



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE ZONAS
SUSCEPTIBLES A PROCESOS DE
REMOCIÓN EN MASA EN LA
ALCALDÍA CUAJIMALPA DE
MORELOS, CDMX.**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero geólogo

P R E S E N T A

Karla Elena Escobar Mercado

DIRECTORA DE TESIS

Mtra. Wendy Vanesa Morales Barrera



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020



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 mejor persona que conoceré, qué dicha compartir la vida contigo, mamá. Gracias por ser y estar, las risas, el apoyo incondicional y todo el amor que me das.

A mi papá, por dejarme sus mejores recuerdos, son lo más valioso que tengo.

A mis hermanos y resto de mi familia, por hacerme saber y sentir que nunca estaré sola.

A mis amigos por su fraternidad, la diversión, las memorias, abrazos, experiencias, cantos y baile, por el apoyo siempre, en todas sus formas.

A mis sinodales y asesora, por las enseñanzas dentro y fuera de un salón de clases, más valioso aún, por su tiempo y paciencia; tal vez, sin saberlo, todos dejaron algo en mí.

A la UNAM por las personas que trajo con ella, por los momentos vividos, los sueños generados y las metas cumplidas. Por las enseñanzas y porque por más de ocho años, crecí con ella.

El tiempo que yo exista, tú vivirás en mí

Después, nadaremos juntos.

Te amo papá.

Agradezco a la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México por la beca recibida durante el desarrollo de esta tesis en el marco del proyecto “Elaboración del Atlas de Riesgos de Origen Natural de la Ciudad de México” (Convenio SECITI/112/2017).

RESUMEN

La creciente urbanización de la Ciudad de México (CDMX) y sus implicaciones, han repercutido en la generación de fenómenos de origen natural como los procesos de remoción en masa (PRM). Este fenómeno ha impactado de forma significativa a la alcaldía Cuajimalpa de Morelos. Esto se debe principalmente a sus características geológicas, geomorfológicas, interacción antrópica, etc. Es por ello que, este trabajo tiene como objetivo generar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa (deslizamientos y caídas) para la demarcación a partir de aplicar un método multicriterio, mediante la creación y ponderación de mapas temáticos de los principales factores condicionantes (geológico, pendientes, uso de suelo, etc.) que favorecen la ocurrencia de inestabilidad de laderas en la región. Se estima que el 11.45% de la superficie cuenta con una susceptibilidad muy alta para deslizamientos, 23.54% alta, el 32.31% media, y el 8.94% y 23.76% niveles de muy baja y baja respectivamente. Mientras que para el mecanismo por caída se tiene que el 10.77% del territorio de la alcaldía está en un nivel de susceptibilidad muy alto, el 42.5% en alto y el 32.41% y 14.30% con un nivel medio y bajo, respectivamente. Los resultados indican que las zonas con mayor susceptibilidad a presentar deslizamientos son el sector norte y centro de la alcaldía, (zonas donde convergen litología y pendientes desfavorables). Mientras que; para el caso de caídas, la mayor susceptibilidad se concentra en la parte sur de la demarcación, resaltan los escarpes de las laderas ahí ubicadas, así como el sector norte y las laderas aledañas al Río Santo Desierto (zona densa en lineamientos). Así mismo, se determinó y caracterizó el nivel de peligro a deslizamientos y caídas en las localidades de Las Maromas y Del Carmen. Para esto se realizaron salidas de campo, estudios de tomografía eléctrica, caracterización del lugar y modelación de las condiciones de ladera. De acuerdo con la cédula de CENAPRED se determinó que la susceptibilidad en la ladera Las Maromas es muy alta a deslizamientos (con un factor de seguridad de 1.018) y caídas. Por otro lado, con base en la modelación de las condiciones de las laderas se determinó un nivel de susceptibilidad muy alta a deslizamientos superficiales y muy baja- baja a caídas. Para la ladera Del Carmen la susceptibilidad es alta a deslizamientos superficiales y baja a caídas, y de acuerdo con los resultados de la modelación realizada, la susceptibilidad es muy alta a deslizamientos y alta a caídas, resultado de los formatos de CENAPRED. Con base en lo anterior, se estima que los estudios de análisis de susceptibilidad deben adaptarse a las condiciones geográficas y a factores condicionantes para cada fenómeno en cuestión. Elaborar estudios de alta calidad, es vital para la adecuada toma de decisiones por parte de las autoridades. Esto para que cada decisión que se tome repercuta directamente en la optimización de recursos, planeación territorial y obras de mitigación.

CONTENIDO

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.3. Justificación	2
1.4. Área de estudio	3
1.4.1. Localización.	3
1.4.2. Aspectos físicos.	3
<i>1.4.2.1 Zonificación geotécnica</i>	4
<i>1.4.2.2 Clima</i>	5
<i>1.4.2.3 Vegetación</i>	5
1.4.3. Geología y geomorfología regional.	5
1.4.4. Edafología	10
1.4.5. Hidrogeología.	11
2. Marco teórico	14
2.1. ¿Qué son los procesos de remoción en masa?	14
2.2. Tipos de PRM	17
2.2.1 Caídas	19
2.2.2 Vuelcos o desplomes	21
2.2.3 Deslizamientos	22
<i>2.2.3.1 Deslizamientos rotacionales</i>	23
<i>2.2.3.2 Deslizamientos traslacionales</i>	24
2.2.4 Expansiones Laterales	25
2.2.5 Flujos	26
2.2.6 Movimientos Complejos	28
2.3 Factores condicionantes en la ocurrencia de un PRM	28
2.3.1 Geología / Aspectos geotécnicos	29
2.3.2 Geomorfología	30
2.3.3 Hidrogeología	32
2.3.4 Clima	32
2.3.5 Vegetación	33
2.3.6 Actividades antrópicas	33
2.4 Agentes desencadenantes	34
2.4.1 Precipitaciones	34
2.4.2 Sismos	36

2.4.3 Otros factores	38
2.5 Mapas de zonificación.....	39
2.6 Mapas de susceptibilidad.....	40
2.7 Prospección Eléctrica - Tomografía	41
2.7.1 Prospección eléctrica en corriente continua	42
2.7.1.1 Arreglo Dipolo- Dipolo.....	44
2.8 Propiedades de geomateriales en ingeniería	45
2.8.1 Resistencia al corte.....	51
3. Metodología	54
3.1 Primera etapa: Investigación de la zona de estudio	54
3.2. Segunda etapa. Investigación dirigida a procesos de remoción en masa y marco teórico.....	54
3.3 Tercera etapa. Recopilación e integración de información específica y elaboración de los mapas	55
3.4 Cuarta etapa. Elaboración de mapas de susceptibilidad.....	61
3.4.1 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos	65
3.4.2 Mapa de Susceptibilidad a Caídas.....	68
3.4.3 Álgebra de mapas.....	71
3.5 Quinta etapa. Casos de estudio	75
4. Mapas y resultados	80
4.1 Modelo de Elevación Digital.....	80
4.2 Mapa de inventario de deslizamientos	80
.....	82
4.3 Mapa geológico.....	83
4.4 Mapa de pendientes	89
4.5 Mapa de uso de suelo	92
4.6 Mapa de influencia del drenaje.....	95
4.7 Mapa de relieve relativo	97
4.8 Mapa de densidad de lineamientos.....	98
4.9 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos	100
4.9.1 Mapa geológico reclasificado	100
4.9.2 Mapa de pendientes reclasificado	100
4.9.3 Mapa de uso de suelo reclasificado.....	101
4.9.4 Mapa de influencia de drenaje reclasificado	101
4.9.5 Mapa de relieve relativo reclasificado.....	101
4.10 Mapa de Susceptibilidad a Caídas.....	105
4.10.1 Mapa geológico reclasificado	105

4.10.2 Mapa de pendientes reclasificado	105
4.10.3 Mapa de densidad de lineamientos reclasificado	106
4.10.4 Mapa de relieve relativo reclasificado	106
4.10.5 Mapa de uso de suelo reclasificado	106
4.10.6 Mapa de influencia de drenaje reclasificado	107
5. Casos de estudio	111
5.1 Colonia Las Maromas	112
5.1.1 Generalidades	112
5.1.2 Modelo geológico	116
5.1.3 Modelo geotécnico	119
5.1.4 Resultados Colonia Las Maromas	123
5.2 Colonia Del Carmen	127
5.2.1 Generalidades	127
5.2.2 Modelo Geológico	131
5.2.3 Modelo Geotécnico	134
5.2.4 Resultados	136
6. Conclusiones, recomendaciones y discusión	141
6.1 Discusión	141
6.2 Conclusiones	146
6.3 Recomendaciones	149
Referencias	151

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 Mapa de Localización a) Ciudad de México dentro de la Provincia fisiográfica Faja Volcánica Transmexicana y b) Alcaldía Cuajimalpa de Morelos y sus colindancias.....	4
Fig. 1.2 a) Localización de la Sierra de las Cruces b) Muestra la Alcaldía Cuajimalpa dentro del bloque central de la Sierra de las Cruces, así como algunas de las estructuras volcánicas que la componen: Ch) Chimalpa, S) Salazar, SM) San Miguel, A) Ajusco, Co) La Corona y Z) Zempoala.....	7
Fig. 1.3 Perspectiva oblicua de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, en él se puede observar la morfología del área de estudio, además de sus variaciones.....	8
Fig. 1.4 Mapa edafológico de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos. Tomado de CONABIO (2001).	11
Fig. 1.5 Mapa hidrogeológico de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos. Modificada de INEGI (2014).....	13
Fig. 2.1 Morfología típica de una ladera. Modificado de Suárez (2009).....	15
Fig. 2.2 Componentes de un movimiento idealizado. Recuperado de Suárez (2009).....	17
Fig. 2.3 Esquema de una caída de roca típica controlada por una pendiente abrupta, en la parte superior se puede observar la corona de desprendimiento, y la presencia de discontinuidades que controlan el tamaño de los bloques. Extraído de Highland & Bobrowsky, 2008.	20
Fig. 2.4 Tipos en las que se puede dar el movimiento de caída principalmente en rocas, los cuales dependen de la inclinación de la ladera que determina la cantidad de contacto del caído con la ladera y viceversa. Tomado de Lara, 2008.....	20
Fig. 2.5 Esquema de un vuelco en roca controlado por las discontinuidades del material, que seccionan la masa en bloques columnares. Extraído de Highland & Bobrowsky, 2008.....	21
Fig. 2.6 Maneras en las que bloques de roca podrían fallar. Extraído de Lara, 2008.	22
Fig. 2.7 Esquema de un deslizamiento rotacional. Se pueden observar A) Superficie de ruptura – cóncava/curva- B) Escarpe principal C) Escarpe secundario –escalonamiento- D) Flanco izquierdo E) Grietas transversales F) Grietas radiales G) Punta. Modificado de Highland & Bobrowsky, 2008.....	23
Fig. 2.8 Deslizamiento traslacional en donde se observa A) la superficie de ruptura plana, B) el escarpe principal, C) flanco izquierdo, D) grietas trasversales, E) grietas radiales, F) pie del movimiento. Modificado de Highland & Bobrowsky, 2008.	24
Fig. 2.9 Esquema de una extensión, se muestran sus partes A) Capa de roca que subyacente donde no ocurre la licuefacción B) Capas de arcilla blanda con limo y arena típicamente hidratadas, c) Capa superficial de material firme y D) Bloques creados por la extensión lateral. Modificado de Highland & Bobrowsky, 2008.....	26
Fig. 2.10 Representación de un flujo. Sus características suelen verse modificadas, en gran medida por el material que es transportado y el contenido de agua, geomorfología etc. A) Cabeza o frente B) Cuerpo del flujo movilizado y canalizado C) Cola o <i>tail</i> ; y D) Depósito en forma de abanico. Modificado de Highland & Bobrowsky, 2008.....	26
Fig. 2.11 Relación entre Voltaje, Intensidad y Resistencia	42
Fig. 2.12 Obtención de resistividad.....	42
Fig. 2.13 Representación de las líneas de flujo dentro del subsuelo. Tomado de Feria (2015).	43
Fig. 2.14 Representación del método de ejecución del arreglo Dipolo- Dipolo. Del lado derecho se observa la expresión bajo la cual se rige el cálculo de la resistividad. Tomado de CEDEX (s.f) y Estrada (2013).....	44

Fig. 2.15 Equipo utilizado en la implementación de Tomografía Eléctrica: (arriba) Sistema Syscal Pro- Lris Instruments junto con una batería externa como fuente; (derecha) arreglo de electrodos conectados mediante cables al Syscal.	45
Fig. 2.16 Curvas representativas de distintos tipos de suelo. Se observan además los valores de D_{10} , D_{60} –existe también el valor de D_{30} – que corresponden a ese porcentaje .10,30,60- que pasa extendiéndolo a la curva en cuestión, cual sea esa. De esta forma se obtiene el valor de D para ese porcentaje. Tomado de González de Vallejo, 2002.	47
Fig. 2.17 Estados de consistencia de un suelo arcilloso. Extraído de (Berry & Reid, 1993).....	49
Fig. 2.18 Procesos para la obtención de PL y LL. a) Copa Casagrande y material para LL b) Muestras en horno de PL y LL c) Material unido tras la abertura en el centro	50
Fig. 2.19 Carta de Plasticidad de Casagrande. La línea A representa el límite entre arcilla (arriba) y limos y/o suelos orgánicos (abajo), mientras que la línea U representa la frontera de la correlación LL/LP. Definiendo arcillas de baja plasticidad (CL), arcillas de alta plasticidad (CH), limos y suelos orgánicos de baja plasticidad (ML-OL), y limos y suelos orgánicos de alta plasticidad (MH-OH). Tomado de Diccionario de geotecnia, 2019.....	51
Fig. 2.20 Esquema de un círculo de Mohr y su envolvente. Se aprecian los factores que se pueden cuantificar de la gráfica, siendo σ_3 y σ_1 los esfuerzos principales, para las pruebas de laboratorio se considera al esfuerzo axial como la principal (σ_1) mientras que σ_1 y σ_2 son tomados como iguales al ser laterales. Extraído de Suárez (2009).	52
Fig. 2.21 Representaciones de la envolvente y círculo de Mohr. Extraído de González de Vallejo (2002).	53
Fig. 3.1 Distribución de pendientes de acuerdo con la clasificación de Suárez, 2009. Distribución descendiente gradual conforme aumenta la pendiente.	56
Fig. 3.2 Distribución de pendientes de acuerdo con la clasificación de caídas propuesta por CENAPRED (2019).....	57
Fig. 3.3 Tabla de puntos de inventario para deslizamientos, los datos 46- 62 son provenientes de Carlos Valerio (2010).....	59
Fig. 3.4 Esquema de la clasificación de métodos indirectos considerados para la elaboración de mapas de susceptibilidad a PRM, en color rosa se resalta el método empleado en el presente trabajo.	63
Fig. 3.5 Comparativa de las principales variables partícipes en la generación de procesos de remoción en masa de acuerdo con distintos autores.	63
Fig. 3.6 Proceso de toma de muestras inalteradas y la elaboración de probetas a partir de ellas, Col. Del Carmen.	78
Fig. 3.7 Equipo para pruebas triaxiales	79
Fig. 4.1 Modelo sombreado del relieve con la altimetría que presenta la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.....	81
Fig. 4.2 Mapa de sitios en donde se reportó la ocurrencia de deslizamientos en la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	82
Fig. 4.3 Unidades que componen a la Sierra de las Cruces.....	83
Fig. 4.4 Mapa Geológico de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	88
Fig. 4.6 Mapa de pendientes, en grados, de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos con la clasificación utilizada para caídas.....	91

Fig. 4.5 Mapa de pendientes, en grados, de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos con la clasificación de deslizamientos	91
Fig. 4.7 Mapa de uso de suelo de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	94
Fig. 4.8 Mapa de influencia de drenaje en deslizamientos para la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	96
Fig. 4.9 Mapa de influencia de drenaje para caídas en la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	96
Fig. 4.10 Mapa de uso de suelo de la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	97
Fig. 4.11 Mapa de densidad de lineamientos en metros por de la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	99
Fig. 4.12 Mapas reclasificados de las distintas variables que intervienen para el mapa de susceptibilidad a deslizamientos de la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	102
Fig. 4.13 Mapa susceptibilidad a deslizamientos de la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	103
Fig. 4.14 Mapas reclasificados de las distintas variables que intervienen para el mapa de susceptibilidad a caídas de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	108
Fig. 4.15 Mapa de susceptibilidad a caídas de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	109
Fig. 5.1 Ubicación de los casos de estudio dentro de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	111
Fig. 5.2 Ubicación de la ladera Las Maromas, en la imagen se muestra su entorno tanto geológico, así como la interacción con aspectos antrópicos. Se muestra la sección A-B realizada con la tomografía eléctrica.....	112
Rumbo de la ladera NE35°	112
Fig. 5.3 Parte inferior de la ladera (cercana al pie de la misma). Se observa la modificación del relieve e incluso la “invasión” de pobladores a la ladera. Resaltan en amarillo los límites de abombamiento.	113
Fig. 5.4 Parte intermedia de la ladera, esta zona segmenta a la ladera en dos frentes.	114
Fig. 5.5 Parte superior de la ladera, se presenta el ojo de agua (estrella amarilla) y las abundantes construcciones en la cara de la ladera.....	114
Fig. 5.6 Tomografía eléctrica de la ladera Las Maromas	115
Fig. 5.7 Corte lateral de la ladera Las Maromas con la distinción de unidades geológicas	117
Fig. 5.8 Corte ladera Las Maromas, con la propuesta de unidades geotécnicas.	119
Fig. 5.9 Análisis de estabilidad de la ladera Las Maromas. En el modelo se observan todas las superficies de deslizamiento posibles, inclusive las de mayor factor de seguridad	121
Fig. 5.10 Análisis de estabilidad de la ladera Las Maromas.....	122
Fig. 5.11 Formato de estimación de la susceptibilidad a deslizamientos para la ladera Las Maromas	125
Fig. 5.12 Formato de estimación de la susceptibilidad a caídas para la ladera Las Maromas	126
Fig. 5.13 Ubicación de la Colonia Del Carmen, en donde se distinguen los asentamientos de tipo irregular en toda la zona, mismos que se han internado en áreas pertenecientes a la cara del talud. Se muestra con A- B los extremos de la sección utilizada para el estudio de tomografía eléctrica.	127

Fig. 5.14 Vista lateral de la ladera (SW-NE). Se nota la interacción con el entorno de forma desordenada.	128
Fig. 5.15 Vista lateral de la ladera (SW-NE). Se nota la interacción con el entorno, un terreno escarpado con barrancas marcadas.	129
Fig. 5.16 Vista lateral de la ladera (SW-NE). La constante interacción antrópico con esta ladera ha ocasionado la incorporación artificial de humedad e incremento de peso en ella.....	129
Fig. 5.17 Tomografía eléctrica de la ladera Del Carmen	130
Fig. 5.18 Perfil del modelo geológico y sus respectivas unidades	131
Fig. 5.19 Unidades geológicas	133
a. Unidad I	133
b. Unidad II	133
c. Unidad III	133
d. Unidad IV	133
Fig. 5.20 Análisis de estabilidad de la ladera Del Carmen.....	135
Fig. 5.21 Formato de estimación de la susceptibilidad a deslizamientos para la ladera Del Carmen	138
Fig. 5.22 Formato de estimación de la susceptibilidad a caídas para la ladera Del Carmen	139
Fig. 6.1 Comparación de mapas de susceptibilidad a deslizamientos en la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos con distintas ponderaciones; arriba el propuesto en este trabajo, debajo el mapa con ponderación propuesta por CENAPRED (Tabla 15).....	143
Fig. 6.2 Comparación de mapas de susceptibilidad a caídas en la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos con distintas ponderaciones; arriba el propuesto en este trabajo, debajo el mapa con ponderación propuesta por CENAPRED (Tabla 15).	144
Fig. 6.3 Gráfica de porcentaje por nivel de susceptibilidad a deslizamientos de la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	145
Fig. 6.4 Gráfica de porcentaje por nivel de susceptibilidad a caídas de la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.	146

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nombre y cantidad de barrancas de las Alcaldía Cuajimalpa de Morelos y circundantes.....	10
Tabla 2. Descripción de los componentes de un movimiento.....	18
Tabla 3. Escala de velocidades para procesos de remoción en masa propuesta por Cruden & Varnes (1996).	19
Tabla 4. Clasificación de un flujo de acuerdo con su composición y tasa de movimiento	28
Tabla 5. Influencia de las distintas características geológicas de un depósito para la generación de inestabilidad de laderas	31
Tabla 6. Resumen de las principales características presentes para cada tipo de factor generador de PRM.....	39

Tabla 7. Concepto de susceptibilidad a inestabilidad de laderas para distintos autores.....	40
Tabla 8. Clasificación por tamaño de partículas componentes del suelo.....	46
Tabla 9. Rangos de coeficiente de uniformidad	47
Tabla 10. Características de los tipos de gradación	48
Tabla 11. Clasificación de pendientes para deslizamientos.....	56
Tabla 12. Clasificación original de pendientes para caídas, INEGI (2019).	57
Tabla 13. Variables utilizadas para los mapas de Susceptibilidad	65
Tabla 14. Propuestas de porcentajes de ponderación para las variables según el fenómeno. La propuesta seleccionada se resalta en color.....	65
Tabla 15. Clasificación en clases para la variable Geología	67
Tabla 16. Clasificación en clases para la variable Uso de Suelo.....	67
Tabla 17. Clasificación en clases para la variable Relieve Relativo	68
Tabla 18. Clasificación en clases para la variable Influencia de Drenaje	68
Tabla 19. Clasificación en clases para la variable Geología	69
Tabla 20. Clasificación en clases para la variable Grado de Lineamientos	70
Tabla 21. Clasificación en clases para la variable Relieve Relativo	70
Tabla 22. Clasificación en clases para la variable Uso de Suelo.....	71
Tabla 23. Clasificación en clases para la variable Influencia de Drenaje	71
Tabla 24. Ponderaciones finales para mapa de susceptibilidad a deslizamientos	73
Tabla 25. Ponderaciones finales para mapa de susceptibilidad a caídas y/o desprendimientos.....	74
Tabla 26. Tamaño de partículas componentes de los depósitos de bloques y cenizas.....	86
.....	86
Tabla 27. Descripción de unidades geológicas de la ladera Las Maromas	118
Tabla 28. Parámetros obtenidos para la ladera Las Maromas	120
Tabla 29. Elementos utilizados en el modelamiento de condiciones estáticas de la ladera Las Maromas	120
Tabla 30. Descripción de unidades geológicas de la ladera Del Carmen.....	132
Tabla 31. Parámetros físicos y mecánicos obtenidos para la ladera Del Carmen	134
Tabla 32. Elementos utilizados en el modelamiento de condiciones estáticas de la ladera Las Maromas	134
Tabla 33. Porcentajes de nivel de susceptibilidad para deslizamientos y caídas	145

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Debido a la creciente urbanización, su inadecuada planeación y desordenada distribución dentro de la Ciudad de México (CDMX) (que implica la construcción de viviendas, hospitales, dependencias, centros corporativos, carreteras e incluso lugares de recreación, etc.), ha traído como consecuencia la modificación del relieve. Esto ha provocado un desequilibrio en las condiciones naturales del entorno y a su vez la generación, aceleración y aumento de ocurrencia de fenómenos de origen natural como los procesos de remoción en masa (PRM).

Para el caso de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, el incremento en su población es evidente. De acuerdo con el Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de Cuajimalpa de Morelos (GCDMX, 1997) la población registrada para el 5 de noviembre de 1995 fue de 136,873 habitantes. Datos que contrastan con los de 2010 que, de acuerdo con lo publicado en el Informe Anual sobre la Situación de Pobreza y Rezago Social por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), la población aumentó a 186,391 personas, que más tarde incrementaría a 199,224 (INEGI,2015) cifra significativa considerando que los habitantes se concentran en su mayoría solo en el sector norte de la demarcación.

Aunado a lo anterior, la Alcaldía se ha consolidado como un centro de corporativos dentro de la Ciudad. Los procesos de remoción en masa se han convertido en un constante problema que afecta a los sectores social, económico y natural. Suárez (2009) reporta que producto del sismo de Kobe – Japón, 1995, los procesos de remoción en masa en las áreas urbanas generado por dicho fenómeno, fueron mayores, en dimensiones que los producidas en zonas con condiciones geológicas y topográficas similares, pero no habitadas.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El presente trabajo tiene como objetivo generar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa (deslizamientos y caídas de laderas) aplicando el método multicriterio de acuerdo con variables condicionantes, en la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos de la CDMX y dos estudios de sitio. Esto con la finalidad de proveer una herramienta que permita diseñar acciones de prevención y mitigación, así como un adecuado ordenamiento territorial.

1.2.2. Objetivos particulares.

1. Generar mapas temáticos (geológico, pendientes, uso de suelo, influencia de drenaje, etc.) de los diversos factores condicionantes a los PRM.
2. Generar un mapa de inventario de deslizamientos a partir de la integración de datos bibliográficos.
3. Elaborar un mapa de susceptibilidad a deslizamientos superficiales.
4. Elaborar un mapa de susceptibilidad a caídas.
5. Determinar y caracterizar el nivel de peligro por procesos de remoción en masa en las localidades de Las Maromas y Del Carmen en la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos.

1.3. Justificación

En la actualidad el estudio y evaluación de los peligros geológicos han tomado gran relevancia, (más aún aquellos que afectan las aglomeraciones humanas) con fines de prevención y mitigación. Dentro la Ciudad de México, geológicamente compleja, se suman factores de origen antrópicos que hacen de los procesos de remoción en masa un peligro recurrente y sumamente perjudicial. Para el caso de Cuajimalpa de Morelos los grandes cambios de pendiente, la litología propia del lugar (de naturaleza piroclástica), sus elementos

morfoestructurales, la continua presencia de asentamientos humanos irregulares, amplias modificaciones del relieve por ocupación de espacios con fines corporativos y/o habitacionales, entre otras variables, posible que el territorio presente una amplia gama de procesos gravitacionales potencialmente peligrosos.

Todo lo anterior hace necesario llevar a cabo un análisis detallado, que considere factores particulares de los procesos de remoción en masa relativos a este estudio y adaptarlos a las condiciones propias del área de interés. De esta manera los resultados del presente trabajo incrementarán la base de datos de la CDMX para evaluación y estimación de este tipo de peligros. Para, de esta manera, apoyar la toma de decisiones por parte de las autoridades, respecto al uso de suelo y planeación urbana dentro de la demarcación.

1.4. Área de estudio

1.4.1. Localización.

La Alcaldía Cuajimalpa de Morelos es una de las 16 Alcaldías que conforman a la Ciudad de México y se ubica al suroeste de ésta. Sus coordenadas geográficas extremas son: 19°24' N, 19°13' N, 99°15' W y 99° 22' W (GCDMX, 1997). La Alcaldía colinda: al norte con la alcaldía Miguel Hidalgo; al norte y poniente con el municipio de Huixquilucan perteneciente al Estado de México; al oriente con la alcaldía Álvaro Obregón y al sur con el municipio Ocoyoacac del Estado de México (Fig. 1.1).

1.4.2. Aspectos físicos.

El área que corresponde a la alcaldía Cuajimalpa de Morelos representa, de acuerdo con su Programa Delegacional de Desarrollo Urbano (GCDMX, 1997), una superficie de 8095 ha, lo que representaría el 5.1% del territorio correspondiente a la Ciudad de México. Se encuentra dentro de las cartas topográficas E14A38, E14A39, E14A48 y E14A49 de escala 1:50 000.

1.4.2.2 *Clima*

Las condiciones climáticas en el área de estudio muestran una temperatura media anual que oscila entre los 10° y 12° C. Los dos climas predominantes son C(E) (w2) (w): semifrío subhúmedo con alto grado de humedad (presente en cerca del 55% del territorio) y C (w2) (w): templado subhúmedo con alto grado de humedad (ocupa el área restante) (INEGI, 1992). En general, en cuanto la altura decrece desde la zona montañosa del territorio, la temperatura asciende. Presenta una precipitación media anual de 800 mm a 1,500 milímetros (CONABIO, 2001). La variación de la precipitación cambia, una vez más, de acuerdo con la posición geográfica; a mayor altitud (parte de sierra, al sur de la demarcación) mayor precipitación, con niveles más bajos al norte de la alcaldía.

1.4.2.3 *Vegetación*

En el poniente y centro de la Alcaldía la vegetación es de pino de conservación, lo que representa un importante generador de oxígeno; parte de esta área constituye el Parque Nacional Desierto de los Leones. Finalmente, al sur se localiza una extensa zona de matorral, mientras que en las zonas deforestadas se presentan fuertes procesos erosivos (GCDMX, 1997).

1.4.3. Geología y geomorfología regional.

La alcaldía Cuajimalpa de Morelos se encuentra dentro de la Subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac, que pertenece a la Provincia Fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana (Fig. 1.1) misma que se extiende en dirección E-W en su parte central y oriental hasta llegar a una dirección WNW-ESE en su parte occidental, desde las costas del Océano Pacífico y alcanza las del Golfo de México (Gómez Tuena et al., 2005). En ella abundan las topoformas de Sierra Volcánica con “estrato-volcanes” y en menor medida lomeríos de tobas distribuidas al norte de la demarcación.

Una de estas elevaciones es la Sierra de las Cruces (SC), la cual tiene una longitud de 110 km y un ancho variable de entre 65 y 20 km, con una marcada dirección al NNW (Marroquín,

2012). Se encuentra delimitada al sur por la Sierra de Chichinautzin (SCH) y las rampas constituidas por la Formación Tepoztlán, al este con la planicie de la Cuenca de México al oeste con la planicie de la Cuenca de Toluca y al norte con el graben de Acambay.

La actividad volcánica de la Sierra de las Cruces inició desde el Plioceno tardío y abarcó hasta el Pleistoceno. Se caracterizó por la emisión de derrames de lava y extrusión de domos de composición andesítico–dacítica de afinidad calco-alcalina que se alterna con flujos piroclásticos de bloques y cenizas, flujos de pómez, oleadas piroclásticas, depósitos de caída, flujos de escombros y lodo, así como repetidos colapsos que originaron depósitos de avalanchas (García Palomo et al., 2008). Todo lo anterior ha sepultado rocas de composición andesítica profundamente erosionadas del Terciario medio que corresponden a la Formación Xochitepec (De Cserna et al., 1987).

La Sierra de las Cruces ha sido dividida a partir de sus características morfoestructurales), en tres bloques: norte, centro y sur por García-Palomo et al. (2008). Se encuentran delimitadas por tres principales sistemas de fallas, con orientaciones preferenciales N-S (orientación variable entre los N15°W y N°20E, sistema más antiguo), NE-SW (varía de N45° E a N65° E) y E-W (es el sistema más claro principalmente en el bloque sur con orientaciones de N75° E a S80° W). De acuerdo con lo anterior se establece que la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos pertenece al bloque centro.

Este bloque, se encuentra delimitado al norte por una amplia zona de falla. En primer lugar, se tiene a la falla Ixtlahuaca (García- Palomo et al., 2008) con una orientación E-W, longitud de 30 km y 6 km de ancho y a la cual se asocian una serie de fallas secundarias con arreglos escalonados, que se prolongan hasta convertirse en la falla Otomí, que presenta una amplia zona de deformación caracterizada por brechas y harina de falla. Se le asocian además fallas secundarias con un arreglo en *échelon*. La falla Otomí se releva con la fosa de Barrientos, estructura constituida por un conjunto de fallas normales, orientadas ENE y E-W y con

buzamiento al N y S (García-Palomo et al., 2008). El límite entre el bloque central y sur lo ocupa una zona compleja de fallas con orientación E-W, conocida como fallas Tenango (Fig. 1.2) (García Palomo et al., 2008). Esta misma falla sigue al E como las fallas Xochimilco y Jicomulco de orientación E-W (García Palomo et al., 2008).

De acuerdo con el análisis de Marroquín (2012), la relación de los tres sistemas de fallas genera en la Sierra de las Cruces levantamiento, hundimiento, escalonamiento y basculamiento de los mismos. Propone que esto es provocado por una extensión perpendicular a la dirección de las fallas, lo que conllevaría el hundimiento gradual del bloque central –bloque donde se encuentra la Alcaldía Cuajimalpa- respecto al bloque norte y sur.

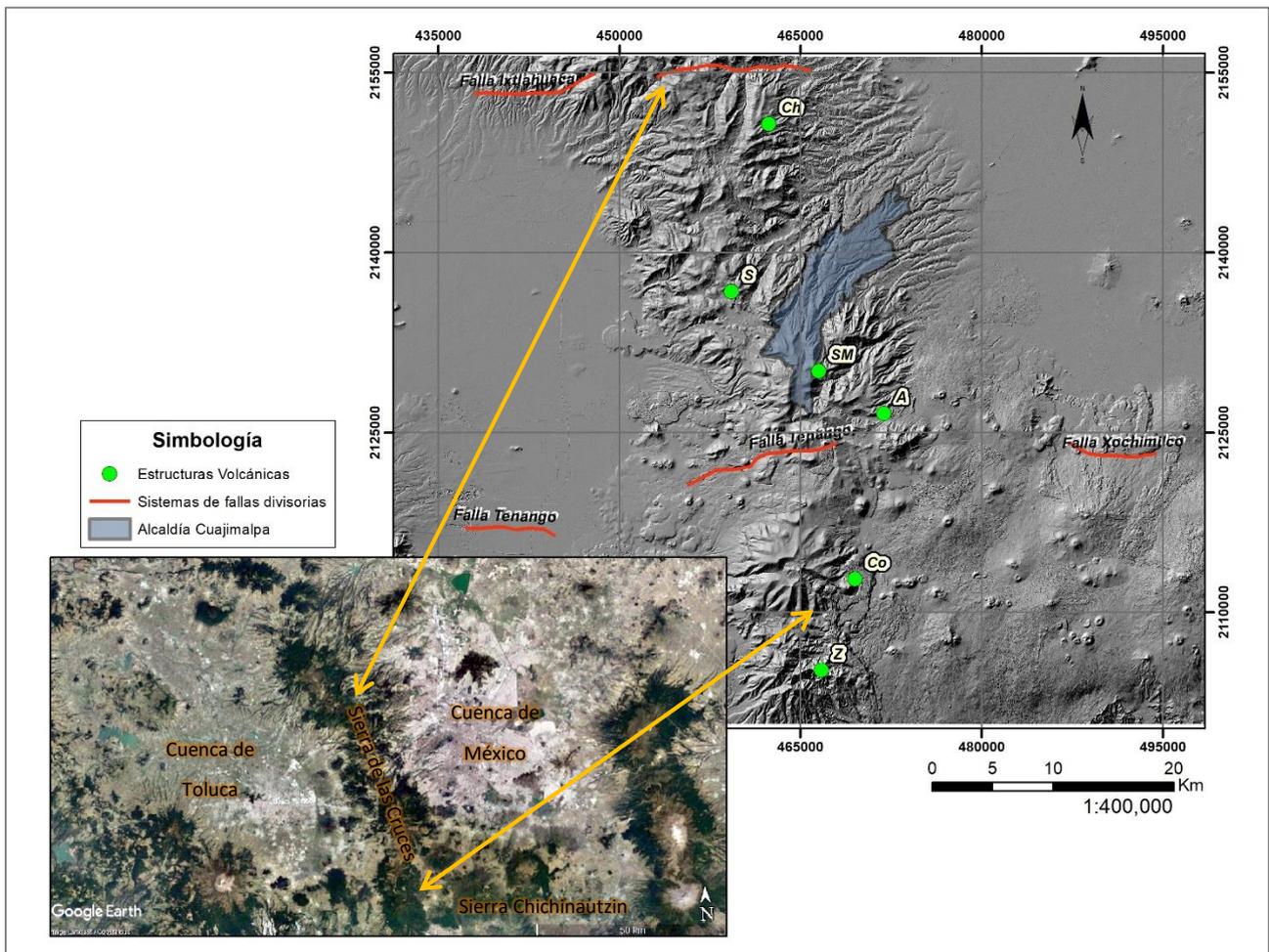


Fig. 1.2 a) Localización de la Sierra de las Cruces b) Muestra la Alcaldía Cuajimalpa dentro del bloque central de la Sierra de las Cruces, así como algunas de las estructuras volcánicas que la componen: Ch) Chimalpa, S) Salazar, SM) San Miguel, A) Ajusco, Co) La Corona y Z) Zempoala.

Morfológicamente el territorio se clasifica en zona de montañas (Fig. 1.3) que, desde la planicie hacia la cima de la demarcación, inicia una sección de “piedemonte”; que se trata en realidad de una rampa compuesta por piroclastos y materiales propios de erosión y denudación. La sierra concentra las siguientes estructuras volcánicas: La Palma (3810 msnm), San Miguel (3800 msnm), El Cochinito (3760 msnm) y El Ángel (3330 msnm) (Secretaría de Protección Civil, 2014).

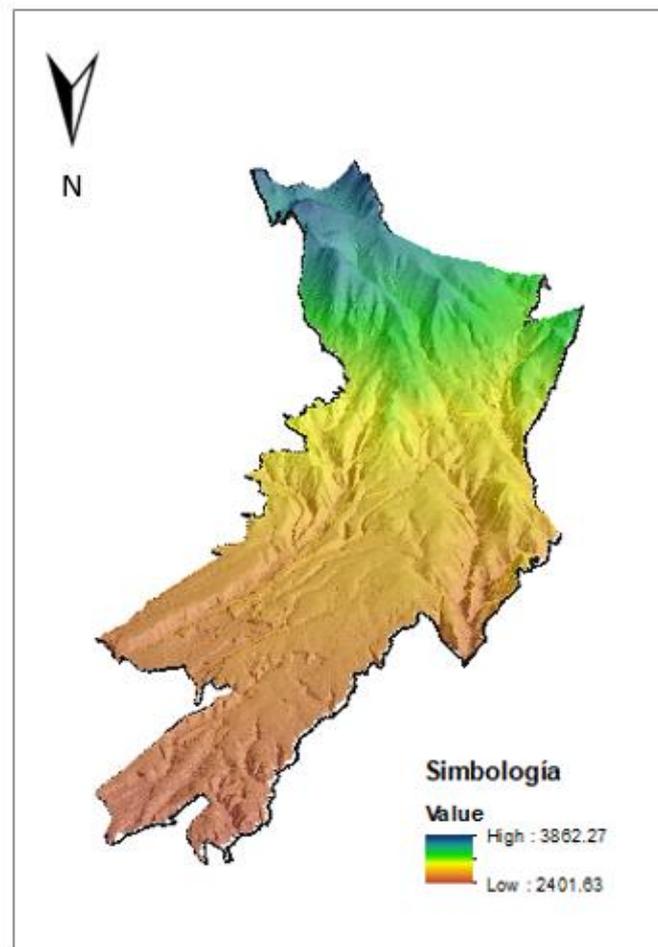


Fig. 1.3 Perspectiva oblicua de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, en él se puede observar la morfología del área de estudio, además de sus variaciones

Otro rasgo característico dentro del área de estudio es la presencia de barrancas a lo largo de la demarcación, aspecto que se acentúa en la parte sur y al inicio de la zona del piedemonte. Conforme al Reglamento de la Ley Ambiental del Distrito Federal (1993) una barranca es “la hendidura formada en el terreno por el flujo natural del agua o por las condiciones topográficas

o geológicas, cuya profundidad es mayor a cinco metros y a dos veces su anchura y su longitud es superior a cuarenta metros”. En el año 2000 se complementó esta descripción “sirven de refugio de vida silvestre, de cauce de los escurrimientos naturales de ríos, riachuelos y precipitaciones pluviales, que constituyen zonas importantes del ciclo hidrológico y biogeoquímico”.

Cuajimalpa de Morelos es la Alcaldía, dentro de la Ciudad de México con mayor cantidad de barrancas, con el 41% de ellas, por encima de las Alcaldías Álvaro Obregón, Miguel Hidalgo y Magdalena contreras (Tabla 1) (PAOT, 2010). Sus morfologías son variadas entre barrancas con forma de “U” que se caracterizan por tener la parte del fondo ancha y laderas menos escarpadas, en comparación con las barrancas en forma de “V”, que suelen tener menor grado de estabilidad y con mayor cantidad de procesos erosivos. Además de su origen, se suelen asociar con la traza de una falla. Las barrancas del primer tipo se localizan al noreste de la Alcaldía, particularmente en Santa Fe, existe un fuerte modelado antrópico que originó su morfología actual (GODF, 2013).

Esto cobra importancia cuando se considera la definición de barranca, la cual establece que este rasgo geomorfológico delimita cuencas y/o subcuencas al servir de controladores de cauces y escorrentías. De esta forma son “conductores” de filtraciones a las zonas más planas localizadas al norte de la delegación.

En años recientes el relieve de la Alcaldía se ha visto modificado por factores antrópicos, en su mayoría relacionados con la ocupación de asentamientos irregulares, estos en las laderas de barrancas o por cortes para construcción. Esto ha tenido implicaciones que se suman al cambio del relieve como la remoción de cobertura vegetal, la modificación de las condiciones hidrológicas del lugar, pérdida de suelo y contaminación por desechos, entre muchos otros factores.

Tabla 1. Nombre y cantidad de barrancas de las Alcaldía Cuajimalpa de Morelos y circundantes

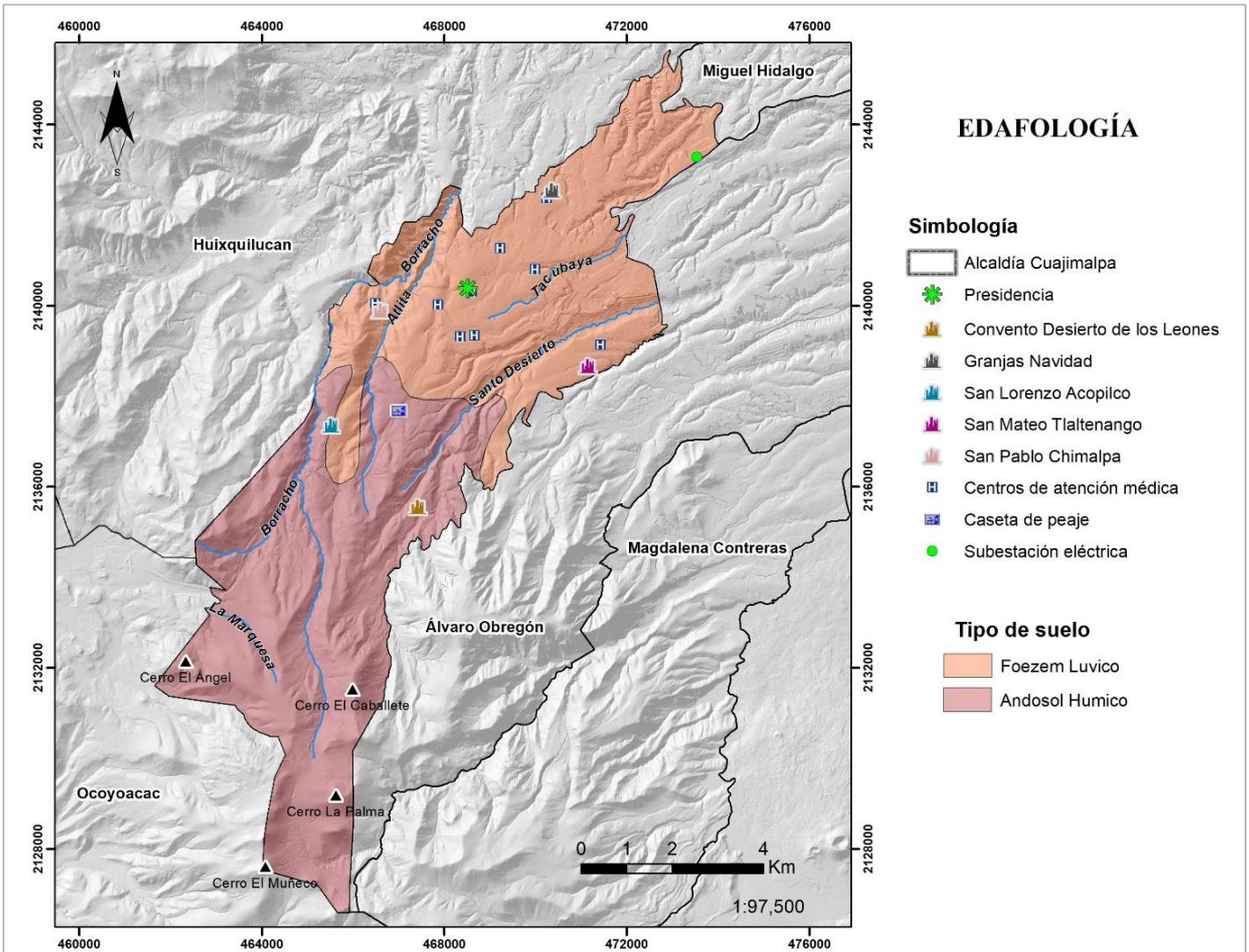
Álvaro Obregón	Cuajimalpa de Morelos	Magdalena Contreras	Miguel Hidalgo
Atzoyapan	Aguazul	Anzaldo	Barrilaco
B del muerto	Arroyo Borracho	Eslava	Bezares
El Moral	Cañada Lomas	La Coyotera	Carpatos
Guadalupe	Chamixto	Río Magdalena	Dolores
Malinche	Echánove	Texcalatlaco	El Castillo
Mixcoac	El Zapote	Teximaloya	Tecamachalco
Parque La Loma	Hueyatla		
Puente Colorado	Hueyatlaco		
Puerta Grande	La Diferencia		
Río Becerra	Los Helechos		
San Borja	Milpa Vieja		
Tacubaya	Moneruco		
Tarango	Muculoa		
Tlalpizahuaya	Oyametitla		
	Pachuquilla		
	Hípico la Sierra		
	Santa Rita		
	Santo Desierto		
	Vista Hermosa		

Tomado de PAOT (2010).

1.4.4. Edafología

De acuerdo con el portal de Geoinformación en el Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (2001) en la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos predominan dos tipos de suelos (Fig. 1.4):

- a) Andosoles: dominante en la porción sur de la Alcaldía (parte alta), suelos característicos de ambientes montañosos, de apariencia oscura, producto de la acumulación y meteorización de materiales volcánicos como ceniza, pómez y demás productos piroclásticos el espesor de esta unidad suele rondar los 10 cm (GODF, 1997).
- b) Luvisoles: con presencia en el sector norte de la Alcaldía, los luvisoles cuentan con una mayor presencia relativa de arcillas, es decir, a mayor profundidad en su espesor existe mayor contenido de arcilla, mismo que disminuye progresivamente en niveles superficiales. Se forman a partir de materiales no consolidados en su totalidad e incluso



depósitos eólicos, aluviales y coluviales y son característicos de ambientes de pseudo planicie o pendientes bajas (FAO, 2008)

1.4.5. Hidrogeología.

La Sierra de las Cruces es la frontera entre las dos cuencas a mayor altura dentro de la Faja Volcánica Transmexicana; la cuenca de México de carácter endorreica y la cuenca de Toluca (García- Palomo et al., 2008) que desembocan por medio del río Lerma-Santiago (Fig. 1.5). El escarpe oriental de la Sierra de las Cruces (sobre el que se encuentra la Alcaldía) representa también el límite occidental de la cuenca de México. Cuajimalpa de Morelos se encuentra dentro del acuífero Zona Metropolitana de la CDMX, contiene siete microcuencas definidas

como: Arroyo Agua de Leones, Arroyo Santo Desierto, Río Tacubaya, Río Becerra, Río San Joaquín, Río Barrilaco y Río Magdalena (GODF, 2013). Estas microcuencas tienen algunos elementos fluviales de importancia (Fig. 1.5):

- Río Borracho: con una longitud de 12.6 km., inicia en la cota 3,350 msnm en el Estado de México y se integra al territorio de la Alcaldía de forma paralela al límite del Estado. Durante su recorrido hasta la confluencia con el Río Atitla recibe una serie de aportaciones de aguas y residuales de distintos pueblos y descarga de colectores (GODF, 2013).
- Río Tacubaya: este río tiene una longitud de 1.35 km. La corriente principal se origina dentro de la Unidad Habitacional Villas de Cuajimalpa. En su tramo inicial se encuentra entubado y en su desarrollo se encuentran tramos revestidos de concreto y entubados. (GODF, 2013)
- Río Atitla: la mayor parte de su recorrido es por las inmediaciones del pueblo de San Pablo Chimalpa. Recibe recargas de aguas negras de diferentes Colonias (GODF, 2013)
- Río Santo Desierto: a pesar de un inicio en condiciones de limpieza dentro del Parque Nacional Desierto de los Leones, este río recibe importantes aportes de contaminación según interactúa con entornos urbanizados (Legorreta, 2013).
- Río La Marquesa: este río que inicia su cauce en la parte alta del Parque Nacional Miguel Hidalgo y Costilla sigue su paso hacia el Estado de México.
- Corriente Agua de Leonel

De acuerdo con la Gaceta Oficial del Distrito Federal (2013) la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos es uno de los centros más húmedos de la cuenca de México, ya que coinciden en el territorio factores como las entradas de humedad y escasa pérdida de ella por evaporación y transpiración. El exceso de humedad se acumula en el fondo de las barrancas (abundantes en la zona) y en las laderas que están orientadas al norte y expuestas a menor radiación solar. El

tipo de vegetación propias de la morfología de barrancas (profundas y estrechas) mantiene la humedad, lo que favorece la recarga de agua al subsuelo.

Conforme a la Comisión Nacional del Agua a la captación de aguas, se le suma la presencia del sistema de fracturas y fallas, alineadas de forma paralela a las corrientes intermitentes. Reportan un nivel freático de 200 a 250 metros, que representan los valores más altos de profundidad en el acuífero de la Zona Metropolitana del Valle de México (GODF, 2013).

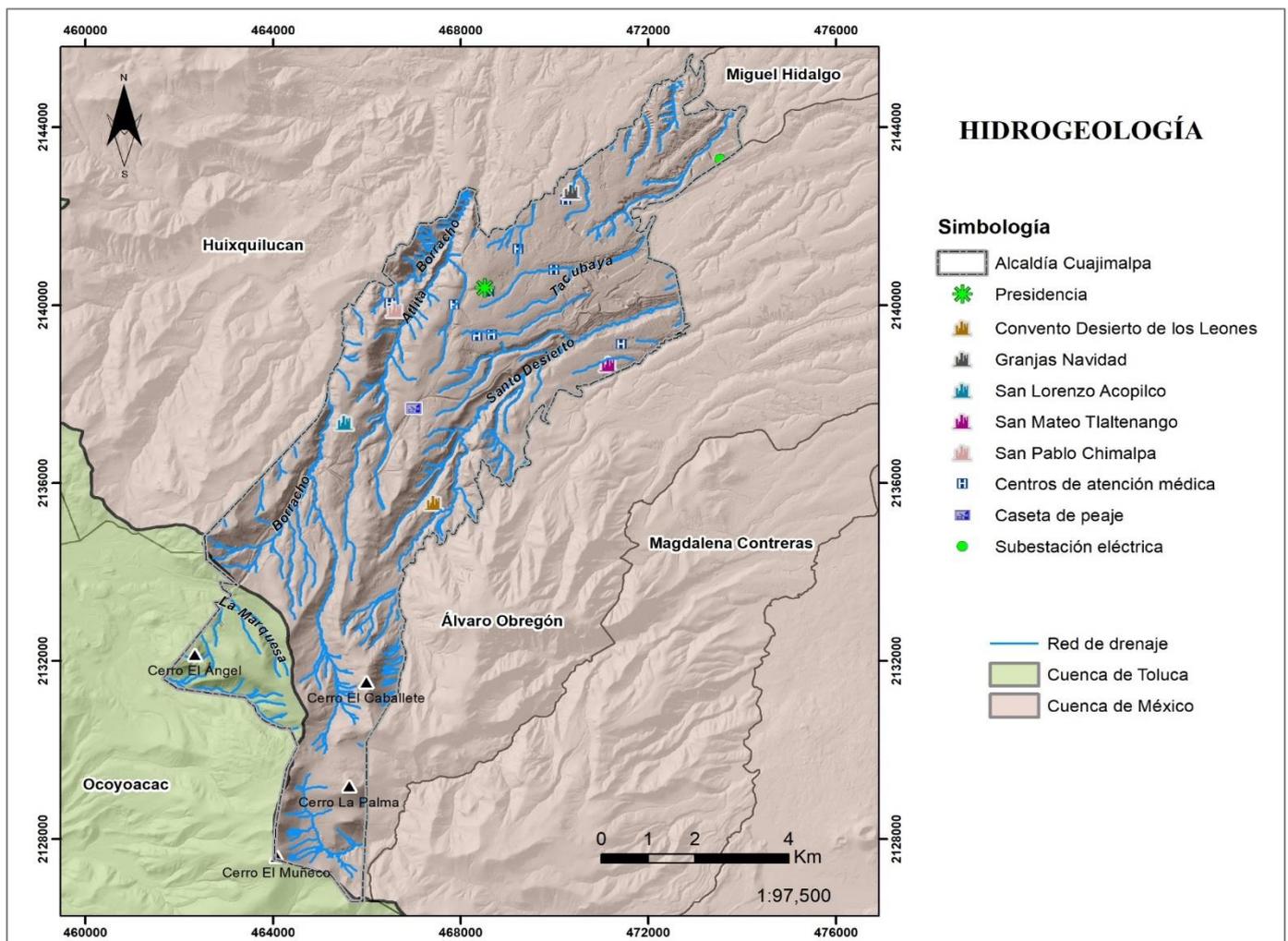


Fig. 1.5 Mapa hidrogeológico de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos. Modificada de INEGI (2014)

2. Marco teórico

2.1. ¿Qué son los procesos de remoción en masa?

Actualmente existe una gran variedad de términos utilizados para referirse a los procesos de remoción en masa. Se ha definido como deslizamientos (por la traducción al español de la palabra original *landslide*), movimientos del terreno, movimientos de ladera, procesos gravitacionales, procesos de ladera, etc. (CENAPRED, 2014). En el presente trabajo se utilizará el concepto de Procesos de Remoción en Masa (PRM), mismo que fue introducido por Penck (1894), de acuerdo con Alcántara (2000). Los PRM son un peligro de origen geológico, entendiendo por peligro al fenómeno natural caracterizado por una probabilidad de recurrencia, magnitud e intensidad de manifestación determinada; que puede producir efectos adversos en sectores como población, producción, infraestructura, bienes y servicios y el ambiente (Obregón y Lara, 2014).

De acuerdo con el trabajo de Alcántara (2000) los procesos de remoción en masa involucran el movimiento de los materiales formadores de las laderas bajo la influencia de la gravedad sin asistencia primordial de algún agente de transporte fluido. La movilización de este material ocurre sobre laderas principalmente, pero depende del tipo de PRM. Es importante señalar, que “las laderas son zonas de la superficie de la Tierra donde suelen afectar en mayor grado los procesos erosivos (geodinámicos y/o climáticos) y su relieve tiende a modificarse para buscar un nuevo equilibrio exigido por dichas variaciones” (Quintana y Texidó, 2013, p5). Lo anterior concuerda con lo expresado por CENAPRED (2014) donde se menciona que las laderas se encuentran en una constante situación de inestabilidad, lo que facilita la ocurrencia de este tipo de movimientos con la asistencia de otros factores. Algunos de sus componentes son pie, pata o base que corresponde al sitio donde se da el cambio brusco de pendiente en la parte inferior

y final del depósito, con forma generalmente cóncava, en contraste con la cabeza, cresta, cima o escarpe que corresponde al cambio de pendiente abrupto, pero en la parte superior de la ladera con forma generalmente convexa (Fig. 2.1). La altura que corresponde a la distancia vertical entre el pie y la cabeza, en ocasiones es difícil de cuantificar. Se añade la pendiente que es la medida de la inclinación de la superficie del talud o ladera. La pendiente se puede medir tanto en grados, porcentaje o relación m:1, en esta última m es la distancia horizontal, contra su correspondiente con una unidad de distancia vertical, donde 45° correspondería a 100%.

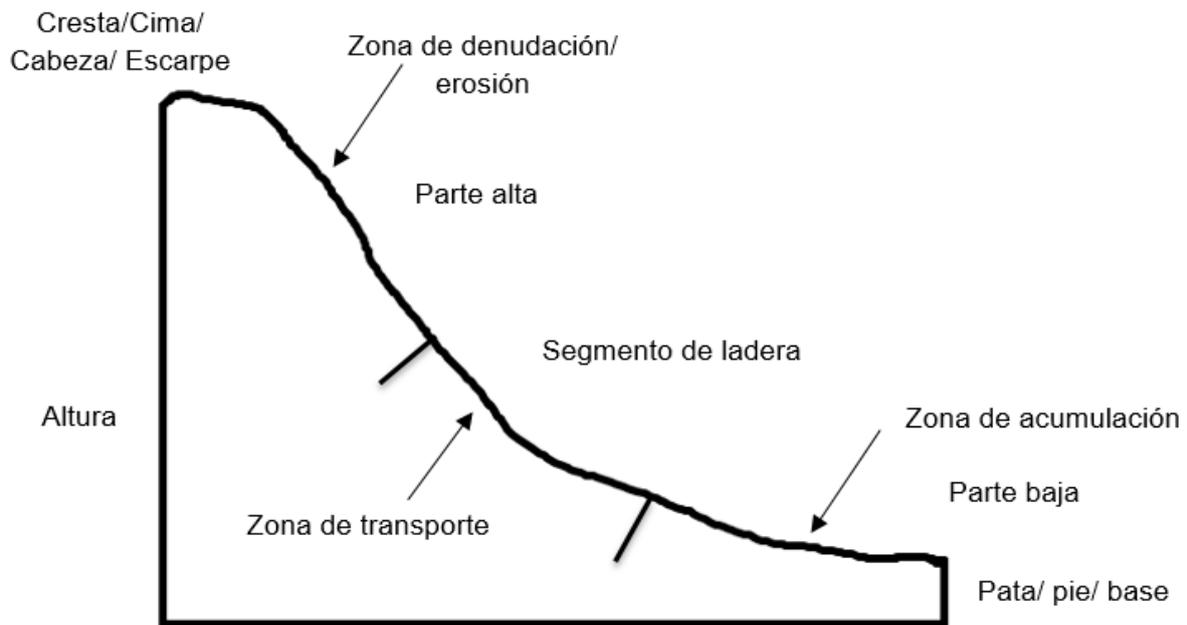


Fig. 2.1 Morfología típica de una ladera. Modificado de Suárez (2009).

Otra definición en cuanto a procesos de remoción en masa, los describe como procesos de transporte de material definidos como de “movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores” (Hauser, 1993, p.11). Estos factores pueden ser intrínsecos o externos al material de la ladera en sí. Una descripción reciente realizada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (Highland & Bobrowsky, 2008) llama a los PRM como un movimiento descendente de roca y/o suelo que ocurre en una superficie de ruptura y en el que el material se mueve como una masa coherente

o semi-coherente con poca deformación interna. Esta movilización puede ser lenta o rápida debido a la acción de la gravedad (Obregón y Lara, 2014). Suárez (2014, pp. 3) concuerda en que “los movimientos ocurren a lo largo de superficies de falla” agrega además en que “la ocurrencia de deslizamientos es producto de las condiciones geológicas, hidrológicas y geomorfológicas y la modificación de éstas por procesos geodinámicos, vegetación, uso de tierra y actividades humanas, así como la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y la sismicidad” (pp. 522).

Por esta razón para que un proceso de remoción en masa suceda es necesaria la intervención de múltiples factores. Estos factores se han dividido en dos grupos principales de causas (factores) fundamentales, de tipo externo e interno (Alcántara, 2000) y que serán abordadas con mayor profundidad en apartados más adelante (2.3 y 2.4).

Para la mejor comprensión y caracterización de los procesos de remoción en masa, Suárez (2009) presenta un modelo idealizado (Fig. 2.2) de los componentes de lo que él llama deslizamientos. Sin embargo, este modelo no es aplicable para todos los tipos de movimiento, se tendrá que adaptar a cada uno de ellos para su descripción. Es importante recordar que el modelo no se presentará siempre de la misma forma ni con los mismos componentes (Tabla 2), incluso al tratarse de un mismo tipo idealizado de PRM.

Una característica importante adicional de los procesos de remoción en masa, es su velocidad de avance. Esta característica es determinante en el impacto y daño causado, ya que de acuerdo con la escala de velocidad de remoción en masa introducida por Cruden y Varnes (1996), a mayor velocidad, mayor será su efecto negativo. El CENAPRED (2014) agrega que la velocidad del movimiento aumenta, al incrementarse el contenido de agua dentro del material y conforme aumenta la inclinación del terreno.

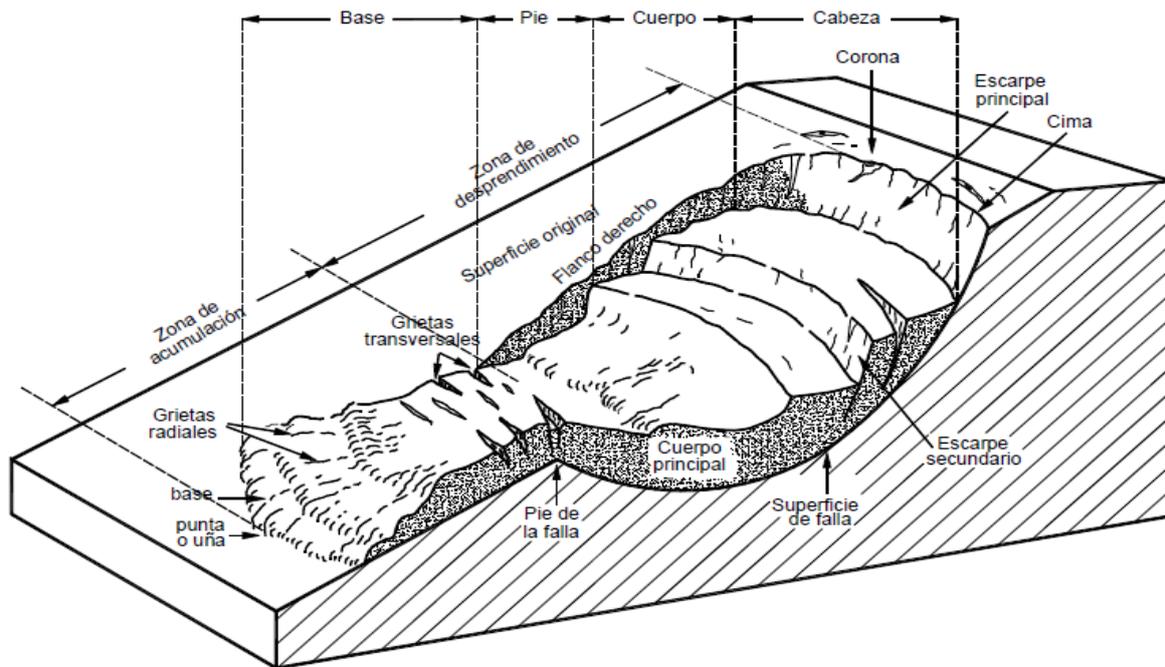


Fig. 2.2 Componentes de un movimiento idealizado. Recuperado de Suárez (2009)

2.2. Tipos de PRM

La controversia de terminología entra también cuando se pretende clasificar a un PRM. Con fines de practicidad se ha adoptado la clasificación propuesta por Varnes en 1978, que posteriormente fue modificada por la EPOCH en 1993 (The Geological Society, s.f). Esta clasificación, que retoma Alcántara (2000), es definida por las dos variables más importantes dentro de un proceso de remoción en masa:

- Mecanismo de movimiento: Caídas, vuelcos o desplomes, deslizamientos, expansiones laterales, flujos y movimientos complejos.
- Material involucrado: Rocas, detritos y/o suelos. Entendiendo por roca, aquella masa dura o firme que se encontraba intacta en su lugar natural antes de iniciar el movimiento. Los detritos en cambio, contienen una importante porción de materiales gruesos (entre 20 y 80%), es decir, mayores a 2mm en tamaño. El suelo se establece como un agregado de partículas sólidas que pudieron haberse formado *in situ* por la erosión de rocas preexistentes en el lugar o haber sido

transportadas hasta ahí. Estas partículas pueden ser minerales y rocas en los que los poros formados entre ellas son llenados con gases o líquidos, agentes también formadores del suelo. (Varnes, 1978).

Tabla 2. Descripción de los componentes de un movimiento.

Componente	Descripción
Cabeza	Corresponde a la parte superior del material que se mueve. La cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud.
Cima	Punto más alto de la cabeza.
Corona	Por encima de la cabeza, se refiere al material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado.
Escarpe principal	Superficie muy inclinada a lo largo de la cima, causada por el desplazamiento del material. La continuación de la superficie de escarpe dentro del material conforma la superficie de falla.
Escarpe secundario	Superficies inclinadas originadas por el desplazamiento diferencial dentro de la masa en movimiento.
Superficie de falla	Se trata del área por debajo del material, delimita el volumen del material desplazado, por debajo de ella no existe movimiento mientras que por encima sí lo hay.
Base	Área cubierta por el material movilizado abajo del pie de la superficie de falla.
Punta o ña	Punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima
Cuerpo principal del deslizamiento	Comprende al material desplazado (material por encima de la superficie de falla). Se pueden presentar varios cuerpos en un mismo PRM
Costado o flanco	Perfiles laterales del movimiento, limitantes. La delimitación del flanco izquierdo y derecho se hace colocándose en la parte alta del movimiento, una vez ahí nuestro lado derecho corresponderá al flanco derecho y por ende el lado izquierdo al flanco derecho.

Recuperado de Suárez, 2009

Tabla 3. Escala de velocidades para procesos de remoción en masa propuesta por Cruden & Varnes (1996).

Clase según velocidad	Descripción	Velocidad (m/s)	Velocidad típica
7	Extremadamente rápido	5	5 m/s
6	Muy rápido	0.05	3 m/min
5	Rápido	5×10^{-4}	1.8 m/hr
4	Moderado	5×10^{-6}	1.3 m/mes
3	Lento	5×10^{-8}	1.6 m/año
2	Muy lento	5×10^{-10}	16 mm/año
1	Extremadamente lento	$< 5 \times 10^{-10}$	<16 mm/año

Extraído de Lara y Sepúlveda, 2008

De esta manera se tienen 18 de tipos de procesos de remoción en masa que de acuerdo con el mecanismo de movimiento en combinación con el material involucrado tendrán características distintivas.

2.2.1 Caídas

Este tipo de PRM (Fig. 2.3) es descrito por Alcántara (2000) como, los movimientos en caída libre (de cualquiera de los posibles materiales involucrados) originados por el desprendimiento del material de una superficie inclinada. Este material en su trayecto puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir (posterior al desprendimiento) ladera abajo. Este proceso suele ser de rápido a muy rápido. Una caída empieza con el desprendimiento de material de una pendiente pronunciada a lo largo de una superficie, en donde se ha producida poca o nulo desplazamiento de cizalla (Highland & Bobrowsky, 2008). Durante la caída, los materiales podrán adquirir una alta energía cinética, teniendo la capacidad de acumular material en el pie del movimiento (Lara y Sepúlveda, 2008). De acuerdo con Suárez (2014), esta acumulación es

llamada escombros o *talus* y generalmente se depositan en forma de conos. Suelen presentar cierta “gradación”, con los bloques de mayor tamaño hacia la parte inferior del depósito.

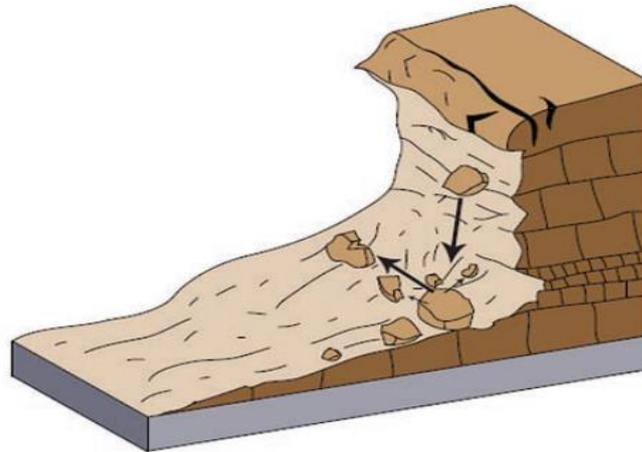


Fig. 2.3 Esquema de una caída de roca típica controlada por una pendiente abrupta, en la parte superior se puede observar la corona de desprendimiento, y la presencia de discontinuidades que controlan el tamaño de los bloques. Extraído de Highland & Bobrowsky, 2008.

En general, las caídas de roca son abruptas y muy comunes en pendientes que tienden a lo vertical. El volumen del material caído varía de acuerdo con cada caso específico, son movimientos de muy rápidos a extremadamente rápidos y depende en su mayoría de la pendiente de la ladera (Highland & Bobrowsky, 2008). Si bien las rocas suelen ser el material más común para este tipo de PRM también se pueden generar en detritos y menor medida en suelos.

Suárez (2009) establece que la velocidad de caída es directamente proporcional a la altura de la ladera de donde se desprende, por lo que: $V = \sqrt{2gh}$

Donde:

g = aceleración debida a la gravedad

h = altura de caída

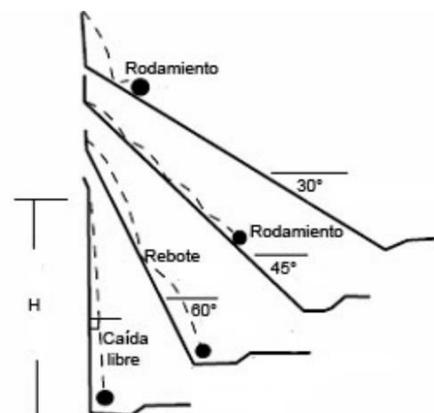


Fig. 2.4 Tipos en las que se puede dar el movimiento de caída principalmente en rocas, los cuales dependen de la inclinación de la ladera que determina la cantidad de contacto del caído con la ladera y viceversa. Tomado de Lara, 2008.

2.2.2 Vuelcos o desplomes

Consiste en la rotación del material entorno a un eje o pivote, determinado por su centro de masa hacia la parte extrema (Alcántara, 2000; Highland & Bobrowsky, 2008). Por su naturaleza, este tipo de proceso de remoción en masa se ve favorecido en materiales rocosos con sistemas de discontinuidades paralelas entre sí (Fig. 2.5) como diaclasas o grietas, incluso por la disposición del material, y en menor medida, en suelos cohesivos secos y residuales. En estos terrenos las grietas de tensión, la cohesión de materiales, altura y pendiente, determinan el volumen y magnitud del PRM (Suárez, 2009).

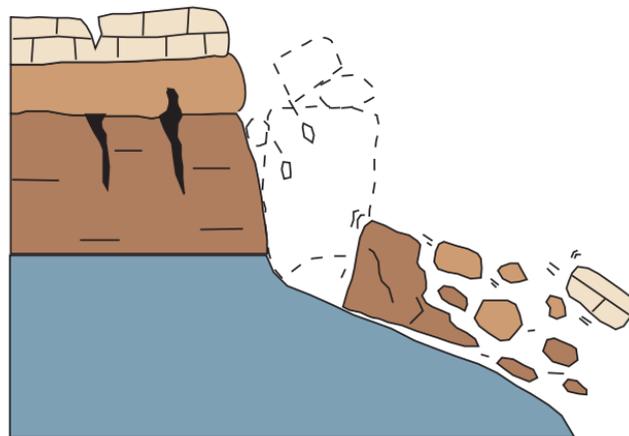


Fig. 2.5 Esquema de un vuelco en roca controlado por las discontinuidades del material, que seccionan la masa en bloques columnares. Extraído de Highland & Bobrowsky, 2008.

Este proceso de remoción en masa no suele restringirse a una velocidad específica, sino que son variable entre extremadamente lentos a extremadamente rápidos, esto dependerá de la cantidad de material involucrado y de la superficie de ruptura que va desde un punto hasta un eje (Fig. 2.6). El también llamado “*toppling*” puede ser originado por dos condiciones principales (Lara y Sepúlveda, 2008): por el peso del material que se encuentra ladera arriba o por fuerzas de extensión que desintegran el material. Estas pueden generarse por discontinuidades orientadas en dirección contraria a la pendiente de la ladera rellenas de agua o hielo.

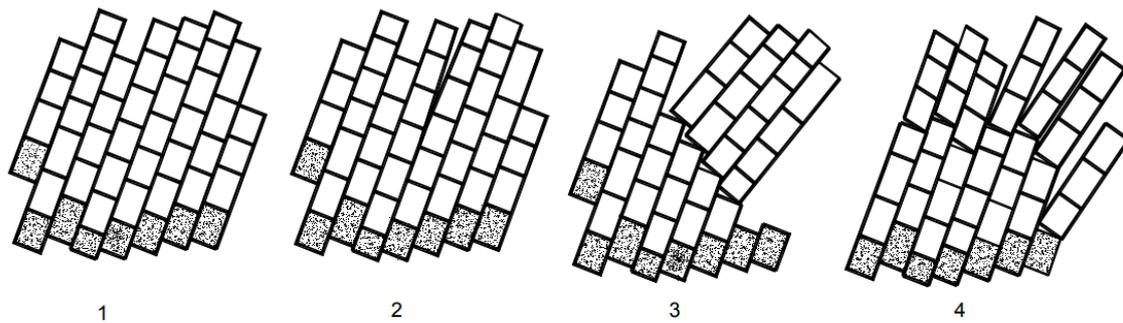


Fig. 2.6 Maneras en las que bloques de roca podrían fallar. Extraído de Lara, 2008.

2.2.3 Deslizamientos

Un deslizamiento es un movimiento ladera abajo de masas de suelo o roca a través de superficies de cizalla definidas (Corominas, 2000). Este movimiento no ocurre a lo largo de toda la superficie de ruptura simultáneamente, comienza en zonas donde se generan fallas locales, a menudo evidenciadas por grietas de tensión en la superficie original a lo largo de la cual se formará el escarpe principal del deslizamiento. El inicio de estos desplazamientos se produce cuando el esfuerzo de cizalla supera el valor del esfuerzo normal y la resistencia del suelo en dicha superficie. Cuanto mayor sea la pendiente mayor es la componente de cizalla lo que genera que los deslizamientos sean más frecuentes (Hauser, 1993).

Este tipo de procesos de remoción en masa se genera sobre una superficie de ruptura que provoca el movimiento de una masa de material (Alcántara, 2000). La superficie de ruptura (que puede ser de dos tipos) condiciona el tipo de movimiento de acuerdo con su forma. A continuación, se describe el mecanismo de movimiento a partir de la geometría de la superficie de ruptura.

2.2.3.1 Deslizamientos rotacionales

Su principal característica es que su superficie de ruptura es curva o cóncava por lo que el movimiento del material es rotacional (Fig. 2.7) (Alcántara, 2000). Presenta una muy baja deformación interna del material, en donde, su movimiento es como el de una masa semicoherente a lo largo de la superficie de ruptura. Estos PRM pueden presentar velocidades extremadamente lentas a moderadamente rápidas (Highland & Bobrowsky, 2008).

De acuerdo con Highland & Bobrowsky (2008), este tipo de PRM se ve favorecidos por el contenido de agua en la ladera y el lugar geográfico. Lara y Sepúlveda (2008) hacen hincapié en que los materiales no siempre son uniformes, por lo que es otro aspecto importante en su ocurrencia.

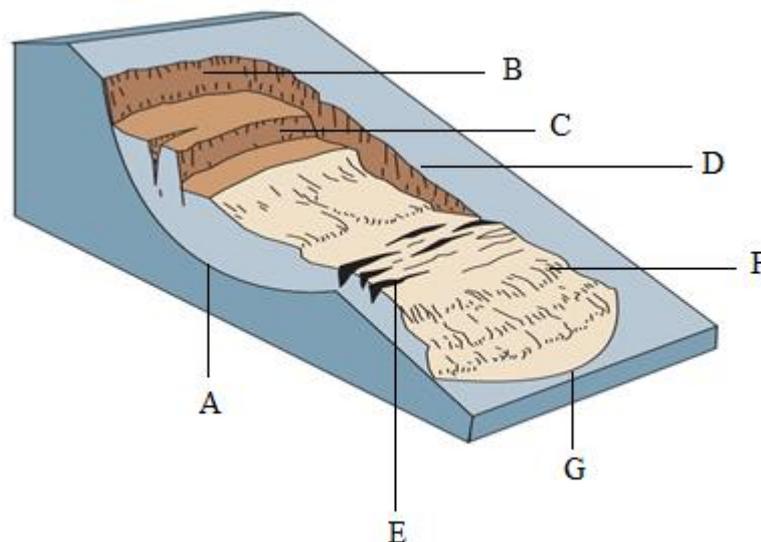


Fig. 2.7 Esquema de un deslizamiento rotacional. Se pueden observar A) Superficie de ruptura –cóncava/curva- B) Escarpe principal C) Escarpe secundario –escalonamiento- D) Flanco izquierdo E) Grietas transversales F) Grietas radiales G) Punta. Modificado de Highland & Bobrowsky, 2008.

“La generación de este tipo de remoción está asociada a pendientes que varían entre 20° y 40°” (Lara y Sepúlveda, 2008). A partir del desplazamiento inicial del material, se crea una morfología típica en estos procesos de remoción a manera de “escalonamiento” del depósito, generado por la rotación del material sobre la superficie de ruptura. Con mayor frecuencia el

escalonamiento se encuentra hacía la cabecera del movimiento (Lara y Sepúlveda, 2008). Este tipo de movimiento suele ser muy peligroso debido a que sus dimensiones se rigen por la topografía del terreno, y el volumen del material desplazado lo que hace posible que cubra grandes áreas.

2.2.3.2 Deslizamientos traslacionales

En este tipo de deslizamiento el movimiento de material ocurre sobre una superficie de ruptura plana o semiplana (Fig. 2.8). Esta superficie de ruptura suele presentarse a menor profundidad que en los deslizamientos rotacionales (Alcántara, 2000; Lara y Sepúlveda, 2008). El deslizamiento suele estar controlado por discontinuidades propias del terreno como fallas, diaclasas, fracturas, superficies de contacto ya sea entre litologías o roca-suelo, mismas que terminan las zonas de mayor debilidad (Lara y Sepúlveda, 2008). Estos tipos de deslizamientos pueden llegar a ser extensos ya que la superficie de ruptura y su inclinación lo permiten, por lo que pueden continuar deslizándose a distancias considerables y a velocidades mayormente moderadas (aunque suele aumentar de acuerdo con el contenido de agua y material, los detritos, por ejemplo, aumentan su velocidad (Highland & Bobrowsky, 2008).

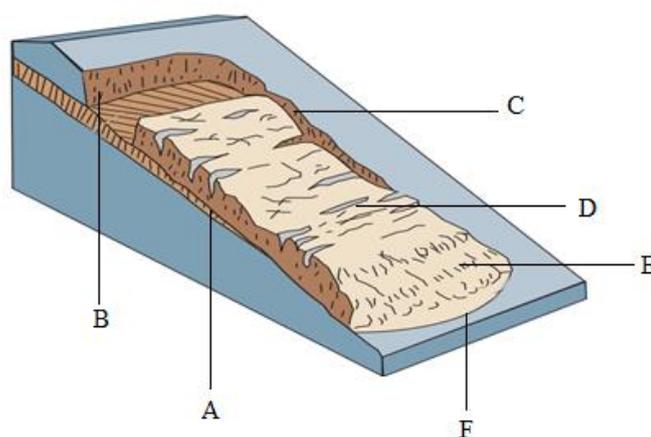


Fig. 2.8 Deslizamiento traslacional en donde se observa A) la superficie de ruptura plana, B) el escarpe principal, C) flanco izquierdo, D) grietas transversales, E) grietas radiales, F) pie del movimiento. Modificado de Highland & Bobrowsky, 2008.

Ambos casos suelen tener grietas transversales, en relación con el escarpe, siendo premonitores del deslizamiento. Por otra parte, en zonas donde han ocurrido deslizamientos se modifican las condiciones de drenaje (desde cambiar hasta la obturación). Otra señal de que ocurre este PRM es la alineación/remoción/ inclinación de la vegetación presente en el área afectada (CENAPRED, 2019).

2.2.4 Expansiones Laterales

Las expansiones laterales consisten en la fragmentación y expansión del material expuesto en superficie (Alcántara, 2000) (Fig. 2.9); “los límites del movimiento en superficie se presentan difusos y difíciles de distinguir” (Lara y Sepúlveda, 2008, pp.51). De acuerdo con Alcántara (2000) el cuadro típico de estos movimientos, lo define la existencia de dos capas con distintas granulometrías; el material de la capa inferior presenta licuefacción (esta licuefacción puede ser desencadenada por otro PRM previo o un movimiento sísmico). Lara y Sepúlveda (2008) asumen que el terreno puede “responder” a la licuefacción de dos formas: 1) en bloques, mismos que suelen ser lentos y presentar gran extensión (hasta varios kilómetros). En este caso la capa superior (de gran espesor) es de roca y la inferior contiene un material más blando; la capa de roca se fractura, esas fracturas son rellenadas con el material debajo de él, mismo que sube por confinamiento; y 2) licuefacción del suelo, en donde la capa inferior (de suelo o material blando) es de gran espesor o al menos, mayor que la capa superior. Los bloques generados en la superficie se hunden en la capa que los subyace, lo que podría ocasionar la formación de grábenes y flujos en el pie de la masa desplazada.

Algunos factores que desestabilizan las capas débiles, además de la licuefacción son la sobrecarga natural o antrópica sobre el terreno encima de ella, saturación de la capa, o la deformación plástica del material a profundidad, por ejemplo, sal (Highland & Bobrowsky, 2008).

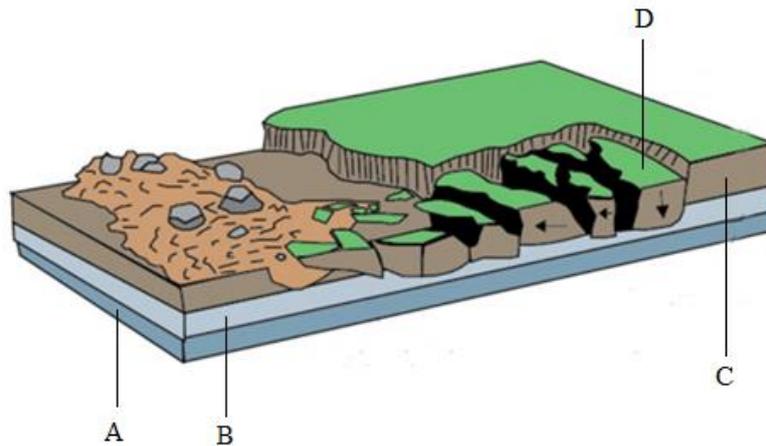


Fig. 2.9 Esquema de una extensión, se muestran sus partes A) Capa de roca que subyacente donde no ocurre la licuefacción B) Capas de arcilla blanda con limo y arena típicamente hidratadas, c) Capa superficial de material firme y D) Bloques creados por la extensión lateral. Modificado de Highland & Bobrowsky, 2008.

2.2.5 Flujos

Los flujos son movimientos espacialmente continuos en los que las superficies de cizalla son de corta duración (Fig. 2.10) (Highland & Bobrowsky, 2008). Las superficies de ruptura no son preservadas y la masa desplazada es fuertemente deformada en su interior, lo que genera que se comporte de manera similar a un líquido de alta viscosidad (Varnes, 1978).

De acuerdo con Lara y Sepúlveda (2008), los flujos se componen primordialmente de tres partes (Fig. 2.10) 1) cabeza: inicio del movimiento, el flujo en esta parte es capaz de movilizar bloques de hasta varios metros de diámetro; 2) cuerpo: incluye el volumen de material arrastrado que aumenta al inicio y comienza a disminuir de granulometría; y 3) la cola: en la que se encuentra un menor porcentaje de sólidos. En este punto el flujo pasa de flujo turbulento (en la cabeza) a ser flujo laminar.

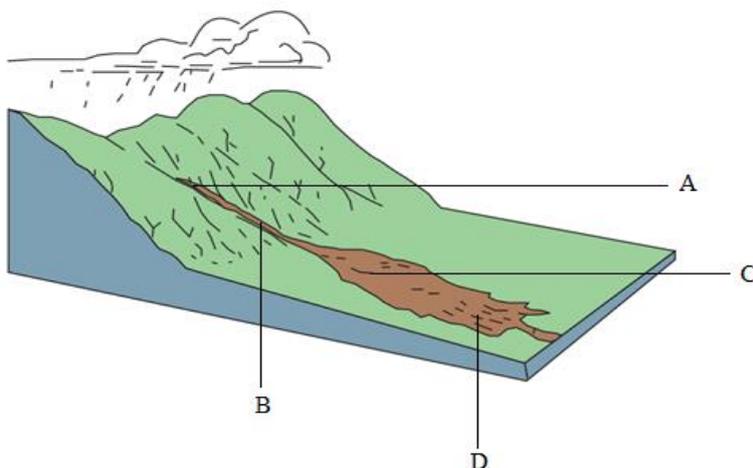


Fig. 2.10 Representación de un flujo. Sus características suelen verse modificadas, en gran medida por el material que es transportado y el contenido de agua, geomorfología etc. A) Cabeza o frente B) Cuerpo del flujo movilizado y canalizado C) Cola o tail; y D) Depósito en forma de abanico. Modificado de Highland & Bobrowsky, 2008.

La movilización del material requiere, inicialmente, una pérdida de la resistencia del material y aumento de los esfuerzos de corte actuantes. Una vez que se inicia el movimiento, su comportamiento estará condicionado a la reducción de la viscosidad en los materiales (Lara y Sepúlveda, 2008). Los flujos son capaces de moverse por grandes extensiones (kilómetros) a grandes velocidades, alcanzando velocidades extremadamente rápidas (Tabla 3), más en terrenos inclinados. La cantidad de agua presente en el flujo es uno de los factores más importantes a considerar, debido que aumenta la fluidez del movimiento. Al final la cola dispone un depósito de material, generalmente con forma triangular. Estos depósitos suelen presentar inestabilidad posterior a su emplazamiento (Highland & Bobrowsky, 2008).

El transcurso de un flujo en un principio es dirigido por la pendiente, para después canalizarse en cauces pre-existentes. A lo largo de su recorrido se pueden encontrar bloques que son depositados en zonas donde el flujo tuvo una menor energía y no pudieron ser transportados. Otra parte relevante en la morfología de los flujos son los “levées”, depósitos ubicados en los bordes del flujo, generados por el desborde del material a lo largo de su trayecto (Lara y Sepúlveda, 2008). La clasificación de este tipo de PRM suelen hacer referencia a los términos de tierra, lodo y/o barro para describir aquel material en el cual, el 80% o más de las partículas son más pequeñas que 2 mm y en el que el tamaño máximo del material es tamaño arena (Varnes, 1978).

Como podemos notar en esta clasificación (Tabla 4), Varnes (1978) incluyen a las avalanchas, cuya principal característica es su gran velocidad y la extensa área de ocupación. La reptación, por el contrario, son movimientos extremadamente lentos, en los que se pueden observar “rizaduras” en la superficie del terreno. Los lahares son flujos desarrollados en ambientes volcánicos.

Tabla 4. Clasificación de un flujo de acuerdo con su composición y tasa de movimiento

Tasa de movimiento	Roca	Detritos	Suelo
Rápido a extremadamente rápido (>1.5m/día)	Flujo de roca Flujo de ladera Avalancha de rocas	Flujo de detritos Avalancha de detritos Lahares	Flujo de arena húmeda y limo Flujo de arcilla Flujo de lodo – saturado-
Menor que rápido (<1.5m/día)	Reptación	Reptación de suelo	Flujos de tierra

Modificada de Varnes (1978)

2.2.6 Movimientos Complejos

Este tipo de PRM se caracteriza por ser la combinación de dos o más tipos de PRM. “Los movimientos complejos ocurren cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al ir desplazándose ladera abajo” (Alcántara, 2000, pp. 12). Si bien pueden pasar de un tipo de movimiento a otro, también puede ocurrir dentro del mismo tipo. Es decir, de un subtipo a otro, esto se presenta comúnmente para el caso de los flujos. Otro caso común dentro de los movimientos complejos, es un deslizamiento que conforme se traslada pasa a ser flujo (Tabla 5).

En general, esta transformación del movimiento se le suele atribuir a factores como el contenido de agua inicial dentro del material, el grado de cohesión, incorporación de humedad conforme el avance del movimiento, entre otros (Lara y Sepúlveda, 2008; Highland & Bobrowsky, 2008).

2.3 Factores condicionantes en la ocurrencia de un PRM

“Los factores condicionantes son aquellos intrínsecos del sistema que caracterizan, de una manera propia, el área sobre la que una amenaza puede actuar. Estos son los que en mayor

medida determinarán la evolución de un cierto fenómeno que vaya a suceder sobre el terreno” (Obregón y Lara, 2014, pp. 74). Alcántara (2000) las llama causas internas y las define como aquellos agentes que le restan resistencia a los materiales sin alterar la tensión o esfuerzos. Es decir, les restan concentración a las fuerzas resistentes (CENAPRED, 2014)

Estos factores generan una situación potencialmente inestable, ya que controlan la susceptibilidad de una zona propensa de fenómenos de remoción en masa (Lara y Sepúlveda, 2008). Estos factores establecen características del movimiento como su tipología, el mecanismo y modelo de rotura, principalmente (Hauser, 1993).

2.3.1 Geología / Aspectos geotécnicos

De acuerdo con Suárez (2014) la susceptibilidad a los distintos tipos de PRM está relacionada con las características geológicas del sitio, las atribuye principalmente a la litología, la geomorfología, la estructura y el estado de meteorización que condicionan la probabilidad de que se presenten PRM.

González de Vallejo (2002) asocia los factores geológicos y geométricos del material a la probabilidad de rotura y con características del PRM como los mecanismos de ruptura.

Es importante no solo considerar la litología de las rocas (u obviarla), sino también la estructura, grado de alteración, además del depósito en sí, tipología, material que lo compone y propiedades como plasticidad, densidad, humedad, permeabilidad, entre otros factores son relevantes (Lara y Sepúlveda, 2008). Para Hauser (1997) el tipo (y las características) del depósito, determinan el comportamiento del movimiento (Tabla 5).

En cuanto a los factores geotécnicos la caracterización de las discontinuidades es la principal componente a considerar. Ella abarca planos de estratificación (y su condición de meteorización y orientación) y juega un rol importante, aún más para los vuelcos, en caso de

que los estratos se orienten contrario a la dirección de la ladera (González de Vallejo, 2002). Para el caso de diaclasas, grietas, fallas, fracturas es necesario describirlas tratando de comprender la abertura, separación, relleno (en general, si una discontinuidad se encuentra rellena con minerales blandos o arcillosos, representa un potencial plano de falla), rugosidad, contenido de agua, etc.

La identificación del arreglo de estas discontinuidades es de suma importancia debido a que se encuentran estrechamente relacionados con la generación de bloques y material propenso a ser movilizados; al conformar planos de ruptura, mismos que a su vez, podrán generar cuñas, que se traducen en posibles planos de deslizamientos (Lara y Sepúlveda, 2008).

De acuerdo con Suárez (2014) cada unidad geológica posee una susceptibilidad específica, por lo que, si una ladera presenta más de un tipo de litología, se deberá de realizar un estudio geotécnico para cada unidad. Cada una de ellas presenta un comportamiento mecánico distinto. En la tabla, se muestra un compilado de características geológicas a considerar dentro de este rubro.

2.3.2 Geomorfología

En general los aspectos geomorfológicos reflejan las características de emplazamiento de los PRM, como la velocidad, energía y volumen del material movilizado. La topografía y la geometría de la ladera (su pendiente, extensión, altura, orientación), determinan la orientación de las fuerzas actuantes y de resistencias. La geometría de la ladera es la principal característica para la generación de flujos, deslizamientos y caídas. La pendiente condiciona la estabilidad, capacidad de transporte y energía del movimiento. Estos factores definen la tasa de erosión y la presencia (o no) de vegetación (Lara y Sepúlveda, 2008).

La geomorfología es útil para la identificación de antiguos PRM (principalmente deslizamientos y flujos) ya que, los terrenos donde se presentó un movimiento suelen ser

propensos a reactivaciones (Hauser, 1993) o desarrollar nuevos PRM por estar compuestos de materiales susceptibles. Por otra parte, la importancia de la topografía, se extiende cuando consideramos los efectos de amplificación de ondas sísmicas por efecto del terreno en donde la topografía superficial juega un rol importante.

Tabla 5. Influencia de las distintas características geológicas de un depósito para la generación de inestabilidad de laderas

Propiedad	Importancia	Autor
Composición y granulometría	Factores determinantes de propiedades de resistencia del depósito y su estabilidad en laderas	Lara y Sepúlveda, pp9, 2008
Plasticidad y humedad de un suelo	Grado de cohesión. Si un suelo fino tiene alta cohesión (como es el caso de arcillas), la presencia de niveles de poco espesor podría generar superficies potenciales de deslizamientos para el material que lo sobreyace. En tanto, un suelo arenoso presenta cohesión de acuerdo con su humedad, esta varía las propiedades de resistencia.	Lara y Sepúlveda, pp9,2008
Densidad del suelo	Determina la resistencia al cizalle del material. Un suelo de alta densidad presentará una mayor resistencia.	Lambe & Whitman, 1972
Permeabilidad	Influye directamente en la distribución del flujo de las aguas subterráneas y superficiales, por ende, en la condición de saturación del suelo. Una saturación del 100% representa la condición más desfavorable para la generación de deslizamientos y flujos.	Lara y Sepúlveda, pp9, 2008
Litología	Factor que influye en la resistencia a la meteorización y alteración de la roca.	Lara y Sepúlveda, pp9, 2008
Presencia de minerales secundarios	Estos minerales pueden acelerar los procesos de meteorización. Influyen de manera relevante en factores como la pérdida de resistencia, facilidad para incorporar agua, expansividad, incremento en la porosidad, etc.	Jacoby, 2001

Extraído de Lara y Sepúlveda, 2008.

2.3.3 Hidrogeología

Considera todas las fuentes de inyección de agua a suelos o macizos rocosos como: condiciones del nivel freático, la red de drenaje artificial (o antrópica), la escorrentía y su infiltración. Es esta saturación la que modificará el grado de cohesión de un suelo o disminuirá la resistencia del material dentro de un macizo rocoso (Lara y Sepúlveda, 2008).

Para González de Vallejo (2002), estos aspectos están asociados con las condiciones geológicas del lugar, al grado de alteración del material y condiciones climáticas de la zona.

2.3.4 Clima

El clima es un condicionante de la mayoría de los procesos erosivos. La temperatura, humedad, radiación solar, el viento y principalmente la precipitación, meteorizan a distinta escala las vertientes. Estos procesos le restan resistencia al macizo rocoso; algunos de los principales efectos del clima sobre la estabilidad de ladera de acuerdo con Lara y Sepúlveda (2008) son:

- 1) La temperatura condiciona la precipitación; modifica la humedad del suelo además del congelamiento del mismo.
- 2) La infiltración de agua por las discontinuidades existentes en el material, como efecto secundario, disminuye el coeficiente de fricción interno.
- 3) La radiación solar interviene directamente sobre la humedad del material. Esta relación varía la resistencia de la ladera con respecto a su humedad.

A esto se le suma el hecho de que el clima de una región establece las pautas para la presencia de distintos tipos de flora y fauna. La vegetación y presencia de animales representan un aspecto importante dentro de la meteorización de las laderas, las raíces de las plantas, por ejemplo, suelen penetrar por las fisuras (discontinuidades) presentes en las rocas, lo que facilita su desintegración, o para el caso de materiales más blandos esta penetración ayuda a la

filtración de agua. Los animales (incluso el hombre) por el contrario, remueve esa cubierta vegetal, lo que expone al material a futuros procesos de meteorización. De esta manera, el clima tiene estrecha relación y/o dependencia con los procesos geodinámicos superficiales (Hauser, 1997).

2.3.5 Vegetación

Es un rubro en donde existe controversia sobre los aspectos negativos y positivos de la vegetación para la generación de PRM. Marín Sánchez y Osorio (2017) establecen que los principales efectos de la vegetación son de dos tipos: 1) Los mecanismos hidrogeológicos: la evapotranspiración y reducción de infiltración de agua fomenta la generación de grietas; 2) De la mecánica de movimiento, es decir, el esfuerzo que ejercen las raíces sobre el material del terreno. Si este es material poco consolidado, alterado o suelo puede aportar estabilidad, a modo de anclaje, si el material es duro las raíces pueden agrietar el terreno y movilizarlo por el peso de la cobertura vegetal, además sirven de conductores de viento al terreno.

Suárez (2014) refiere a un impacto positivo en la disminución de erosión, reptación y generación de grietas superficiales, esto para el caso de los deslizamientos principalmente; señala que aumenta la resistencia cohesiva del material en superficie. También sostiene evaluar y caracterizar la cobertura vegetal, para lo que se debe incluir el estudio de la densidad de drenaje, altura total de la vegetación, tipo, forma, profundidad, diámetro, etc.

2.3.6 Actividades antrópicas

Las actividades humanas han abierto brecha dentro de los factores condicionantes en zonas urbanas o en proceso de urbanización. Su principal intervención dentro de los PRM es la disminución artificial de la resistencia del material. El aporte de material propenso a ser movilizado por futuros eventos, modificación al régimen hidrológico y cambios en la topografía del lugar (Lara y Sepúlveda, 2008).

Los principales factores que intervienen en esta clase son la modificación del relieve, casi siempre para la generación de nuevos asentamientos, la modificación de cauces, acumulación de desechos, etc.

2.4 Agentes desencadenantes

“Las causas externas (o factores desencadenantes) son todas aquellas que producen un incremento en la tensión o esfuerzos, pero no en la resistencia de los materiales” (Alcántara, 2000, pp 13). Para Obregón y Lara (2014) los factores desencadenantes son aquellos parámetros externos al sistema que producen la generación del fenómeno, ellos proponen a los sismos y lluvias como los mayores agentes detonadores.

Los principales agentes desencadenantes de los PRM son intensas lluvias (producen típicamente flujos y deslizamientos), sismos (responsables de caídas y deslizamientos) (Lara y Sepúlveda, 2008), además de actividad volcánica, incendios forestales y actividades antrópicas (Highland & Bobrowsky, 2008) refiriéndose, por ejemplo, a el cambio en la geometría del relieve, socavaciones, cambios en el régimen hidrológico, cargas y descargas, vibraciones artificiales, etc. (CENAPRED, 2014).

2.4.1 Precipitaciones

Hauser (1997) propone que las precipitaciones desencadenan prácticamente, todos los procesos de remoción en masa. El agua reduce la resistencia al corte de los materiales y de las presiones intersticiales, lo que incrementa su consecuente inestabilidad para propiciar un PRM (Lara y Sepúlveda, 2008). González de Vallejo (2002) describe la disminución de la resistencia como la modificación de las presiones tensionales presentes en el terreno, que además de las presiones intersticiales, sucede en consecuencia del aumento de peso de la superficie.

Suárez (2009) presenta un análisis enfocado a lo que él describe deslizamientos, y que de acuerdo con la clasificación de PRM, es una propuesta de tipología que incluye a los

deslizamientos y flujos. En él explica la relevancia del sistema hidrológico y cómo afectan al comportamiento de la ladera factores como:

- 1) Lubricación: principalmente a lo largo de las discontinuidades en donde la lubricación actúa como reductor del coeficiente de fricción. El mayor impacto de la lubricación ocurre superficialmente.
- 2) Ablandamiento: también llamado debilitamiento, se genera mayormente en el material de relleno de las discontinuidades. Se manifiesta como el cambio de las propiedades físicas del material, la reducción de la resistencia al corte y la cohesión.
- 3) Presiones de poros: corresponde a la presión interna del agua que ejerce sobre los poros del material, esta presión disminuye la presión efectiva y la resistencia al cortante, esta presión es mayor en el interior de la ladera y menor cerca de la superficie. Este factor puede incrementar súbitamente en el momento en el que ocurre la lluvia.
- 4) Tensiones capilares: es una fuerza de superficie que le permite al líquido moverse en cualquier dirección a través de poros en el sustrato (Allaby, 2013). La reducción de la tensión capilar disminuye la cohesión del suelo, mismo que incrementa la presión del poro del agua, la cual puede desencadenar en un PRM (Rodríguez et al., 2006). En cambio, la ocurrencia de litologías poco permeables, de grano fino, permite crear una barrera o efecto capilar, lo que reduce la presión de poro (Galeandro et al., 2014).
- 5) Fatiga por fluctuaciones del nivel freático: se trata de un deterioro en las propiedades del material, por efecto de las variaciones (ascenso y descenso) en el nivel freático. Se le suele asociar con mayor frecuencia a vertientes fluviales por estar en mayor proximidad con el agua subterránea.
- 6) Lavado de cementantes: propensos a este factor son los carbonatos y suelos residuales –lavado de finos-, sin embargo, cualquier cementante soluble suelen tener posibilidad de “lavarse” y reducir la cohesión y fricción interna.

- 7) Aumento de densidades: el aumento de la densidad, por presencia de agua se refleja con la adición de peso y por consiguiente el incremento del esfuerzo cortante.
- 8) Colapso: de este rasgo son distintivos los suelos colapsables (depósitos de flujos y/o suelos eólicos) cuyo material es propenso a ceder con el aumento de humedad.
- 9) Interacción Química: constituye a los procesos en donde ocurre un intercambio iónico, disolución, hidratación, corrosión y precipitación.
- 10) Erosión: engloba al desprendimiento, arrastre y depósito de las partículas de suelos que fueron generadas por la intervención del agua y/o viento. Influye además en la modificación del relieve.

Como se puede observar estas condiciones son aplicables (no necesariamente en conjunto) para todos los PRM, por lo que se vuelve necesario un análisis de identificación del rango característico para la generación de estos movimientos.

2.4.2 Sismos

El principal efecto de los sismos como agente desencadenante es el hecho de que en su presencia “existe el triple efecto de aumento del esfuerzo cortante, disminución de la resistencia por aumento de la presión de poros y deformación, asociados con la onda sísmica; pudiéndose llegar a la falla al cortante y hasta la licuación en el caso de los suelos granulares saturados” (Suárez, 2009, pp. 267; lo que favorece a la generación de expansiones laterales (González de Vallejo., 2002). Lara y Sepúlveda (2008), sostiene que la licuefacción es inducida por el sismo (perturbaciones rápidas) en materiales saturados, sin cohesión y en condiciones de carga no drenadas, lo que genera un exceso en la presión de poro, condición que refleja la reducción de esfuerzo efectivos actuantes en el material.

Los principales factores que afectan la respuesta de los taludes durante los sismos son; 1) la magnitud de la aceleración sísmica; 2) duración del sismo; 3) distancia al área epicentral; 4) formación geológica; y 5) dimensiones del talud (Havenith et al., 2016).

Algunos de los efectos físicos de las ondas sísmicas sobre el terreno, además de la licuefacción, son:

- ➔ Amplificación por efecto topográfico: suelen ser de escalas locales, generadas por las irregularidades del terreno “distinguiéndose dos tipos: aquellas provocadas por la topografía superficial y aquellos provocados por depósitos de suelos blandos en superficie” (Morales Ramírez, 2011, pp. 28). Las amplificaciones generadas por estos salientes topográficos se producen con certeza en la parte alta del talud. Acorde con Morales Ramírez (2011) se ha comprobado que las estructuras ubicadas en la parte superior de laderas manifiestan mayores daños respecto a aquellos en las partes bajas de la misma, al contar con la amplificación de ondas en topografías convexas. De acuerdo con Suárez (2009), otro factor que interviene en la amplificación de las ondas es la presencia de agua subterránea.
- ➔ Fracturación cosísmica de talud: “La fracturación o agrietamiento del suelo y de los macizos rocosos, se presentan como un efecto directo de los esfuerzos inducidos por un sismo en áreas con diversas intensidades de la onda sísmica” (Suárez, 2009).
- ➔ Subsistencia sísmica: genera asentamientos en el terreno, más comúnmente en terrenos granulares y/o rellenos.
- ➔ Dilatancia: entendida como “el cambio de volumen observado en los materiales granulares cuando se someten a deformaciones por corte” (Diccionario de geotécnica, online, 2019). La dilatancia es una característica común de los suelos y las arenas. La cantidad de dilatancia depende en gran medida de la densidad del suelo. En general,

cuanto más denso es el suelo, mayor es la cantidad de expansión de volumen bajo el corte.

- ➔ Perturbaciones en el nivel freático: estas perturbaciones sísmicas, involucran el ascenso del nivel freático hasta saturar el terreno, esto origina, en el material, un comportamiento de fluido viscoso, típico de licuefacción (Lara y Sepúlveda, 2008).

2.4.3 Otros factores

Otro agente desencadenante que suele movilizar grandes volúmenes de material son las erupciones volcánicas. Los efectos de ellas, de acuerdo con Lara y Sepúlveda (2008) se enlistan a continuación: 1) Post derretimiento de la nieve debido a una erupción, lo que proporciona un lubricante al material que compone sus laderas; 2) Inestabilidad del edificio volcánico por efecto magmático, y su consecutivo colapso lo produce avalanchas; 3) Movimientos sísmicos propios de la actividad del volcán. Este factor puede provocar inestabilidad tanto en el material del aparato volcánico como en sus alrededores.

De acuerdo con Suárez (2014), el factor antrópico juega un papel destabilizador al ser un agente que modifica constantemente la superficie del planeta (Tabla 6). Su mayor impacto ocurre en la generación de deslizamientos, flujos o vuelcos por la modificación de la geometría de la ladera lo que conlleva la disminución de esfuerzos compresivos y un aumento de los esfuerzos de corte, acompañados por la exposición de mayor superficie. A este factor se le suman la modificación de las condiciones naturales de las corrientes superficiales y subterráneas debido a vibraciones por maquinaria, tránsito; y/o explosivos, etc. Además de la deforestación que provoca una saturación del terreno por la incipiente infiltración (CENAPRED, 2014). En la Tabla 6 se enlistan a mayor detalle algunos de los factores condicionantes y desencadenantes para la generación de PRM.

Tabla 6. Resumen de las principales características presentes para cada tipo de factor generador de PRM.

FACTORES CONDICIONANTES	FACTORES DESENCADENANTES
Causas de índole geológica	Causas por procesos físicos
Materiales débiles Materiales sensibles Materiales intemperizados Materiales sujetos a cizallamiento Materiales con fisuras y diaclasas Discontinuidades orientadas adversamente Discontinuidades estructurales Permeabilidad contrastante Contraste de materiales con diferente plasticidad.	Precipitación intensa Derretimiento rápido de nieve o hielo Eventos de precipitación extraordinarios Actividad símica Erupciones volcánicas Gelifracción Expansión e hidratación de arcillas
Causas morfológicas	Causas de origen antropogénico
Levantamientos tectónicos o volcánicos Erosión glacial Erosión fluvial al pie de las laderas Erosión marina al pie de los acantilados Erosión glacial al pie de las laderas Erosión en márgenes laterales Erosión subterránea Remoción de la vegetación	Excavación de laderas o del pie de las laderas Incremento de peso en las laderas Disecación de cuerpos de agua Deforestación Irrigación Actividad minera Vibraciones artificiales

Tomado de Alcántara, 2002.

Las distintas causas y grados de afectación dependen totalmente del lugar geográfico donde se encuentre el área de estudio y las condiciones presentes en ella (climáticas, topográficas, tectónicas, presencia humana, tipos de litología, agentes denudativos, etc); por lo que en un determinado sitio no necesariamente se presentarán todos los factores.

2.5 Mapas de zonificación

“La zonificación consiste en la división del terreno en áreas homogéneas y la calificación de cada una de estas áreas de acuerdo con el grado real o potencial de amenaza o riesgo” (Suárez, 2009). Varnes y colaboradores (1984) conciben la zonificación como la división de la

superficie del terreno en áreas y definidas por un “*ranking*” de acuerdo con el grado actual o potencial para la ocurrencia de algún proceso de remoción en masa.

2.6 Mapas de susceptibilidad

Para la correcta descripción de un mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, es necesario, en primera instancia, definir el concepto de susceptibilidad; para ello en la Tabla 7 se presentan diferentes definiciones propuestas por distintos autores.

Un mapa de susceptibilidad, muestra la clasificación de una zona en distintas áreas con diferentes grados de estabilidad, en donde se dan (o no) las condiciones necesarias para la generación de PRM. Cabe destacar que “la probabilidad de ocurrencia de un factor detonante no se considera en un análisis de susceptibilidad” (Suárez, 2009, p533). Otra restricción de los mapas de susceptibilidad es que en ellos no se muestra la totalidad de áreas a ser afectadas por los PRM, ni logran predecir cuándo ocurrirá el fenómeno (Obregón y Lara, 2014).

Tabla 7. Concepto de susceptibilidad a inestabilidad de laderas para distintos autores.

Definición de susceptibilidad	Fuente
Posibilidad de que una zona quede afectada por un determinado proceso, expresada en diversos grados cualitativos y relativos.	González de Vallejo (2002).
Capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada por un proceso geológico determinado.	Lara y Sepúlveda (2008).
Propensión o tendencia de una zona a ser afectada o hallarse bajo la influencia de un proceso determinado, en este caso movimientos en masa.	Obregón y Lara (2014)
Expresa la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno. La susceptibilidad es una propiedad del terreno que indica qué tan favorables o desfavorables son las condiciones de éste, para que pueda ocurrir deslizamientos.	Suárez, pp 533 (2009)

2.7 Prospección Eléctrica - Tomografía

“La geofísica es la ciencia que estudia las propiedades físicas de la Tierra, ... determina su estructura a partir de diversas propiedades físicas características de cada material que la forma” (CEDEX, s/f). Para la medición y análisis de estas propiedades, la geofísica hace uso de los métodos de exploración indirecta del entorno, valiéndose de las cualidades que la componen, por ejemplo:

- Métodos gravimétricos: para anomalías gravimétricas y/o de densidad, así como de variaciones del campo gravitatorio terrestre.
- Métodos Sísmicos: para el estudio de velocidades de ondas sísmicas.
- Métodos Magnéticos: para anomalías en el Campo Magnético.
- Métodos Eléctricos: a partir de las anomalías generadas por paso de una corriente eléctrica por el terreno (variaciones en la resistividad de los materiales) se generan modelos en los que se muestran los contrastes de resistividades de los materiales que componen el subsuelo; la interpretación del modelo resultante pretende recrear un medio geológico adecuado o consistente. Este tipo de métodos se emplean principalmente en el estudio de agua subterránea, geología estructural, geotecnia, cuerpos minerales de interés, etc.

Para la correcta aplicación de un método eléctrico es necesario definir aspectos como resistividad y corriente. Se entiende por resistividad (Ωm) como una propiedad intrínseca de los macizos rocosos, y se trata de una medida que cuantifica el paso de una corriente eléctrica por ese medio (Universidad de Chile, s.f). Esta cualidad depende de factores como la naturaleza del tipo de suelo, grado de saturación, propiedades de las sustancias contenidas en los poros y discontinuidades, concentración de sales disueltas, nivel de compactación, temperatura, presión e incluso variaciones estacionales (Pérez, 2010)

El cálculo de la resistividad tiene como fundamento la ley de Ohm que establece la relación entre las magnitudes (Fig. 2.11):

1. Voltaje (V): también llamado Potencial Eléctrico o Diferencia de Potencial. Unidad: voltios (V)
2. Intensidad de corriente (I): unidad: amperios (A)
3. Resistencia (R): unidad ohmios (Ω)

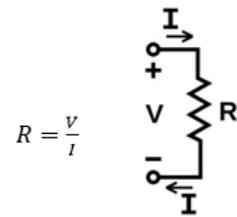


Fig. 2.11 Relación entre Voltaje, Intensidad y Resistencia

De esta manera, el cálculo de la resistividad queda de la siguiente manera (Fig. 2.12); donde ρ = Resistividad, R= Resistencia, L= Longitud y A= Área. Unidades: Ohmio metro (Ωm).

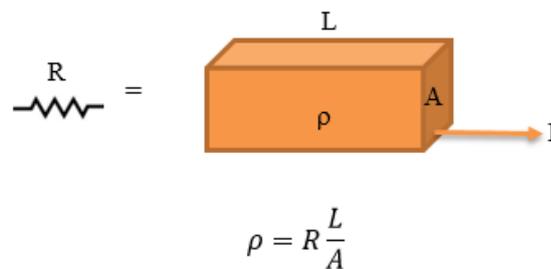


Fig. 2.12 Obtención de resistividad

Los métodos eléctricos se dividen en dos: corriente continua y corriente alterna (es decir, tipo de corriente que circula por el medio). Cada una de éstas se divide a su vez en dos categorías: corriente natural y corriente artificial (de acuerdo con el origen de la corriente circulante) (Estrada, 2013). Para los fines del presente trabajo se explicará a mayor profundidad el método eléctrico de corriente continua artificial pues engloba el método de tomografía eléctrica utilizado en este estudio.

2.7.1 Prospección eléctrica en corriente continua

Como se explicó con anterioridad este tipo de prospección al igual que los demás métodos geofísicos intenta modelar contrastes de las propiedades de las rocas en el subsuelo. En particular, por medio de “la distribución de la resistividad del subsuelo mediante la inyección de corriente continua a través de fuentes artificiales” (Quintana y Teixidó, 2013, pág. 13).

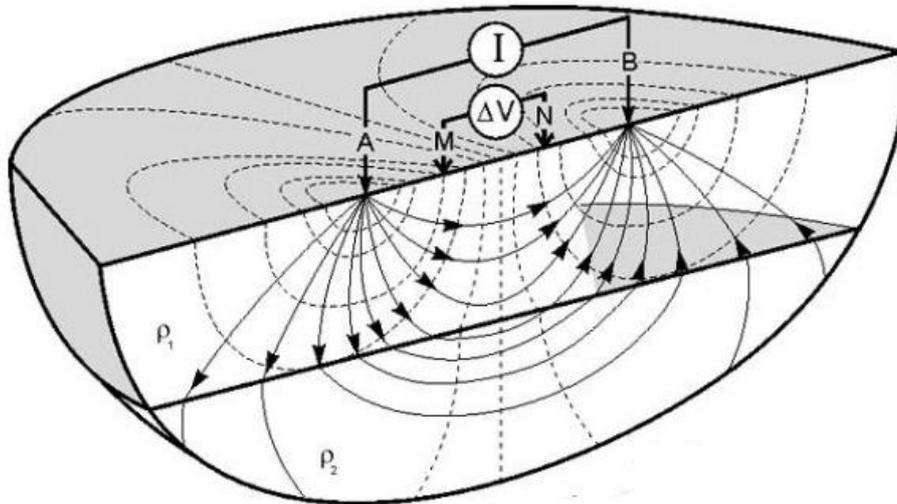


Fig. 2.13 Representación de las líneas de flujo dentro del subsuelo. Tomado de Feria (2015).

En la Fig. 2.13 se ejemplifica la teoría mencionada, la corriente es inyectada artificialmente al subsuelo mediante los electrodos A y B. En los electrodos M y N se mide la respuesta del terreno. De esta manera la diferencia de potencial entre la corriente inicial (electrodos A y B) y la final (electrodos M y N) se vuelve evidente. Estos cambios de potencial reflejan las anomalías/contrastes de resistividades del subsuelo mediante la ecuación (1):

$$V_M - V_N = K \frac{I\rho}{2\pi} \dots (1)$$

En donde K es una constante única para cada dispositivo.

El alcance vertical y la resolución de los resultados van de la mano con el tipo de arreglo que se utilice, es decir, el acomodo que se les dé a ambos tipos de electrodos. El arreglo que se utilizó en este trabajo fue el denominado Dipolo- Dipolo.

2.7.1.1 Arreglo Dipolo- Dipolo

En este tipo de arreglo la corriente es inyectada al subsuelo por los electrodos 1 y 2 como se muestra en la Figura 2.14, mientras la medición de la diferencia de potencial se va desplazando de modo: electrodos 3-4, 4-5 y así sucesivamente obteniendo puntos a distintas profundidades ($n = 1, 2, 3 \dots$). Posteriormente los electrodos de inyección pasan a ser 2 y 3 para ser medidos en 4 y 5. Estos cambios se producen continuamente hasta completar una red de puntos que contienen los valores de resistividades. (Estrada, 2013; CEDEX, s.f.).

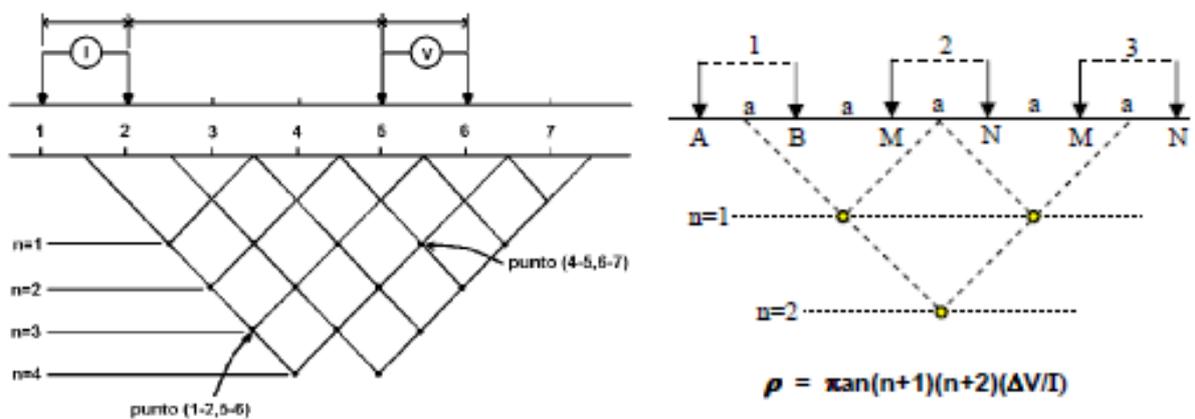


Fig. 2.14 Representación del método de ejecución del arreglo Dipolo- Dipolo. Del lado derecho se observa la expresión bajo la cual se rige el cálculo de la resistividad. Tomado de CEDEX (s.f) y Estrada (2013).

A la modelización 2D de esta malla de puntos de la resistividad del subsuelo mediante un procesamiento numérico se le conoce como Tomografía Eléctrica (Fig. 2.15).



Fig. 2.15 Equipo utilizado en la implementación de Tomografía Eléctrica: (arriba) Sistema Syscal Pro-Iris Instruments junto con una batería externa como fuente; (derecha) arreglo de electrodos conectados mediante cables al Syscal.

2.8 Propiedades de geomateriales en ingeniería

Un suelo se define como un “agregado de minerales unidos por fuerzas débiles de contacto, separables por medios mecánicos de poca energía o por agitación en agua” (González de Vallejo, 2002, pág. 20). La generación de estas partículas parte de un macizo rocoso que por acciones erosivas se desintegran y transforman; la meteorización que afecta a la roca sana para su consecuente degradación puede ser de tipo (Geografía, s.f):

- Física: la fragmentación de la roca se debe a esfuerzos mecánicos externos y/o internos. Algunos de ellos son los cambios térmicos, efectos de hielo y deshielo, y la relajación tensional después de alguna remoción de volumen.
- Química: durante este proceso los minerales formadores de la roca –o una fracción de ellos- se descomponen químicamente generando la rotura en las rocas por efecto de: disolución, oxidación e hidratación que son parte de los cambios que se pueden dar en macizos rocosos.
- Biológica: se caracteriza por tener como principales agentes a plantas y animales, como la expansión por presencia de raíces de árboles y la actividad bacteriana.

Los suelos pueden ser de tipo residual si estos permanecen *in situ*, mientras que serán suelos transportados si, por cualquier agente (agua, viento y/o glaciar) fueron movilizados (González de Vallejo, 2002). Es importante mencionar que se entiende al suelo como un material trifásico compuesto por sólidos, agua y aire, donde, estos últimos dos elementos se concentran en los espacios vacíos entre los sólidos. Las partículas sólidas que componen a los suelos se clasifican con base en su tamaño, su distribución es expresada en la Tabla 8.

Una forma de caracterizar los suelos es mediante la distribución de los tamaños de partículas sólidas que lo componen, y se representan en una curva granulométrica (Fig. 2.16), siendo esta, el resultado de un análisis de laboratorio en el cual se hace “pasar” al suelo seco por tamices con mallas de distintos tamaños. Para este análisis es utilizado el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), de esta manera se obtiene el porcentaje retenido en cada uno de ellos. En la curva granulométrica se relaciona el diámetro de las partículas (malla del tamiz) con el porcentaje que pasa (González de Vallejo, 2002).

Tabla 8. Clasificación por tamaño de partículas componentes del suelo.

Tipo de partículas	Tamaño de partículas (mm)		Observaciones
	Normas Británicas	SUCS*	
Grava	60- 2	75- 4.75	Observables a simple vista, no se retiene el agua por su alta permeabilidad
Arena	2- 0.06	4.75- 0.075	Al mezclarse con el agua se separan fácilmente, aún observables a simple vista
Limo	0.06- 0.002	< 0.075 finos	Aunque retienen el agua mejor que tamaños superiores, la exudan ante movimientos de impacto
Arcilla	< 0.002	na	Generalmente producto de meteorización química, cuentan con gran retención de agua al tener la capacidad de incorporarla en sus cadenas

* Sistema de clasificación unificado; na= no aplica. Extraído de Berry & Reid, 1993.

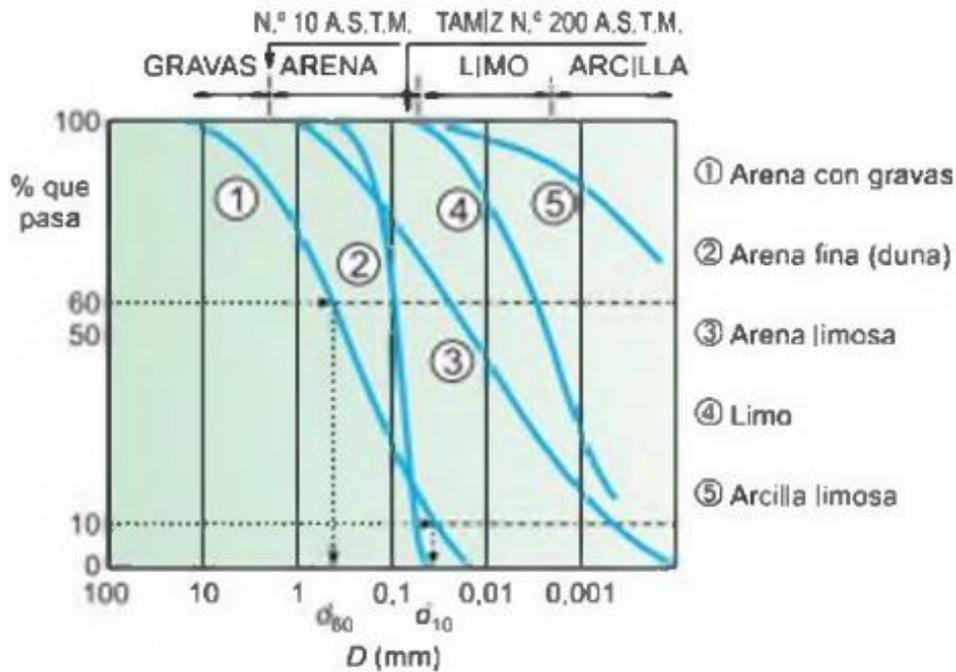


Fig. 2.16 Curvas representativas de distintos tipos de suelo. Se observan además los valores de D_{10} , D_{60} —existe también el valor de D_{30} — que corresponden a ese porcentaje .10,30,60- que pasa extendiéndolo a la curva en cuestión, cual sea esa. De esta forma se obtiene el valor de D para ese porcentaje. Tomado de González de Vallejo, 2002.

Otros parámetros pueden obtenerse de este análisis de laboratorio, algunos de ellos se enlistan a continuación, de acuerdo con Berry & Reid (1993) y González de Vallejo (2002):

- Coeficiente de uniformidad (C_u): Es un coeficiente utilizado para evaluar la uniformidad del tamaño de las partículas (Tabla 9).

Tabla 9. Rangos de coeficiente de uniformidad

C_u	Observaciones
< 5	Granulometría uniforme
5- 20	Granulometría poco uniforme
>20	Suelo bien graduado

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots (2)$$

- Coeficiente de curvatura (C_c): este valor crea una clasificación de bien o mal gradado

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})} \quad \dots (3)$$

Tabla 10. Características de los tipos de gradación

Gradación		Curva	Observaciones
Bien gradado		Suave que cubre un amplio rango de tamaños	Proporciones maso menos iguales de para todos los tamaños de partículas
Mal gradado	Uniforme	Casi vertical	Gran proporción de partículas contenida en un reducido rango de tamaños
	Gradación discontinua		Proporciones de grandes y pequeños tamaños de partículas pero escasos tamaños intermedios

- Contenido de finos: granos de tamaño menor a 0.075 mm o tamiz No. 200, la relevancia de este factor radica en que un mayor contenido de finos el suelo obstaculiza la expulsión de agua bajo la influencia de esfuerzos.
- Plasticidad: propiedad de un material que define la capacidad de deformación, sin rebote elástico, variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse o agrietarse (Juárez Badillo, 2012). Normalmente esta propiedad es distintiva de las arcillas y depende de la composición y contenido de humedad del material. El comportamiento de las arcillas se da de forma gradual de acuerdo con los límites de Atterberg (Fig. 2.17) y son descritos como “el contenido de humedad para el cual la consistencia cambia de un estado a otro” (Berry & Reid, 1993, pág. 38)

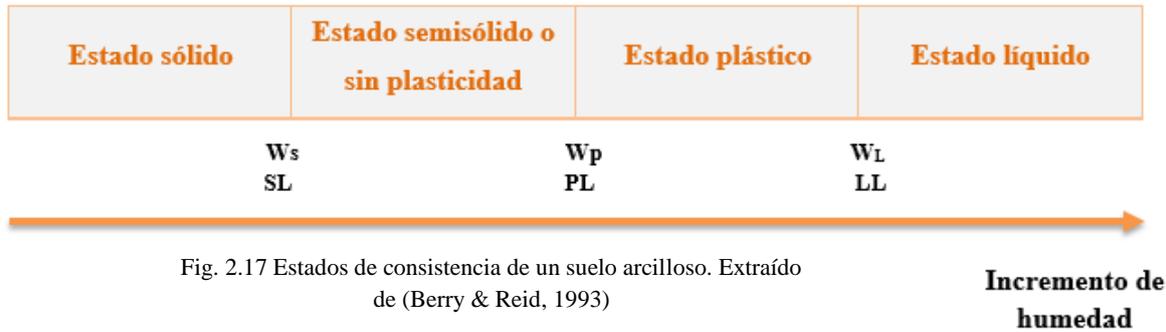


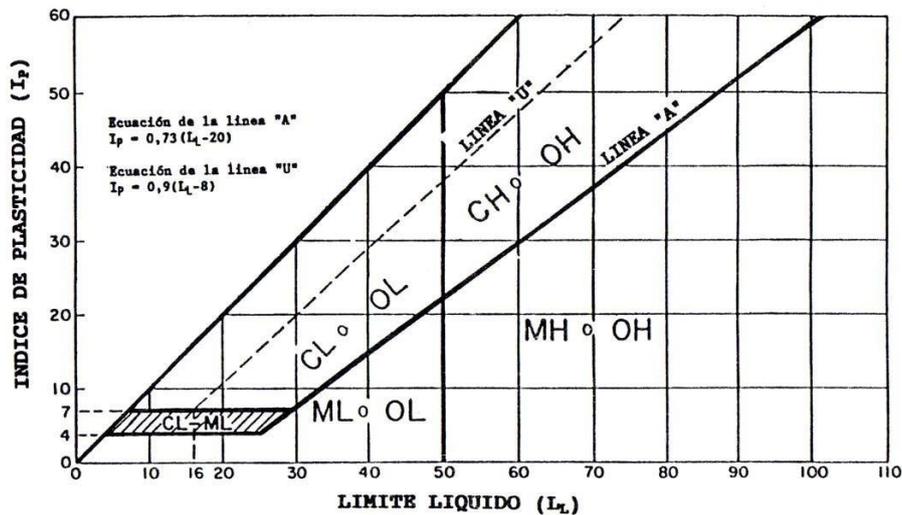
Fig. 2.17 Estados de consistencia de un suelo arcilloso. Extraído de (Berry & Reid, 1993)

El límite plástico que separa al estado semisólido del estado plástico, se obtiene con la formación de pequeños rollos del material con las manos. Los rollos buscados son aquellos que no se fisuren ni cuarten, cuando se obtengan esas características se deberá de calcular el contenido de humedad en al menos tres muestras, para más tarde generar la media que será el valor del PL. Por otra parte, el LL es calculado con ayuda de un instrumento denominado Copa Casagrande (Fig. 2.18). En este utensilio se coloca la arcilla ya humedecida, una vez ahí con ayuda de un acanalador se realiza una división a la mitad de la copa siguiendo una marca presente. Posteriormente, la copa se somete a golpes controlados, de acuerdo con la cantidad de golpes necesarios para que la abertura previa se cierre. Se toma una muestra del centro (donde existía la abertura) y se calcula a partir de ella, el contenido de agua. Esto debe realizarse con al menos tres muestras. Finalmente, se grafica en una curva de fluidez el contenido de agua vs el número de golpes para dibujar en ella la línea representativa. El LL se obtiene de la interpolación del valor obtenido de contenido de agua cuando se prolonga el número de golpes a la curva.



Fig. 2.18 Procesos para la obtención de PL y LL. a) Copa Casagrande y material para LL b) Muestras en horno de PL y LL c) Material unido tras la abertura en el centro

Con la obtención de estos parámetros se puede calcular el índice de plasticidad. Este factor representa el intervalo de humedad en el que la arcilla se comporta de manera plástica. Con ayuda del índice de plasticidad y el límite líquido se clasifica el suelo, en función de su plasticidad, esto con ayuda de una Carta de Plasticidad (Fig. 2.19).



$$IP = L_L - L_P \dots (4)$$

Fig. 2.19 Carta de Plasticidad de Casagrande. La línea A representa el límite entre arcilla (arriba) y limos y/o suelos orgánicos (abajo), mientras que la línea U representa la frontera de la correlación LL/LP. Definiendo arcillas de baja plasticidad (CL), arcillas de alta plasticidad (CH), limos y suelos orgánicos de baja plasticidad (ML-OL), y limos y suelos orgánicos de alta plasticidad (MH-OH). Tomado de Diccionario de geotecnia, 2019.

Al analizar los parámetros presentados anteriormente se pueden establecer:

- ✓ $L_L > 50$ material de alta plasticidad
- ✓ $L_L > 50$ material de baja plasticidad

A mayor plasticidad, el suelo “admite mucha agua, por lo que pueden experimentar deformaciones plásticas grandes, etc.” (González de Vallejo, 2002, pág. 23), siendo así menos resistentes y permeables.

2.8.1 Resistencia al corte

Una propiedad de suma importancia en el análisis de estabilidad es la resistencia al corte, entendida como “la máxima resistencia que el suelo puede soportar... resistencia interna que ofrece la masa de suelo por el área unitaria para resistir la falla al deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él” (Valerio Salas, 2011, pág. 15). Esta propiedad en suelos saturados se puede calcular por medio de la ecuación de Coulomb:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi' \dots (5)$$

Donde:

τ = Esfuerzo de resistencia al corte

c' = Cohesión efectiva

σ = Esfuerzo normal

μ = Presión intersticial

ϕ' = Ángulo de fricción interna

Se entiende la cohesión como “una medida de la cementación o adherencia entre las partículas del suelo” (Suárez, 2009, pág. 77). Su representación gráfica consiste en una línea recta llamada envolvente de rotura de ordenada al origen con el valor de la cohesión efectiva y donde, se esquematiza el ángulo de fricción interna como el ángulo formado entre la envolvente de rotura y la horizontal (Fig. 2.20).

Esta envolvente es tangencial al círculo generado en ensayos de laboratorio con datos como σ máximo y mínimo y figura al estado de esfuerzos para el momento de la falla.

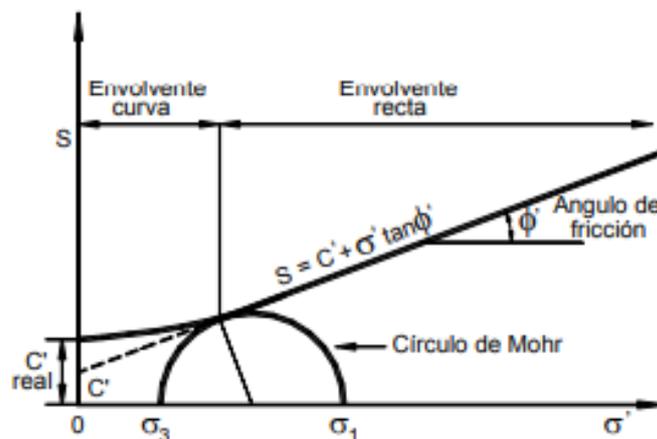
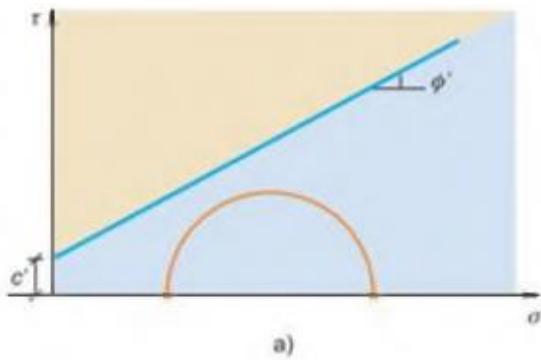


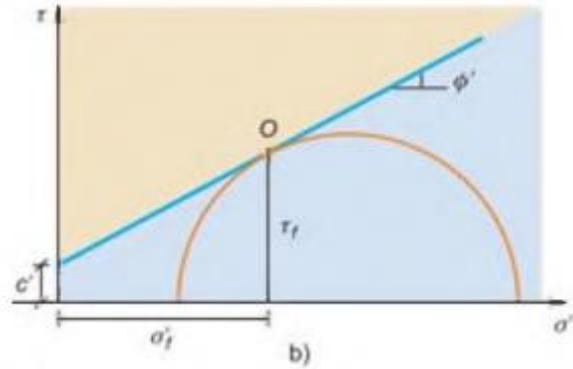
Fig. 2.20 Esquema de un círculo de Mohr y su envolvente. Se aprecian los factores que se pueden cuantificar de la gráfica, siendo σ_3 y σ_1 los esfuerzos principales, para las pruebas de laboratorio se considera al esfuerzo axial como la principal (σ_1) mientras que σ_2 y σ_3 son tomados como iguales al ser laterales. Extraído de Suárez (2009).

Estas condiciones crean tres escenarios posibles, descritos a continuación en la Fig. 2.21



a) Debido a que la envolvente representa una combinación crítica de rotura, el suelo representado por este círculo de Mohr se encuentra en un estado seguro, incluso con un margen de error.

b) El suelo se encuentra en una situación de rotura para la combinación que da origen al punto O.



c) Este círculo de Mohr representa un escenario imposible pues queda por encima de la envolvente por lo que la falla ya habría ocurrido.

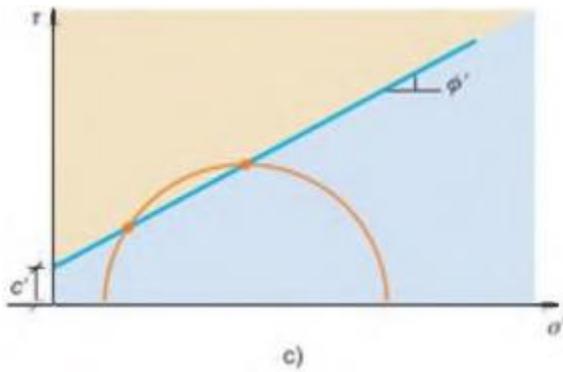


Fig. 2.21 Representaciones de la envolvente y círculo de Mohr. Extraído de González de Vallejo (2002).

3. Metodología

Para la realización de este trabajo se emplearon herramientas teóricas, analíticas y trabajo de campo. Por conveniencia de exposición, en cuanto al flujo de trabajo, se han dividido en cinco etapas, descritas a continuación:

3.1 Primera etapa: Investigación de la zona de estudio

Consistió en una investigación bibliográfica acerca del área de estudio con el fin de recabar información que serviría como primer conocimiento general, por ejemplo: ubicación, contexto regional, datos estadísticos, etc. Dentro de las principales fuentes sobresalen: tesis, artículos, fascículos y datos provenientes de instituciones gubernamentales como INEGI, SEDATU y PAOT. A esta primera fase se sumó una visita de reconocimiento de la zona de estudio. El principal objetivo de la salida de campo fue observar la dinámica de interacción entre la mancha urbana y el entorno natural.

3.2. Segunda etapa. Investigación dirigida a procesos de remoción en masa y marco teórico

En esta segunda etapa del trabajo se buscó y recopiló basta información específica referente a los procesos de remoción en masa, incluyendo características para su generación y desarrollo, así como conceptos asociados como susceptibilidad, zonificación, peligro, etc. Destacan tesis, libros tanto impresos como electrónicos y artículos como principales fuentes de información.

3.3 Tercera etapa. Recopilación e integración de información específica y elaboración de los mapas

- **Modelo de Elevación Digital (DEM):** Luego de la recopilación de información y a la par de su integración, se recabó información correspondiente a las cartas topográficas E14A38, E14A39, E14A48 y E14A49. Se obtuvo información tipo LiDAR (*Light Detection and Ranging*) de las cartas mencionadas, descargadas directamente del sitio web de INEGI (2014). Este material fue seleccionado, por presentar una mejor resolución (de 5 metros). A partir de este mosaico LiDAR se generó, con ayuda un Sistema de Información Geográfica, el Modelo de Elevación Digital (*DEM* por sus siglas en inglés). Debido a que este insumo cartográfico fue utilizado para el procesamiento y obtención de varios mapas auxiliares, se consideró la opción de mejor resolución, por encima de las curvas de nivel presentadas por INEGI cuyo detalle alcanza en su mayoría los 20 metros.

Se decidió usar el *DEM* con mayor resolución, de acuerdo con lo establecido por Suárez (2009), quien define esta herramienta como “capas raster en los sistemas de información geográfica donde la elevación es representada como pixeles que cubren un área rectangular específica en una determinada escala” (pp. 530), hace además hincapié en que un análisis de peligros depende en gran medida de la exactitud en cuanto a resolución del Modelo de Elevación Digital.

- **Mapa geológico:** La información para la elaboración de este mapa fue recabada de distintas fuentes con el objetivo de obtener la máxima precisión. Como se verá más adelante, la geología es el principal factor por considerar en la generación de procesos de remoción en masa.

En primera instancia se consideró el mapa propuesto por Carlos Valerio (2010). Posteriormente se corroboró y modificó con la geología expuesta por Esther Romero Terán (2001). Por último, los contactos litológicos fueron precisados con ayuda de las curvas de nivel generadas a partir del Modelo de Elevación Digital.

- **Mapa de pendientes:** Dada la naturaleza del presente trabajo fue necesario generar dos mapas de pendientes a partir del *MDE*, creados a través de un Sistema de Información Geográfica para representar la inclinación del terreno respecto a la horizontal.
 - Para el mapa de susceptibilidad a deslizamientos: El criterio utilizado para la clasificación del mapa de pendientes, fue el propuesto por Suárez (2009) y expuesto en la Tabla 11.

Tabla 11. Clasificación de pendientes para deslizamientos

Clasificación	% de pendiente	Ángulo de inclinación
Muy baja	0 a 5%	0 a 8.5°
Baja	15 a 30%	8.5 a 16.7°
Mediana	30 a 50%	16.7 a 26.6°
Alta	50 a 100%	26.6 a 45°
Muy alta	Más del 100%	Más de 45°

La distribución de datos muestra un decremento pronunciado después de rebasar los 16° de inclinación (Fig. 3.1).

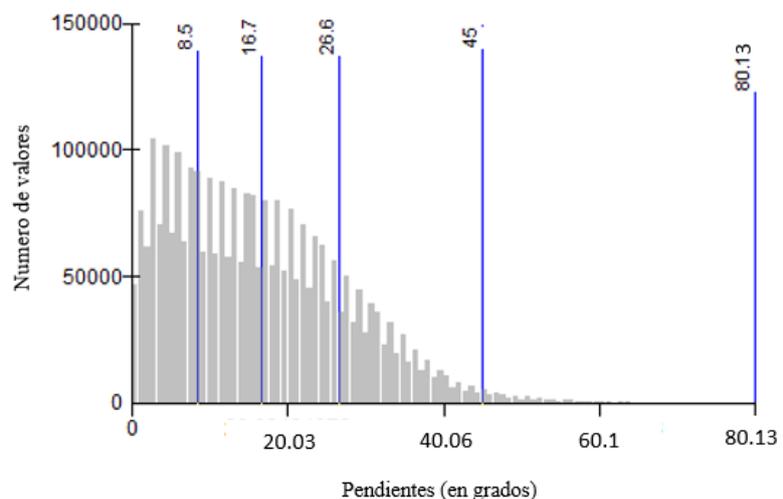


Fig. 3.1 Distribución de pendientes de acuerdo con la clasificación de Suárez, 2009. Distribución descendente gradual conforme aumenta la pendiente.

Se decidió utilizar esta clasificación debido a que es una propuesta dentro del análisis geotécnico de laderas para deslizamientos.

- Para el mapa de susceptibilidad a caídas: se optó por retomar la clasificación propuesta por CENAPRED (2019) en su formato de estimación de la susceptibilidad a este fenómeno, la clasificación final se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Clasificación original de pendientes para caídas, INEGI (2019).

Clasificación	Intervalo
Baja	Menos de 30°
Media	30° a 50°
Alta	50° a 70°
Muy alta	70° a 90°

Los datos de la zona de estudio, al usar esta clasificación muestran un decremento abrupto para toda inclinación mayor de 20° (Fig. 3.2):

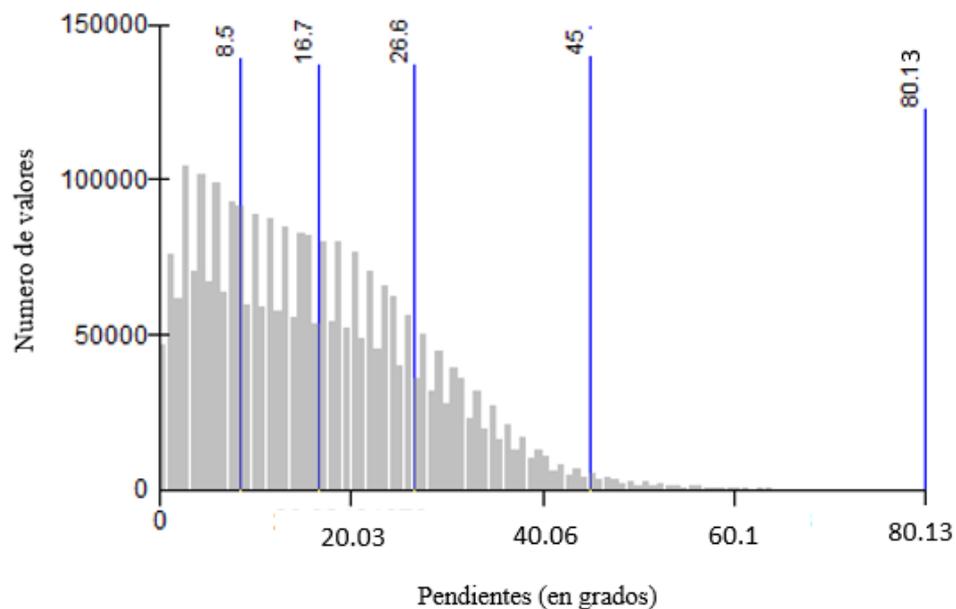


Fig. 3.2 Distribución de pendientes de acuerdo con la clasificación de caídas propuesta por CENAPRED (2019).

➤ **Mapa de inventario:** la información recabada sobre este campo proviene de dos fuentes, la primera otorgada de la base de datos generada por el Instituto de Geofísica de la UNAM como parte del proyecto “Elaboración del atlas de Riesgos de Origen Natural de la Ciudad de México” (Convenio SECITI/112/2017) (datos proporcionados por el Instituto de Geofísica, UNAM, datos no publicados) y la segunda, el inventario presentado por Carlos Valerio (2010). Los datos de la primera fuente están definidos como: deslizamiento traslacional, rotacional, flujos, caídas y “no se sabe”. Mientras que, en el expuesto por Valerio, no se especifica esta información. Por esta razón se optó en sumar los datos, de esta manera se concentró la información de la siguiente manera:

- Deslizamiento traslacional, deslizamiento rotacional, flujos, “no especificado” y puntos del inventario de Valerio (Fig. 3.3).

La clasificación anterior se llevó a cabo con la intención de tomar en cuenta todas las posibilidades vertidas en los campos “no especificado” y los datos de Valerio fueran deslizamientos o caídas según sea el caso. De esta manera se asegura la inclusión de todos los datos. Para el caso de caídas, se optó por omitir el mapa de inventario dada la escasa información y/o claridad en los datos de clasificación.

Evento	Latitud	Longitud	Tipo	Fecha	Actividad Humana	Presencia de Lluvia
1	19.36258831	-99.2887532	Deslizamiento traslacional	07/06/1986	No	Sí
2	19.36258831	-99.2887532	Deslizamiento rotacional	11/06/1994	No	Sí
3	19.34341931	-99.28326265	Deslizamiento traslacional	15/10/1996	No	Sí
4	19.36258831	-99.2887532	Deslizamiento rotacional	22/06/1998	No	Sí
5	19.36258831	-99.2887532	Deslizamiento rotacional	13/08/1998	Sí	Sí
6	19.36258831	-99.2887532	Deslizamiento rotacional	16/01/1998	Sí	No
7	19.3470668	-99.27667379	Deslizamiento traslacional	29/07/1998	No	Sí
8	19.36258831	-99.2887532	Deslizamiento rotacional	25/09/2001	No	Sí
9	19.36358398	-99.27507677	Deslizamiento rotacional	19/12/2001	No	Sí
10	19.3927372	-99.2634604	Deslizamiento traslacional	21/08/2004	No	Sí
11	19.37405752	-99.30417938	Deslizamiento rotacional	09/09/2004	No	Sí
12	19.3689108	-99.27686119	Deslizamiento rotacional	02/09/2005	No	Sí
13	19.34174659	-99.30897412	Deslizamiento traslacional	26/09/2006	No	No
14	19.37420149	-99.30414146	Deslizamiento traslacional	29/07/2007	No	Sí
15	19.35838212	-99.27611174	Deslizamiento traslacional	27/07/2009	Sí	No
16	19.35999349	-99.28025292	Deslizamiento rotacional	14/07/2010	No	
17	19.38021507	-99.25936716	Deslizamiento traslacional	05/09/2011	No	Sí
18	19.3625938	-99.27530113	Deslizamiento rotacional	06/09/2013	No	Sí
19	19.34986967	-99.31688211	Deslizamiento rotacional	26/09/2013	No	No
20	19.3501049	-99.31663899	Deslizamiento rotacional	26/09/2013	No	No
21	19.35179105	-99.31547613	Deslizamiento rotacional	26/09/2013	No	No
22	19.35412115	-99.31609414	Deslizamiento rotacional	26/09/2013	No	No
23	19.3524348	-99.2884761	Deslizamiento rotacional	27/09/2013	No	No
24	19.32649357	-99.32559285	Deslizamiento traslacional	27/09/2013	No	No
25	19.36796428	-99.29831063	Deslizamiento rotacional	30/10/2013	No	No
26	19.35432195	-99.27020875	Deslizamiento traslacional	10/11/2015	Sí	No
27	19.37127403	-99.30504744	Deslizamiento rotacional	03/10/2018	No	Sí
28	19.36082886	-99.28128452	Flujo	31/08/2018	No	Sí
29	19.35392722	-99.31739933	Flujo	26/09/2013	No	Sí
30	19.35298968	-99.31918046	Flujo	26/09/2013	No	Sí
31	19.35304725	-99.32072471	Flujo	26/09/2013	No	Sí
32	19.35455378	-99.27043497	Flujo	04/11/2015	Sí	No
33	19.3315971	-99.32974772	Flujo	26/09/2013	No	Sí
34	19.32865002	-99.32729316	Flujo	26/09/2013	No	Sí
35	19.3276183	-99.32608153	Flujo	26/09/2013	No	Sí
36	19.37655219	-99.26725059	Flujo	19/07/2016	No	Sí
37	19.35524393	-99.30767641	Flujo	19/07/1984	No	No
38	19.33127232	-99.29596543	No especificado	29/06/2005	Sí	No
39	19.35511109	-99.3160766	No especificado	08/08/2005	Sí	No
40	19.39048834	-99.26548423	No especificado	22/10/2005	Sí	No
41	19.39197044	-99.26587063	No especificado	30/10/2005	Sí	No
42	19.33408644	-99.31138431	No especificado	12/10/2006	Sí	No
43	19.37425746	-99.28977305	No especificado	18/01/2007	Sí	No
44	19.38235349	-99.27029887	No especificado	30/08/2010	Sí	No
45	19.33156535	-99.29563435	No especificado	21/19/2010	Sí	No
46	19.312818	-99.329901				
47	19.324906	-99.324571				
48	19.324715	-99.329615				
49	19.329569	-99.332566				
50	19.331949	-99.331994				
51	19.336708	-99.325427				
52	19.351845	-99.313917				
53	19.341375	-99.287029				
54	19.343635	-99.272038				
55	19.364099	-99.279176				
56	19.361957	-99.281675				
57	19.358388	-99.277868				
58	19.383876	-99.263869				
59	19.381318	-99.259586				
60	19.387326	-99.259407				
61	19.388873	-99.25798				
62	19.387088	-99.254351				

Fig. 3.3 Tabla de puntos de inventario para deslizamientos, los datos 46- 62 son provenientes de Carlos Valerio (2010).

- **Mapa de uso de suelo:** para la elaboración de este mapa se utilizó el realizado por el Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED, s.f). La decisión de seleccionarlo por encima de los datos referentes al marco geo-estadístico de la Alcaldía del portal de INEGI (2018) y al mapa de uso de suelo mostrado en el PDDU (GCDMX, 1997) fue que, aunque la primera presenta datos actuales, son muy generales, al presentar tres unidades (mancha urbana, zonas rurales y suelo de conservación). Por otra parte, la información recabada del Programa Delegacional a pesar de tener mayor detalle en la delimitación de unidades, se trata de datos con más de 20 años de antigüedad y como se mencionó en el Capítulo 1 la alcaldía ha pasado por cambios importantes en los últimos años. Sin embargo, se observó que todas las variantes de mapas de uso de suelo contempladas cuentan con una tendencia de información similar por lo que se consideró más confiable la versión mencionada (INAFED) al contar con unidades representativas –Agroecológico, Agroforestal, Áreas Naturales Protegidas, Forestal, Poblado Rural y Suelo Urbano-, capacidad de acoplar la información a la metodología planeada y una buena tolerancia temporal.
- **Mapa de Influencia de Drenaje:** en primera instancia se tomó la red hídrica generada por INEGI (2018) para las cuatro cartas que contienen a la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos. Con el propósito de hacerla más representativa, se modificaron algunos de sus vértices y se agregaron más líneas de afluencia; lo previo con ayuda de las curvas de nivel generadas a cada cinco metros. Sin embargo, no se consideraba que la red tuviera suficiente precisión respecto a la escala utilizada en el resto del trabajo, por lo anterior, se tomaron en cuenta para este mapa los drenajes generados por el Software Sistema para Análisis Automatizados Geocientíficos o *SAGA* por sus siglas en inglés a partir del procesamiento del Modelo Digital de Elevación y los algoritmos de Análisis

del Terreno presentes en el *Terrain*. Posteriormente los drenajes obtenidos de SAGA fueron procesados en un sistema de información geográfica mediante la herramienta Distancia Euclidiana. Con este método se adquirió un modelo *raster* donde cada valor de las celdas corresponde a un valor de proximidad respecto al río más cercano. Este mapa fue considerado debido a que es un factor condicionante para el origen de los PRM, no son únicamente los ríos sino las rutas de escorrentía y drenajes menores. Ya que intervienen en el grado de saturación de los materiales al incorporar agua y alterar así, propiedades como la cohesión (disminución dependiente de la granulometría, disminución de la resistencia e incremento de tensiones) (Lara y Sepúlveda, 2008).

- **Mapa de Relieve Relativo:** Parte del Modelo de Elevación Digital generado anteriormente. El mapa de Relieve Relativo (RR) muestra la diferencia altitudinal presente en cada cuadrante de la malla realizado a través de SIG con una resolución de 100 m. La finalidad de esta variable es representar las áreas con mayor potencial de inestabilidad, debido a que, a mayor superficie expuesta en laderas, mayor será la susceptibilidad de colapsar.

3.4 Cuarta etapa. Elaboración de mapas de susceptibilidad

Hansen (1984; en Remondo, 2001) especifica que el estudio de laderas puede tener dos vertientes: el enfoque ingenieril y el enfoque geomorfológico. La principal diferencia entre ellos es la escala con la que se trabaja. En el enfoque ingenieril la escala es de carácter local por lo que se puede realizar una evaluación más precisa de la ladera, casi siempre para fines específicos, por lo que se requieren estudios detallados de campo y distintas pruebas de laboratorio. Por otro lado, en el enfoque geomorfológico la zona de estudio es mayor, por lo que es un análisis más regional. En el presente trabajo se abordarán ambas visiones, un método

con perspectiva regional para los mapas de susceptibilidad a deslizamientos y caídas, mientras que para la evaluación de los casos de estudio se tratará con una orientación ingenieril.

De acuerdo con la clasificación anterior, el enfoque geomorfológico tiene dos subdivisiones que se describen a continuación:

1) Métodos Directos: el ejemplo más claro, son los inventarios cartográficos de deslizamientos o caídas según sea el caso; con base en la idea de que en los sitios donde se han presentado deslizamientos puede volver a ocurrir movimiento del terreno o bien en sitios próximos y/o bajo las mismas condiciones. Las fuentes del inventario pueden ser diversas, como fotografías aéreas, antecedentes bibliográficos, o datos tomados directamente en campo. En cualquiera de los casos se deben tomar en cuenta factores como la escala, la exactitud topográfica, las dimensiones, etc., de acuerdo con el propósito que requiera el estudio. De este inventario se podrían derivar un mapa de densidad de movimientos por unidades, mapas de actividad - interpretación multitemporal- y mapas geomorfológicos de amenaza para su consecuente análisis.

2) Métodos Indirectos: la principal característica de este tipo de métodos es que “la susceptibilidad, amenaza o riesgo se evalúa mediante la combinación espacial de parámetros” (Redondo, 2001, pp. 50). A su vez, los métodos indirectos se catalogan como se muestra en la Figura 3.4.

En la realización del mapa de susceptibilidad tanto para deslizamientos como para caídas se utilizó el método estadístico multicriterio que se basa en el proceso jerárquico analítico (AHP) desarrollado por Saaty en 1980 (Morales, 2018), explicado y resaltado en color en la Figura 3.4. En primera instancia se realizaron los mapas de las distintas variables a considerar para deslizamientos y caídas, de acuerdo con las consideraciones necesarias para cada parámetro y las condiciones específicas de cada uno de los fenómenos a analizar (Tabla 13). Esta decisión

tuvo como fundamento la comparación de las distintas posturas tomadas por algunos autores, respecto a los factores más decisivos en la generación de procesos de remoción en masa. Fueron seleccionadas las variables con mayor frecuencia y que a su vez coincidían con la visión general del trabajo.

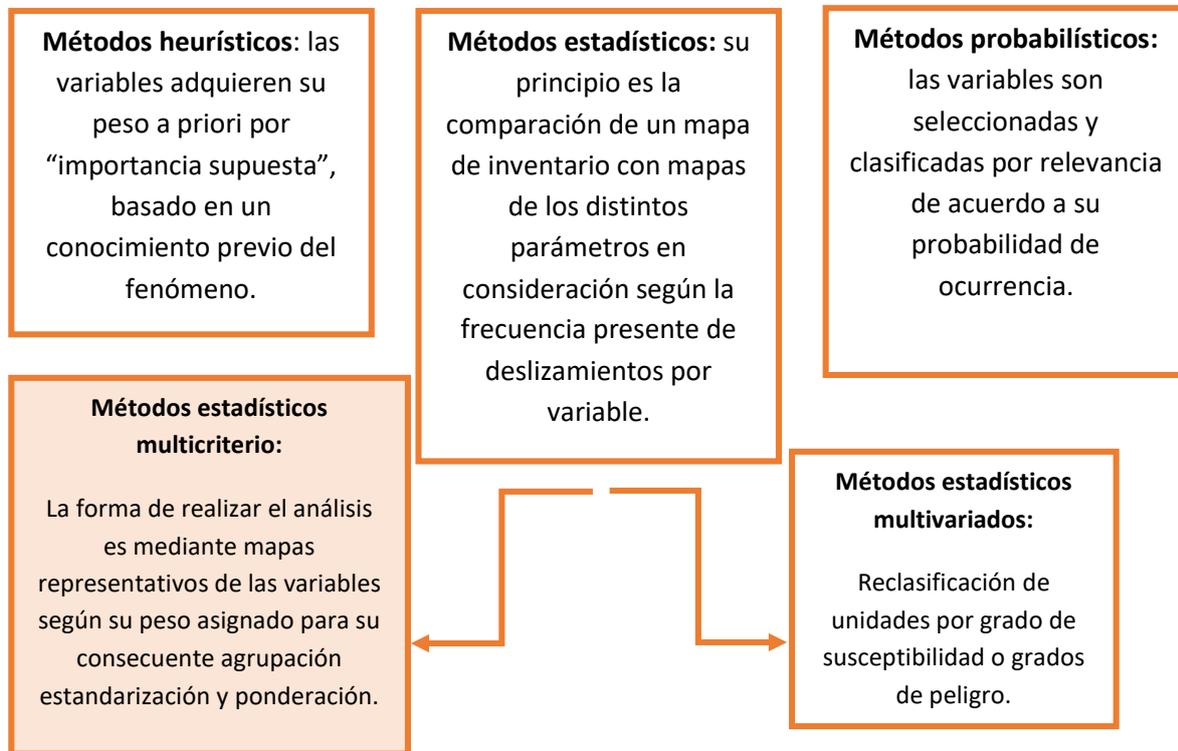


Fig. 3.4 Esquema de la clasificación de métodos indirectos considerados para la elaboración de mapas de susceptibilidad a PRM, en color rosa se resalta el método empleado en el presente trabajo.

Autor	MAPAS														
	Geológico	Pendientes	Uso de Suelo	Inventario	Geohidrológico	Geomorfológico	Cobertura vegetal	Orientación	Altitud	Curvatura	Flujo acumulado	Altimetría	Precipitación	Topográfico	Geotecnico
Obregón y Lara, 2013	x	x	x		x	x	x								
Jímenez Perálvez Jorge D., 2005	x	x						x	x						
Suárez, 2009	x	x		x		x								x	x
Mendoza Ramírez y Aristizábal, 2017	x	x	x					x		x	x				
Blanc y Cleveland, 1968 en Remondo	x	x		x											
Brabb 1972 en Remondo	x	x		x											
Valentini 1967 en Remondo	x	x		x											
Legorreta et al., 2014	x	x	x		x				x	x		x			
Yépez Rincón et al., 2017	x		x		x		x						x		

Fig. 3.5 Comparativa de las principales variables partícipes en la generación de procesos de remoción en masa de acuerdo con distintos autores.

Como podemos observar en la Fig. 3.5, en todos los casos es imprescindible un mapa geológico preciso, seguido de un mapa de pendientes (en muchos de los escenarios esta combinación resulta decisiva), mapa de uso de suelo y de un inventario. Esta información permitió elaborar mapas “secundarios” que complementan el análisis y cálculo de susceptibilidad final. Estas consideraciones fueron tomadas en cuenta tanto en la selección de variables a integrar en el cálculo (Tabla 13), como en el peso que más tarde se les fue asignado. Es decir, el peso de la variable geología es mayor porque es más recurrente en la literatura. Otro aspecto considerado como punto de partida en el peso de las variables, fue la propuesta del CENAPRED, en donde se coincide con los factores de mayor impacto en la generación de estos PRM. Por último, se tomó en cuenta la adecuación de estas variables a la zona de estudio y su impacto en la inestabilidad de laderas.

Una vez seleccionados los parámetros se les fue asignado un peso a cada uno de ellos. En un inicio se plantearon cuatro propuestas de ponderaciones según sea el caso: de susceptibilidad a deslizamientos y a caídas y/o desprendimientos (Tabla 14). De donde fue seleccionada la de mejor adecuación para la generación de los distintos fenómenos. Para el caso del mapa de susceptibilidad a deslizamientos fue seleccionada la propuesta que mejor corroboró el mapa de inventario realizado, debido a que representan puntos reales de ocurrencia. En tanto el caso de susceptibilidad a caídas se eligió la ponderación que acentuaban las interacciones de variables observadas en campo. También fueron evaluadas por descarte, es decir, ponderaciones que marcaban un grado de susceptibilidad considerable con combinaciones de variables que en comparativa con lo observado en campo no se confirmaban.

Tabla 13. Variables utilizadas para los mapas de Susceptibilidad

Variables para mapa de susceptibilidad a deslizamientos	Variables para mapa de susceptibilidad a caídas
Mapa geológico	Mapa geológico
Mapa de pendientes	Mapa de pendientes
Mapa de uso de suelo	Mapa de densidad de lineamientos
Mapa de influencia de drenaje	Mapa de Relieve Relativo
Mapa de relieve relativo	Mapa de uso de suelo
	Mapa de influencia de drenaje

Tabla 14. Propuestas de porcentajes de ponderación para las variables según el fenómeno.

La propuesta seleccionada se resalta en color.

Propuestas Variable	Susceptibilidad a deslizamientos				Susceptibilidad a caídas			
	CENAPRED 2019	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3	CENAPRED 2019	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
Geología	45%	50%	45%	35%	29%	25%	23%	30%
Pendiente	29%	25%	30%	30%	27%	25%	23%	25%
Uso de Suelo	26%	12.5%	12%	15%	26%	10%	14%	10%
Influencia de Drenaje		9.4%	8%	15%		5%	8%	
Relieve Relativo		3.1%	5%	5%		15%	17%	15%
Fallas y Fracturas					18%	20%	20%	20%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

3.4.1 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos

Para la generación del mapa por deslizamientos se considera, como combinación primordial los factores condicionantes de geología y pendientes. Puesto que, para este fenómeno, las dos variables son las de mayor relevancia (de acuerdo con la mayoría de los autores consultados, Fig. 3.4), al presentar un espectro de pendientes más amplio para su generación. Además, se

suelen presentar con mayor frecuencia en materiales de baja competencia, favorecidos por la presencia de humedad (mapa de influencia de drenaje) y el uso de suelo que se le asigna a la superficie en cuestión, siendo los más modificados de forma antrópica los más susceptibles, aún más cuando se lleva a cabo de forma irregular como se realiza actualmente en la Alcaldía Cuajimalpa. Otra variable que se consideró en este apartado fue el de relieve relativo, pues son estas variaciones altitudinales por donde se deslizará parte de la ladera. También es aquí, donde suele desencadenarse un flujo, convirtiéndose así en un movimiento complejo. Este potencial de tornarse en un movimiento secundario se ve favorecido por una distancia inclinada, aunado al contenido de humedad.

Una vez seleccionados los pesos de ponderación para cada variable a usar, se prosiguió a la asignación de pesos por elemento o clase pertenecientes a cada una de ellas. Para esta asignación se subdividieron todas las variables en cinco clases, de acuerdo con su grado de susceptibilidad y que representarían su peso dentro de la variable, siendo: **1 Muy baja, 2 Baja, 3 Media, 4 Alta y 5 Muy alta.** Siendo de muy baja susceptibilidad a deslizamientos aquellos elementos con menor recurrencia en la generación de este fenómeno. Al contrario de los elementos con valor cinco cuyo impacto es significativo dentro de la ocurrencia de este PRM.

En lo relativo a los factores de geología (Tabla 15) y uso de suelo (Tabla 16) se produjeron mediante la interpolación del número de eventos registrados en el inventario para la variable considerada. Para la variable de pendientes la clasificación fue directa al presentar las cinco clases con su grado de susceptibilidad como se mostró anteriormente (apartado 3.3). La estrecha relación entre el inventario de deslizamientos con la asignación de pesos se respalda con lo postulado por Varnes (1984), en donde los movimientos naturales de falla podrían presentarse en el futuro en las mismas condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas que con las que se presentan actualmente o se presentaron en el pasado, para un lugar en específico. Para Lara y Sepúlveda (2008), los mapas de inventario ayudan a

delimitar unidades asociadas con la ocurrencia de los PRM, de esta forma se les puede interpretar como una primera zonificación a estos fenómenos.

Tabla 15. Clasificación en clases para la variable Geología

Elemento	Deslizamientos	Nivel de susceptibilidad	Clase
Basalto	0	Muy bajo	1
Dacita	1	Bajo	2
Andesita	3	Medio	3
Depósitos de bloques y cenizas	18	Alto	4
Depósitos aluviales	6	Alto	4
Lahar	34	Muy alto	5

Tabla 16. Clasificación en clases para la variable Uso de Suelo

Elemento	Deslizamientos	Nivel de susceptibilidad	Clase
Áreas Naturales Protegidas	0	Muy bajo	1
Agroecológico	5	Bajo	2
Agroforestal	1	Bajo	2
Forestal	8	Medio	3
Poblado Rural	17	Alto	4
Suelo Urbano	31	Muy alto	5

Estas distribuciones de clases se determinaron a partir de la clasificación por método de *Quantil* (Cuantil o por puntos seleccionados a intervalos equivalentes de acuerdo con la distribución de una variable aleatoria), producido automáticamente en el SIG al representar y distribuir de mejor forma todos los elementos de las variables en las distintas clases.

Para la variable de relieve relativo, la asignación de pesos se sostiene en función de acoplar el rango de valores para cada celda en cinco categorías (Tabla 17). En este caso existe un valor

máximo de 113.5 m de diferencia altitudinal y la convicción de que a mayor altura existe una mayor inestabilidad en laderas y taludes lo que repercute en la incidencia de los PRM.

Tabla 17. Clasificación en clases para la variable Relieve Relativo

Nivel de susceptibilidad	Clase	Diferencia de altura
Muy Baja	1	0m- 10m
Baja	2	10m-30m
Media	3	30m-50m
Alta	4	50m- 100m
Muy alta	5	Mayor a 100m

En cuanto a la variable “influencia de drenaje” se retomó la ponderación propuesta por Déthié Sarr et al. (2019), en su análisis de inestabilidad en la región de Mako en Senegal (Tabla 18) al presentar un objetivo similar. Además, las escalas de las dos áreas de estudio en cuestión son de carácter regional por la que se considera aplicable.

Tabla 18. Clasificación en clases para la variable Influencia de Drenaje

Nivel de susceptibilidad	Clase	Distancia a drenaje
Muy Baja	1	Más de 200m
Baja	2	100- 200m
Media	3	50- 100m
Alta	4	25- 50m
Muy alta	5	0 -25m

3.4.2 Mapa de Susceptibilidad a Caídas

En lo relativo al mapa de susceptibilidad por caídas, las variables tomadas en cuenta, así como su peso dentro del cálculo de susceptibilidad cambia con respecto al mapa de susceptibilidad por deslizamientos superficiales. Con tres variables consideradas como las principales: geología, pendiente y grado de fracturación, ya que son precisamente los

lineamientos, fracturas, fallas y discontinuidades en general, las que producen los bloques susceptibles a caer, en conjunto con pendientes abruptas y elevadas laderas. Dentro de esta propuesta el factor uso de suelo está presente y se considera “secundario” respecto a las tres variables antes mencionadas.

En cuanto a las clases propuestas para este mapa, se consideran cuatro, las cuales reflejan su nivel de susceptibilidad: **1 Bajo, 2 Medio, 3 Alto y 4 Muy alto**, una vez más estas categorías representan el peso de cada elemento dentro de las distintas variables tomadas en cuenta para la generación de caídas. La variable pendiente mantiene la clasificación propuesta por el CENAPRED (2019). En tanto al factor geología se considera las propiedades geo mecánicas de los distintos tipos de macizos rocosos, en ese sentido los materiales de mayor competencia y con mayor número de discontinuidades son más propensos a desarrollar bloques, aunque se debe recordar que para todos los PRM son tres los materiales probables –roca, detritos y suelo– por lo que no se deben de descartar las litologías de menor competencia como los depósitos aluviales y los depósitos de lahar (Tabla 19). De acuerdo con Lara y Sepúlveda (2008) ante un sismo (factor desencadenante) las caídas de roca son el evento de mayor abundancia, junto con los deslizamientos. González de Vallejo (2002) señala que las caídas son comunes en zonas montañosas, manifestándose en masas rocosas. Él lo compara con los vuelcos, en los que también define a los frentes rocosos como los lugares de mayor susceptibilidad.

Tabla 19. Clasificación en clases para la variable Geología

Elemento	Nivel de susceptibilidad	Clase
Depósitos aluviales	Bajo	1
Depósitos de bloques y cenizas	Medio	2
Lahar	Medio	2
Basalto	Alto	3
Andesita	Muy alto	4
Dacita	Muy alto	4

Para la asignación de pesos a la variable densidad de lineamientos se empleó la clasificación de intervalo geométrico, dentro del SIG. Esto debido a que fue posible adaptar de mejor forma a la visión de este trabajo (Tabla 20). En cuanto al relieve relativo, se dividió de acuerdo con lo propuesto por Lara y Sepúlveda (2008), pues retoman estudios precedentes y relacionan la frecuencia de caídas con distintas variables, entre ellas, el desnivel del terreno (Tabla 21). Debido a que se trata de una clasificación con un enfoque muy particular a este fenómeno, se decidió tomarlo como punto de partida.

En tanto la variable de uso de suelo, siguió una clasificación con tendencia muy similar a la de los deslizamientos (Tabla 22). Con el mismo fundamento metodológico, el factor influencia de drenaje fue modificado debido a las discrepancias de número de clases en comparación con el mapa de susceptibilidad a deslizamientos (Tabla 23).

Tabla 20. Clasificación en clases para la variable Grado de Lineamientos

Nivel de susceptibilidad	Clase	Densidad de lineamientos (m/ 500m ²)
Baja	1	0 -60.14
Media	2	60.14- 217.12
Alta	3	217.12- 626.85
Muy alta	4	626.85- 1696.34

Tabla 21. Clasificación en clases para la variable Relieve Relativo

Nivel de susceptibilidad	Clase	Diferencia de altura
Baja	1	0 - 7.5 m
Media	2	7.5 - 15m
Alta	3	15 – 22.5 m
Muy alta	4	>22.5 m

Tabla 22. Clasificación en clases para la variable Uso de Suelo

Elemento	Nivel de susceptibilidad	Clase
Áreas Naturales Protegidas	Bajo	1
Agroecológico	Medio	2
Agroforestal	Medio	2
Forestal	Medio	2
Poblado Rural	Muy alto	3
Suelo Urbano	Alto	4

Tabla 23. Clasificación en clases para la variable Influencia de Drenaje

Nivel de susceptibilidad	Ponderación/ Clase	Distancia a drenaje (m)
Baja	1	0- 25
Media	2	25- 50
Alta	3	50- 100
Muy alta	4	+ 100

3.4.3 Álgebra de mapas

Como último paso en la generación de los mapas de susceptibilidad y contempladas todas las ponderaciones anteriores, se realizó el álgebra de mapas utilizando un sistema de información geográfica, en donde se consideraron capas de tipo *raster* con resolución de cinco metros. Cada capa representa una variable, reclasificada en las clases correspondientes a cada PRM según el caso en cuestión. De esta forma se suman las capas *raster* multiplicadas por la ponderación de la variable correspondiente.

$$SF = (SG)(\%) + (SP)(\%) + (SD)(\%) \dots (6)$$

Donde:

SF= Susceptibilidad Final

SG= Susceptibilidad por geología

SP= Susceptibilidad por pendientes

SD= Susceptibilidad por drenaje

Independientemente de la cantidad de variables, la fórmula anterior, puede incluir cualquier cantidad de porcentajes. Es importante recalcar que, en los componentes de la ecuación, SG, SP, etc. Contienen implícitamente la susceptibilidad asignada por elemento, por lo que el resultado expresará ambas consideraciones.

Las ponderaciones finales utilizadas para el álgebra de mapas se muestran a continuación en las tablas 24 y 25.

Tabla 24. Ponderaciones finales para mapa de susceptibilidad a deslizamientos

Variable	Peso	Variable	Clase
Geología	35%	Basalto	1
		Dacita	2
		Andesita	3
		Depósitos de bloques y cenizas Depósito aluviales	4
		Lahar	5
Pendiente	30%	0°- 8.5°	1
		8.5°- 16.7°	2
		16.7°- 26.6°	3
		26.6°- 45°	4
		Más de 45°	5
Uso de suelo	15%	Áreas Naturales Protegidas	1
		Agroecológico Agroforestal	2
		Forestal	3
		Poblado Rural	4
		Suelo Urbano	5
Influencia de drenaje	15%	Mayor a 200m	1
		100- 200m	2
		50- 100m	3
		25- 50m	4
		0-25 m	5
Relieve Relativo	5%	0-10m	1
		10- 30m	2
		30-50 m	3
		50-100 m	4
		Mayor a 100m	5

Tabla 25. Ponderaciones finales para mapa de susceptibilidad a caídos y/o desprendimientos

Variable	Peso	Variable	Clase
Geología	23%	Depósitos aluviales	1
		Lahar y depósitos de bloques y ceniza	2
		Basalto	3
		Dacita y Andesita	4
Pendiente	23%	Menos de 30°	1
		30° - 50°	2
		50° - 70°	3
		70° - 90°	4
Grado de Lineamientos	20%	0 – 60.14	1
		60.14- 217.12	2
		217.12- 626.85	3
		626.85- 1696.34	4
Uso de suelo	14%	ANP	1
		Agroecológico, agroforestal y forestal	2
		Poblado rural	3
		Suelo Urbano	4
Relieve Relativo	17%	0-7.5 m	1
		7.5 – 15 m	2
		15 – 22.5 m	3
		+ 22.5 m	4
Influencia de Drenaje	8%	+ 100 m	1
		50-100 m	2
		25- 50 m	3
		0-25 m	4

3.5 Quinta etapa. Casos de estudio

En primera instancia se realizó una salida de campo de reconocimiento tanto de la alcaldía en general como para la selección de los casos de estudio, mismos que se seleccionaron de tal forma que los datos que arrojará la evaluación se podrían implementar en las mitigaciones y mejoras del sitio. En su selección se consideraron los sitios que presentaban este tipo de problemáticas, así como sitios propuestos por los directivos de la Secretaría de Protección Civil de Cuajimalpa de Morelos, que presentaran condiciones distintas entre sí y la disponibilidad de acceso para los estudios correspondientes y su análisis. De esta manera se eligieron las laderas Maromas y Del Carmen, nombres asignados por encontrarse en esas respectivas colonias. Una vez elegidos los casos específicos se realizó una inspección donde se tomaron algunos datos estructurales, reconocimiento geológico, contexto urbano, relación con el entorno, entre otros aspectos. Se inició la planeación y ubicación para las líneas de tomografía eléctrica a realizarse. Estas fueron ejecutadas en la segunda y tercera visitas de campo, en las que también se tomaron muestras de las unidades más representativas para cada caso (Fig. 3.6). Para ambos casos fueron realizados arreglos con 48 electrodos Dipolo-Dipolo y Dipolo- Dipolo inverso en secciones longitudinales a la ladera. Para el caso de la ladera Las Maromas se llevó a cabo con una separación de dos metros mientras que para el caso de la Col. Del Carmen fue a cada tres metros; todo esto con el propósito de abarcar mayor superficie de análisis.

Como paso siguiente, se estudiaron las muestras colectadas. Este análisis consistió en la determinación de los límites de consistencia (límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y su clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el análisis granulométrico (porcentaje de suelos, coeficiente de uniformidad, coeficiente de curvatura y curva granulométrica). Todo lo anterior se realizó con el fin de caracterizar los sitios de estudio. Es importante mencionar que los análisis de laboratorio se realizaron en el

Laboratorio de Geotecnia “Francisco Zamora Millán” de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Como complemento al estudio, se realizó un análisis de equilibrio límite para encontrar el factor de seguridad con un software especializado. Dadas las condiciones de cada ladera el tratamiento fue distinto para cada caso. La ladera Las Maromas resultaba difícil la extracción de muestras y/o más visitas invasivas al área por lo que se plasmaron en su modelación los datos estructurales obtenidos de visitas de campo previas, las características de los materiales que la conforman y sus potencias obtenidas de la tomografía eléctrica, características que intervienen en la ladera como viviendas, presencia de humedad, premonitores como grietas, etc. Por otra parte, en la Col. Del Carmen no existían tantos factores “mapeables” por lo que los datos de entrada en el software, fueron otros; características de los materiales, grosores y estructuras obtenidas de la tomografía eléctrica, y para una mejor modelación se ingresaron datos de mecánica de suelos como cohesión y ángulo de fricción interna. Estos parámetros fueron extraídos de pruebas triaxiales para una unidad y de fundamento teórico para otras. Para la realización de éstas se realizaron visitas para la extracción de muestras inalteradas y su consecuente preparación en el Laboratorio de Geotecnia “Francisco Zamora Millán” de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Este tipo de pruebas se realizan a una muestra de suelo inalterada cilíndrica denominada probeta (Fig. 3.6). Estas muestras inalteradas se caracterizan por preservar la estructura y el contenido de humedad del lugar donde fueron extraídas (Polanco, 2001). Lo anterior se logra labrando un cubo de suelo de 30 cm^3 , en el lugar de origen. Posteriormente se cubre de un material aislante como manta de cielo o plásticos envolventes; para asegurar que no haya fugas de humedad.

Para comenzar la prueba es necesario recubrir la probeta con una membrana de *látex*, misma que impedirá que haya intercambio de materiales y/o agua entre la muestra y la cámara triaxial en la que se encuentra ubicada al fijarse con aros de plástico a la base y cima de la cámara. La cámara se encuentra conectada a un sistema de válvulas y reguladores de agua y aire que se mantienen unidos a la muestra, mediante discos porosos para darle saturación o no a la muestra. Posterior a la colocación de la probeta, se cubre con la membrana de *látex* y se asegura a la cámara, esta se inundará aplicándole a la muestra una presión de confinamiento. Todos los cambios de presión y respuesta del suelo son mostrados en las pantallas de los lectores. De igual forma, el agua expulsada por la muestra es medida en la bureta. Finalmente, el sistema de carga se realiza de forma controlada, por lo que aplica una carga axial conocida, hasta llegar al punto de falla (Fig. 3.7). En este trabajo se realizó la prueba de tipo “CU”.

➤ Prueba rápida/ Prueba con consolidación y sin drenaje (CU):

- Consolidación de la muestra.
- Aplicación de carga axial de forma rápida hasta fallar la muestra sin cambio de volumen.
- Se determinan los valores de cohesión (C) y ángulo de fricción interna (ϕ).

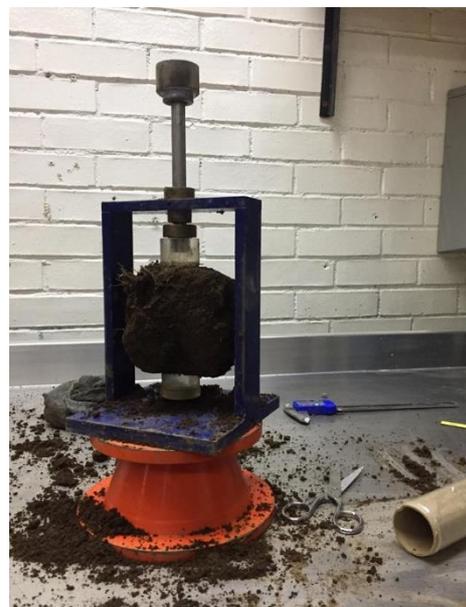


Fig. 3.6 Proceso de toma de muestras inalteradas y la elaboración de probetas a partir de ellas, Col. Del Carmen.

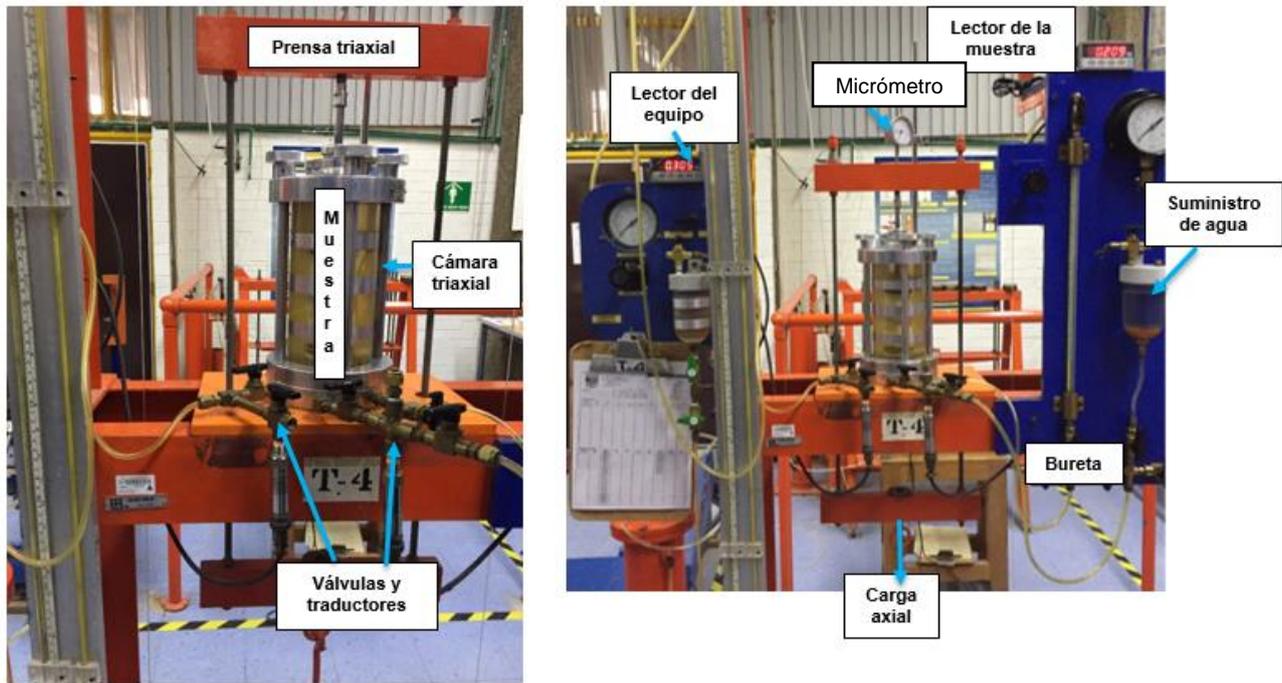


Fig. 3.7 Equipo para pruebas triaxiales

Para tener un contexto visual, se realizaron vuelos con un vehículo aéreo no tripulado (*UAV* por sus siglas en inglés).

Finalmente, a modo de comparación, también se evaluaron los casos de estudio con el cálculo de susceptibilidad específica presentado en el formato de CENAPRED “Estimación de la susceptibilidad a deslizamientos/ caídos y desprendimientos”

4. Mapas y resultados

En este capítulo se exponen y describen los mapas temáticos de los distintos factores condicionantes que intervienen en la generación de los deslizamientos y caídas. Estos mapas fueron utilizados para la generación de los mapas de susceptibilidad.

4.1 Modelo de Elevación Digital

El modelo digital de elevación (MDE) muestra que la zona de estudio presenta un desnivel altitudinal de 1460 m. Su punto más bajo se encuentra en el límite noroeste (Fig. 4.1). Se puede identificar la transición de zona montañosa dominada por zonas elevadas, como domos y cerros pertenecientes a la franja montañosa de la Sierra de Las Cruces (Cerro El Muñeco, Cerro La Palma, Cerro el Caballete y Cerro El Ángel). A lo largo de toda la demarcación existen barrancas, unas más profundas que otras. Por ejemplo, en la parte central se observan con mayor abundancia, en los extremos de la misma que coincide con los cambios litológicos, a éstas se le suman las ubicadas en la zona norte de la demarcación (Fig., 4.1).

4.2 Mapa de inventario de deslizamientos

La mayoría de los eventos reportados se concentran al centro-norte de la Alcaldía, su distribución se orienta hacia las orillas de las principales barrancas, y en general en todos los cambios de elevación (Fig. 4.2). Al sobreponer esta información con el mapa geológico, es claro que los deslizamientos ocurren con mayor cantidad en materiales de menor competencia como lo son los depósitos de lahar y depósitos de bloques y cenizas. Siguiendo con el análisis, y con apoyo de la Fig.4.7 podemos deducir que en su mayoría la generación de estos PRM está relacionada con la presencia de condiciones antrópicas ya sea por la modificación del relieve o

por la existente relación con entre el asentamiento humano y el tipo de materiales geológicos antes mencionados.

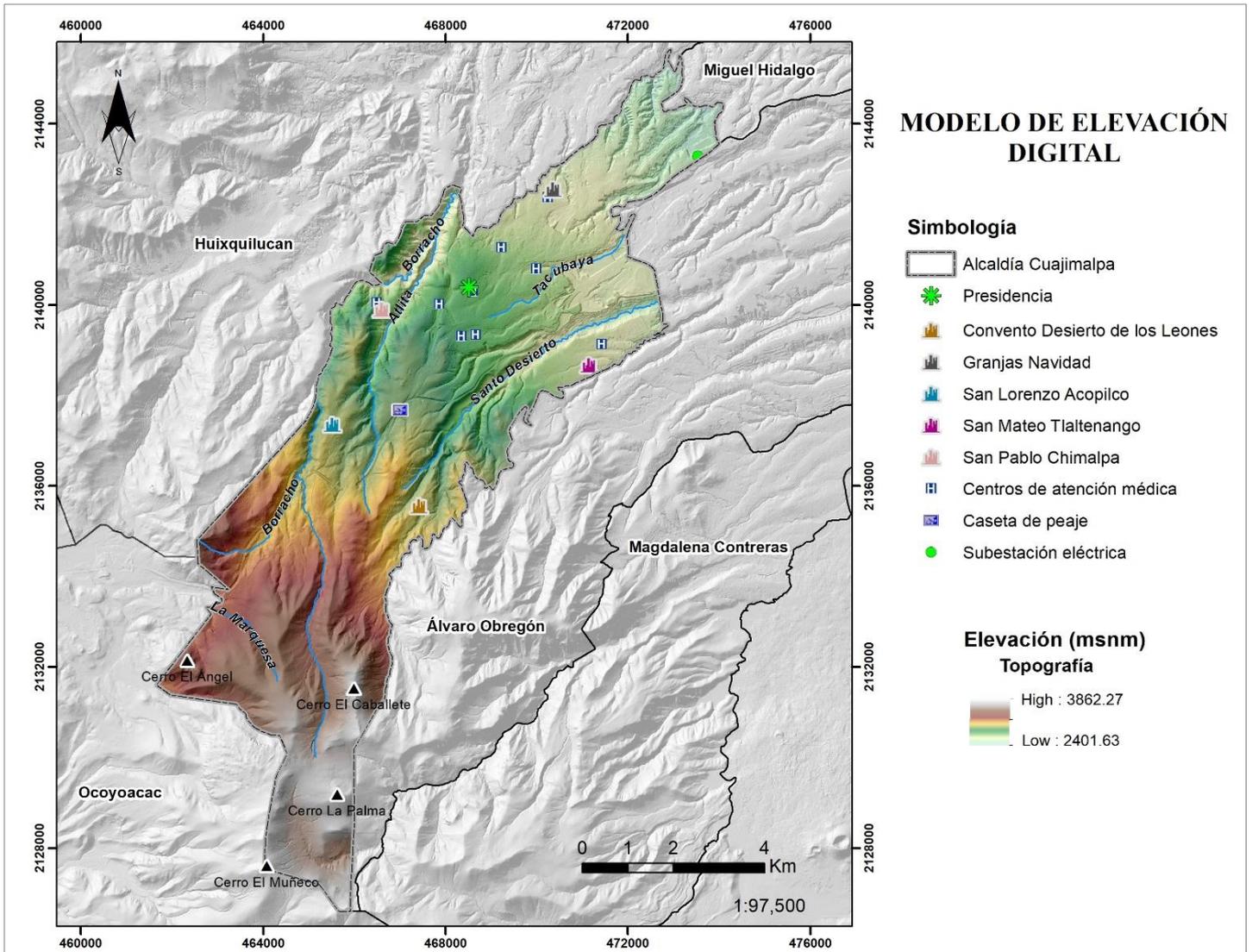
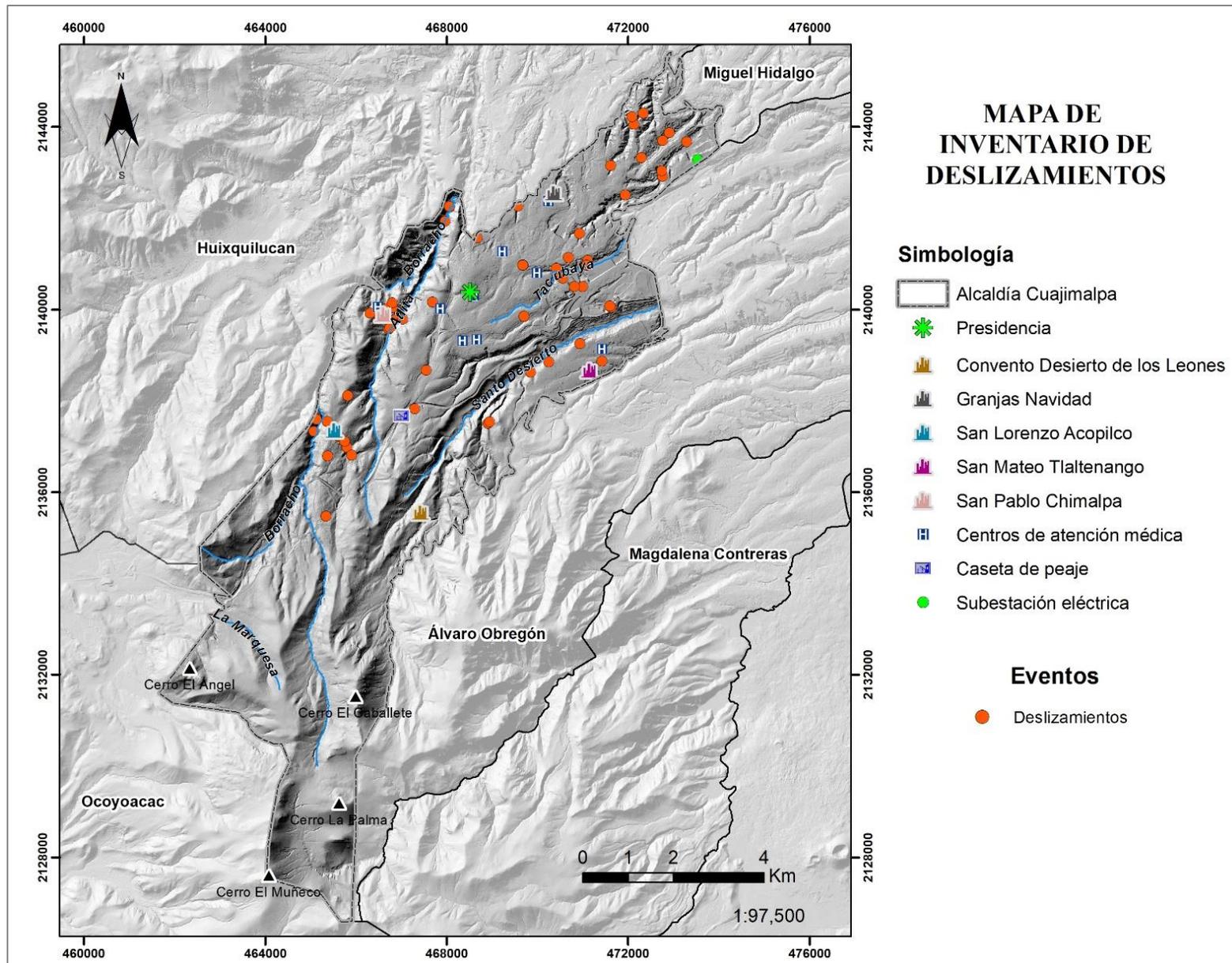


Fig. 4.1 Modelo sombreado del relieve con la altimetría que presenta la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX



4.3 Mapa geológico

La geología juega un rol de suma importancia en la generación de procesos de remoción en masa. Para explicar a mayor profundidad la geología del área de estudio se presentan a continuación los eventos que dieron origen a las características geológicas actuales en la demarcación, los cuales se describen en orden cronológico del más antiguo al más reciente, Todo ello de acuerdo con el trabajo de Romero Terán (2001), quien estudió a detalle este territorio.

Los eventos que conforman a la Sierra de las Cruces son variados, a continuación se colocan de manera esquematizada las principales unidades (Fig. 4.3), siendo aquellos con un subrayado los que se presentan en la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos. Si bien existen unidades posteriores que pertenecen a otros “grupos” la mayoría de las formaciones comprendidas en Cuajimalpa de Morelos forman parte del Complejo Volcánico San Miguel (CVSM).

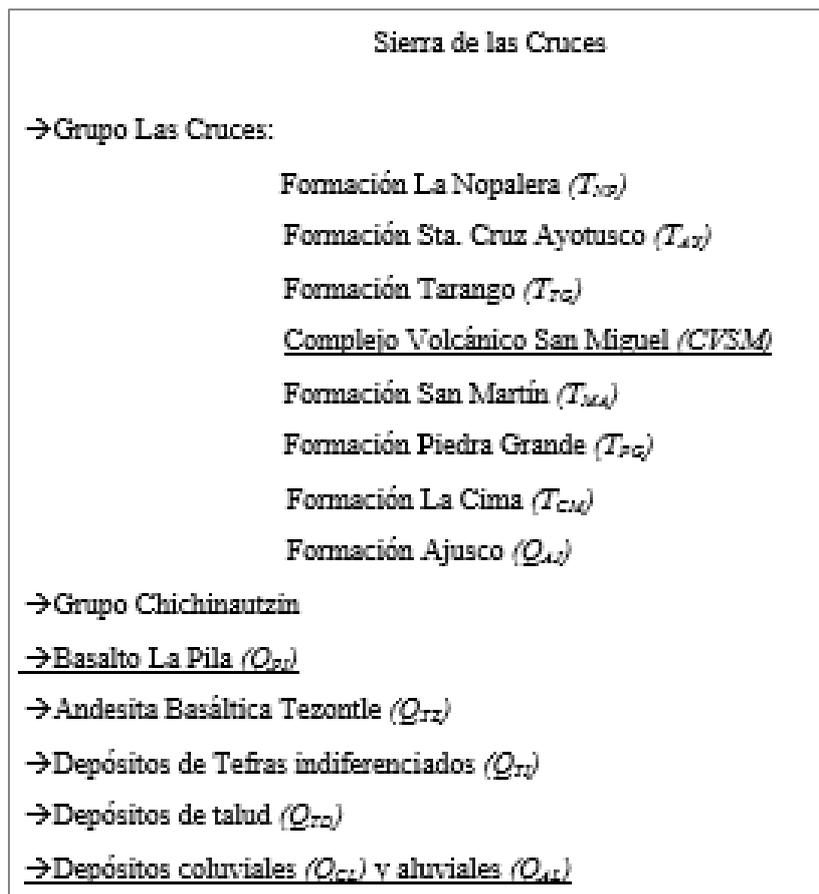


Fig. 4.3 Unidades que componen a la Sierra de las Cruces

Aparentemente el periodo de actividad, correspondiente a la Formación Tarango Inferior (principio del volcanismo a finales del Mioceno, y fin de la depositación a finales del Plioceno) produjo depósitos de pómez de caída, flujos piroclásticos y lahares, además de la acumulación de depósitos piroclásticos, proceso seguido de una posterior actividad de índole erosivo, para continuar con la fase Formación Tarango Superior. Este periodo se relaciona con la formación de la caldera del volcán San Miguel y la glaciación Illinois (Mooser, 1984; en Romero, 2001). A partir del Plioceno Tardío comenzó la formación del CVSM, la cual inicia con la construcción de los edificios poligenéticos, intercalados con algunos volcanes monogenéticos (variantes en tamaño). Todo esto a partir de volcanismo efusivo y explosivo. La tendencia composicional es félsica intermedia, se caracteriza por el acompañamiento de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, lahares, caída de pómez, etc. Posteriormente los productos volcánicos aparentemente se tornaron más máficos (Basalto La Pila, Q_{PL}). Una serie de eventos post eruptivos continuaron, durante el Pleistoceno Medio. El emplazamiento de glaciales modificó al CVSM, lo que ocasionó otro periodo de erosión y formación de valles en forma de “U”. En el Holoceno se comenzaron a generar depósitos de talud, coluviales y aluviales. En el mapa geológico se observa la interacción de las formaciones y/o unidades geológicas dentro de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos (Fig. 4.4). La zona de mayor altitud (sur y centro de la demarcación) se encuentra dominada por rocas ígneas extrusivas de composición intermedia representadas en su mayoría por andesitas, seguidas por dacitas; mientras que al centro de la Alcaldía se distribuye un derrame de lava de composición máfica denominada Basalto La Pila. Como se menciona en el PDDU de la Alcaldía (GCDMX, 1997, pp. 4), en ella “se localizan una serie de volcanes alineados norte- sur y paralelos a ellos se desarrollan valles profundos y escalonados”. Desde el centro y hacia el norte de la Alcaldía se observa un notorio cambio de composición con depósitos de bloques y cenizas, hasta que finalmente en la zona baja (norte de la Alcaldía) se tienen depósitos de lahar.

Las características propias de los materiales influyen en las propiedades geotécnicas. Con base en ello, a continuación, se describen los materiales presentes en la Alcaldía y sus condiciones geotécnicas:

- Basalto: roca ígnea máfica de grano fino, compuesta por augita y plagioclasa cálcica principalmente. En general el comportamiento de este material es homogéneo por su poca variabilidad de componentes, sin embargo, presenta una alta porosidad, no así permeabilidad ya que sus vesículas no suelen estar conectadas (Pompa Mera, 2018).
- Andesita: roca ígnea extrusiva de composición intermedia de grano fino, compuesta de una matriz de vidrio que rodea a su principal componente que es la plagioclasa. Se presenta en forma de flujos de lava (por su aparente alta viscosidad los flujos tienden a ser menos rápidos y generalmente tienen morfología de flujo de bloques), domos (Pompa Mera, 2018). Se trata de una roca compacta, lo que le da una buena competencia.
- Dacita: roca ígnea de grano fino integrada por plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico principalmente, están soportados por una matriz vítrea, dando origen a una textura porfídica. Se presenta en domos, flujos de lava y productos piroclásticos (Pompa Mera, 2018). Debido a su alta viscosidad el recorrido de las lavas dacíticas no suele ser mucho, acumulándose así muy próximos a los domos. Por su considerable contenido de cuarzo normalmente la meteorización es menos eficiente.
- Depósitos de bloques y cenizas: “Producto de actividad explosiva, seguida de una remoción/ retrabajo de material; sus partículas son exclusivamente de materiales de origen volcánico- piroclástico” (Caballero, s.f) (Tabla 27). Estos materiales son caracterizados a continuación:

Tabla 26. Tamaño de partículas componentes de los depósitos de bloques y cenizas

Tamaño	Sin consolidar	Consolidadas
>64 mm	Bombas	Brecha volcánica
	Bloques	Aglomerado
2- 64 mm	Lapilli	Lapillistone
0.063- 2 mm	Ceniza gruesa	Tufa gruesa/ Arenisca volcánica
<0.063 mm	Ceniza fina	Trufa fina/ Lutita volcánica

Modificado de Caballero, s.f.

Debido a que su origen requiere de un agente de transporte (por agua y/o aire) este material puede llegar a encontrarse en lugares lejos de su fuente (Caballero, s.f). Normalmente se presentan débilmente soldados, por lo que las propiedades como la resistencia, deformabilidad, etc., se ven afectadas. Estos depósitos son ampliamente heterogéneos, por lo que, presentan asentamientos diferenciales.

- Depósitos de lahar: “Son flujos de materiales volcánicos generados cuando el agua meteórica, de escorrentía superficial, de deshielo parcial de glaciales o fusión de nieve y/o la acumulada en algunos cráteres formando lagos volcánicos, se mezcla con estos materiales y se desplaza transportándolos en masa en los barrancos y cauces fluviales que tienen sus cabeceras en las laderas del volcán” (Bárnes, 2016, pág. 3). Otra definición complementaria de lahar y que ayuda a comprender las propiedades de estas unidades, los describe como “fluidos compuestos de sedimentos volcánicos con una gran cantidad de agua, puede estar conformado de diferentes granulometrías y tipos de rocas. Estos flujos se pueden provocar por saturación de agua en los macizos volcánicos, provocando el arrastre de material ya sea por intensas lluvias o deshielo, por lo que igualmente pueden ocurrir lahares aunque el volcán no esté en erupción. Un lahar hace referencia a una avalancha de productos volcánicos que, al ser un flujo, en la

mayoría de las ocasiones busca los cauces de los ríos para seguir su trayectoria” (Universidad de Costa Rica, 2019). Por lo anterior, se puede decir que los lahares son altamente heterogéneos lo que refleja una alta variabilidad en propiedades incluso dentro de una misma zona, así como de su grado de compactación.

- Depósitos aluviales: “Un depósito aluvial es una masa de sedimentos detríticos que ha sido transportada y sedimentada por un flujo o aluvión. Usualmente el termino aluvión se usa para los depósitos de arena, grava y arcillas arrojado por los ríos y arroyos. Generalmente, el aluvión, o depósito aluvial (como también se le conoce), es de un origen muy reciente” (Glosarios especializados, 2012). Estos tipos de materiales son poco estables, con un grado muy bajo de compactación, heterogéneos en granulometría y de origen de partículas. Al depositarse tienen un alto contenido de agua e incluso presencia de materia orgánica. Por ello sus propiedades mecánicas suelen ser muy desfavorables para fines ingenieriles.

Por lo anterior, podemos decir que la zona sur de la demarcación, conformada por rocas ígneas es la de mayor competencia, mientras que hacia el norte, los materiales al ser producto de los primeros, muestran una menor resistencia, mayor grado de alteración y son disectados por las principales barrancas; esto indica la capacidad de estos materiales para ser modificados.

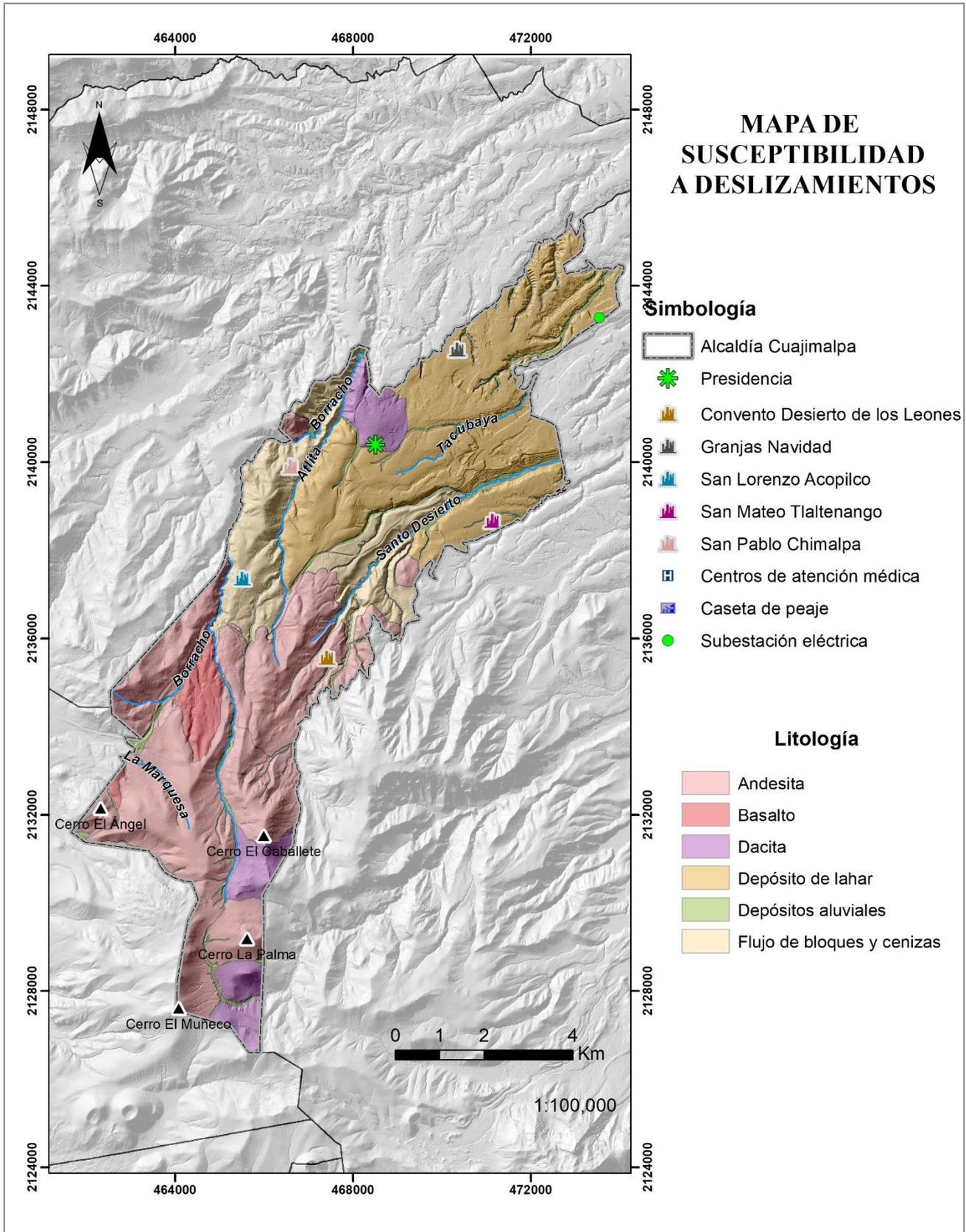


Fig. 4.4 Mapa Geológico de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.

4.4 Mapa de pendientes

El objetivo final de este trabajo es generar dos mapas de susceptibilidad para dos distintos tipos de PRM. Por esta razón, se clasificaron dos rangos de pendientes, uno para cada caso, todo ello a partir del mapa de pendientes que se creó desde el MDE. Las mayores pendientes se ubican principalmente al sur de la Alcaldía y al centro-este, centro-oeste de la misma. Las pendientes coinciden en su mayoría con las barrancas generadas por el paso de los ríos, para la zona centro y con la zona de sierra al sur. Existen algunas zonas aisladas en el norte de la demarcación en la que también se pueden observar pendientes principalmente moderadas a altas.

Para la zona centro y norte de Cuajimalpa las pendientes son muy bajas, lo que manifiesta una morfología de mesetas sub- horizontal, limitadas lateralmente por algunas pendientes moderadas delimitadas por los caudales y/o los valles entre barrancas. Lo anterior coincide con la geometría esperada de depósito de lahar y flujos de bloques y ceniza. Su geometría original ha sido acentuada y modificada por la mancha urbana. Es importante recalcar que, si bien no existen muchos puntos con pendientes extremadamente altas (mayores a 45°), se concentran una vez más en las barrancas, productos de la erosión fluvial.

Para el caso de las pendientes susceptibles a deslizamientos se observa una graduación de la inclinación en su distribución espacial, estos rasgos facilitan el reconocimiento de las distintas morfologías del relieve en la alcaldía (Fig. 4.5). El presente trabajo no considera como factor principal para la generación de deslizamientos un alta pendiente, sino su combinación con otros factores (como la geología e hidrología). La zona de llanura corresponde con los principales asentamientos urbanos y refleja una modificación antrópica. Esta zona presenta la mayor cantidad de cauces, mismos que marcan a su paso pendientes más abruptas. Para la parte centro-sur de Cuajimalpa es evidente una mayor heterogeneidad de pendientes al tratarse de valles y zonas altas con menor perturbación antrópica.

Sin embargo, para la distribución de pendientes en el caso de caídas (Fig. 4.6), se encuentran dos zonas de dominio muy marcadas, de centro a norte de la Alcaldía predomina la primera categoría denominada de susceptibilidad muy baja. Es decir, de 0° - 10° , mientras que del centro al sur de la demarcación la mayor presencia corresponde a la segunda categoría (susceptibilidad baja), no obstante, la distribución dentro de estas zonas predominantes sigue siendo heterogénea, quedando acentuados de igual forma los cauces de los ríos.

Como se logra apreciar, en general, la alcaldía Cuajimalpa de Morelos tiene un relieve sumamente variado con pendientes que van desde valores muy cercanos a 0° hasta los 80° . En este tipo de terrenos con gran heterogeneidad se vuelve indispensable un análisis de pendientes, debido a que no se puede estandarizar un valor en común para toda la alcaldía.

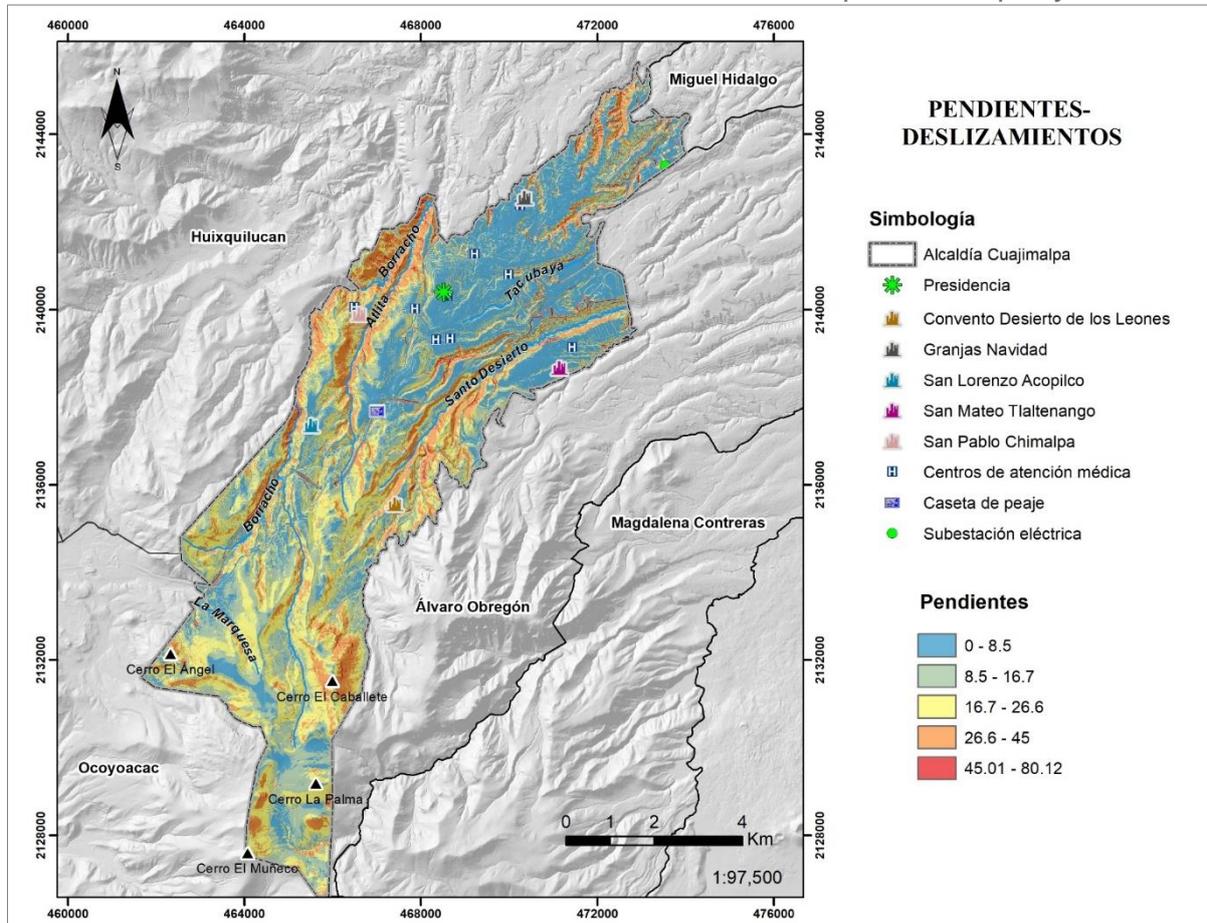


Fig. 4.5 Mapa de pendientes, en grados, de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos con la clasificación de deslizamientos

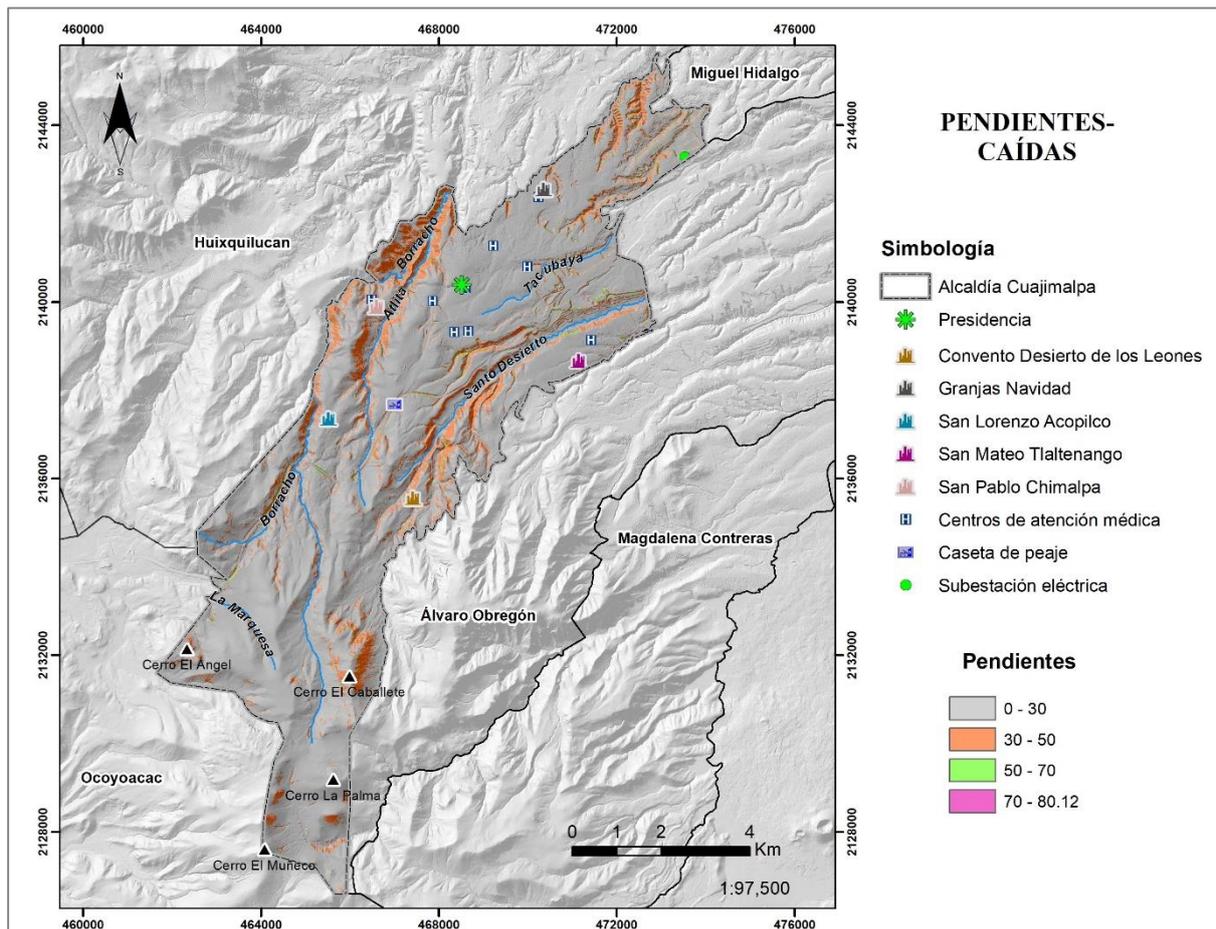


Fig. 4.6 Mapa de pendientes, en grados, de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos con la clasificación utilizada para caídas

4.5 Mapa de uso de suelo

Cuajimalpa de Morelos es una de las siete alcaldías que no están cubiertas en su totalidad por la mancha urbana de la Ciudad de México. Esto como resultado de su interacción con la Sierra de las Cruces, misma que ocupa el sur y parte del centro de la demarcación. De esta forma se ubican seis categorías de uso de suelo de acuerdo con el Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED, s.f) (Fig. 4.7):

1. Agroecológico
2. Agroforestal
3. Forestal
4. Áreas Naturales Protegidas (ANP)
5. Poblado rural
6. Suelo urbano

Las ANP ubicadas dentro de la alcaldía son dos: Miguel Hidalgo (La Marquesa) y El Desierto de los Leones, ambas localizadas al sur de la demarcación. Dentro de la zona de conservación se encuentra vegetación de tipo pinácea y de oyamel, especie característica de altitudes mayores a 2000 msnm y ambientes frescos; mientras que para el caso de las áreas de agroecología y agroforestal el porcentaje es menor y se encuentran en constante interacción con todas las demás categorías, siendo las de mayor resalte los poblados rurales y el suelo de mancha urbana.

Por otra parte, en la Fig. 4.7 se aprecia que la mancha urbana ocupa prácticamente todo el norte de la alcaldía. Se debe tener en cuenta que en la superficie delimitada como urbana y/o rural se tienen pendientes de bajas a medias (en su mayoría bajas) para ambos PRM en cuestión, principalmente para el área urbana ubicada al centro- oeste de la alcaldía. Las mayores pendientes que se observan ocurren en barrancas, incluso se observa la correlación entre las áreas pobladas o con intervención antrópica y estas formas de relieve.

A pesar de que sus altas pendientes y condiciones climáticas, ponen a esta zona en situaciones complicadas de habitar. Cuajimalpa presenta un problema grave con asentamientos irregulares, los cuales son cada vez más comunes; además de la construcción acelerada de grandes edificios comerciales o de vivienda. Todo lo anterior demanda necesidades secundarias como la implementación de tuberías de agua, gas, tiraderos de basura, vialidades, etc. Estas actividades en ocasiones son realizadas también de forma irregular, lo que genera modificaciones en el relieve que no son reportadas. Lo precedente en conjunto con las pendientes y geología de la zona se ven reflejado en la generación de procesos de remoción en masa para la alcaldía.

De acuerdo con Sarr y colaboradores (2019), la agricultura y la urbanización tienden a reducir la estabilidad del terreno mediante la creación de zonas de debilidad, ya sea por el cambio en el régimen de flujo de drenaje o el incremento de estrés en el medio. La vegetación, en cambio, favorece la estabilidad del terreno.

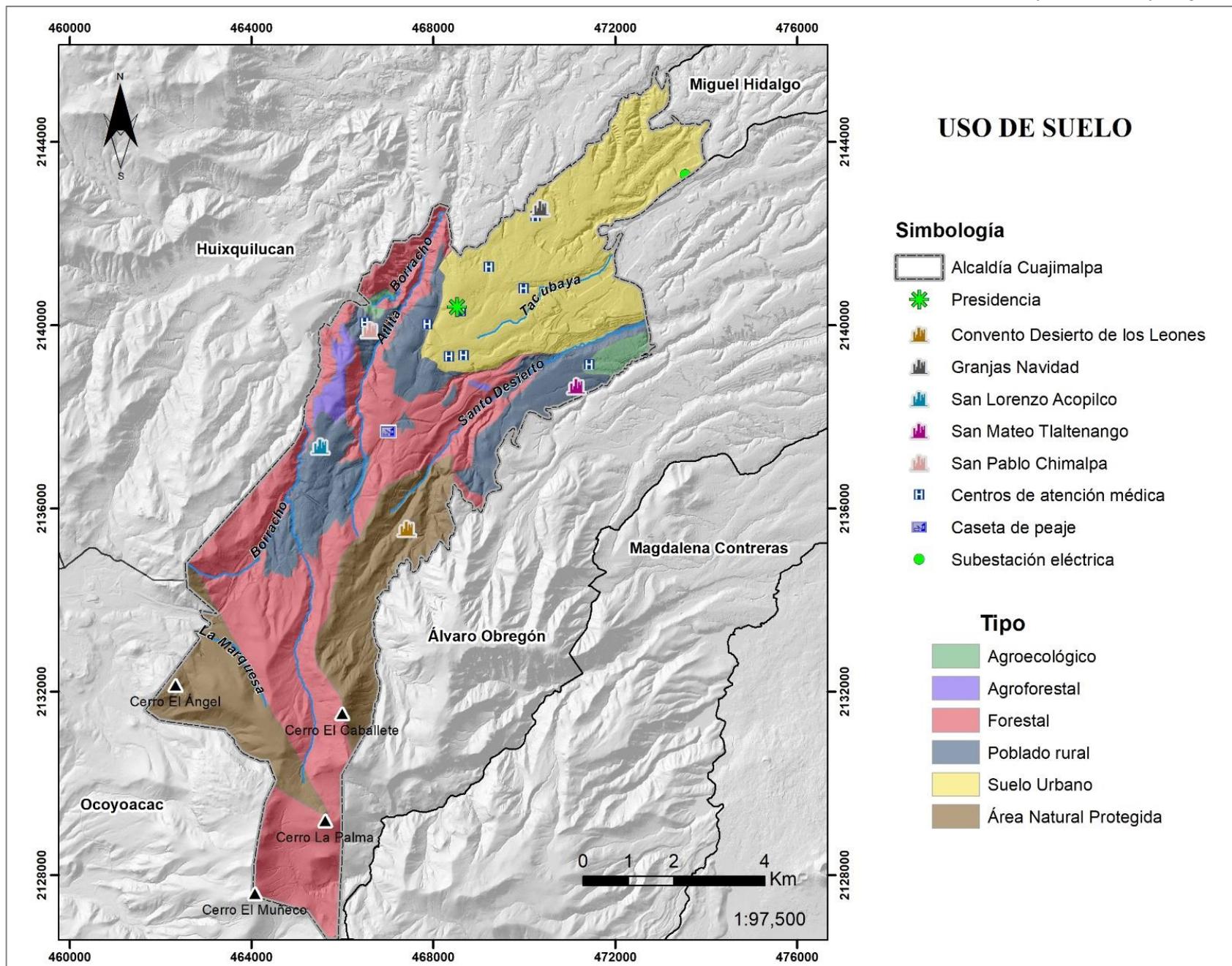


Fig. 4.7 Mapa de uso de suelo de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.

4.6 Mapa de influencia del drenaje

La importancia del agua en cualquiera de sus formas –escorrentía, lluvias, etc.- ha sido remarcada en Capítulos pasados; es por ello que su representación dentro del cálculo de susceptibilidad a un PRM se llevó a cabo mediante la distancia al cauce más cercano. Debido a que éste representa la humedad natural de ríos actuales y/o rutas de afluencia en caso de lluvias y el alcance de ellas.

En la Fig. 4.8, se observa que, para la clasificación correspondiente a susceptibilidad a deslizamientos, son las partes altas de la demarcación las de menor susceptibilidad al contar con distancias mayores a 200 m a un cauce o en su defecto para la zona norte en la superficie de planicie central. También se reconoce que, los valores con mayor cantidad de ríos corresponden a una susceptibilidad media cubriendo prácticamente toda la alcaldía. Las zonas de mayor susceptibilidad aún alcanzan a delimitar los cauces, una vez más éstas superficies coinciden con barrancas, límites litológicos, acentuando además zonas de debilidad de materiales y/o potencial de erosión.

Mientras que en la Fig. 4.9 se expresa la situación para el fenómeno de caídas. Se nota una mayor presencia de susceptibilidad baja. Es decir, mayor a 100m, enmarcando los cauces con susceptibilidades desde media hasta muy alta. Para ambos casos, la zona norte de la demarcación contiene mayor cantidad de cauces, aunque no así en longitud, sin embargo, debido a su proximidad, esta zona queda cubierta casi en su totalidad por valores de susceptibilidad de media a alta, sintonizando así con la mancha urbana y demás actividades antrópicas.

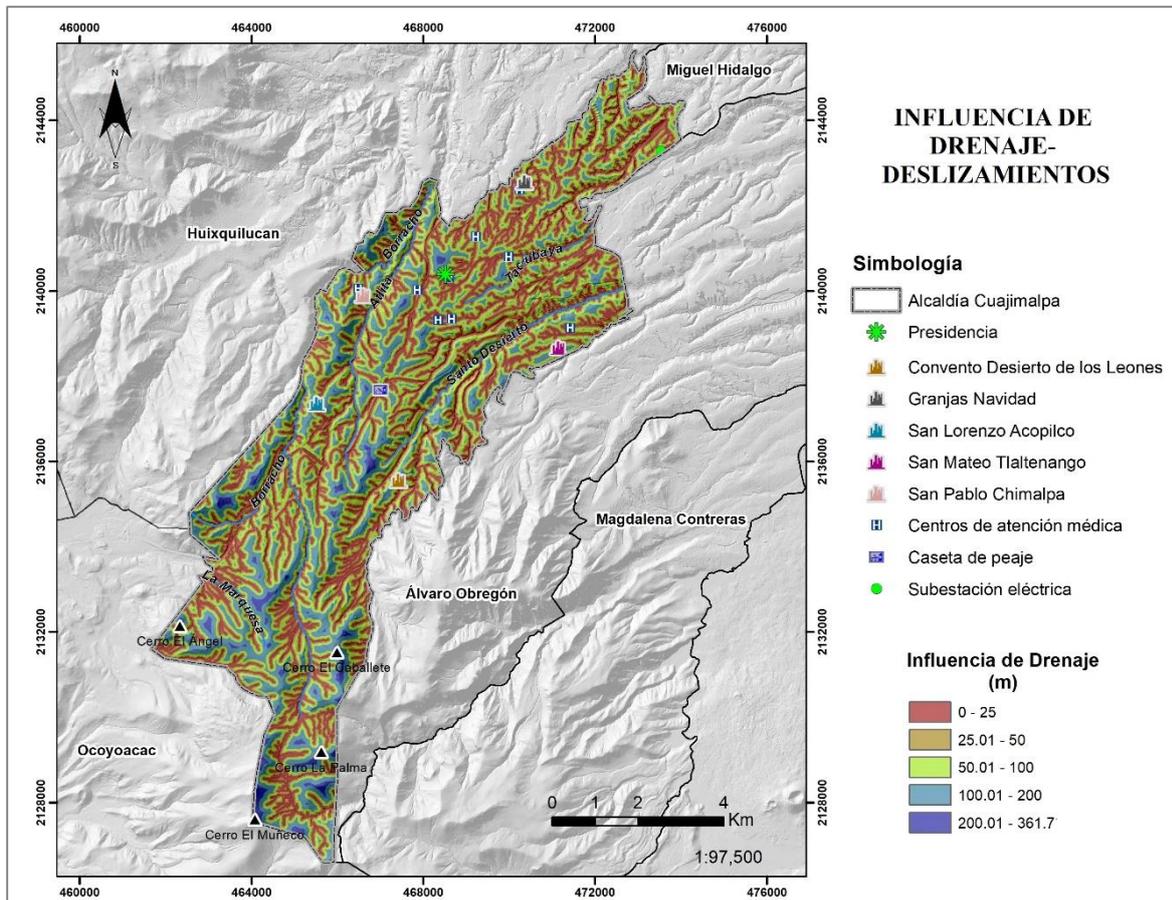


Fig. 4.8 Mapa de influencia de drenaje en deslizamientos para la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.

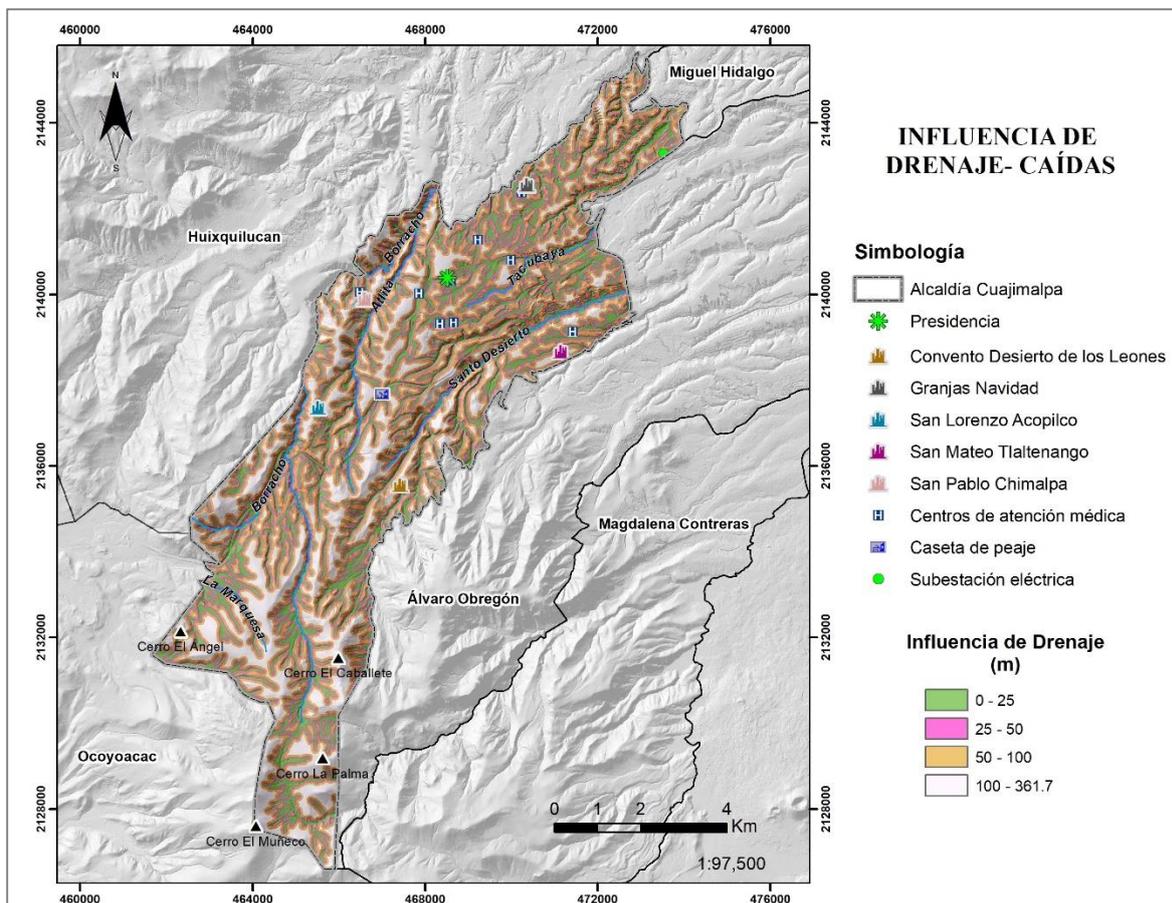


Fig. 4.9 Mapa de influencia de drenaje para caídas en la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.

4.7 Mapa de relieve relativo

El mapa de relieve relativo presenta la diferencia entre el punto de mayor y menor altitud dentro de un área de 100 m², para este caso 112.5 m (Fig. 4.10). Este parámetro interviene no solo en la susceptibilidad a deslizar, sino que también nos puede acercar al volumen de material involucrado en un movimiento del terreno. Como podría esperarse, las mayores diferencias altitudinales se encuentran en las laderas continuas a los cauces de ríos, esto para la zona centro y norte de la demarcación, sigue el comportamiento de bifurcación o “Y” que se venía observando en los anteriores parámetros. Por otra parte, para el sector sur, las zonas de mayor valor fueron las laderas de los principales cerros de Cuajimalpa, una vez más el extremo norte se comporta como aislado, con altos valores de relieve relativo.

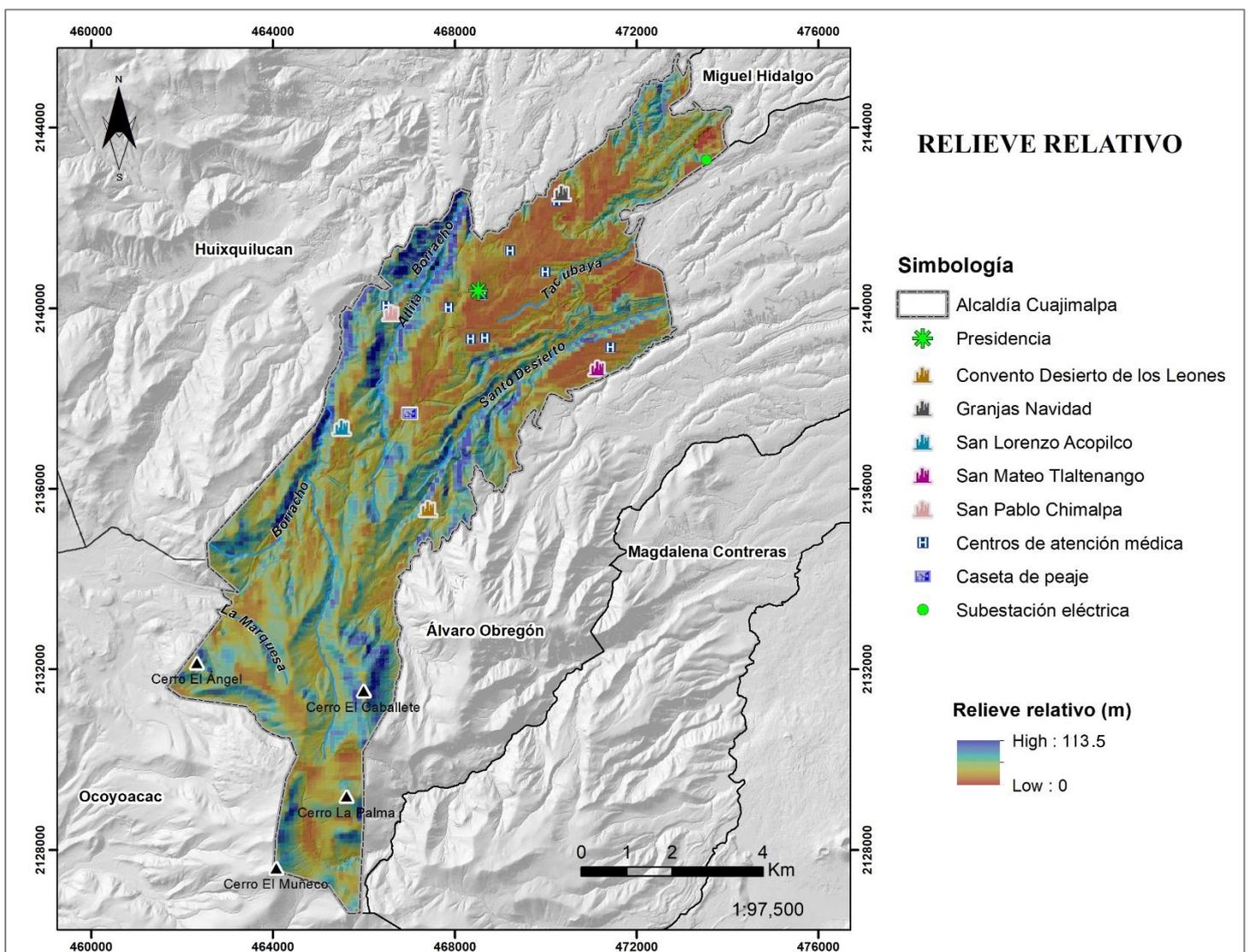


Fig. 4.10 Mapa de uso de suelo de la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.

4.8 Mapa de densidad de lineamientos

Dentro de esta conceptualización se integran tanto fallas y fracturas documentadas, así como marcados lineamientos identificados en imágenes satelitales y/o en el Modelo de Elevación Digital. Esto con el fin de distinguir las zonas con mayor densidad de discontinuidades, dado que esto reflejaría, como ya se mencionó, su potencial de influencia en la generación de deslizamientos, mayormente en la de caídas, ya que como se vio para este PRM las discontinuidades colaboran en la generación de bloques de material a movilizarse, principalmente incorporando agua al terreno, es decir, aumentando su permeabilidad. También favorece el incremento de la superficie de contacto con el ambiente, por lo tanto, mayor grado de meteorización al material que en combinación con el resto de factores favorecen un PRM.

En específico, para la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, la zona con mayor presencia de lineamiento es la zona centro oriente (Fig. 4.11). Sin embargo, observamos que a lo largo del centro de la demarcación existe una alta densidad de lineamientos. En general, el extremo sur muestra una menor presencia de lineamientos. La distribución espacial de la densidad de lineamientos no sigue, aparentemente, una preferencia por una litología específica. Sin embargo, las discontinuidades de mayor continuidad se pueden asociar con la presencia de barrancas. Podemos decir, además, que las orientaciones preferenciales son NE-SW y N-S, seguidas en menor medida por la dirección E-W. Las unidades de este mapa son manejadas como m/u^2 , en donde u^2 es $250,000 m^2$ al ser una malla de cuadrados de 500 m de longitud .

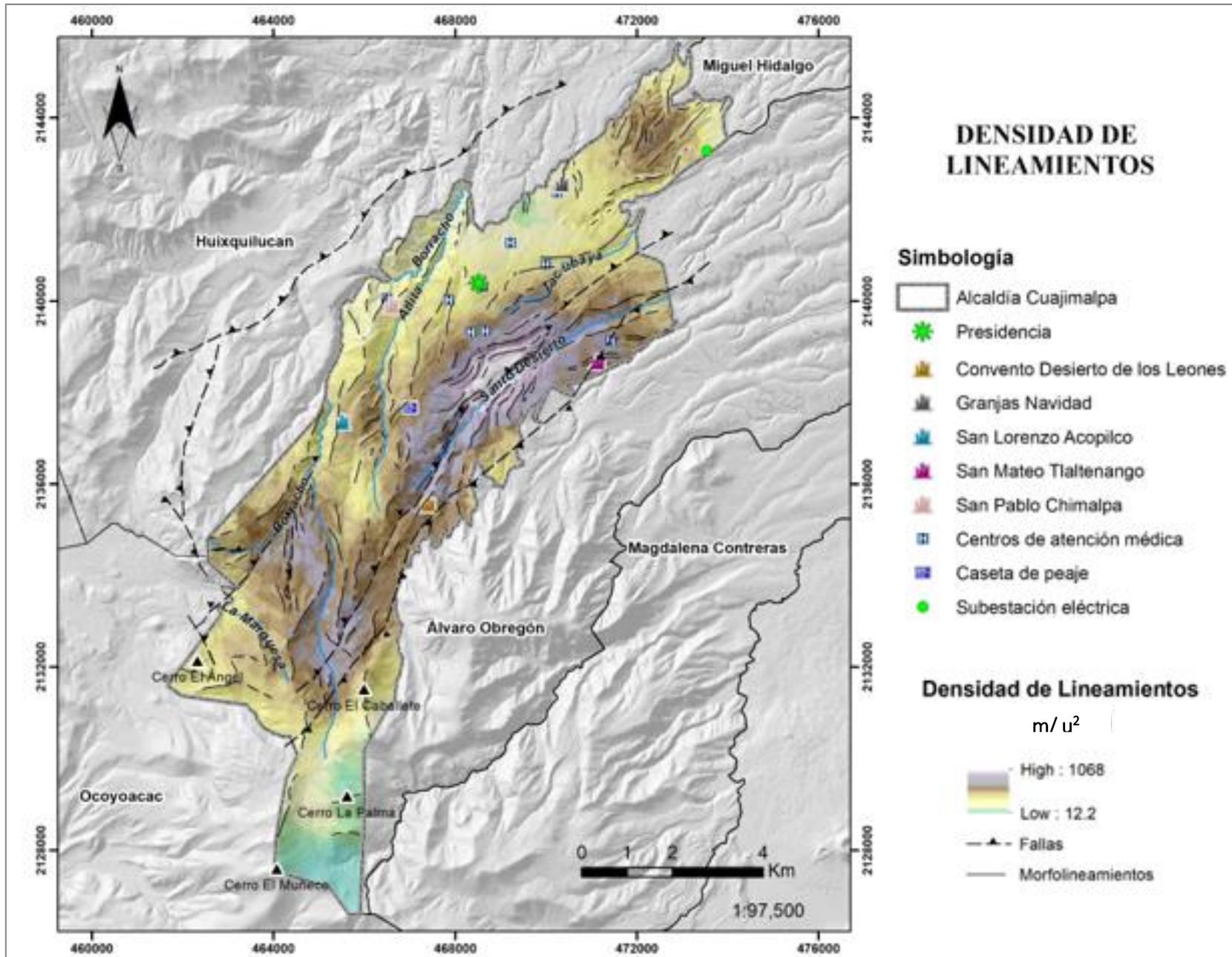


Fig. 4.11 Mapa de densidad de lineamientos en metros por de la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.

4.9 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos

Como se ha mencionado, los mapas de susceptibilidades finales se han generado mediante la ponderación de elementos y variables, cuyos pesos se especifican en el Capítulo 3. Los mapas reclasificados por variables utilizados para la elaboración del mapa de susceptibilidad a deslizamientos se explican a continuación.

4.9.1 Mapa geológico reclasificado

La Alcaldía Cuajimalpa de Morelos se divide casi por el centro en dos grandes regiones, siendo la zona sur la de menor a media susceptibilidad. Esto se debe principalmente a que en el Basalto La Pila se encuentra en esta zona, siendo esta unidad, debido a sus características la de menor susceptibilidad para toda la demarcación (Fig. 4.12). En la zona norte se observan las unidades de alta y muy alta susceptibilidad a deslizamientos, ya que aquí se encuentran los depósitos de bloques y cenizas y lahares. Es importante mencionar que estas zonas no son constantes, ya que existen algunos islotes de menor susceptibilidad en su interior que corresponden a la Dacita Teopazulco. Por otra parte, los depósitos aluviales (clasificados de susceptibilidad alta) se encuentran dispersos en los valles de la alcaldía.

4.9.2 Mapa de pendientes reclasificado

Esta clasificación se mantiene conforme lo expresado en el capítulo anterior, de forma que las pendientes de mayor susceptibilidad se concentran en las zonas de barrancas y escarpes que pueden ser de origen natural o antrópico (Fig. 4.12). Se observa mayor variabilidad y gradualidad en las pendientes (que reflejan los distintos grados de susceptibilidad) en la zona centro y sur de la demarcación. Al norte de la alcaldía Cuajimalpa se observa un cambio drástico de baja a alta susceptibilidad a deslizamiento claro y menos gradual. En el extremo norte, en lo que podría describirse como una zona de planicie, se presenta susceptibilidad muy alta, esto como efecto de la erosión en materiales de menor resistencia.

4.9.3 Mapa de uso de suelo reclasificado

Para el caso de uso de suelo la distribución de superficies de mayor susceptibilidad se localiza al norte de la alcaldía y va acompañado de la actividad humana. Como se refleja en la Fig 4.12, este nivel de susceptibilidad se degrada a medida que se aleja de la mancha urbana, siendo la región sur la de menor ocurrencia.

4.9.4 Mapa de influencia de drenaje reclasificado

En la elaboración del mapa de influencia de drenaje se utilizaron los canales generados en el programa *Sistema para Análisis Automatizados Geocientíficos* (SAGA). Ellos no solo reflejan los ríos sino también su patrón de drenaje. Es por ello que pareciera, toda la superficie de la alcaldía presenta alta a muy alta susceptibilidad (Fig. 4.12). El mapa refleja zonas potenciales en las que el flujo de agua constante e incluso en época de lluvia generaría deslizamientos en combinación con los demás factores. Como se estipula desde la clasificación, las zonas más alejadas los canales son las de menor susceptibilidad, siendo éstas en su mayoría, las partes más elevadas de la alcaldía. Estas áreas se aprecian en mayor abundancia al sur de Cuajimalpa. Al norte los cauces se presentan más próximos entre sí, dejando menores superficies fuera de las clasificaciones por debajo de la susceptibilidad media.

4.9.5 Mapa de relieve relativo reclasificado

Como se nota en la Fig. 4.12, si bien las distribuciones son variadas no muestran un patrón aleatorio. Las zonas de mayor susceptibilidad de acuerdo a su valor de relieve relativo se encuentran alrededor de las barrancas, aún aquellas con susceptibilidad baja- media comienzan a resaltar en los cauces de los ríos. Para la zona norte-centro la susceptibilidad es muy baja a baja; contrario a las zonas sur, centro-sur y extremo norte, donde además de presentar mayor variabilidad se ubican los cuadrantes con mayor susceptibilidad. Es importante mencionar que se observa gradualidad en los valores de relieve relativo que sigue la susceptibilidad baja a media a alta y a muy alta, de ser el caso.

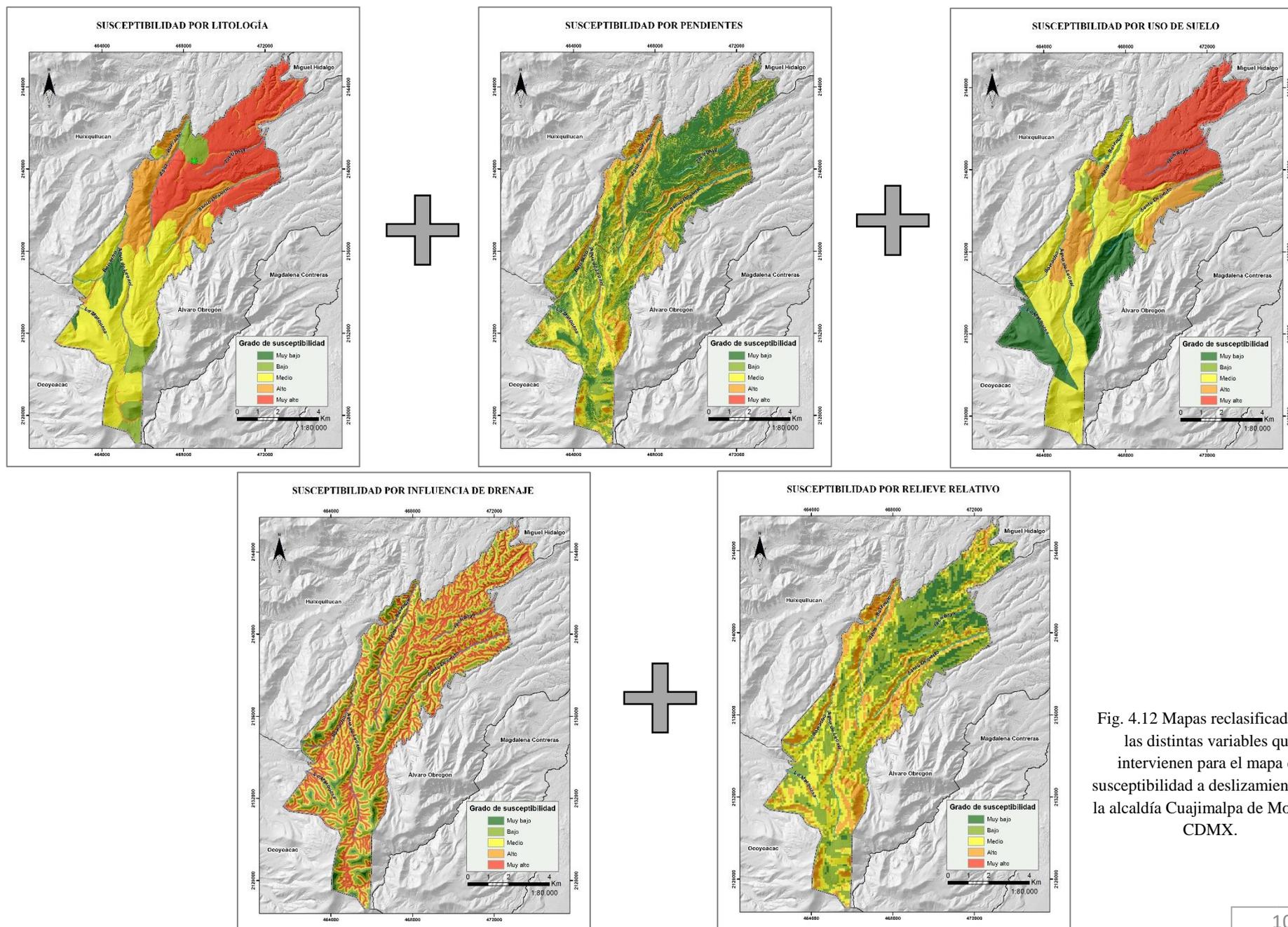


Fig. 4.12 Mapas reclasificados de las distintas variables que intervienen para el mapa de susceptibilidad a deslizamientos de la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.

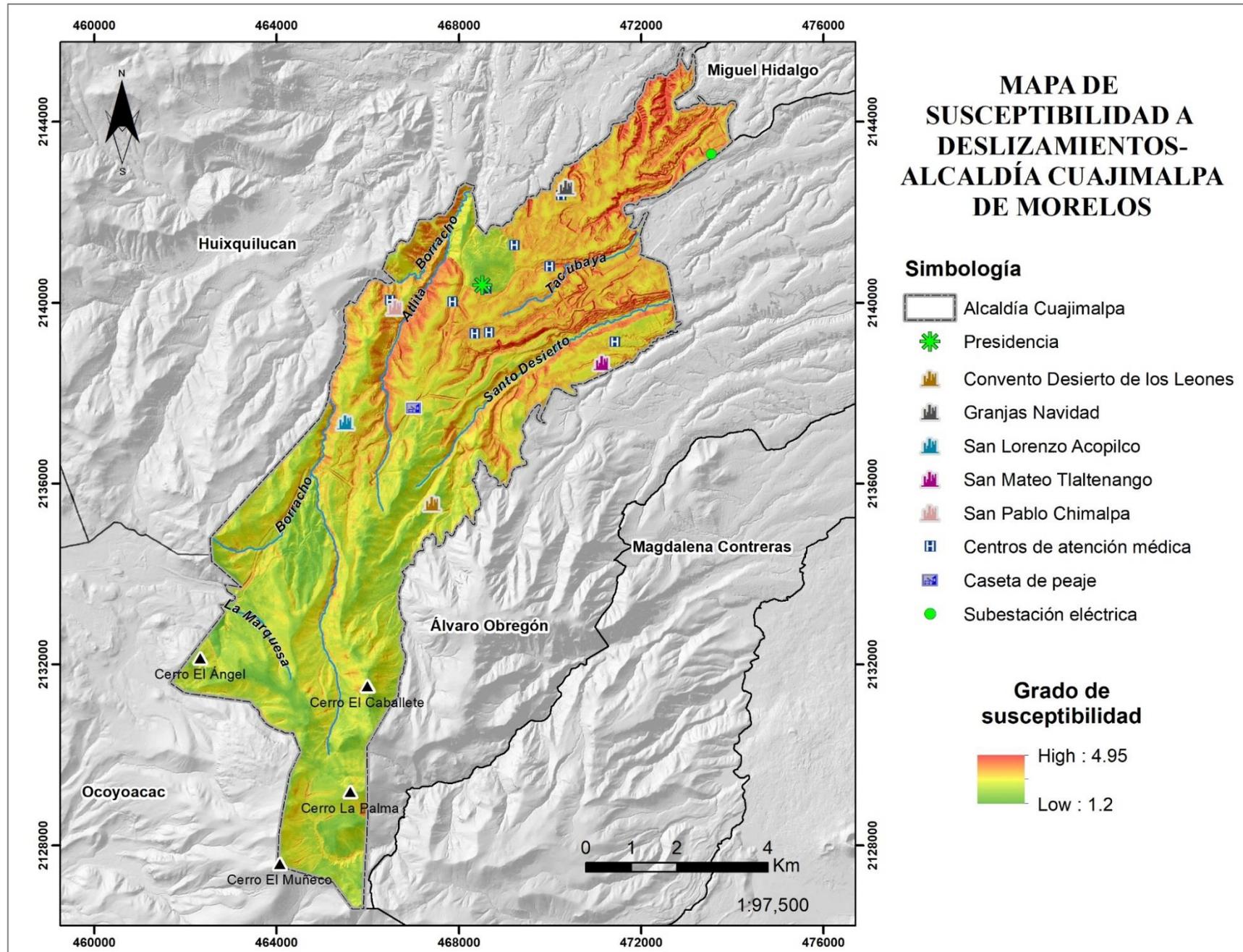


Fig. 4.13 Mapa susceptibilidad a deslizamientos de la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.

En los mapas anteriores se presentaron las susceptibilidades por variable, con ellos se realizó una sobreposición matricial ponderada a partir de un enfoque multicriterio, medio por el cual se produjo el mapa de susceptibilidad a deslizamientos (Fig. 14). En el que el rango posible es de 1 a 5 siendo 1 muy baja susceptibilidad a deslizamientos y 5 el de mayor susceptibilidad. Con base en éste se concluye que las áreas de mayor susceptibilidad a presentar este tipo de fenómeno se sitúan de forma general, al norte de la alcaldía, ya que como se observó en los mapas reclasificados, ahí confluyen variables con niveles altos de susceptibilidad como depósitos de lahar y de bloques y cenizas, pendientes escarpadas (que sirven además de canales de tipo tanto permanente para el caso de ríos, así como escorrentías superficiales y en las que la diferencia altitudinal es mayor). Destacan aún más, acentuando esta característica incluso en zonas de menor susceptibilidad como lo es el sector sur de la Alcaldía, en donde áreas de baja susceptibilidad cambian de grado en zonas donde la influencia del drenaje y/o el relieve relativo es mayor, como se aprecia, por ejemplo, en las laderas aledañas al Cerro El Caballete.

Las zonas de mayor susceptibilidad coinciden con los principales asentamientos urbanos y rurales, debido a que es sobre estas laderas de colonias importantes como San Lorenzo Acopilco, San Pablo Chimalpa y Granjas Navidad donde existen asentamientos, incluso de carácter irregular, lo que implica la exposición de personas e infraestructura.

Para este mapa final y de acuerdo con los pesos asignados a las variables, la geología y las pendientes son los factores más decisivos para la estimación de la susceptibilidad a deslizamiento. Sin embargo, y como se puede observar en la Fig. 4.13 el grado de susceptibilidad mínimo para la demarcación es de 1.2 lo que refleja un mínimo de ocurrencia, pero el fenómeno puede pasar, por lo que no se debe exentar ninguna zona a presentar deslizamientos.

4.10 Mapa de Susceptibilidad a Caídas

Como se menciona en la metodología, para el caso del mapa de susceptibilidad a caídas, las distintas variables que intervienen en su generación se clasificaron en cuatro clases de acuerdo con su grado de susceptibilidad. Los mapas obtenidos de esa categorización se describen a continuación.

4.10.1 Mapa geológico reclasificado

Por su grado de susceptibilidad, las litologías presentes en la Alcaldía Cuajimalpa dividen, de forma general, al territorio en dos; el sector sur de alta ocurrencia con algunos islotes de susceptibilidad media que corresponden a basaltos (Fig. 4.14). Mientras que el sector norte presenta un grado medio de susceptibilidad, esto debido a que engloba los depósitos de bloques y cenizas y los depósitos de lahar. En este sector también hay presencia de rocas dacíticas lo que genera un aumento de susceptibilidad. Por último, dado que los depósitos aluviales se localizan principalmente en las barrancas a lo de toda la demarcación, el rango de susceptibilidad a caídas “bajo” ocurre de la misma forma.

4.10.2 Mapa de pendientes reclasificado

Las condiciones establecidas para los valores de pendiente cambian drásticamente para el caso de caídas, mismo que se puede notar en la Fig. 4.14. Se observa que, de forma general, la alcaldía Cuajimalpa de Morelos cuenta con susceptibilidad baja en cuanto a pendientes se refiere, es decir, menores a 30° , todas ellas distribuidas a su largo. La tendencia de bifurcación de la zona centro a norte, mencionada anteriormente, queda acentuada en este caso por zonas de susceptibilidad media, que como se ha visto son consecuencia de las grandes barrancas. Se puede observar que pendientes de susceptibilidades alta y muy alta (mayores a 50°) son escasas, encontrándose principalmente al NE de la demarcación.

4.10.3 Mapa de densidad de lineamientos reclasificado

Como se ha mencionado previamente la densidad de lineamientos tiene una predisposición NE (Fig. 4.14). La distribución espacial de los lineamientos se da de forma progresiva y casi “radial”. Se distingue que la zona de mayor afectación es el flanco este de la demarcación, con presencia de susceptibilidad alta a muy alta, mientras que el extremo sur y NW son los de menor susceptibilidad y en general son también las zonas de mayor homogeneidad. En el extremo norte de la alcaldía el comportamiento es gradual, con zonas de mayor susceptibilidad en la parte central.

4.10.4 Mapa de relieve relativo reclasificado

En la Figura 4.14 se aprecia la disposición de la susceptibilidad por valor de relieve relativo. Se observa que la mayor parte del territorio es de alta susceptibilidad, principalmente en la región centro – sur, producto de las grandes barrancas y la morfología montañosa característica de la alcaldía. Cubriendo de forma indistinta las litologías de andesita, dacita y depósitos de bloques y cenizas; mientras que, en el sector norte, por las diferencias altitudinales consecuencia de las disecciones generadas por los cauces de ríos. En la porción centro- norte el grado de susceptibilidad desciende a baja- media, espacio ocupado principalmente por depósitos de lahar.

4.10.5 Mapa de uso de suelo reclasificado

La constante interacción entre un entorno y la actividad humana aumenta la susceptibilidad del medio a presentar PRM. Al aplicar esto a la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, se puede apreciar que la porción norte, correspondiente a suelo urbano es de muy alta susceptibilidad, mientras que las localidades rurales se ubican de forma aleatoria en el sector, estas presentan así zonas de alta ocurrencia, los cuales están rodeadas por áreas de susceptibilidad media, misma que se extiende hasta el extremo sur de Cuajimalpa. En tanto que las superficies de menor susceptibilidad, se encuentran al sureste y suroeste de la alcaldía.

4.10.6 Mapa de influencia de drenaje reclasificado

Si bien la susceptibilidad por influencia de drenaje es la variable con menor ponderación dentro del cálculo de susceptibilidad caídas, éste no se debe obviar. Recordemos que para este mapa se utilizaron todos los canales con corriente perenne o intermitente. Es por ello que las zonas más próximas a ellos, es decir, las de mayor susceptibilidad se encuentran distribuidas por toda la alcaldía. Con mayor concentración en tanto se aproximan al norte ya que es ahí donde existe mayor densidad de drenaje. Gradualmente la cantidad de ríos cambia a valores de susceptibilidad media y baja, en tanto aumenta la distancia al canal, ubicándose así en el sector sur las zonas menos susceptibles.

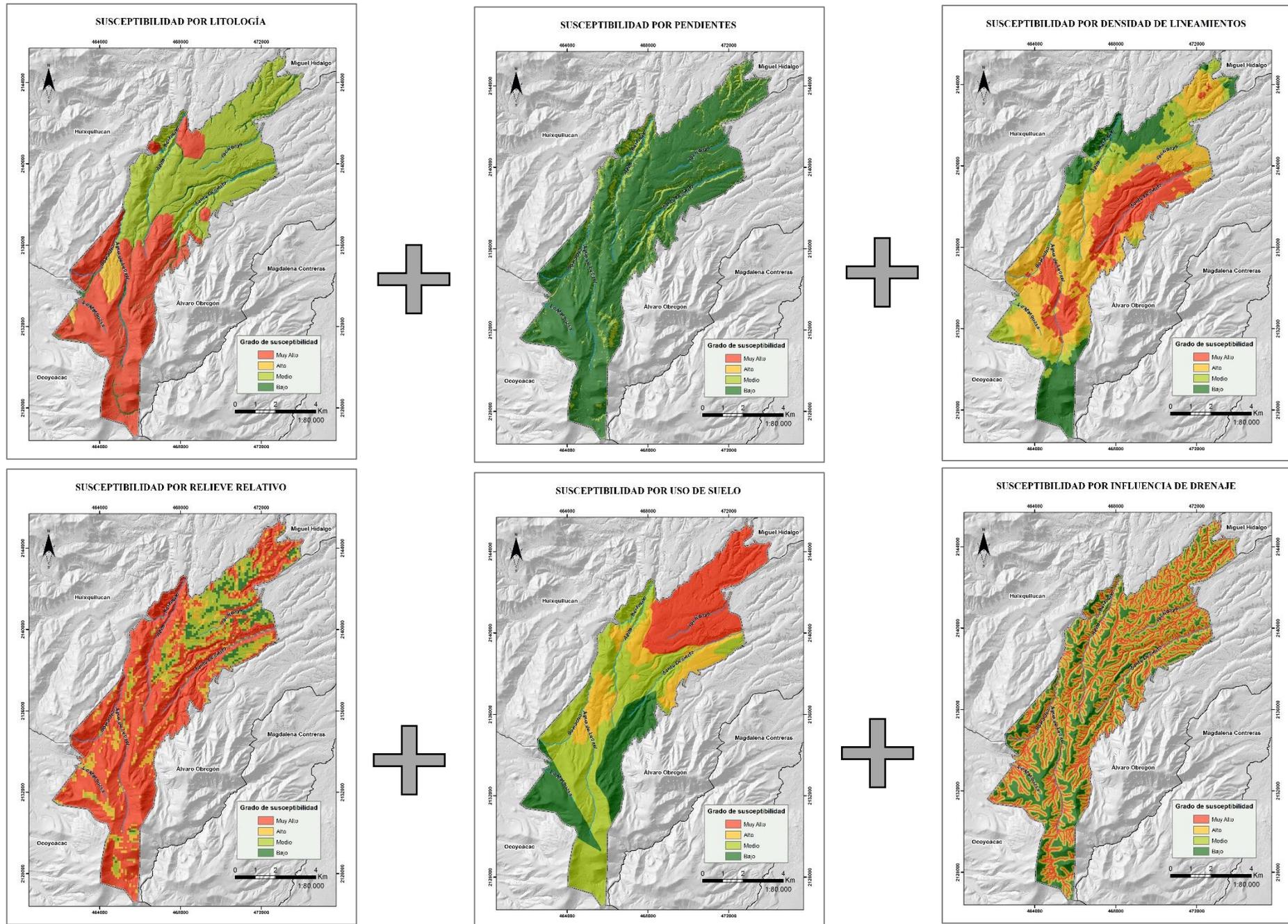


Fig. 4.14 Mapas reclasificados de las distintas variables que intervienen para el mapa de susceptibilidad a caídas de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.

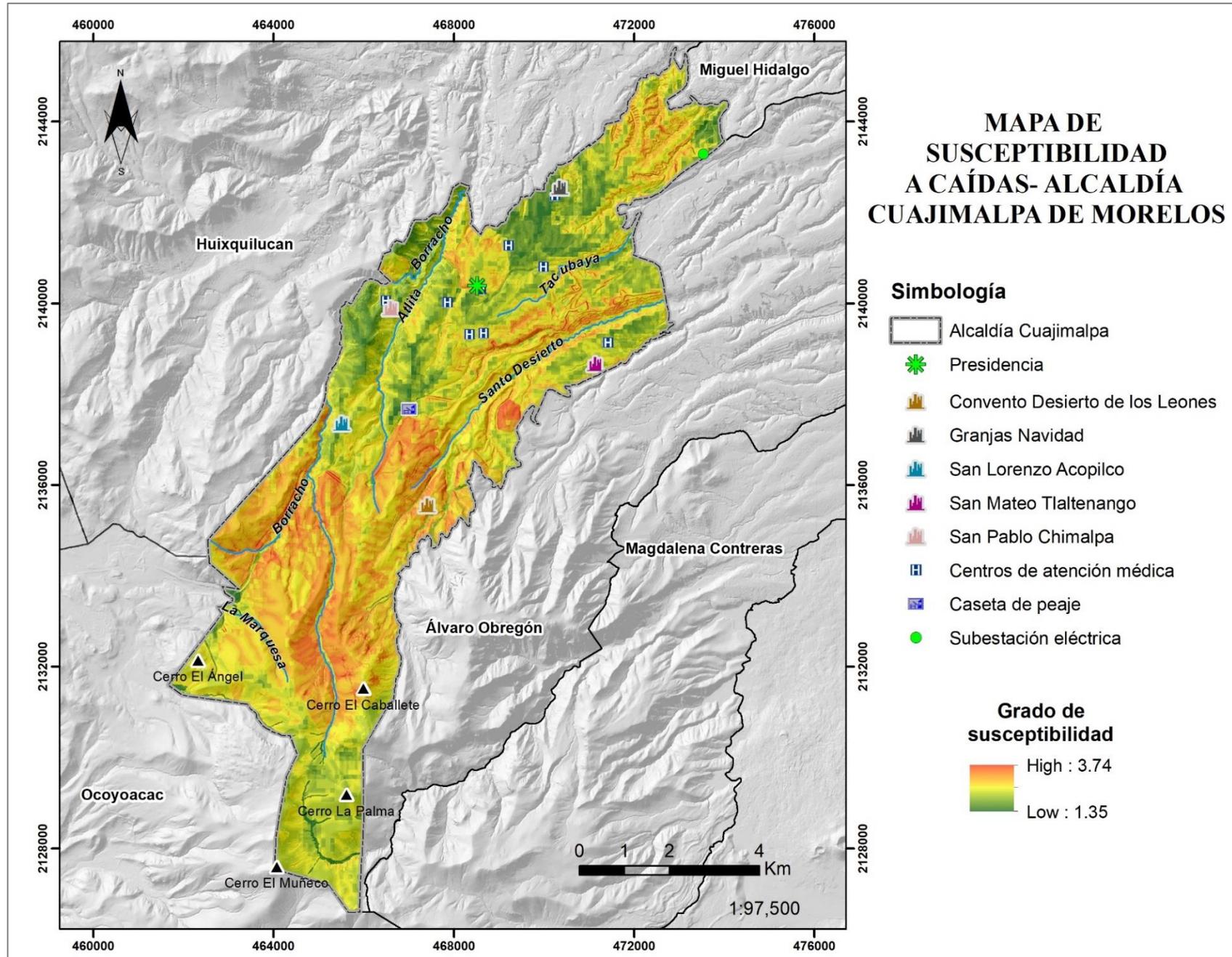


Fig. 4.15 Mapa de susceptibilidad a caídas de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.

Con base en el cálculo de sobreposición matricial de las variables establecidas como primordiales para la generación del mapa por mecanismo de caídas dentro de la alcaldía, las áreas susceptibles y su grado a presentar este fenómeno cambian respecto con el mapa de susceptibilidad de deslizamientos. Partiendo de la Fig. 4.15 en donde 1 representa el grado mínimo de susceptibilidad a caídas y 4 susceptibilidad muy alta; se hace evidente que las zonas con alta/ muy alta susceptibilidad se ubican dispersas dentro de la demarcación guiándose principalmente por los aspectos geológicos. Es decir, tanto litología como la densidad de lineamientos, y en segundo término por la morfología (pendientes y relieve relativo). De esta forma prácticamente todo el sector centro y centro-sur cuentan con susceptibilidad a caídas de media a alta, así como las laderas escarpadas (altas pendientes con altos valores de relieve relativo) del sector sur y norte. En el mapa de susceptibilidad a caídas se presenta una coincidencia en las laderas aledañas al río Santo Desierto. En esta zona existe una susceptibilidad media a muy alta para caídas y para deslizamientos, convirtiéndose en un área con grandes problemáticas de inestabilidad de laderas, acorde con suelo urbano y rural en su mayoría. De igual forma, en el extremo norte de la alcaldía en las zonas de barrancas se aprecia una mayor susceptibilidad a caídas, lo que implica una alta exposición a personas e infraestructura que ahí interactúan, debido a que es una zona densamente urbanizada. Estas zonas si bien no “caen” en litologías de mayor susceptibilidad sí concuerdan con las superficies de mayor densidad de lineamientos que es una de las variables de mayor importancia (y peso) para el cálculo de la susceptibilidad final. Como se aprecia en la Figura 4.15 en general toda la demarcación tiene un grado de susceptibilidad bajo (importante recordar que no se parte de un grado muy bajo de susceptibilidad) hasta muy alto, como consecuencia de que para este fenómeno se han establecido más variables participantes para la producción de caídas. Por este motivo al igual que el caso de susceptibilidad a deslizamientos no se debe excluir las zonas de susceptibilidad baja como áreas donde no se generarán este tipo de PRM.

5. Casos de estudio

Como se mencionó, dentro de los objetivos del presente trabajo se encuentra la evaluación de dos laderas ubicadas dentro de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos (Fig. 5.1), con el fin de determinar el tipo de PRM (específicamente deslizamientos y/o caídas) al que son susceptibles y su consecuente caracterización.

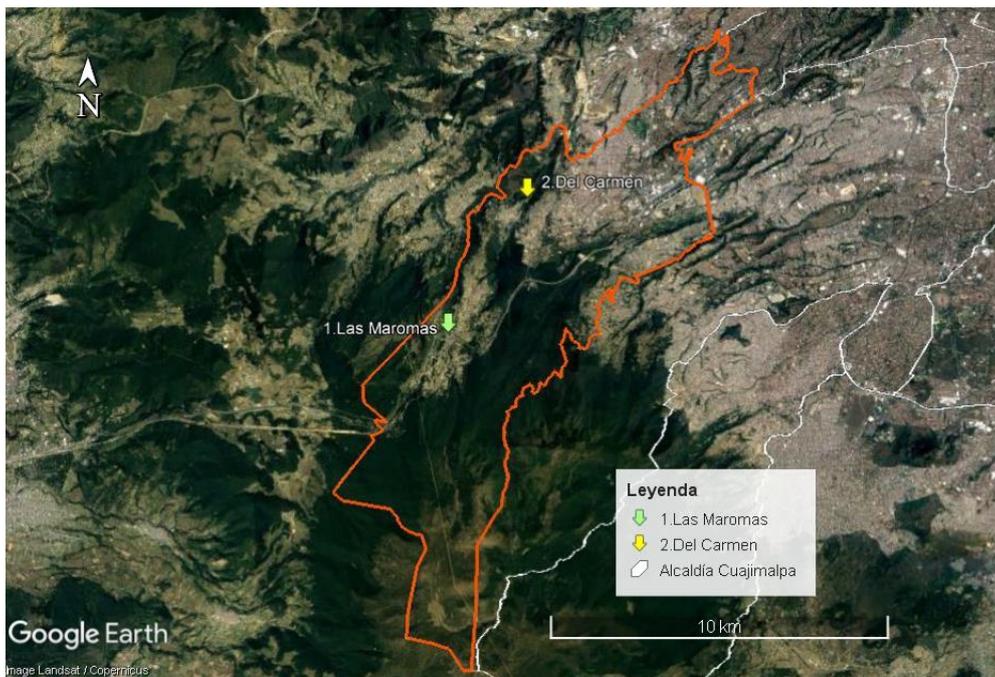


Fig. 5.1 Ubicación de los casos de estudio dentro de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.

La ladera ubicada en la Colonia Las Maromas se encuentra en el centro de la demarcación, en cambio, el sitio la Colonia Del Carmen se encuentra al noroeste de la misma (Fig. 5.1). Ambos sitios se localizan en poblados definidos como rurales, en litología de depósitos de bloques y cenizas y cercanos a ríos. Su caracterización y los distintos métodos de análisis para su evaluación de susceptibilidad se especifican a continuación.

Es importante mencionar que los modelos geológicos de los sitios están basados principalmente a partir de la tomografía eléctrica obtenida y con lo observado en campo. Sin embargo, no necesariamente coincide con el modelo geotécnico, aunque sí se basa en él. Esto debido a que en este último se enfatizó el comportamiento mecánico de las unidades que los componen.

5.1 Colonia Las Maromas

5.1.1 Generalidades

Esta colonia que se ubica en el centro- oeste a un costado del tramo carretero México- Toluca (Fig. 5.2). Sus coordenadas son 19.3209083 N y -99.3332972 W, con una altura de 2944 msnm, siendo el sitio de mayor altura de los dos casos de estudio. Fue elegida debido a la existencia de antecedentes de deslizamientos bajo la influencia de intensa lluvia como agente detonador, presencia de una salida de agua en la zona media de la ladera (posible premonitor de la existencia de un plano de deslizamiento), dimensiones favorables para la realización del estudio. Además, el área de posible influencia de afectación del movimiento contempla viviendas en condiciones económicas desfavorables y por su cercanía con el Río Borracho. Además de que, el material removido de la ladera representaría un peligro social.



Fig. 5.2 Ubicación de la ladera Las Maromas, en la imagen se muestra su entorno tanto geológico, así como la interacción con aspectos antrópicos. Se muestra la sección A-B realizada con la tomografía eléctrica.

Observaciones en campo:

Algunas de las observaciones realizadas a lo largo de las distintas visitas a campo fueron:

- Presencia de zonas compresivas con evidencia de abombamientos locales, distribuidas en la cara de la ladera (Fig. 5.3).
- Construcciones a lo largo de la ladera que representan un peso extra (Fig. 5.4 y 5.5).
- Grietas de tensión en la corona.
- Aparentes dos “fases de movimiento” dentro de la morfología de la ladera (Fig. 5.3 y 5.4).
- Aparente desplazamiento de flujo a modo de embudo o canalizado terminal (Fig. 5.3).
- Numerosas modificaciones antrópicas como cortes, aportaciones de humedad a la ladera, etc. (Fig. 5.5).
- Conforme se desciende por la ladera, se observa un incremento de basura dentro de la cubierta de suelo.



Fig. 5.3 Parte inferior de la ladera (cercana al pie de la misma). Se observa la modificación del relieve e incluso la “invasión” de pobladores a la ladera. Resaltan en amarillo los límites de abombamiento.



Fig. 5.4 Parte intermedia de la ladera, esta zona segmenta a la ladera en dos frentes.

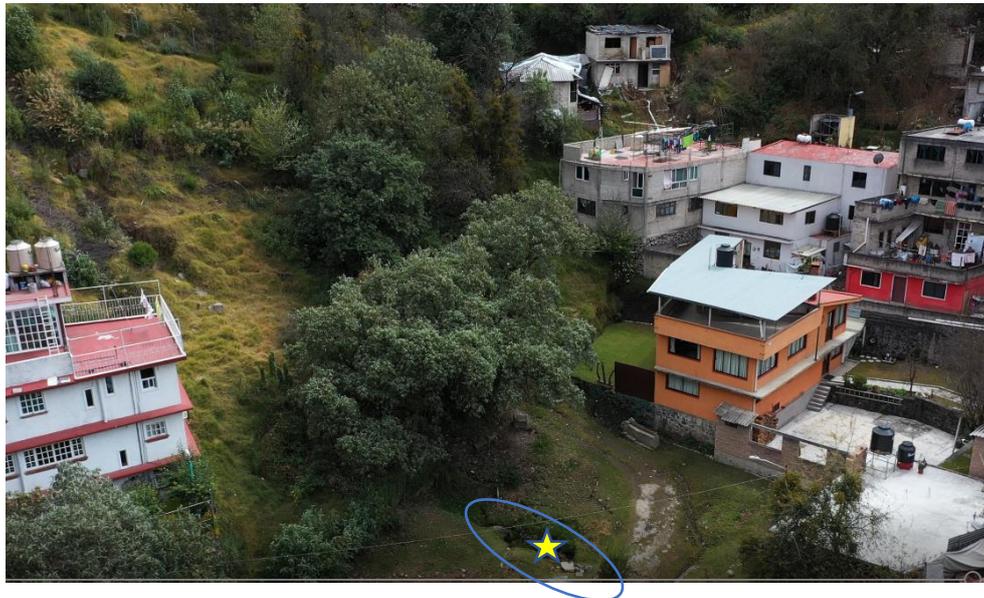


Fig. 5.5 Parte superior de la ladera, se presenta el ojo de agua (estrella amarilla) y las abundantes construcciones en la cara de la ladera.

Especificaciones de la tomografía eléctrica:

→ Equipo *Syscal Pro- Iris Instruments*

→ Sección longitudinal de 96 metros (Fig. 5.6).

→ Arreglo Dipolo- Dipolo de 48 electrodos cada 2 metros (992 puntos de atribución).

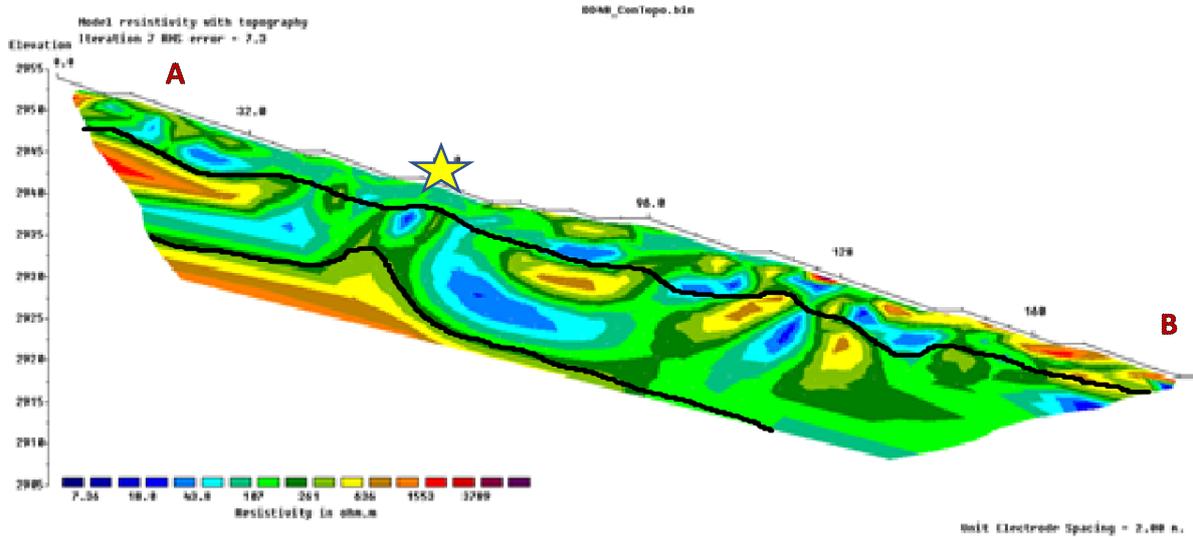


Fig. 5.6 Tomografía eléctrica de la ladera Las Maromas

En la tomografía (Fig. 5.6) podemos observar de forma general, que la ladera tiene valores de resistividades bajas, en su mayoría de los 18.4 a los 261 ohm*m. Estos valores son mínimos y se relacionan con materiales conductores que, a su vez podría significar la presencia de materiales saturados, materiales granulares, de baja competencia, entre otros. Todas ellas son condiciones posibles para esta ladera dado el aporte constante de humedad tanto de forma artificial (aporte antrópico) como por medio de una zona de interacción entre el ojo de agua (estrella amarilla en Fig. 5.5) y un régimen hídrico regional. Esto se asume debido a que los habitantes del área y personas de Protección Civil expresaron que el pequeño ojo de agua siempre cuenta con agua, incluso en temporada seca. Se distinguen además en líneas de color negro (Fig. 5.6), límites establecidos entre materiales de distintas resistividades. Estos límites son establecidos en las tendencias de contrastes entre resistividades siendo estos de mayor resistividad respecto al resto de la ladera, llegando a valores de 261 hasta 3789 ohm*m. Estos límites fueron interpretados como los límites entre unidades geotécnicas.

5.1.2 Modelo geológico

La Colonia Las Maromas se encuentra sobre depósitos de bloques y cenizas provenientes de los aparatos volcánicos antiguos y localizados al sur de la demarcación. Un afloramiento de un corte la parte lateral izquierda de la ladera evidenció, en detalle, la composición de los materiales que la constituyen. La localización de la misma se puede identificar en la fig. 5.4. En la cima estratigráfica se encuentra la capa de suelo -unidad S- (Fig. 5.7). Por debajo de ella un depósito de bloques y cenizas -unidad BC- de estructura masiva con una marcada tendencia de discontinuidades pseudo verticales, cuyo límite inferior está conformado por una superficie de contacto con un echado representativo de 29°. Este contacto contiene además material blando de color blancuzco que se aprecia ladera arriba, sin continuidad visible ladera abajo. Como siguiente unidad se encuentra la unidad ME por encima de un depósito antrópico cercano a la vialidad, el depósito muestra una estructura masiva (Tabla 27).

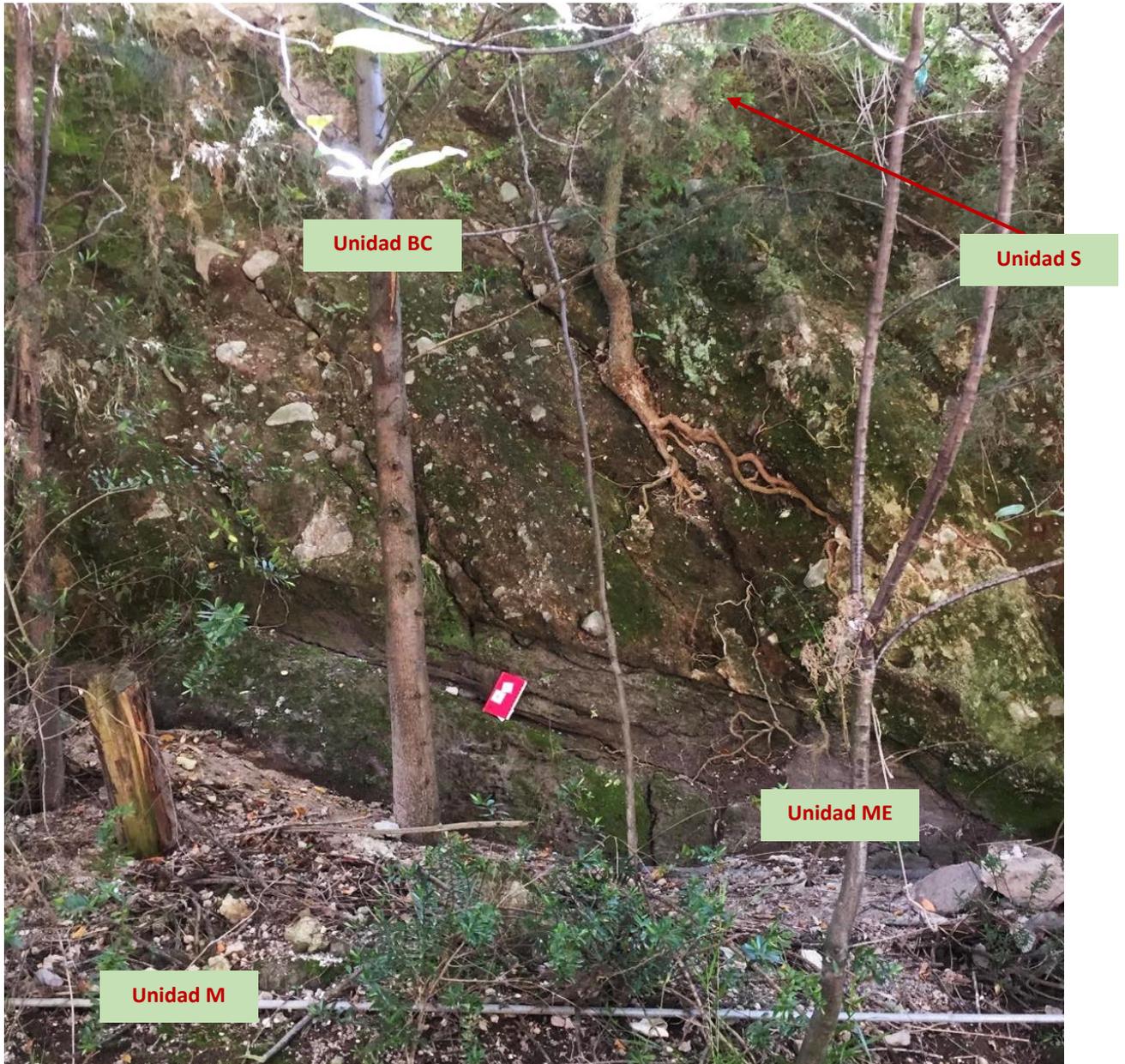


Fig. 5.7 Corte lateral de la ladera Las Maromas con la distinción de unidades geológicas

Tabla 27. Descripción de unidades geológicas de la ladera Las Maromas

Unidad	Grosor	Descripción
S- Suelo	8- 10 m	Material arcillo-arenoso de color rojizo. Es notoria la humedad presente, con algunas variaciones a lo largo de la ladera. Cercano al pie se observa la presencia de basura y material de construcción.
BC	3 m	Esta unidad de roca de color general marrón claro, presenta discontinuidades con rumbo norte y echado de 73°, las raíces de árboles se hacen notar en estos planos de debilidad. La roca se presenta con un grado de alteración medio, donde algunos materiales ya se encuentran alterados, en su mayoría el vidrio volcánico componente de algunos de los bloques de la roca, lo que se presume generó el material blanquizco arcilloso. Los clastos son de origen volcánico, de tamaños muy variables desde 70 cm hasta arenas gruesas, dentro de una matriz arcillo-arenosa. Aunque no se aprecia una continuidad lateral en el corte se mide una potencia de 3 m en promedio.
ME	1-1.5m	Esta unidad de depósitos de bloques y cenizas se presenta en pseudoestratificación y con un menor grado de alteración en relación con la unidad encima de ella, aunque es de menor espesor dentro del corte, se logra apreciar una continuidad lateral. Es por eso que se interpreta como la unidad que representa mayor peligro, con dato estructural SE40° con 29°. Esto dado que su buzamiento coincide en mayor medida con el de la ladera. El tamaño de los sedimentos se muestra más homogéneo y de menores tamaños encontrándose en su mayoría de tamaño ceniza gruesa.
M	-	Por último, en la base, se observa una unidad completamente masiva de apariencia de “conglomerado”, debido a que sus clastos son redondeados, sin estructuras aparentes. Parece ser un relleno antrópico por debajo de la unidad ME lo que puede evidenciar las modificaciones antrópicas dentro de esta ladera.

5.1.3 Modelo geotécnico

Geotécnicamente y para conveniencia de la modelación dentro del programa especializado en inestabilidad de laderas se identificaron tres unidades de análisis (Fig. 5.8):

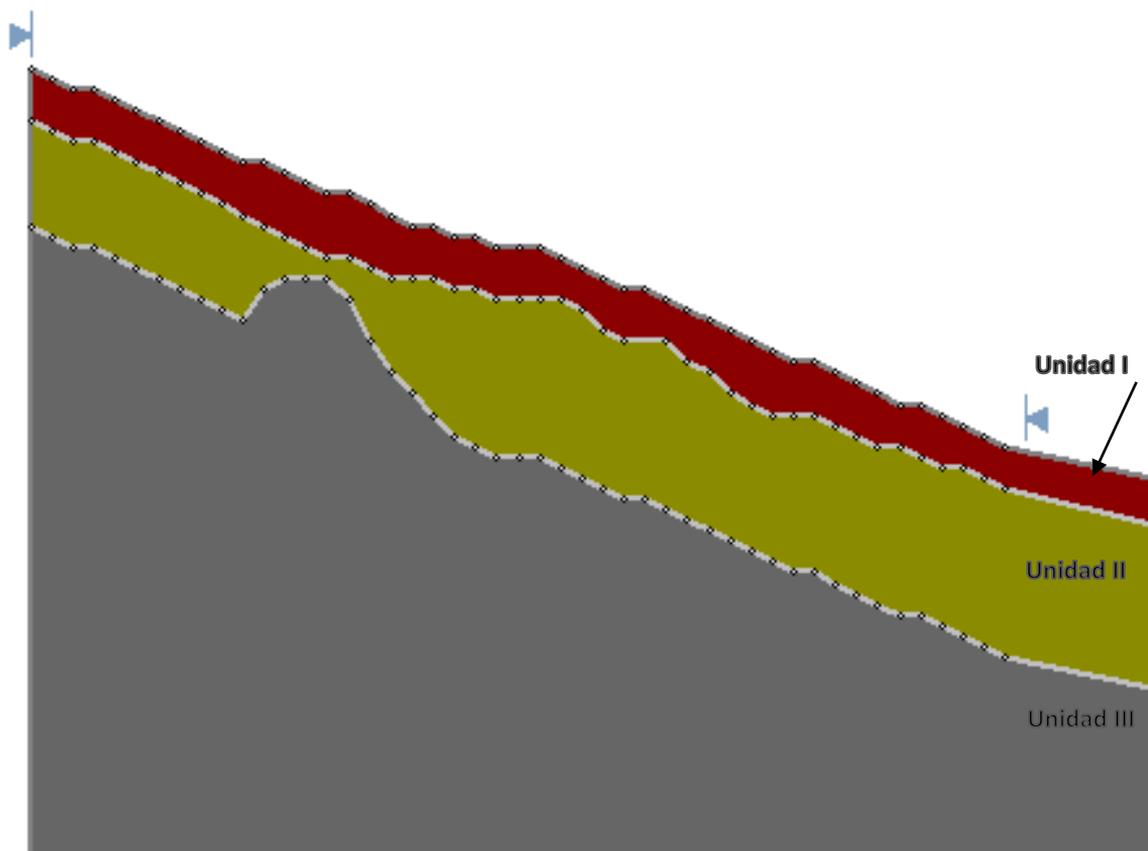


Fig. 5.8 Corte ladera Las Maromas, con la propuesta de unidades geotécnicas.

La Unidad I representa al suelo, mientras que la Unidad II comprende ambas unidades geológicas correspondientes a depósitos de bloques y cenizas, es decir, la unidad BC y la unidad ME. Por otro lado, la Unidad III representa un material esperado por debajo de las mencionadas anteriormente. Dado que se observa una mejora de los materiales al descender en la columna estratigráfica está Unidad III, se propone sea de mejor calidad geotécnica. De acuerdo con esta caracterización se obtuvieron los parámetros geotécnicos para cada unidad. A continuación, se presentan (Tabla 28 y 29)

Tabla 28. Parámetros obtenidos para la ladera Las Maromas

UNIDAD GEOTÉCNICA	PARÁMETROS							
	SUCS	Cu	Cc	LL	LP	IP	C (kN/m ²)	Θ
Unidad I	SM- Arena limosa	-	-	-	-	-	1	19°
Unidad II	SP- Arena mal graduada con gravas y finos	35.5	0.776	46	23.935	22.935	0.5	36.5°
Unidad III	SP- Arena mal graduada con gravas	13.33	0.833	45.8	24.485	21.315	0	40°

Tabla 29. Elementos utilizados en el modelamiento de condiciones estáticas de la ladera Las Maromas

Elemento plasmado	Defensa
Carga distribuida	Se realizó el cálculo de la carga que ejercen las viviendas sobre la ladera obteniendo un aproximado de 1000 Kg/m ² para una vivienda de 2 plantas, lo que se tradujo en 9.8 kN/m ² .
Grietas	Sobre el modelo se plasmaron las grietas de tensión observadas en campo, esto sobre la parte alta de la ladera.
Límites	Se consideró toda la ladera dentro de los límites de pendiente, dado que se asume que todos los niveles presentan susceptibilidad.
Línea piezométrica	La ubicación de la línea piezométrica fue ubicada dentro de la ladera al nivel del ojo de agua descrito anteriormente.

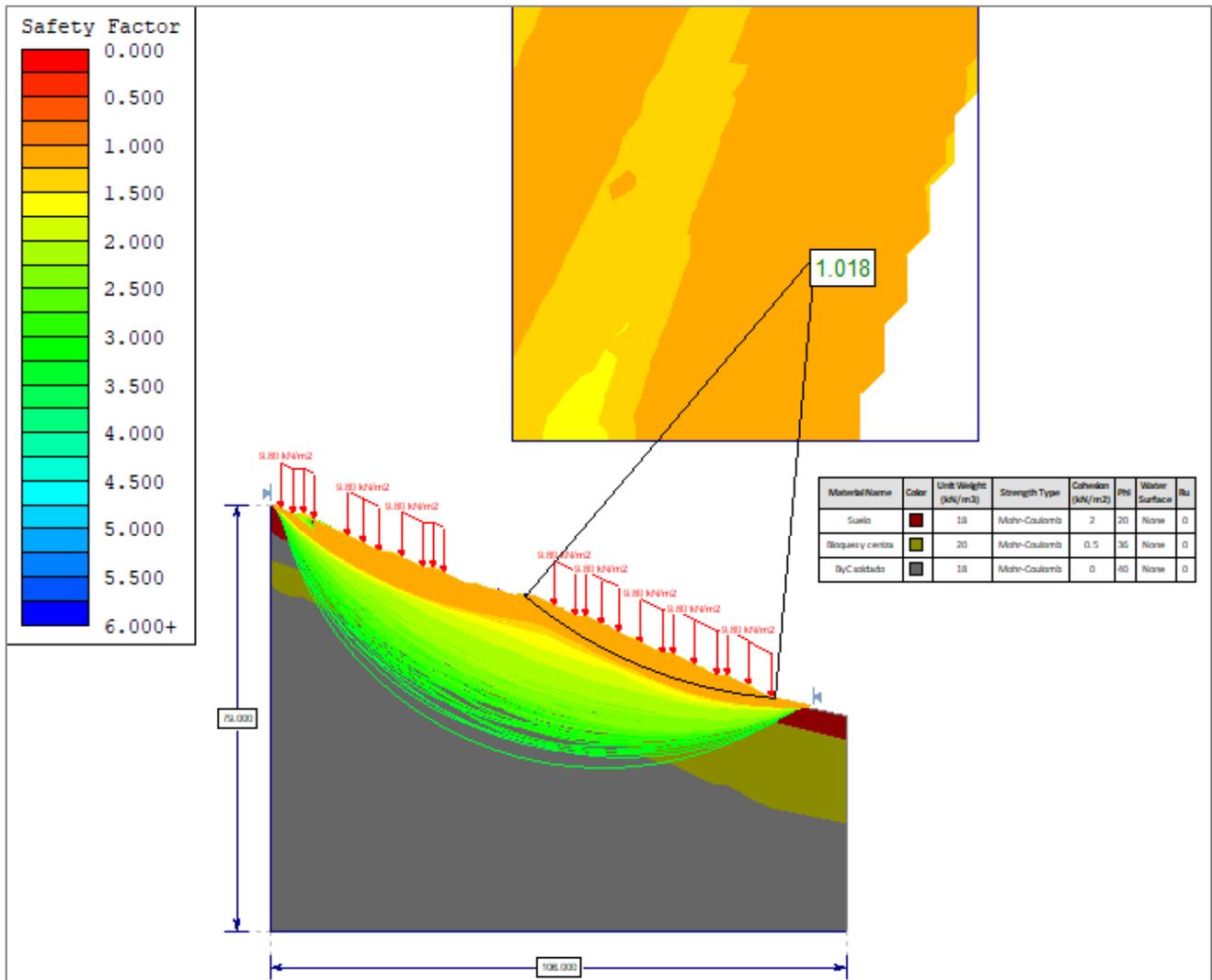


Fig. 5.9 Análisis de estabilidad de la ladera Las Maromas. En el modelo se observan todas las superficies de deslizamiento posibles, inclusive las de mayor factor de seguridad

Si bien el modelo se ejecutó dos veces con los mismos parámetros especificados, la Fig. 5.9 muestra todas las posibles superficies de deslizamiento generadas bajo esas condiciones. Las superficies de menor susceptibilidad a deslizar son aquellas que se encuentran a mayor profundidad. Sin embargo, de presentarse generarían un volumen de material removido mayor que las superficies de alta susceptibilidad. En cambio, en la Fig. 5.10 se observan las superficies de desplazamiento más susceptibles. Estas superficies son generadas en dos movimientos superficiales de suelo que afectan la parte alta y baja de la ladera, respectivamente (deslizamiento alto y bajo). Principalmente la zona baja de la ladera cuenta con un nivel muy alto de susceptibilidad a generar un deslizamiento, ya que el factor de seguridad es cercano a

1, lo que significa un valor muy próximo a la inestabilidad. Si bien se trata de un deslizamiento somero de suelo, su existencia podría generar un comportamiento “dominó”, ya que se extraería el pie de lo que es representado como el deslizamiento alto y su consecuente inestabilidad, lo que desencadenaría un segundo periodo de movimiento. Por lo que el volumen de masa removida involucrada aumentaría considerablemente, así como su área de afectación. Como evidencias premonitoras de deslizamiento, en campo se encontraron abombamientos observados a lo largo de la ladera y grietas en la parte en su parte alta, y que se interpretan como premonitores de este movimiento de suelo (Fig. 5.3).

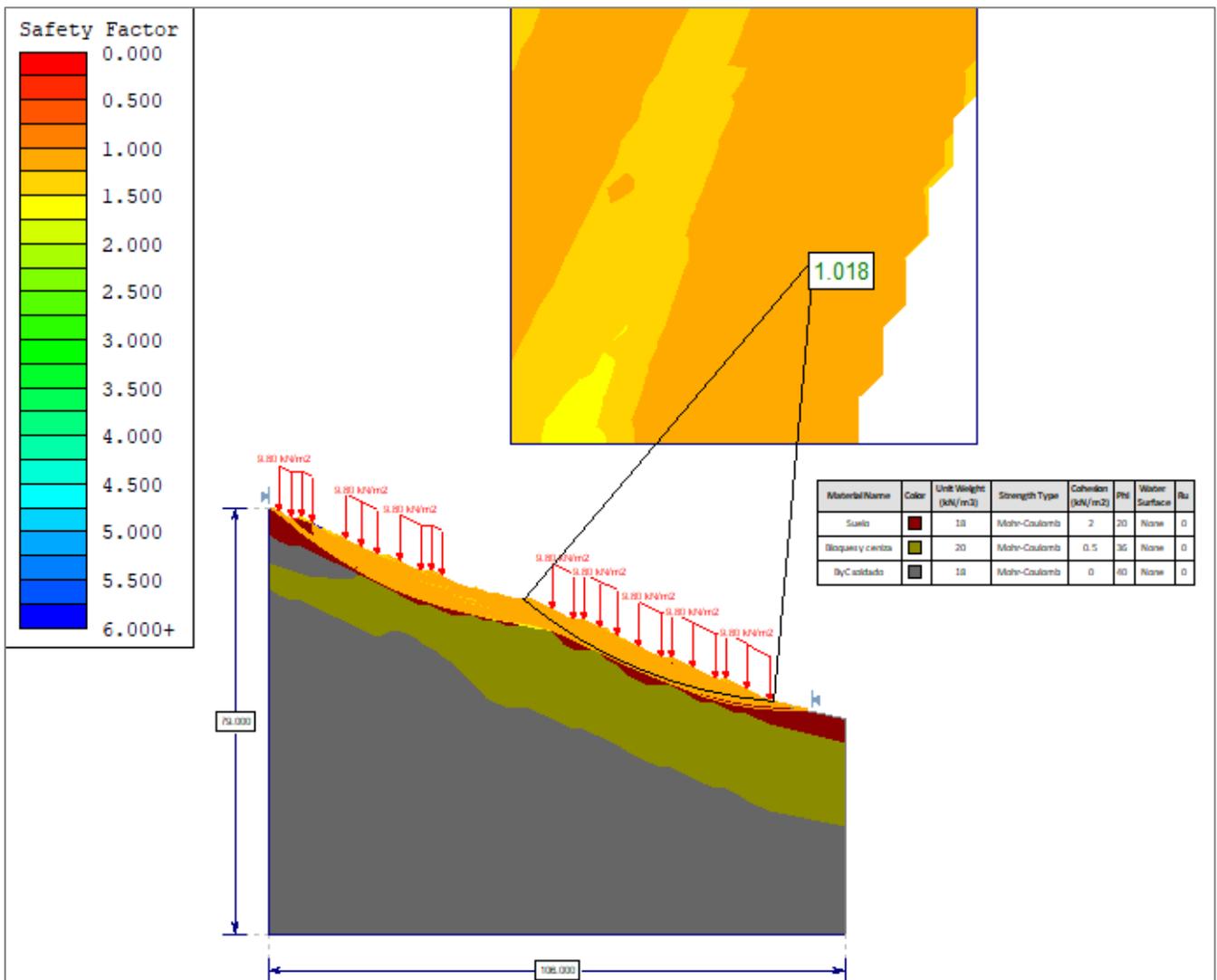


Fig. 5.10 Análisis de estabilidad de la ladera Las Maromas

5.1.4 Resultados Colonia Las Maromas

Con base en las características propias del lugar y su evaluación se considera a la región de Las Maromas como un sitio con alta susceptibilidad a presentar un deslizamiento de suelo superficial en la parte bajo de la ladera representado con un factor de seguridad de 1.018, así mismo con baja susceptibilidad a un fenómeno de caídas de roca. Esto se debe, principalmente, a su composición arenosa en disposición desfavorable respecto a la ladera como se mencionó anteriormente.

La capa más superficial es la que se considera como las más susceptible a deslizarse. Además, corresponde al lecho de mayor conductividad (marcados en la tomografía eléctrica). Al tomar en cuenta que uno de los principales factores que considera el cálculo de la resistividad es el contenido de agua, cobra importancia el hecho de que en esta zona la gran mayoría de los deslizamientos son provocados por lluvias intensas.

Los análisis granulométricos (resultados en Tabla 28) muestran que las dos primeras unidades geotécnicas corresponden a arenas gruesas. Este tipo de material suele presentar una porosidad de hasta 60%; lo que facilita el flujo de drenaje de la superficie a y dentro de él, y hasta las superficies que se consideran superficies de deslizamiento potenciales, determinadas por la interfaz donde las resistividades de los materiales contrastan reflejando principalmente cambios de competencia en el material, tanto hidratado y/o alterado, como fracturado, poroso, etc. y generan el volumen de material susceptible a deslizar.

Más allá de lo observado en campo, resulta en una mayor susceptibilidad de la ladera; incluso mayor peligro en caso de que un agente detonador como lo sería una lluvia intensa, ya que su límite líquido (contenido de agua en el que el material comienza a comportarse como fluido viscoso y fluye bajo su propio peso, dado que conlleva un aumento de densidad) podría

alcanzarse o estar muy cercano a él. Estos cambios de humedad se reflejarían en modificaciones de ladera. Resultados que coinciden con los obtenidos con el formato de CENAPRED de susceptibilidad a deslizamientos (Fig. 5.11) que concluye que la ladera Las Maromas tiene un nivel de susceptibilidad a deslizarse muy alto.

Se observa que los resultados generados con en el formato de evaluación de CENAPRED para el caso de caídas de roca (Fig. 5.12) no coinciden con la estimación presentada en este trabajo. Esto se puede deber a que las características observadas en campo deben ser acotadas a una opción dentro del formato y la exactitud dentro de esa representación puede presentar errores y estos, a su vez, acumularse a lo largo de la evaluación.

Si bien queda fuera del alcance de este trabajo, se debe considerar que actualmente la ladera ya presenta con grietas de tensión en la corona y el peso sobre ella aumenta constantemente al expandirse la mancha urbana. El presente trabajo diagnostica que, esto generaría asentamientos diferenciales o movimiento pautado del material de la ladera. Cabe recordar que las viviendas ubicadas en el área de estudio, se encuentran sobre la unidad susceptible a deslizarse e inevitablemente, de presentarse un deslizamiento serían afectadas por el material removido.

FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓRICOS					
FACTOR	INTERVALOS O CATEGORÍAS	ATRIBUTO RELATIVO	OBSERVACIONES	MAROMAS	
Inclinación de los taludes	Más de 45°	2	Estimar el valor medio. Úsese clinómetro	1.8	
	35 a 45°	1.8			
	25 a 35°	1.4			
	15 a 35°	1			
	Menos de 15°	0.5			
Altura	Menos de 50 m	0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Úsese nivelaciones, planos o cartas topográficas. Niveles dudosos con GPS	1.2	
	50 a 100 m	1.2			
	100 a 200 m	1.6			
	Más de 200 m	2			
Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área o región	No se sabe	0.3	Reseñas verosímiles de lugareños	0.6	
	Algunos someros	0.4			
	Sí, incluso con fechas	0.6			
FACTORES GEOTÉCNICOS					
Tipo de suelos o rocas	Suelos granulares medianamente compactos a sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas	1.5 a 2.5	Vulnerables a la erosión; o suelos de consistencia blanda	1.8	
	Rocas metamórficas (pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas	1.2 a 2.0			
	Suelos arcillosos consistentes o arena limosos compactos	0.5 a 1.0	Multiplicar por 1.3 si está agrietado		
	Rocas sedimentarias (lutitas, areniscas, conglomerados, etc) y tobos competentes	0.3 a 0.6	Multiplicar por 1.2 a 1.5, según el grado de meteorización		
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, etc)	0.2 a 0.4	Multiplicar por 2 a 4 según el grado de meteorización		
	Espesor de la capa de suelo			Revisarse cortes y cañadas; o bien, recurrirse a exploración manual	1
	Menos de 5 m	0.5			
5 a 10 m	1				
10 a 15 m	1.4				
Aspectos estructurales en formaciones rocosas	Estado de la discontinuidad		Considérese planos de contacto entre formaciones, grietas, juntas y planos de debilidad	0.6	
	Menos de 15°	0.3			
	25 a 35°	0.6			
	Más de 45°	0.9			
	Ángulo entre el echado de las discontinuidades y la inclinación del talud		Ángulo diferencial positivo si el echado es mayor que la inclinación del talud	1	
	Más de 10°	0.3			
	0 a 10°	0.5			
	0°	0.7			
	0 a -10°	0.8			
	Más de -10°	1			
Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de la dirección del talud		Considerar la dirección de las discontinuidades más representativas	0.2		
Más de 30°	0.2				
10 a 20°	0.3				
Menos de 5°	0.5				
FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES					
Evidencias geomorfológicas de "huecos" en laderas	Inexistentes	0	Formas de conchas o embudo (flujos)	0.5	
	Volúmenes moderados	0.5			
	Grandes volúmenes faltantes	1			
Vegetación y uso de la tierra	Zona urbana	2	Considérese no solo la ladera sino también la plataforma de la cima	2	
	Cultivos anuales	0.5			
	Vegetación intensa	2			
	Vegetación moderada	1.2			
	Rocas con raíces en sus fracturas	2			
	Área deforestada	0			
Régimen del agua en la ladera	Nivel freático superficial	1	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud	1	
	Nivel freático inexistente	0			
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o la plataforma	1			
			SUMATORIA	10.7	
ESTIMACIÓN DE GRADO DE LA AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS					
Grado	Descripción			Suma de las calificaciones	
5	Susceptibilidad muy alta			Más de 10	
4	Susceptibilidad alta			8.5 a 10	
3	Susceptibilidad moderada			7 a 8.5	
2	Susceptibilidad baja			5 a 7	
1	Susceptibilidad muy baja			Menos de 5	

Fig. 5.11 Formato de estimación de la susceptibilidad a deslizamientos para la ladera Las Maromas

FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓTICOS				
ACTOR	INTERVALOS O CATEGORÍAS	ATRIBUTO RELATIVO	OBSERVACIONES	MAROMAS
Inclinación de los taludes. Indique el valor: °	70 a 90°	2	Estimar el valor medio. Úsese clinómetro	1.4
	50 a 70°	1.8		
	30 a 50°	1.4		
	Menos de 30°	0.5		
Altura	Menos de 10 m	0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Úsese nivelaciones, planos o cartas topográficas. Niveles dudosas con GPS	1.2
	10 a 50 m	1.2		
	50 a 100 m	1.6		
	Más de 100 m	2		
Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área o región	No se sabe	0.3	Reseñas verosímiles de lugareños	0.6
	Algunos someros	0.4		
	Sí, incluso con fechas	0.6		
FACTORES GEOTÉCNICOS				
Tipo de suelos o rocas	Suelos duros o competentes (cementado) que forman bloques	1 a 1.5	Multiplicar por 1.3 si está agrietado	1.3
	Rocas metamórficas (pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas	0.5 a 0.8		
	Rocas sedimentarias (lutitas, areniscas, conglomeradas, etc)	1 a 2		
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, etc)	1.5 a 2		
	Espesor de la capa de suelo:			Revisense cortes y cañadas; o bien, recúrrase a exploración manual
Menos de 5 m	1.8			
5 a 10 m	1.4			
10 a 15 m	1.0			
Aspectos estructurales en formaciones rocosas	Echado de la discontinuidad		Considérense planos de contacto entre formaciones, grietas, juntas y planos de debilidad	0.6
	Menos de 15°	0.3		
	15 a 35°	0.6		
	Más de 35°	0.9		
	Ángulo entre el echado de las discontinuidades y la inclinación del talud		Ángulo diferencial positivo si el echado es mayor que la inclinación del talud	1
	Más de 10°	0.3		
	0 a 10°	0.5		
	0°	0.7		
	0 a -10°	0.8		
	Más de -10°	1		
Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de la dirección del talud		Considerar la dirección de las discontinuidades más representativas	0.2	
Más de 30°	0.2			
10 a 30°	0.3			
Menos de 10°	0.6			
FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES				
Evidencias geomorfológicas de "huecos" en laderas	Inexistentes	0	Formas de conchas o embudo (flujos)	0.5
	Volúmenes moderados	0.5		
	Grandes volúmenes faltantes	1		
Vegetación y uso de la tierra	Zona urbana	2	Considérense no solo la ladera sino también la plataforma de la cima	2
	Cultivos anuales	0.5		
	Vegetación intensa	2		
	Vegetación moderada	1.2		
	Rocas con raíces en sus fracturas	2		
	Área deforestada	0		
Régimen del agua en la ladera	Nivel freático superficial	1	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud	1
	Nivel freático inexistente	0		
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o la plataforma	1		
			SUMATORIA	11.2
ESTIMACIÓN DE GRADO DE LA AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS				
Grado	Descripción			Suma de las calificaciones
5	Susceptibilidad muy alta			Más de 10
4	Susceptibilidad alta			8.5 a 10
3	Susceptibilidad moderada			7 a 8.5
2	Susceptibilidad baja			5 a 7
1	Susceptibilidad muy baja			Menos de 5

Fig. 5.12 Formato de estimación de la susceptibilidad a caídas para la ladera Las Maromas

5.2 Colonia Del Carmen

5.2.1 Generalidades

Este sitio de estudio se localiza en el pueblo de San Pablo Chimalpa, al final de la calle Constanza (Fig. 5.13), se encuentra en las coordenadas 19.35755 N y -99.31224 W, con una altitud de 2677 msnm. Fue propuesto por Protección Civil de la alcaldía, ya que fue una de las zonas con mayor afectación por el sismo del 19 de septiembre de 2017. La mala distribución de los asentamientos humanos en esta zona, no solo establecidos en condiciones adversas como abruptas pendientes sino también, como se mencionará más adelante sobre materiales poco competentes, lo que aporta más variantes como la consecuente modificación del relieve, deshechos a la ladera y en algunos casos incorporación de humedad a falta de un sistema de drenaje adecuado.

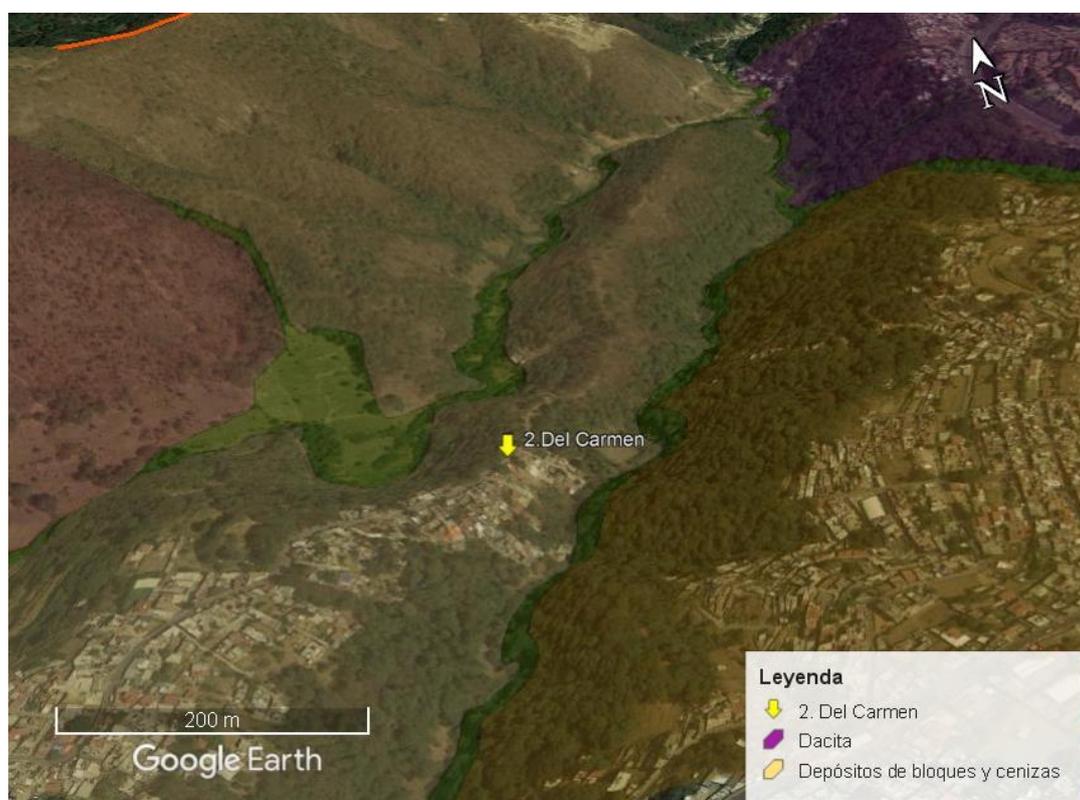


Fig. 5.13 Ubicación de la Colonia Del Carmen, en donde se distinguen los asentamientos de tipo irregular en toda la zona, mismos que se han internado en áreas pertenecientes a la cara del talud. Se muestra con A- B los extremos de la sección utilizada para el estudio de tomografía eléctrica.

Observaciones en campo:

→ Presencia de construcciones en ambas laderas de la loma, tanto a la altura de la “corona” (en el inicio de la curvatura), como conforme se desciende hacia la base de las laderas (Fig. 5.14, 5.15 y 5.16).

→ Colina en forma de lengua (Fig. 5.13).

→ En el lugar se aprecian dos unidades que componen la ladera, sobrepuestas estratigráficamente (U1 sobre U2), afloran en ocasiones de forma inversa, es decir, U2 sobre U1. Lo anterior se debe al arreglo topográfico irregular del sitio. Por debajo, al nivel del río existe una tercera unidad (U3) bien soldada y de mayor competencia.

→ Se observaron grandes deslizamientos en la ladera noroeste próxima a la zona de estudio, de acuerdo con lo reportado por el personal de PC fue un deslizamiento grande que incluso cobró vidas.



Fig. 5.14 Vista lateral de la ladera (SW-NE). Se nota la interacción con el entorno de forma desordenada.

→ Sin discontinuidades aparentes.

→ Personal de Protección Civil (PC) narra que las viviendas afectadas por el sismo del 19 septiembre de 2017 fueron las que se encontraban en este cambio de pendiente (curvatura).



Fig. 5.15 Vista lateral de la ladera (SW-NE). Se nota la interacción con el entorno, un terreno escarpado con barrancas marcadas.



Fig. 5.16 Vista lateral de la ladera (SW-NE). La constante interacción antrópica con esta ladera ha ocasionado la incorporación artificial de humedad e incremento de peso en ella.

Especificaciones de la tomografía eléctrica:

- Equipo *Syscal Pro- Iris Instruments*.
- Sección longitudinal de 144 m.
- Arreglo Dipolo- Dipolo de 48 electrodos cada 2 metros (992 puntos de atribución)

Como se observa en la Fig. 5.17 para este segundo caso, las condiciones son más variantes. El modelo geológico obtenido de esta interpretación hace evidente una “intercalación” de materiales que comparte los mismos valores de resistividad. Ladera arriba un mayor dominio de altas resistividades es evidente, mientras que ladera abajo aún los altos resistivos no llegan a ser máximos como los observados en mayores altitudes. Los valores bajos y medios-altos se encuentran en contacto con la superficie topográfica. Estos valores dan referencia a materiales con un alto grado de humedad y/o materiales alterados (3-15 ohm*m). Próxima al centro de la sección se nota una zona de discontinuidad que se ha caracterizado como un bajo topográfico, que se infiere podría tratarse de una falla. A partir de este paleo relieve se han dispuesto los eventos siguientes. La zona de resistividades bajas (15-64 ohm*m) separa dos cuerpos principales de resistividades con valores mayores a 1000 ohm*m. Conforme se descende se contempló en campo que la capa de suelo aumentaba en potencia que corresponde al material conductor y que se ha interpretado como el material susceptible a un deslizamiento superficial.

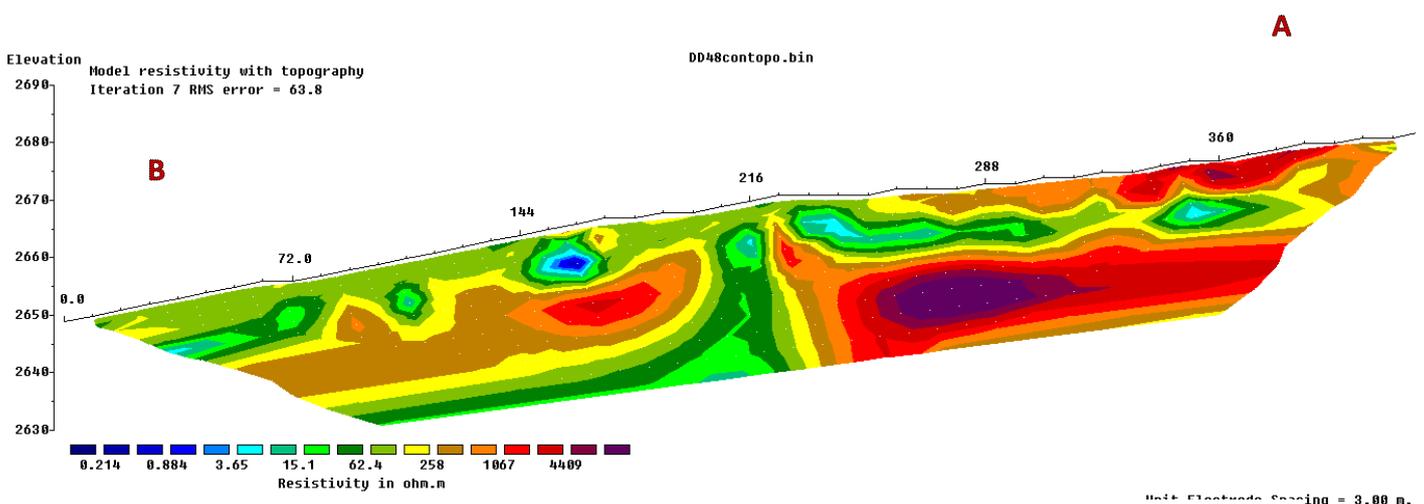


Fig. 5.17 Tomografía eléctrica de la ladera Del Carmen

5.2.2 Modelo Geológico

El modelo geológico mostrado en la Fig. 5.18 es resultado del análisis e interpretación de la geología regional, las condiciones locales, la tomografía eléctrica y lo observado en campo. La interpretación para este caso de estudio, se hace referencia a un primer evento de depósito, que como se observa es de valores de resistividad más altos, lo que se traduce en un material de mejor calidad, es decir, menos fracturado, compacto, de menor porosidad, etc. Este material se ha determinado como el depósito de bloques y cenizas ubicado ladera abajo (unidad IV). Posteriormente un segundo episodio depositaría a la unidad III, esta vez se trata de un material de mayor heterogeneidad en cuanto al tamaño de sus componentes y de menor competencia. Se observó menor compactación respecto a la unidad subyacente a ella, sin embargo, hacía el lado SW, es decir, cercano a la presencia de viviendas, esta unidad se notó con mayor alteración, deleznable y con mayor porosidad. Ladera arriba se encuentra la Unidad II de misma litología de bloques y cenizas. Sobre esta Unidad se encuentran la mayoría de las viviendas y resultan ser las ubicadas en la corona de la ladera, como las afectadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017, aunque se trata de una capa de mayor resistividad, es decir, mayor competencia es de poco espesor (alrededor de 4-5 m).

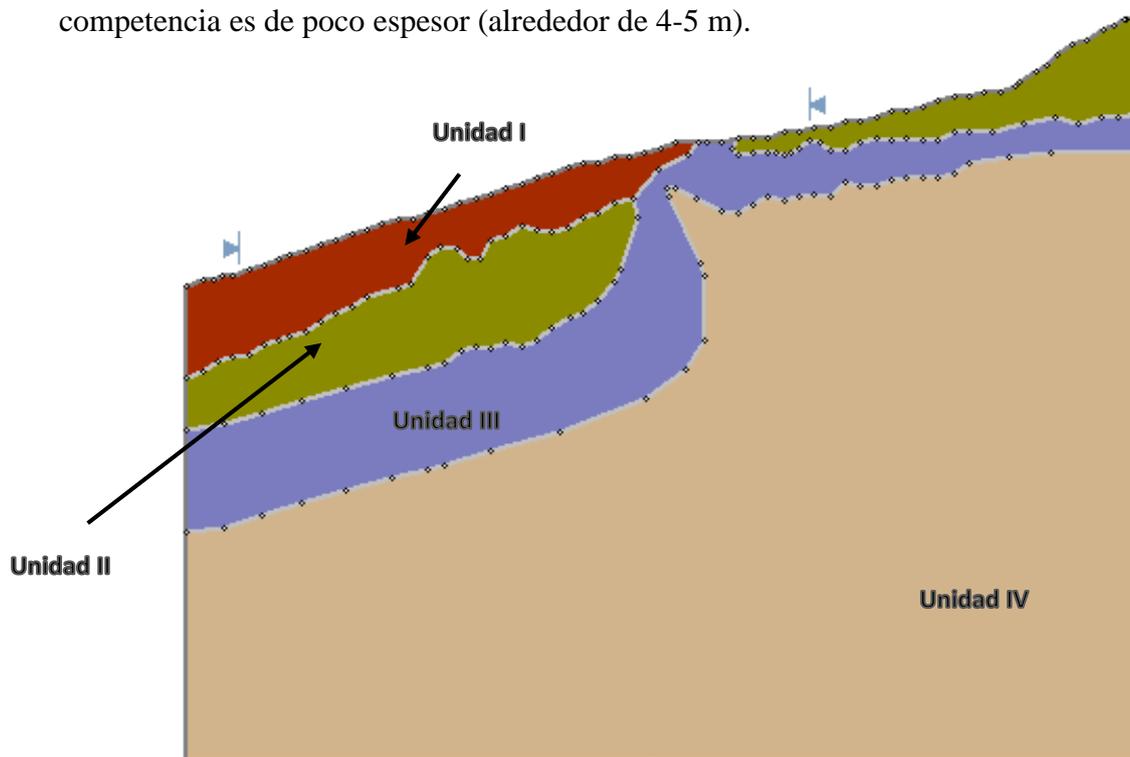


Fig. 5.18 Perfil del modelo geológico y sus respectivas unidades

La capa de suelo de espesor variable y que se encuentra delimitada como unidad I, es importante mencionar que, en campo se percibió la presencia de suelo a los costados de la lengüeta y no solo en el frente como se muestra en la tomografía. No obstante, se determinó correcta esta interpretación dado que como se ha mencionado, esta capa de suelo crece conforme se desciende de la ladera, acercándose así al modelo propuesto.

Tabla 30. Descripción de unidades geológicas de la ladera Del Carmen

Unidad	Grosor	Descripción
U-I	8 -10 m	Cubierta de suelo, color marrón oscuro con tonalidades rojizas; se trata de una capa potente donde se hacen presentes raíces. La unidad posee pequeños clastos/ fragmentos de roca con tendencia sub-angulosa (Fig.5.19a).
U-II	5-10 m	Unidad con características similares a la Unidad II. Sin embargo, se nota cierta más competencia, mantiene el color grisáceo, compuesta de gravas principalmente, presenta mayor resistencia al martillo de geólogo (Fig. 5.19b)
U-III	10-13 m	<p>Esta capa subyacente es de color grisáceo claro con abundantes clastos envueltos en una escasa matriz (48.646% de gravas, 50.123% de arena y 1.231% de finos), catalogada como una roca de depósitos de bloques y cenizas (Fig. 5.19c)</p> <p>Esta unidad abarca hasta el pie de la ladera por lo que cubre aproximadamente 70m, el grado de meteorización disminuye conforme se desciende por la ladera, pasando de una roca muy meteorizada, deleznable, con alta porosidad y considerablemente húmeda a una roca de mayor competencia y menos porosidad ubicada a escasos metros del pie de la ladera.</p> <p>A lo largo de la cara principal de las laderas se hacen evidentes canales de escorrentías y cavidades donde el agua se acumularía y filtraría.</p> <p>Esta transición en las propiedades de la unidad indica mayor capacidad de filtración y aportación de humedad a la ladera hasta niveles bajos.</p>
U-IV	Indefinido	Depósito de bloques y ceniza compacto de color gris oscuro a la intemperie, y gris medio al fresco. Con componentes de tamaño lapilli a bloques envueltos en ceniza fina y gruesa (Fig, 5.19d)

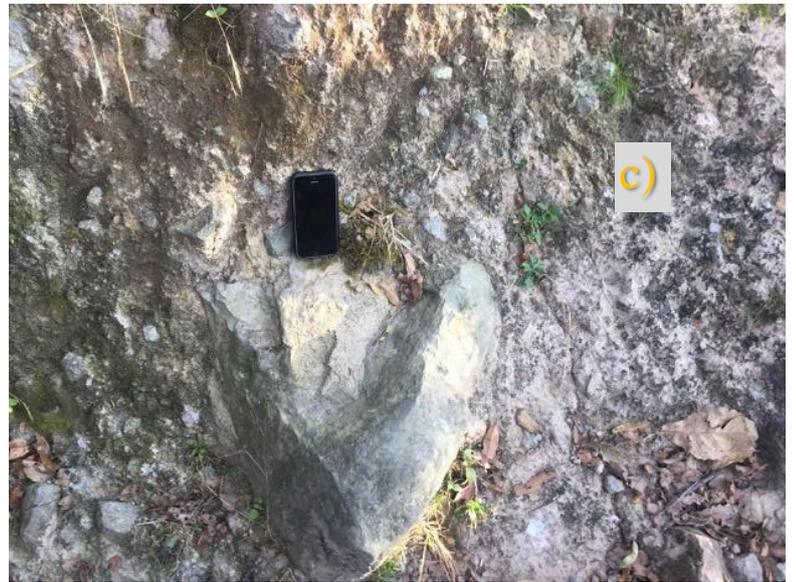


Fig. 5.19 Unidades geológicas

- a. Unidad I
- b. Unidad II
- c. Unidad III
- d. Unidad IV

5.2.3 Modelo Geotécnico

A continuación, se presentan los parámetros físico- mecánicos (Tabla 31) y las condiciones estáticas del modelamiento (Tabla 34) para la Ladera Del Carmen (Tabla 32)

Tabla 31. Parámetros físicos y mecánicos obtenidos para la ladera Del Carmen

UNIDAD GEOTÉCNICA	PARÁMETROS							
	SUCS	Cu	Cc	LL	LP	IP	C (kN/m ²)	φ
Unidad I	SM- Arena limosa	-	-	-	-	-	0.9807	16.1
Unidad II	-	-	-	-	-	-	0.6	33°
Unidad III	SW- Arena bien graduada con gravas	16.042	1.07	41.75	22.25	19.5	0.3	(36.68) 33°
Unidad IV	-	-	-	-	-	-	0	45°

Tabla 32. Elementos utilizados en el modelamiento de condiciones estáticas de la ladera Las Maromas

Elemento plasmado	Argumento
Carga distribuida	Se realizó el cálculo de la carga que ejercen las viviendas sobre la ladera obteniendo un aproximado de 1000 Kg/m ² para una vivienda de 2 plantas, lo que se tradujo en 9.8 kN/m ²
Límites	Para este caso los límites no fueron establecidos para toda la ladera, dada su configuración, pues la parte alta de ella, a pesar de tener mayor pendiente continúa a una zona de “planicie” y se ubica sobre unidades más estables, concentrándose la zona crítica cerca del centro de la sección donde coinciden contactos litológicos y la presencia de la unidad de suelo.

Para el caso de la Colonia Del Carmen el factor de seguridad muestra un valor menor a 1 que se puede traducir como niveles de susceptibilidad muy altos a deslizamientos superficiales de suelo. Sin embargo, y como se observa en la Figura 20, se trata de volúmenes muy bajos, y que por la topografía del lugar y la ausencia de viviendas en la parte baja de la ladera pudo haberse presentado ya y no haber sido reportado. No obstante, valores de factor de seguridad indicadores de alta susceptibilidad a deslizamientos y de mayor profundidad pueden notarse en la unidad de suelo, bajo estas condiciones. Por lo que la zona media- baja de la ladera se considera altamente susceptible a deslizamientos de suelo. La presencia de superficies de deslizamiento a mayor profundidad y que involucraría un deslizamiento de detritos son de susceptibilidad media-baja al contar con un factor de seguridad próximo a 1.5-2.

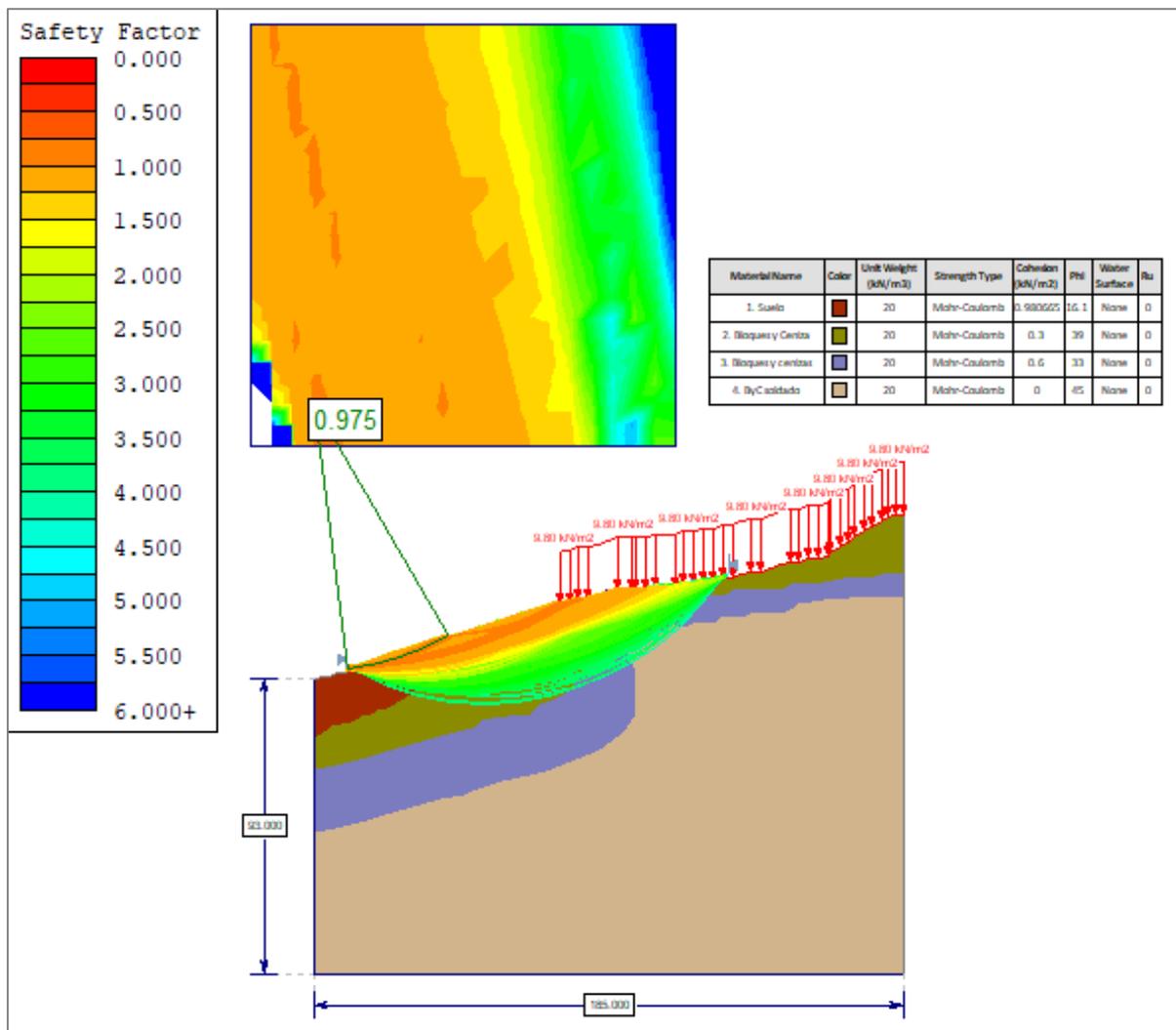


Fig. 5.20 Análisis de estabilidad de la ladera Del Carmen

5.2.4 Resultados

En conclusión, la ladera Del Carmen se cataloga con un nivel de susceptibilidad medio-alto al presentar deslizamientos superficiales de suelo y con un nivel muy bajo a la generación de caídas (susceptibilidad muy baja a caídas de roca). Esto bajo condiciones estáticas con las que fueron evaluadas. Se considera que podrían presentarse problemas de subsidencia diferencial dada la intercalación de materiales con distintas competencias quedando en el centro la Unidad II de menor resistencia.

Existe una vez más una discrepancia entre los resultados dados con el formato de estimación de susceptibilidad presentado por CENAPRED (Fig. 21 y 22) y los acordados en el presente trabajo, debido a la globalización de factores en opciones limitadas, pues como se mencionó anteriormente, no se estima una susceptibilidad “muy alta” a caídas y/o desprendimientos, principalmente a que la composición y disposición de los materiales dentro de la ladera no son propicios para la generación de bloques. Por el contrario sí se consideran susceptibles a deslizamientos de suelo y/o detritos (si estos llegaran a ser más profundos), principalmente ladera abajo, como se ha confirmado en el modelo de la Fig. 5.20 y que corresponde a lo observado en campo.

Por otra parte, y en cuanto las viviendas afectadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017 (razón por la que fue propuesto este caso de estudio) personal de Protección Civil sugirió la idea de que se trataba de un deslizamiento. Sin embargo, la idea contrasta con lo descrito en el mapa de zonificación sísmica (GODF, 2010), donde se categoriza al área de estudio como parte de la zona 1, es decir, superficie firme con amplificación de ondas reducida. Esta condición está dada por las características del tipo de material, no así por el efecto que se puede generar por la morfología del terreno. Este trabajo propone que, la afectación fue resultado mayormente de un efecto de amplificación de ondas sísmicas por efecto de la geometría de la ladera. Como

se expuso en el Capítulo 2, la amplificación por efecto topográfico ocurre de forma local, generadas para este caso por la topografía superficial del talud.

Las estructuras ubicadas en la parte alta de las laderas, manifiestan mayores daños que las ubicadas en la parte baja, siendo esas las superficies convexas en donde se experimentan las amplificaciones de ondas sísmicas. Aunado a lo anterior, el daño en las viviendas podría considerarse también un efecto de impedancia sísmica, es decir, un efecto por cambio de densidad en el material, con modificaciones de ondas sísmicas a lo largo del paso de un material a otro con distintas características, mismas que se pueden notar en la Fig. 5. 20. La variación de la Unidad II y la Unidad III se encuentra en la parte alta de la ladera y coincide con la presencia de viviendas.

FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓTICOS					
FACTOR	INTERVALOS O CATEGORÍAS	ATRIBUTO RELATIVO	OBSERVACIONES	CHIMALPA	
Inclinación de los taludes	Más de 45°	2	Estimar el valor medio. Úsese clinómetro	1.8	
	35 a 45°	1.8			
	25 a 35°	1.4			
	15 a 35°	1			
	Menos de 15°	0.5			
Altura	Menos de 50 m	0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Úsese nivelaciones, planos o cartas topográficas. Niveles dudosos con GPS	1.2	
	50 a 100 m	1.2			
	100 a 200 m	1.6			
	Más de 200 m	2			
Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área o región	No se sabe	0.3	Reseñas verosímiles de lugareños	0.6	
	Algunos someros	0.4			
	Sí, incluso con fechas	0.6			
FACTORES GEOTÉCNICOS					
Tipo de suelos o rocas	Suelos granulares medianamente compactos a sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas	1.5 a 2.5	Vulnerables a la erosión; o suelos de consistencia blanda	2.3	
	Rocas metamórficas (pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas	1.2 a 2.0			
	Suelos arcillosos consistentes o arena limosos compactos	0.5 a 1.0	Multiplicar po 1.3 si está agrietado		
	Rocas sedimentarias (lutitas, areniscas, conglomerados, etc) y tobas competentes	0.3 a 0.6	Multiplicar por 1.2 a 1.5, según el grado de meteorización		
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, etc)	0.2 a 0.4	Multiplicar por 2 a 4 según el grado de meteorización		
	Espesor de la capa de suelo			Revísense cortes y cañadas; o ben, recúrrase a exploración manual	1
	Menos de 5 m	0.5			
	5 a 10 m	1			
	10 a 15 m	1.4			
	15 a 20 m	1.8			
Aspectos estructurales en formaciones rocosas	Estado de la discontinuidad		Cóndírese planos de contacto entre formaciones, grietas y planos de debilidad	0.6	
		Menos de 15°			0.3
		25 a 35°			0.6
		Más de 45°	0.9		
	Ángulo entre el echado de las discontinuidades y la inclinación del talud		Ángulo diferencial positivo si el echado es mayor que la inclinación del talud	0.3	
		Más de 10°			0.3
		0 a 10°			0.5
		0°			0.7
	0 a -10°	0.8			
	Más de -10°	1			
Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de la dirección del talud		Considerar la dirección de las discontinuidades más representativas	0.3		
	Más de 30°			0.2	
	10 a 20°			0.3	
	Menos de 5°	0.5			
FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES					
Evidencias geomorfológicas de "huecos" en laderas	Inexistentes	0	Formas de conchas o embudo (flujos)	0.5	
	Volúmenes moderados	0.5			
	Grandes volúmenes faltantes	1			
Vegetación y uso de la tierra	Zona urbana	2	Considérese no solo la ladera sino también la plataforma de la cima	2	
	Cultivos anuales	0.5			
	Vegetación intensa	2			
	Vegetación moderada	1.2			
	Rocas con raíces en sus fracturas	2			
	Área deforestada	0			
Régimen del agua en la ladera	Nivel freático superficial	1	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud	0	
	Nivel freático inexistente	0			
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o la plataforma	1			
SUMATORIA				10.6	
ESTIMACIÓN DE GRADO DE LA AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS					
Grado	Descripción			Suma de las calificaciones	
5	Susceptibilidad muy alta			Más de 10	
4	Susceptibilidad alta			8.5 a 10	
3	Susceptibilidad moderada			7 a 8.5	
2	Susceptibilidad baja			5 a 7	
1	Susceptibilidad muy baja			Menos de 5	

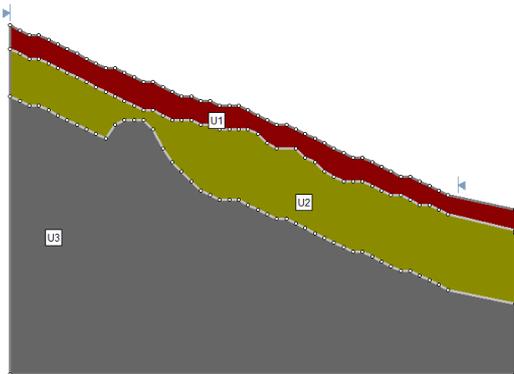
Fig. 5.21 Formato de estimación de la susceptibilidad a deslizamientos para la ladera Del Carmen

FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓTICOS				
FACTOR	INTERVALOS O CATEGORÍAS	ATRIBUTO RELATIVO	OBSERVACIONES	CHIMALPA
Inclinación de los taludes. Indique el valor: °	70 a 90°	2	Estimar el valor medio. Úsese clinómetro	1.4
	50 a 70°	1.8		
	30 a 50°	1.4		
	Menos de 30°	0.5		
Altura	Menos de 10 m	0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Úsese nivelaciones, planos o cartas topográficas. Niveles dudosos con GPS	1.6
	10 a 50 m	1.2		
	50 a 100 m	1.6		
	Más de 100 m	2		
Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área o región	No se sabe	0.3	Reseñas verosímiles de lugareños	0.6
	Algunos someros	0.4		
	Sí, incluso con fechas	0.6		
FACTORES GEOTÉCNICOS				
Tipo de suelos o rocas	Suelos duros o competentes (cementado) que forman bloques	1 a 1.5	Multiplicar por 1.3 si está agrietado	1
	Rocas metamórficas (pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas	0.5 a 0.8		
	Rocas sedimentarias (lutitas, areniscas, conglomeradas, etc)	1 a 2		
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, etc)	1.5 a 2		
	Espesor de la capa de suelo:			Revisense cortes y cañadas; o bien, recúrrase a exploración manual
Menos de 5 m	1.8			
5 a 10 m	1.4			
10 a 15 m	1.0			
Aspectos estructurales en formaciones rocosas	Echado de la discontinuidad		Considérense planos de contacto entre formaciones, grietas, juntas y planos de debilidad	0.6
	Menos de 15°	0.3		
	15 a 35°	0.6		
	Ángulo entre el echado de las discontinuidades y la inclinación del talud		Ángulo diferencial positivo si el echado es mayor que la inclinación del talud	0.3
	Más de 10°	0.3		
	0 a 10°	0.5		
	0°	0.7		
	0 a -10°	0.8	Considerar la dirección de las discontinuidades más representativas	0.3
	Más de -10°	1		
	Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de la dirección del talud			
Más de 30°	0.2			
10 a 30°	0.3			
Menos de 10°	0.6			
FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES				
Evidencias geomorfológicas de "huecos" en laderas	Inexistentes	0	Formas de conchas o embudo (flujos)	0.5
	Volúmenes moderados	0.5		
	Grandes volúmenes faltantes	1		
Vegetación y uso de la tierra	Zona urbana	2	Considérense no solo la ladera sino también la plataforma de la cima	2
	Cultivos anuales	0.5		
	Vegetación intensa	2		
	Vegetación moderada	1.2		
	Rocas con raíces en sus fracturas	2		
Área deforestada	0			
Régimen del agua en la ladera	Nivel freático superficial	1	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud	0
	Nivel freático inexistente	0		
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o la plataforma	1		
			SUMATORIA	9.7
ESTIMACIÓN DE GRADO DE LA AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS				
Grado	Descripción			Suma de las calificaciones
5	Susceptibilidad muy alta			Más de 10
4	Susceptibilidad alta			8.5 a 10
3	Susceptibilidad moderada			7 a 8.5
2	Susceptibilidad baja			5 a 7
1	Susceptibilidad muy baja			Menos de 5

Fig. 5.22 Formato de estimación de la susceptibilidad a caídas para la ladera Del Carmen

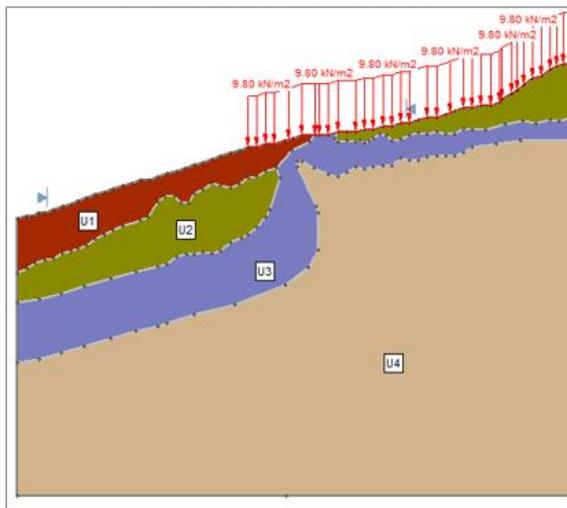
OBTENCIÓN DE PARÁMETROS

CASO DE ESTUDIO. 1 LAS MAROMAS



Unidad	Propiedades índice	Propiedades mecánicas
U1	No elaboradas	No, por comparativa de un material similar en Chimalpa (el otro caso de estudio)
U2	Sí, pruebas de mecánica de suelos en el laboratorio de la Facultad	No, determinadas por teoría
U3	No elaboradas	No, determinadas por teoría

CASO DE ESTUDIO. 2 Col. DEL CARMEN



Unidad	Propiedades índice	Propiedades mecánicas
U1	No elaboradas	Sí, por pruebas de mecánica de suelos en el laboratorio de la Facultad
U2	No, por relación con la unidad 3	No, determinadas por relación con la unidad 3
U3	Sí, por pruebas de mecánica de suelos en el laboratorio de la	Sí, por teoría
U4	No elaboradas	No, determinadas por teoría

Materiales	Grados	
	Suelto	Denso
Arena, granos redondos, uniformes	27.5	34
Arena, granos angulares, bien graduados	33	45
Gravas arenosas	35	50
Arena limosa	27-33	30-34
Limo inorgánico	27-30	30-35

Tomado de: Valores representativos de ϕ para arenas y limos de Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1976). Mecánica de suelos. en la ingeniería práctica.

6. Conclusiones, recomendaciones y discusión

6.1 Discusión

Durante el desarrollo de este trabajo se reafirmó la importancia de adaptar los factores condicionantes para la generación de PRM, tales como la litología, pendiente, drenaje, etc. (y su grado de afectación) para cada lugar geográfico en cuestión, así como para cada mecanismo de inestabilidad. Como se analiza a continuación los mapas no siempre reflejan de la mejor forma las condiciones de un entorno y con ello el cálculo de su susceptibilidad a procesos de remoción en masa. Es por ello que, en este trabajo se propone ampliar la propuesta de CENAPRED para la elaboración de mapas de susceptibilidad a caídas y deslizamientos, que, si bien sirve de guía, resulta insuficiente cuando se trabaja a escalas mayores como en el caso de la alcaldía Cuajimalpa. Esto debido a que engloban grandes rasgos de características en un solo grupo determinado o se omiten otras de alta importancia como lo es el relieve relativo en la generación de caídas. Estos factores son considerados de importancia para las condiciones propias de la alcaldía Cuajimalpa de Morelos dadas las características geológicas y geomorfológicas (principalmente). Sin embargo, todas las variables deben de reconsiderarse y evaluarse para cada zona de estudio, para un área de planicie o de elevaciones sutiles la integración del factor relieve relativo perdería relevancia.

Al realizar una comparativa de los mapas de susceptibilidad a deslizamientos y caídas elaborados como mapas de susceptibilidad finales y los generados con la ponderación establecida por el CENAPRED, se observa las delimitaciones de las zonas susceptibles son burdas y extensas y no existe distinción entre ellas (Fig. 6.1 y 6.2). Así mismo, no precisan zonas puntuales o específicas sino regiones muy amplias. Por el contrario, con los elaborados

con la metodología propuesta en este trabajo, se delimitan con mayor detalle y forma las zonas susceptibles a presentar un deslizamiento y/o caída.

Con base en lo anterior y la evidencia teórica (criterios de distintos autores, mostrados en el Capítulo 3), en este trabajo se consideró la incorporación de factores condicionantes importantes en la generación y delimitación de los PRM para esta zona de estudio. Para ambos casos (susceptibilidad a deslizamientos y caídas) se añadieron las variables de drenaje y relieve relativo con respecto a las variables del CENAPRED, ya que se consideró que estos factores son de suma relevancia en la generación de la inestabilidad de laderas y principalmente en la influencia que tienen en la zona de estudio. De igual forma, los resultados son más próximos a la realidad, más específicos, de mejor resolución y adaptación. Esta mejoría en la calidad de los resultados, no solo contribuye significativamente en la toma de decisiones por parte de las autoridades, ya que se podrán optimizar de manera eficiente los recursos económicos y humanos con los que cuentan para atender de manera oportuna dicha amenaza, sino que también tendrán un impacto social directo. Debido a que son resultados de libre acceso a la población, esto representa información de valor al proporcionar a los habitantes la posibilidad de tomar decisiones consientes sobre los lugares de asentamiento, lo que repercute en la disminución de emplazamientos en lugares de alta susceptibilidad a PRM. Por otra parte, y como se ha mencionado la generación de este fenómeno es multifactorial, por lo cual el trabajo sirve de divulgador sobre esos factores y sus efectos, que en muchas ocasiones son minimizados e incluso ignorados. En conjunto, este trabajo no solo podrá conducir a un mejor ordenamiento territorial, con decisiones conscientes por parte de autoridades y población, sino que también sirve como base para el diseño de un plan de emergencia para la temporada de lluvias (principal agente desencadenante en el área de estudio). Así mismo, contribuye en la generación de programas de mitigación en zonas delimitadas como altamente susceptibles a PRM.

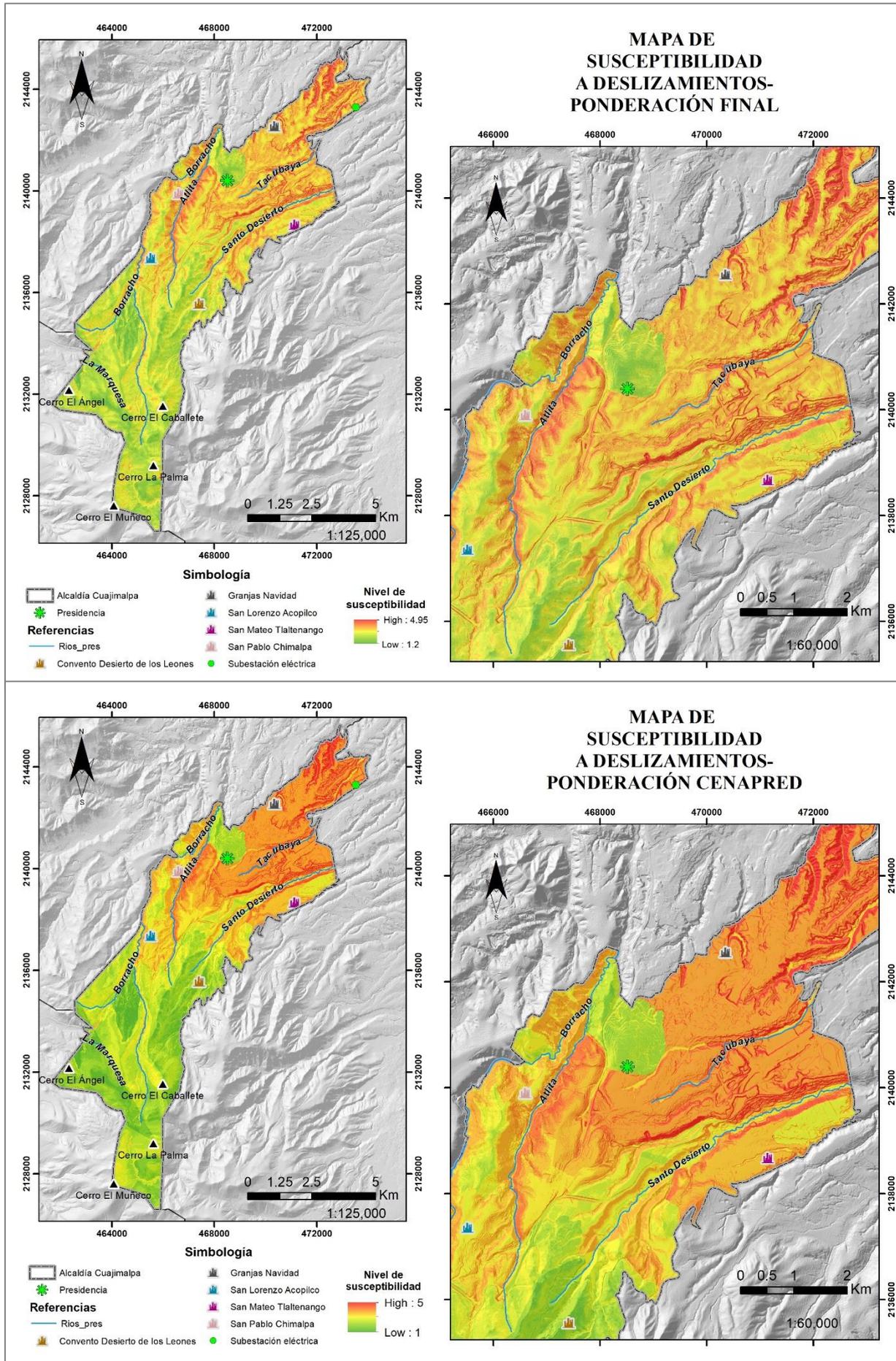


Fig. 6.1 Comparación de mapas de susceptibilidad a deslizamientos en la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos con distintas ponderaciones; arriba el propuesto en este trabajo, debajo el mapa con ponderación propuesta por CENAPRED (Tabla 15).

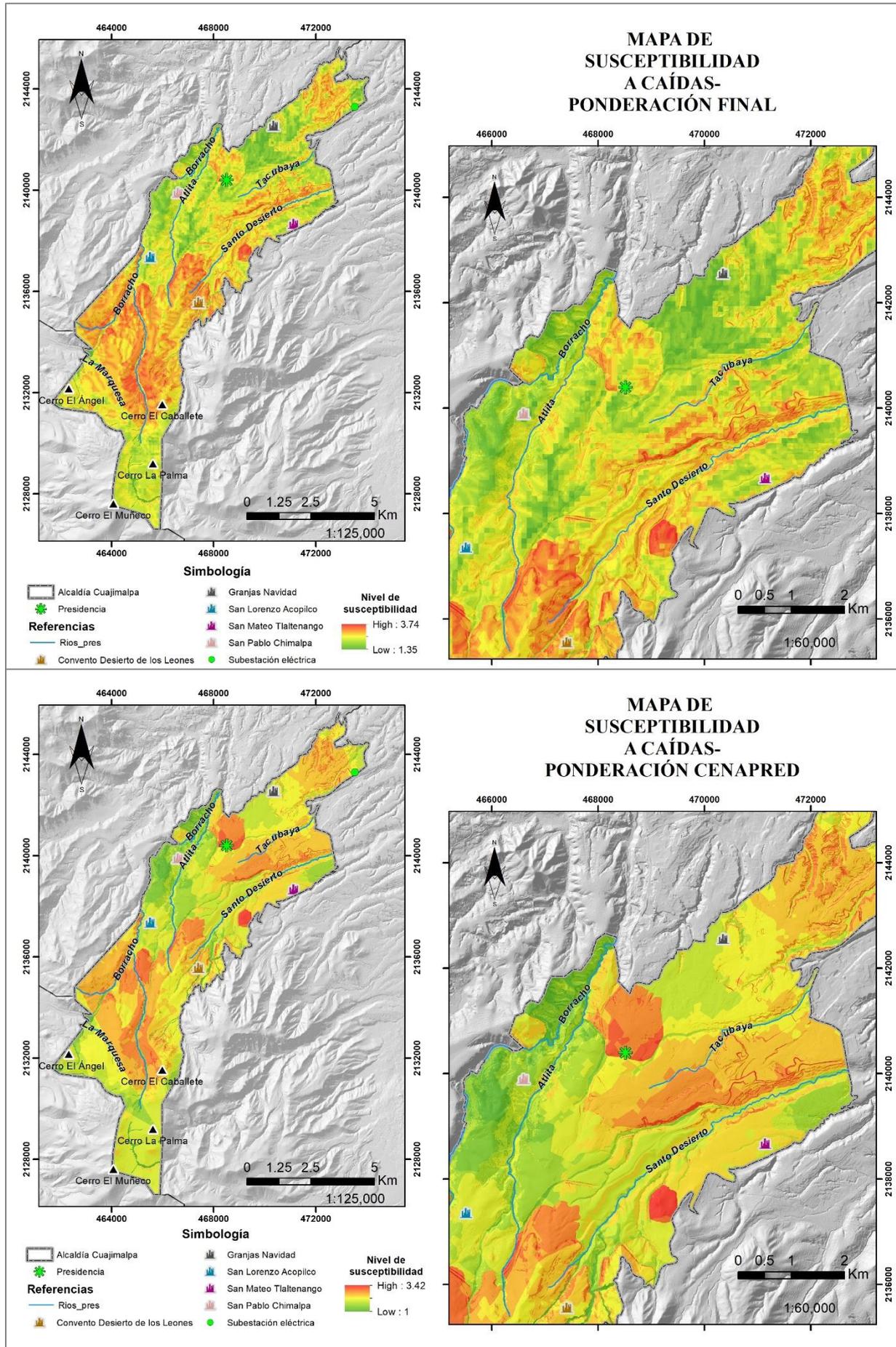


Fig. 6.2 Comparación de mapas de susceptibilidad a caídas en la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos con distintas ponderaciones; arriba el propuesto en este trabajo, debajo el mapa con ponderación propuesta por CENAPRED (Tabla 15).

Fue posible categorizar los grados de susceptibilidad a deslizamientos y caídas en cinco (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto) y cuatro (bajo, medio, alto y muy alto) niveles respectivamente (Tabla 33). De estos la alcaldía presenta una superficie del 32% con susceptibilidad media a presentar deslizamientos y solo 8.94% con un nivel muy bajo (Fig. 6.3). En cambio, para la susceptibilidad a presentar caídas, el porcentaje de la superficie con valores altos es de 42.5% y no existe la susceptibilidad muy baja (Fig. 6.4).

Tabla 33. Porcentajes de nivel de susceptibilidad para deslizamientos y caídas

Clasificación	Porcentaje en mapa de susceptibilidad a deslizamientos	Porcentaje en mapa de susceptibilidad a caídas
Muy bajo	8.94	---
Bajo	23.76	14.303
Medio	32.31	32.41
Alto	23.54	42.513
Muy alto	11.447	10.773



Fig. 6.3 Gráfica de porcentaje por nivel de susceptibilidad a deslizamientos de la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.

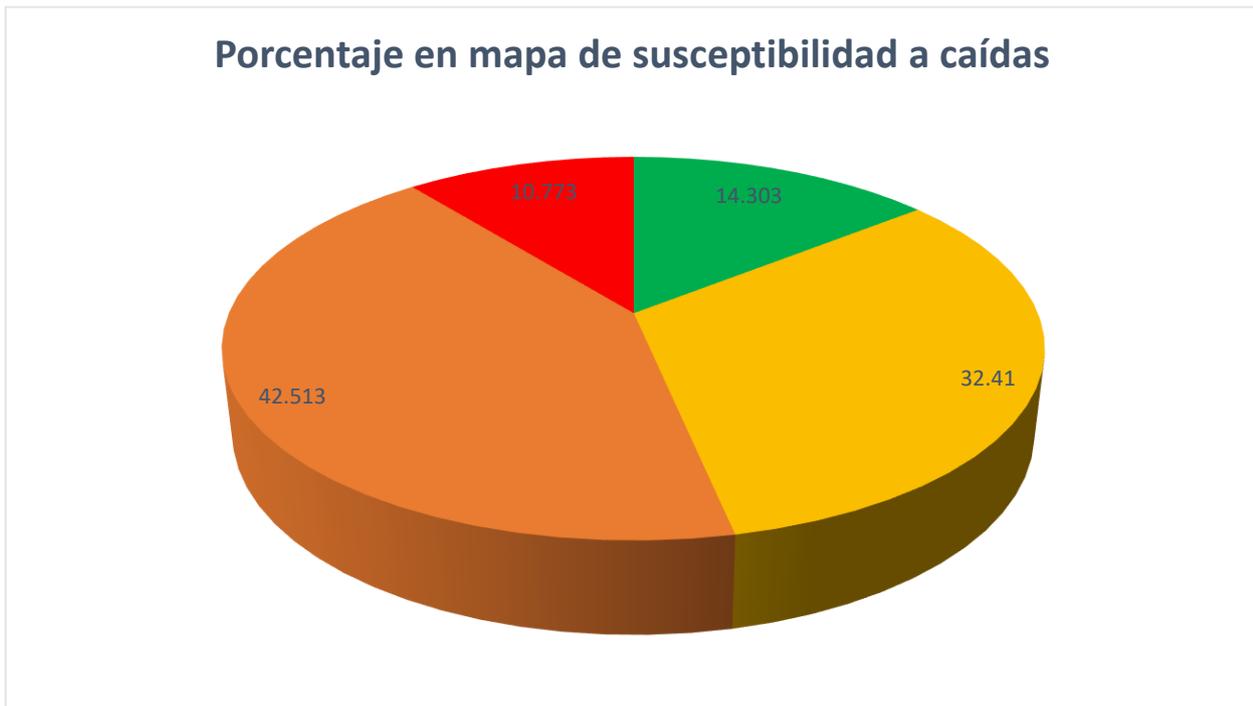


Fig. 6.4 Gráfica de porcentaje por nivel de susceptibilidad a caídas de la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX.

Los mapas finales presentados en el capítulo 4 serán los que se deben tomar a consideración dado que estos resultados son aproximados, sin embargo, dan una representación general y muy cercana a la realidad de los datos.

6.2 Conclusiones

En este trabajo se generaron mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, uno para el mecanismo de deslizamientos superficiales y otro para caídas. Se aplicó un método multicriterio condicionante de ponderación para la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, CDMX. Esto con la finalidad de proveer una herramienta que permita diseñar acciones de prevención y planes de emergencia, así como un adecuado ordenamiento territorial. Como base para la elaboración de estos mapas se generaron mapas temáticos (geológico, pendientes, uso de suelo,

influencia de drenaje, etc.) de los diversos factores condicionantes a los PRM y un mapa de inventario de deslizamientos, a partir de la integración de datos bibliográficos. Por último, se determinó y caracterizó el nivel de peligro por procesos de remoción en masa en las localidades de Las Maromas y Del Carmen en la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos. Con base en lo anterior se concluye que:

- Las zonas de mayor grado de susceptibilidad a deslizamientos dentro de la Alcaldía Cuajimalpa de Morelos son el sector norte y centro, principalmente aquellas superficies donde convergen los escenarios más favorables con variables de mayor peso como la geología y pendiente; coinciden además con los cauces dentro de la demarcación. Esta última característica se extiende para el resto del territorio, donde incluso en zonas de menor susceptibilidad se presenta un aumento en la misma unidad geomorfológica.
- Las zonas de mayor susceptibilidad a deslizamientos coinciden en su mayoría con territorio poblado (suelo urbano y población rural, principalmente) lo que se traduce en alta exposición para la población.
- Para el caso de susceptibilidad a caídas, las áreas de mayor problemática se encuentran en la parte sur de la demarcación, acentuando los escarpes de las laderas ahí ubicadas. Así como el sector norte y las laderas aledañas al Río Santo Desierto. Esto debido a que es en estas zonas, donde se acentúan los lineamientos dentro de Cuajimalpa de Morelos.
- Las superficies de mayor susceptibilidad a caídas convergen para el caso del norte y centro-este de la demarcación con suelo urbano, lo que representa un peligro para las personas que ahí se desarrollan.
- Al comparar los mapas de susceptibilidad a los dos procesos de remoción, se observa que delimitan zonas susceptibles en áreas. en su mayoría, distintas entre sí. Esto puede explicarse porque los diferentes mecanismos de falla que se pueden presentar en un involucran distintas condiciones.

- Las áreas más “críticas” son las laderas ubicadas a los alrededores del Río Santo Desierto y las barrancas en el extremo norte de la demarcación dado que convergen aquí alta susceptibilidad para deslizamientos y caídas.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, no es suficiente contar con una variable desfavorable (o favorable) para realizar afirmaciones sobre la susceptibilidad a ciertos procesos de remoción masa. Debido a que es la interacción de todos los factores que intervienen en un medio lo que los condiciona. Razón por la cual en este trabajo se abarcaron los más recurrentes o de mayor influencia para el área de estudio. En el mapa de susceptibilidad a deslizamientos se observa que no todo el territorio comprendido con litología de lahar tiene el mismo grado de susceptibilidad. Este varía de acuerdo con la presencia (o no) de pendientes abruptas, drenaje, uso de uso, etc.
- Es importante resaltar que los mapas propuestos en este trabajo fueron realizados para dos de los PRM más frecuentes, eso no excluye la susceptibilidad de ocurrencia del resto de los movimientos existentes.
- Puede ocurrir un fenómeno incluso en zonas donde el mapa indica un nivel de susceptibilidad muy bajo- bajo, ya que siempre existe ese potencial de que los factores se conjunten para la generación de un PRM
- La ladera Las Maromas (caso de estudio 1) ha sido considerada una ladera con susceptibilidad muy alta para deslizamientos de suelo, al presentar dos fases de movimientos marcados por dos superficies de deslizamiento. La principal en la parte inferior de la ladera con un factor de seguridad de 1.018. Sin embargo, la generación de ese tipo de deslizamiento detonaría otro en el sector norte, debido a que están interconectados. Por otra parte, para la generación de caídas, la ladera Las Maromas tiene una susceptibilidad baja- muy baja al no contar con una disposición significativa dentro de la ladera para generar bloques susceptibles a descender.

- La ladera Del Carmen (caso de estudio 2) se cataloga con una susceptibilidad alta a deslizamientos de suelo muy superficiales y de susceptibilidad media a deslizamientos de suelo de mayor magnitud. Con respecto a la susceptibilidad a caídas de bloques en cualquiera de sus subtipos (caídas de roca, de detritos y/o suelo), su estimación es baja.

6.3 Recomendaciones

- En el caso de estudio 1 (Las Maromas) se recomienda no aumentar las cargas presentes sobre la ladera, es decir, no continuar con la construcción y/o ampliación de viviendas en el área. De igual forma, evitar la aportación de humedad a la ladera; ya que estos agentes son esencialmente antrópicos (alcantarillado y letrinas) y se encuentran interactuando con la unidad más susceptible a presentar un deslizamiento, es decir, la unidad de suelo.
- Dadas las condiciones urbanas actuales para la ladera Del Carmen (caso de estudio 2) se estima que, si la mancha urbana continúa creciendo y adentrándose a la ladera, la susceptibilidad aumentará lo que puede desencadenar un deslizamiento con una ruptura de mayor profundidad.
- Prevenir la construcción de viviendas y/o comercios en la corona de la ladera, con especial atención en la curvatura de la misma, dados los antecedentes de afectaciones estructurales a las estructuras ante un sismo como resultado de la amplificación de ondas sísmicas.
- Es importante fomentar una cultura de planeación y prevención, principalmente para áreas urbanas, es por ello que mapas como los presentados en este trabajo deben ser tomados en cuenta para la planificación urbana.
- Elementos donde se exprese el reconocimiento del entorno y los peligros presentes en él deben ser difundidos y de fácil acceso entre los pobladores por parte de las autoridades.

- Campañas de concientización sobre los fenómenos de origen natural a la población, ya que en las jornadas de campo se observó que, de forma general, personas desconocen o se creen ajenas a los distintos PRM.
- Actualización constante de base de datos y mapas con el fin de que el producto siempre sea el más acercado a una realidad y con mejores insumos cartográficos y mayor cantidad de variables disponibles.
- Acercamiento con personal de PC por parte de los generadores de información, para su divulgación y explicación, de esta forma ellos pueden ser emisores de información.
- Actualizar los formatos de inestabilidad de laderas CENAPRED, de tal forma que cuenten con mayor facilidad de llenado. Sin embargo, se debe considerar llevarlos a cabo por medio de personal con experiencia o conocimientos sobre el tema (toma de fotos, mediciones, etc.).
- Tener un verdadero conocimiento del contexto geológico/ geotécnico. Si bien al realizar una estimación de susceptibilidad no se resuelve el verdadero “problema” para cada sitio específico, el desconocer el origen de este puede provocar catástrofe. Por ello las medidas a tomar podrían no ser las acertadas o las que mejor se adecuen según sea el caso.
- Los resultados de los casos de estudio pueden servir como apoyo para otros sitios particulares con condiciones similares lo cual se debe realizar de manera sistemática por parte de las autoridades.

Referencias

- Alcántara Ayala, I., (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificación y terminología. *Investigaciones geográficas*, 41, 7-25.
- Allaby, M. (Ed.), (2013). *A Dictionary of Geology and Earth Sciences*. Oxford, UK: (Fourth Ed.) Oxford University Press.
- Bárnes Portillo. (2016). Modelización de lahares y diseño de estructuras de contención en el volcán Popocatepetl (México). (Tesis de Maestría). Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Berry, P, Reid D. (1993). *Mecánica de suelos*. (Santafé de Bogotá, Colombia): McGraw Hill.
- Caballero Miranda. (2012) Rocas Volcanoclásticas. *Ciencias de la Tierra*. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Glosarios especializados, grupo camaleón. Depósitos aluviales (aluviones). Recuperado de: <https://glosarios.servidor-alicante.com/geologia/depositos-aluviales-aluviones>
- Carlos Valerio. (2010). Procesos de Remoción en masa en rocas volcánicas, porción SO de la Cuenca de México. (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Centro de estudios y experimentación de obras públicas, CEDEX, Laboratorio de geotécnia. (s.f.). *Técnicas Geofísicas*
- Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial. (2017). Zonificación Geotécnica, Atlas-CDM. Recuperado el 13 de agosto de 2019 de http://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3Azonificacion_geotecnica#more
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2014). Inestabilidad de laderas. (Segunda versión electrónica). Recuperado de: <https://www.gob.mx/cenapred/documentos/serie-de-fasciculos-inestabilidad-de-laderas>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2019). Síntomas que anteceden la falla de laderas. Conferencia llevada a cabo en el curso “Riesgos hidrometeorológicos y deslizamiento de laderas”. CENAPRED, CDMX.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2001). Portal de Geoinformación, Sistema Nacional de Información sobre biodiversidad. Recuperado el 10 de agosto de 2019 de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Corominas, Jordi. (2000). Tipos de rotura en laderas y taludes. Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de https://www.academia.edu/11425017/Tipos_de_rotura_en_laderas_y_taludes
- Cruden D. M. y D. J. Varnes (1996), 'Landslides types and processes', in Turner, A. K. y R. L. Schuster (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board. Special report 247, National Academy Press, Washington D.C., pp. 36-75.
- De Cserna Zoltan, de la Fuente- Duch Mauricio, Palacios- Nieto Miguel, Triay Leonardo, Mitre-Salazar Luis Miguel, Mota- Palomino Reynaldo. (1988). *Estructura geológica, gravimetría,*

sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México. Instituto de Geología. Boletín 104.

Diccionario de Geotecnia. (online). (2019). Carta de Plasticidad de Casagrande. Recuperado de: <https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/carta-de-plasticidad-de-casagrande/>

Diccionario de geotécnica (online). (2019). Dilatancia. Recuperado el 20 de julio de 2019 de <https://www.diccionario.geotecnia.online/diccionario/dilatancia/>

Estrada Luis. (2013). Apuntes de Prospección Geoeléctrica. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, departamento de geodesia y topografía, Universidad Nacional de Tucuman.

Feria Rodríguez. (2015). Estudio de técnicas electromagnéticas de prospección del subsuelo. (Tesis de Licenciatura). Escuela Politécnica Superior de Barcelona, España.

Gaceta Oficial del Distrito Federal, México, 04 de agosto de 2010. Secretaría de Protección Civil del Gobierno del Distrito Federal. Norma Técnica Complementaria al Reglamento de la Ley de Protección Civil del Distrito Federal NTC-002-SPCDF-PV-2010 que establece los Lineamientos Técnicos para la aprobación, utilización, operación y funcionamiento de instrumentos de alertamiento sísmico en inmuebles del Distrito Federal

Gaceta Oficial del Distrito Federal, México, 22 de octubre de 2013. No. 1717 Tomo II.

Galeandro, A., Doglioni, A., Simeone, V., Simunek, J., 2014. Analysis of infiltration processes into fractured and swelling soils as triggering factors of landslides. *Environmental Earth Sciences* 71: 2911-2923.

García-Palomo A., Zamorano J. J., López-Miguel C., Galván- García A., Valerio V. C., Ortega R., Macías J. L. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 25, p.158-178.

Geografía. (s.f.). La meteorización: Fuentes modificadoras del relieve. Recuperado el 20 de julio de 2019 de <https://lageografia.com/geografia-fisica/meteorizacion-fuerzas-modificadoras-relieve>

Gobierno de la Ciudad de México. Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda. (1997). Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de Cuajimalpa de Morelos (PDDU). Tomo II.

Gómez Tuena A., Orozco- Esquivel Ma., Ferrari L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Tomo LVII, Núm 3, p. 227-283.

González de Vallejo. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson Educación.

Hauser, A. (1993). Remociones en Masa en Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín* 45, Santiago de Chile.

Hauser, A. (1997). Los aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín* 49, Santiago de Chile.

Havenith, H., Torgoev, A., Braun, A., Schlögel, R., Micu, M., (2016). A new classification of earthquake-induced landslide event types based on seismotectonic, topographic, climatic and geologic factors. *Geoenvironmental Disasters* 3:6. Recuperado de: <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0041-1>

- Highland Lynn & Peter Bobrowsky. (2008). *The Landslide Handbook— A Guide to Understanding Landslides*. Recuperado de https://pubs.usgs.gov/circ/1325/pdf/C1325_508.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018) Marco Geoestadístico, diciembre 2018. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/default.html#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI). (1992). Cuaderno de información básico delegacional.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI). (2015). Anuario estadístico y geográfico del Distrito Federal.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI). (2014). Portal, México en cifras.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (s.f). Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Delegación del Distrito Federal, Cuajimalpa de Morelos. Recuperado de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM09DF/delegaciones/09004a.html>
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (s.f). Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Delegación del Distrito Federal, Cuajimalpa de Morelos. Recuperado de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM09DF/delegaciones/09004a.html>
- Juárez Badillo, E., Rico Rodríguez, A. (2012). *Mecánica de suelos 1: Fundamentos de la mecánica de suelos*. (Ciudad de México, México): Limusa.
- Lara, M., Sepúlveda, S. (2008). *Remociones en Masa, Apuntes del Curso del año 2008*. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Legorreta, Jorge. (2013). Los ríos de la ciudad de México: pasado, presente y futuro. *Ciencias* 107-108, julio 2012-febrero 2013, 18-32. [En línea]
- Ley Ambiental del Distrito Federal, Diario Oficial de la Federación, México, 25 de octubre de 1993.
- Marín-Sánchez R. J y Osorio J. P. (2017) Efectos de la vegetación en la estabilidad de laderas: una revisión. *Revista Politécnica*, vol. 13, no. 24, pp. 113-126, 2017.
- Marroquín Guerra, S.G. (2012). Aspectos Generales del análisis químico de materiales geológicos y su aplicación en un estudio de procesos magmáticos (Sierra de las Cruces, Cinturón Volcánico Mexicano). Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Morales Méndez, D. (2018). Evaluación del método multi-criterio para la zonificación de deslizamientos: Huehuetla, Puebla y Metzititlán, Hidalgo. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Morales Ramírez. (2011). Factores de amplificación de ondas sísmicas en cenizas volcánicas. (Tesis de grado). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.
- Obregón Christian y Lara Julio. (2014). Aplicación del mapa de susceptibilidad por procesos de geodinámica superficial a la gestión territorial. *Revista del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*. Vol. 17, N.o 33, pp. 73-80.

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2008). Base referencial mundial del recurso suelo; un marco conceptual para la clasificación, correlación y comunicación internacional.
- Pérez García, et al. (2010). Evaluación de la resistividad en campo y en laboratorio y su aplicación a pavimentos. Secretaría de comunicaciones y transportes. Publicación técnica No. 35
- Polanco Rodríguez. (2001). Prácticas de Laboratorio de Mecánica de Suelos I. Facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Pompa Mena. (2018). III. Rocas de composición intermedia y félsica. Presentación Power Point.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. (2010). Actualización estadístico espacial como fuente de un ordenamiento territorial en la región de la zona sur de la Ciudad de México, en las delegaciones Cuajimalpa de Morelos, Álvaro Obregón, Milpa Alta, Tlalpan y Xochimilco.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. (2010). Ocupación irregular y riesgo socioambiental en barrancas de la Delegación Cuajimalpa de Morelos, Distrito Federal.
- Quintana Berlanga, Álvaro R. y Teixidó Ullod, Teresa. (2013). Aplicación de la tomografía eléctrica en la caracterización del deslizamiento de Doña Mencía (Córdoba). [Diapositivas de PowerPoint]. Universidad de Granada.
- Remondo Tejerina. (2001). Elaboración y validación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante técnicas de análisis espacial (Tesis doctoral). Universidad de Oviedo, España.
- Rodríguez, C.E., Torres, A.T., León, E.A., (2006). Landslide Hazard in El Salvador. Proceedings Geohazards. Engineering Conference International. 1-9. <http://dc.engconfintl.org/geohazards/6>
- Romero Terán, E. (2001). Geología del Complejo Volcánico San Miguel, al sur poniente de la Cuenca de México. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, D.F, México.
- Sarr, D, Hamath Kebe, H. Yasuhara, H. Ababacar Fall, A. y Ndiaye, M. (2019). Instabilities susceptibility assessment of fractured rock masses using geographic information system: application on the sector of Mako (South- Eastern Senegal). International Journal of Geosciences, Vol. 10, pp 995- 1007.
- Secretaría de Desarrollo Social. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2010). Informe Anual Sobre La Situación de Pobreza y Rezago Social, Cuajimalpa de Morelos, D.F.
- Secretaría de la Contraloría General (SCG). (2008). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones. Recuperado el 08 de abril de 2019 de: <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/742.pdf>
- Secretaria de Protección Civil. (2014). Actualización de los Mapas de Riesgo Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, Cuajimalpa de Morelos.
- Suárez Jaime. (2009). Deslizamientos: Análisis Geotécnico. (Santander, Colombia): Universidad Industrial de Santander

- Suárez Jaime. (2014). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. (Santander, Colombia): Universidad Industrial de Santander
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1976). Mecánica de suelos. en la ingeniería práctica.
- The Geological Society. (s.f). Landslide & Slope Instability Geohazards: Classification Schemes – EPOCH. Recuperado de: http://www.ukgeohazards.info/pages/eng_geol/landslide_geohazard/eng_geol_landslides_classification_epoch.htm
- Universidad de Chile. (s.f). Antecedentes teóricos. Chile, pregrado en Ciencias de la Tierra. Extraído de: http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/geo_mod0.pdf
- Universidad de Costa Rica. (2019). ¿Qué es un lahar?. Recuperado de <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/vulcanologia/5204-que-es-un-lahar>
- Valerio Salas. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. Revista UCR, Vol. (1), pág. 14-24.
- Varnes, D.J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., Landslides: Analysis and Control, National Research Council, Washington DC, Transportation Research Board, Special Report 176, National Academy Press, Washington DC.
- Varnes, D.J. (1984) Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice, Natural Hazards. UNESCO, Paris.
- Varnes, D.J., IAEG Commission on Landslides (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. París, Francia: UNESCO.