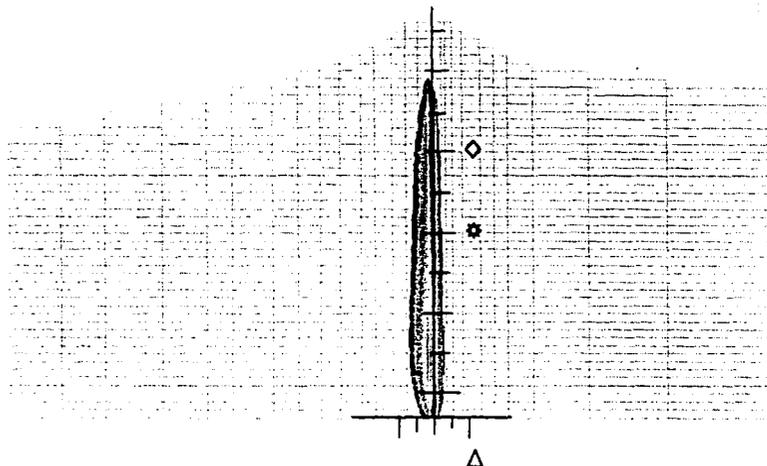


Fig. 4.2.14 Distribución de isovalores de desplazamiento vertical, cerca de la fisura (corte suroeste – noreste). Todos los desplazamientos son hacia arriba, pero los valores mayores se obtienen en la zona clara hacia el centro, el desplazamiento máximo se ubica en la región oscura central, hacia los 2000m bajo el nivel del mar. La distribución está notablemente abombada hacia el Este. (archivo Vse2y200isofis)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Isovalores de desplazamiento vertical en la región cercana a la fisura en el Corte Sur - Norte



UNKNOWN: 2 MNEMONIC:VN	
200	1.4000E-02
162	1.3673E-02
124	1.3346E-02
86	1.3019E-02
48	1.2692E-02
10	1.2365E-02
104	1.2038E-02
66	1.1711E-02
28	1.1384E-02
10	1.1057E-02
62	1.0730E-02
24	1.0403E-02
13	1.3718E-02
1	1.3700E-02

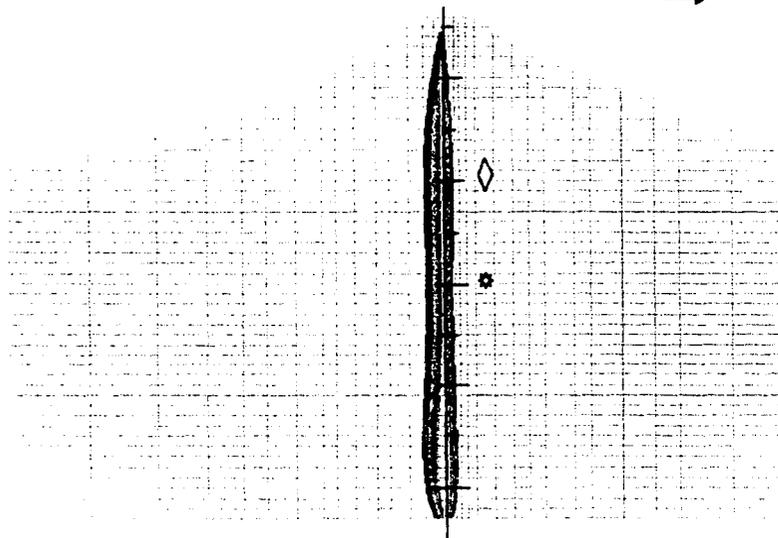
 nivel del mar
  2000m sobre el nivel del mar
  1000m hacia el norte de la fisura

Fig. 4.2.15 Distribución de isovalores de desplazamiento vertical, cerca de la fisura. Todos los desplazamientos son hacia arriba, pero los valores mayores se obtienen en la zona oscura hacia el centro, el desplazamiento máximo se ubica hacia los 2500m bajo el nivel del mar. La distribución está abombada hacia el sur, corte sur - norte y se observa una suave cintura, alrededor de 1000m bajo el nivel del mar. (archivoVey200isofis)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Isovalores de desplazamiento vertical en la región cercana a la fisura en el Corte Sureste – Noroeste

NW



★ nivel del mar

◇ 2000m sobre el nivel del mar

1493 NODES
1411 ELEMENTS
1411 QUADRANGLES

UNKNOWN: 2 MNEMONIC:VN

200 — 1.0200E-02

182 — 1.0100E-01

174 — 0.1000E+00

166 — 0.2000E+00

158 — 0.3000E+00

150 — 0.4000E+00

142 — 0.5000E+00

134 — 0.6000E+00

126 — 0.7000E+00

118 — 0.8000E+00

110 — 0.9000E+00

102 — 0.9877E+00

94 — 9.9161E+00

86 — 9.9000E+00

200 ISOVALUES

Fig. 4.2.16 Distribución de isovalores de desplazamiento vertical, cerca de la fisura (corte sureste – noroeste). Todos los desplazamientos son hacia arriba, pero los valores mayores se obtienen en la zona clara hacia el centro, el desplazamiento máximo se ubica hacia los 2500m bajo el nivel del mar. La distribución está abombada hacia el Sureste. (archivo Vney200isofis)

7 FEIS CON
MALLA DE ORIGEN

4.3 Análisis de resultados

(Observación: La precisión de las escalas utilizadas es de 200m en sentido vertical y 500m en sentido horizontal).

Desplazamientos horizontales

I. Gráficas con curvas de isovalores de desplazamiento horizontal

➤ Gráficas 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 y 4.2.4

- 1) Estas gráficas presentan **200** curvas de **isovalores de desplazamiento horizontal**
- 2) Se observa una **región de transición** en el sentido de los desplazamientos horizontal, en todos los cortes.
- 3) Se observan **2 regiones similares** a la de transición en las pared inmóvil del mallado tridimensional, que corresponde a las dos líneas verticales extremas de los cortes. Pero estas **no tienen significado** físico debido a que si se extiende el modelo, aparecerían más alejadas, junto a la nueva frontera inmóvil.
- 4) Si se divide cada gráfica en cuatro regiones utilizando la región de transición, (de manera similar a cuadrantes), se observa que en los **cuadrantes superiores** los desplazamientos se dirigen en **sentidos opuestos hacia las laderas del volcán**. En cambio los **cuadrantes inferiores**, también presentan **sentidos opuestos, pero hacia adentro del volcán**.
- 5) Las curvas de isovalores corresponden a desplazamientos horizontales entre un valor mínimo y uno máximo:

CORTE	VALOR MÍNIMO Y MÁXIMO DE DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL
Oeste-Este	$-5.1 \times 10^{-3} \text{m}$, $4.8 \times 10^{-2} \text{m}$
Suroeste-Noreste	$-9.2 \times 10^{-3} \text{m}$, $9.1 \times 10^{-2} \text{m}$
Norte - Sur	$-3.1 \times 10^{-3} \text{m}$, $3.3 \times 10^{-3} \text{m}$
Sureste-Noroeste	$-2.2 \times 10^{-4} \text{m}$, $2.5 \times 10^{-2} \text{m}$

Tabla 4.3.1 Límites inferior y superior de desplazamientos en horizontales.

➤ Gráficas 4.2.5, 4.2.6, 4.2.7 y 4.2.8

- 1) Estas gráficas presentan **4** curvas de **isovalores** de desplazamiento horizontal en la **cercanía de la región de transición**.
- 2) La curvas de isovalores tienen una **forma similar** a un conjunto de **hipérbolas** en la **región de transición**. Se extienden hacia la misma región del volcán hasta llegar a un valor crítico en que cambian de sentido y se extienden hacia la región contraria del volcán. Con base en esto se puede obtener una apreciación de los **límites de la región de transición**

ESTAS GRÁFICAS
SON
FALTA DE ORIGEN

CORTE	LÍMITES DE LA REGIÓN DE TRANSICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES	
	Horizontal, en torno el centro de la fisura, (m)	Vertical m snm
Oeste-Este	-1500 a 2500	-1200 a 1000
Suroeste-Noreste	-1500 a 2600	-2600 a 2000
Norte - Sur	-2400 a 1700	-2000 a 2000
Sureste-Noroeste	-3000 a 2000	-1700 a 1000

Tabla 4.3.2 Ubicación de los límites horizontales y verticales de la región de transición de desplazamientos horizontales.

- 3) En todos los cortes las curvas de isovalores forman un **brazo** que se extiende **hacia arriba** y termina en la **superficie**, de la siguiente manera:

CORTE	UBICACIÓN DEL BRAZO DE ISOVALORES EN LA SUPERFICIE	
	Del centro de la fisura	m sobre el nivel del mar
Oeste-Este	1600m hacia el Este	4600
Suroeste-Noreste	1450m hacia el Noreste	4400
Norte - Sur	1000m hacia el Sur	4800
Sureste-Noroeste	1650m hacia el Sureste	4600m sobre el nivel del mar

*La incertidumbre en sentido vertical es de 100m y en sentido horizontal de 250m

Tabla 4.3.4 Ubicación de la intersección del brazo de las curvas de isovalores de desplazamientos horizontales, con la superficie del volcán.

- 6) Se observa otro **brazo hacia abajo** en los cortes cuya ubicación es:

CORTE	UBICACIÓN DEL BRAZO DE ISOVALORES EN EL LÍMITE INFERIOR
Oeste-Este	250m hacia el Este del centro de la fisura
Suroeste-Noreste	500m Hacia el Noreste del centro de la fisura
Norte - Sur	400m hacia el Sur del centro de la fisura
Sureste-Noroeste	300m hacia el Sureste del centro de la fisura

Tabla 4.3.5 Ubicación de la intersección del brazo de las curvas de isovalores de desplazamientos horizontales, con el límite horizontal inferior del mallado.

- 7) Otros dos **brazos horizontales** se observan en todos los cortes , pero estos presentan un comportamiento suave en el cambio del sentido de los esfuerzos. El corte Sureste - Noroeste no presenta el mismo comportamiento. La **profundidad** a la que se localizan estos brazos es como sigue:

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

CORTE	PROFUNDIDAD DE LOS BRAZOS HORIZONTALES DE ISOVALORES
Oeste-Este	-800m a -400m snm, centrada en la recta de -600m snm
Suroeste-Noreste	-800m a -400m snm, centrada en la recta de -600m snm
Norte - Sur	-700m a -100m snm, centrada en una franja de -400m SNM a 600m snm
Sureste-Noroeste	Sureste: Una curva que comienza en -400m snm a 600m de la fisura y llega a -700m snm a 600m de la fisura en una banda de 200m de espesor
LOS BRAZOS NO SON HORIZONTALES	Noroeste: Una curva que comienza en -400m snm a 650m de la fisura y llega a -700m snm a 600m de la fisura, en una banda de 200m de espesor

Tabla 4.3.6 Ubicación de la profundidad de los brazos horizontales de las curvas de isovalores de desplazamientos horizontales

Desplazamientos de verticales

➤ Gráficas 4.2.9, 4.2.10, 4.2.11 y 4.2.12

- 1) Se presentan **200** curvas de **isovalores de desplazamiento vertical**
- 2) La **distribución** de las curvas de isovalores es **suave** a lo largo de todo el corte. Se observa que los **desplazamientos son mayores** a medida que están más **próximos a la fisura**. El máximo desplazamiento se encuentra cerca de la fisura, como es de esperarse.
- 3) Los valores de los desplazamientos tiene un valor mínimo y uno máximo, en cada corte. No todas son simétricas cerca de la fisura. A continuación se describen ambas características:

CORTE	VALOR MÍNIMO Y MÁXIMO DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL	SIMETRÍA DE LA DISTRIBUCIÓN, CON RELACIÓN A LAS FRANJAS DE ISOVALORES
Oeste-Este	-1.2×10^{-3} m, 2.0×10^{-2} m	Más separadas hacia el Este
Suroeste-Noreste	-2.5×10^{-3} m, 4.1×10^{-2} m	Curvadas hacia el Noreste y más separadas
Norte - Sur	-8.4×10^{-4} m, 1.4×10^{-2} m	Más separadas hacia el Sur.
Sureste-Noroeste	-6.1×10^{-4} m, 1.0×10^{-2} m	Más separadas hacia el Sureste. Arriba: inclinadas hacia fuera

Tabla 4.3.7 Valor máximo y mínimo de desplazamiento vertical, para cada corte. También se analiza la simetría de la distribución.

➤ Gráficas 4.2.13, 4.2.14, 4.2.15 y 4.2.16

- 1) Se presentan **200** curvas de **isovalores de desplazamiento vertical** en la **cercanía de la fisura**.
- 2) Los desplazamientos tienen valores entre:

TESIS CCM
 FALTA DE CUBIERTA

CORTE	LÍMITE INFERIOR Y SUPERIOR DE DESPLAZAMIENTO EN Y
Oeste-Este	$1.2 \times 10^{-3} \text{ m}$, $2.0 \times 10^{-2} \text{ m}$
Suroeste-Noreste	$2.5 \times 10^{-3} \text{ m}$, $4.1 \times 10^{-2} \text{ m}$
Norte - Sur	$6.4 \times 10^{-3} \text{ m}$, $1.4 \times 10^{-2} \text{ m}$
Sureste-Noroeste	$6.1 \times 10^{-3} \text{ m}$, $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}$

Tabla 4.3.8 Límites inferior y superior de desplazamientos verticales

- 3) Cerca de la fisura la distribución de los desplazamientos verticales consiste en **curvas cerradas en torno a un máximo**. Las distribuciones **no son simétricas**. A continuación se da la ubicación del máximo y se describe la simetría de la distribución:

CORTE	CENTRO DE LA REGIÓN DE MÁXIMO DESPLAZAMIENTO EN Y		SIMETRÍA DE LA DISTRIBUCIÓN, CERCA DE LA FISURA
	Del centro de la fisura	Sobre el nivel del mar	
Oeste-Este	0m, centro	-2500m	Ligeramente abombada hacia es Este
Suroeste-Noreste	0m al Suroeste	-1800m	Notablemente abombada hacia el Noreste
Norte - Sur	-200m al Sur	-3000m	Notablemente bombada hacia el Sur. Con apariencia de gota
Sureste-Noroeste	-200m al Sureste	-3500m	Abombada hacia el Sureste. Con apariencia de cacahuete.

Tabla 4.3.9 Ubicación vertical del centro de la región de máximo de las curvas de isovalores de desplazamientos en Y y aspecto general.

- 4) Dos de las distribuciones de isovalores, cercanas a la fisura, presentan una cintura.

CORTE	UBICACIÓN VERTICAL DE LA CINTURA EN LA DISTRIBUCIÓN
Oeste-Este	No se observa
Suroeste-Noreste	No se observa
Norte - Sur	-600 m snm. Es muy ligera
Sureste-Noroeste	-600 SNM. Se ve claramente

Tabla 4.3.10 Ubicación vertical de la cintura de la distribución de isovalores de desplazamientos verticales en la cercanía de la fisura.

5. Correlación de la prueba, con la sismicidad y Conclusiones

5.1 Correlación de los resultados de la prueba simplificada del mallado con la sismicidad.

Sentido horizontal

El siguiente mapa tiene la función de mostrar cómo se puede determinar la ubicación del cráter mediante la intersección de una línea que une la estación PPM con PPT y la otra, PPX con la PPB. Esta región corresponde a la fisura del mallado.

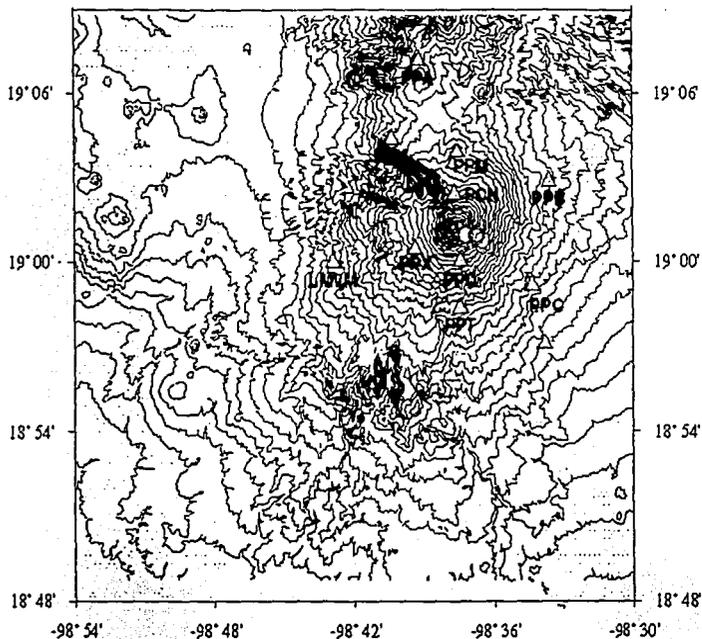


Fig. 5.1.1 Mapa del Popocatepétl con curvas de nivel. Los triángulos representan las estaciones sísmológicas, los círculos representan epicentros. Este mapa tiene el propósito de mostrar cómo puede ubicarse el cráter, mediante la intersección de 2 líneas, una que une la estación PPX con PPB y otra, la PPM con PPT.

A continuación se muestra una figura con los epicentros del registro sísmico de Dic de 1994 a dic de 2002. Las estaciones sismológicas (triángulos) ayudan a determinar la ubicación del cráter, que corresponde a la fisura en el mallado.



PPM PPX

PPT PPB

Fig. 5.1.2 Localización del cráter, en el mapa. Las estaciones sismológicas se representan con triángulos y los epicentros con círculos. El cráter se localiza en la intersección de las líneas blancas, que unen la estaciones PPM - PPT y PPX - PPB.

FRIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la siguiente figura se representan los cuatro cortes que se elaboraron en el mallado, trasladados al mapa de ubicación de sismos.

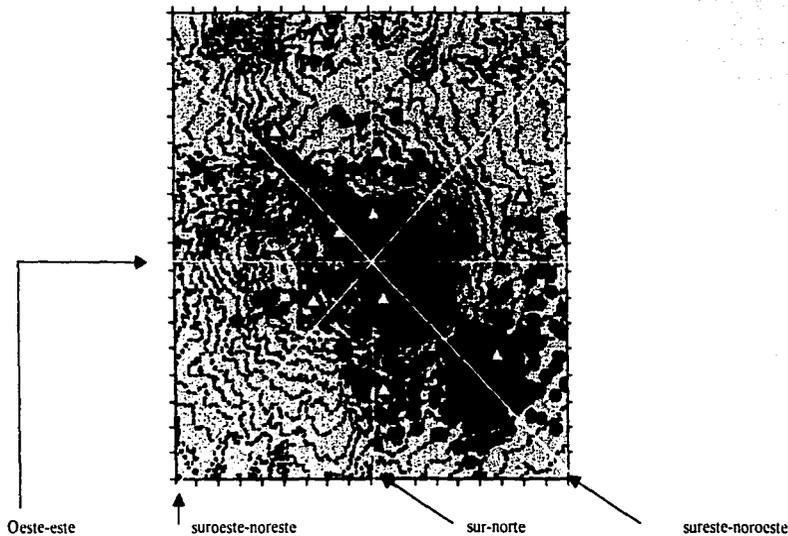


Fig. 5.1.3 Cortes correspondientes a los realizados sobre el mallado, trasladados al mapa de epicentros de sismos VT. En la escala alrededor de la figura, la separación entre dos líneas equivale a 0.9Km.

Dependiendo del corte se obtiene una distribución diferente de sismos. Los cortes del mallado tridimensional se realizaron mediante planos verticales, separados entre sí 45°. Cada uno de estos planos atraviesa el cráter en la fisura del modelo. Los planos tienen las siguientes direcciones: Oeste-Este, Suroeste-Noreste, Sur-Norte y Suroeste -Noreste.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la siguiente figura se muestran los límites aproximados de las regiones de mayor sismicidad en relación con planos de corte

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

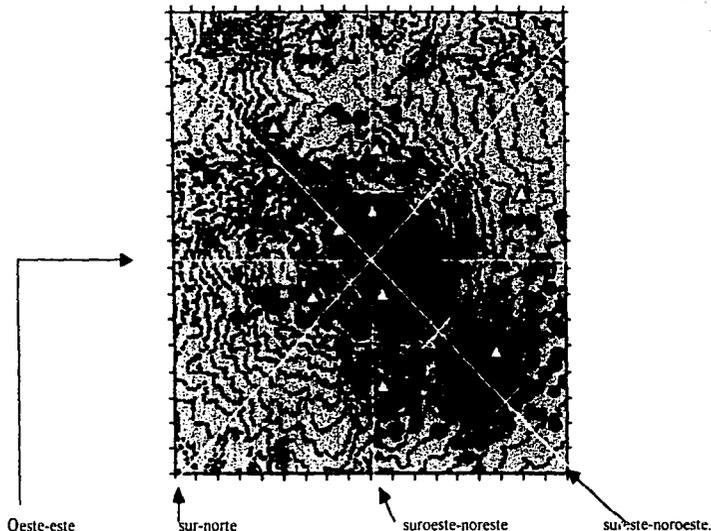


Fig. 5.1.4 Los límites de las regiones de máxima sismicidad, correspondientes a los planos de corte. La separación entre las líneas de la escala equivale a 0.9 km. Ubicación horizontal de y la correspondiente de cambio de esfuerzos del mallado.

Corte	Registro de sismicidad, distancia al cráter	Mallado tridimensional, distancia a la fisura
Corte Oeste - Este	1400m, O - 2900m, E	1500m, O - 2500m, E fig.
Corte Suroeste - noreste	1100m, SO - 2100m, NE	1500m, SO - 2600m, NE fig.
Corte Sur - norte	2700m, S - 2000m, N	3000m, S - 2000m, N fig.
Corte Sureste - noroeste	Máximo princ: 3000m, SE - 1900m, NO Máximo sec: 7300m, SE - 3300m, SE	2500m, SE - 1600m, NO fig. No se observa con claridad.

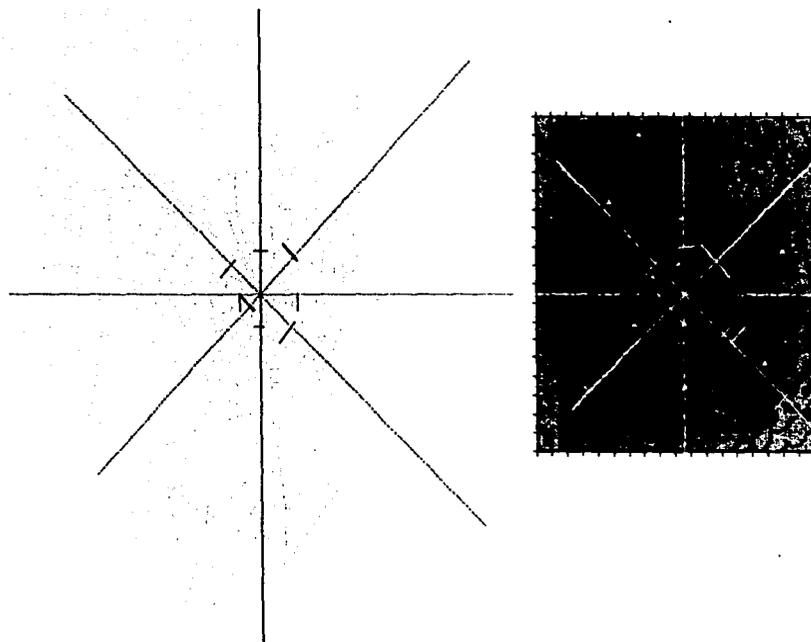
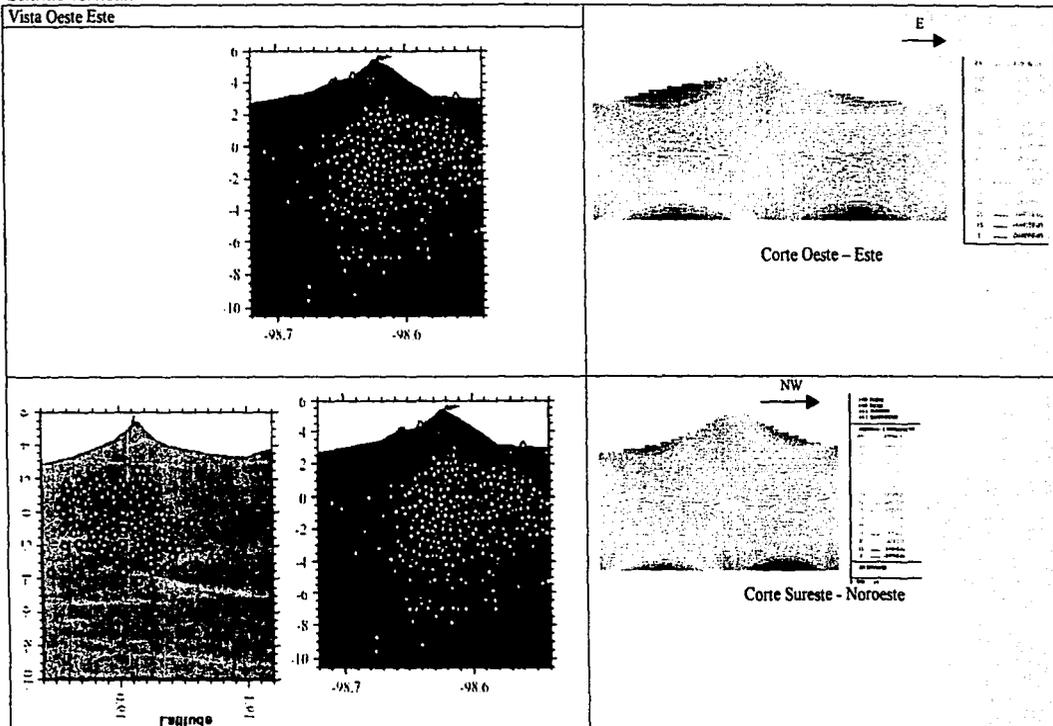


Fig . 5.1.5 Corte horizontal del mallado comparado con el registro de sismicidad. Se muestran las líneas correspondientes a los planos de corte verticales y los límites horizontales de la región de cambios de esfuerzos de las gráficas de desplazamiento horizontales de las figuras del cap. 4 y los límites de la región de mayor sismicidad.

Al comparar ambas imágenes se observa que la región de cambio de esfuerzos encontrada esta contenida dentro de la región principal de epicentros y tienen una buena correspondencia en cada uno de los cortes. Sin embargo, la región secundaria de sismos no se encuentra en los resultados para el mallado tridimensional.

Sentido vertical.



**TESIS CON
FALDA DE ORIGEN**

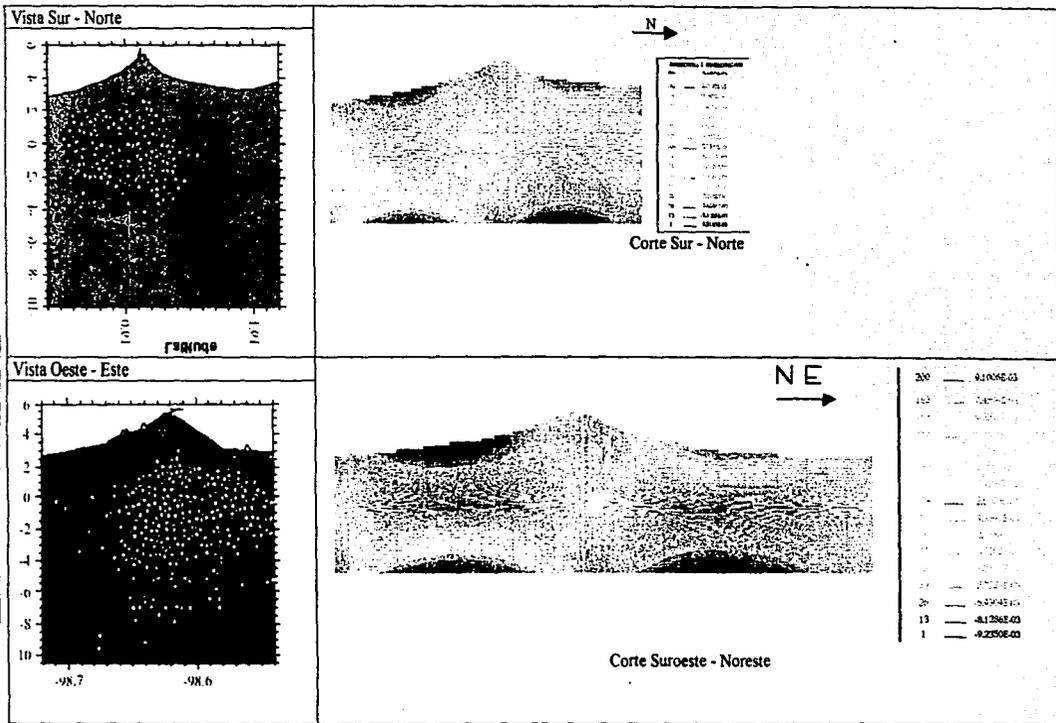


Fig 5.1.6 Comparación la localización de los sismos VT, en la profundidad (hipocentros) y la región de cambio de esfuerzos. Vistas Sur Norte con el corte Sur - Norte. Vistas Oeste - Este, Vista Oeste - Este con el corte Noroeste - Sureste

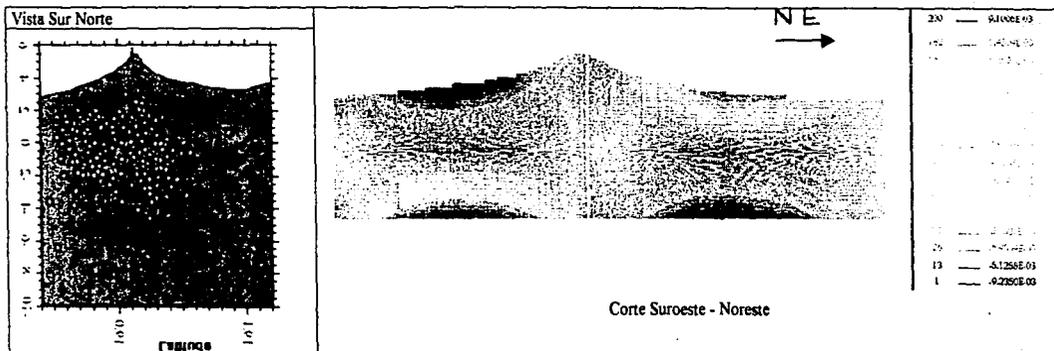


Fig 5.1.6 Comparación la localización de los sismos VT, en la profundidad (hipocentros) y la región de cambio de esfuerzos. Vistas Sur Norte con el corte Sur este- Noreste. Vistas Oeste - Este, Vista Oeste - Este con el corte Noroeste - Sureste

Analizando estas gráficas se observa que en sentido vertical se localiza la región de mayor sismicidad entre los -3000m y los 2000m snm. Comparando esto con las gráficas del modelo tridimensional del capítulo 5, se observa que la región correspondiente para el mallado obtenido esta entre los -2600m y los 2000m snm. Lo cual muestra una buena correspondencia entre los datos sísmicos y el modelo desarrollado.

	Límites verticales
Ubicación vertical de la región de mayor sismicidad en el registro sísmico	-3000m y los 2000m
Ubicación vertical de la región de cambio de esfuerzos para el mallado desarrollado	-2600m y los 2000m

Aclaración: Es importante señalar que corte y vista no son lo mismo, porque en las vistas se muestran todos los hipocentros que tienen componente este u oeste o norte o sur y los cortes solo muestran la región de cambio de esfuerzos contenida en el plano del corte, por tal motivo se muestra la figura 6.4, que es una fig. Comparativa, en planta y las vistas verticales dan información secundaria, para apoyar las distribuciones horizontales. En cambio para determinar la región vertical de sismicidad y compararla con la correspondiente región de cambio de esfuerzos, son las vistas de la fig. 6.5 las que aportan la información relevante.

TESIS CON
FALTA DE CUBRIM

5.2 Conclusiones

1. Los **parámetros físicos utilizados** en el módulo elapxx arrojan **resultados comparables** con la **ubicación de los sismos**.
2. El estado reproducido, para el mallado, **no excede el límite elástico**.
3. Las **regiones de transición** de desplazamientos horizontales están **comprendidas en la nube de sismos** de la figura de la figura 5.1.2

CORTE	INTERVALO DE REGISTRO SÍSMICO	INTERVALO RESULTANTE	CORRESPONDENCIA
Oeste-Este	2160m al Sureste - 3150m al Noroeste, en torno del cráter interno	-1500m a 2500m en torno el centro de la fisura	70 %-79%
Suroeste-Noreste	1890m al Suroeste - 2970m al Noreste, en torno del cráter interno	-1500m a 2600m en torno el centro de la fisura	79%-88%
Sur - Norte	3510m al Sur - 2940m al Norte, en torno del centro del cráter interno	-2400m al Sur - 1700m al Norte, en torno del centro de la fisura	76% - 60%
Sureste-Noroeste	3780m al sureste - 2970m al Noroeste, en torno del cráter interno	-3000m al sureste - 2000m al Noroeste, en torno el centro de la fisura	79% - 67%

En promedio ambas regiones tienen una correlación de 75%, en los cortes efectuados.

4. En sentido **vertical** se compara a continuación la distribución de **sismos** con la **región de transición** de desplazamientos en los cortes:

CORTE	LIMITES DE LA REGIÓN DE TRANSICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES	INTERVALO RESULTANTE	INTERVALO VERTICAL DEL REGISTRO SÍSMICO	CORRESPONDENCIA
Oeste-Este	-1200 a 1000 snm	-2600m a 2000m snm	-2600m a 2100m snm	100% - 95 %
Suroeste-Noreste	-2600 a 2000 snm			
Norte - Sur	-2000 a 2000 snm			
Sureste-Noroeste	-1500 a 600 snm			

El porcentaje de correspondencia promedio es de 98%, para los cortes efectuados.

5. Si se consideran los dos porcentajes de correspondencia anteriores se tiene un **porcentaje de correspondencia promedio total de 85%**, que es favorable al mallado.
6. Los desplazamientos verticales brindan una medida de la **deformación vertical del edificio volcánico** que va de **0.012m a 0.041m** cerca de la fisura, según tabla 4.3.7. Se puede considerar que son comparables en relación con las deformaciones registradas durante periodos de actividad, relativamente, moderada, por Ej., en la crisis de 1994 a 1995 se observó una deformación de 3.4 cm al lado noreste del volcán. (S. De la Cruz y Reyna 1995)
7. Los brazos de las curvas de isovalores que afloran a la superficie manifiestan **debilidad estructural** del modelo del volcán **hacia el sureste, el este y el noreste** del cráter lo cual es coherente con la forma del edificio volcánico porque presenta mayor pendiente hacia estos flancos y no tiene obstáculos que lo soporten. En

TRABAJOS CON
FALSA DE ORIGEN

- cambio, hacia el norte se encuentra el Iztaccihuatl, que sostiene ese lado del volcán. Este resultado es compatible con la posibilidad de que el próximo **derrumbe gigante se genere hacia el sureste del volcán**, como lo suponen Siebe et al , 1995.
8. Si se compara, a grosso modo, el corte horizontal del mallado con la nube de sismos, se observa que tienen similitud, por tal motivo se puede considerar que la **topografía del edificio debe ser un parámetro importante para la distribución de los sismos.**
 9. Podría pensarse que la **fuerza neta** es pequeña pero considerando que está aplicada por dentro del edificio, como en el caso de un huevo o un puente, una fuerza pequeña basta para romperlos. Pollard en 1973 encontró que la presión del magma **debe exceder levemente el esfuerzo normal a lo largo de la fisura**, debido al peso del volcán. (Chevallier, et al 1988)
 10. La **prueba simplificada** del mallado **no reproduce el máximo secundario de sismos**, aunque el corte correspondiente presenta diferencias con los demás, que podrían estar relacionadas con este máximo secundario.
 11. **Así se puede concluir que el mallado obtenido permitió reproducir, de manera general, dos aspectos importantes: la región de mayor sismicidad y la región de debilidad estructural donde se cree que puede ocurrir el próximo derrumbe gigante.** (Siebe et al 1995)
 12. Por tal motivo se puede considerar que este mallado puede permitir el modelaje de diversas situaciones físicas, como se planteó en la introducción.
 13. Algunas de las cuestiones que podría coadyuvar a resolver son:
 - a) Si se modifica la fuerza neta ascendente, ¿cómo cambia la región de máxima sismicidad?
 - b) Si se modifica la fuerza neta ascendente cómo, ¿cambia la región de debilidad?
 - c) ¿A partir de qué magnitud para la fuerza, se excede el límite elástico?
 - d) ¿Cuántas veces puede multiplicarse la fuerza neta ascendente, antes de que la deformación ponga en riesgo de fallar al edificio volcánico?
 - e) A partir de qué valor de la fuerza neta ascendente, se obtiene una explosión en el mallado.
 - f) Si se modifican los parámetros físicos o las condiciones a la frontera. ¿Qué cambios se obtienen en los resultados?, Etc.
 14. El mallado desarrollado, también puede ser modificado:
 - a) Puede extenderse más a la redonda o en profundidad.
 - b) Puede modificarse la posición de la fisura o sus características geométricas.
 - c) Pueden utilizarse otro tipo de elementos finitos para aproximar mejor la superficie del volcán. Etc.
 15. Además:
 - a) El mallado con módulos del paquete, de otras propiedades físicas.
 - b) Puede servir de base para mallados distintos o de partes específicas, para especular escenarios de actividad del volcán.
 - c) **Este tipo de modelación parece prometedor por que con un modelo grueso del volcán se obtienen resultados consistentes con la información sísmica.**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Apéndice 1

En relación al planteamiento matemático del problema puede utilizarse el brindado por la guía 2 del paquete MODULEF:

$$-\sum_{j=1}^2 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0$$

Dentro del todo el interior del mallado

$$\sigma_{ij} n_{ij} = (P)_j \delta_{\Gamma_1}$$

Fuerza sobre la "pared" Γ_1 , de la fisura

$$\sigma_{ij} n_{ij} = (P)_j \delta_{\Gamma_2}$$

Fuerza sobre la "pared" Γ_2 , de la fisura

$$u_1 = u_2 = 0$$

Sobre las fronteras verticales exteriores Γ_3 y Γ_4

$$\epsilon_{ij}(u) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad i, j = 1, 2$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{\varphi} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}$$

$$= \frac{E\nu}{(\nu + 1)(1-2\nu)} \epsilon_{ij} \delta_{ij} + \frac{E}{\nu + 1} \epsilon_{ij} \quad i, j = 1, 2$$

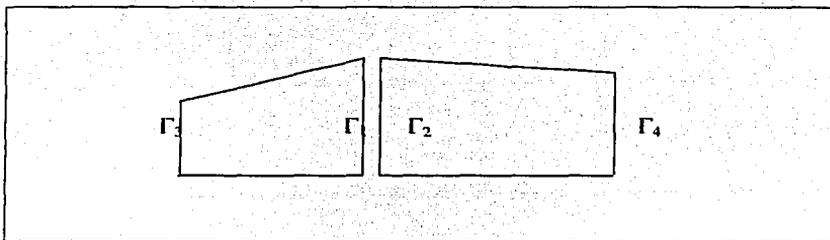


Fig. A1.1 Se muestran las líneas Γ_1 y Γ_2 dónde es aplicada una fuerza ascendente y Γ_3 y Γ_4 donde se aplica la condición de que el desplazamiento sea cero.

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

62

Respecto del aspecto plástico se tiene " La fluencia en un material solo se produce si la tensiones satisfacen un criterio general de fluencia. Este criterio establece un límite de tensiones para un punto del sólido, a partir del cual se inicia un proceso tenso-deformacional inelástico en dicho punto.

El límite elástico, está definido por la función de fluencia:

$$F(\sigma_{ij}; a_k) = f(\sigma_{ij}) - K(\sigma_{ij}; a_k) \leq 0 \quad (1)$$

donde $f(\sigma_{ij})$ es la tensión equivalente o efectiva, $K(\sigma_{ij}; a_k)$ es el umbral equivalente de tensiones y a_k las variables internas del problema" (E. Carl, S. Oller y Ee. Oñate)

El problema que se resolvió no excedió este límite elástico, no se obtuvo plastificación de los elementos, por tal motivo el problema es elástico.

Aclaración: No se requiere el planteamiento de las ecuaciones para utilizar el paquete MODULEF, estas son planteadas y resueltas por el mismo mediante los programas conversacionales. Por otro lado, el nivel de las matemáticas que se utilizan en para fundamentar los procedimientos del paquete utilizado excede el correspondiente al nivel de Licenciatura.

TELIS CON
FALLA DE ORIGEN

63

Apéndice 2

Para la elaboración del mallado tridimensional se desarrollaron 91 programas y la elaboración de las pruebas requirió otros 20. Aquí se muestra un ejemplo del tipo de programas desarrollados.

El siguiente programa es una muestra de los que se utilizaron para generar la mitad de cada anillo entre dos curvas de nivel. Se observa el número de referencia 0 en todos los puntos salvo en el 13 y el 26 que corresponden a la región de la frontera exterior del mallado donde se considera que se mantendrá inmóvil. Estos anillos son cerrados hasta la curva de nivel de los 3600m SNM, a partir de los 3400m SNM se abren en la zona norte porque las curvas ya no son cerradas en torno del Popocatepetl.

'E34							
'POIN							
1	26			\$ IMPRE	NPOINT	\$	
\$	NOP	NOREF (NÓP)	X (NOP)	Y (NOP)		\$	
1	0		-8.02208	-5.48180E03E03			
2	0		0.711101E03	-5.03926E03			
3	0		2.20467E03	-4.70736E03			
4	0		3.20038E03	-2.88189E03			
5	0		3.86418E03	-1.60959E03			
6	0		4.36204E03	-0.281979E03			
7	0		4.91522E03	0.492462E03			
8	0		5.02585E03	1.59881E03			
9	0		4.80458E03	3.47959E03			
10	0		4.47268E03	4.86253E03			
11	0		3.31101E03	6.24546E03			
12	0		2.48125E03	7.51776E03			
13	1		1.76213E03	9.34323E03			
14	0		-8.02208	-6.97537E03			
15	0		0.877051E03	-6.31156E03			
16	0		2.64721E03	-5.81371E03			
17	0		3.53228E03	-3.76697E03			
18	0		4.36204E03	-2.32872E03			
19	0		5.13648E03	-0.503248E03			
20	0		6.13219E03	0.437146E03			
21	0		5.91093E03	1.87539E03			
22	0		5.57902E03	3.59023E03			
23	0		4.97053E03	5.52634E03			
24	0		4.36204E03	6.90927E03			
25	0		3.97482E03	8.23688E03			
26	1		3.36633E03	9.89640E03			

'LIGN							
1	4			\$ IMPRE	NOLM	\$	
\$	NOLIG	NOELIG	NEXTR1	NEXTR2	NOREFL	NFFRON	RAISON \$
1	2	1	14	0	0	0	0.100000E+01
2	2	14	15	0	0	0	0.100000E+01
3	2	15	2	0	0	0	0.100000E+01
4	2	2	1	0	0	0	0.100000E+01

64

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

'QUAC
 1 1 1 4 1 \$ IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI NS1L
 \$ LIST OF THE CONTOUR LINES :
 1 2 3 4
 3 1 \$ IMAX NQUAD

'LIGN
 1 4 \$ IMPRE NDLM \$
 \$ NOLIG NOELIG NEXTR1 NEXTR2 NOREFL NFFRON RAISON \$
 1 2 2 15 0 0 0.100000E+01
 2 2 15 16 0 0 0.100000E+01
 3 2 16 3 0 0 0.100000E+01
 4 2 3 2 0 0 0.100000E+01

'QUAC
 1 2 1 4 1 \$ IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI NS1L
 \$ LIST OF THE CONTOUR LINES :
 1 2 3 4
 3 1 \$ IMAX NQUAD

'RECO
 1 1 2 3 0.10000E-01 0 \$ IMP NIV1 NIV2 NIV3 EPS IOPT
 0 0 \$ NBNNE NBNNSD

'LIGN
 1 4 \$ IMPRE NDLM \$
 \$ NOLIG NOELIG NEXTR1 NEXTR2 NOREFL NFFRON RAISON \$
 1 2 3 16 0 0 0.100000E+01
 2 2 16 17 0 0 0.100000E+01
 3 2 17 4 0 0 0.100000E+01
 4 2 4 3 0 0 0.100000E+01

'QUAC
 1 4 1 4 1 \$ IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI NS1L
 \$ LIST OF THE CONTOUR LINES :
 1 2 3 4
 3 1 \$ IMAX NQUAD

'RECO
 1 3 4 5 0.10000E-01 0 \$ IMP NIV1 NIV2 NIV3 EPS IOPT
 0 0 \$ NBNNE NBNNSD

'LIGN
 1 4 \$ IMPRE NDLM \$
 \$ NOLIG NOELIG NEXTR1 NEXTR2 NOREFL NFFRON RAISON \$
 1 2 4 17 0 0 0.100000E+01
 2 2 17 18 0 0 0.100000E+01
 3 2 18 5 0 0 0.100000E+01
 4 2 5 4 0 0 0.100000E+01

'QUAC
 1 6 1 4 1 \$ IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI NS1L
 \$ LIST OF THE CONTOUR LINES :
 1 2 3 4
 3 1 \$ IMAX NQUAD

'RECO
 1 5 6 7 0.10000E-01 0 \$ IMP NIV1 NIV2 NIV3 EPS IOPT
 0 0 \$ NBNNE NBNNSD

'LIGN
 1 4 \$ IMPRE NDLM \$
 \$ NOLIG NOELIG NEXTR1 NEXTR2 NOREL NFFRON RAISON \$
 1 2 5 18 0 0 0.100000E+01
 2 2 18 19 0 0 0.100000E+01
 3 2 19 6 0 0 0.100000E+01
 4 2 6 5 0 0 0.100000E+01

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

65

```

'QUAC
  1      8      1      4      1
$ LIST OF THE CONTOUR LINES :
  1      2      3      4
  3      1
$ IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI NS1L

'RECO
  1      7      8      9  0.10000E-01  0
0      0
$ IMP NIV1 NIV2 NIV3 EPS IOPT
$ NBNNF NBNNSD

'LIGN
  1      4
$ IMPRE NDLM $
$ NOLIG NOELIG NEXTR1 NEXTR2 NOREFL NFFRON RAISON $
  1      2      6      19      0      0      0.100000E+01
  2      2      19      20      0      0      0.100000E+01
  3      2      20      7      0      0      0.100000E+01
  4      2      7      6      0      0      0.100000E+01

'QUAC
  1      10      1      4      1
$ LIST OF THE CONTOUR LINES :
  1      2      3      4
  3      1
$ IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI NS1L

'RECO
  1      9      10      11  0.10000E-01  0
0      0
$ IMP NIV1 NIV2 NIV3 EPS IOPT
$ NBNNF NBNNSD

'LIGN
  1      4
$ IMPRE NDLM $
$ NOLIG NOELIG NEXTR1 NEXTR2 NOREFL NFFRON RAISON $
  1      2      7      20      0      0      0.100000E+01
  2      2      20      21      0      0      0.100000E+01
  3      2      21      8      0      0      0.100000E+01
  4      2      8      7      0      0      0.100000E+01

'QUAC
  1      12      1      4      1
$ LIST OF THE CONTOUR LINES :
  1      2      3      4
  3      1
$ IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI NS1L

'RECO
  1      11      12      13  0.10000E-01  0
0      0
$ IMP NIV1 NIV2 NIV3 EPS IOPT
$ NBNNF NBNNSD

'LIGN
  1      4
$ IMPRE NDLM $
$ NOLIG NOELIG NEXTR1 NEXTR2 NOREFL NFFRON RAISON $
  1      2      8      21      0      0      0.100000E+01
  2      2      21      22      0      0      0.100000E+01
  3      2      22      9      0      0      0.100000E+01
  4      2      9      8      0      0      0.100000E+01

'QUAC
  1      14      1      4      1
$ LIST OF THE CONTOUR LINES :
  1      2      3      4
  3      1
$ IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI NS1L

'RECO
  1      13      14      15  0.10000E-01  0
0      0
$ IMP NIV1 NIV2 NIV3 EPS IOPT
$ NBNNF NBNNSD

'LIGN
  1      4
$ IMPRE NDLM $
$ NOLIG NOELIG NEXTR1 NEXTR2 NOREFL NFFRON RAISON $

```

66

**TEJIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1	2	9	22	0	0	0.100000E+01
2	2	22	23	0	0	0.100000E+01
3	2	23	10	0	0	0.100000E+01
4	2	10	9	0	0	0.100000E+01

'QUAC
1 16 1 4 1 \$ IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI NS1L
\$ LIST OF THE CONTOUR LINES :
1 2 3 4
3 1 \$ IMAX NQUAD

'RECO
1 15 16 17 0.10000E-01 0 \$ IMP NIV1 NIV2 NIV3 EPS IOPT
0 0 \$ NBNNF NBNNSD

'LIGN
1 4 \$ IMPRE NDLM \$
\$ NOLIG NOELIG NEXTR1 NEXTR2 NOREFL NFFRON RAISON \$
1 2 10 23 0 0 0.100000E+01
2 2 23 24 0 0 0.100000E+01
3 2 24 11 0 0 0.100000E+01
4 2 11 10 0 0 0.100000E+01

'QUAC
1 18 1 4 1 \$ IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI NS1L
\$ LIST OF THE CONTOUR LINES :
1 2 3 4
3 1 \$ IMAX NQUAD

'RECO
1 17 18 19 0.10000E-01 0 \$ IMP NIV1 NIV2 NIV3 EPS IOPT
0 0 \$ NBNNF NBNNSD

'LIGN
1 4 \$ IMPRE NDLM \$
\$ NOLIG NOELIG NEXTR1 NEXTR2 NOREFL NFFRON RAISON \$
1 2 11 24 0 0 0.100000E+01
2 2 24 25 0 0 0.100000E+01
3 2 25 12 0 0 0.100000E+01
4 2 12 11 0 0 0.100000E+01

'QUAC
1 20 1 4 1 \$ IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI NS1L
\$ LIST OF THE CONTOUR LINES :
1 2 3 4
3 1 \$ IMAX NQUAD

'RECO
1 19 20 21 0.10000E-01 0 \$ IMP NIV1 NIV2 NIV3 EPS IOPT
0 0 \$ NBNNF NBNNSD

'LIGN
1 4 \$ IMPRE NDLM \$
\$ NOLIG NOELIG NEXTR1 NEXTR2 NOREFL NFFRON RAISON \$
1 2 12 25 0 0 0.100000E+01
2 2 25 26 0 0 0.100000E+01
3 2 26 13 1 0 0.100000E+01
4 2 13 12 0 0 0.100000E+01

'QUAC
1 22 1 4 1 \$ IMPRE NIVEAU NUDSD NBRELI NS1L
\$ LIST OF THE CONTOUR LINES :
1 2 3 4
3 1 \$ IMAX NQUAD

'RECO
1 21 22 23 0.10000E-01 0 \$ IMP NIV1 NIV2 NIV3 EPS IOPT
0 0 \$ NBNNF NBNNSD

VEIS CON
 FALLA LE ORIGEN

67

'SAUV				
1	23	0	\$ IMPRE NINOPO	NTNOPO
E34.NOPO			\$ FILE NAME	
'F				

Fig.A.2.1 Programa para construir el semianillo de la curva de nivel 34, del lado este.

Algunas palabras de uso frecuente:

POIN	palabra clave para insertar puntos
LIGN	palabra clave para dibujar rectas
QUAC	palabra clave para trazar las líneas del mallado
RECO	palabra clave para pegar mallados parciales

Algunos parámetros de uso frecuente:

NOP	número de punto
NOREF(NOP)	numero de referencia
X(NOP)	Coordenada X
Y(NOP)	Coordenada Y
NOLIG	número de línea
NOELIG	Número de puntos en una línea
NEXTR1	número del 1er puntos extremo
NEXTR2	número del 2o puntos extremo
NOREFL	número de referencia
NFFRON	0 si no se utiliza una función

TESIS CON
FALLA LE ORIGEN

68

Bibliografía

- Akin J. Ed. "Finite Element Analysis for Undergraduates. Academic Press E. U. 1986
- Baboska I. Modeling Mesh Generation and Adaptive Numerical Methods for Partial Differential Equations. Springer Verlag New York 1995.
- Bianchi R. A. Coradini, C. Federico, G. Giberti, G. Sartoris and R. Scandone, " Modeling or surface ground deformation in the Phelegran Fields volcanic area", Italy, Bull. Volcanol., 47, 321-330, 1984.
- Anderson E. M. 1935, "The dynamics of the formation of cone sheets, ring dykes, and caldron- subsidences": v 56. p 128-157.
- Atanacio Jiménez Gerardo. "Mallado Bidimensional y tridimensional" Serie de Guías de Usuario de la Biblioteca Computacional MODULEF. Instituto de Geofísica UNAM, agosto, 1997.
- Baboska I. " Modeling, Mesh Generative, and Adaptive Numerical Methods for Partial Differential Equations, Springer - Verlag, New York, 1995.
- Blot C. " Volcanic et Sismicité dans les Arcs insulaires Prevision de ces Phenomenes", Orston, Paris 1976.
- R. Bonifaz, A.L. Cabrera y G. Gómez, " Integración de Información Cartográfica Sobre Riesgo Volcánico por Medio de Sistemas de Información Geográfica" CENAPRED, 1995.
- Bruce F. Houghton, Stephen R. McNutt, Hazel Ryner, John Stix, " Encyclopedia de Volcanes" Academic Press, 2000.
- E. Car, S. Oller y Ee. Oñate, Matrices tangentes algorítmicas en el problema elastoplástico 1994
Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería, Universitat Politècnica de Catalunya, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Gran Capitán S/N, 08034 Barcelona, España
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, " Volcan Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis de 1994 -1995". Sistema Nacional de Protección Civil, Universidad Nacional Autónoma de México, Edición especial julio de 1995, México D.F.
- Cayol V. and Cornet F. 1998 "Three-dimensional modeling of the 1983-1984 eruption at Piton de la Fournaise Volcano, Réunion Island" Journal of Geophysical Research, v 103 p 18025-18037.
- L. Chevallier y W.J. Verwoerd "A numerical model for the mechanical behavior of intraplate volcanoes", , Journal of Geophysical Research Vol. 93. pages 4182 - 4198. May 10 1988.
- Chevallier L. and Verwoerd W, "Influence of temperature on the distribution of stress and displacement in a volcano, numerical aproach" Bulletin of Volcanology, v 52 p 413-435. 1991.
- Davis, P.M. Surface deformation associated with a dipping hydrosurface, J Geophys. Res. 88, 5826-5834, 1983
- S. de la Cruz - Reyna, H. Nolasco, E. Ramos, J.L. Degollado, F.J. Castillo, C. Velazquez, A. Medrano, H. González, H. Romero y D. A. Castellanos. " La red Geodésica del Volcán Popocatepetl para el Monitoreo de la Actividad Volcánica" CENAPRED 1995.
- H. Delgado, G. Carrasco, P.P. Cervantes, R. Cortés y R. Molinero, " Patrones de Viento en la región del volcán Popocatepetl y Ciudad de México" CENAPRED 1995.
- Dieterich and Deker "Finite element modeling of surface deformation associate with volcanism" Journal of Geophysical Research, v 80 p 4094-4102. 1975.
- S de la Cruz -Reyna, J Quezada, C. Peña, O. Zepeda y T. Sánchez, " Historia de la actividad reciente del Popocatepetl (1354-1995) CENAPRED. 1995.
- Graham F. "Finite Element Computational Aspects, Vol III Prentice Hall, Inc E:U: 1984
- Gardner, J. " Aprendiendo UNIX, 2º Ed., Prentice Hall Hispanoamericana, México 1995
- INRIA, Guías 1-7. Guídes MODULEF
- Jeffreys H. 1935, "Note on fracture", Proceedings of the Royal Society of Edimburgh vol 56 158-163.
- Johnson C. Numerical Solution of partial differential equations by the finite element method" Cambridge University Press Sweden 1990.
- Lahr J., Chouet V., Stephens C., Power J and Page R, "Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: implication of the magmatic system of the 1989-1990 eruptions at Redout Volcano", Alaska Journal of Volcanology and Geothermal Research
- Landau L. P. And Lifchitz E. M. Theory of Elasticity" 3º Ed, Butterworth Heinemann, Great Britain reprinted in 1997.
- J.L. Macías, G. Carrasco y C. Siebe, " Zonificación de Peligros Volcánicos del Popocatepetl" CENAPRED 1995.

69

TECIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Medina F. "Sismicidad y Volcanismo en México", Fondo de cultura económica, 1997.
- Mogi, K. Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformation of the ground surface around them, Bull. Earthquake Res. Inst 36, 99-135. 1958.
- Nakamura, K. Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation: Principle and proposal, J Volcanol, Geotherm. Res. 2, 1-16, 1977.
- Necas J. And Alabaceb. Mathematical theory of Elastic and Elastoplastic Bodies: An introduction. Elsevier Scientific Publish Company Czechoslovakia 1981
- Paul A., P Gratier, and J.A. Boudon, A numerical model for simulating deformation of Mount St. Helens volcano, J. Geophys. Res 92, 10, 299-10, 312, 1987.
- Phillips, W. J." The Dynamics of emplacement of cone sheets, tectonophysics, 24 69-84, 1974
- Pollard, D. D. Equations for stress and displacement fields around pressurized elliptical holes un elastic solids, Math. geol. 5. 11-25. 1973°.
- Pollard, D.D. and G. Holzhausen, On the mechanical interaction between a fluid-filled fracture and the earth's surface, tectonophysics 53, 27_57, 1979.
- Poland, Michael "Determining stress orientation in volcanic edifices through analysis of observed and inferred dike orientations", Arizona State University. September 9, 1998.
- R. Quaas, R. González, E. Guevara E. Ramos y S. De la Cruz Reyna. "Monitoreo Volcánico: Instrumentación y Métodos de Vigilancia" CENAPRED 1995.
- C.Siebe, M. Abeams, J.L. Macias. Depósitos de Avalancha de Escombros y Edad del Actual Cono del Volcán Popocatepetl" CENAPRED 1995.
- Ryan, M. P., Neutral buoyancy and the mechanical evolution of magmatic systems, in Magmatic Processes. Physicochemical principles, Spec. Publ. 1, edited by B. O. Mysen, pp. 259-287, The Geochemical Society, Ann Arbor, Mich. 1987 b.
- Reyes Ávila Luis Alfonso. "Análisis elstostático Tridimensional: Carretera - Terraplen -Alcantarilla".Serie de Guías de Usuario de la Biblioteca Computacional MODULEF. Instituto de geofísica UNAM, agosto, 1998.
- Robson, G.R., and K.G. Barr, "The effect of stress on faulting and minor intrusions inthe vicinity of a magmzt body, Bull. Volcanol, 27, 315-350, 1964.
- Sánchez Macía Jorge. "Cálculo de de esfuerzos y visualización de la s Zonas Plasticas en Elastoplasticidad Bidimensional" Serie de Guías de Usuario de la Biblioteca Computacional MODULEF. Instituto de geofísica UNAM, mayo, 1997.
- Tsunakawa, H. Simple two dimensional model of propagation of magma- filled cracks, J.Volcanol. Geotherm. Res., 16, 335-343, 1983.
- Carlos Valdés González y Guillermo J. González Pomposo, " Sismicidad del Volcán Popocatepetl, Noviembre 1993 a Marzo 1994 Reporte interno Instituto de Geofísica UNAM. 1994.
- C. Valdés, G. González, A. Arciniega, M. Guzman, E. Nava, C. Gutierrez y M. Santoyo. " Sismicidad del volcán Popocatepetl a partir del 21 de Diciembre de 1994 al 30 de Marzo de 1995" CENAPRED 1995.
- Wadge, G., Achache J., Ferretei, A. Francis, P.W., Morley, J., Muller, J.P, Murray, J.B. "Vocano Monitoring unsing Interferometric SAR" Envaironmental Systems Science, Centr, University of Reading UK, 2003.
- Wait R. And Michael A.P. " Finite Element Analysis and Applicatios", John Wiley and Sons Great Britain, 1995.
- Yarza de la torre E. " Volcanes de México" Instituto de geografía UNAM, 1992
- Yokoyama, I.,A modelfor the crustal deformations around volcanoes, J. Phys. Earth, 19,199-207, 1971.

Direcciones de internet:

- <http://dg.ija.csic.es/prog.html>
- <http://www.geo.vu.nl/~gard/papers/thesis/thesis-5.html>
- <http://cipres.cec.uchile.cl/~therve/>
- <http://cenapred.unam.mx>
- <http://www.ian.pv.cnr.it>

...S CON
FALLA DE ORIGEN

70