

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Ciencias de la Tierra**

**Análisis de riesgo por deslizamiento de ladera en el tramo
Arroyo Guadalupe - El Mirador, de la autopista Tijuana-
Ensenada, Baja California**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Gretel Jael Nava Licona

Ensenada, Baja California, México

2016

Tesis defendida por

Gretel Jael Nava Licona

y aprobada por el siguiente Comité

M. en C. Francisco Suárez Vidal
Director del comité

M. en C. Alejandro Hinojosa Corona

Dr. Juan García Abdeslem

Dr. Luis Gustavo Álvarez Sánchez



Dr. Juan García Abdeslem
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Gretel Jael Nava Licona © 2016

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor

Resumen de la tesis que presenta **Gretel Jael Nava Licona** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

Análisis de riesgo por deslizamiento de ladera en el tramo Arroyo Guadalupe – El Mirador, de la autopista Tijuana – Ensenada, Baja California

Resumen aprobado por:

M. en C. Francisco Suárez Vidal
Director de tesis

Se identifican y describen los factores que pudieran propiciar deslizamientos de ladera en la región comprendida entre la desembocadura del Arroyo Guadalupe, en el poblado La Misión, El Mirador de la autopista Escénica (1D) ubicado al Norte de la Ciudad de Ensenada, y la Carretera Federal No.1. Se utilizó una metodología, recomendada por el CENAPRED, para estimar el grado de peligro sobre asentamientos humanos, infraestructura y servicios, empleando para ello fotografías aéreas, ortofotos digitales y modelos digitales de elevación obtenidos a través de nubes de puntos LiDAR. Los resultados alcanzados en este trabajo sugieren que, debido al escaso relieve topográfico y a su basamento volcánico, el peligro asociado a deslizamientos de ladera en la zona de estudio, es en general muy bajo. El máximo grado de peligro es moderado, y está asociado a la presencia de escarpes. Debido a su disposición geográfica todos los sistemas de servicios: vías de comunicación, líneas de conducción de energía eléctrica, el poliducto de PEMEX, los acueductos y el gasoducto Costa Azul cruzan por zonas de peligrosidad moderada. Sin embargo, el poblado La Misión bien podría considerarse bajo amenaza, relacionada con el potencial crecimiento de su zona urbana hacia los escarpes colindantes.

Palabras clave: Deslizamiento de ladera, riesgo geológico, peligro geológico, Sistemas de Información Geográfica, autopista Tijuana-Ensenada.

Abstract of the thesis presented by **Gretel Jael Nava Licona** as a partial requirement to obtain the Master degree in Earth Sciences, with orientation in Environmental Geosciences.

Landslide risk analysis of slope in the stretch Arroyo Guadalupe - El Mirador of the highway Tijuana - Ensenada, Baja California

Abstract approved by:

M. en C. Francisco Suárez Vidal
Thesis Director

Landslide prone factors are identified and described for a region northwest of Ensenada, Baja California delimited to the north by Arroyo Guadalupe, the Pacific coastline to the west, El Mirador on the Scenic Toll Highway (1D) on the south and Federal Highway 1 to the east. A methodology recommended by CENAPRED was used to estimate the danger on settlements and infrastructure using aerial photographs, digital ortophotos and LiDAR derived digital terrain models. The results suggest that the associated danger of landslides is very low for the most of region, due to the low terrain relief and a basaltic substrate. Moderate is the maximum degree of danger and it is associated to the presence of fault scarps in the region. Due to its geographical position all the services systems: roads, electric lines, PEMEX pipeline, aqueducts and the Costa Azul pipelines cross through moderate risk zones. Nevertheless, La Misión town could be considered under threat due to the potential growing of this urban zone to the adjacent escarpments

Keywords: Landslide, geologic risk, geologic hazard, Geographic Information Systems, Tijuana-Ensenada highway.

Dedicatoria

**Con admiración y cariño en memoria del Maestro Francisco Suárez Vidal:
El león de la cueva 129, mi maestro Jedi que ahora es uno con la fuerza.**

...En un páramo de luz,
despojados del dolor
Nos volveremos a encontrar
Al final del infinito
Entre ríos purpura
A la fuente regresar...

Agradecimientos

A la fuerza universal que es todo amor y que nos va poniendo por caminos misteriosos para hacernos cada día mejores y más que nada para hacernos felices.

A mis padres Micaela y Aurelio, a mis hermanos Blanca, Issa y Marco y a mis sobrinos Joshua, Elias y Mikeila por ser mi motor, mi fuerza y mi valor para luchar por mis sueños. Los amo muchísimo.

Con cariño al médico cirujano Elias F. Licona Salinas, por mantenerme sana y viva, en mi frágil condición de ser humano.

Al Consejo Nacional de Ciencia Y Tecnología por hacer posible que con su programa de becas podamos continuar nuestro crecimiento profesional.

Al personal docente, técnico, administrativo, de seguridad e intendencia del Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada, por ser la base de la pirámide del desarrollo científico.

Al Dr. Juan García Abdeslem por su orientación, apoyo y tiempo y sobre todo por ponerme en manos del M. en C. Francisco Suárez Vidal (q.e.p.d.), quien supo alimentar mis ansias de aprendizaje y superación, y a quien le estaré eternamente agradecida por sus enseñanzas no solo académicas, si no de vida.

A Alejandro Hinojosa Corona y Luis Gustavo Álvarez Sánchez, miembros del comité de esta tesis, por el empeño y tiempo invertidos en la revisión de la misma.

A Santiago Alfonso Higareda Cervera, Ismael Villanueva, Jorge Torres Rodríguez, Sergio Vázquez, Guadalupe Morales, Víctor Frías, Ena Gámez, José Mojarro y Elizabeth Aviles Becerril, por su apoyo técnico, así como en la obtención de datos, revisión y procesamiento de la información para que este trabajo pudiera llegar a buen término.

Con especial énfasis a Ramón Mendoza por el apoyo en campo, técnico y en todo momento, por no dejarme sin la luz guía cuando más lo necesité.

A Claudia, Lita, Manuel, Ángel, Omar, Felipe y Saúl por el conocimiento, las lágrimas y carcajadas que hemos compartido y por el apoyo día con día que nos hizo más que compañeros, amigos (¡ustedes me han enseñado tanto!).

Al lunático por su amor, por ser parte de mi inspiración, por los ánimos y la grata compañía, aún a la distancia.

A Romeo, por ser mi loco y tierno acompañante en cada momento desde que nos conocimos ♥.

A todos los que me faltaron y que de alguna forma me dieron ánimos para seguir adelante a pesar de las adversidades del camino.

-“Si la montaña viene a ti... ¡corre es un derrumbe!”-

Tabla de contenido

	<i>Página</i>
Resumen español	ii
Resumen inglés	iii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	vii
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Deslizamientos	
2.1 Factores condicionantes y desencadenantes.....	5
2.2 Tipos de deslizamientos.....	5
2.3 Deslizamientos en la autopista Escénica 1D.....	8
Capítulo 3. Localización y descripción del área de estudio	13
Capítulo 4. Metodología	16
Capítulo 5. Materiales	20
Capítulo 6. Resultados alcanzados	25
Capítulo 7. Discusión	35
Capítulo 8. Conclusiones	37
Lista de referencias bibliográficas	39

Lista de figuras

Figura	Página	
1	<p>a) Localización de la zona de estudio (punto rojo) en la península de Baja California, México. b) El área de estudio (polígono achurado) comprende de la desembocadura del arroyo Guadalupe en el poblado La Misión hasta El Mirador de la autopista Escénica (1D), cerrando el polígono de estudio con los puntos donde limita con la carretera Federal No. 1 (Carretera libre).....</p>	3
2	<p>Tipos de deslizamiento: a) los caídos de rocas o derrumbes obedecen mayoritariamente a pendientes muy fuertes o acantilados, b) los deslizamientos rotacionales y c) traslacionales que definen su ocurrencia por el comportamiento de la superficie de falla del material remanente de una pendiente, d) los flujos o avalanchas que dependen de la saturación del suelo por un fluido y por último la e) reptación, la cual es un movimiento sumamente lento pero persistente de suelo aparentemente sin una superficie de falla bien definida (Modificado de Highland y Bobrowsky, 2008).....</p>	8
3	<p>a) Localización del área en el corredor Tijuana-Ensenada mostrada en el recuadro naranja. b) Localización de la ocurrencia de deslizamientos históricos sobre la autopista Escénica (1D) : 1.- Década de los 40/ km. 90, 2.-Año 1963/ km. 91+300, 3.-Año 1967 (Abril)/ km. 90+200, 4.-Año 1967 (Mayo)/ km. 94, 5.-Año 1969/ km. 95, 6.-Año 1969/ km. 95+300, 7.-Año 1969/ km. 95+450, 8.-Año 1969/km. 88+400, 9.-Año 1976/ km. 98+300, 10.-Año 2013/ km. 93. Se indica la ubicación de la estación climatológica número 2005.....</p>	11
4	<p>a) Promedio diario de vehículos (en miles) agregados por mes que cruzaron por la caseta de San Miguel durante el 2012. El mayor volumen de usuarios fue en el mes de Julio (barra amarilla). b) Los usuarios fueron automovilistas predominantemente y en la clasificación de otros se agruparon los automóviles con remolques (2.2%), motocicletas (0.3%) y otros no clasificados (0.5%).....</p>	12

5	Configuración de una nube de puntos LiDAR, los rebotes de luz son clasificados por su origen, en el terreno o en la superficie (vegetación, infraestructura, etc.). Tomada de LIDAR-America.com.....	20
6	Geología del área de estudio, obtenida de Gastil et., al (1975) e INEGI (2006), incorporando los lineamientos foto interpretados.....	21
7	Modelo digital de elevación de alta resolución LiDAR tipo terreno con resolución de 5 metros por celda (INEGI, 2008).....	22
8	Mapa de pendiente en grados obtenido a partir del modelo digital de elevación.....	23
9	Mapa de lineamientos, obtenido a través de la digitalización de las áreas alrededor de cada lineamiento foto interpretado se muestran en rojo y el valor asignado a sus celdas fue de 1.2, mientras que para el resto del área su valor es cero.....	26
10	Mapa obtenido de la sumatoria de los factores geotécnicos.....	27
11	Mapa topográfico con curvas de nivel, el cuál fue empleado para calcular la diferencia de elevaciones entre piso y techo de los escarpes	29
12	Mapa resultante de la sumatoria de los factores topográficos: pendiente y diferencia de elevación entre piso y techo de los escarpes.....	30
13	Mapa de riesgo por deslizamiento de ladera.....	32

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Velocidad y destructividad de deslizamientos y flujos (Tomada de Mendoza y colaboradores, 2002).....	4
2	Factores geotécnicos (tomada de Suárez, 1998).....	16
3	Factores geomorfológicos y ambientales (tomada de Suárez, 1998).....	17
4	Factores topográficos e históricos (tomada de Suárez, 1998).....	18
5	Clasificación del nivel de peligrosidad (tomada de Suárez, 1998).....	18

Capítulo 1. Introducción

El Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) y el centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) reconocen, dependiendo de su origen, los siguientes riesgos potenciales: hidrometeorológicos, físico químicos, sanitarios, antropogénicos y geológicos. En este último tipo se agrupan: actividad volcánica, sismicidad y fenómenos relacionados con la remoción de masa. Reconoce que particularmente los asociados con fenómenos geológicos son los de mayor impacto debido a su capacidad para causar otros eventos del mismo o diferente tipo.

Estadísticas del Centro de Investigación de la Epidemiología del Desastre (CRED por sus siglas en inglés) muestran que los deslizamientos de tierra son responsables de al menos 17% de las fatalidades causadas por los riesgos de tipo natural en todo el mundo. Sin embargo la frecuencia de su ocurrencia no se encuentra bien documentada, ni tampoco su impacto socioeconómico, el cual está subestimado ya que usualmente su ocurrencia no se separa de otros peligros naturales desencadenantes como precipitación extrema, sismos, etc. (Lacasse y Nadim, 2009). Se convierte entonces en una necesidad el localizar e identificar las zonas geográficas con mayor grado de peligro, para evaluar la vulnerabilidad de los objetos involucrados y optimizar las tareas de mitigación preservando la vida de la población (Escamilla et al., 2011).

En términos cualitativos, se entiende por riesgo la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores. Y puede ser expresado como el producto del peligro por la vulnerabilidad (Rosales et al, 2004; Zepeda-Ramos y Sánchez-Pérez, 2001; Suárez, 1998). El peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad durante un cierto periodo de tiempo en un sitio dado (Cruden y Fell, 1997).

La vulnerabilidad es la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por efecto de un fenómeno perturbador (Zepeda-Ramos y Sánchez-Pérez, 2001).

El objetivo de este trabajo es identificar los posibles factores desencadenantes y tipos de deslizamientos de ladera en la región comprendida entre la desembocadura del Arroyo Guadalupe en el poblado La Misión, hasta El Mirador de la autopista Escénica (Carretera 1D), cerrando el polígono de estudio con los puntos donde limita con la carretera federal No. 1 (Figura 1) para estimar el grado de peligrosidad, integrando los bienes y servicios vulnerables, para visualizar aquellos que se encuentran en mayor riesgo, empleando un Sistema de Información Geográfica para agilizar los procedimientos.

Para alcanzar este objetivos, se empleó la metodología propuesta por Anbalagan (1992) la cual ha sido la elegida por numerosos autores alrededor del mundo (Suárez, 1998; Henao, 2014; Hermelin et al., 2008; Tagliaferro-Singer, 2012; Dai y Fan, 2002; Sharma y Kumar, 2008; por mencionar algunos), siendo además la recomendada por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, como la indicada para evaluar deslizamientos de ladera en México.

Existen trabajos previos para evaluar y definir zonas y grados de peligrosidad por deslizamiento de laderas en tramos del corredor Tijuana- Rosarito-Ensenada (Aragón-Arreola, 1994; Morales, 1995; Montalvo, 1996; Cruz-Castillo y Delgado-Argote, 2000; Gómez-Castillo, 2010). Sin embargo, la zona definida para el presente estudio no ha sido sometida con anterioridad a ningún tipo de análisis por este tipo de fenómeno geológico.

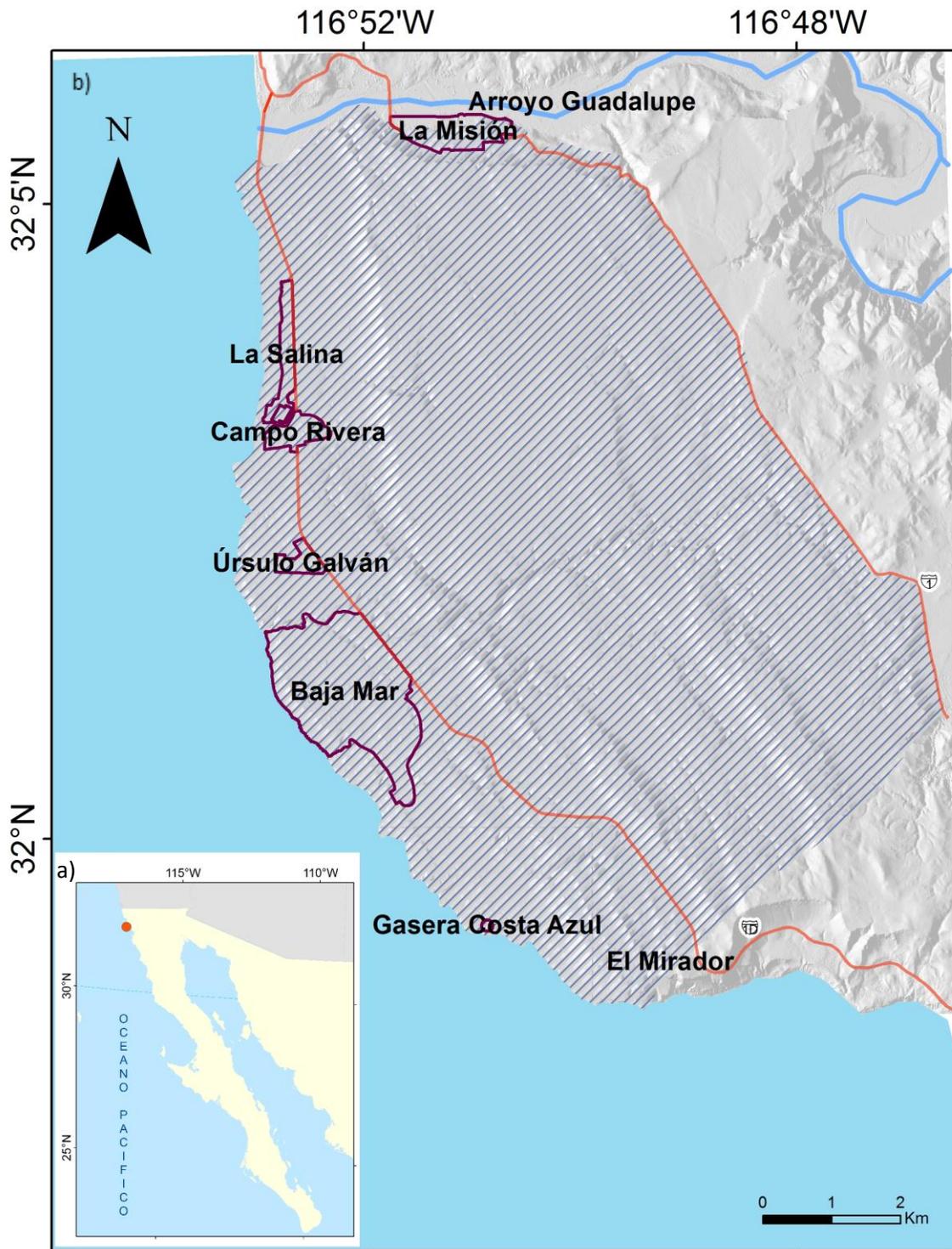


Figura 1.- a) Localización de la zona de estudio (punto rojo) en la península de Baja California, México. b) El área de estudio (polígono achurado) comprende de la desembocadura del arroyo Guadalupe en el poblado La Misión hasta El Mirador de la autopista Escénica (1D), cerrando el polígono de estudio con los puntos donde limita con la carretera Federal No. 1 (Carretera libre).

Capítulo 2. Deslizamientos

Deslizamiento de ladera es un término general que se emplea para designar a los movimientos talud abajo de una masa de roca o sedimentos, que resultan de un desplazamiento hacia abajo y hacia afuera de suelos, rocas y vegetación, bajo la influencia de la gravedad. Estas inestabilidades se caracterizan porque los materiales que componen la masa deslizada se pueden mover por derrumbe o caída, deslizamiento, flujo y desplazamiento lateral. Como puede verse en la Tabla 1, algunos deslizamientos son rápidos porque ocurren en segundos, mientras que otros pueden tomar horas, semanas, meses, o aun lapsos mayores para que se desarrollen (Escamilla et al., 2011).

Tabla 1.- Velocidad y destructividad de deslizamientos y flujos (Tomada de Zepeda-Ramos y Sánchez-Pérez, 2001)

Velocidad	Interpretación de la velocidad	Posible impacto destructivo
	Extremadamente lento	No hay daño a las estructuras construidas con criterios sanos de ingeniería
0.05 a 0.016 m/año	Muy lento	En general, las estructuras edificadas con criterios ingenieriles no sufren daños; y si ocurren, son reparables
	Lento	Carreteras y estructuras bien construidas pueden sobrevivir si se les da el mantenimiento adecuado y constante.
1.5 a 13 m/mes	Moderado	Estructuras bien construidas pueden sobrevivir.
1.5 m/día, a 1.8 m/hora	Rápido.	Posible escape y evacuación. Construcciones y equipo destruidos
0.3 a 3 m/s	Muy rápido	Pérdida de algunas vidas. Gran destrucción.
3 a 5 m/s	Extremadamente rápido	Catástrofe de gran magnitud.

2.1 Factores condicionantes y desencadenantes

En términos generales se puede decir que los factores que propician los problemas de deslizamientos o de inestabilidad de laderas se dividen en internos y externos; y tienen que ver directa o indirectamente con los esfuerzos cortantes actuantes y resistentes que se desarrollan en la potencial superficie de falla o de deslizamiento. En no pocas ocasiones dichos factores se combinan, resultando difícil distinguir la influencia de cada uno de ellos al romperse el equilibrio de una ladera.

Los factores internos están directamente relacionados con el origen y las propiedades de los suelos que componen la ladera, así como por su distribución espacial y, de manera muy particular, por la presencia de agua. Estos factores son:

Propiedades de suelos y rocas, estructuras geológicas y aumento de la presión de agua en la ladera. Este último se encuentra estrechamente ligado con factores externos relacionados hidrológicamente.

Los factores externos son ajenos a la ladera cuya estabilidad es perturbada: lluvias intensas y prolongadas, sismos, actividad volcánica, cargas sobre la ladera y numerosas causas generadas por el hombre (Rosales et al., 2004)

2.2 Tipos de deslizamiento

De acuerdo con diversos autores (Suárez, 1998; Selby, 1988) existen, básicamente, tres tipos de deslizamientos (Figura 2):

1. Los caídos o derrumbes (Figura 2a) son movimientos abruptos de suelos y fragmentos aislados de rocas que se originan en pendientes muy fuertes y acantilados, por lo que el movimiento es prácticamente de caída libre, rodando y rebotando y a su vez, pueden ser clasificados en desprendimientos (caída de suelos producto de la erosión o de bloques rocosos, atendiendo a discontinuidades estructurales proclives a la inestabilidad) o vuelcos o volteos (caída de bloques

rocosos con giro hacia adelante y hacia afuera, propiciado por la presencia de discontinuidades estructurales en posición cercana a la vertical)

2. Los deslizamientos propiamente dichos, que son movimientos de una masa de materiales pendiente abajo, sobre una o varias superficies de falla delimitadas por la masa estable o remanente de una ladera y a su vez se distinguen dos tipos:

Rotacionales (Figura 2b): Deslizamientos en los que su superficie principal de falla resulta cóncava hacia arriba (forma de cuchara o concha), definiendo un movimiento rotacional de la masa inestable de suelos y/o fragmentos de rocas con centro de giro por encima de su centro de gravedad. A menudo estos deslizamientos rotacionales ocurren en suelos arcillosos blandos, aunque también se presentan en formaciones de rocas blandas muy intemperizadas.

Traslacionales (Figura 2c): Deslizamientos en los que la masa de suelos y/o fragmentos de rocas se desplazan hacia afuera y hacia abajo, a lo largo de una superficie de falla más o menos plana, con muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. Usualmente determinan deslizamientos someros en suelos granulares, o bien están definidos por superficies de debilidad en formaciones rocosas, tales como planos de estratificación, juntas y zonas de diferente alteración o meteorización de las rocas, con echado propicio al deslizamiento.

3. Los flujos (Figura 2d), que son considerados movimientos de suelos y/o fragmentos de rocas pendiente abajo de una ladera, en donde sus partículas, granos o fragmentos tienen movimientos relativos dentro de la masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla, Los flujos varían de muy lentos a muy rápidos, así como secos o húmedos. Pueden distinguirse:

Flujos de lodo: Masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo muy rápidamente, y que contiene por lo menos 50% de granos de arena y limo y partículas arcillosas.

Flujos de tierra o suelo: Masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo muy rápidamente, y que contiene por lo menos 50% de granos de grava, arena y limo.

Flujos o avalancha de detritos: Movimiento rápido de una mezcla en donde se combinan suelos sueltos, fragmentos de rocas, y vegetación con aire y agua atrapados, formando una masa viscosa o francamente fluida que fluye pendiente abajo. Creep o flujo muy lento: A diferencia de los casos anteriores, es un movimiento constante pero muy lento de suelos y rocas pendiente abajo, en el que no se define con precisión la superficie de falla.

Lahar: Flujo de suelos o detritos que se origina en las laderas de un volcán, generalmente disparado por sismos, lluvias intensas que erosionan depósitos volcánicos, deshielo repentino por actividad volcánica, o bien por rotura o desbordamiento de represas de agua.

Varnes (1978) menciona sobre esta clasificación el esparcimiento lateral (Figura 2e), en el cual el movimiento dominante es la extensión lateral acomodada por fracturas de corte y tensión. El mecanismo de falla puede incluir elementos no solo de rotación y translación sino también de flujo. Generalmente, los movimientos son complejos y difíciles de caracterizar. Su velocidad de movimiento es por lo general extremadamente lenta. Los esparcimientos laterales pueden ocurrir en masas de roca sobre suelos plásticos y también se forman en suelos finos, como arcillas y limos sensibles que pierden gran parte de su resistencia al remodelarse. Dentro de esta clasificación pueden a su vez dividirse dos tipos:

a) Los movimientos distribuidos en una extensión pero sin una superficie basal bien definida de corte o de flujo plástico. Esto ocurre predominantemente en rocas, especialmente en las crestas de serranías. La mecánica de este movimiento no es bien conocida. Y los movimientos que envuelven fracturas y extensión de roca o suelo, debido a licuefacción o flujo plástico del material subyacente. Las capas superiores pueden hundirse, trasladarse, rotarse, desintegrarse o pueden licuarse y fluir (Suárez, 1998).

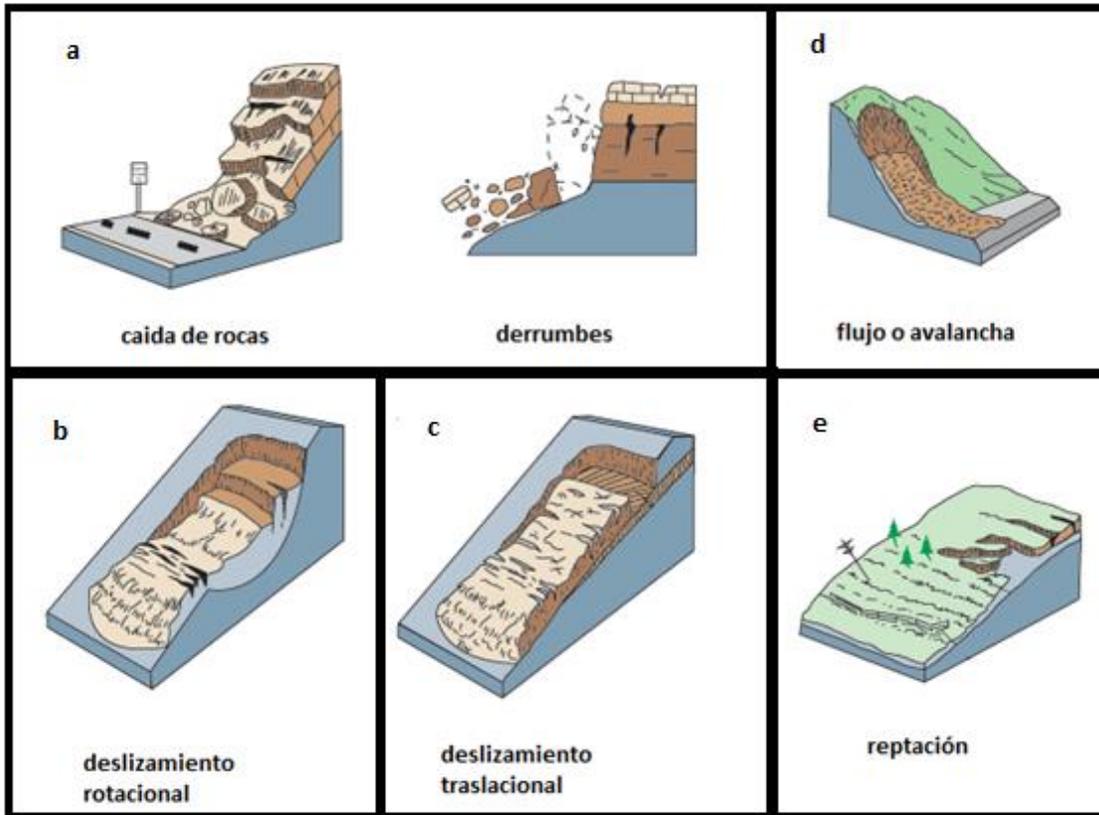


Figura 2.- Tipos de deslizamiento: a) los caídos de rocas o derrumbes obedecen mayoritariamente a pendientes muy fuertes o acantilados, b) los deslizamientos rotacionales y c) traslacionaes que definen su ocurrencia por el comportamiento de la superficie de falla del material remanente de una pendiente, d) los flujos o avalanchas que dependen de la saturación del suelo por un fluido y por último la e) reptación, la cual es un movimiento sumamente lento pero persistente de suelo aparentemente sin una superficie de falla bien definida (Modificado de Highland y Bobrowsky, 2008).

2.3 Deslizamientos en la autopista Escénica (1D)

El proyecto de esta carretera de cuota comenzó en 1961 y fue inaugurada el 25 de abril de 1967 (CAPUFE, 1982). Desde antes de la construcción de este proyecto de infraestructura, en la zona existían antecedentes de movimientos de masa. Los pobladores del área cercana a la actual autopista señalan que en la década de los años 40 ocurrió un deslizamiento súbito en el km 90 (Cruz-Castillo, 1998). A continuación se mencionan de manera cronológica los eventos documentados por deslizamientos de ladera (Figura 3):

Para desplantar la autopista en el km 91+300, se construyó un terraplén de 24 m de altura sobre una falla geológica, que se ubica al pie de un cantil de aproximadamente 60 m de altura. En el año de 1963 se activó una primera masa en este lugar. El evento en este sitio consistió en un movimiento lento de la masa del terraplén y del terreno natural ladera abajo formando en el camino un escalón de 1.80 m de altura, longitud de 80 m y un desplazamiento hacia el mar de más de un metro. Los principales factores que originaron este deslizamiento fueron el peso del terraplén sobre la falla, así como la influencia del agua infiltrada producto de las lluvias (Gómez-Castillo, 2010).

En el km 90+200, desde el comienzo de la construcción de la autopista, se descubrió que existe un deslizamiento doble. La masa deslizante mayor tiene 230 m de longitud por 250 m de ancho y la menor, que se encuentra dentro de la mayor, tiene 115 m de longitud y 100 m de ancho, pero se desplaza a mayor velocidad que la más grande. En abril de 1967 ocurrió un tercer deslizamiento, que se ubicó también dentro del deslizamiento mayor.

Uno de los primeros deslizamientos en presentar evidencia de actividad fue el del km 94, que colapsó súbitamente en mayo de 1967, después de haber presentado movimientos de mediana magnitud. El deslizamiento ocurrió mes y medio después de terminada la temporada de lluvias, cuando la acción del agua infiltrada era muy importante para la estabilidad del terraplén. En esa ocasión, las autoridades decidieron desplazar el trazo de la autopista ladera arriba, debido a la urgencia de ponerla en funcionamiento a la brevedad posible (Rico-Rodríguez et al., 1969).

A principios de 1969 se empezaron a manifestar más movimientos sobre el nuevo trazo, arrastrando el terraplén del camino, a pesar de haber sido construido sobre terreno firme (Gómez-Castillo, 2010).

En el km 95 existe una gran zona inestable de varios deslizamientos asociados a fallas, más específicamente en 95+000, 95+300 y 95+450. Esta zona se detectó cuando al finalizar la carretera comenzó a haber movimientos de baja magnitud. Se

han realizado numerosas obras para tratar de estabilizar el área, entre las principales se mencionan: colocación de líneas de colimación, construcción de una galería filtrante (tipo bóveda), eliminación de varios miles de metros cúbicos de material de la parte superior de los deslizamientos y construcción de una trinchera estabilizadora (Rico-Rodríguez et al., 1969).

En noviembre de 1969 comenzó a manifestarse un evento de deslizamiento en el km 88+400. Este afecta una longitud de aproximadamente 40 metros de la autopista, abarcando el acotamiento y el carril de baja velocidad y se extiende hacia la playa, logrando abrirse hasta una longitud de más de 300 metros, su trazo se pierde en el mar. La superficie afectada por éste deslizamiento es de 4.5 hectáreas (Gómez-Castillo, 2010).

En agosto de 1976, en el km 98+300 ocurrió un gran evento de deslizamiento que destruyó varias casas y empujó un amplio tramo de la carretera hacia el mar, provocando el cierre de la circulación en la carretera por varios meses (Plaza-Flores, 1979). Se sabe que en esta misma fracción de la autopista ocurrió otro deslizamiento importante en el año 1984, pero no está bien documentado.

El 28 de Diciembre de 2013, se presentó en el km 93, un deslizamiento de 30 metros de profundidad por 300 metros de largo. Este fenómeno fue asociado a la naturaleza de la litología del área aunado al paso de vehículos con grandes cargas (Aguado, 2014). Derivado de este suceso la carretera escénica (1D) permaneció cerrada a la circulación, registrándose cuantiosas pérdidas a comercios locales; el flujo vehicular debió desviarse a la carretera libre (Federal No. 1) de solamente dos carriles, provocando caos y accidentes viales. El diario El Economista (Cervantes, 2014) reportó una pérdida diaria de \$750,000, así como la disminución de hasta el 20% de la ocupación hotelera en Ensenada.

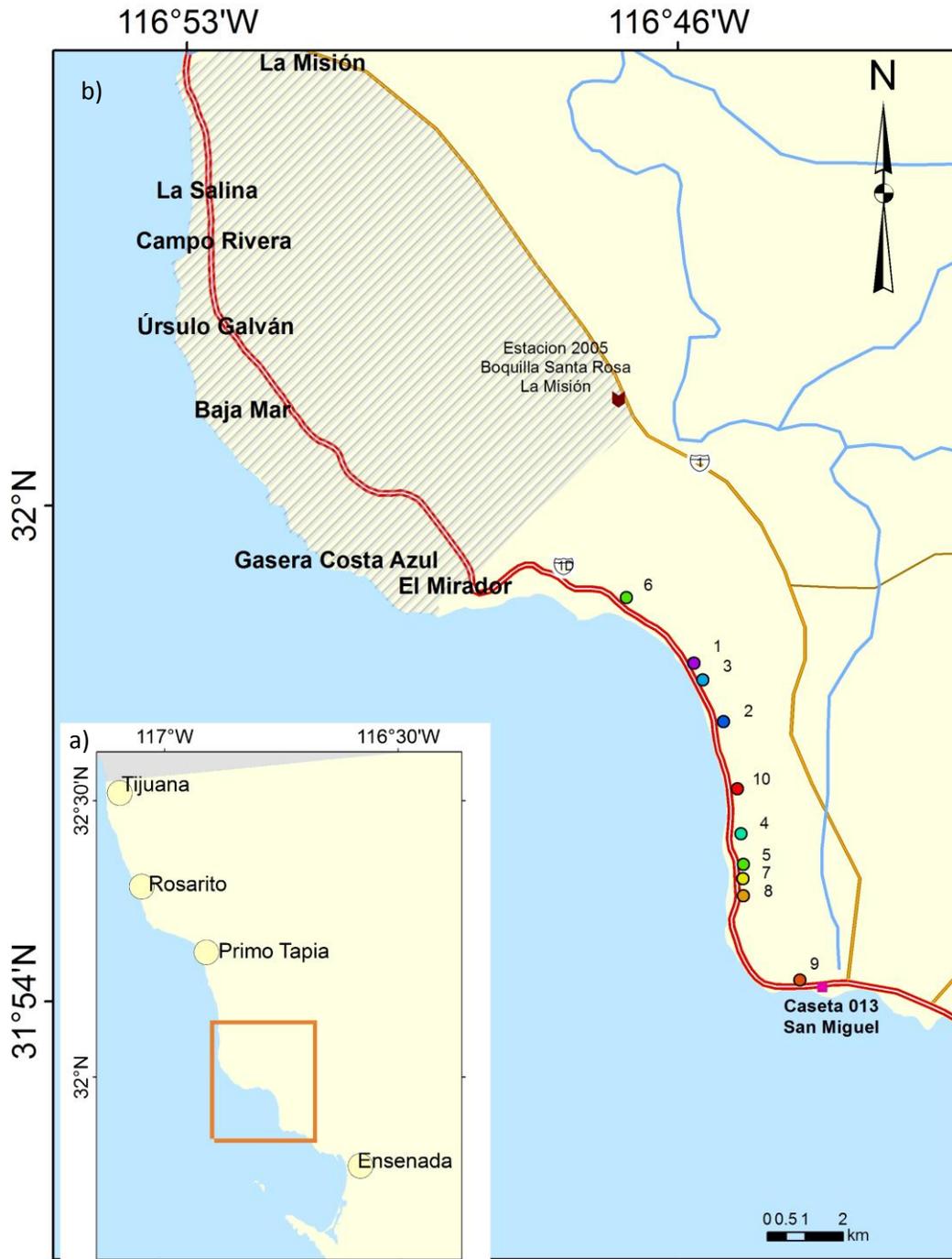


Figura 3.- a) Localización del área en el corredor Tijuana-Ensenada mostrada en el recuadro naranja. b) Localización de la ocurrencia de deslizamientos históricos sobre la autopista Escénica (1D) : 1.-Década de los 40/ km. 90, 2.-Año 1963/ km. 91+300, 3.-Año 1967 (Abril)/ km. 90+200, 4.-Año 1967 (Mayo)/ km. 94, 5.-Año 1969/ km. 95, 6.-Año 1969/ km. 95+300, 7.-Año 1969/ km. 95+450, 8.-Año 1969/km. 88+400, 9.-Año 1976/ km. 98+300, 10.-Año 2013/ km. 93. Se indica la ubicación de la estación climatológica número 2005.

Estadísticas de la caseta de cobro San Miguel 013 Ensenada, Baja California de CAPUFE (ubicación en Figura 3) durante el 2012 (año anterior al último deslizamiento) un volumen total anual de 3'959,375 vehículos registrados, del cual 84.7% fueron automóviles particulares, siendo el mes de julio el de mayor tráfico (Figura 4). Con este dato se puede estimar el efecto que podría generar un nuevo suceso de esta índole.

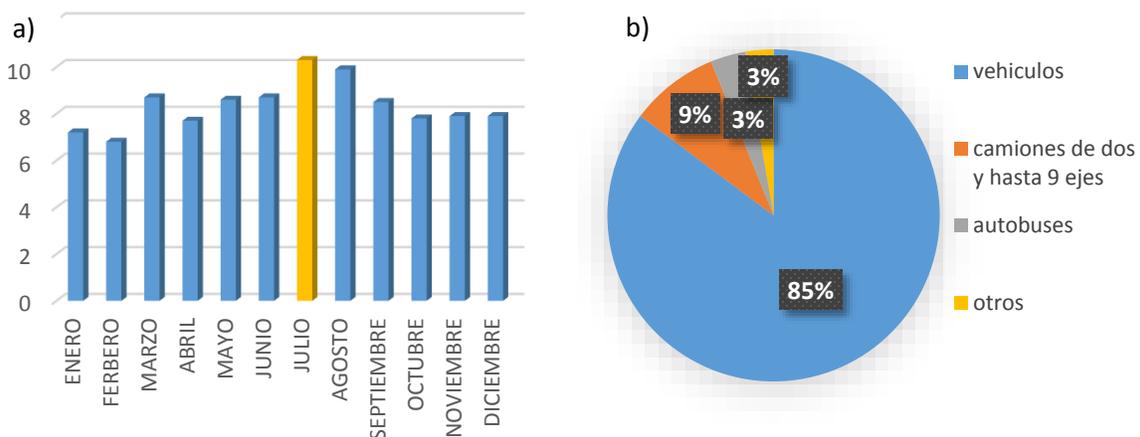


Figura 4.- a) Promedio diario de vehículos (en miles) agregados por mes que cruzaron por la caseta de San Miguel durante el 2012. El mayor volumen de usuarios fue en el mes de Julio (barra amarilla). b) Los usuarios fueron automovilistas predominantemente y en la clasificación de otros se agruparon los automóviles con remolques (2.2%), motocicletas (0.3%) y otros no clasificados (0.5%).

Capítulo 3. Localización y descripción del área de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio de Ensenada, al norte de la ciudad de Ensenada, en la porción comprendida entre la autopista Escénica Tijuana-Ensenada (1D) y la carretera libre Tijuana- Ensenada (Federal No. 1) (Figura 1).

El límite norte de ésta es la desembocadura del arroyo Guadalupe y su límite sur es El Mirador ubicado en el km 84 de la autopista Escénica Tijuana-Ensenada (1D).

En este espacio se encuentran; además del trazo de los cuatro carriles de la autopista Escénica Tijuana-Ensenada (1D), la carretera libre de cuota Tijuana-Ensenada (Federal No. 1), el poblado La Misión, el desarrollo turístico Bajamar, tres localidades rurales reconocidas por el INEGI con los nombre de Úrsulo Galván, Campo Rivera y La Salina, cuyas poblaciones suman 1113 habitantes (INEGI, 2010).

En cuanto a servicios e infraestructura, cruzan de este a oeste en la zona aproximadamente 26 km de líneas eléctricas que proveen de este servicio a La Misión y Bajamar; 14 km de poliducto de PEMEX, 11 km del trazo de un acueducto y 16 kilómetros de gasoducto perteneciente a la empresa Costa Azul.

Según Gastil y colaboradores (1975) y las cartas geológicas elaboradas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2006), la litología que aflora en esta zona es de edad Mioceno-Pleistoceno de la Formación Rosarito Beach, que de acuerdo con Minch (1967) está constituida por intercalaciones de flujos de basalto, rocas piroclásticas y rocas sedimentarias clásticas. (Figura 6).

Esta formación tiene dos cuencas principales: Tijuana y La Misión. La cuenca Tijuana se divide a su vez en 5 miembros; Mira al Mar compuesta por una brecha sedimentaria y el resto de los miembros: Costa Azul, Amado Nervo, Las Glorias y Los Buenos predominantemente basálticos y con intercalaciones de arenisca tobacea y lutita (Gastil et al., 1975). Por su parte la cuenca la Misión agrupa también 5

miembros, los cuales son: Punta Mezquite (que consiste en brechas y tobas), el miembro Medio Camino (compuesto por toba, basalto y arenisca), La Misión (constituido por basalto y toba), Los Indios (formado por toba, depósitos volcanoclásticos no marinos y volcanoclásticos marinos fosilíferos) y El Descanso conformado por conglomerado (Carreño y Smith, 2007).

Uno de los factores más importantes para la ocurrencia de un deslizamiento es la temporada de lluvias o la ocurrencia de lluvias atípicas, es decir, la caída de una cantidad considerable de agua en un periodo corto de tiempo (Crozier, 1999). En zonas de climas especialmente secos o áridos es un factor de peso determinante debido a que los materiales presentes no cuentan con un equilibrio ante la presencia de grandes cantidades de agua (Escamilla et al., 2011)

La región se caracteriza por un clima semiárido y mediterráneo, con un régimen de lluvias invernales que se presentan de noviembre a abril.

En el análisis de 16 estaciones pluviométricas, se puede ver que los meses con mayor precipitación son enero, febrero y marzo y el mes más seco es junio registrándose en promedio 279.6 mm/año (Barradas, 2010).

Se realizó la búsqueda de datos de pluviómetros cercanos instalados en la zona y se recopilaron datos de la Base de datos climatológica nacional (Sistema CLICOM, 2015): 2005 Boquilla Santa Rosa de la Misión-BC (Figura 3) y la cual cuenta con información recabada para el periodo desde 1948 al 2007. Aunque desafortunadamente hay importantes huecos en la información de esta estación, se sabe que la precipitación anual promedio es de 265.6 mm, así mismo, el año con mayor precipitación fue 1983, con una precipitación de 735.8 mm.

Capítulo 4. Metodología

La metodología empleada es la propuesta por Anbalagan (1992), la cual es una evaluación por peligro de deslizamiento basada en un esquema de puntuación de factores. Este esquema es una combinación de experiencias pasadas ganadas del estudio de factores causantes y su impacto en deslizamientos de ladera, con condiciones anticipadas en el área de estudio.

Esta metodología propone un sistema numérico basado mayoritariamente en factores causantes de la inestabilidad de laderas como la geología, la morfología de la ladera, el relieve de la zona, uso de suelo, cobertura vegetal y las condiciones de las aguas subterráneas. Para la representación en mapas de esta metodología no se toman en cuenta los factores de lluvias ni sismicidad. Más recientemente, Suárez (1998) divide los factores a evaluar en tres categorías: Factores geotécnicos, factores topográficos e históricos y factores geomorfológicos y ambientales.

Dentro de los factores geotécnicos (Tabla 2) se evalúan: a) el tipo de roca ya que la respuesta de la roca al intemperismo y erosión dependiendo de su tipo son más vulnerables y menos resistentes, lo cual podría provocar un deslizamiento con mayor facilidad, b) el espesor de la capa de suelo, ya que suelos más viejos suelen encontrarse mejor compactados, en cambio suelos jóvenes se encuentran más sueltos y presentan una resistencia menor, c) la disposición de las discontinuidades estructurales en relación con la inclinación de la ladera, tales como estratificación, foliación, fallas, fracturas o contactos litológicos.

Dentro de los factores geomorfológicos y ambientales (Tabla 3) se evalúan: a) en la morfología de la ladera, dependiendo de la existencia de huecos en las cercanías de la zona a evaluar se pueden observar antecedentes de este comportamiento en la zona. b) la vegetación y uso de suelo es un indicador indirecto de la estabilidad de una ladera.

Tabla 2.- Factores geotécnicos (tomada de Suárez, 1998).

Factores Geotécnicos				
Factor	Intervalos o Categorías		Atributo relativo	Observaciones
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
	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poca a muy intemperizadas		1.2 a 2.0	
	Suelos arcillosos consistentes o areno limosos compactos		0.5 a 1.0	Multiplicar por 1.3 si está agrietado
	Rocas sedimentarias (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	Menos de 5 m	0.5	Revisen cortes y cañadas; o bien, recúrrase a exploración manual
5 a 10 m		1		
10 a 15 m		1.4		
15 a 20 m		1.8		
Aspectos estructurales en formaciones rocosas	Echado de la discontinuidad	Menos de 15°	0.3	Considérese planos de contacto entre formaciones, grietas, juntas y planos de debilidad
		25° a 35°	0.6	
		Más de 45°	0.9	
	Ángulo entre el echado de las discontinuidades y la inclinación del talud	Más de 10°	0.3	Ángulo diferencial positivo, si el echado es mayor que la inclinación del talud
		0° a 10°	0.5	
		0°	0.7	
		0° a -10°	0.8	
	Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo del talud	Más de 30°	0.2	Considerar la dirección de las discontinuidades más representativas
		10° a 20°	0.3	
Menos de 5°		0.5		

***Entiéndase por roca sana a aquella que no muestran signos de alteración.**

Si la vegetación ha sido removida o es pobre, la ladera se encontrará expuesta a una erosión mayor y más rápida. Las zonas de cultivo, suelen ser aquellas de menor pendiente y como se les suministra una carga de agua regular suelen desarrollar suelos y raíces que pueden hacer estable a la pendiente, y c) las aguas subterráneas al distribuirse en terrenos montañosos suelen desarrollar canales en las discontinuidades de las rocas. Este tipo de patrones es difícil de analizar para zonas amplias, por lo que se propone la observación del comportamiento de la zona como una alternativa, determinado si el terreno es más seco o más pantanoso.

Tabla 3.- Factores geomorfológicos y ambientales (tomada de Suárez, 1998).

<u>Factores geomorfológicos y Ambientales</u>			
Factor	Intervalos o Categorías	Atributo relativo	Observaciones
Evidencias geomorfológicas de "huecos" en laderas contiguas	Inexistentes	0	Formas de conchas o de embudos (flujos)
	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 en la cima
	Cultivos anuales	1.5	
	Vegetación intensa	0	
	Vegetación moderada	0.8	
	Área deforestada	2	
Aguas subterráneas	inundable	1	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud
	pantanosos	0.8	
	muy húmedo	0.5	
	húmedo	0.2	
	seco	0	

Por último, dentro de los factores topográficos e históricos (Tabla 4) se evalúa: a) la inclinación de los taludes que se divide en tres categorías de acuerdo al ángulo en grados que presente, b) la diferencia de elevación entre la base y el techo del escarpe y c) la existencia de antecedentes históricos de deslizamientos en la zona.

Suárez (1998) aportó a esta metodología, además de la separación en tres apartados de la tabla original: la evaluación de huecos en las laderas contiguas y la existencia de antecedentes históricos de deslizamientos en la zona.

Tabla 4.- Factores topográficos e históricos (tomada de Suárez, 1998).

Factores Topográficos e históricos			
Factor	Intervalos o Categorías	Atributo relativo	Observaciones
Inclinación de los taludes	Más de 45°	2	Estimar el valor medio
	35° a 45°	1.8	
	25° a 35°	1.4	
Altura	Menos de 50 m	0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Úsense nivelaciones, planos o cartas topográficas
	50 a 100 m	1.2	
	100 a 200	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
	Algunos someros	0.4	
	Sí, incluso con fechas	0.6	

Posteriormente por medio de la sumatoria total se puede dar a cada una de las zonas evaluadas un rango de peligrosidad conforme a lo mostrado en la Tabla 5.

Tabla 5.- Clasificación del nivel de peligrosidad (tomada de Suárez, 1998).

Grado	Descripción	Suma de las calificaciones
5	Amenaza muy alta	7.5
4	Amenaza alta	6.1 a 7.5
3	Amenaza moderada	5.1 a 6.0
2	Amenaza baja	3.5 a 5.0
1	Amenaza muy baja	3.5

Capítulo 5. Materiales

Los materiales empleados en este trabajo se dividen en tres tipos: primero los datos o insumos con los que se partió, después las herramientas con las que se les aplicó cierto tratamiento a los datos o insumos originales y por último los productos de ese tratamiento que fueron los empleados para la obtención de los resultados de la metodología con la cual se pudo llegar a los objetivos iniciales.

- A) Datos: Para realizar este trabajo se utilizaron diversos insumos generados por el INEGI, que abarcan el área de estudio: 1) fotografías aéreas a color que fueron tomadas entre los años 1972 y 1973, con las que se pudieron formar ocho pares estereográficos a escala ~ 1:25,000, 2) ortofotos digitales en blanco y negro (H11B11b, I11D81e) con las cuales se armó un mosaico escala 1:20,000, y 3) modelos digitales tipo terreno (INEGI,2008), obtenidos a partir de nubes de puntos LiDAR (Light Detection And Ranging, por sus siglas en inglés). Se utilizaron los cuadrantes H11B11b1, H11b11b2, I11D81e1, I11D81e2, I11D81e3 e I11D81e4 escala 1:10,000.

Las nubes de puntos son un registro de las elevaciones existentes sobre el nivel del mar con un sistema activo de rayos láser que emite un haz de luz sobre la superficie terrestre (pulsos) para luego recoger sus reflejos, también denominados retornos o rebotes (Figura 5). Posteriormente la nube de puntos es ajustada al terreno mediante procesos geodésicos, de la que se seleccionan aquellos puntos que corresponden únicamente al terreno, generando una nube de puntos clasificada a la que se le aplica una interpolación a los puntos clasificados del último retorno y habiendo eliminado aquellos puntos que no pertenecen al terreno como los reflejados por infraestructura, vegetación y objetos aéreos como nubes o pájaros, de esta manera se puede generar un modelo digital de elevación de tipo terreno con una resolución horizontal de 5 m (Figura 7).

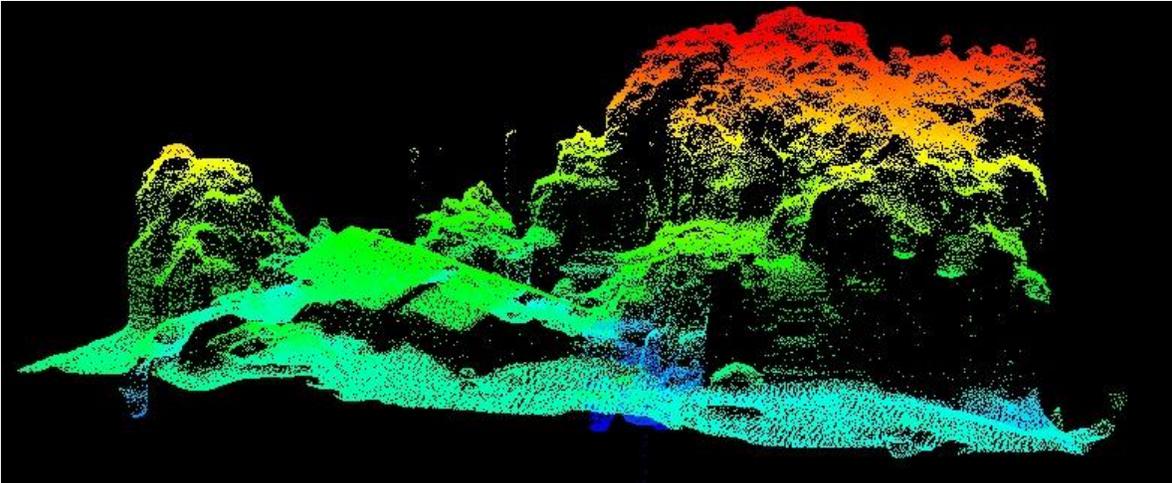


Figura 5.- Configuración de una nube de puntos LiDAR, los rebotes de luz son clasificados por su origen, en el terreno o en la superficie (vegetación, infraestructura, etc.). Tomada de LIDAR-America.com

- b) Herramientas: Se empleó un estereoscopio de espejos para la fotointerpretación de los pares estereográficos. El reconocimiento de campo se empleó como una herramienta para validar la litología y dejar en claro detalles como el predominio del uso del suelo, vías de acceso, infraestructura de sistemas vulnerables en el área, etc. Sin embargo, la herramienta principal para el procesamiento de los datos es el software de arcGIS, ArcMap 10.2.2 mediante el cual se realizaron digitalizaciones, conversiones y cálculos digitales. También mediante la herramienta *raster calculator* se sumaron las celdas de los productos citados a continuación, para obtener el mapa de riesgos.
- c) Productos: Empleando los datos por medio de las herramientas se obtuvieron los mapas digitales de la geología (Figura 6), el modelo digital de elevación se obtuvo del levantamiento LIDAR del terreno del cual se desprendieron el mapa de pendientes (Figura 8) y el que permitió realizar el cálculo y la digitalización del mapa de diferencia de elevaciones en las zonas de escarpes.

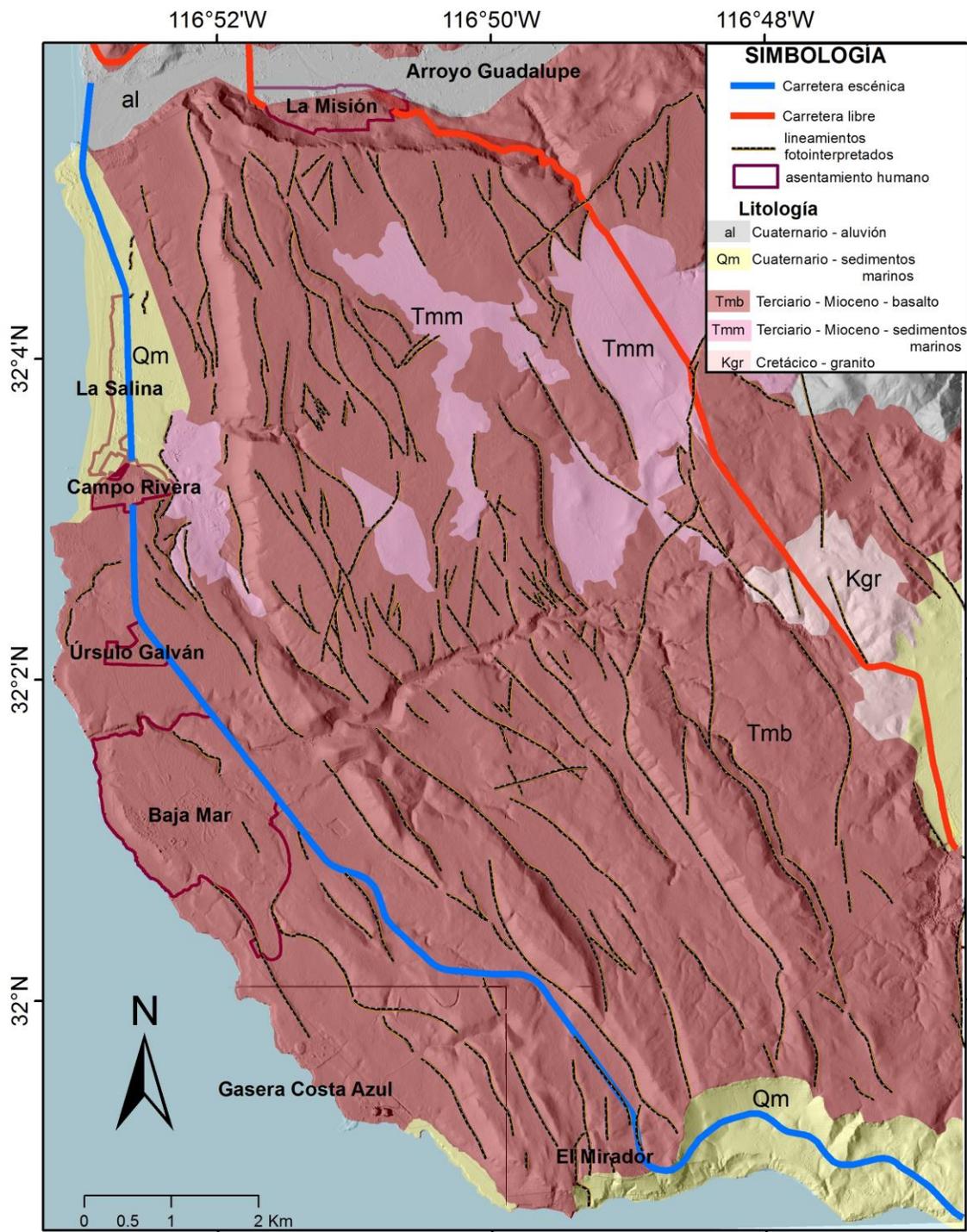


Figura 6.- Geología del área de estudio, tomada de Gastil et al., (1975) e INEGI (2006), incorporando los lineamientos fotointerpretados.

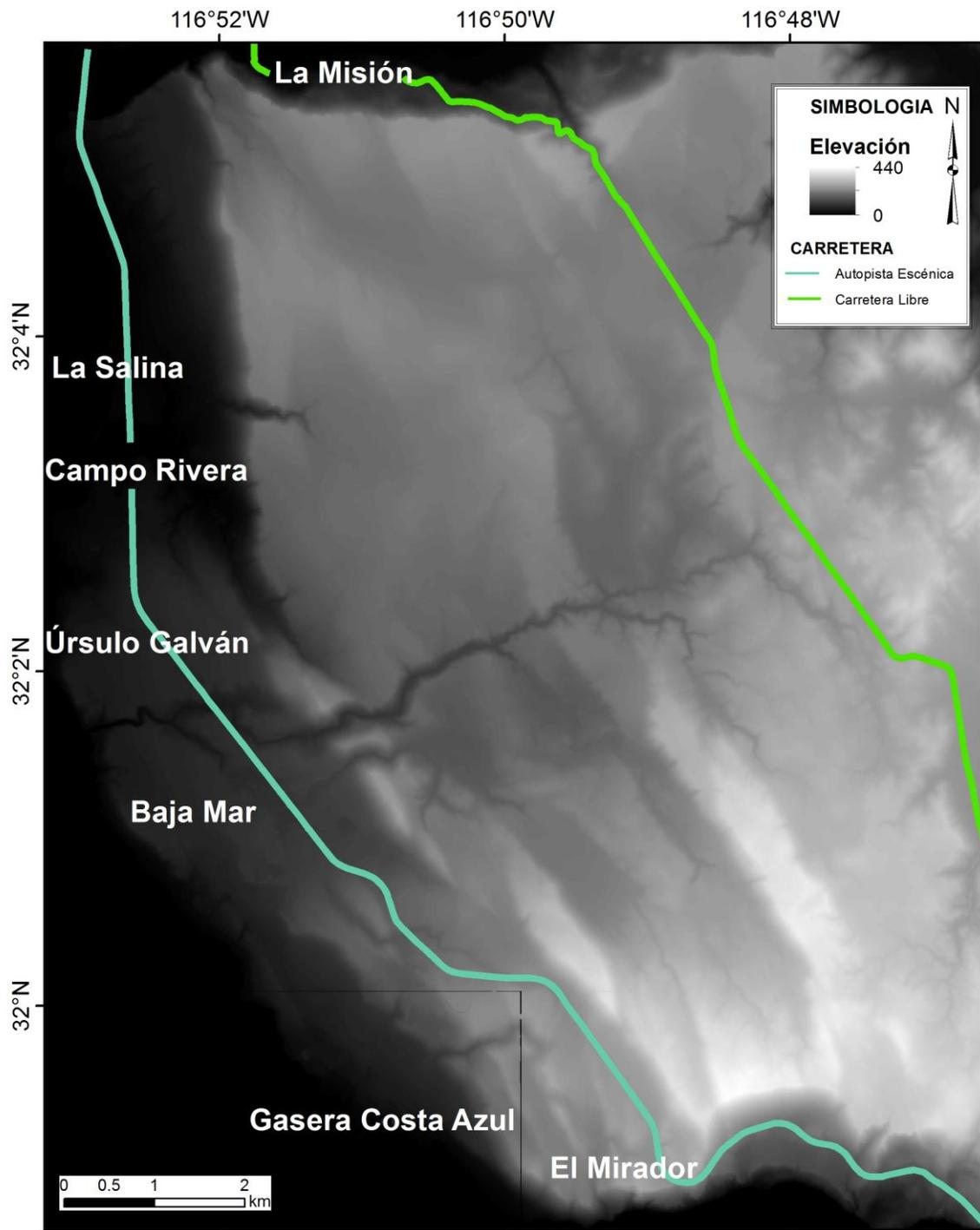


Figura 7.- Modelo digital de elevación de alta resolución LiDAR tipo terreno con resolución de 5 m por celda (INEGI, 2008).

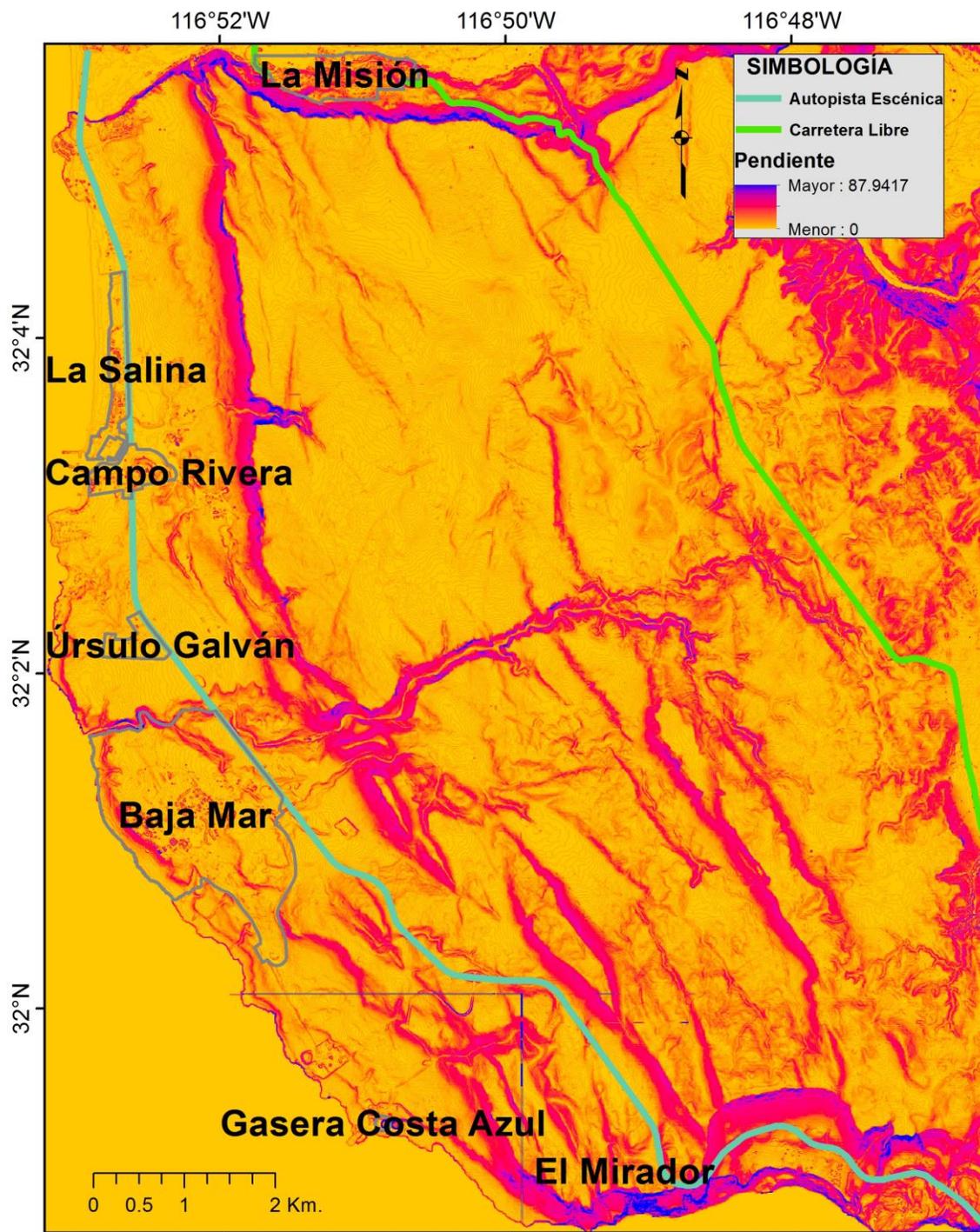


Figura 8.- Mapa de pendientes en grados obtenido a partir del modelo digital de elevación.

Capítulo 6. Resultados alcanzados

Partiendo de la metodología de Anbalagan (1992) que puede resumirse de la siguiente manera:

$$NP = FT + FG + FA$$

Donde:

NP= Nivel o grado de Peligrosidad

FT= Valor de la sumatoria de cada atributo relativo de los factores topográficos e históricos

FG= Valor de la sumatoria de cada atributo relativo de los factores geotécnicos

FA= Valor de la sumatoria de cada atributo relativo de los factores geomorfológicos y ambientales

Se realizó un análisis de los factores en las diferentes áreas de la zona de estudio, se utilizó el SIG Arcmap 10.2.2 para la digitalización y conversión de las capas, realizando las proyecciones, reclasificaciones y asignaciones correspondientes a cada celda en cada una de ellas.

En el apartado de factores geotécnicos, se tomaron en cuenta el factor de tipos de rocas y la igualdad de los ángulos del rumbo y echado de las discontinuidades y de los escarpes que forman las discontinuidades en la zona de estudio.

El espesor de la capa de suelo se tomó como un valor constante de menos de 5 m, por lo que no fue sumado, mientras que el factor echado de la discontinuidad tampoco fue sumado por desconocerse la relación del mismo con el ángulo del echado de los escarpes.

En cuanto al tipo de roca los puntajes correspondientes asignados de la siguiente forma: sitios donde la roca es ígnea (se considera roca sana ya que se desconoce el grado de fracturamiento y espesor de la capa) se le dio un puntaje de 0.3, mientras que para los sitios con depósitos sedimentarios el valor es de 0.5.

El índice espacial de peligrosidad se obtiene al ir sumando las celdas de los diferentes factores (mapas) que lo integran: la geología (Figura 6) más los valores de los lineamientos obtenidos de la fotointerpretación alrededor de los cuales se trazaron polígonos a 10 m a cada lado del lineamiento (Figura 9). Este resultado se presenta en la Figura 10.

En la Figura 9 es posible apreciar que los escarpes de las mesetas coinciden en casi todos los casos con la presencia de un lineamiento fotointerpretado, igualándose de esta manera el ángulo de sus rumbos.

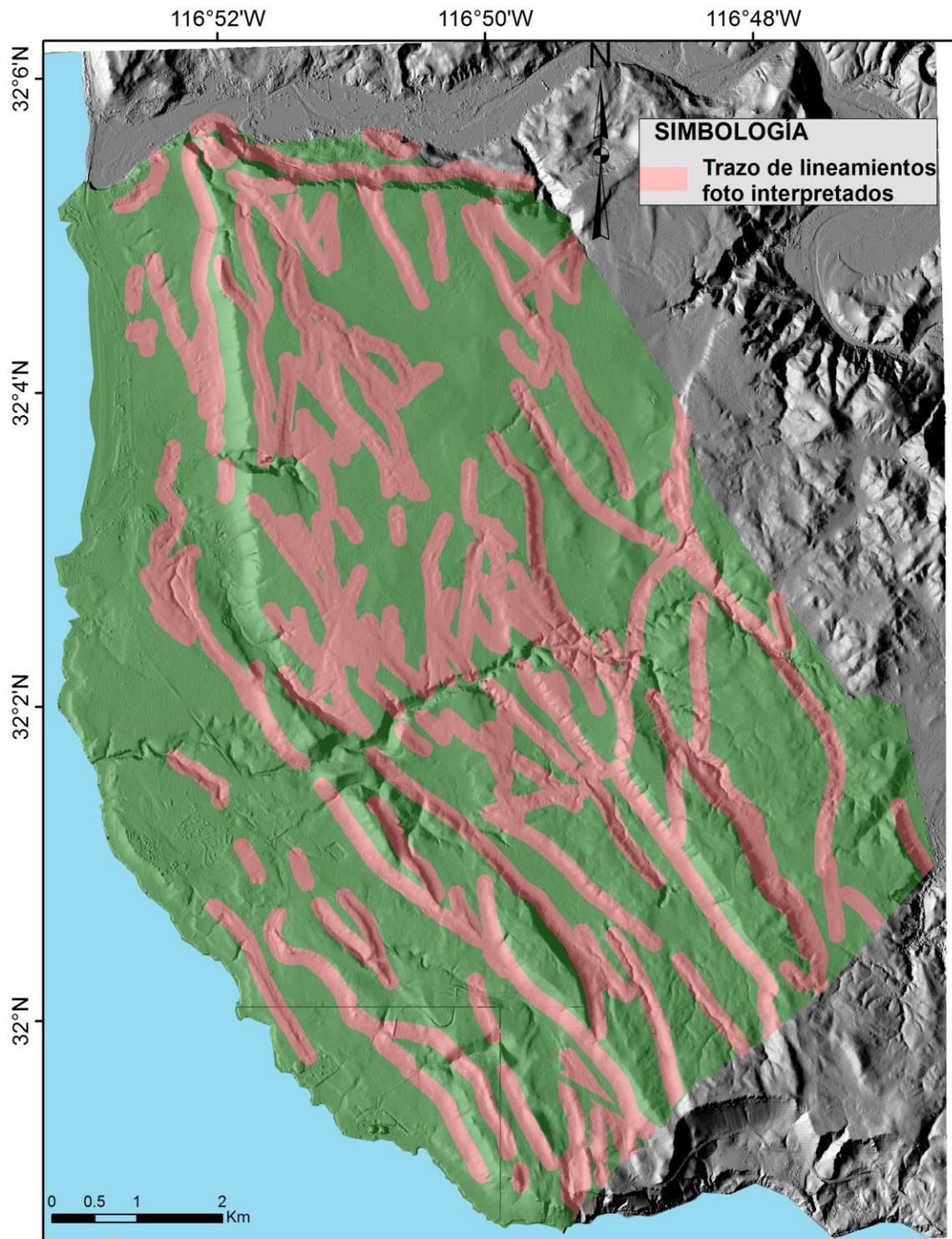


Figura 9.- Mapa de lineamientos, obtenido a través de la digitalización de las áreas alrededor de cada lineamiento fotointerpretado se muestran en rojo y el valor asignado a sus celdas fue de 1.2, mientras que para el resto del área su valor es cero.

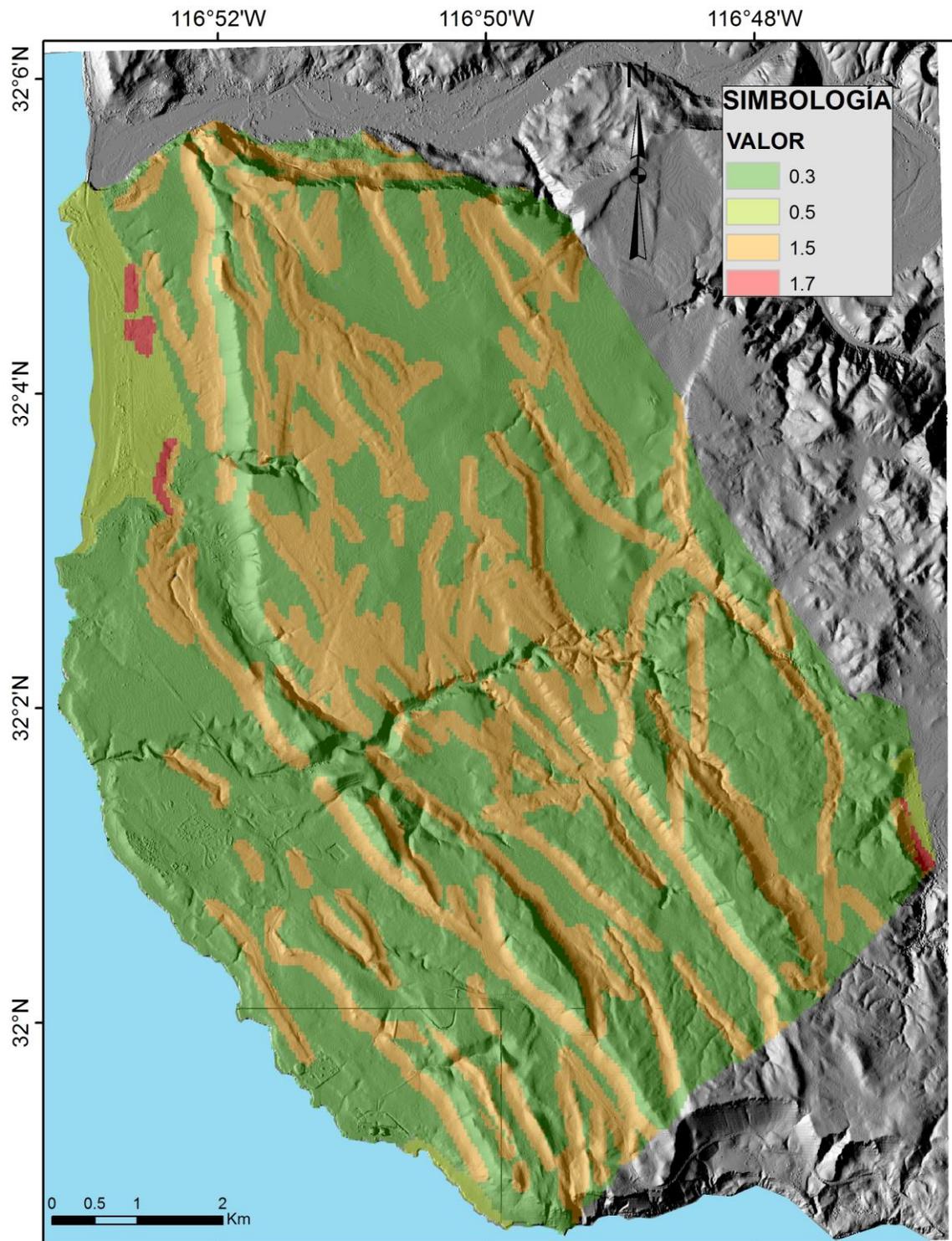


Figura 10.- Mapa obtenido de la sumatoria de los factores geotécnicos.

Entre los factores topográficos e históricos, se consideró que la inclinación de los taludes y la diferencia de elevaciones entre pisos y techos de los escarpe son dos factores que deben considerarse durante la sumatoria de capas aplicadas a un SIG. Sin embargo, el factor antecedentes de deslizamiento en el sitio, fue eliminado de la sumatoria por considerarse constante para cada celda del mapa resultante.

Los valores asignados en el factor de inclinación de taludes varía de la siguiente forma: un valor de 0.5 para los sitios con pendientes menores y hasta 15° , un valor de 1.0 para las pendientes de 16° y hasta 25° , 1.4 para las pendientes entre 26° y 35° y finalmente un valor de 1.8 puntos para las pendientes entre 36° y 45° (Figura 8).

El puntaje asignado para cada celda conforme a la diferencia de elevaciones de cada escarpe es de 0.6 puntos para aquellas diferencias de menos de 50 m, de 1.2 para las de entre 51 y hasta 100 m y de 1.6 para las elevaciones con diferencias de entre 101 y hasta 200 m (Figura 11).

Como existen antecedentes de deslizamientos regionales documentados (aunque en el área no existe ninguno), se toma como un valor constante de cero para todas las celdas.

Una vez más, la sumatoria de estos factores está representada por la suma de las matrices de celdas de los mapas de las figuras 5 y 8. El resultado fue el mapa de la Figura 12.

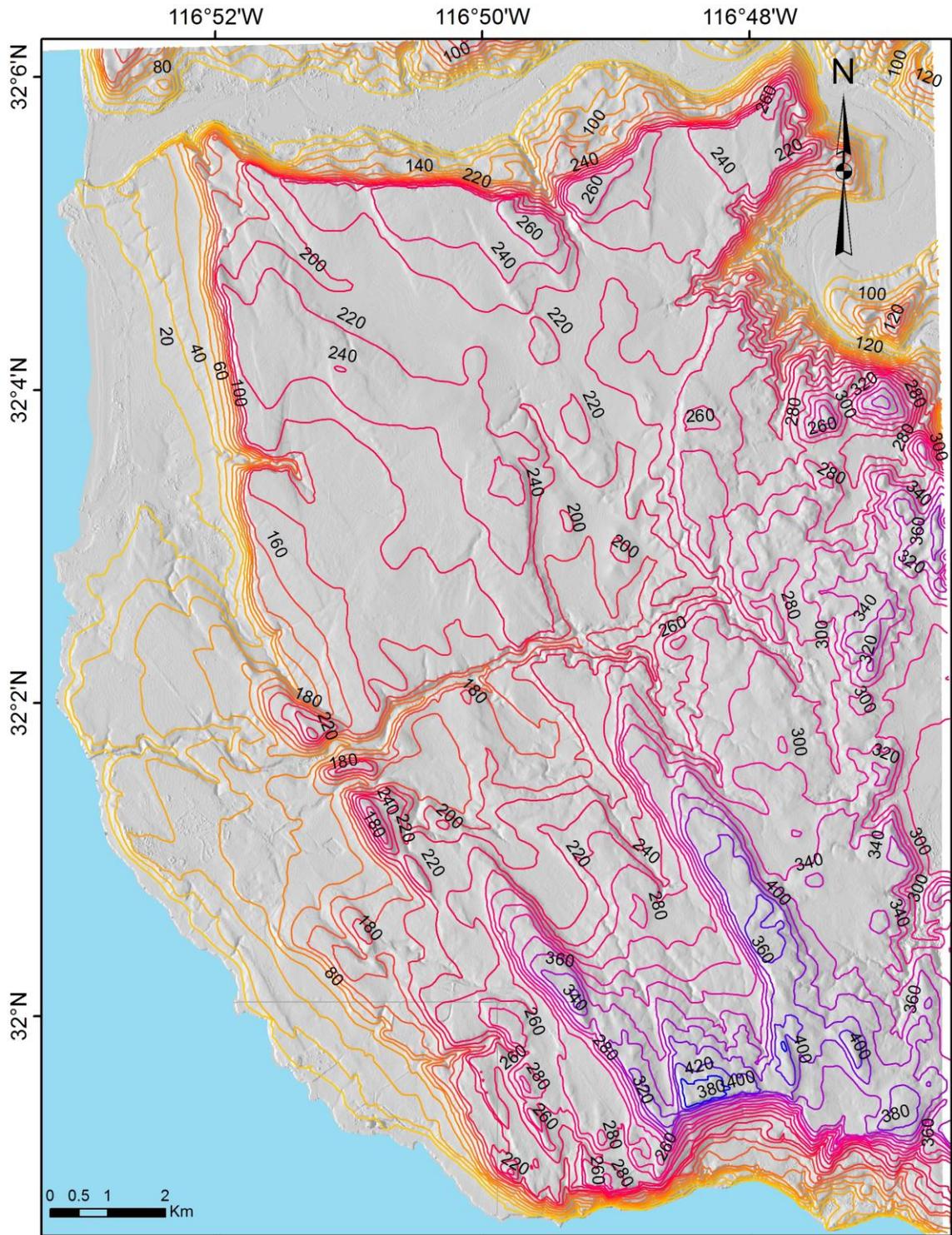


Figura 11.- Mapa topográfico con curvas de nivel, el cuál fue empleado para calcular la diferencia de elevaciones entre piso y techo de los escarpes.

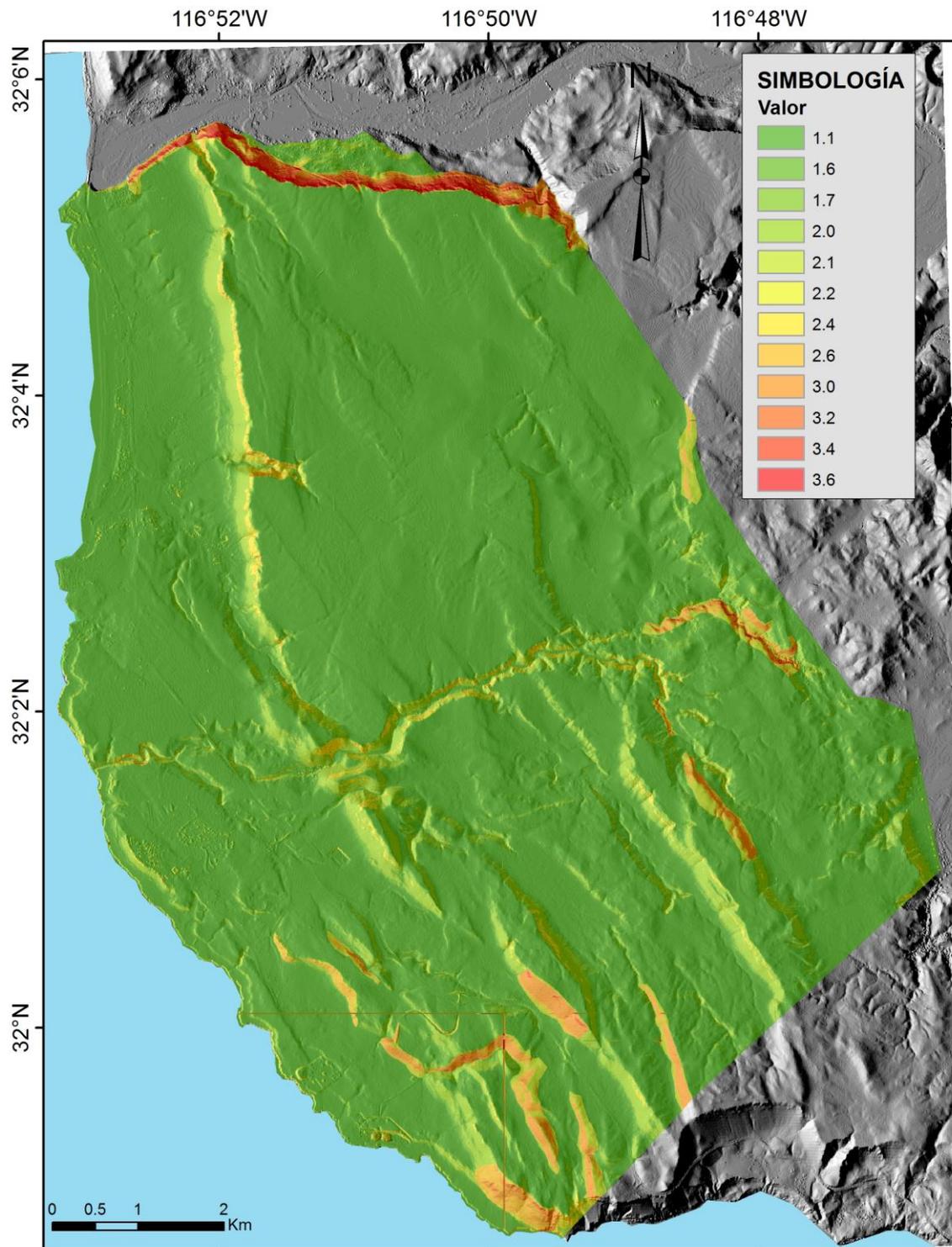


Figura 12.- Mapa resultante de la sumatoria de los factores topográficos: pendiente y diferencia de elevación entre piso y techo de los escarpes.

Los factores geomorfológicos y ambientales no fueron tomados en cuenta en la sumatoria de capas debido a que todas ellas tenían un valor constante de cero por ser una zona con evidencias de huecos en laderas contiguas inexistentes, tierra cubierta de vegetación intensa y ser un área dominada por un régimen seco.

Finalmente, se sumaron los mapas 10 y 12 por medio de la herramienta *raster calculator* de ArcMap 10.2.2 de Esri. Si se revisan los valores numéricos obtenidos en la suma de celdas del mapa de peligrosidad, el puntaje mayor en una celda es de 5.1 lo cual, contrastándolo con los puntajes de nivel de peligrosidad propuestos para la metodología utilizada ubica el grado de peligrosidad más alto como moderado (Tabla 5) es decir, que solo existen zonas de muy baja, baja y moderada peligrosidad (Figura 13).

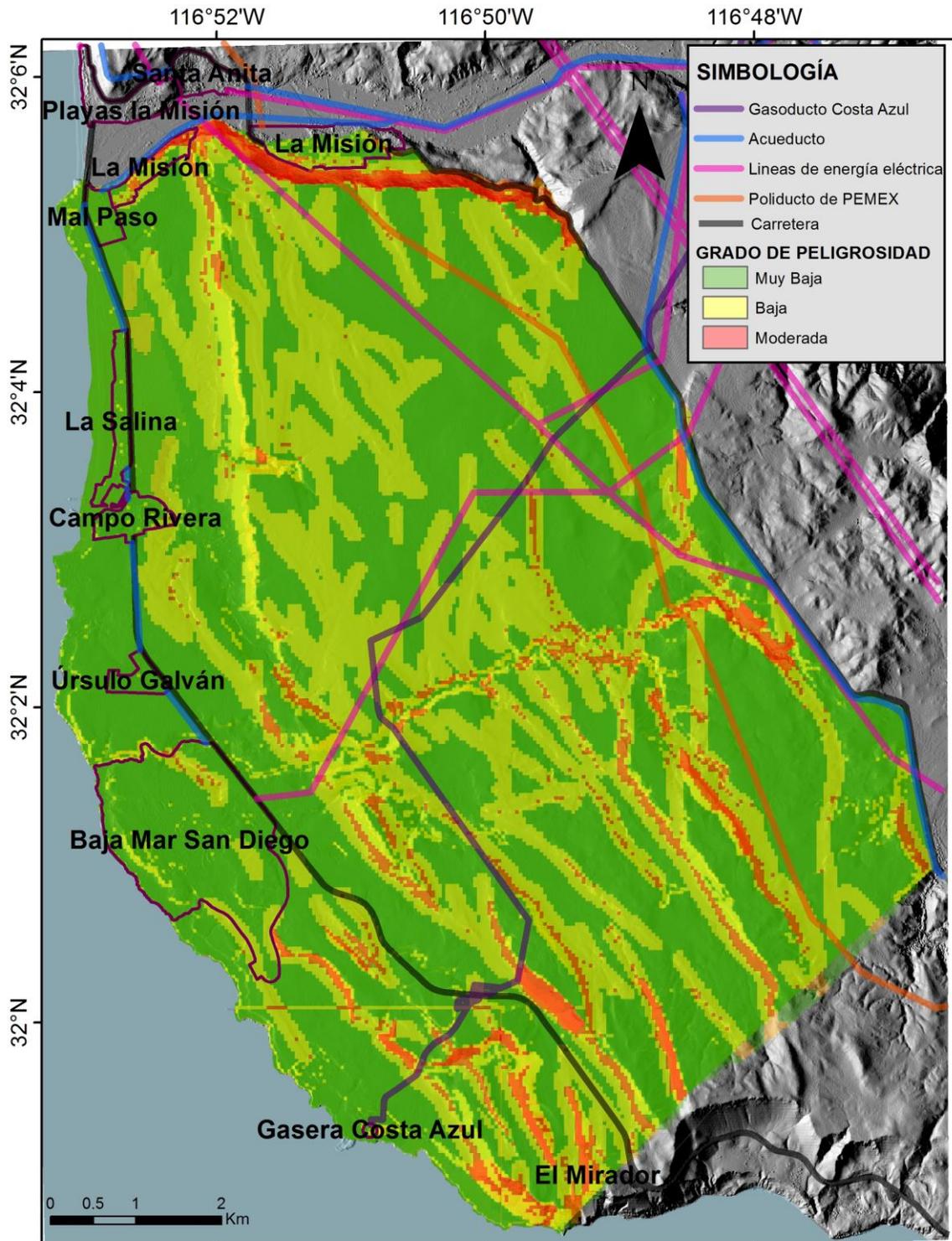


Figura 13.- Mapa de riesgo por deslizamiento de ladera.

Las zonas con moderada peligrosidad presentan valores mayores en los puntajes de sus pendientes y diferencias de elevación entre el piso y el techo de los escarpes. Las zonas con baja peligrosidad, a pesar de su baja pendiente o menor diferencia de elevación entre piso y techo de escarpes presentan la coincidencia del rumbo del ángulo de un lineamiento fotointerpretado y el ángulo del rumbo del escarpe.

De entre las zonas con moderado nivel de peligrosidad llaman la atención por su cercanía con la infraestructura carretera aquellas localizadas en la entrada del poblado La Misión (por la carretera Federal No. 1) y en la porción del área de estudio más cercana a El Mirador (carretera de cuota dirección Tijuana Ensenada).

Para el mapa de riesgo se integraron los sistemas afectables (bienes y servicios vulnerables en caso de la ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa).

Los sistemas expuestos al nivel de peligrosidad moderado son: el poblado La Misión y la porción de la carretera libre (Federal No. 1) ubicada en la zona norte del área estudiada, el poliducto de PEMEX cruza de forma perpendicular a dos zonas (la zona del cañón ubicado cerca de la porción central del área, y en la zona norte).

El gasoducto Costa Azul corta en numerosas ocasiones por zonas de peligrosidad baja, que se encuentran más bien definidas por la existencia de lineamientos interpretados que por pendientes o diferencias de elevaciones importantes.

Las líneas de energía eléctrica dispuestas por medio de torres metálicas no se encuentran en un riesgo mayor al bajo, dominando esta condición el hecho de encontrarse distribuidas a lo largo del sistema de lineamientos que determina la geomorfología de mesetas de la zona.

La autopista Escénica (1D) en la porción cercana a la zona de El Mirador cruza una zona de peligrosidad moderada, donde la geomorfología comienza a cambiar y se ve mayormente afectada por la diferencia de elevación entre piso y techo de los

escarpes, así mismo por un importante cambio litológico de basáltico a sedimentario.

Los acueductos se encuentran expuestos solo a un grado de peligrosidad muy bajo, debido a que están dispuestos de manera paralela a las carreteras (en ambos casos: carretera Federal No. 1 y 1D), desviándose antes de las zonas consideradas de grado moderado de peligrosidad.

En cuanto a los asentamientos humanos, éstos se encuentran dentro de una peligrosidad muy baja, a excepción del poblado La Misión, cuya urbanización no planeada ha hecho crecer la zona para construcción habitacional hacia el escarpe aledaño, aun así el nivel de peligrosidad de la zona es moderado.

Capítulo 7. Discusión

Aunque existen trabajos de evaluación de riesgos por deslizamientos en otras zonas dentro del corredor Tijuana-Ensenada, no existe ninguno que se encargue de la zonificación de grados de peligrosidad en la presente área de estudio.

La metodología empleada permite el análisis de un área extensa al mismo tiempo, sin embargo deben emplearse insumos de suficiente calidad (imágenes y modelos con buena resolución) para la obtención de óptimos resultados.

El método de obtención de información indirecta no discrimina el tipo de discontinuidad entre falla, contacto litológico o fractura, lo cual permite obtener un resultado confiable, considerando que se le dé menor importancia a la inspección en campo. Es importante tomar en cuenta que el grado de peligrosidad de un fenómeno de remoción en masa podría favorecerse por la presencia de estructuras con un desplazamiento neto

Para esta metodología, tener información del espesor de las capas de roca del sitio evaluado y conocer el ángulo que forma cada capa con respecto a los escarpes de la zona significaría que se realizaran análisis en campo lo cual incrementaría el tiempo y costo del proyecto.

Un elemento que simplificó el análisis en esta zona es la poca variabilidad de la litología, estando casi completamente cubierta por derrames de basalto. Sin embargo, el análisis de la tendencia de fallas de éste se encuentra limitado por no conocerse el espesor de la capa. Así mismo, se desconoce el ángulo en el que hace contacto con el material al que sobreyace.

Para definir la ocurrencia de los tipos de deslizamientos debemos tomar en cuenta que en las zonas designadas como de riesgo moderado, predominan los escarpes con alta elevación y grado de pendiente. Por lo tanto, podría presentarse predominantemente un movimiento en masa de tipo derrumbe o caída o vuelco de

bloques. En tanto que para las zonas de talud que por naturaleza comparten el rumbo de los lineamientos con el rumbo del escarpe, podría presentarse un movimiento de tipo deslizamiento propiamente dicho (rotacional), suponiendo que en algunas partes la litología variable en el cuerpo del mismo podría significar una discontinuidad que favorecería dicho evento. No pueden ser descartados los movimientos en masa de tipo flujo, aunque su ocurrencia queda reducida a una probabilidad muy baja, ya que para su ocurrencia son necesarios suelos o materiales cuyos poros necesitan encontrarse saturados por fluido.

Por su presencia a lo largo de toda la zona analizada, debe considerarse de importancia fundamental para la toma de decisiones sobre la construcción de infraestructura futura la existencia de una serie de lineamientos de orientación NW-SE.

Otro factor importante para la toma de decisiones acerca de la construcción de asentamientos humanos en el sitio es el conjunto de redes de servicios que se encuentran distribuidos en la zona (gasoducto Costa Azul y poliducto PEMEX), que si bien, no fue un objetivo perseguido en la presente, se denota la existencia de peligro que podría llevar a una contingencia de tipo químico.

Capítulo 8. Conclusiones

Los factores predominantes en la zona para la ocurrencia de deslizamientos de ladera de mayor a menor grado son: la existencia de una familia de lineamientos con rumbo NW-SE que coincide con los escarpes de las mesetas que definen geomorfológicamente la zona, la existencia de pendientes de hasta 45°, la diferencia de elevaciones entre piso y techo de escarpes de hasta más de 100 m y el tipo de litología.

Considerando que el rumbo de los lineamientos fotointerpretados coincide en todos los casos con los taludes de las mesetas, podría ser un factor determinante para la ocurrencia de movimientos en masa de tipo deslizamiento propiamente dicho.

Los resultados alcanzados en este trabajo sugieren que el grado máximo de peligrosidad en la zona es moderado, comprendiendo éste la menor de las áreas. El grado predominante es el muy bajo.

Los 26 km de líneas eléctricas que proveen de este servicio a La Misión y Bajamar, 14 km de poliducto de PEMEX, 11 km del trazo de un acueducto y 16 km de gasoducto perteneciente a la empresa Costa Azul; debido a su disposición geográfica, cruzan zonas de peligrosidad moderada.

Es importante mencionar que la carretera Federal No. 1 en la zona próxima al poblado La Misión atraviesa un área de peligrosidad moderada que podría estar sujeta a caídas o derrumbes, obedeciendo a las pendientes abruptas y diferencia de elevación entre el corte creado para construir la carretera y la parte superior del escarpe resultante.

La autopista Escénica (1D) se encuentra próxima a una zona de grado moderado de peligrosidad en la parte más cercana a El Mirador.

El poblado La Misión se considera bajo amenaza moderada de sufrir los efectos de un fenómeno de remoción en masa, relacionado con el potencial crecimiento de su zona urbana hacia los escarpes que forman el cañón de la desembocadura del arroyo Guadalupe.

Lista de referencias bibliográficas

- Aguado, A. (2014). Daños provocados por derrumbe en la carretera Escénica Tijuana-Ensenada. Universidad Nacional Autónoma de México. Revista ERNterate. Boletín informe diario 140108, 2.
- Anbalagan, R. (1992). Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering geology*, 32(4), 269-277.
- Aragón Arreola, M. J. (1994). Evaluación de riesgo geológico debido a movimientos de ladera en la Ciudad de Tijuana B.C., México. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Arguelles, A. (2010). Cambios hidrológicos en las cuencas que abastecen de agua en la zona de Ensenada, Baja California, México. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 75.
- Carreño, A. L. and J. T. Smith. (2007). Stratigraphy and correlation for the ancient Gulf of California and Baja California peninsula, Mexico. Vol 371. Paleontological Research Institution. Ithaca, New York.
- Cervantes, S. (2014). Ensenada tiene mermas millonarias por Escénica. *El Economista*, 24 p. Recuperado de: <http://www.especialistas.com.mx/saiweb/viewer.aspx?file=SA6CN4vCWFEHE12iNRaokXnU4akWrs7zVvy7RgjLJ5JGTO73fzPFRAbYfFF9E5hC//HFRFIbThb6mFj@@xkv6yFQ==&opcion=0&encrip=1>
- Crozier, M. J. (1999). Prediction of rainfall-triggered landslides: A test of the antecedent water status model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(9), 825-833.
- Cruden, D., and Fell, R. (1997). Quantitative risk assessment for slopes and landslides—the state of the art. *Landslide Risk Assessment*, 3-12.

- Cruz-Castillo, M., y Delgado-Argote, L. A. (2000). Los deslizamientos de la carretera de cuota Tijuana-Ensenada, Baja California. *Geos*, 20, 418-432.
- Dai, F., and Fan Lee, C. (2002). Landslides on natural terrain: Physical characteristics and susceptibility mapping in Hong Kong. *Mountain Research and Development*, 22(1), 40-47.
- Escamilla, I., Moreno, M., y Torres, M. (2011). Valoración de la vulnerabilidad de objetos geográficos usando representaciones conceptuales. Laboratorio de procesamiento inteligente de información geoespacial, Centro de Investigación en computación. Instituto Politécnico Nacional, 23. Recuperado de: http://www.inegi.org.mx/eventos/2011/Conf_lbero/doc/ET1_21_ESCAMILLA.pdf.
- Gastil, R. G., Phillips, R. P., and Allison, E. C. (1975). Reconnaissance geology of the state of Baja California. *Geological Society of America Memoirs*, 140, 1-201.
- Gómez-Castillo, G. (2010). Peligro geológico en la zona de playa Saldamando-El mirador en la autopista Tijuana Ensenada. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 87.
- Henao, P. (2014). El riesgo: realidad virtual. Deslizamientos activados por amenaza sísmica volcánica del volcán Cerro Machín. *Revista entorno geográfico*. No. 10, 152-177.
- Hermelin, M., Bedolla, G., Aguilar, A. (2008). Inventario de los desastres de origen natural en Colombia, 1970-2006. Limitantes, tendencias y necesidades futuras. *Gestión y ambiente*. Vol. 11, No. 1. Recuperado de: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/viewFile/9218/9859>.
- Highland, L., and Bobrowsky, P. T. (2008). *The landslide handbook: a guide to understanding landslides*. Reston, VA, USA: US Geological Survey. 129.

- INEGI (2008). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Modelo Digital de elevación de alta resolución LiDAR tipo terreno. Recuperado de: http://buscador.inegi.org.mx//search?q=&requiredfields=cve_titgen:1015&client=ProductosR&proxystylesheet=ProductosR&num=10&getfields=* &sort=meta:edicion:D:E::D&entsp=a__inegi_politica_p72&lr=lang_es%7Clang_en&oe=UTF-8&ie=UTF8&entqr=3&filter=0&site=ProductosBuscador&tlen=260
- INEGI (2010). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Conjunto de los datos vectoriales de las cartas topográficas digitales 1:50,000. H11B11 e I11D81.
- Lacasse, S., and Nadim, F. (2009). Landslide risk assessment and mitigation strategy. In *Landslides—Disaster risk reduction* (pp. 31-61). Springer Berlin Heidelberg.
- Minch, J. A. (1967). Stratigraphy and structure of the Tijuana-Rosarito Beach area, northwestern Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 78(9), 1155-1178.
- Montalvo Arrieta, J. (1996). Deslizamientos de laderas inducidos por terremotos en la cd. de Tijuana, B.C. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 128.
- Morales Pérez, M. (1995). Caracterización de los factores geológicos que controlan los deslizamientos de ladera en el área de San Miguel-Salsipuedes, Ensenada, B.C., México. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 59.
- Plaza-Flores, J. F. (1979). Cambios en la Playa San Miguel Debidos a un Deslizamiento y a la Adición de Nuevo Material Vertido en la Línea de Costa. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California. 65
- Rico, A. R., Springall, J. C., y Springall, G. C. (1969). Deslizamientos en la autopista Tijuana-Ensenada. Dirección General de Información.

- Rosales, G. J., Uribe, L. J., Urbán, L. G., y Nava, S. E. (2004). Guía metodológica para elaborar atlas de peligros naturales a nivel de ciudad. Identificación y zonificación. Editores Consejo de Recursos Minerales y Secretaría de Desarrollo Social, México.
- Selby, M. J. (1988). Landslides: Causes, consequences and environment. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 18(3), 343-343.
- Sharma, M., and Kumar, R. (2008). GIS-based landslide hazard zonation: a case study from the Parwanoo area, Lesser and Outer Himalaya, HP, India. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(1), 129-137.
- Sistema CLICOM. (2015). Base de datos climatológica nacional. Estación 2005 Boquilla Santa Rosa de la Misión. Recuperado de: <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga–Colombia. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos/Ingeniería de Suelos Ltda. 550.
- Tagliaferro, M., y Singer, A. (2012). Los deslizamientos ocurridos el 20 de noviembre del 2008 en las colinas del sur de Caracas: una visión general de su impacto geotécnico. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 27(1), 31-40.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes, Special report 176: Landslides: Analysis and Control: Washington, DC. Transportation Research Board.
- Zepeda Ramos, O., y Sánchez Pérez, T. A. (2001). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. Atlas nacional de riesgos de la República Mexicana. Centro Nacional de Prevención de Desastres.