

01159



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ZONIFICACIÓN DE PELIGROS POR INESTABILIDAD DE TALUDES
EN LA SIERRA DE GUADALUPE Y PROPUESTA GEOTÉCNICA DE
MITIGACIÓN.”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN:
I N G E N I E R Í A C I V I L
EN LA ESPECIALIDAD DE GEOTECNIA
P R E S E N T A:
VÍCTOR CARLOS VALERIO.

TUTOR PRINCIPAL: ING. JESÚS ALBERRO ARÁMBURU.
TUTOR ESPECÍFICO: DR. ARMANDO GARCÍA PALOMO.



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F.

NOVIEMBRE DE 2004



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.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A todos mis profesores.

Al Servicio Geológico Metropolitano, en especial a Armando García Palomo, Wendy V. Morales, Celia López Miguel, Adriana Galván, Hernando Rueda Galeano, Miguel Tapia Cruz, por el apoyo recibido en la realización de este trabajo y porque de todos he aprendido mucho.

Al Ing. Estebán Ramos de Protección Civil del Estado de México.

A CONACYT por el apoyo recibido durante mis estudios.

Al honorable jurado.

A mi director de tesis Jesús Alberro Arámburu.

A Sergio R. Herrera Castañeda.

A mi madre Lidia Valerio Gamboa, a mis hermanas Rosalba, Fernanda y Paty; a mis sobrinos Christopher, Alonso, Marifer, Paty y Javier.

A mi padre Victor Carlos Wuotto (R.i.p).

ZONIFICACIÓN DE PELIGROS POR INESTABILIDAD DE TALUDES EN LA SIERRA DE GUADALUPE Y PROPUESTA GEOTÉCNICA DE MITIGACIÓN

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
I. RESUMEN.....	2
II. GENERALIDADES.....	3
II.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
II.2 IMPORTANCIA DEL TEMA	3
II.3 OBJETIVOS.....	4
II.4 METODOLOGÍA.....	4
III. GEOGRAFÍA	6
III.1 LOCALIZACIÓN.....	6
III.2 MORFOLOGÍA.....	8
III.3 TOPOGRAFÍA.....	10
III.3.1 MAPA DE PENDIENTES.....	10
III.4 INFLUENCIA ANTRÓPICA.....	12
III.5 HIDROLOGÍA.....	14
III.6 CLIMA.....	14
IV. GEOLOGÍA.....	17
IV.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	17
IV.1.1 CINTURÓN VOLCÁNICO TRANSMEXICANO.....	17
IV.1.2 CUENCA DE MÉXICO.....	17
IV.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL	18
IV.2.1 GEOLOGÍA DE LA SIERRA DE GUADALUPE.....	18
IV.2.2 CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES DE LAS UNIDADES VOLCÁNICAS.....	19
IV.2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	22
IV.3 SISMICIDAD.....	25
V. PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS	26
V.1 CLASIFICACIÓN DE PROCESOS DE INESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS.....	27
V.1.1 CONDICIONES REQUERIDAS PARA LA FALLA POR DESLIZAMIENTO.....	30
V.1.2 CONDICIONES REQUERIDAS PARA LA FALLA POR VOLTEO.....	30
V.2 FACTORES DESENCADENANTES DE PROCESOS DE INESTABILIDAD DE TALUDES.....	31

VI. ZONIFICACIÓN DE PELIGROS POR INESTABILIDAD DE TALUDES DE LA SIERRA DE GUADALUPE.....	33
VI.1.MECANISMOS POTENCIALES DE FALLA EN LA SIERRA DE GUADALUPE.....	33
VI.2. AGENTES DETONANTES DE LA FALLA EN LA SIERRA DE GUADALUPE.....	44
VI.3. CARTOGRAFÍA DE PELIGROS Y MAPA DE ZONIFICACIÓN.....	48
VII. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y TRATAMIENTOS GEOTÉCNICOS.....	50
VII.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES EN LA SIERRA DE GUADALUPE.....	50
VII.1 .1 INFLUENCIA DE LA SISMICIDAD.....	50
VII.1.2 INFLUENCIA DEL AGUA.....	51
VII. 2 EJEMPLOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y TRATAMIENTOS.....	53
VII.2.1 ANÁLISIS POR DESLIZAMIENTO.....	53
VII.2.1.1 SOLUCIÓN GEOTÉCNICA PARA DESLIZAMIENTO.....	56
VII.2.2 ANÁLISIS POR VOLTEO.....	57
VII.2.2.1 SOLUCIÓN GEOTÉCNICA PARA VOLTEO.....	62
VII.3 SOLUCIONES GEOTÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS.....	63
VII.4 TRATAMIENTOS RECOMENDADOS PARA LA SIERRA DE GUADALUPE.....	70
VII.5 RECOMENDACIONES GENERALES A LOS PROCESOS CONSTRUCTIVOS.....	72
VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	77
ANEXO.....	79

INTRODUCCIÓN

El Hombre siempre ha estado en contacto con desastres naturales: sismos, erupciones volcánicas, inundaciones, deslizamientos y flujos tanto de suelo como de roca. Estos fenómenos se presentan en la naturaleza con cierto período de recurrencia y pueden ser muy destructivos. Resulta imposible vivir en un ambiente que esté fuera de peligro y que no implique algún riesgo para las personas, pero tomar conciencia acerca de estos fenómenos y del hecho de que en ocasiones la actividad humana es la que induce el riesgo, nos compromete a todos (profesionistas, autoridades, instituciones, sociedad civil) a formular criterios que regulen el uso de tierra en zonas donde aún no se construye, así como a generar mapas de peligro en zonas ya pobladas.

Actualmente miles de personas viven en condiciones irregulares y en alguna situación de riesgo por lo que es importante generar mapas de peligros para detectar zonas vulnerables, prevenir accidentes y mitigar los peligros.

El presente trabajo de tesis contribuye al conocimiento de los factores que propician algún tipo de falla en las laderas rocosas de la Sierra de Guadalupe, en la parte que comprende el Estado de México, y que ponen en riesgo la vida de las personas y la infraestructura ahí construida.

Se le da importancia a la obtención de la geología y de un Mapa de Cartografía de Peligros que delimita las zonas afectadas y señala el mecanismo potencial de falla.

Este tesis contó con el apoyo del Servicio Geológico Metropolitano y las autoridades de Protección Civil del Estado de México y fue el resultado de participar en el proyecto "Evaluación y zonificación de los peligros geológicos por deslizamiento en las laderas de la Sierra de Guadalupe, Estado de México".

I. RESUMEN

La Sierra de Guadalupe es una pequeña prominencia topográfica localizada en la porción central de la Cuenca de México. Tiene una altitud de 3,000 msnm, y vista en planta presenta una forma circular, con un diámetro de 17 km. La comparten los municipios de Tlalnepantla, Tultitlán, Coacalco y Ecatepec en el Estado de México y la Delegación Gustavo A. Madero en el Distrito Federal. Geológicamente está constituida por 14 unidades volcánicas dentro de las cuales hay domos y estratovolcanes colapsados. Los domos son denominados: El Tenayo, Chalma, Tlayacampa, El Tejocote, Chiquihuite, Cerro Gordo y Maria Auxiliadora; mientras que los estratovolcanes se denominan: El Jaral, Picacho, Pico Tres Padres y La Presa. La composición de las rocas que constituyen a la Sierra de Guadalupe son predominantemente de composición ácida, como dacitas, riolitas y en menor proporción rocas intermedias como andesitas.

Las formas originales del relieve fueron producidas por actividad volcánica y una fuerte afectación tectónica por medio de fallas y fracturas, modeladas posteriormente por la erosión y acumulación exógena.

La Sierra de Guadalupe ha sufrido un intenso proceso de urbanización que conlleva un riesgo dadas sus condiciones topográficas, geológicas, estructurales y de comportamiento mecánico de los macizos rocosos, lo que ha propiciado que represente una de las regiones con mayor peligro por movimientos de ladera dentro de la Cuenca de México. Los principales peligros que ponen en riesgo la vida de las personas así como la infraestructura construida en las laderas de la sierra son: volteo, caída y deslizamiento de rocas, flujo de detritos y reptación de laderas. Estos peligros están asociados al origen y la estructura geológica de las diferentes unidades volcánicas. El fracturamiento asociado a las fallas principalmente de tipo normal y los planos de flujo y enfriamiento asociados al emplazamiento de las estructuras volcánicas (domos y volcanes), controlan los procesos de inestabilidad de taludes, principalmente el volteo y deslizamiento. Los circos de erosión controlan parte de los peligros por inestabilidad de taludes ya que definen laderas de captación en las cuales frecuentemente hay bloques y detritos de roca que pueden rodar o incorporarse en un flujo, respectivamente. En las cabeceras de los circos de erosión es frecuente la presencia de escarpes de falla, donde se presenta el volteo de bloques de roca y hacia las partes intermedias o bajas existen zonas de rodados, los cuales pueden iniciar su movimiento pendiente abajo y afectar a las personas e infraestructura civil.

Los tratamientos geotécnicos recomendados consisten en cables, muros, anclajes y medidas de drenaje para bloques cuyo mecanismo potencial de falla es por volteo o deslizamiento; para la caída de rocas por desprendimiento se propone el atado de bloques, cables y malla, concreto lanzado y drenaje; para el rodamiento de bloques se propone el uso de mallas, trincheras y barreras de contención.

II. GENERALIDADES

II.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Cuenca de México, debido a su conformación geológica, presenta una serie de peligros geológicos y/o geotécnicos, como son: sismicidad, inundaciones, hundimiento, agrietamiento de suelo e inestabilidad de taludes; estos peligros afectan de manera directa a la población y a la infraestructura civil. En particular las fallas de taludes son fenómenos que ocurren con frecuencia en la zona de laderas de la Cuenca de México, sobre todo en época de lluvias o bien durante periodos de actividad sísmica importante.

En la Sierra de Guadalupe se desarrollaron asentamientos humanos a partir de la década de 1960, dando como resultado que gran parte de las viviendas fueron construidas en zonas de laderas potencialmente inestables. El origen volcánico, edad y tectonismo de la sierra, aunado a la intervención humana, han propiciado que represente una de las regiones con mayor peligro por movimientos de ladera dentro de la Cuenca de México (SEGEOMET, 2003).

II.2 IMPORTANCIA DEL TEMA

Los problemas asociados a la inestabilidad de taludes han recibido más atención en las últimas décadas debido a sus efectos destructivos en zonas urbanas. El crecimiento urbano se ha desarrollado sin control y sin la intervención de especialistas en las Ciencias de la Tierra (geotecnistas, geólogos, geofísicos, geógrafos) teniendo como resultado que sean habitadas zonas de laderas potencialmente inestables. Desde el punto de vista de la Protección Civil es importante contar con un Mapa de Zonificación de Peligros por Inestabilidad de Taludes, con fines de planeación y para tener una base para realizar estudios a detalle.

La utilidad de este mapa permitirá:

- ✓ Conocer la ubicación y el peligro implicado en las laderas de la Sierra de Guadalupe con fines de zonificación.
- ✓ Aportar información básica para realizar estudios a detalle en alguna ladera o cantil.
- ✓ Tener las herramientas básicas para una mejor planificación de las obras a proyectar en la Sierra de Guadalupe.
- ✓ Evitar el crecimiento urbano hacia zonas de peligro, de reserva ecológica y de recarga de los mantos acuíferos.

II.3 OBJETIVOS

- 1) Realizar un estudio regional de los taludes rocosos a partir del origen y estructura de las diferentes unidades volcánicas que conforman la Sierra de Guadalupe, específicamente en la parte correspondiente al Estado de México.
- 2) Identificar y cartografiar los mecanismos potenciales de falla de los taludes y los agentes detonantes más importantes.
- 3) Generar el Mapa de Zonificación por Inestabilidad de Taludes en la Sierra de Guadalupe.
- 4) Realizar un análisis de estabilidad representativo por volteo y deslizamiento de bloques y formular un esquema general de tratamientos geotécnicos aplicable a la Sierra de Guadalupe así como recomendaciones a los procesos constructivos.

II.4 METODOLOGÍA

Para realizar el presente trabajo se cubrieron tres etapas principales, las cuales se basan en la utilización de técnicas de campo y gabinete para identificar los factores que intervienen en la generación del peligro geotécnico en la zona de estudio, así como el reconocimiento de los principales mecanismos potenciales de falla de las laderas rocosas.

❖ Primera etapa de gabinete: recopilación y generación de información base.

- 1) *Recopilación bibliográfica.* Consistió en la búsqueda, tanto en bibliotecas como en internet, de artículos, memorias, tesis y libros referentes a la geología, al estudio teórico de los deslizamientos y en particular a los procesos que afectan a la Sierra de Guadalupe.
- 2) *Obtención o generación de mapas base.* Los mapas indispensables son: topográfico, geológico, estructural, de pendientes y modelo sombreado. Con estos mapas se infieren las características más importantes del terreno, las zonas escarpadas, los circos de erosión y rasgos estructurales.
- 3) *Fotointerpretación.* Este análisis permitió identificar los principales rasgos del relieve que influyen en la inestabilidad de los taludes como fallas, escarpes, circos de erosión, deslizamientos recientes y antiguos, zonas donde afloran macizos rocosos o de acumulación de bloques. Esta información está sujeta a posteriores verificaciones en campo.

❖ Trabajo de campo.

4) *Geológico-estructural*. El trabajo de campo sirvió para reconocer los sistemas de fallas y fracturas que afectan a la región y para determinar la forma y tamaño de bloques potencialmente inestables. A partir del muestreo de rocas en los afloramientos se estableció la litología de las diferentes unidades volcánicas.

5) *Geotécnico*. Se detectaron y cartografiaron en un mapa topográfico escala 1:25 000, los macizos rocosos potencialmente inestables, las zonas de rodados, de acumulación de bloques y detritos, los frentes de flujos de lava, trazas y escarpes de falla, con ayuda de fotografías, notas, croquis de rasgos del terreno y equipo de campo.

❖ Segunda etapa de gabinete: interpretación de resultados y generación del mapa final.

6) *Procesamiento de datos*. Los datos de campo, las observaciones y la cartografía se capturó en formato digital.

7) *Generación del Mapa de Zonificación de Peligros por Inestabilidad de Taludes*. Con base en el trabajo de campo, donde se cartografiaron en un mapa topográfico las zonas potencialmente inestables en forma de “amibas”, se digitalizaron y etiquetaron las áreas de acuerdo con el mecanismo probable de falla.

8) *Análisis de estabilidad representativo*. Se realizó un ejemplo de análisis de estabilidad representativo para deslizamiento y volteo de bloques de roca, resaltando la influencia de que ejercen los sismos y el agua en la estabilidad.

9) *Propuesta de mitigación para cada tipo de peligro*. A partir de una revisión de los tratamientos recomendados en rocas y de lo observado en campo, se propone un esquema general de tratamientos geotécnicos aplicable a la Sierra de Guadalupe y algunas recomendaciones a los procedimientos constructivos.

III. GEOGRAFÍA

III.1 LOCALIZACIÓN

La Sierra de Guadalupe es una pequeña prominencia topográfica localizada en la porción central de la Cuenca de México (Fig. III.1), entre las coordenadas 19° 30', 19° 38' de latitud N (2 156 000, 2 171000 UTM) y 99° 00', 99° 12' de longitud W (500 000, 479 000 UTM); la comparten los municipios de Tlalnepantla, Tultitlán, Coacalco y Ecatepec en el Estado de México y la Delegación Gustavo A. Madero en el Distrito Federal. La Sierra de Guadalupe tiene una altitud de 3,000 msnm, y vista en planta presenta una forma circular, con un diámetro de 17 km (Fig. III.2).

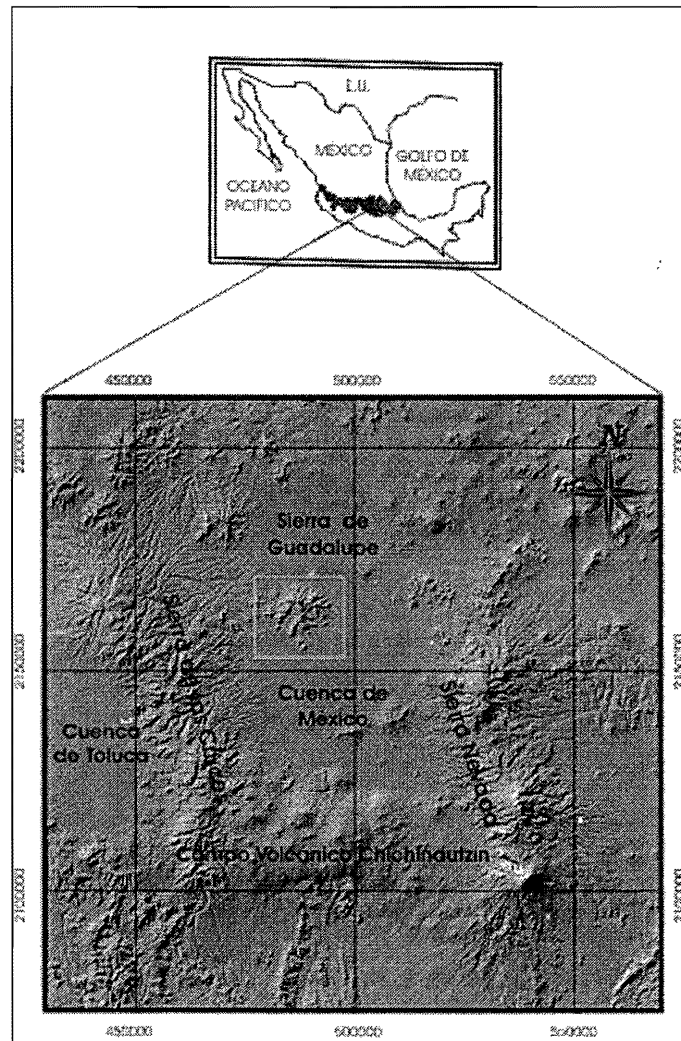


Fig. III.1 Localización de la Sierra de Guadalupe dentro de la Cuenca de México

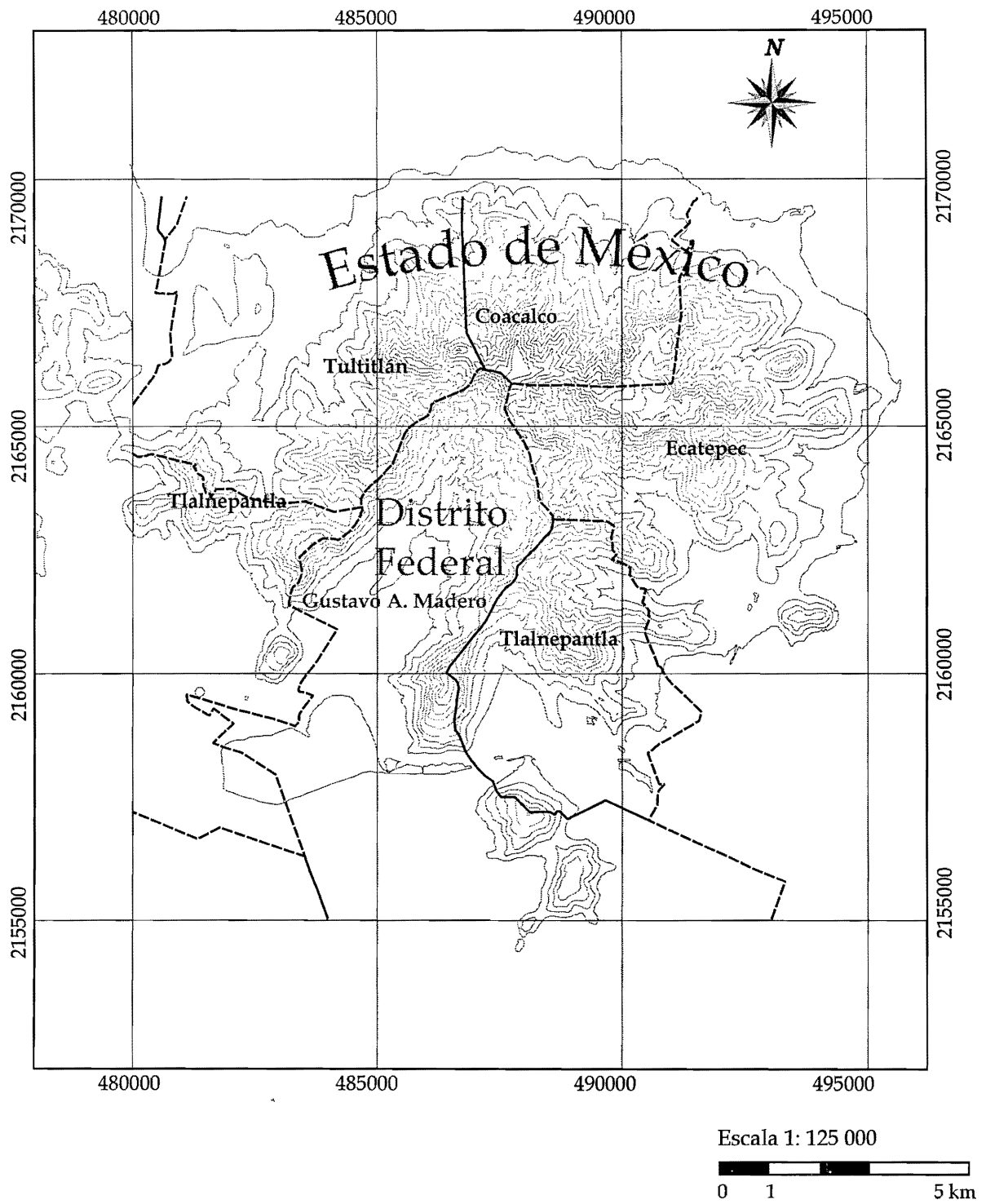


Figura III.2 Localización de la Sierra de Guadalupe y división política

III.2 MORFOLOGÍA

El relieve de la Sierra de Guadalupe varía entre las cotas 2240 a 3,000 msnm. Las formas originales del relieve fueron producidas por actividad volcánica y una fuerte afectación tectónica por medio de fallas y fracturas, modeladas posteriormente por la erosión y acumulación exógena.

Las prominencias volcánicas que conforman la sierra se encuentran afectadas por circos de erosión (Fig III.3), que son estructuras en forma cóncava a manera de anfiteatro con laderas empinadas, las cuales se originan en la cabecera de algunas corrientes fluviales, por deslizamiento y acción erosiva fluvial de pequeñas escorrentías que inciden en un canal principal (Lugo-Hubp, 1996) o bien pueden ser originados por colapsos volcánicos o por tectonismo.

La disección se manifiesta por barrancos, circos de erosión y valles, algunos de ellos en forma de herradura. El modelo sombreado se muestra en la fig. III.4 (SEGEOMET,2003).

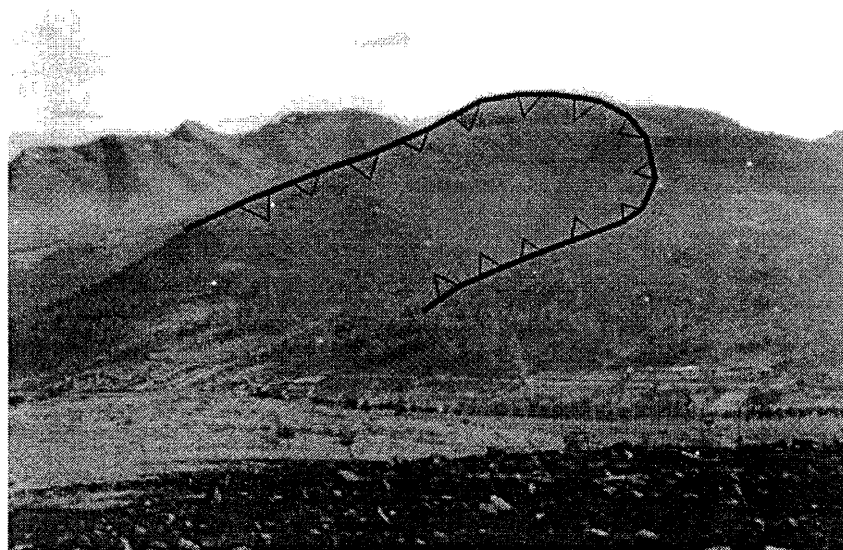


Fig. III.3 Circo de erosión

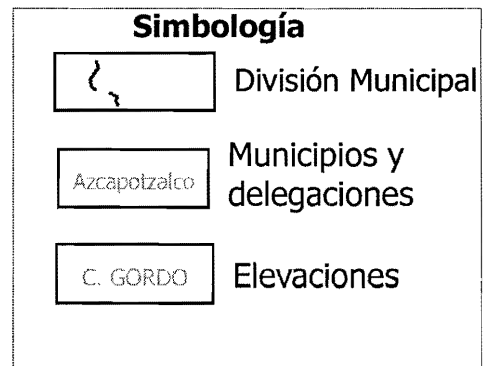


Fig. III.4. Modelo sombreado de la Sierra de Guadalupe

III.3 TOPOGRAFÍA

Para este trabajo se utilizó como base el mapa topográfico de INEGI; la Sierra de Guadalupe se ubica en la hoja Cuautitlán E14A29. La escala utilizada es de 1:50,000 con proyección UTM, con una equidistancia de 10 m entre las curvas de nivel. Además, se digitalizó un nuevo mapa topográfico con curvas de nivel a cada 10 metros escala 1:25,000 el cual se utilizó como base para vaciar la información que se obtenía en campo.

Observando la posición, distribución geográfica y rasgos del relieve se tiene que la sierra ocupa una extensión aproximada de 150 km², vista en planta presenta una forma casi circular, con una diferencia de desnivel de 770 m, entre las cotas de 2 240 msnm hasta la de 3 010 msnm. Las principales prominencias topográficas son: El Pico Tres Padres, Cerro El Picacho, Cerro María Auxiliadora, Pico del Águila, Pico Moctezuma, Cerro Zacatenco, Cerro Gordo, Cerro Chiquihuite, Cerro El Tenayo y Tepeyac entre otros.

III.3.1 MAPA DE PENDIENTES

Con el mapa de pendientes se ubican los diferentes grados de inclinación del terreno. La elaboración del mapa de pendientes consiste en convertir la distancia que hay entre curvas de nivel a valores de pendiente en grados o en porcentajes. Para su realización se utilizó el Sistema de Información Geográfica (Ilwis) (SEGEOMET,2003). Los rangos obtenidos fueron definidos por los valores de la altimetría de la región, obteniéndose cinco rangos de inclinación, que son de 0°-15°, 16°-30°, 31°-45°, 46°-60° y > 60° (Fig.III.5).

- El rango de 0°-15°. Corresponde con las altitudes mas bajas y abarca la planicie lacustre y las ligeras inclinaciones del pie de monte que rodean a la Sierra de Guadalupe.
- El rango de 16°-30°. Esta pendiente es característica de laderas rectas que definen elevaciones aisladas alrededor de la sierra. Corresponde a las partes bajas de las laderas montañosas, como los cerros: Chiquihuite, Tenayo, María Auxiliadora, Gordo y Tlayacampa.
- Los rangos de 31°-45°. Las cimas agudas y las laderas de fuerte pendiente de origen volcánico se definen de manera precisa en este rango. Queda incluido el conjunto montañoso de la sierra de Guadalupe (2 900 m de altitud). Corresponden a la parte central de las prominencias topográficas de los cerros El Picacho, Pico Tres Padres y Pico Moctezuma, caracterizado por escarpes pronunciados.
- Los rangos de 46°-60° y mayores, son las zonas de mayor altura, que se relacionan con zonas muy abruptas, escarpes pronunciados y afloramientos rocosos con procesos gravitacionales activos. Corresponde a las zonas de Chiquihuite, Chalma de Guadalupe y los alrededores de los cerros El Picacho, Tres Padres y Moctezuma.

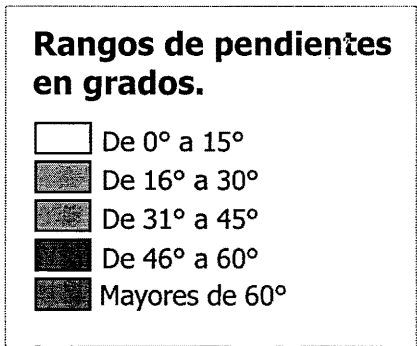
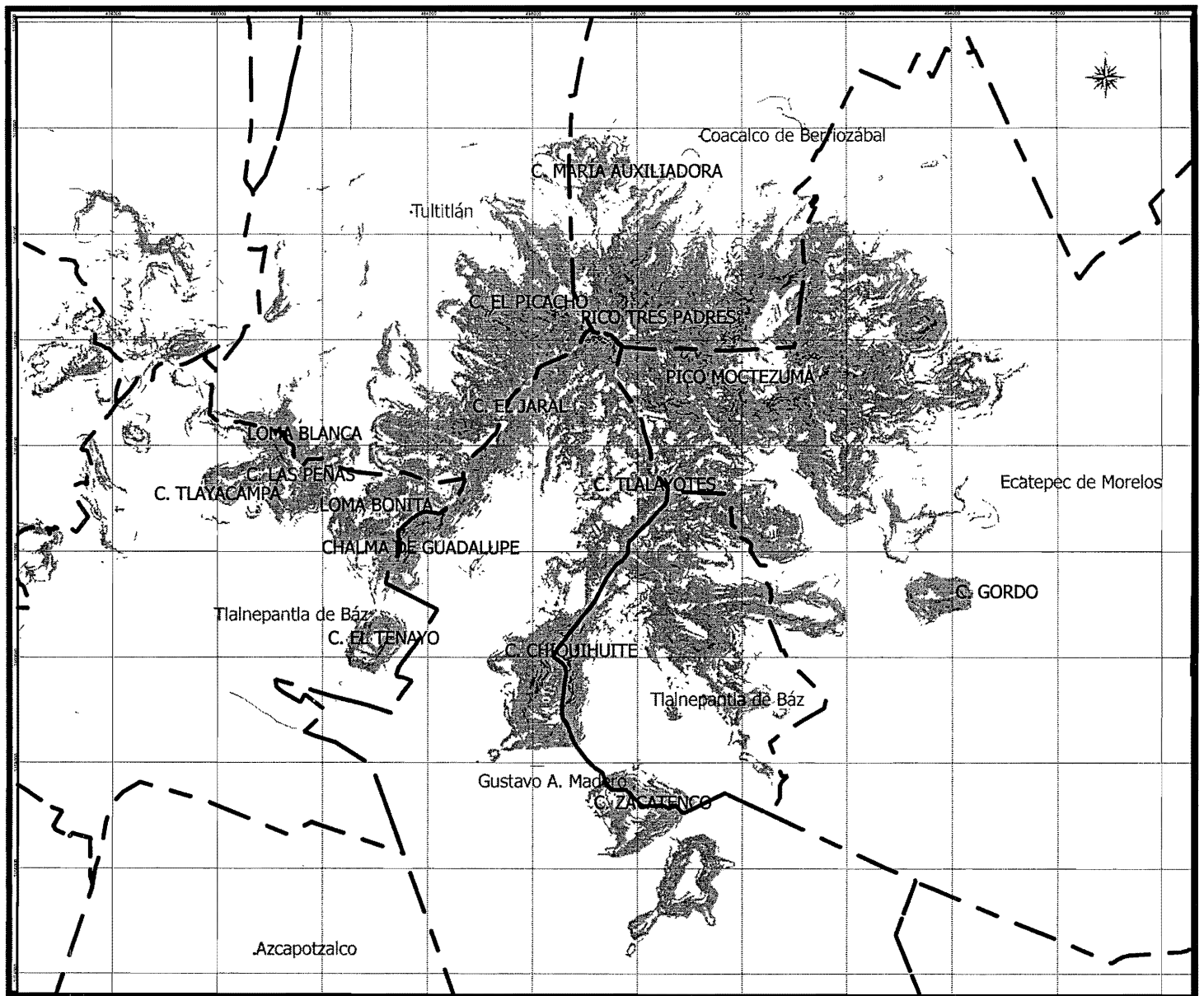


Fig. III.5. Pendientes en grados

III.4 INFLUENCIA ANTRÓPICA

El gran crecimiento demográfico que se ha registrado en las últimas décadas, la falta de planeación territorial y la demanda cada vez mayor de vivienda, ha tenido como resultado una expansión de la mancha urbana a zonas de laderas montañosas que presentan serios peligros desde el punto de vista geotécnico. Particularmente, en la Sierra de Guadalupe se han desarrollado una gran cantidad de asentamientos humanos, muchos de ellos irregulares, por lo que fue necesario construir bardas o muros ecológicos para evitar más asentamientos. Este intenso proceso de urbanización ha ocasionado grandes alteraciones e impactos en el medio físico y a las condiciones naturales que favorecen algún tipo de falla de los taludes hay que añadir la influencia que ejerce la actividad humana sobre las laderas naturales que se traduce en cortes de taludes, sobrecarga de obras civiles, vibraciones por maquinaria o paso de vehículos y explotación de canteras. En la fig. III.6 se muestra el mapa de crecimiento urbano de la Sierra de Guadalupe de 1970 a 1990 y en la fig. III.7 se muestra la zona urbana para el año 2000.

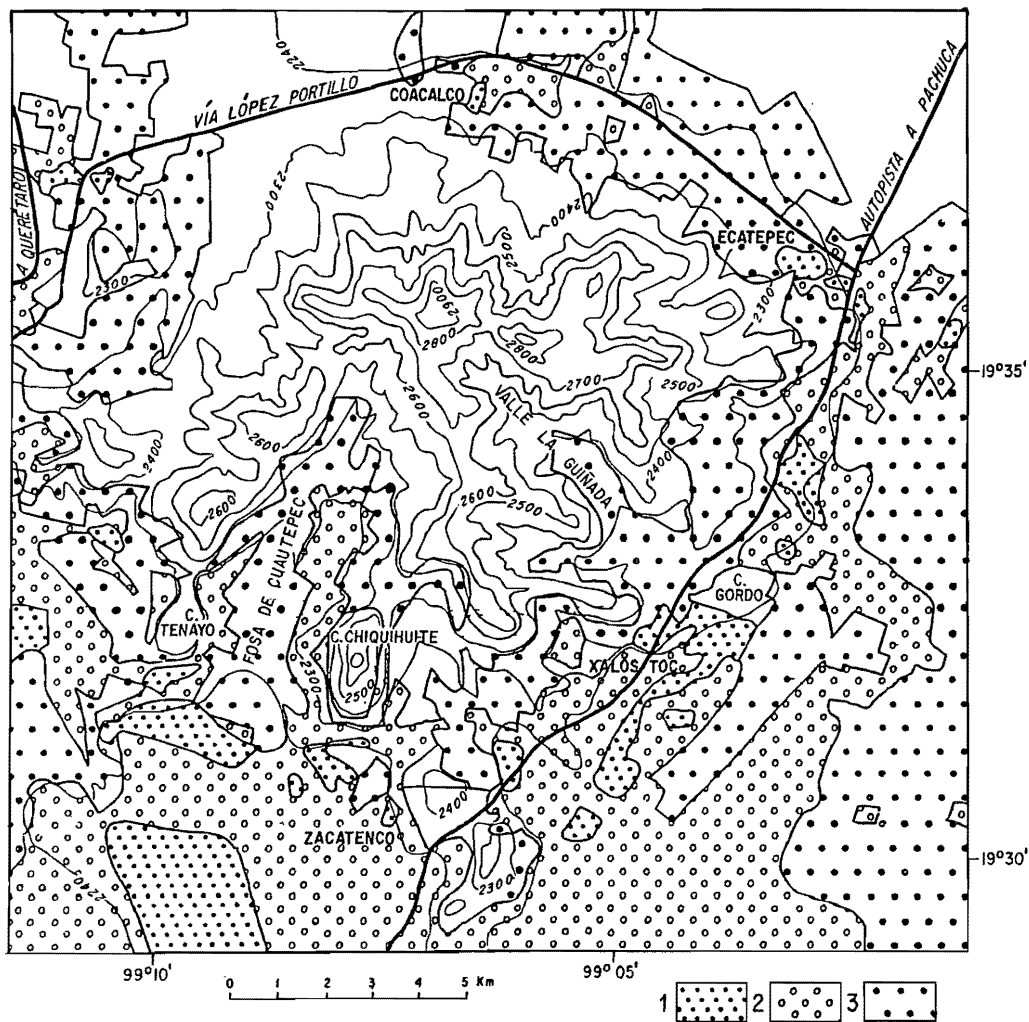


Fig. III.6 Mapa de crecimiento urbano. 1) 1970; 2) 1980; 3) 1990. (Lugo y Salinas,1996)

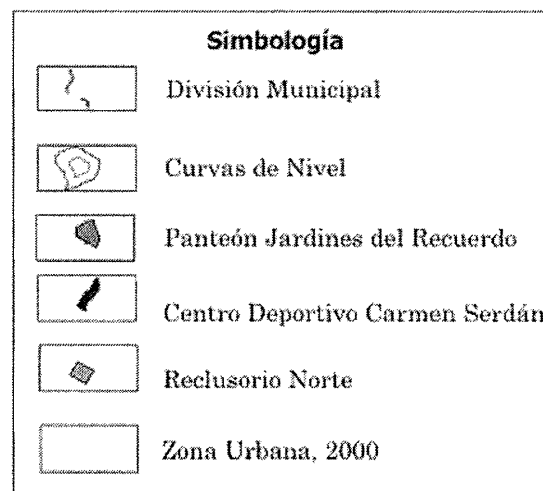
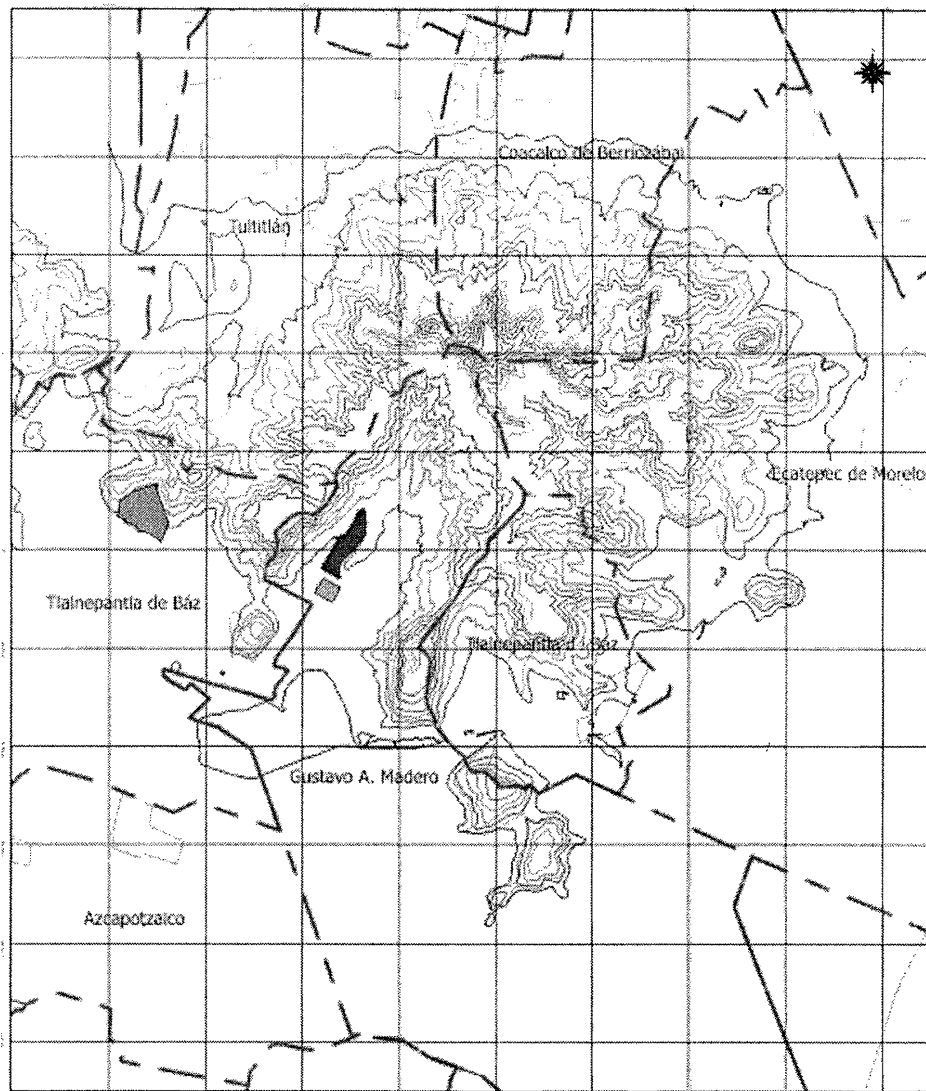


Fig.III.7. Crecimiento urbano al año 2000 (SEGEOMET,2003).

III.5 HIDROLOGÍA

La Sierra de Guadalupe se ubica en la región hidrológica número 26 o del “Alto Pánuco”. Hacia el oriente de la sierra se ubica gran parte del municipio de Ecatepec de Morelos, el cual corresponde a la subcuenca “D” o del río Moctezuma y a la subcuenca “P” que incluye los lagos de Texcoco y Xaltocan. En este municipio corre el río de los Remedios, que sirve como límite territorial con la parte norte del Distrito Federal y Nezahualcóyotl. En la parte norte de la sierra está el municipio de Coacalco de Berriozábal, con ausencia de ríos importantes y sólo escorrentías en temporada de lluvias. Por último al nor-oeste y oeste colindan los municipios de Tultitlán y Tlalnepantla; en éste último, cruzan los ríos Tlalnepantla, San Javier y los Remedios. El municipio de Tultitlán corresponde a las sub-cuencas “D” y “P”.

El patrón de drenaje de la Sierra de Guadalupe es variado ya que está controlado principalmente por tres factores: la morfología semicircular de la sierra, por zonas de deslizamiento y por el control estructural. El principal patrón de drenaje es de tipo radial, se forma en la parte central de la sierra y se distribuye alrededor de la misma. El segundo patrón de drenaje es de tipo dendrítico y está controlado por circos de erosión. Por último, se presenta el patrón de drenaje angular, caracterizado por afluentes largos que siguen zonas de fracturas o fallas.

III.6. CLIMA

La fórmula que identifica el clima de la sierra es $C (W_o) (w) b (i')$, donde C= climas templados y húmedos, W= árido (desértico), w= estación seca en invierno, b= temperatura media del mes más cálido que supera los 22 °C e i' = coeficiente arbitrario, lo que representa un clima templado sub-húmedo, de acuerdo a la clasificación de Köpen y modificado de García (1988).

En la Sierra de Guadalupe predominan esencialmente dos tipos de climas:

1) el de la parte alta y 2) el de la planicie.

En el primero el régimen de lluvias ocurre en verano durante los meses de junio a septiembre con un promedio de precipitación entre 100 mm y 180 mm mensuales y una precipitación promedio anual máxima entre 710 y 820 mm. El verano es fresco y largo con una temperatura promedio de 15.6 °C. La temperatura del mes más frío es de 10 °C, con heladas ocasionales en los meses de noviembre a febrero y la temperatura más caliente es de 18 °C, por lo que la oscilación térmica es moderada.

El otro clima se presenta en la planicie que rodea la sierra, el cual es clasificado como tipo semi-seco del subtipo de los semi-secos templados cuya temperatura media anual se encuentra entre 12 ° y 18 °C. Las lluvias ocurren en verano durante los meses de junio a septiembre y los meses más calurosos son marzo, abril, mayo y junio.

Se generó un mapa de precipitación a partir de los datos de estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio (SEGEOMET,2003).

Los rangos de precipitación que se utilizaron fueron los siguientes (Fig III.8):

- De 0 a 600 mm
- De 600 a 650 mm
- De 650 a 700 mm
- De 700 a 750 mm
- De 750 a 800 mm
- Mayores de 800 mm

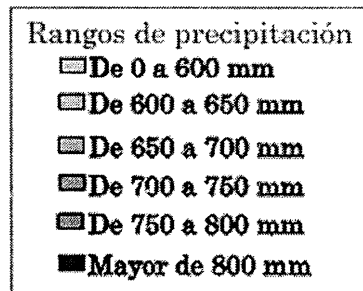
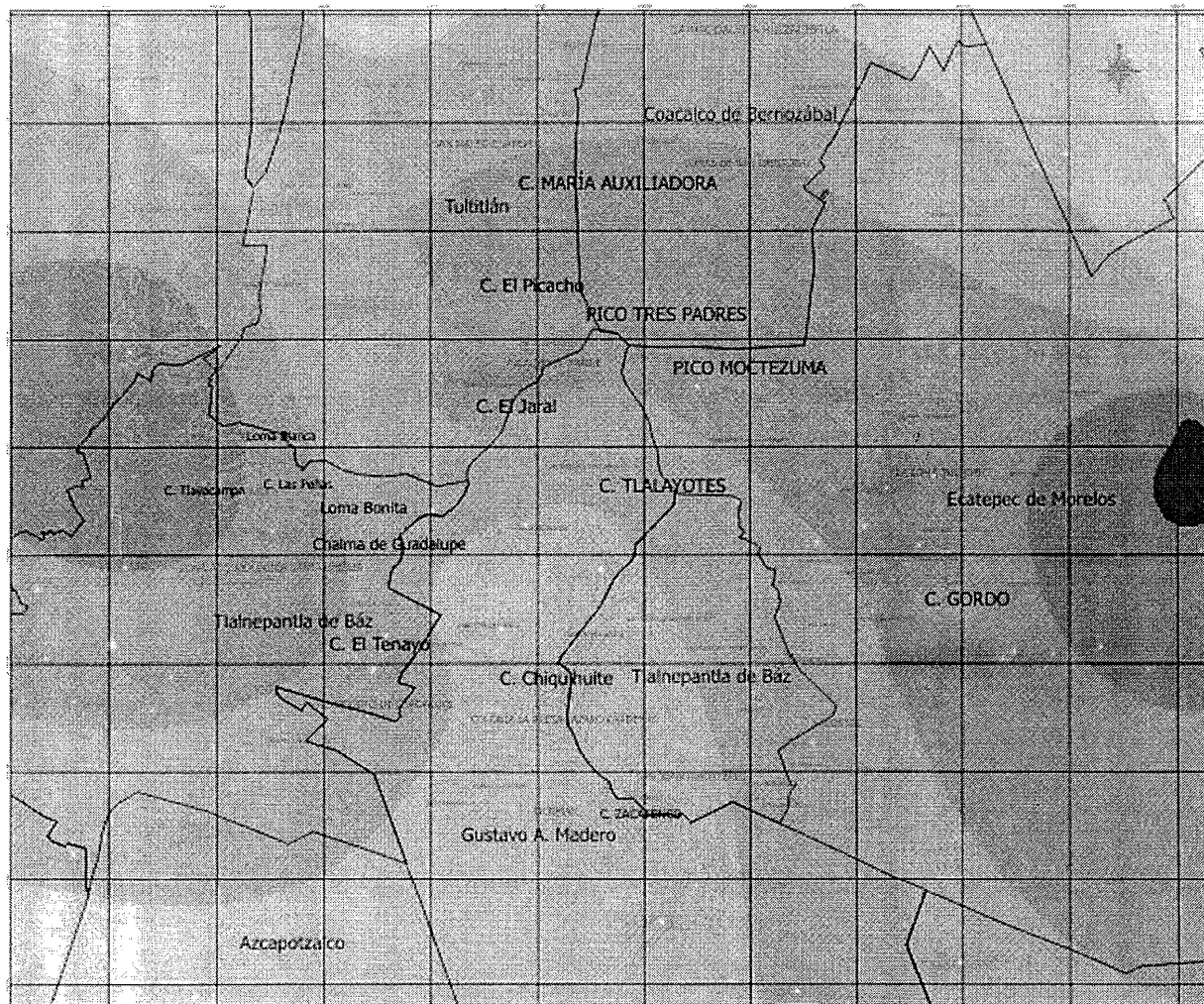


Fig. III.8. Mapa de precipitación de la Sierra de Guadalupe

En la tabla III.9 se muestran datos puntuales de precipitación promedio anual.

MUNICIPIO	GEOFORMA	PRECIPITACIÓN EN mm
Ecatepec de Morelos	Pico Moctezuma con una pendiente aproximada de entre 31° - 45°	720 - 740
Ecatepec de Morelos	C. Gordo, con una pendiente aproximada de 16° - 30° en la parte alta y de 0° - 15° en la planicie	600 - 640
Ecatepec de Morelos y Tlalnepantla	San Andrés de la Cañada con pendiente aproximada de 45° - 60° en la parte alta y de 0° - 15° en la planicie	700 - 710
Tlalnepantla	Complejo Dómico Tlayacampa con pendiente aproximada de 45° - 60°	730 - 760
Tlalnepantla	C. Chiquihuite con pendiente aproximada de 45° - 60°	600 - 640
Tlalnepantla	C. Tenayo con pendiente aproximada de 45° - 60°	600 - 640
Tultitlán	C. Picacho con una pendiente aproximada de 30° - 60°	700 - 710
Coacalco de Berriozabal y Tultitlán	Pico Tres Padres con una pendiente aproximada de 30° - 45°	700 - 740
Coacalco de Berriozabal	C. María Auxiliadora con una pendiente aproximada de 16° - 30°	600 - 710

Tabla III.9. Valores de precipitación promedio anual de algunas zonas de la Sierra de Guadalupe.

IV. GEOLOGÍA

IV.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

IV.1.1 CINTURÓN VOLCÁNICO TRANSMEXICANO

La zona de estudio se localiza regionalmente dentro del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM). El CVTM es un arco volcánico continental con una composición predominantemente andesítico-dacítico, que se extiende por más de 1200 Km desde las costas del Pacífico hasta las inmediaciones del Golfo de México (Fig. IV.1), con un ancho que varía entre 20 y 200 Km (García-Palomo, 2002). Hacia la parte central del CVTM se localiza la Cuenca de México.



Fig. IV.1 Localización del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano. (Demant, 1978)

IV.1.2 CUENCA DE MÉXICO

La Cuenca de México (Fig. IV.2) es una cuenca lacustre endorreica con una altitud promedio de 2,240 msnm y está bordeada por una serie de cadenas volcánicas de diferente edad. Al oeste la cuenca está delimitada por la Sierra de Las Cruces, conformada por edificios volcánicos, principalmente estratovolcanes, que tienen una orientación general N-S. El límite oriental de la Cuenca de México es la Sierra Nevada, constituida por los volcanes Tláloc, Telapón e Iztaccíhuatl y el volcán activo Popocatepetl. La parte norte de la cuenca es delimitada por la antigua zona volcánica de Pachuca, mientras que al sur es delimitada por el Campo Volcánico de Chichinautzin, el cual está constituido por volcanes monogenéticos principalmente (SEGEOMET,2003). Sin embargo, dentro de la Cuenca de México existen dos sierras: la Sierra de Santa Catarina, localizada en la parte sureste y la Sierra de Guadalupe, localizada en la parte central de la Cuenca y objetivo del presente trabajo.

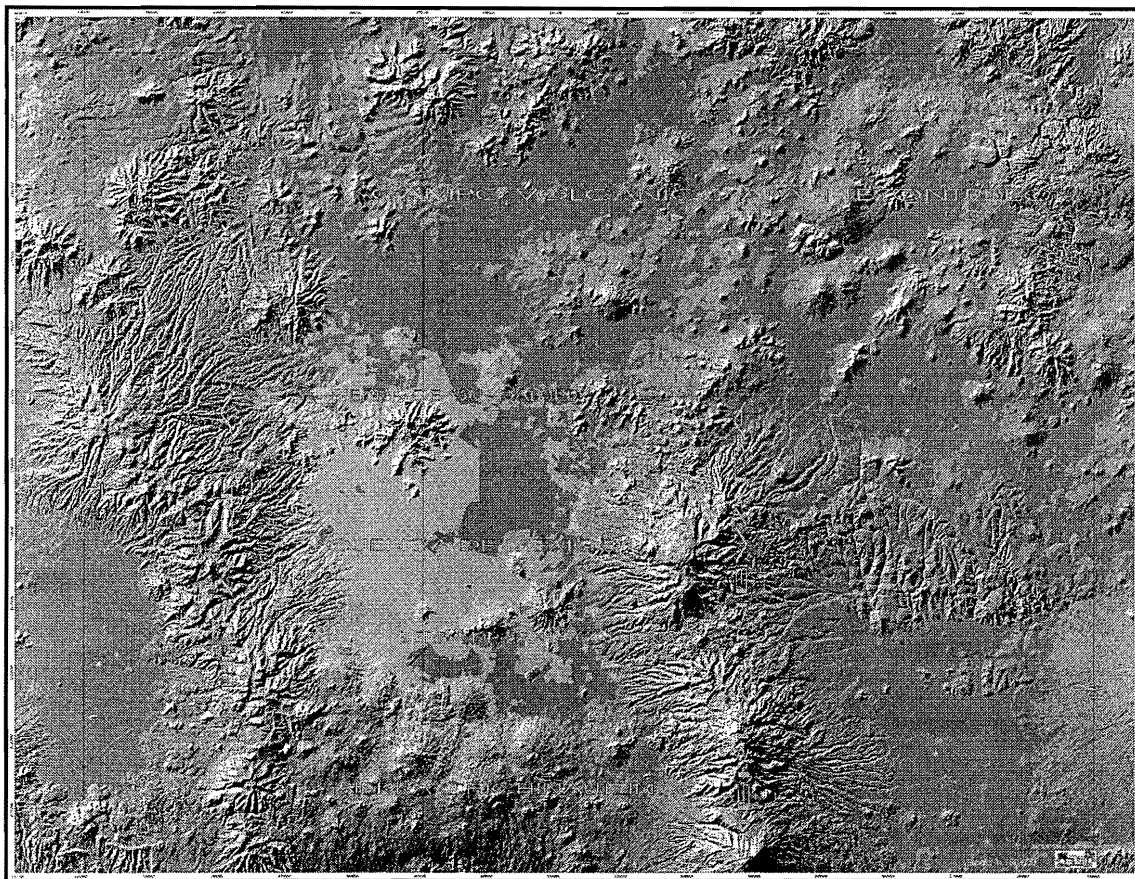


Fig. IV.2 Cuenca de México y mancha urbana.

IV.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

IV.2.1 GEOLOGÍA DE LA SIERRA DE GUADALUPE

Geológicamente la Sierra de Guadalupe está constituida por un conjunto de domos y volcanes de diferente tamaño. Se reconocieron al menos 14 unidades volcánicas, dentro de las cuales hay domos y estratovolcanes colapsados.

Los domos son denominados: El Tenayo, Chalma, Tlayacampa, El Tejocote, Chiquihuite, Cerro Gordo y Maria Auxiliadora; mientras que los estratovolcanes se denominan: El Jaral, Picacho, Pico Tres Padres y La Presa. Cada uno de ellos tiene características volcánicas particulares que permiten diferenciarlos entre sí. Por ejemplo, existen diferentes tipos de flujos de lava, flujos piroclásticos, depósitos de caída y lahares, estos últimos se encuentran ampliamente distribuidos alrededor de la Sierra de Guadalupe.

La composición de las rocas que constituyen a la Sierra de Guadalupe son predominantemente de composición ácida, como dacitas, riolitas y en menor proporción rocas intermedias como andesitas (SEGEOMET,2003). En lo que respecta a la edad, se han efectuado diversos fechamientos radiométricos entre 14 y

16 Ma, (Jacobo-Albarrán, 1985) lo que permite ubicarla dentro del Mioceno Medio, constituyéndola como la Sierra más antigua dentro de la Cuenca de México. Lozano (1968) reportó los fechamientos de dos rocas de la sierra, en Barrientos y en la fosa de Cuauhtepic, del orden de 14-15 millones de años, determinados por K-Ar. Mooser (1975) atribuye una edad a la sierra principalmente del Mioceno temprano.

A continuación se describen las principales estructuras volcánicas que constituyen a la Sierra de Guadalupe.

IV.2.2 CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES DE LAS UNIDADES VOLCÁNICAS

Es importante conocer el tipo de roca y la estructura geológica de las laderas de la Sierra de Guadalupe pues dependiendo de su origen y formación, los taludes rocosos heredarán rasgos estructurales y litológicos que influirán en su comportamiento.

Descripción de las diferentes unidades volcánicas que conforman la sierra de Guadalupe (Fig. IV.3) (SEGEOMET,2003).

La descripción se hace en el sentido de las manecillas del reloj a partir del Cerro El Tenayo, ubicado en la parte surponiente de la sierra.

Domo El Tenayo

Corresponde a un pórfido dacítico de color gris a rosa claro, con presencia de fenocristales de cuarzo y plagioclasa inmersos en una matriz afanítica. Se presenta como derrames sucesivos de lava, los cuales le dan el aspecto de una textura de flujo, que intercala bandas de color gris y rosa claro con espesores variables. El domo está alargado en dirección SW; se encuentra afectado por fallas con rumbo N 30° E, que definen el graben de Cuauhtepic.

Domo Chalma

Constituido por flujos de lava muy alterados de color rosa claro, con fenocristales de plagioclasa, anfíboles y abundante cuarzo, embebidos en una matriz félsica; se clasifica como pórfido riolítico. El domo está compuesto por derrames sucesivos de lava, localmente presenta estructuras de flujo, con bloques fracturados perpendicularmente a la dirección de flujo. Su estructura tiene una pendiente suavizada hacia el NW y escarpada hacia el NE. Lo afectan fallas en dirección NE; en la Cantera localizada al sur del domo se observan estrías de falla y fracturas verticales.

Complejo Dómico Tlayacampa

Los afloramientos que caracterizan al Complejo Dómico Tlayacampa corresponden a rocas color rojo claro al intemperismo, mientras que en muestra fresca son rosa claro. Presentan textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, cuarzo en menor cantidad y minerales ferromagnesianos, clasificándolas como dacitas porfídicas.

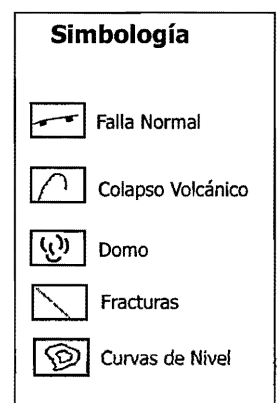
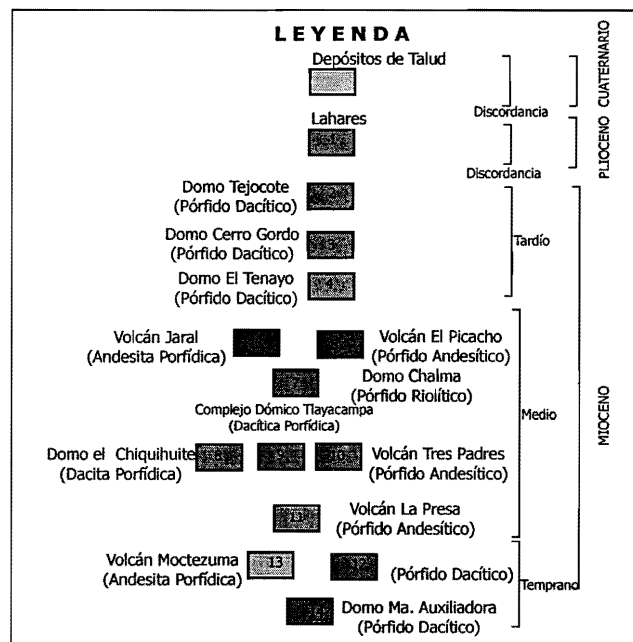
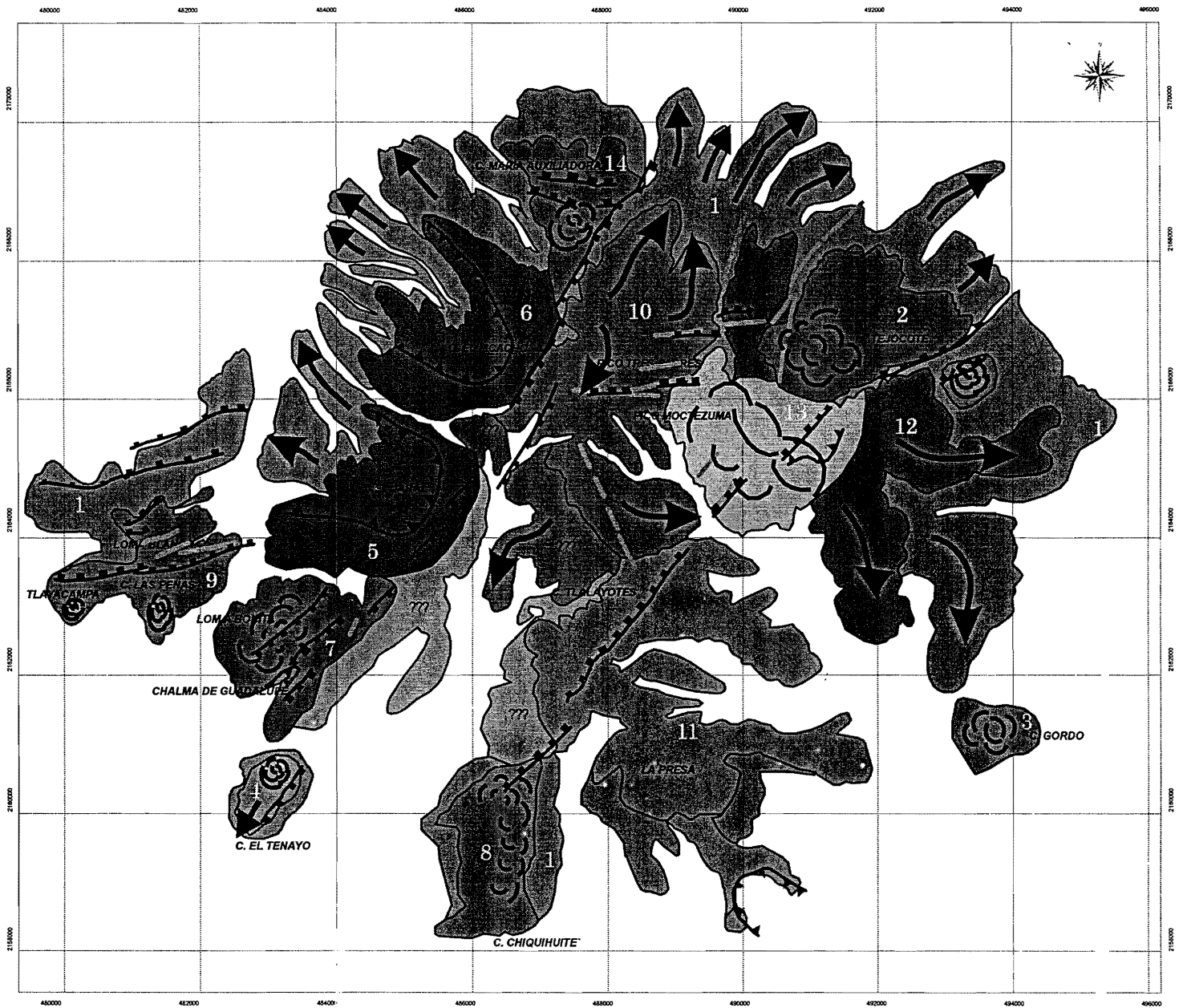


Fig. IV.4 Geología del área de estudio (SEGEOMET, 2003).

El Complejo está formado por dos domos, el Tlayacampa alargado en dirección E–W, y el otro formado por dos cerros denominados Cerro Loma blanca y el Cerro las Peñas en dirección NW y NE respectivamente. Presentan estructuras de colapso con depósitos de avalancha, sobre los cuales está construido el Cementerio Jardines del Recuerdo.

Volcán El Jaral

Está compuesto de varios flujos de lavas color gris oscuro, masivas, de color gris muy clara, con apariencia terrosa. La roca presenta textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, piroxenos y algunos anfíboles, se clasifica como andesita porfídica. Su estructura fue afectada por un colapso parcial del edificio en la parte W.

Volcán El Picacho

Localizado al NW de la zona de estudio, está compuesto por derrames de lava andesítica, con textura porfirítica fina, color gris oscuro, fenocristales de plagioclasa y piroxenos; se clasifica como pórfido andesítico. Localmente existen estructuras de flujo de 2 a 10 cm de espesor. Se trata de una estructura compuesta por varios flujos o derrames de lava y se encuentra afectado por un colapso en la parte NW.

Domo María Auxiliadora

Constituido por lavas de color rosa, con textura porfídica, en ocasiones afanítica, con fenocristales de plagioclasa, cuarzo y máficos; se clasifica como pórfido dacítico. El domo está alargado hacia la parte norte.

Volcán Pico Tres Padres

Esta estructura volcánica está constituida por lavas de color gris oscuro, textura porfídica, fenocristales de cuarzo, piroxenos y plagioclasas; se clasifica como pórfido andesítico. Hacia la base en el sector N, afloran secuencias de lahares con espesores de hasta 10 m. Se caracteriza por presentar escarpes de falla y circos de erosión en las partes altas así como fuerte pendiente ($>45^\circ$).

Volcán Moctezuma

Constituido por flujos de lava color gris oscura, porfirítica fina con fenocristales de plagioclasa, piroxenos y algunos anfíboles embebidos en una matriz vítrea; se clasifica como andesita porfídica. En su base se encuentra constituido por flujos dacíticos color rosa y de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa y máficos; estos flujos presentan varios lóbulos orientados en dirección NE que albergan a la estructura denominada domo el Tejocote. En su parte más alta el volcán forma un pico con un altura de 2 960 m.s.n.m.

Domo El Tejocote

Constituido por lavas de composición dacítica, color rosa, textura porfídica, con fenocristales de cuarzo y plagioclasa, orientados en una textura de flujo; se clasifica como pórfido dacítico. El domo está orientado en dirección NE, con una altura máxima de 2,850 m.s.n.m., con diferentes lóbulos orientados hacia el W de la zona de estudio.

Volcán La Presa

Constituido por flujos de lava de composición dacítica, de color rojizo claro a rosa, textura porfídica con abundantes cristales de cuarzo, biotita y plagioclasa, clasificándose como pórfido dacítico. El volcán está conformado por varios lóbulos alargados en dirección SE y está afectado por fallas en dirección NE. La estructura principal se encuentra colapsada en dirección E.

Domo Cerro Gordo

Constituido por flujos de lava muy alterados de color rosa claro, con fenocristales de plagioclasa, anfíboles y abundante cuarzo, embebidos en una matriz félsica; se clasifica como pórfido dacítico. La parte superior del domo se encuentra muy alterada y fracturada en dirección perpendicular a la estratificación. El domo tiene una altura máxima de 2,440 m.s.n.m. y está alargado en dirección E.

Domo El Chiquihuite

Está constituido por flujos de lava dacítica de color rosa, los cuales presentan textura porfídica con fenocristales de cuarzo y plagioclasa inmersos en una matriz de microcristales félsicos; se clasifica como dacita porfídica. El domo está compuesto por sucesivos derrames de lava que presentan pseudoestratificación; lo afectan fallas en dirección NE que se manifiestan como escarpes en los flancos NW y NE del domo.

IV.2.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Los primeros trabajos que describen la geología estructural de la sierra de Guadalupe son de Lozano (1968), quien considera la presencia de dos sistemas de fallas: el primero con una orientación WNW-ESE asociado con la actividad del CVTM y posiblemente sea el que originó la Sierra de Guadalupe; el segundo es posterior a la formación de la Sierra de Guadalupe y el mejor definido, con una orientación NE 30°-45°, al que pertenecen las fallas Tenayuca y Chiquihuite. Mooser (1975) propone la “fosa de Cuatepec” la cual está delimitada por dos fallas con orientación NE-SW. Sin embargo existe otra orientación E-W que divide a la sierra prácticamente en dos.

En campo se reconocieron principalmente tres sistemas de fallas (SEGEOMET, 2003): el primer sistema presenta una orientación N-S, sobre el cual se observan una serie de fosas y pilares tectónicos y localmente se caracteriza por pequeñas zonas de cizalla, que indican un movimiento normal. De acuerdo a las relaciones estructurales y estratigráficas se considera a este sistema como el más antiguo.

El segundo sistema de fallas y fracturas afecta a toda la Cuenca de México; su orientación es NE-SW y entre las fallas más importantes pertenecientes a este sistema están las fallas Tenayuca y Chiquihuite, las cuales definen una de las estructuras más prominente de este sistema que es la fosa de Cuatepec.

La falla Tenayuca fue descrita por Mooser en 1992 y está localizada en la parte central de la Sierra de Guadalupe, la cual se reconoce desde el cerro El Tenayo hasta el oeste del cerro María Auxiliadora, abarcando una longitud de 6 km.

La falla Tenayuca tienen una orientación de N 35° E y un fuerte buzamiento hacia el SE. Es una falla discontinua con intervalos más o menos largos, separados entre sí por zonas de relevo como es el caso entre el cerro El Tenayo y el cerro Chalma de Guadalupe. Se reconoce morfológicamente por tener un fuerte escarpe caracterizado por abundantes zonas inestables a lo largo de éste. Sobre los planos de falla presenta estrías, harina de falla, brecha de falla y abundante fracturamiento; el evento más joven está representado por estrías de falla vertical y escalones que indican un *sentido de movimiento normal con fuerte buzamiento*.

La falla Chiquihuite, descrita inicialmente por Mooser (1992), se trata de una falla que también se localiza en la parte central de la Sierra de Guadalupe y se prolonga desde el cerro El Chiquihuite, lugar de donde toma su nombre, hasta las inmediaciones del Municipio de Coacalco y Ecatepec, alcanzando una longitud cercana a los 6 km; es paralela a la falla Tenayuca y por lo tanto tiene una orientación de N 35° E con un buzamiento de 70° al NW, formando conjuntamente la Fosa de Cuauhtepic. Esta falla se caracteriza por ser continua y se reconoce por el alineamiento de un conjunto de domos y por cortar estructuras volcánicas a través de un escarpe continuo y pronunciado. Sobre los planos de falla se reconocen únicamente estrías de falla vertical que indican un *sentido de movimiento normal*. Está asociada a una de las zonas más activas por volteo de rocas en la Sierra de Guadalupe, que es el cerro del Chiquihuite.

Asímismo se describe como falla Tlalayotes (SEGEOMET,2003) a una estructura secundaria que une a las fallas Tenayuca y Chiquihuite con un ángulo de 50° aproximadamente y una longitud 3.5 km. La orientación de la falla es N 22° W, con un fuerte buzamiento hacia el SW, presenta un escarpe continuo y pronunciado.

El tercer sistema de fallas y fracturas tiene una orientación E-W, afecta a rocas jóvenes, por lo que se considera el más reciente y también se caracteriza por la presencia de harina de falla, brechas y estructuras sigmoidales. Las fallas más importantes de este sistema son las fallas La Quebrada y Tlayacampa.

Se da el nombre de falla La Quebrada a una estructura lineal localizada al noroeste de la Sierra de Guadalupe (SEGEOMET,2003). Presenta una longitud aproximada de 8 kilómetros, con una orientación ENE y con un buzamiento cerca de los 70° hacia el SE. Esta zona de falla tiene abundantes indicadores cinemáticos como: estrías verticales, estructuras sigmoides, brecha y harina de falla y desplazamientos de horizontes estratigráficos, los cuales indican un *sentido de movimiento normal*. Forma parte de la Fosa de Barrientos y presenta elementos que se prolongan hacia la Sierra de Guadalupe, teniendo la mejor expresión en el Cerro María Auxiliadora.

La falla Tlayacampa se localiza al oeste de la Sierra de Guadalupe y es paralela a la falla La Quebrada, formando ambas la Fosa de Barrientos. Tiene una longitud

aproximada de 8 km, y es casi paralela a la falla de La Quebrada, pero con un sentido de buzamiento hacia el NW. En el cerro Tlayacampa presenta un escarpe bien desarrollado. En general se trata de una falla discontinua, formada por segmentos de 0.5 a 3 km, con zonas de relevo entre ellos. Los indicadores cinemáticos que se encontraron en el cerro Tlayacampa, son principalmente de fracturamiento vertical, estructuras sigmoides y estrías verticales que indican un *sentido de movimiento normal*.

Estos tres sistemas de fallas y fracturas presentan indicios de actividad a través del tiempo.

IV.3 SISMICIDAD

Sismicidad regional.

La actividad sísmica regional es resultado de la subducción de las placas oceánicas Cocos y Rivera, debajo de la placa continental de Norteamérica, a lo largo de la costa del Pacífico; se generan sismos de magnitud $M > 7$ grados Richter. Asimismo se generan sismos de esta magnitud en la parte continental, a profundidades mayores a 40 km, relacionados con fallas activas (Fausto M, 2002).

Sismicidad local.

Los temblores que se sienten en la Ciudad de México generalmente se atribuyen a sismos que ocurren a lo largo de la costa del Pacífico. Sin embargo, los registros sismológicos muestran que la Cuenca de México, e incluso la misma Ciudad de México, acusa una actividad sísmica local, la cual está relacionada con la estructura geológica de la misma cuenca (De Cserna, 1988).

Asimismo existe actividad sísmica de baja magnitud y con focos a profundidades no mayores de 5 km asociada al cambio en el estado de esfuerzos como resultado de la filtración del agua a través de las fallas y fracturas como es el caso de la Sierra de las Cruces (Alberro, 1991).

Se han detectado zonas de recurrencia sísmica dentro de la Cuenca de México así como sus posibles ciclos de retorno (Tabla IV.4).

Región	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Año del evento (magnitud y profundidad)	Periodo de recurrencia (años promedio)
Chapultepec	19,4	99,25	1924 (6 - ND), 1981 (3,3 - 4 km)	57
Cuautitlán	19,7	99,2	1961 (1 - 33km) 1983 (2,4 - 10 km)	22
Chichinautzin	19,33	99,21	1977 (<1 - 5 km) 1991 (<1 - 5 km)	14
Centro	19,37	99,07	1974 (<1 - 5 km) 1977 (<1 - 33 km) 1978 (4 - 33 km) 1994 (<1 - 5 km)	<20
Sierra de Guadalupe	19,56	99,45	1970 (4,4 - 33 km) 1978 (3 - 33 km) 1985 (4,2 - 10 km) 1991 (5,3 - 10 km)	7

Tabla IV.4 Localidad, magnitud y año de ocurrencia de sismos generados dentro de la cuenca entre 1924 y 1955 y sus periodos de recurrencia. (Fausto M, 2002).

Se aprecia que la región de la sierra de Guadalupe es la de mayor recurrencia, con intervalos cortos de tiempo: 7 años. Los sismos que se generan en esta región destacan por su intensidad, de hasta $M = 5,3$ grados Richter. En los análisis de estabilidad se hará hincapié en la influencia de los sismos en los taludes.

V. PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS

Los tipos de movimientos de taludes en rocas pueden tener diferentes configuraciones y mecanismos de falla, involucrar una gran variedad de materiales y pueden ser activados por varios fenómenos. Los taludes rocosos generalmente se presentan como macizos afectados por discontinuidades que constituyen arreglos regulares o irregulares, constituidos por bloques de diferentes dimensiones y formas que definen la estructura interna del macizo (Gaziev, 1984).

Las masas rocosas generalmente son afectadas por discontinuidades o superficies de debilidad que separan bloques de roca intacta, constituyendo en su conjunto los macizos rocosos.

Es conveniente aclarar los términos de discontinuidad, roca intacta y macizo rocoso.

- *Discontinuidad.* Es el término general para designar cualquier superficie en una masa rocosa que tiene resistencia a la tensión nula y que separa a los bloques de roca intacta dentro de un macizo rocoso.
- *Roca intacta:* se refiere a la mezcla consolidada y cementada de partículas minerales que forman los bloques dentro de las discontinuidades del macizo rocoso.
- *Macizo rocoso.* Es el conjunto de bloques de roca intacta y de las discontinuidades de diverso tipo que afectan a la masa rocosa. Es la roca tal y como se encuentra en el sitio y en un estado discontinuo debido a la presencia de sistemas de rasgos estructurales tales como fracturas o planos de estratificación.

Las discontinuidades generalmente se presentan agrupadas en familias, caracterizadas por valores medios representativos de orientación y características físicas. Ciertas discontinuidades de la masa son visibles directamente (fallas, fracturas) dando al macizo rocoso la apariencia de un amontonamiento de bloques más o menos regulares y de aspecto monolítico (Marsal y Reséndiz, 1983) (Fig V.1.) La orientación relativa, el espaciamiento y las intersecciones de las diferentes familias de discontinuidades de un macizo rocoso, definen la forma y tamaño de los bloques, constituyendo la estructura del macizo rocoso (Gaziev, 1984). La falla en los taludes rocosos generalmente está asociada a movimientos a través de las discontinuidades.

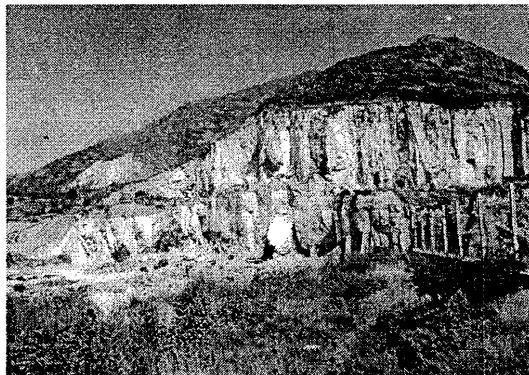


Fig. V.1. Aspecto discontinuo de un macizo rocoso. Mina en Chalma de Guadalupe.

V.1 CLASIFICACIÓN DE PROCESOS DE INESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS

La terminología que se usa en este trabajo, aplicada a la Sierra de Guadalupe, se describe a continuación (Hutchinson, 1996, González, 2002):

- **Reptación.** Son movimientos del talud extremadamente lentos, perceptibles sólo durante periodos largos de medición. La reptación se manifiesta por una inclinación de los árboles, postes y elementos similares así como por agrietamientos, escalonamientos, rotura de muros y cualesquiera estructura longitudinal que exista en el lugar.
- **Deslizamientos.** Son movimientos relativamente rápidos del talud en los cuales la masa de roca se mueve a través de una o más superficies bien definidas y que definen la geometría del deslizamiento.

1. Deslizamiento rotacional. La falla se presenta por corte a través de una superficie de falla curva. Se presenta en rocas con fracturamiento denso y aleatorio y/o muy alteradas. Fig. V.2.

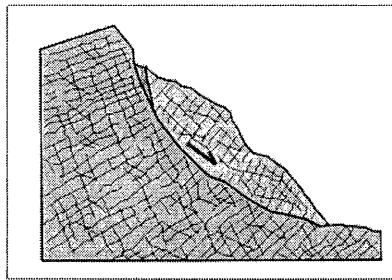


Fig. V.2 Deslizamiento rotacional en rocas.

2. Deslizamiento traslacional. La falla se presenta por corte a través de una superficie relativamente plana. Por los rasgos estructurales que afectan a las rocas conviene hacer una sub-clasificación de este tipo de deslizamientos:

2.1 Deslizamientos planos de roca (Fig. V.3). Son movimientos traslacionales de masas monolíticas de roca que se presentan en superficies planas formadas por discontinuidades que pueden estar rellenas de materiales arcillosos.

2.2 Deslizamientos en cuña (Fig. V.4). Se refiere a la falla que se presenta en masas rocosas en las cuales el deslizamiento se desarrolla sobre la línea de intersección de dos discontinuidades planas.

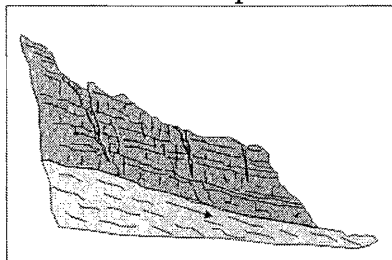


Fig. V.3. Deslizamiento de bloques de roca sobre una superficie plana

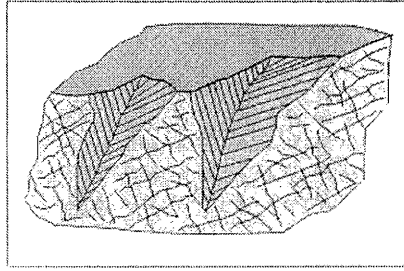


Fig. V.4. Deslizamiento en cuña

3. Deslizamiento de detritos. Estos deslizamientos afectan a los detritos que conforman la capa superficial en los taludes.

□ **Movimientos de detritos en forma de flujo (Fig. V.5).**

1. Flujo de detritos. Son movimientos rápidos a muy rápidos de detritos húmedos o con alto grado de saturación. Esta forma destructiva de falla del talud está asociada a zonas montañosas donde una precipitación puede movilizar los detritos del manto e incorporarlos en un flujo. El material involucrado puede ser detritos de roca alterada o acumulaciones de material de escombros.

2. Avalancha. Son flujos extremadamente rápidos de detritos secos. Algunos deslizamientos o caídas de roca de gran magnitud se pueden convertir en avalanchas.

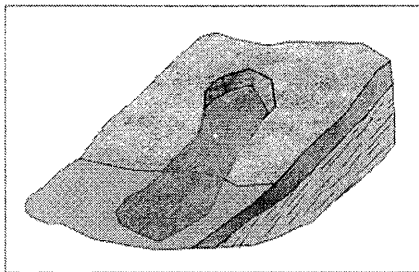


Fig. V.5. Forma típica de un flujo.

- **Volteos.** Este tipo de falla ocurre cuando la resultante de las fuerzas aplicadas a un bloque cae fuera del tercio medio en la base del mismo. El giro o volteo se produce alrededor de un punto pivote. Este tipo de falla es común en masas rocosas con discontinuidades casi verticales.

Otros tipos de inestabilidad asociados al volteo son (Hoek y Bray, 1996):

1. Volteo con flexión (Fig. V.6). Se presenta cuando un sistema de discontinuidades orientado subverticalmente y con echado en contra del talud, delimita capas o columnas semicontinuas, donde la fuerza del peso induce un momento y los bloques tienden a flexionarse. Este mecanismo de falla puede ser inducido por erosión o excavaciones en el pie del talud.

2. Volteo de bloques (Fig. V.7). Este mecanismo de falla ocurre cuando se trata de bloques singulares que son divididos por discontinuidades muy espaciadas y con gran apertura.

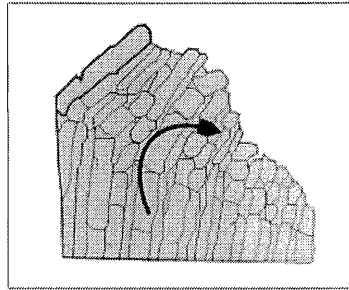


Fig. V.6. Volteo con flexión.

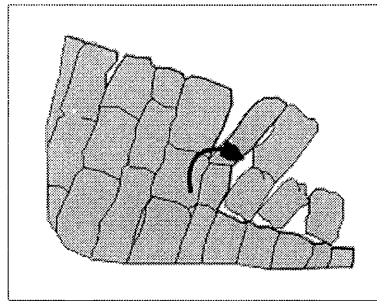


Fig. V.7. Volteo de bloques.

- **Caídos.** Comprende el descenso rápido y libre de bloques de roca con tamaño y forma variable, de taludes con fuerte pendiente, de acantilados. El movimiento puede incluir deslizamiento, rodamiento, rebotes y caída libre.

1. **Primarios o desprendimiento (Fig. V.8).** Involucra material fresco que se ha separado del talud.

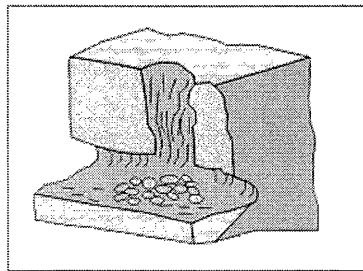


Fig. V.8. Caída libre de rocas.

2. **Secundarios o rodamiento. (Fig. VI.9).** Involucra material disgregado, que ha quedado como un residuo del primario.

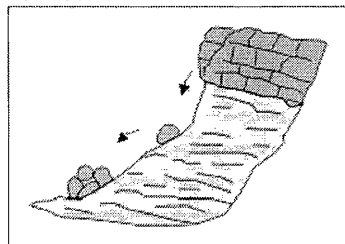


Fig. V.9. Rodamiento de rocas.

Movimientos complejos. Se refiere a la combinación de dos o más mecanismos de falla.

V.1.1 CONDICIONES REQUERIDAS PARA LA FALLA POR DESLIZAMIENTO

Para que ocurra un deslizamiento sobre un solo plano, es preciso que se satisfagan las siguientes condiciones geométricas (Hoek y Bray, 1996):

- El plano sobre el cual ocurre el deslizamiento debe tener por fuerza un echado paralelo o casi paralelo (dentro de aproximadamente $\pm 20^\circ$) a la cara del talud.
- El plano de falla tiene por fuerza que aflorar en la cara del talud. Si el echado del plano de falla es α y el del talud es β , se debe cumplir $\beta > \alpha$.
- El echado del plano de falla debe ser mayor que el ángulo de fricción en dicho plano, esto es, $\alpha > \phi$.

Si se trata de una falla en cuña limitada por dos planos, entonces el ángulo α se refiere a la inclinación de la línea de intersección.

V.1.2 CONDICIONES REQUERIDAS PARA LA FALLA POR VOLTEO

Las condiciones más sencillas que propician un volteo se pueden deducir con el modelo de un bloque que descansa sobre un plano inclinado. En este caso, la forma del bloque es tan importante como su peso. La forma se define por la altura H y por el ancho B , el peso por W y α es el ángulo de inclinación del plano, como se ilustra en la figura V.10.

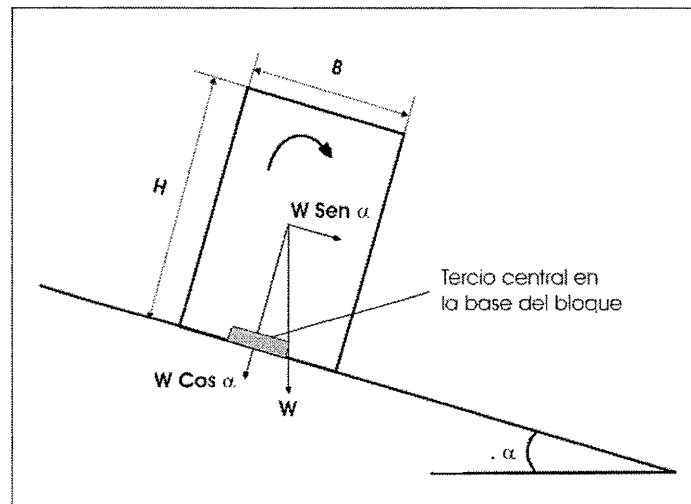


Fig. V.10 Configuración geométrica de un bloque en un plano inclinado.

El volteo lo determina la posición del vector peso con relación a la base del bloque. Si el vector peso, que normalmente pasa por el centro de gravedad del bloque, llegara a caer fuera del tercio central de la base, causaría un volteo. Los taludes muy escarpados y fracturados verticalmente muestran claras señales por volteo.

V.2 FACTORES DESENCADENANTES DE PROCESOS DE INESTABILIDAD DE TALUDES

Existen diversas condiciones, activas o pasivas, que intervienen en los procesos de inestabilidad de los taludes (Herrera, 2002). En la cartografía de los peligros se están marcando los agentes detonantes más importantes, ya que muchos de ellos son debido a agentes antrópicos y su influencia se puede evitar.

Los factores que potencialmente pueden inducir inestabilidad en los taludes se pueden agrupar en cuatro categorías:

- 1) Características y condiciones geológicas del terreno
- 2) Procesos de tipo geomorfológico
- 3) Procesos de origen químico, físico y biológico.
- 4) Procesos de origen humano o antrópicos.

Por lo general las causas de un movimiento de ladera son el producto de varios de estos factores. Con base en la forma en que actúan, se pueden distinguir entre factores antecedentes y factores iniciadores o detonantes del movimiento. Los factores antecedentes hacen que una ladera sea susceptible a la falla reduciendo su grado de seguridad a un valor marginal, mientras que los factores detonantes dan inicio al movimiento (Herrera, 2002)

1.- Características y condiciones geológicas del terreno

Litológicas: Presencia de formaciones suaves o de baja resistencia, material alterado, cizallado o fracturado.

Estratigráficas: Presencia de capas masivas descansando sobre capas poco competentes, presencia de capas permeables, contraste de rigidez de los materiales.

Estructurales: Echados de discontinuidades muy inclinados, roca fuertemente fracturada o cizallada debido a: fallamiento, plegamiento, enfriamiento y esfuerzos por deformación interna causada por erosión rápida o excavaciones a cielo abierto.

Topográficas: Acantilados o fuertes pendientes causados por erosión y/o fallamiento. Estas características son de tipo antecedente.

2.- Procesos de tipo geomorfológico

Son los procesos que actúan en el modelado de la corteza terrestre y que a través del tiempo producen cambios en el estado de equilibrio de las laderas.

Procesos endógenos:

Fenómenos tectónicos y volcánicos

Procesos exógenos:

Erosión fluvial, erosión subterránea

Remoción de la vegetación por erosión, incendio o sequía

Depósito de materiales en forma natural sobre la cresta de taludes

Estos procesos pueden ser de tipo antecedente y también detonadores.

3.- Procesos de origen químico, físico y biológico

Estos procesos inducen condiciones desfavorables en el equilibrio mediante el incremento de los esfuerzos actuantes en el terreno o reduciendo algunas veces los esfuerzos resistentes del mismo. El clima y la sismicidad son los principales procesos.

Meteorización de las rocas

Lluvia intensa en lapsos cortos

Precipitación prolongada

Sismos

Contracción y expansión de suelo en discontinuidades

Crecimiento de raíces en discontinuidades

Congelamiento de agua en discontinuidades

Estos procesos pueden ser de tipo antecedente y también detonante.

4.- Procesos de origen humano o antrópicos.

Son las actividades que realiza el ser humano y que afectan las condiciones de estabilidad de una ladera.

Excavación en laderas para obras civiles (caminos, viviendas, canales).

Explotación de canteras.

Sobrecarga: volteo de material de rezaga de minas, canteras, excavaciones, colocación de rellenos, sobrecarga de las viviendas y terraplenes en la corona y el cuerpo del talud.

Irrigación

Fugas de agua en tanques y líneas de conducción por mantenimiento deficiente de redes de drenaje

Deforestación

Vibraciones del terreno: perforaciones, explosiones, paso de vehículos pesados, vibraciones de maquinaria.

Creación de tiraderos con materiales muy sueltos.

Acción de cuña y palanqueo deliberado con la mano, cuñas o explosivos.

Estos procesos pueden ser de tipo antecedente y también detonante.

VI. ZONIFICACIÓN DE PELIGROS POR INESTABILIDAD DE TALUDES DE LA SIERRA DE GUADALUPE

Muchas veces los términos peligro y riesgo se manejan indistintamente, dependiendo de la persona y de la situación en que se encuentre, por lo que es conveniente aclarar la diferencia entre ambos términos.

Riesgo. Es una medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la vida, la salud, la propiedad o el ambiente.

Peligro. Se refiere al proceso de inestabilidad de un talud geométrica y mecánicamente caracterizado (Suárez, 1998).

VI.1 MECANISMOS POTENCIALES DE FALLA EN LA SIERRA DE GUADALUPE

Los principales tipos de falla se engloban en los siguientes casos particulares:

Volteo

- Falla por volteo de bloques tabulares o columnares, limitados por discontinuidades con ángulo de echado casi vertical. Es el mecanismo de falla que predomina en la región y está asociado al fallamiento regional y al emplazamiento de frentes de flujo de lava. Las trazas de las fallas que han quedado expuestas por erosión o influencia antrópica, los escarpes de falla y los frentes de flujo consisten en una alineación regular de bloques tabulares o columnares limitados por fracturas de enfriamiento, de estratificación y asociadas a los sistemas de fallas presentes.
- También existen bloques que han sido modelados por el intemperismo y que se encuentran simplemente apoyados sobre otros bloques.

Caída

- Falla por desprendimiento. Es común en cantiles o zonas donde la pendiente es abrupta. Los bloques están unidos por planos de debilidad o se encuentran separados del talud pero están apoyados o acunados con otros bloques.
- Falla por rodamiento de bloques redondeados, subredondeados o irregulares, que están separados de la masa estable.

Deslizamiento

- Falla por deslizamiento plano. Se presenta cuando el echado de las fracturas o planos de estratificación buza a favor del deslizamiento.

- Deslizamiento en cuña. Este mecanismo aparece aisladamente y se presenta cuando se intersectan dos discontinuidades y la línea de intersección aflora y tiene un echado considerable.
- Falla rotacional. La superficie de falla es curva y delimita un conjunto de bloques que pueden fallar individualmente.

Flujo de detritos

- Falla por arrastre de material detrítico, que en caso de precipitación intensa puede descender a gran velocidad en una matriz de suelo arcilloso y gravas. En ocasiones el material es de origen antrópico ya que existen tiraderos de escombros.

Reptación de laderas

- La reptación se manifiesta por una inclinación de los árboles, postes y elementos similares. Se presenta en laderas formadas por coladas de lava que no tienen apoyo al frente.

Movimientos complejos

- Se refiere a la combinación de dos o más mecanismos de falla. Generalmente es volteo combinado con deslizamiento, ya que hay bloques columnares con discontinuidades verticales pero apoyados sobre superficies inclinadas, por lo que pueden presentar ambos tipos de movimiento.

CERRO EL TENAYO

Mecanismo de falla combinado



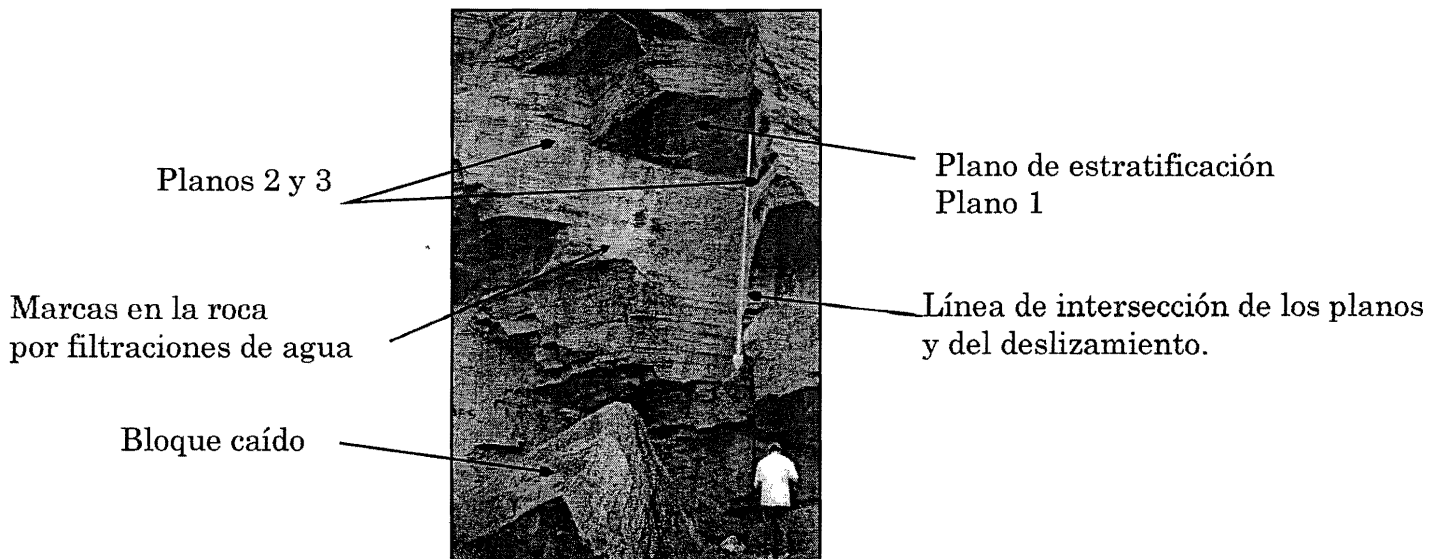
Bloques de forma columnar que forman una estructura de bloques en dominó. Altura de bloques 2 m.

Falla por caída



Ejemplos de caída por rodamiento de bloques redondeados y rectangulares.

Falla por deslizamiento en cuña



CHALMA DE GUADALUPE

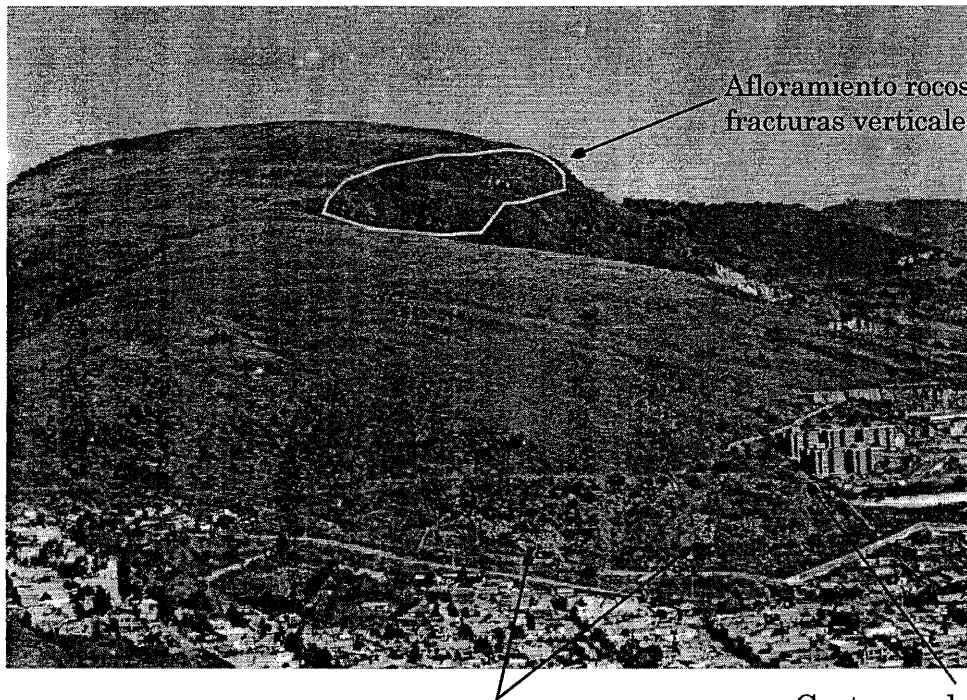
Volteo y deslizamiento



Zona de extracción de material en el Cerro Chalma donde se usan explosivos.

LOMA BONITA

Volteo

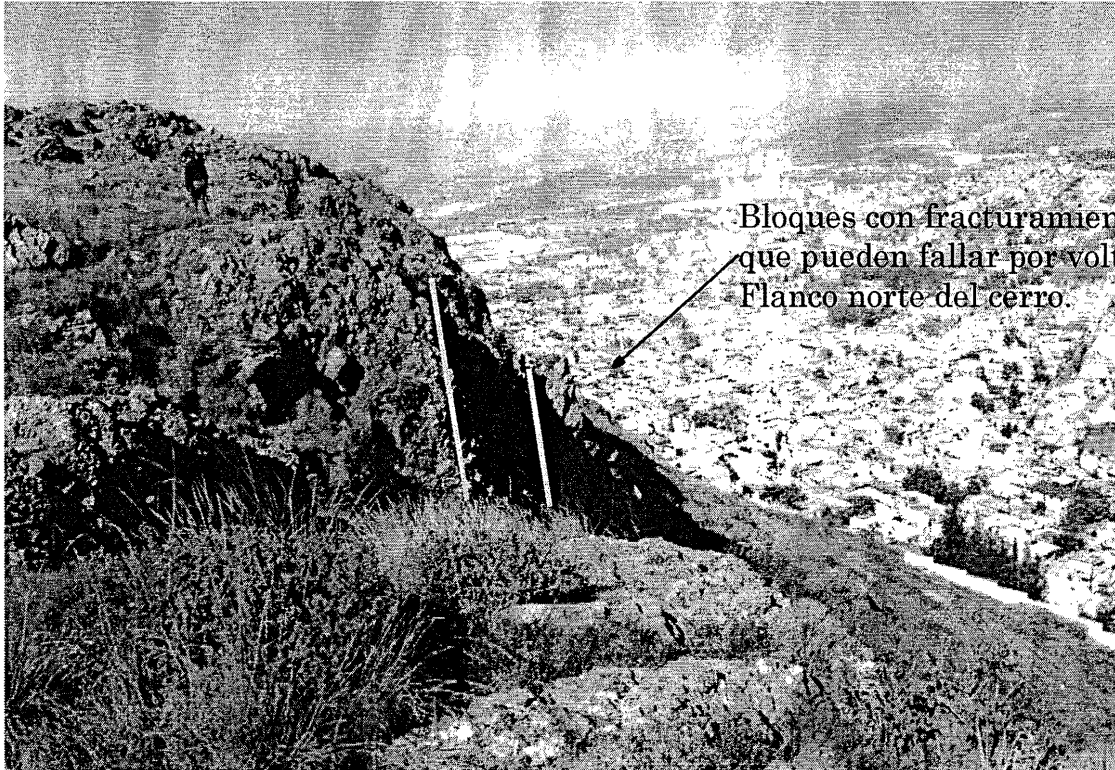


Tiraderos de escombros

Cortes en la ladera para construcción de unidades habitacionales

CERRO TLAYACAMPA

Volteo de rocas



Bloques con fracturamiento vertical
que pueden fallar por volteo.
Flanco norte del cerro.

CERRO LOMA BLANCA

Volteo y rodamiento de rocas

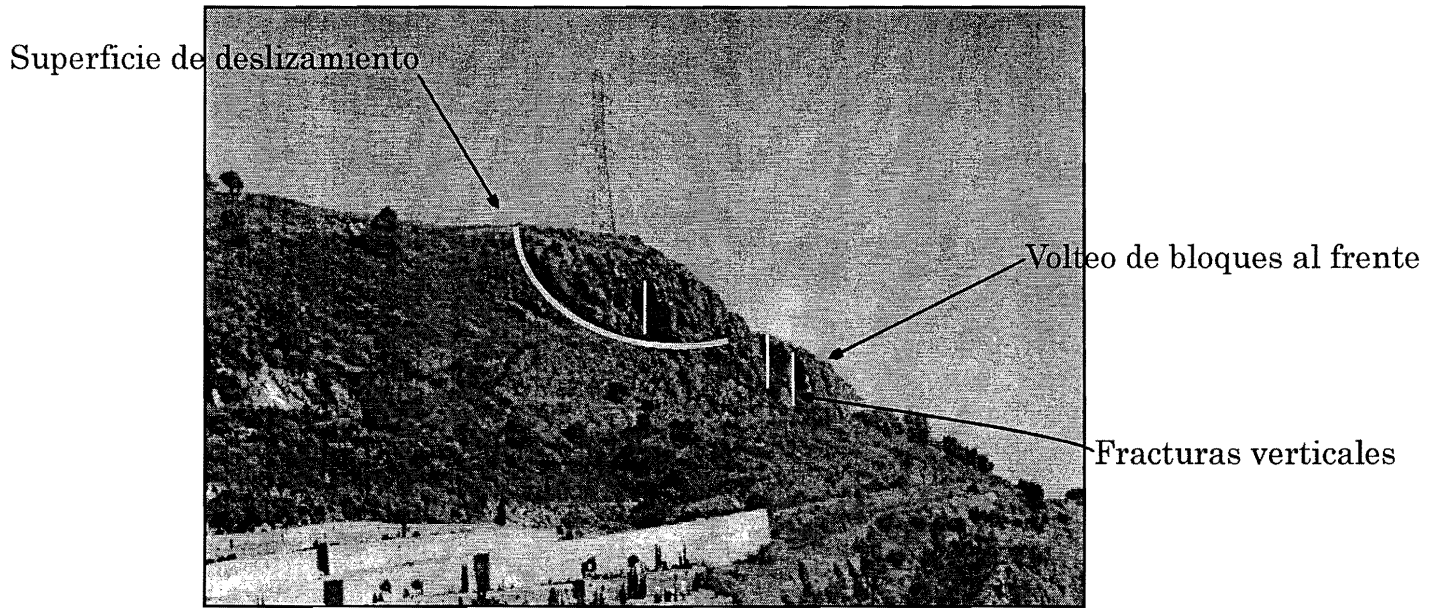
Bloques con
fracturas
verticales.



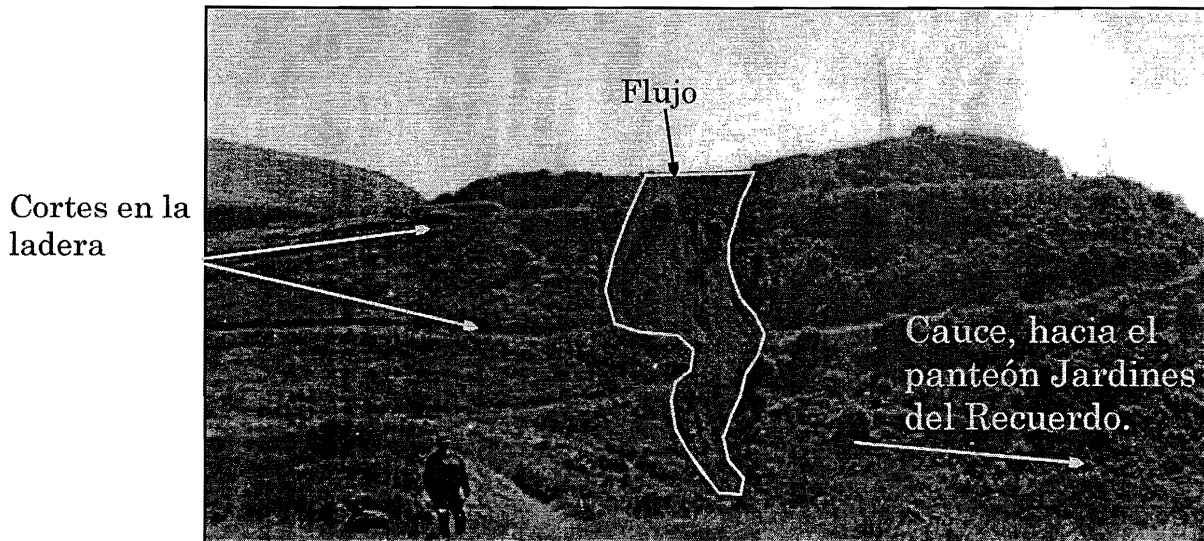
Abajo hay zonas
de rodados

CERRO LAS PEÑAS

Deslizamiento rotacional y volteo de rocas al frente

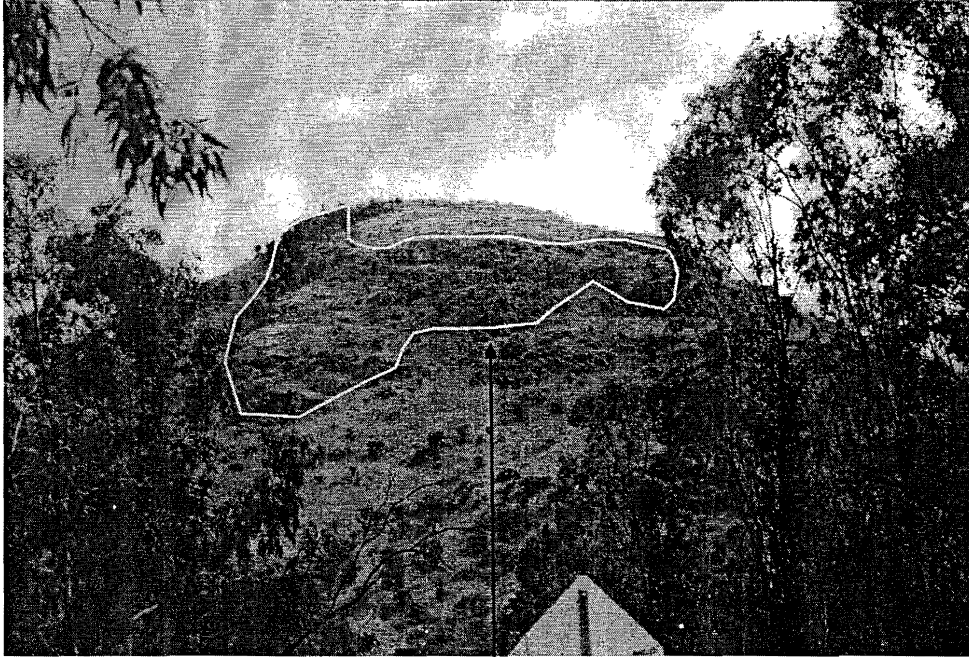


Flujos de detritos

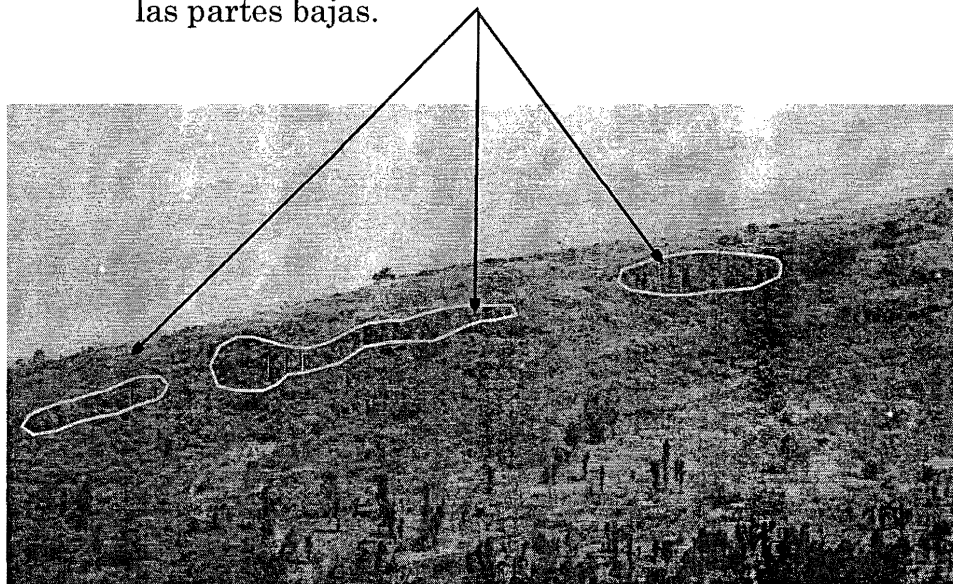


CERRO EL PICACHO

Volteo



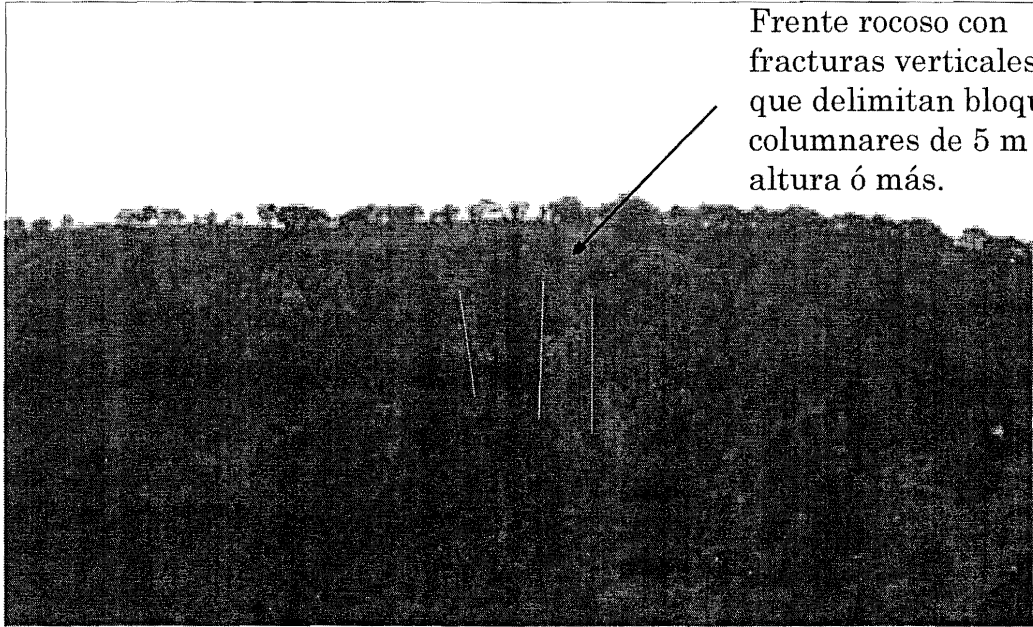
Afloramientos rocosos con fracturas verticales.
Se puede presentar volteo y rodamiento hacia
las partes bajas.



Cabecera del circo de erosión, porción NW del Cerro Picacho.

PICO TRES PADRES

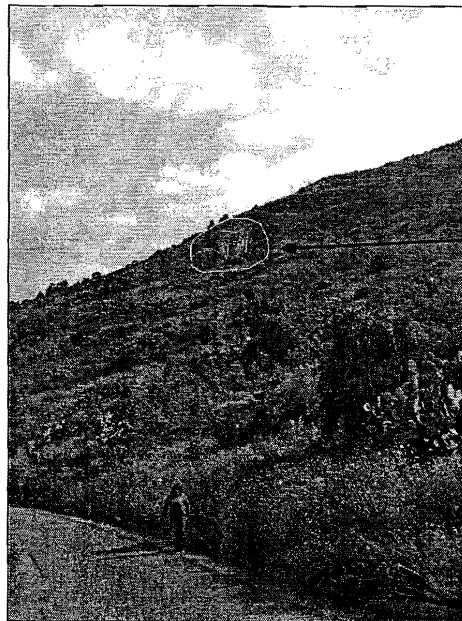
Volteo



Frente rocoso con fracturas verticales que delimitan bloques columnares de 5 m de altura ó más.

CERRO MARIA AUXILIADORA

Volteo

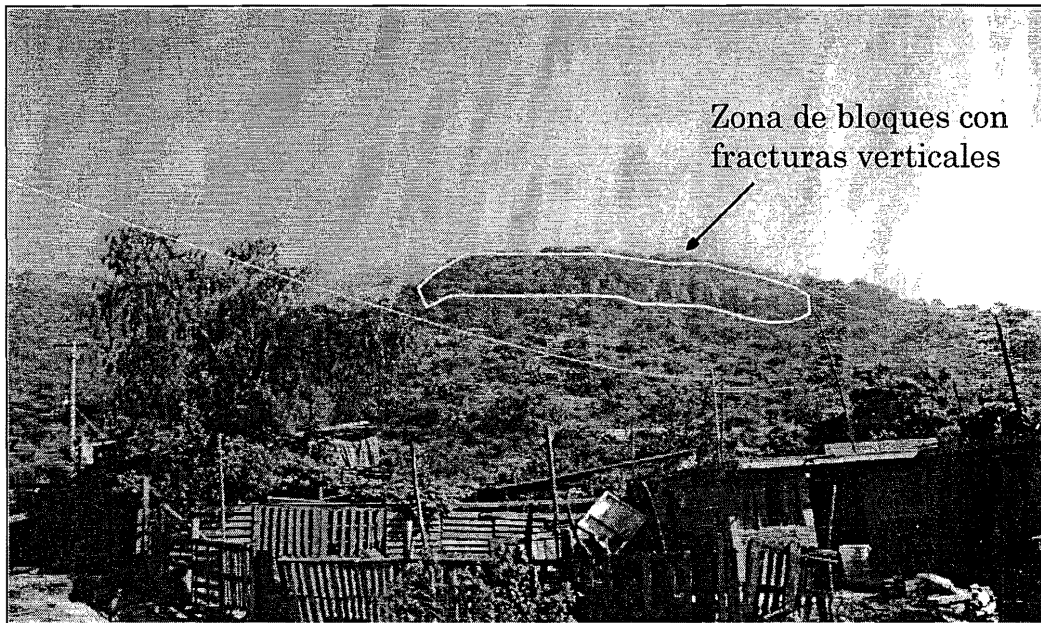


Afloramiento rocoso con fracturas subverticales. A lo largo del camino se observaron rodados.

Zona de reserva ecológica, no hay asentamientos humanos.

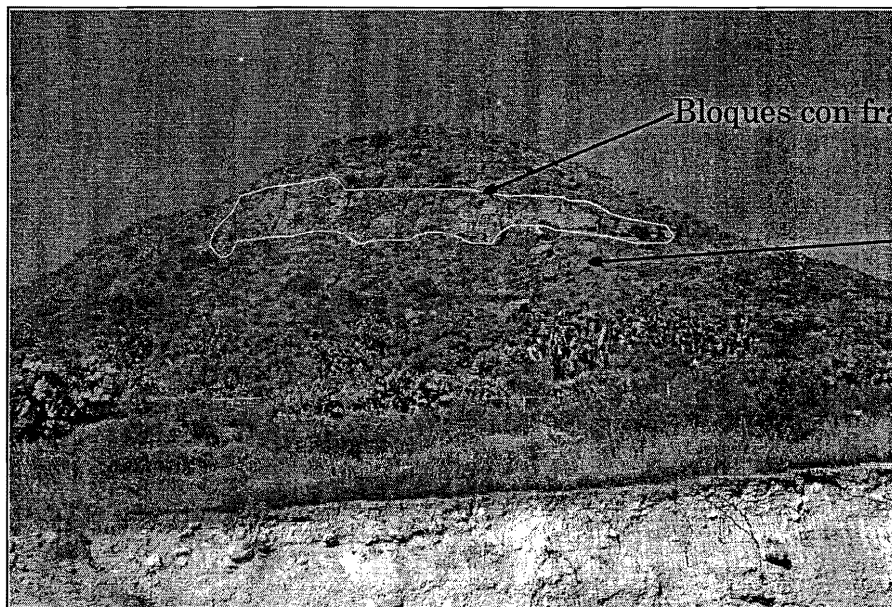
PICO MOCTEZUMA

Volteo



CERRO TEJOCOTE

Volteo y caída por rodamiento



CERRO GORDO

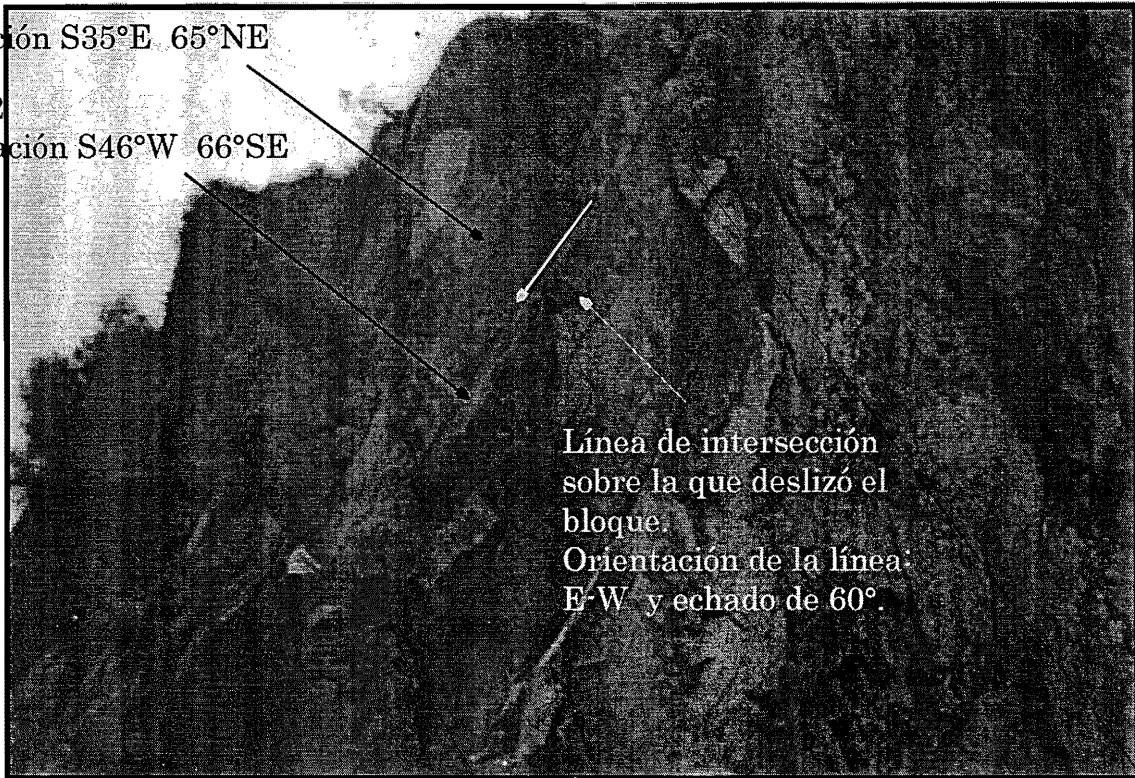
Deslizamiento en cuña

Plano 1.

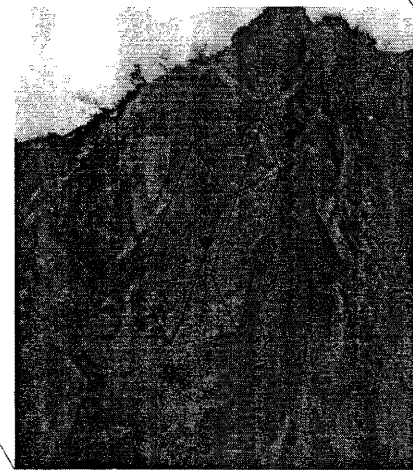
Orientación S35°E 65°NE

Plano 2

Orientación S46°W 66°SE



Línea de intersección
sobre la que deslizó el
bloque.
Orientación de la línea:
E-W y echado de 60°.

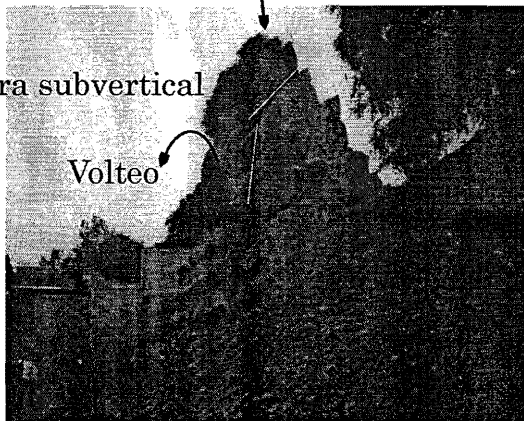


Deslizamiento y volteo

Deslizamiento plano
de un bloque

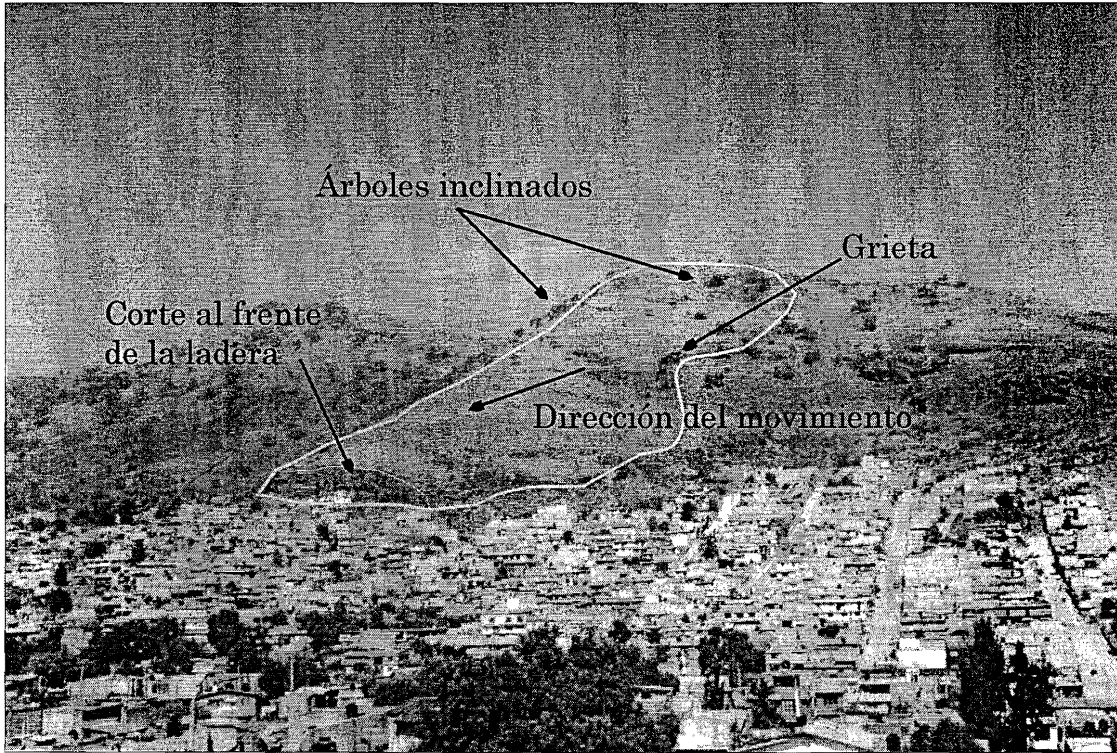
Fractura subvertical

Volteo

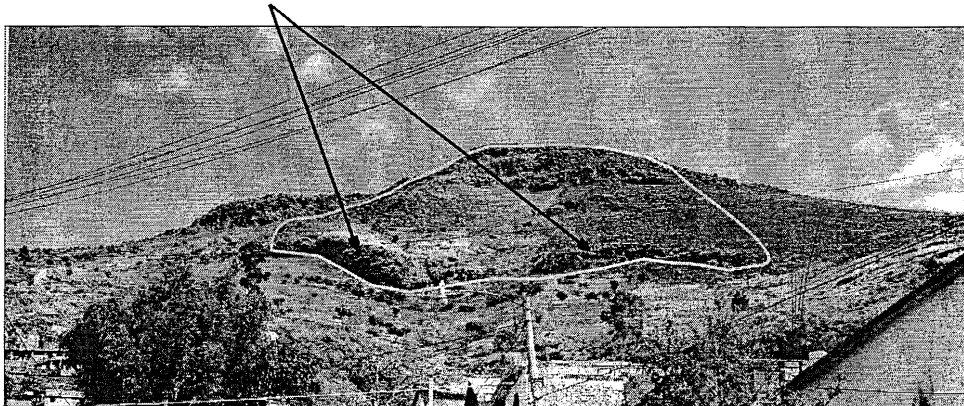


CERRO LA PRESA

Reptación



Coladas de lava sin apoyo al frente.



El movimiento se determinó observando la inclinación de los árboles.

VI.2 AGENTES DETONANTES DE LA FALLA EN LA SIERRA DE GUADALUPE

Los principales agentes detonadores que se identificaron durante los recorridos en campo son:

Precipitación pluvial. Las lluvias intensas tienen efectos desfavorables sobre la estabilidad de los taludes que conforman la Sierra de Guadalupe.

- 1) La influencia del agua básicamente no cambia el ángulo de fricción de la roca; su principal influencia es que satura las fracturas de la roca y genera presiones de poro que disminuyen el *esfuerzo normal total* al *esfuerzo normal efectivo* ($\sigma' = \sigma - u$), lo que se traduce en una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante en las discontinuidades.
- 2) La dilatación del agua contenida en fracturas debido al cambio de volumen por congelamiento induce esfuerzos en las discontinuidades.
- 3) El agua genera la degradación química y alteración de la roca al infiltrarse en las fisuras del macizo.
- 4) En bloques tabulares, el agua genera empujes que contribuyen al volteo.
- 5) El escurrimiento puede erosionar la base de bloques potencialmente inestables y propiciar la falla por rodamiento.
- 6) Las lluvias y la formación de corrientes de agua en la superficie (escorrentía superficial) favorece los procesos de erosión y de arrastre.
- 7) En los materiales tipo lahar la lluvia destruye las fuerzas capilares preexistentes.

Sismos. Este factor, junto con la precipitación pluvial intensa, es de los agentes detonadores más importantes de las fallas de taludes. Su influencia se manifiesta como una fuerza que casi siempre se considera horizontal. Actúa por periodos cortos y cambia de signo o sentido con una frecuencia que corresponde a la del sismo.

- 1) Los empujes sísmicos ejercen una fuerza que tiende a separar los bloques a través de las discontinuidades y si existen bloques que tienen condiciones de apoyo precarias el empuje sísmico induce una fuerza desequilibrante que propicia la falla.
- 2) En el caso de bloques redondeados, ubicados en zonas de fuerte pendiente, el empuje sísmico les induce una velocidad inicial (proporcional a la intensidad del sismo) con la cual tiene lugar el rodamiento de la roca.

Acción biológica. Este es un mecanismo lento que actúa básicamente por el crecimiento de raíces entre las fracturas y que predispone al talud a la falla ante la presencia de otros agentes detonantes (Fig. VI.1)

- 1) Esta influencia se manifiesta principalmente en la acción de empuje que ejerce el crecimiento de raíces de árboles entre las discontinuidades de la roca, lo que tiende a separar los bloques, a disgregarlos y en casos especiales a provocar la falla. Como este proceso es lento, generalmente actúa combinado con otros y llegado a un punto límite de equilibrio, basta la influencia instantánea de otro agente detonador (lluvia, sismo, corte del talud, vibración) para que se provoque la falla.

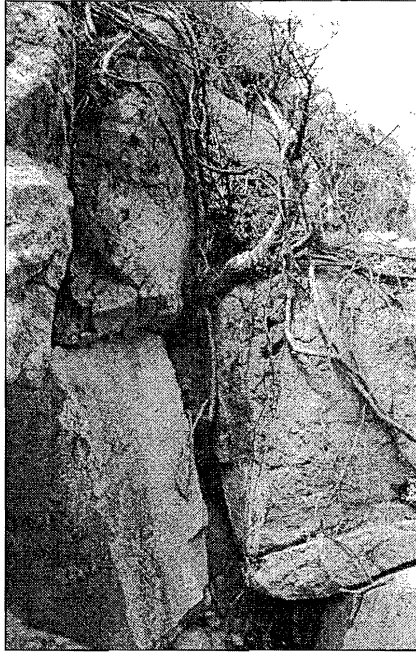


Fig. VI.1. Las raíces creciendo entre las fracturas contribuyen a separar los bloques y los predisponen a la falla.

Deforestación y quema de basura.

- 1) Existen áreas donde se generan incendios, ya sea por la quema de basura o por causas accidentales (Fig. VI.2), lo que perjudica a la vegetación no arbórea, ya que se deja al descubierto la roca más o menos alterada que vuelve a estar sujeta a procesos de infiltración, de erosión e intemperismo (Fig. VI.3).

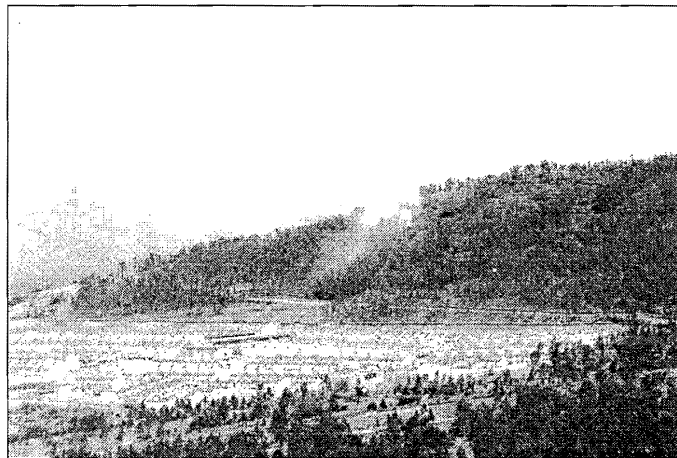


Fig. VI.2. Aspecto de un incendio en progreso en el municipio de Ecatepec.

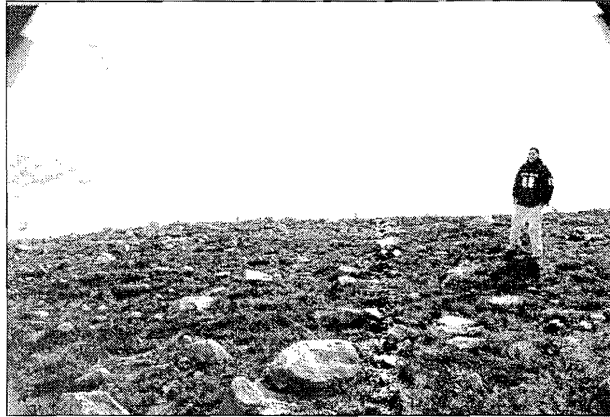


Fig. VI.3. Cerro Las Peñas, en Tlalnepantla. Aspecto después de ocurrido un incendio. Se observan los bloques que han quedado al descubierto.

Antrópicos.

- 1) Los cortes de taludes para explotación como canteras es frecuente en la Sierra de Guadalupe (Fig.VI.4). Si se realiza un corte en un talud sin conocer los sistemas de fracturamiento que pudiesen afectar su estabilidad, se puede estar induciendo la falla en bloques cuya salida natural la da el corte del talud.
- 2) La sobrecarga de las construcciones y demás obras civiles (Fig. VI.5).
- 3) Las vibraciones, sean de maquinaria, detonaciones o vehículos, inducen fuerzas que afectan la estabilidad de los taludes.

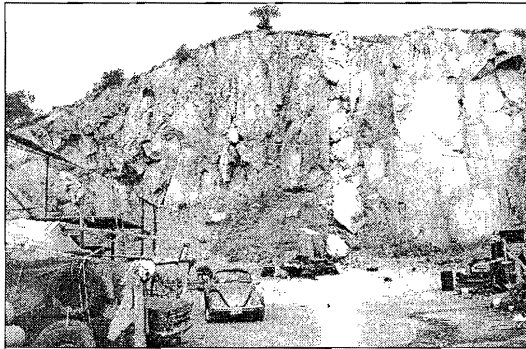


Fig. VI.4. Zona de extracción de material. En estas áreas se recomienda no construir.

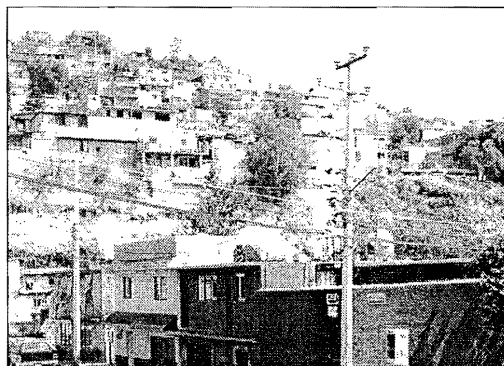


Fig. VI.5. Las construcciones inducen una fuerza permanente en los taludes.

Pérdida progresiva de la resistencia al esfuerzo cortante

- 1) Debido a grandes desplazamientos en las discontinuidades.
- 2) Por alteración de los rellenos y las asperezas de las paredes que forman las discontinuidades.

Erosión e intemperismo. Estos son procesos naturales, modificadores del relieve terrestre.

- 1) Disminuyen la resistencia al esfuerzo cortante en discontinuidades.
- 2) Aceleran los procesos de arrastre y caída de material a zonas de baja pendiente (Fig.VI.6).
- 3) En general degradan la roca alterando sus propiedades mecánicas e hidráulicas.

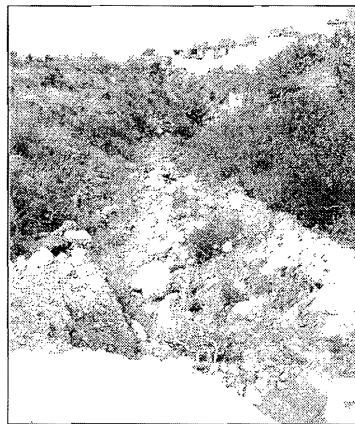


Fig. VI.6. Los detritos son canalizados a través de cauces o barrancas, pudiendo afectar a la población e infraestructura en época de grandes avenidas.

La acción de estos agentes detonadores de la falla se ejerce combinada y progresivamente hasta que se llega a un punto límite en que cualquier desequilibrio de fuerzas provoca el deslizamiento, el volteo, la caída o el flujo de rocas (generalmente el sismo o la lluvia aportan esa fuerza desequilibrante). Se describen los agentes detonadores más importantes que se identificaron.

VI.3 CARTOGRAFÍA DE PELIGROS Y MAPA DE ZONIFICACIÓN

Los mapas constituyen el método más efectivo para representar la información sobre la peligrosidad en una región y los trabajos de cartografía tienen como finalidad dividir el territorio en zonas o unidades con diferentes tipos de peligro.

Un mapa de inventarios puede incluir la localización espacial de los procesos y/o zonas afectadas, así como las características de los mismos. Por ejemplo si se trata de movimientos de ladera, se representan de forma puntual o zonal los procesos actuales, antiguos y las áreas afectadas y dependiendo del detalle, se puede indicar el tipo de movimiento, la edad, el grado de actividad, etc.

Para la cartografía de peligros se fotointerpretaron fotos aéreas escala 1: 37 500 e imágenes de satélite, donde se marcaron lineamientos de fallas y circos de erosión. Se realizó un exhaustivo trabajo en campo que consistió en la cartografía y descripción de los peligros por inestabilidad de taludes y los agentes detonantes localizados en la sierra; la descripción incluía: mecanismo potencial de falla, área aproximada, pendiente, altitud, forma de la ladera o barranca y algunas observaciones extras. Se utilizó GPS, mapas topográficos escala 1: 25 000 y fotografías para cartografiar los peligros. Estos se marcaron en los mapas topográficos acompañados de una clave (V=volteo, D=deslizamiento, C= caída, F=flujo, R=reptación) para posteriormente ser digitalizados en forma de “amibas” y etiquetados.

Los parámetros que se describieron de los macizos rocosos en afloramientos de la Sierra de Guadalupe son (ISRM,1978; SEGEOMET, 2003):

- *Número de familias de fracturamiento:* la estructura y dimensiones de bloques de un macizo rocoso están influenciados por los sistemas de fracturamiento y sus intersecciones.

Clase	Descripción
I	Masivo, fracturas ocasionales y aleatorias
II	Un sistema de fracturas
III	Un sistema más uno aleatorio
IV	Dos sistemas de fracturas
V	Dos sistemas más uno aleatorio
VI	Tres sistemas de fracturas
VII	Tres sistemas más uno aleatorio
VIII	Cuatro o más sistemas de fracturas
IX	Roca triturada, tendiendo a suelo

- *Tamaño y forma de bloques.* Este es un indicador importante del comportamiento del macizo rocoso.

Clasificación de macizos rocosos en función del tamaño y la forma de bloques		
Clase	Tipo	Descripción
I	Masivo	Pocas discontinuidades o con espaciado muy grande
II	Cúbico	Bloques aproximadamente equidimensionales
III	Tabular	Bloques con una dimensión considerablemente menor que las otras dos
IV	Columnar	Bloques con una dimensión considerablemente mayor que las otras dos
V	Irregular	Grandes variaciones en el tamaño y forma de los bloques
VI	Triturado	Macizo rocoso muy fracturado

- *Descripción de los bloques intactos entre las discontinuidades.* Se describe la forma de los bloques y a partir de observaciones de campo en afloramientos accesibles y mosaicos fotográficos, se determina el mecanismo potencial de falla.
- *Descripción de los agentes detonantes observados.* En los recorridos se describieron los factores que afectan la estabilidad de los macizos rocosos, principalmente los de origen antrópico ya que en ocasiones se pueden evitar.

La cartografía resultante de este análisis está representada en el Mapa de Zonificación de Peligros (Anexo) por “amibas”, que son las zonas de extensión de los peligros identificados y con diferente color para indicar el tipo de mecanismo de falla dominante. En total se cartografiaron cerca de 192 zonas de peligro, de las cuales en general se encuentran distribuidas de la siguiente manera (Tabla VII.7).

TIPO DE PELIGRO	IDENTIFICADOS
Caídas	58
Deslizamiento	8
Flujo	11
Volteo	82
Combinado o más de dos peligros (Volteo, caída y/o deslizamiento)	33
Total	192

Tabla VII.7

Esta tabla indica que el mayor peligro geológico existente es por volteo, le sigue la caída por rodamientos y en menor proporción los restantes. Aunque cabe señalar que seguramente existan más y estos no se lograron identificar ya sea por invasión de casas o por la vegetación, los cuales en cierta medida enmascaran estas zonas.

VII. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y TRATAMIENTOS GEOTÉCNICOS

VII.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES EN LA SIERRA DE GUADALUPE

La estabilidad de los macizos rocosos que forman las laderas de la sierra de Guadalupe está definida por los siguientes factores esenciales:

- 1) La estructura interna de los macizos rocosos, determinada por el carácter de su fracturamiento así como por la forma y dimensión de los bloques.
- 2) La resistencia al esfuerzo cortante en las discontinuidades.
- 3) La resistencia a la erosión de la base en que se apoyan bloques tabulares o sub-redondeados.
- 4) La influencia de las fuerzas actuantes en el macizo rocoso, que son el peso propio, las presiones hidrostáticas, las fuerzas de filtración (cuando existe una corriente de filtración ya sea temporal o continua), las fuerzas dinámicas debidas a empujes sísmicos o vibraciones de vehículos o maquinaria, las sobrecargas debidas a obras civiles.
- 5) La presencia de bloques que han sido separados de la masa rocosa y que están expuestos a rodar.
- 6) En zonas con alto fracturamiento se originan abundantes detritos los cuales se pueden incorporar en un flujo en caso de lluvias intensas. También se puede tratar de acumulaciones de material de escombros de origen antrópico.

VII.1 .1 INFLUENCIA DE LA SISMICIDAD

La influencia de los sismos se manifiesta como una fuerza que casi siempre se considera horizontal y queda definida como:

$$F_s = CW$$

donde W representa el peso del bloque sobre el cual se considera aplicado el empuje sísmico y la constante "C" corresponde a la proporción de la aceleración inducida por el sismo respecto a la de la gravedad g (Fig. VII.1).

El coeficiente c se obtiene de las cartas de regionalización sísmica de la Comisión Federal de Electricidad donde se presentan los valores de la aceleración horizontal máxima que puede ocurrir en un sitio y con un periodo de retorno dados (C.F.E., 1993).

De acuerdo con la zonificación sísmica de la Comisión Federal de Electricidad, la zona de estudio se encuentra en la zona B, que aproximadamente abarca toda la Cuenca.

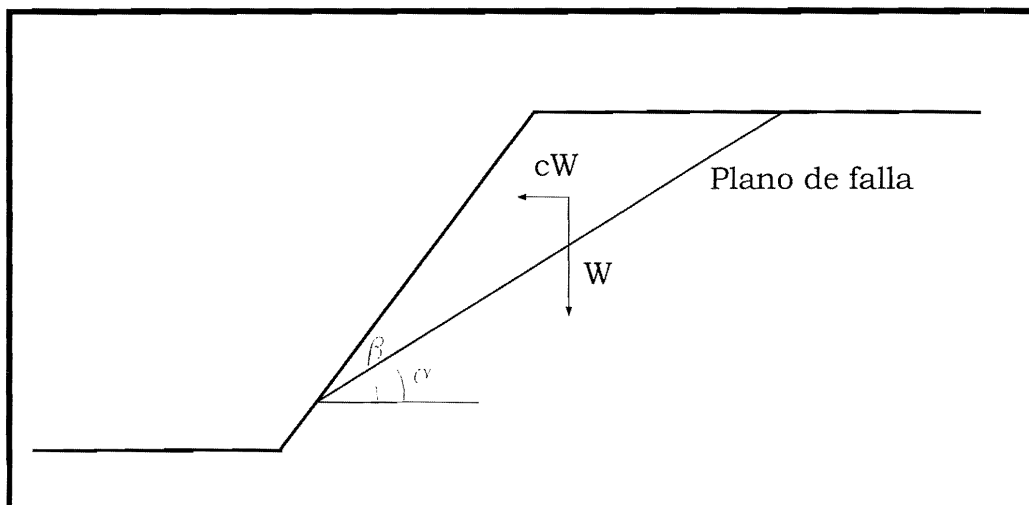


Fig.VII.1 Talud con las componentes del peso y empuje sísmico.

En la tabla VII.2, "C" representa el coeficiente sísmico básico, y en los análisis de estabilidad representativos se usará el valor de 0.16 asignado al tipo de suelo I, en vista de que se trata de terreno firme.

Zona	Suelo	C	Descripción
B	I	0.16	Terreno firme, tepetate, arenisca compacta
	II	0.20	Arenas no cementadas, arcillas de mediana rigidez
	III	0.24	Arcillas blandas muy compresibles

Tabla VII.2 Valores del coeficiente sísmico en para diferentes tipos de terreno

VII.1.2 INFLUENCIA DEL AGUA

La presencia del agua tienen efectos desfavorables sobre la estabilidad de los taludes rocosos que conforman la Sierra de Guadalupe.

- 1) La influencia del agua básicamente no cambia el ángulo de fricción de la roca; su principal influencia es que satura las fracturas de la roca y genera presiones de poro que disminuyen el *esfuerzo normal total* al *esfuerzo normal efectivo* ($\sigma' = \sigma - u$), lo que se traduce en una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante en las discontinuidades.

La ecuación para calcular la resistencia al corte es:

$$\tau_p = c + (\sigma_v - u) \tan\phi = c + (\sigma') \tan\phi$$

donde "u" es la presión hidrostática, "c" es la cohesión en la discontinuidad y "φ" es el ángulo de fricción.

- 2) La dilatación del agua contenida en fracturas debido al cambio de volumen por congelamiento induce esfuerzos en las discontinuidades.
- 3) El agua genera empujes que contribuyen al volteo y deslizamiento de bloques.
- 4) El escurrimiento puede erosionar la base de bloques potencialmente inestables y propiciar la falla por rodamiento.

Los procesos de inestabilidad de laderas generalmente están relacionados con las características hidrometeorológicas de la región. La tabla VII.3 muestra valores de precipitación para diferentes tipos de movimiento en la región de España (González, 2002).

RELACION ENTRE PRECIPITACIONES Y DESENCADENAMIENTO DE MOVIMIENTOS DE LADERA					
Tipo de movimiento	Precipitación anual en mm (P)		Precipitación en los 3-4 meses previos al movimiento (mm)		
	Total en el año previo	Media anual de la serie (entre 30 y 70 años)	Total en los meses previos	% P total del año previo	% P media anual de la serie
Deslizamientos	500 a 1000	500 a 800	300 a 500	50-60%	≤ 30%
Flujos de tierra	500 a 800	600 a 700	300 a 400	50-80%	50-60%
Flujos de derrubios	≥ 1300	1100 a 1200	350 a 650	30-50%	50-120%
Desprendimientos	250 a 700	220 a 450	100 a 250	≤ 30%	50_130%

Tabla VII.3.

En el caso de la Sierra de Guadalupe, los niveles de precipitación anual acumulada van de 600 mm a 800 mm. Estos niveles de precipitación coinciden con los del ejemplo mostrado; aunque no se cuenta con datos de intensidad, se sabe que en los meses de junio a septiembre se concentran las lluvias, por lo que es posible esperar altos niveles de precipitación durante lapsos cortos, pudiendo suponer condiciones de saturación en las discontinuidades de los macizos rocosos de la Sierra de Guadalupe.

VII.2 EJEMPLOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y TRATAMIENTOS

Se presenta un ejemplo de análisis de estabilidad para deslizamiento y volteo. Se utiliza el método de *equilibrio límite* para los análisis (Hoek y Bray, 1996).

El análisis se llevará a cabo por medio del factor de seguridad para taludes.

El factor de seguridad es la relación entre las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan a lo largo de la superficie de ruptura. La condición de equilibrio límite se cumple cuando F.S. = 1.

Se asume que la superficie de rotura presenta una geometría tal que el deslizamiento es cinemáticamente posible.

Las propiedades que son de interés para los análisis son *el peso volumétrico, el ángulo de fricción, la cohesión, la geometría del bloque, los niveles de agua estimados en las discontinuidades y el valor del coeficiente sísmico de la región.*

VII.2.1 ANÁLISIS POR DESLIZAMIENTO

Se considera un elemento de espesor unitario, sacado en ángulos rectos con respecto a la cara del talud.

El factor de seguridad se calcula de la misma manera que para el bloque en un plano inclinado. En este caso, el factor de seguridad, dado por la fuerza que se opone al deslizamiento dividida entre la fuerza que tiende a inducirlo es:

$$F = \frac{cA + (W \cdot \cos\alpha - U)\tan\phi}{W \cdot \sin\alpha}$$

donde, con base en la figura VII.4.

$$A = (H - z) / \sin\alpha$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot H_w \cdot A$$

El peso se obtiene mediante la expresión:

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\left(1 - \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right) / \tan\alpha - 1 / \tan\beta \right]$$

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD POR DESLIZAMIENTO

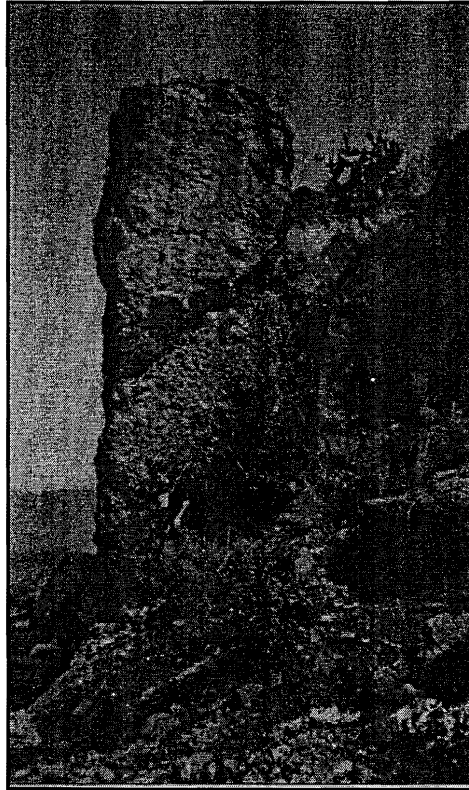
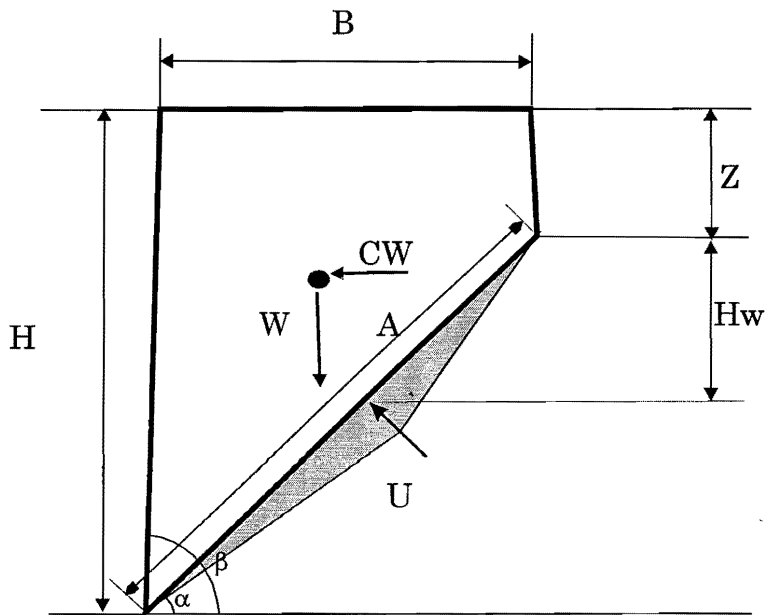


DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL
BLOQUE



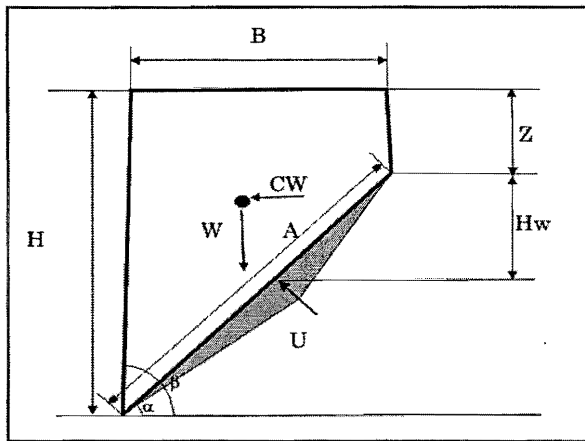
Donde:

- B: Ancho del bloque
- H: Altura del bloque
- C: Coeficiente sísmico
- W: Peso del bloque
- Z: Altura de la grieta
- Hw: Altura del agua en la superficie de deslizamiento
- A: Área de contacto
- α : Ángulo de la superficie de deslizamiento
- β : Ángulo del talud
- U: Subpresión
- CW: Fuerza sísmica

Fig. VII.4

ANÁLISIS PARA DESLIZAMIENTO

Datos:



H=	5	m
C=	0.16	
Hw=	0.7	m
c=	0	t/m ²
Z=	3.6	m
γr=	2.1	t/m ³
γw=	1	t/m ³
α=	25	Grados
β=	89	Grados
φ=	25	Grados

ANÁLISIS POR PESO PROPIO

$$F.S. = \frac{F_{res}}{F_{act}} = \frac{W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi}{W \cdot \sin \alpha} = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$$

Asumiendo que no existe cohesión, el factor de seguridad está dado por la relación entre los ángulos de fricción y de echado de la discontinuidad.

Si se supone que el bloque está en un estado de equilibrio límite, el ángulo de fricción es de por lo menos 25°. Se puede suponer que el bloque tiene un ángulo de fricción mayor o bien que existe un valor de cohesión en la discontinuidad tal que el bloque no ha fallado ante fuerzas externas, como empujes sísmicos o subpresión.

ANÁLISIS CON SUBPRESIÓN EN LA DISCONTINUIDAD, COHESIÓN c=0, φ=25°.

$$F.S. = \frac{c \cdot A + (W \cdot \cos \alpha - U) \cdot \tan \phi}{W \cdot \sin \alpha}$$

$$A = (H - z) \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \quad \text{"A" es el área de contacto de la discontinuidad}$$

A = 3.31 m²

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma_r \cdot H^2 \cdot \left(\left(1 - \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right) / \tan \alpha - 1 / \tan \beta \right)$$

W = 26.65 t

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot H_w \cdot A$$

U = 1.16 t

F.S. = ΣFres/ΣFact

ΣFres 10.72

ΣFact 11.26

FS=	0.95
-----	------

ANÁLISIS POR SISMO

$$F.S. = \frac{(W \cos \alpha - CW \sin \alpha) \cdot \tan \phi}{W \cdot \sin \alpha + CW \cos \alpha}$$

F.S. = ΣFres/ΣFact

ΣFres 10.42

ΣFact 15.12

FS=	0.69
-----	------

VII.2.1.1 SOLUCIÓN GEOTÉCNICA PARA DESLIZAMIENTO

Para este mecanismo de falla tanto el empuje sísmico como la subpresión tienen una influencia negativa en la estabilidad.

Al observar los factores de seguridad para el caso de agua y sismo, tomando el valor del ángulo de fricción supuesto, se nota que el talud es inestable.

La propuesta para estabilizar este bloque consiste en el uso de cables pasivos que rodeen el bloque y anclados en roca firme, de manera que entren en funcionamiento cuando se presenten movimientos.

La solución propuesta para este mecanismo de falla es (Fig. VII.5):

- Retiro de la arcilla que está en la grieta y tala de raíces de hierba o arbustos que estén creciendo dentro de la misma.
- Cable de torón de acero para retención de bloque. Los cables deberán rodear al bloque de manera que no exista la posibilidad de movimiento y serán sujetos en roca firme mediante anclas cortas.

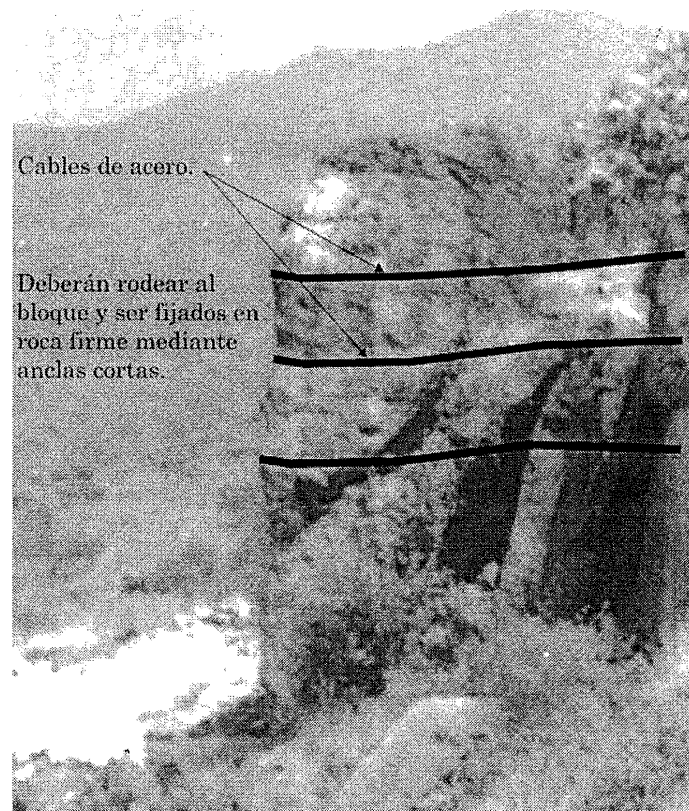


Fig. VII. 5 Tratamiento geotécnico para la falla por deslizamiento

VII.2.2 ANÁLISIS POR VOLTEO

Los taludes muy escarpados y fracturados verticalmente muestran claras señales por volteo.

El análisis por volteo se realiza haciendo una sumatoria de momentos con respecto a el punto más desfavorable, en este caso es O (ΣM_0) (figura VII. 6).

El factor de seguridad se define como:

$$F.S = \Sigma M_{res} / \Sigma M_{act}$$

Análisis por empuje hidrostático

$$F.S. = \frac{W \cdot \frac{B}{2}}{\frac{\gamma_w \cdot H_w^3}{6} + \frac{\gamma_w \cdot H_w \cdot B^2}{3}}$$

Análisis por sismo

$$F.S. = \frac{W \cdot \frac{B}{2}}{C \cdot W \cdot H}$$

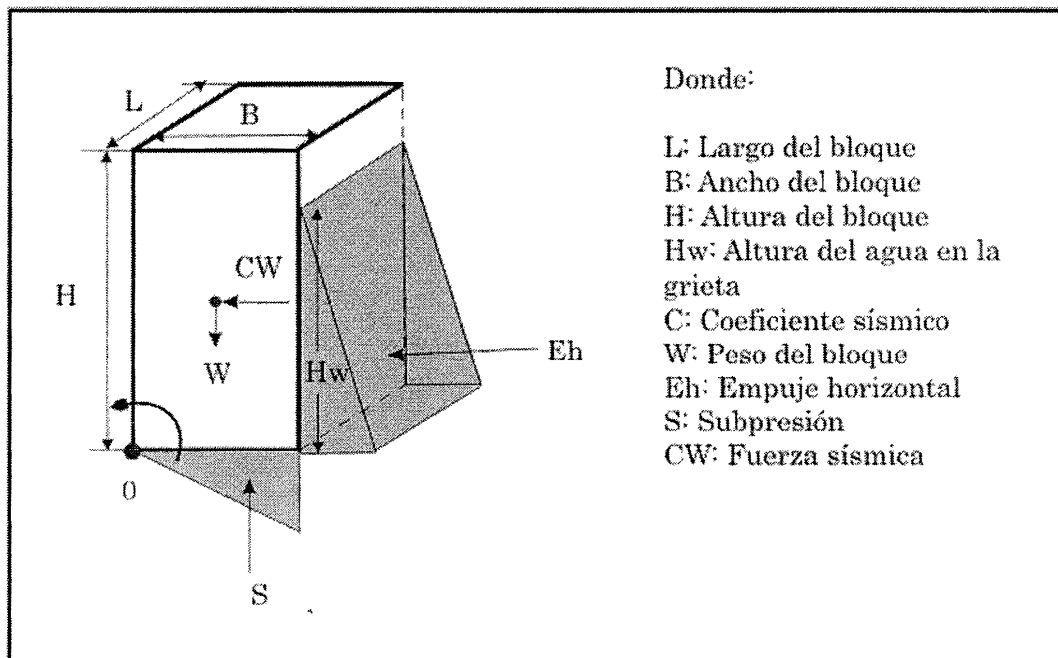


Fig. VII.6 Modelo para el análisis por volteo.

ANALISIS DE ESTABILIDAD POR VOLTEO

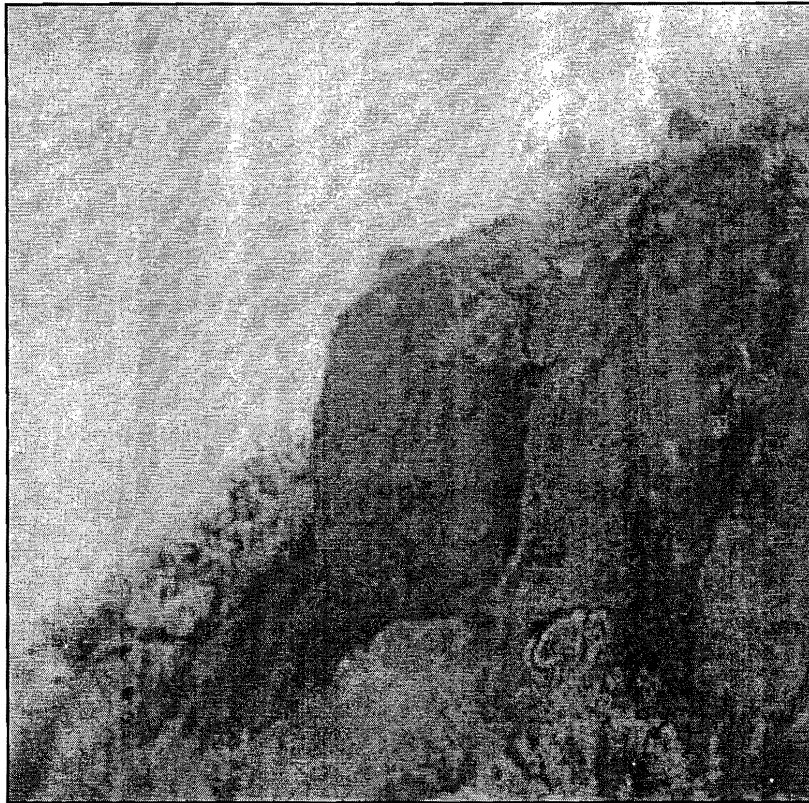
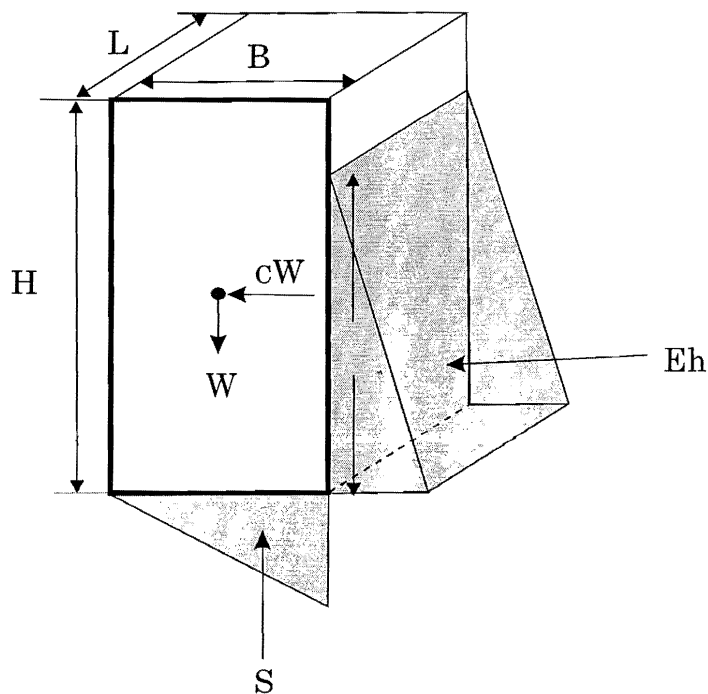


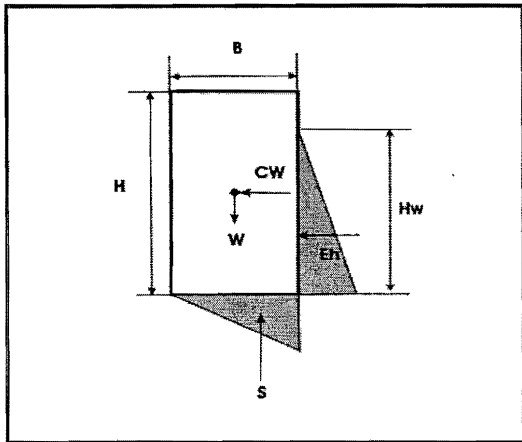
DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL BLOQUE



Donde:

- L: Largo del bloque
- B: Ancho del bloque
- H: Altura del bloque
- Hw: Altura del agua en la grieta
- W: Peso del bloque
- Eh: Empuje hidrostático
- S: Subpresión
- cW: Fuerza sísmica

ANÁLISIS PARA VOLTEO



Datos del bloque:

B=	2.5	m
H=	5	m
γ_r =	2.1	t/m ³
H _w =	0.5	m
γ_w =	1	t/m ³
W=	26.25	t/m
c=	0.16	

ANÁLISIS POR EMPUJE HIDROSTÁTICO

$$F.S. = \frac{\sum Mr}{\sum Ma}$$

Donde: F.S: Factor de seguridad
Mr: Momento resistente
Ma: Momento actuante

$$\sum Mr = W \cdot \frac{B}{2} \qquad \sum Ma = \frac{\gamma_w \cdot H_w^3}{6} + \frac{\gamma_w \cdot H_w \cdot B^2}{3}$$

$$F.S. = \frac{W \cdot \frac{B}{2}}{\frac{\gamma_w \cdot H_w^3}{6} + \frac{\gamma_w \cdot H_w \cdot B^2}{3}}$$

Para el análisis se considerarán valores de agua en la grieta desde 0.5 m hasta 5 m, que sería el caso más desfavorable al tener la grieta llena de agua, para observar su comportamiento.

Para un valor de 0.5 m se tiene el siguiente factor de seguridad.

$$H_w = 0.5 \text{ m}$$

$$\sum Mr = 32.81$$

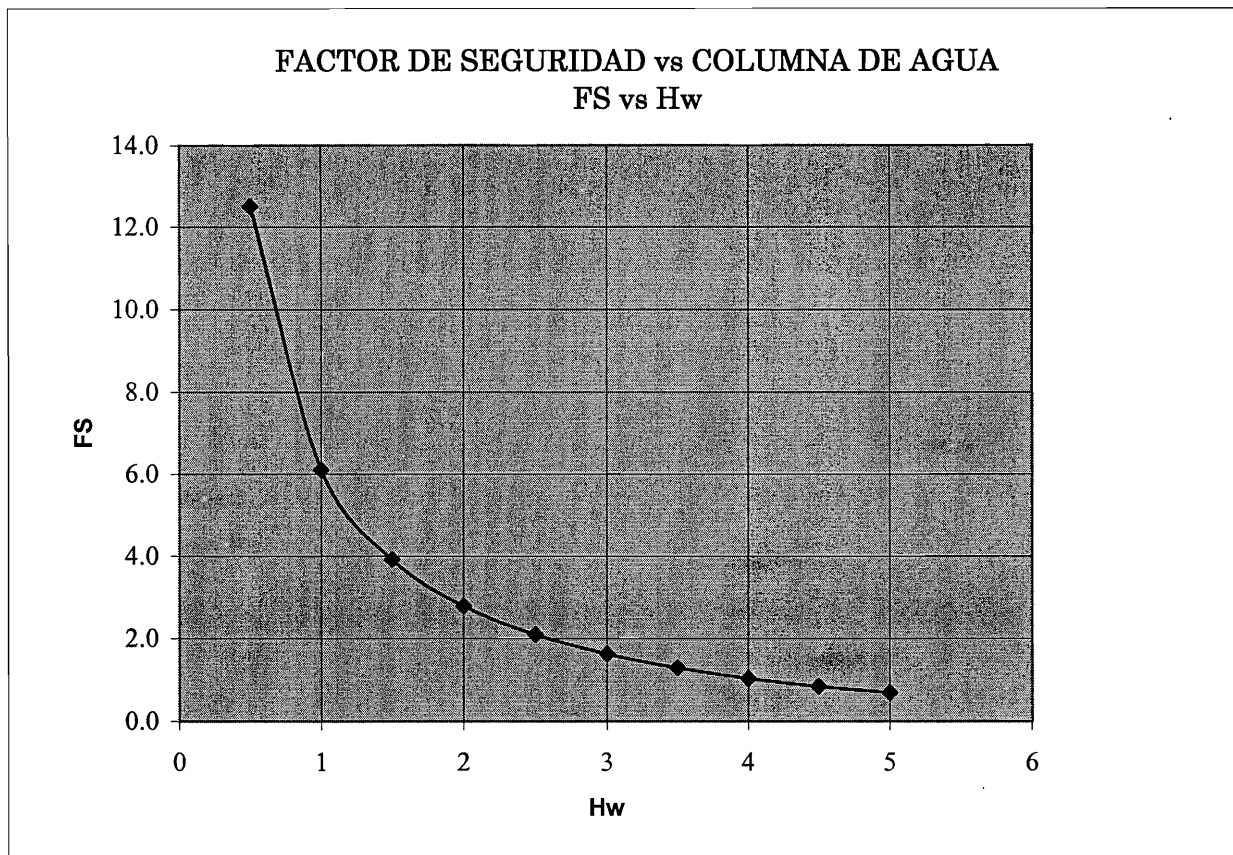
$$\sum Ma = 2.63$$

F.S. =	12.5
--------	------

Los valores del factor de seguridad para el aumento de agua en la grieta se muestran en la tabla

hw	FS
0.5	12.5
1	6.1
1.5	3.9
2	2.8
2.5	2.1
3	1.6
3.5	1.3
4	1.0
4.5	0.8
5	0.7

Comportamiento del F.S. al aumentar el nivel de agua en la grieta.



Se observa que al llegar el agua a la altura de 4 m atrás de la grieta el factor de seguridad es 1. Por lo tanto es importante evitar que la grieta se rellene con material arcilloso y vegetación para evitar que se sature de agua.

ANÁLISIS POR SISMO

$$F.S. = \frac{\sum Mr}{\sum Ma}$$

$$\sum Mr = W \cdot \frac{B}{2} \qquad \sum Ma = \frac{c \cdot W \cdot H}{2}$$

$$F.S. = \frac{w \cdot \frac{B}{2}}{\frac{c \cdot W \cdot H}{2}}$$

Para el análisis por sismo se considera un valor de coeficiente sísmico de C=0.16, en este caso no se considera el empuje hidrostático, ya que sería una condición extraordinaria el encontrar ambos casos juntos.

El factor obtenido para este caso es el siguiente:

$$\sum Mr = 32.81$$

$$\sum Ma = 10.5$$

F.S. =	3.1
--------	-----

Considerando el empuje sísmico se aprecia que el bloque no voltea, esto se debe en cierta medida a la forma del bloque ya que su relación alto/ancho es baja, de 2.

ANÁLISIS POR DESLIZAMIENTO

Se realiza el análisis tomando en cuenta la posibilidad de que el bloque deslice hacia el frente sobre la base. Esto determinará cuál mecanismo es más peligroso, si el volteo o el deslizamiento, dependiendo del nivel de agua en la grieta y de las propiedades resistentes de la discontinuidad de la base.

ANÁLISIS POR EMPUJE HIDROSTÁTICO

Deslizamiento en material friccionante

$$F.S. = \Sigma Fr / \Sigma Fa$$

Donde: F.S: Factor de seguridad
Fr: Fuerza resistente = fricción en la base = $(W - S) \tan\phi$
Fa: Fuerza actuante = empuje hidrostático = $(\gamma_w H_w / 2)(H_w)$
S = $(\gamma_w H_w / 2)(B)$

$$F.S. = (W - S) \tan\phi / Eh$$

Considerando el nivel de agua en la grieta de 4 m, se tiene:

$$Eh = (4)(4)(1/2)(1) = 8 \text{ t/m}$$

$$S = (4)(2,5)(1/2)(1) = 5 \text{ t/m}$$

Considerando el equilibrio límite

$$F.S. = (26,25 - 5) \tan\phi / 8 = 1$$

Se obtiene que $\phi = 21^\circ$

Si ϕ es menor de 21° entonces es posible el deslizamiento.

Deslizamiento en material cohesivo

Se puede suponer que la base del bloque está rellena de material arcilloso, por lo que el bloque desliza sobre la arcilla.

Fr: Fuerza resistente = cohesión en la base = cB

Fa: Fuerza actuante = empuje hidrostático = $(\gamma_w H_w / 2)(H_w)$

c = cohesión

B = base del bloque

$$F.S. = cB / Eh$$

$$F.S. = (2,5)c / 8 = 1$$

Despejando c , se tiene $c = 3,2 \text{ t/m}^2$

Para las condiciones supuestas si $c < 3,2 \text{ t/m}^2$ es posible es deslizamiento

ANÁLISIS POR SISMO

Considerando los valores límites de ϕ y c para el análisis por sismo se tiene:

$$F.S. = \Sigma Fr / \Sigma Fa$$

Donde:

F.S: Factor de seguridad

Fr: Fuerza resistente = fricción o cohesión en la base

Fa: Fuerza actuante = empuje sísmico

Friccionante

$$Fr = W \tan\phi = (26,25)(\tan 21^\circ) = 10 \text{ t/m}$$

$$Fa = CW = (0,16)(26,25) = 4,2 \text{ t/m}$$

$$F.S. = 10 / 4,2 = 2,4$$

Cohesivo

$$Fr = cB = (3,2)(2,5) = 8 \text{ t/m}$$

$$F.S. = 8 / 4,2 = 1,9$$

Se puede observar que con los valores supuestos de ángulo de fricción y cohesión el bloque tiene un factor de seguridad mayor que 1, por lo que el principal problema lo ocasiona el agua.

Con medidas de drenaje como cunetas de coronación y drenes en la parte trasera se evita tanto el volteo como el deslizamiento del bloque.

VII.2.2.1 SOLUCIÓN GEOTÉCNICA PARA VOLTEO

Después del análisis para este bloque se procede a dar la solución geotécnica. Se observa que el problema de inestabilidad lo provoca principalmente el agua, por lo que se presentarán problemas en época de lluvias.

De la grafica hw vs FS se puede notar que el cuando el nivel de agua (hw) se acumula en la grieta hasta una altura mayor a 4 m, el bloque presenta la falla por volteo, ya que el factor de seguridad $FS < 1$.

La solución para este tipo de falla es evitar que al agua entre en la grieta del bloque, para evitar el empuje hidrostático.

El tratamiento que se propone para este mecanismo de falla es drenaje superficial, mediante cunetas de coronación y la colocación de drenes en la parte trasera del bloque, esto posterior al retiro de arbustos, hierba, raíces y suelo de la grieta (Fig.VII.7).

El sellado de la grietas no es recomendable ya que la inyección o aplicación de una mezcla, que puede ser de concreto o bentonita-cemento, inducirá empujes mayores inclusive que los del agua, dada la densidad de estos materiales. Asimismo el nivel freático puede llegar a un nivel tal que empuje al bloque detrás del relleno.

Para evitar que la base se erosione y el bloque pierda apoyo o bien para anular la posibilidad de que el bloque deslice sobre la base, es recomendable construir un muro de apoyo, dado que la altura de la base del bloque al terreno no es considerable.

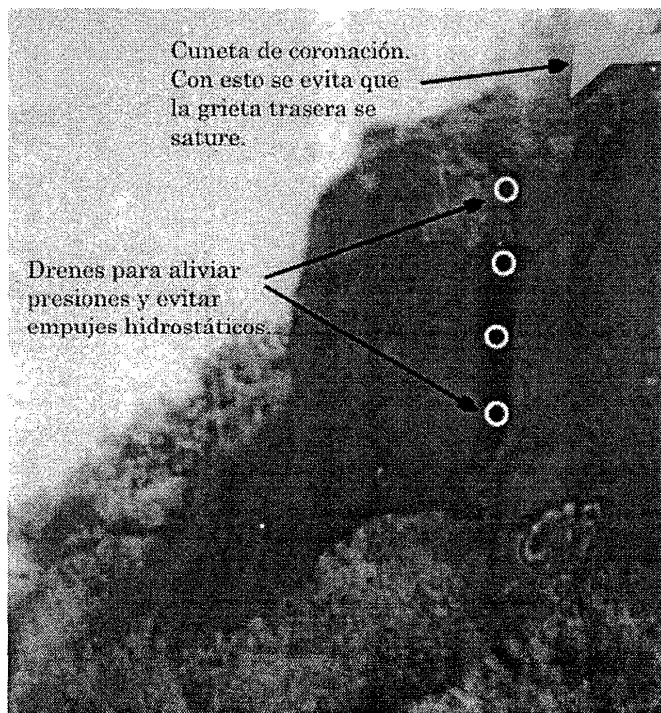


Fig. VII.7. Medidas de drenaje para el bloque.

VII.3 SOLUCIONES GEOTÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

Los principales tipos de falla de taludes rocosos que se presentan en la Sierra de Guadalupe son:

- Falla por volteo de bloques tabulares o columnares en zonas abruptas, escarpes de falla o frentes de flujo de lava, o bloques previamente afallados que han sido moldeados con el tiempo y que presentan condiciones de apoyo particularmente precarias.
- Falla por rodamiento de bloques por erosión o pérdida de apoyo al pie.
- Falla por desprendimiento de bloques que están en cantiliver en zonas de fuerte pendiente (70-90°).
- Falla por deslizamiento de bloques, donde la fractura tiene un echado favorable al deslizamiento.
- Falla por arrastre de material detrítico de origen natural y antrópico.

Los estudios para la corrección de un talud han de partir, necesariamente, de un conocimiento detallado de las propiedades intrínsecas de los materiales, la geometría del talud y los factores externos que influyen en su inestabilidad.

La aplicación de uno u otro tratamiento de estabilización requiere de una valoración previa, desde un punto de vista técnico y económico, con objeto de definir las soluciones adecuadas.

Las medidas estabilizadoras pueden consistir en:

- Modificación de la geometría del talud.
- Drenaje.
- Aumento de la resistencia del talud mediante la introducción de elementos estructurales resistentes.
- Construcción de muros u otros elementos de contención.
- Medidas de protección superficial, que pueden ser activas o pasivas.

En este apartado se describen los *métodos de estabilización* frecuentemente usados en *rocas* (RENFE, 1999; González, 2002; Gaziev, 2003), con la finalidad de llegar a un esquema general aplicable a la Sierra de Guadalupe, que permita acotar las obras de mitigación para los diferentes mecanismos potenciales de falla.

Modificación de la geometría del talud

Las formas de actuar sobre la geometría del talud para mejorar su estabilidad son las siguientes:

A) Modificación del talud.

Consiste en la eliminación de una masa inestable o potencialmente inestable obteniendo un nuevo perfil del talud.

B) Excavaciones en cabecera.

Consiste en la eliminación de material de la parte superior de la masa potencialmente inestable. En esta zona el peso del material contribuye en mayor medida al deslizamiento, pues la superficie de rotura suele tener una mayor inclinación. Por ello, la excavación de material en esta zona produce una mejora apreciable de la estabilidad.

Drenaje

Las medidas de drenaje son en general, las más efectivas, ya que el agua es el principal agente que desencadena procesos de inestabilidad en los taludes. La aplicación de estas medidas (que bien podrían ser llamadas preventivas) requiere un conocimiento hidrogeológico detallado, que permita la aplicación de sistemas de drenaje más adecuados en cada caso. Las medidas habituales de drenaje son de dos tipos:

A) Drenaje superficial.

Cunetas de drenaje. Estas cunetas suelen situarse paralelamente al talud y su objetivo es captar y conducir las aguas de correntía superficial fuera del talud. Según la situación que ocupan en el talud se denominan:

- Cuneta de coronación.
- Cuneta de berma.
- Cuneta de base o de pie.

B) Drenaje profundo.

Los drenajes profundos consisten en conductos u orificios que penetran en el talud recogiendo el agua contenida en el mismo, provocando un descenso en el nivel freático y/o generando una caída de potencial hidráulico al igualar las presiones del agua dentro del talud con la presión atmosférica. Los más habituales son:

- a) Drenes horizontales o californianos. Son perforaciones subhorizontales con diámetro variable (generalmente entre 10 y 15 cm) y con longitudes de 20-40 m; son efectivos para evacuar el agua de la base de los taludes.

- b) Zanjas con relleno drenante.
- c) Galerías de drenaje.
- d) Pozos verticales con bombeo o drenes que los comuniquen con el exterior.

Las galerías de drenaje y los pozos verticales con bombeo implican un mayor costo.

Anclajes

Los anclajes son elementos formados por barras o cables de acero alojados en el interior del terreno y perforados desde la superficie. Los anclajes se emplean frecuentemente en *taludes rocosos fracturados* como medida muy efectiva para estabilizar *bloques que pueden deslizarse o volcar*.

En las figuras VII.8, VII.9, VII.10 se muestran algunas disposiciones de anclajes.

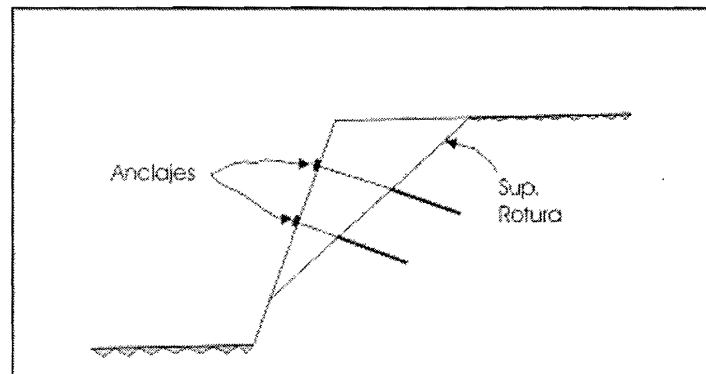


Fig. VII.8. Anclajes para estabilizar la falla por deslizamiento.

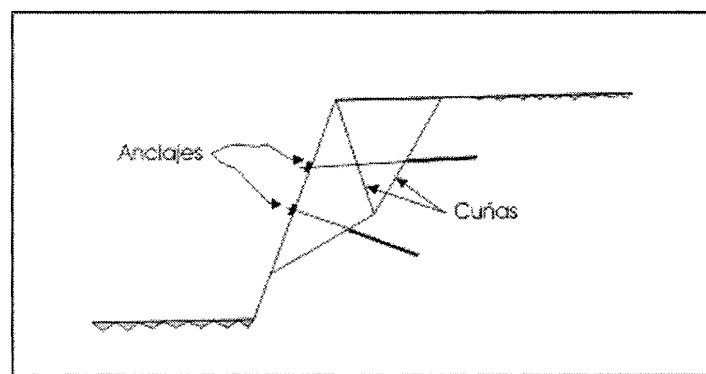


Fig. VII.9. Anclajes para estabilizar falla por deslizamiento de cuñas.

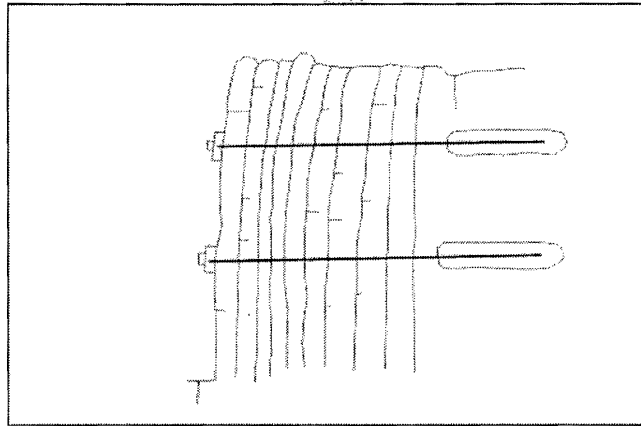


Fig.VII.10. Anclajes para estabilizar falla por volteo.

Muros

Los muros se construyen al pie del talud como elementos resistentes, de contención o sostenimiento; son efectivos frente a inestabilidades superficiales.

A) Muros de recalce.

Se instalan en los taludes en roca en los que existen masas importantes de *roca en voladizo* (Fig. VII.11). Su misión es proporcionar un apoyo a dichas masas con el fin de evitar su desprendimiento.

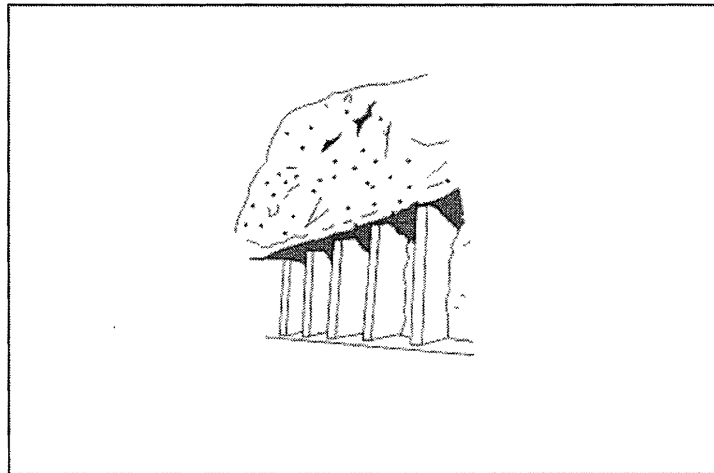


Fig. VII.11. Muros de recalce para estabilizar bloques rocosos en cantiliver

B) Muros anclados.

Son muros reforzados con anclajes lo que elimina los problemas de estabilidad por volteo y deslizamiento de un muro convencional.

Son adecuados para taludes en roca de mala calidad, con orientación desfavorable de discontinuidades y tamaño elevado de bloques o masas de roca inestables. Siempre será necesaria la realización de medidas de drenaje.

Protección contra desprendimientos de roca

Existen numerosas medidas para el control de desprendimientos, los cuales se agrupan en:

- Medidas activas o de estabilización: contribuyen al control de los desprendimientos en roca de forma activa, impidiendo el movimiento de los bloques rocosos.
- Medidas pasivas o de protección: su objeto es controlar los bloques de roca que se han movido de su lugar de origen.

- *Medidas activas o de estabilización*

- a) Eliminación de bloques.

Consiste en la eliminación de forma controlada de los bloques sueltos o potencialmente inestables con riesgo de caída (Fig. VII.12).

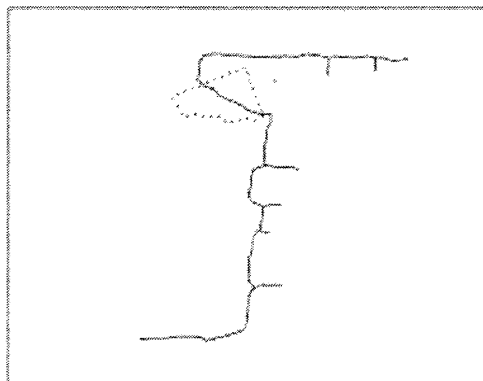


Fig. VII.12. Eliminación de bloques

Se pueden llevar a cabo mediante diferentes técnicas:

- Voladura controlada
- Cemento expansivo
- Fragmentación mediante martillo picador
- Elevación desde la parte superior del talud mediante grúas, usando ganchos anclados a los bloques.
- Eliminación manual mediante palancas

Deben eliminarse únicamente los bloques adecuados, en caso contrario el efecto puede ser perjudicial para la estabilización de otros bloques a largo plazo.

b) Fijación de bloques.

Fijación de bloques de roca de mediano tamaño mediante barras de acero de diámetro medio de 2 a 4 cm y longitud normal de 3 a 6 m. Las barras se colocan en perforaciones realizadas en la roca y rellenas de mortero o resina.

Cuando los bloques o masas de roca a estabilizar presentan grandes dimensiones, su fijación debe realizarse mediante anclajes ya que permiten fijar los bloques de roca a mayor profundidad en el macizo rocoso y admiten cargas considerables.

c) Atado de bloques.

Consiste en la estabilización de un bloque o conjunto de *bloques de roca sueltos*, mediante cables que se disponen en torno al bloque y cuyos extremos se anclan a la superficie del talud. Se utiliza generalmente para grandes bloques (10 – 25 m³). El atado se puede realizar con una envoltura de malla tupida que se ancla a la zona no meteorizada.

d) Sistema mixto de cables y malla.

Se utiliza para estabilizar *zonas de talud que se encuentran muy fracturadas*. Consiste en la colocación de una pantalla metálica, sujeta a la roca potencialmente inestable o generadora de desprendimientos. A la malla se superpone una serie de cables formando una retícula anclada a la roca en sus extremos y tensionados.

e) Concreto lanzado.

Consiste en la proyección de una capa de concreto sobre la superficie del talud. Dicha capa de concreto puede reforzarse mediante la aplicación de una malla metálica fijada al talud sobre la que se proyecta el concreto.

Esta medida es útil para evitar *pequeños desprendimientos* y para proteger la superficie del talud de la meteorización, cuyo desarrollo puede favorecer la aparición de bloques inestables. Asimismo, es una medida adecuada para evitar la infiltración de agua de lluvia y escorrentía superficial.

Para facilitar la salida de agua deben realizarse drenes que atraviesan la capa de concreto.

- *Medidas pasivas o de protección*

a) Malla de guiado.

Son mallas de alambre de acero tendidas desde la parte superior del talud hasta la base. La función de estas mallas es la de guiar o conducir los bloques de roca en su caída con el fin de que se acumulen en el pie del talud. Los bloques que potencialmente se desprenderán del talud deben de ser de un volumen inferior a 0.5 m³ para evitar el arrastre, desprendimiento o rotura de la malla de guiado.

b) Mallas de sostenimiento.

Las mallas de sostenimiento son mallas de alambre de acero de triple torsión preferentemente, que se anclan en el borde superior del talud a una distancia del mismo de aproximadamente 1 m, tendiéndose en la superficie del talud y volviéndose a anclar en la base del mismo, con unos elementos que se puedan quitar y reponer para limpiar las caídas del material. Este método se utiliza para taludes con material muy suelto, o cuando los *bloques son de pequeño volumen*.

c) Trincheras o zanjas.

Consisten en zanjas que se sitúan al pie de los taludes para recoger los bloques rocosos desprendidos. En función de sus dimensiones puede utilizarse tanto para desprendimientos de pequeña como de gran magnitud.

Se puede cubrir el fondo de la zanja con una capa de grava o de tierra para favorecer la recolección y detenimiento de los bloques.

d) Barreras de contención.

Consiste en la instalación de barreras en la superficie o al pie del talud, con el fin de interceptar los bloques rocosos en su trayectoria de caída. Las barreras pueden ser de mampostería, concreto o de gaviones o bien pueden estar constituidas por postes metálicos, redes o vigas de acero, las cuales son apropiadas para desprendimientos de pequeña magnitud. Las barreras dinámicas consisten en mallas de cable de acero entrelazado, soportadas por postes de acero cimentados y anclados al terreno.

VII.4 TRATAMIENTOS RECOMENDADOS PARA LA SIERRA DE GUADALUPE

En las siguientes tablas (VII.13, VII.14, VII.15, VII.16) se resumen los tratamientos recomendables para los mecanismos de falla presentes en la Sierra de Guadalupe, principalmente por volteo, deslizamiento, caída y flujos, aunque esto no implica que sean los únicos.

MECANISMO DE FALLA	TRATAMIENTOS GEOTÉCNICOS
VOLTEO	<p>MEDIDAS DE DRENAJE A) Drenaje superficial a) Cunetas de drenaje</p> <p>MUROS</p> <p>MODIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TALUD A) Retiro de material en la cabecera</p> <p>ANCLAJES</p> <p>CABLES</p>

Tabla VII.13. Tratamientos geotécnicos para volteo

MECANISMO DE FALLA	TRATAMIENTOS GEOTÉCNICOS
DESLIZAMIENTO	<p>MODIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TALUD</p> <p>MEDIDAS DE DRENAJE A) Drenaje superficial B) Drenaje profundo</p> <p>MUROS Muros anclados</p> <p>ANCLAJES</p>

Tabla-VII.14. Tratamientos geotécnicos para deslizamiento

MECANISMO DE FALLA	TRATAMIENTOS GEOTÉCNICOS
CAÍDA DE ROCAS	<p>PROTECCIÓN CONTRA DESPRENDIMIENTO DE ROCA</p> <p>Medidas activas o de estabilización</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Eliminación de bloques b) Fijación de bloques c) Atado de bloques d) Sistema mixto de cables y malla e) Concreto lanzado y drenaje <p>PROTECCIÓN CONTRA RODAMIENTO DE ROCAS</p> <p>Medidas pasivas o de protección</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Malla de guiado b) Mallas de sostenimiento c) Trincheras d) Barreras de contención

Tabla VII.15. Tratamientos geotécnicos para caída de rocas

MECANISMO DE FALLA	TRATAMIENTOS GEOTÉCNICOS
FLUJO	<p>MODIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TALUD</p> <ul style="list-style-type: none"> A) Remoción parcial o total de material <p>MEDIDAS DE DRENAJE</p> <ul style="list-style-type: none"> A) Drenaje superficial a) Cunetas de drenaje <p>BARRERAS DE CONTENCIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> A) Muros de gaviones B) Muros secos <p>PROTECCIÓN CONTRA LA EROSION</p>

Tabla VII.16. Tratamientos geotécnicos para flujo

VII.5 RECOMENDACIONES GENERALES A LOS PROCESOS CONSTRUCTIVOS

Los trabajos (SEGEOMET, 2001; Rábago, 2001) deberán iniciar con la limpieza de basura, desyerbe y retiro de árboles y raíces, así como retiro de trozos de roca en zona aledaña en una franja de 2 m alrededor de los bloques. Pueden emplearse productos químicos para matar raíces y evitar la germinación tanto en la parte superior de los bloques como en las fracturas y grietas laterales. Esta misma actividad se podrá aplicar en bloques críticos y donde haya taludes de roca en las zonas habitadas. Se deberá asegurar la cancelación de fugas de agua y de drenajes que viertan agua sobre los taludes construyendo bordillos en las vialidades, encauzando apropiadamente el agua con cunetas y bajantes de mampostería o de concreto fuera de la zona de taludes.

En el caso de bloques pequeños que están apoyados sobre otros más grandes se podrán retirar manualmente, tomando las medidas de seguridad correspondientes; si los bloques son más grandes se puede recurrir al uso de cables, lazando el bloque en forma segura y en varias direcciones y jalándolo con gatos hasta un lugar donde pueda descansar en condiciones estables. Se debe tener cuidado de no mover un bloque del cual dependa la estabilidad de otros bloques, pues al retirarlo se puede provocar un alud de rocas que ponga en peligro la vida de los trabajadores o de otras personas.

Se podrán demoler bloques de roca utilizando productos químicos expansores o en forma manual, controlando mediante barreras al pie el producto demolido para evitar su disgregación fuera de la zona de demolición.

En oquedades y en la base erosionada de bloques se procederá a construir mampostería para reposición de roca, restituyendo el apoyo perdido. En grupos de bloques esta mampostería podrá hacerse sellando bloques considerados clave para que exista unión entre ellos y una buena trabazón.

En huecos muy grandes podrá tomarse la decisión de hacer una reposición parcial (muretes) sólo al pie del mismo para darle un adecuado apoyo, sin tener que recurrir al relleno de toda la cavidad.

Podrán utilizarse fragmentos de la propia roca existente en el sitio para la fabricación de la mampostería y mortero agua-cemento-arena con proporción de cemento:arena de 1:5 para la cementación de los bloques.

En bloques con posibilidades de falla por volteo o desprendimiento en los que existen condiciones propicias para apoyar un muro de mampostería al pie se recomienda su construcción. Dependiendo del tamaño del muro, podrá ser celular o masivo y también podrá ser de concreto. El aspecto más importante es garantizar en todos los casos un adecuado desplante del muro en roca, evitando cimentarlo en materiales térreos; por tal motivo, deberá excavarse hasta llegar a roca y perfilar con martillo neumático escalones para asegurar una superficie discontinua y un adecuado apoyo (se puede hacer un escarificado de roca al pie con cincel o martelina para lograr una

buena adherencia del mortero o concreto). Los muros tendrán la doble función de contener y apuntalar, evitando el cabeceo del bloque. Dependiendo del tamaño y forma del bloque serán las dimensiones de la base y la altura del muro. La mampostería se fabricará con fragmentos de la propia roca existente en el sitio y mortero agua-cemento-arena con proporción de cemento-arena de 1:5 para la cementación de los bloques.

Para algunos bloques que se encuentran a gran altura en cantiliver y prácticamente colgados de la cara del talud o para aquellos donde el muro no asegura la estabilidad del mismo y deba evitarse el cabeceo de la parte superior, se recomienda el uso de cables de torón de acero de $\frac{3}{4}$ " y de 1" de diámetro, los cuales deben amarrar al bloque y fijarse en roca que no tenga posibilidad de movimiento. En el sitio de fijación se perforarán orificios para colocar anclas cementadas con mortero ($f'c=200 \text{ kg/cm}^2$) provistas de un gancho para introducir el cable y haciendo un doblez en el mismo para fijarlo con una abrazadera o "perro" en uno de los extremos, mientras que en el otro extremo se jalará con un tirfor hasta eliminar cualquier juego entre la cara del bloque y el cable y se fijará con otra abrazadera. En la cara del bloque se recomienda colocar anclas cortas provistas de gancho u ojal para guiar el cable.

Cuando el fracturamiento de los macizos es muy frecuente, se requiere el uso de malla para confinar a todos los bloques, la cual se podrá fijar en la cara del bloque con anclas cortas de varilla de acero.

Es recomendable la impermeabilización de las cunetas de drenaje ya que mejora notablemente el funcionamiento de estos elementos al evitar la infiltración; puede hacerse mediante concreto, láminas impermeables, geotextiles, etc.

Todos estos trabajos son clasificados como de alto riesgo por efectuarse en lugares acantilados donde siempre existirá el peligro de perder el equilibrio, resbalar o bien pueden ocurrir desprendimientos de fragmentos de roca, por lo que el personal deberá estar capacitado para llevarlos a cabo y contar con equipo de seguridad tal como casco, arneses de alpinista que le sujeten tronco y piernas, columpios y andamios adecuados.

Deberá evitarse que la basura, vegetación, fragmentos y bloques de roca que accidentalmente sean desprendidos durante los trabajos se proyecten ladera abajo o hacia las viviendas, por lo que se utilizarán redes, muros secos (apilamiento de piedras) o cualquier tipo de barrera para evitar daños a personas, viviendas e infraestructura.

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La Sierra de Guadalupe ha sufrido un intenso proceso de urbanización que conlleva un riesgo dadas sus condiciones topográficas, geológicas, estructurales y de comportamiento mecánico de los macizos rocosos.

Los principales peligros que ponen en riesgo la vida de las personas así como la infraestructura construida en las laderas de la sierra son: volteo, caída y deslizamiento de rocas, flujo de detritos y reptación de laderas.

Se concluye que la mayoría de los procesos de inestabilidad de taludes están controlados por tres factores:

- **Geológico-estructural**

Los sistemas de fallas y fracturas afectan a los macizos rocosos de la sierra de la siguiente forma: generan zonas de debilidad estructural y delimitan bloques cuyos mecanismos de falla están influenciados por la forma del fallamiento a nivel regional.

El fracturamiento asociado a las fallas principalmente de tipo normal y los planos de flujo y enfriamiento asociados al emplazamiento de las estructuras volcánicas (domos y volcanes), controlan los procesos de inestabilidad de taludes, principalmente el volteo y deslizamiento. Las zonas donde se marcaron lineamientos de fallas se manifiestan como escarpes o trazas de fallas que a nivel de campo consisten en una alineación regular de bloques rocosos de forma tabular o columnar. Las discontinuidades que delimitan a estos bloques son:

- Fracturas asociadas al fallamiento regional.
- Líneas de flujo o estratificación
- Fracturas de enfriamiento

Los escarpes y frentes rocosos que se forman están expuestos a la acción de los agentes detonantes como: sismos, empujes hidrostáticos, fuerzas de filtración, erosión, fuerzas debidas a factores biológicos y antrópicos.

- **Geomorfológico**

El origen, la edad y los factores modificadores del relieve tienen influencia sobre las geoformas actuales. Los circos de erosión son estructuras geomorfológicas que controlan parte de los peligros por procesos de remoción en masa, pues definen laderas de captación en las cuales frecuentemente hay bloques y detritos de roca que pueden rodar o incorporarse en un flujo, respectivamente. En las cabeceras de los circos de erosión es frecuente la presencia de escarpes de falla, donde se presenta el volteo de bloques de roca y hacia las partes intermedias o bajas existen zonas de rodados, los cuales pueden iniciar su movimiento pendiente abajo y afectar a las personas e infraestructura civil (Figs. VIII.1).



Fig.VIII.1. Zona de rodados que pueden afectar a la población, volcán La Presa.

- **Factor antrópico**

La influencia del hombre como modificador del relieve terrestre da como resultado cortes en las laderas (Fig. VIII.2), hechos con el propósito de urbanizar y extraer material (Fig. VIII.3). Dichas actividades pueden generar inestabilidad en los taludes. La acción antrópica genera vibraciones, sobrecarga al terreno y filtraciones en fracturas, lo que tiende a inestabilizar los macizos rocosos que conforman la Sierra de Guadalupe. Los tiraderos de escombros pueden incorporarse en un flujo de detritos (Fig. VIII.4).

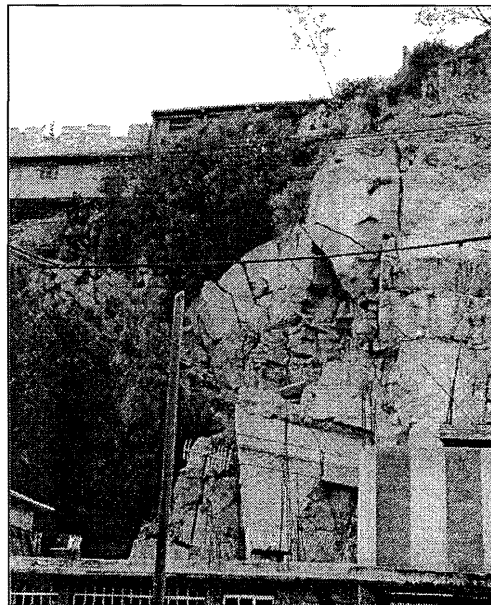


Fig. VIII.2. Corte en el talud que ha generado bloques que pueden volcar. Se aprecia que existen viviendas en la corona y al pie del talud.

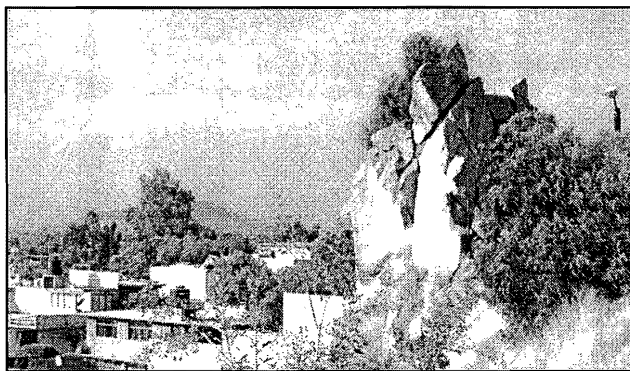


Fig. VIII.3 Aspecto de una antigua zona de extracción de material en Cerro Gordo, que después fue poblada. Se observan los bloques que pueden deslizar y afectar a las viviendas.



Fig. VIII.4 Creación de tiraderos de escombros cerca del Panteón Jardines del Recuerdo, que pueden incorporarse en un flujo de detritos en caso de precipitación abundante.

Se recomienda:

- Evitar más construcciones en las laderas
- Poner señalamientos claros respecto al peligro potencial.
- Evitar la quema de basura en zonas donde crece vegetación no arbórea.
- No verter agua de las viviendas de la corona del talud hacia abajo para evitar filtraciones y empujes hidrostáticos.
- Limitar el tránsito de vehículos pesados en los caminos construidos en zonas de ladera.
- Programar un plan preliminar de mitigación de riesgo que involucre a las autoridades y a la comunidad para evaluar la posibilidad de colaborar conjuntamente en los trabajos.
- Evaluar el interior de las viviendas para detectar macizos rocosos inestables y dar recomendaciones para evitar potenciales daños.

BIBLIOGRAFÍA

Alberro, J., Hernández, R., 1991. Temblores inducidos por fuerzas de filtración. Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, No, 530.

Comisión Federal de Electricidad., 1993. Manual de Diseño de Obras Civiles, Sección C: Estructuras, Tomo I, Criterios de Diseño, Capítulo III, Diseño por Sismo.

De Cserna, Z., De la Fuente, M., Palacios, M., Triay, L., Mitre, L., Mota, R., 1988. Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México. Instituto de geología-UNAM. Boletín 104, 71 p.

Demant, Alan., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 2, num. 2, p. 172-187.

Fausto Martínez, O., 2002. Análisis geomorfológico enfocado a los procesos de ladera en la Sierra de Guadalupe, México. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis profesional.

García, M. E., 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana): Sistema de Clasificación Climática: México D.F., Instituto de Geografía, 219 p.

García-Palomo, Armando., 2002. Vulcanismo y Geología Estructural de la Región de Apan, Edos. de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y México, tesis doctoral, 181p.

Gaziev, Erast., 2003. Análisis de la estabilidad de taludes rocosos. Series del Instituto de Ingeniería, serie docencia, SD/43.

Gaziev, Erast., 1984. Estabilidad de los macizos rocosos y métodos de estabilización. Series del Instituto de Ingeniería, No. D-21.

González, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., 2002. Ingeniería Geológica, Prentice Hall.

Herrera, S., 2002. Regionalización de los deslizamientos en México, Academia Mexicana de Ingeniería, México.

Hoek, Evert., Bray, Jonh W., 1996. Rock Slope Engineering, Institution of Mining and Metallurgy, tercera edición.

Hutchinson, J.N., 1988. General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides, Vol. I, editado por Christophe Bonnard.

ISRM. International Society For Rock Mechanics Commission On Standardization Of Laboratory And Field Tests, 1978. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. Publicado en International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts., V. 15, p. 319-368.

Jacobo, Albarrán, J. J., 1985. Estudio petrogenético de las rocas ígneas de la porción Central del Eje Neovolcánico. Revista del Instituto Mexicano del Petróleo.

Lozano Barraza, Luis., 1968. Geología de la Sierra de Guadalupe, México, D.F. Instituto Politécnico Nacional, Escuela superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis profesional, 39 p.

Lugo Hubp, José., Salinas Montes, Araceli., 1996. Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (al norte de la Ciudad de México) y su relación con peligros naturales: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 13, num. 2, p. 240-251.

Marsal R.J., Reséndiz D., 1983. Presas de tierra y enrocamiento, Editorial Limusa.

Mooser, F., 1975. Historia geológica de la Cuenca de México, Memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo, editado por el D.D.F, México.

Mooser, F., Montiel A., y Zuñiga A., 1992. Nuevo Mapa geológico del sur - poniente del Valle de México: Simposio Experiencias geotécnicas en la zona poniente del Valle de México.

Rábago, A., 2001. Informe geotécnico del Proyecto "Evaluación de los peligros geológicos existentes en los sitios San Juan y Candelaria Ticomán, Delegación Gustavo A. Madero" realizado por el SEGEOMET.

RENFE, 1999. Normas españolas para Proyectos, estudios geotécnicos, explanaciones y taludes. Dirección de Mantenimiento de Infraestructura. Primera edición, marzo de 1999.

SEGEOMET, Servicio Geológico Metropolitano., 2001. Proyecto "Evaluación de los peligros geológicos existentes en los sitios San Juan y Candelaria Ticomán, Delegación Gustavo A. Madero".

SEGEOMET, Servicio Geológico Metropolitano., 2003. Proyecto "Evaluación y zonificación de los peligros geológicos por deslizamiento en las laderas de la Sierra de Guadalupe, Estado de México".

Suárez Díaz, J., 1998. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Editado por el Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Colombia.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Anexo

**Mapa de Zonificación de Peligros por Inestabilidad de Taludes en la
Sierra de Guadalupe.**

480000 482000 484000 486000 488000 490000 492000 494000



480000 482000 484000 486000 488000 490000 492000 494000



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

ALUMNO: VÍCTOR CARLOS VALERIO

COMITÉ TUTORIAL
TUTOR PRINCIPAL: ING. JESÚS ALBERRO ARÁMBURU
TUTOR ESPECÍFICO: DR. ARMANDO GARCÍA PALOMO

TESIS:

ZONIFICACIÓN DE PELIGROS POR INESTABILIDAD
DE TALUDES EN LA SIERRA DE GUADALUPE Y
PROPUESTA GEOTÉCNICA DE MITIGACIÓN

Tipos de Procesos de Remoción en Masa

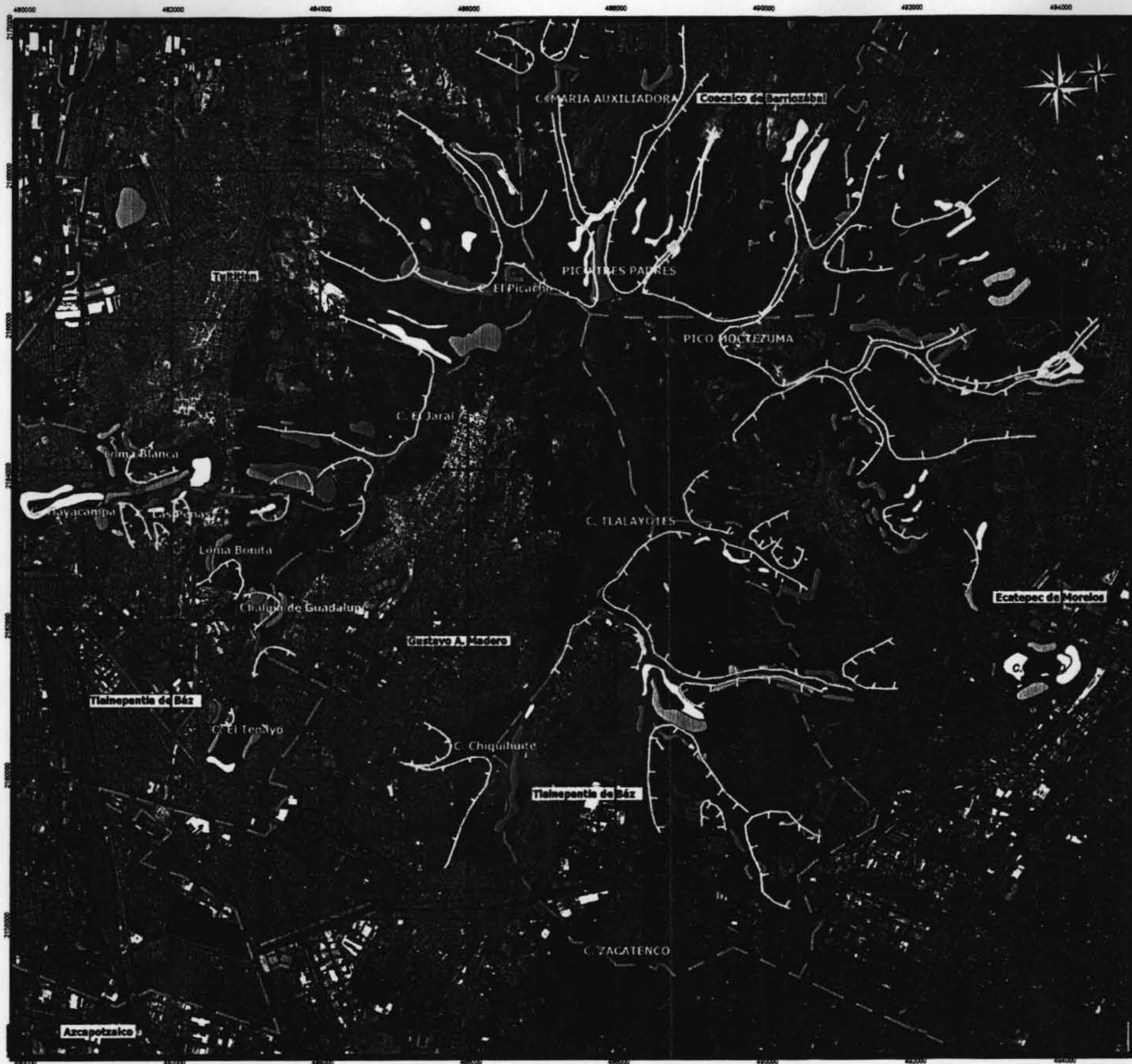
- Volteo
- Caída
- Deslizamiento
- Flujo
- Mas de 2 peligros (Caída,deslizamiento o volteo)

Simbología

- Circos de Erosión
- Reptación de ladera
- División Municipal
- Municipios y Delegaciones

Cartografía de Peligros

Escala 1: 62 500



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA






ALUMNO: VÍCTOR CARLOS VALERIO

COMITÉ TUTORIAL
TUTOR PRINCIPAL: ING. JESÚS ALBERRO ARÁMBURU
TUTOR ESPECÍFICO: DR. ARMANDO GARCÍA PALOMO



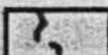
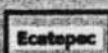
TESIS:

ZONIFICACIÓN DE PELIGROS POR INESTABILIDAD
DE TALUDES EN LA SIERRA DE GUADALUPE Y
PROPUESTA GEOTÉCNICA DE MITIGACIÓN

Tipos de Procesos de Remoción en Masa

-  Volteo
-  Caída
-  Deslizamiento
-  Flujo
-  Mas de 2 peligros (Caída, deslizamiento o volteo)

Simbología

-  Circos de Erosión
-  Reptación de ladera
-  División Municipal
-  Ecatepec Municipios y Delegaciones

Cartografía de Peligros

Escala 1: 62 500





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
 FACULTAD DE INGENIERÍA






ALUMNO: VÍCTOR CARLOS VALERIO

COMITÉ TUTORIAL
 TUTOR PRINCIPAL: ING. JESÚS ALBERRO ARÁMBURU
 TUTOR ESPECÍFICO: DR. ARMANDO GARCÍA PALOMO



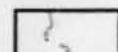

TESIS:

ZONIFICACIÓN DE PELIGROS POR INESTABILIDAD
 DE TALUDES EN LA SIERRA DE GUADALUPE Y
 PROPUESTA GEOTÉCNICA DE MITIGACIÓN

Tipos de Procesos de Remoción en Masa

-  Volteo
-  Caída
-  Deslizamiento
-  Flujo
-  Mas de 2 peligros (Caída,deslizamiento o volteo)

Simbología

-  Circos de Erosión
-  Reptación de ladera
-  División Municipal
-  Municipios y Delegaciones

Cartografía de Peligros

