



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA PARA EL MONITOREO DE
LADERAS CON FINES DE PREVENCIÓN
PARA LA CIUDAD DE TIJUANA, BAJA
CALIFORNIA**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Luis Eliel García Núñez

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Ricardo Rubén Padilla Velázquez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

DEDICATORIA

A la ciudad que me ha adoptado, la ciudad que recibió a mi familia con los brazos abiertos y nos dio la oportunidad de alcanzar la felicidad. Que este trabajo sea el inicio de algo más grande, y desde el enfoque de la ingeniería, aporte lo necesario para lograr una convivencia adecuada con el entorno físico que define a la noble ciudad de Tijuana.

A mi Madre y a mi Padre, pues por ellos es que he alcanzado cada una de mis metas y por ellos seguiré esforzándome cada día de mi vida.

A mis hermanos, Irving y Jordi, por llenar mi vida de felicidad y motivarme a seguir adelante.

A mi Tía Rosita, por darme su amor incondicional y apoyarme durante esta gran aventura.

A mi sobrina, Zoe Lilian, por bendecir a nuestra familia con su brillo inigualable. Daré mi mayor esfuerzo para lograr un mejor mundo para ella.

Alejandra, es la primera meta que alcanzamos juntos, el primer logro importante que consigo por ti.

A la memoria de mi Tío, Fernando Girón, por ser mi inspiración para aspirar a convertirme en un hombre de bien, por ayudarme a encaminar mi vida académica y profesional, este trabajo es para usted.

AGRADECIMIENTOS

A mi alma máter, la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, por brindarme la oportunidad de desarrollarme de manera íntegra como estudiante, como profesionista y, sobre todo, como ser humano.

A la FACULTAD DE INGENIERÍA, por ayudarme a formar las bases éticas, técnicas y profesionales del gran ingeniero que aspiro lograr a ser.

A la Dirección de Protección Civil Municipal del XXII Ayuntamiento de Tijuana, por brindarme el apoyo necesario para la realización de este trabajo y demostrarme la importancia de cualquier esfuerzo encaminado a la prevención.

Al Doctor José Rito Portugal Servin de la Mora, por confiar en mi persona, en mi trabajo y esfuerzo. Gracias por brindarme la oportunidad de vincular la voluntad de la ingeniería en trabajos de prevención. Gracias por su apoyo incondicional.

Al Maestro en Ingeniería Ricardo Rubén Padilla Velázquez, por confiar en mi desde el inicio de esta aventura. Gracias por su tiempo, dedicación y esfuerzo. Gracias por los conocimientos compartidos y por ser la imagen del ingeniero íntegro y profesional que espero lograr a ser. Gracias por todo su apoyo.

A todos y cada uno de los profesores que dedicaron su esfuerzo en la formación académica, profesional y humana de mi persona. Un agradecimiento especial a los sinodales, por su enorme interés en este trabajo profesional.

A Minerva y Miguel Ángel, mis padres. Por darme la vida y por toda la confianza y amor incondicional que han depositado en mí. Ustedes dos son los pilares de mi existencia y por ustedes dos lograre a ser un hombre de bien.

A mi Tía Rosita, por abrir las puertas de su casa y de su corazón. Gracias por brindarme el amor de madre que me impulso a cumplir esta meta.

A Irving y Jordi, por enseñarme el significado de una familia. Gracias por apoyarme durante todo este tiempo.

A todas las personas que formaron parte de mi vida académica. Gracias a todas aquellas personas que hoy me llevo en mi corazón, gracias a todos mis amigos.

A mi motivación, a la razón de mi felicidad. Gracias Alejandra por formar parte de mi vida, gracias por todo tu amor incondicional. Gracias por todo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES SOBRE LA INESTABILIDAD DE LADERAS.....	4
1.1 Marco geológico general.....	4
1.1.1 Ubicación geográfica y características de la población.....	4
1.1.2 Geomorfología general.....	5
1.1.3 Litología.....	7
1.1.4 Características del suelo.....	9
1.2 Eventos históricos y casos relevantes.....	14
1.3 Daños y pérdidas económicas asociadas.....	20
CAPÍTULO 2. RIESGO POR INESTABILIDAD DE LADERAS.....	24
2.1 Conceptos básicos asociados al riesgo.....	24
2.1.1 Desastres.....	24
2.1.2 Riesgo.....	26
2.1.3 Amenaza.....	26
2.1.4 Vulnerabilidad.....	27
2.1.5 Prevención de desastres.....	29
2.2 Necesidad de invertir recursos en la prevención de desastres.....	30
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LADERAS.....	33
3.1 Fallas posibles sobre una ladera.....	33
3.1.1 Nomenclatura de una ladera.....	34
3.1.2 Clasificación de los movimientos.....	35
3.1.3 Nomenclatura de un deslizamiento.....	42
3.1.4 Caracterización de un movimiento.....	46
3.2 Factores condicionantes para la inestabilidad de laderas.....	52
3.2.1 Factores geométricos.....	53
3.2.2 Factores geológicos y geomorfológicos.....	54
3.2.3 Factores hidrogeológicos.....	55
3.2.4 Cobertura vegetal y meteorización.....	56
3.2.5 Factores antrópicos.....	57

3.3	Factores desencadenantes en la inestabilidad de laderas	59
3.3.1	La lluvia como agente detonante	60
3.3.2	Sismicidad	62
3.3.3	Actividad humana	63
CAPÍTULO 4. PROPUESTA PARA EL MONITOREO DE LADERAS		67
4.1	Antecedentes	67
4.1.1	Alcance y limitaciones	70
4.2	Síntomas de una ladera inestable	71
4.3	Sobre la instrumentación	79
4.4	Metodología de trabajo	80
4.4.1	Identificación de los factores influyentes en la inestabilidad de laderas	82
4.4.2	Monitoreo del movimiento superficial	83
4.4.3	Monitoreo del agrietamiento superficial	86
4.4.4	Monitoreo de la inclinación de elementos superficiales	91
4.5	Gestión de la información	93
CAPÍTULO 5. TRABAJOS COMPLEMENTARIOS		96
5.1	Metodología complementaria	96
5.1.1	Mediciones pluviométricas	96
5.1.2	Tecnología GPS	98
5.1.3	Aplicación de un equipo Geo-radar	99
5.2	Generación de mapas y aplicación de Sistemas de Información Geográfica	101
5.2.1	Zonificación	101
5.2.2	Sistemas de Información Geográfica	103
5.3	Sistemas automáticos y de alerta temprana	104
5.3.1	Sistemas automatizados de monitoreo	104
5.3.2	Sistemas de alerta temprana	106
5.4	Uso de dispositivos aéreos pilotados a distancia	109
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DEL POSIBLE MECANISMO DE FALLA		113
6.1	Propiedades mecánicas de los suelos	113
6.1.1	Concepto de esfuerzo	113

6.1.2 Resistencia al esfuerzo cortante	117
6.2 Factor de seguridad	121
6.3 Método de análisis	122
6.3.1 Análisis de estabilidad por el método de dovelas de Fellenius	123
6.4 Ejemplo de análisis de estabilidad por el método de dovelas de Fellenius	127
6.4.1 Consideraciones para el planteamiento del problema	127
6.4.2 Ejemplo 1. Ladera sin presencia de factores desfavorables	128
6.4.3 Ejemplo 2. Ladera bajo condiciones desfavorables	136
6.4.4 Análisis de resultados	142
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	144
ANEXO A. MAPAS COMPLEMENTARIOS	147
ANEXO B. CONTENIDO COMPLEMENTARIO	150
REFERENCIAS	152

INTRODUCCIÓN

Generalmente se entiende el concepto de desastre como sinónimo de un fenómeno natural al grado de afirmar que existen los desastres o catástrofes naturales y se culpa a la naturaleza por estas situaciones. Estrictamente esta percepción es errónea ya que los desastres están ligados al grado de vulnerabilidad de la población a una o varias amenazas, ya sean naturales o provocadas por el hombre. Es decir, los desastres surgen como consecuencia de la ocurrencia de ciertas amenazas a una población determinada y la magnitud de los daños está en función de las condiciones en las que se encuentra dicha población. En este contexto resaltan los escenarios geográficos y rasgos del relieve, ya que estos no decidieron ser parte de las características de una localidad o población, por el contrario, el asentamiento humano debe de considerar permanentemente las particularidades de su entorno y de acuerdo a la adaptación al medio, será el grado de vulnerabilidad al que esté expuesto el asentamiento. En pocas palabras, debemos ser conscientes de dónde estamos ubicados y a que amenazas estamos expuestos.

México es un país privilegiado debido a la gran diversidad regional de la que goza, esto aporta riquezas naturales envidiables y únicas en el mundo. Esta complejidad geográfica implica la presencia de una variedad interesante de fenómenos perturbadores de origen natural asociados a las particularidades de cada territorio. Es el caso de la ciudad fronteriza de Tijuana, Baja California; debido a su complejidad geológica, los rasgos del relieve que la cobijan y el acelerado y descontrolado aumento de la mancha urbana, presenta un alto grado de vulnerabilidad y exposición ante cualquier fenómeno de origen natural que provoque un potencial desastre en la ciudad.

La población mexicana, así como los habitantes de la ciudad de Tijuana, están expuestos al enorme poder destructivo asociado a la presencia de fenómenos naturales de origen geológico, comúnmente nos referimos a uno de ellos como deslizamientos o inestabilidades de laderas. Esto consiste en movimientos de masa de suelo o rocas pendiente abajo.

Cuando existe equilibrio entre la resistencia que oponen las condiciones de la ladera o son mayores que las fuerzas motoras que disparan un movimiento, se afirma que una ladera es estable, por lo tanto, la inestabilidad se presentara cuando las fuerzas motoras sean mayores que cualquier resistencia dentro o fuera de la ladera.

Los principales problemas ligados a la inestabilidad de una ladera consisten en los deslizamientos, flujos y caídos o derrumbes. Los deslizamientos se presentan cuando una porción externa de masa de material de la ladera se desliza sobre una supuesta superficie de deslizamiento o falla, será este mecanismo el que centre las atenciones de este trabajo, sin restarle importancia a los demás movimientos. Los flujos de tierra se caracterizan por un movimiento pendiente abajo de material disgregado, generalmente provocado por la presencia de un medio líquido. Los caídos ocurren cuando se desprende o vuelca un fragmento importante del cuerpo de la ladera y cae con gran velocidad, inclusive en caída libre, ocurren comúnmente en taludes verticales o casi verticales.

Existen diversos agentes que condicionan la inestabilidad de una ladera, así como aquellos que desencadenan el movimiento del material. Por lo general, las causas más usuales de origen natural que activan los movimientos son las lluvias prolongadas y los movimientos sísmicos, además de considerar ciertos aspectos geológicos y características propias de cada material que compone la ladera. Otros factores importantes a considerar como desencadenante de los problemas de inestabilidad son aquellos referidos como antropogénicos: provocados por el hombre. Cortes carreteros, excavaciones o cualquier trabajo de remoción de material que no tenga el estudio y análisis adecuado de las implicaciones que conllevan, puede provocar una falla importante y ser un foco potencial para un desastre. Es importante identificar y determinar las diferencias entre los factores que condicionan y desencadenan los movimientos de material, de esta manera será más fácil reconocer los síntomas de una ladera inestable.

La prevención de cualquier tipo de desastres en cualquier población es de trascendental importancia, pero es fundamental sumar esfuerzos en temas de reducción y/o eliminación de daños en ciudades que con el tiempo han crecido en todos los sentidos, convirtiéndose en urbes significativas. Las consecuencias de que un agente perturbador provoque un desastre en una ciudad importante serán inimaginables si contamos la presencia de una gran cantidad de habitantes, un área urbana creciente y desordenada, una población poco preparada y escasa o nula noción del concepto de prevención.

Una acción imprescindible para complementar los trabajos de prevención de afectaciones provocadas por la inestabilidad de laderas, así como para cualquier otro agente perturbador, consiste en la observación y supervisión de los parámetros asociados a un posible desastre, con el fin de identificarlos y asociarlos a la potencial ocurrencia de la catástrofe. Esta es la esencia del

monitoreo. Observar las características propias de los taludes naturales, identificar aquellos factores que condicionen la inestabilidad y los que desencadenen el movimiento de material; y así generar la información adecuada, fundamentada y con la mayor certeza posible para aportar en la toma de decisiones relacionadas con la protección civil y la planeación urbana.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo principal sembrar las bases de un sistema de monitoreo que genere la información necesaria para la gestión del riesgo asociado a la inestabilidad de laderas en la ciudad de Tijuana, Baja California; planteando la metodología de trabajo más adecuada teniendo en cuenta los recursos que se dispongan y las carencias presentes. De la misma manera, se busca aportar la información necesaria para identificar los factores influyentes en la inestabilidad de una ladera, así como las posibles manifestaciones superficiales de un movimiento de masa. Además, se pretende complementar los trabajos de prevención realizados por todas las asociaciones y organizaciones privados o gubernamentales del municipio. Asimismo, en esta obra se pretende demostrar la influencia de ciertas características presentes en una ladera, con el apoyo del procedimiento de análisis de estabilidad adecuado.

Este trabajo se justifica con el significado de la protección civil, en palabras del doctor José Rito Portugal Servín de la Mora, director en turno del año actual del departamento de Protección Civil Municipal de Tijuana: *“La Protección Civil es una acción solidaria y participativa, donde intervienen los sectores públicos y privados con el fin de salvaguardar la vida, integridad y salud de la población, así como sus bienes y el medio ambiente”* (J.R. Portugal, comunicación personal, 15 de agosto de 2018). Es dentro de esa participación donde tienen lugar las acciones de la ingeniería. Los esfuerzos técnicos no tienen lugar si no se encaminan al bien común, por ello, ésta justificación se complementa con la esencia de la Ingeniería Civil, la cual dicta que los esfuerzos y conocimientos físico matemáticos aplicados a la modificación del entorno tienen como último fin, el beneficio para la sociedad. Es importante cuidar el costo, funcionalidad y seguridad de los trabajos que se realicen.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES SOBRE LA INESTABILIDAD DE LADERAS

1.1 Marco geológico general

La ciudad de Tijuana es parte de las formas del relieve que se identifican y definen como provincia fisiográfica de la Península de Baja California (INEGI, s.f.) y se encuentra a su vez al oeste de la cuenca del Río Tijuana (Wright & Vela, 2005). El Atlas de la Cuenca del Río Tijuana de Wright y Vela, describe el área conocida como Zona Río, en la cual se desarrolla la mayor parte de la mancha urbana, rodeada al norte por mesetas de altos escarpes y al sur por estructuras similares, pero con la presencia de pendientes más suavizadas. Dichas formaciones fueron elevadas para crear terrazas o mesetas marinas que posteriormente se diseccionaron formando los característicos cañones escarpados que rodean a la ciudad.

1.1.1 Ubicación geográfica y características de la población

Al extremo noroeste de la franja fronteriza norte del país, en el Estado de Baja California, se ubica la ciudad de Tijuana, la cual abarca un área de 1237.86 km². Colinda al norte con el condado Estadounidense de San Diego California, al oeste con el Océano Pacífico, al sur con los municipios de Playas de Rosarito y Ensenada, y al este con el municipio de Tecate. Para ilustrar de mejor manera la ubicación geográfica de la ciudad es recomendable consultar la figura A.1, del anexo A.

De acuerdo a los últimos datos registrados en el 2016, que podemos observar en la Tabla 1, la ciudad cuenta con una población total mayor al millón y medio de habitantes, el cual representa el 49.57% del total estatal. Convirtiéndose en el municipio con mayor índice poblacional del estado (INEGI, 2017).

En la ciudad existe un acelerado crecimiento poblacional derivado de la migración de otras partes del país y sur de los Estados Unidos provocando el dinamismo, la diversidad y la complejidad cultural características de esta ciudad fronteriza. Todo lo anterior impulsa una expansión urbana que

se pretende satisfacer de manera no planificada, permitiendo que áreas muy poco competentes o incompetentes para el desarrollo urbano se conviertan en zonas habitables.

Tabla 1. Población por municipio del Estado de Baja California 2016.

Municipio	Habitantes	%
Ensenada	486 639	14.66
Mexicali	988 417	29.77
Tecate	102 406	3.08
Tijuana	1 645 570	49.57
Playas de Rosarito	96 734	2.91
TOTAL	3 319 766	100

En este sentido y en base al Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tijuana 2014 (CICESE, 2014), al cual nos referiremos de ahora en adelante como ARNM 2014, el municipio cuenta con una mancha urbana de 345.60 km², emplazado mayormente al norte y noreste del territorio. Representando un 27.93% del área total de la ciudad. El primer lugar en porcentaje territorial se lo lleva el conjunto de arbustos que se desarrolla principalmente en las laderas de los cerros, con un 50.3 % del área regional. Sobre esta vegetación no se han asentado poblaciones significativas, por lo tanto, no tienen una modificación sustancial, pero son áreas potenciales para el descontrolado crecimiento urbano.

1.1.2 Geomorfología general

Wright y Vela señalan que la mayoría de las estructuras geomorfológicas de la región noroeste de Baja California se crearon por la interacción sísmica entre las placas tectónicas del Pacífico y la Norteamericana, conocida como Zona de Cizalla del Sur de California (Cruz Castillo, 2002). Posteriormente, los sistemas pluviales del Río Tijuana, el Río Alamar y el Río Las Palmas, aportaron

a la creación de la superficie erosionada del oeste de la ciudad, por donde coincide el trazo de la zona urbana.

La configuración, origen y formas en las que se encuentra la superficie de la ciudad, son presentadas en el análisis geomorfológico del CICESE en el 2014 y mencionadas con anterioridad en el diagnóstico de riesgos urbanos de la ciudad en el 2001 (López Álvarez, 2001). Los rasgos del terreno que se identifican en la topografía de Tijuana son 6 zonas geomorfológicas que se enlistan a continuación:

- *Mesa de Otay* (Meseta compleja); se extiende en la parte norte y noreste de la ciudad, destacando amplias mesetas cortadas de manera abrupta por escarpes de considerable altura;
- *Zona Río* (Llanura aluvial costera); corresponde al valle de origen fluvial generado por los cauces del Río Tijuana y el Río Alamar. Debido a los pocos accidentes topográficos asociados a este valle, así como su bajo nivel topográfico, se encuentra la mayor concentración de desarrollo urbano de la ciudad;
- *Sierras alargadas* (Meseta compleja con lomeríos); abarcan la parte oeste y sur de la ciudad, donde destacan lomeríos extensos (de ahí el nombre);
- *Sierra de la Presa* (Sierra Baja); se presenta como el conjunto de sierras elevadas en la parte este de la ciudad;
- *Sierra de la Gloria* (Sierra Alta); formada por elevaciones al extremo noreste y al igual que la zona anterior, se encuentran al este de la mancha urbana;
- *Cerro Colorado*; ubicado al este de Tijuana es el rasgo más alto del entorno.

La distribución y localización de las zonas geomorfológicas se puede consultar en la figura A.2 del anexo A.

El origen y comportamiento de las estructuras geológicas de la región son respuesta natural al marco tectónico dominante y a la constante actividad sísmica (López Álvarez, 2001), la respuesta de esta influencia tectónica se traduce en deformaciones, fracturamientos y la notoria presencia de la conocida red de fallas que se esparcen en la región.

El trabajo de Cruz Castillo señala un amplio sistema de fallas activo con una velocidad de desplazamiento lateral registrada al 2002, del orden de 60 mm por año. Confirmando la gran

actividad sísmica de la región norte de Baja California. La red de fallas se conforma por los sistemas San Miguel-Vallecitos-Calabazas, El Descanso-Estero, Coronado Bank-Agua Blanca, San Clemente-San Isidro, Imperial-Cerro Prieto, Laguna Salada y Sierra Juárez-Sierra San Pedro Mártir.

Estos sistemas de fallas se encuentran al este y suroeste de la ciudad de Tijuana, pero su relativa cercanía al municipio las convierte en un factor determinante dentro de los riesgos naturales de origen geológico. La distribución de cada una de las fallas se puede observar en la figura A.3, en el anexo A de este trabajo.

La misma ciudad cuenta con su propia red de fallas que son motivo de constantes estudios y un permanente monitoreo sísmico por parte del Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada. El alto índice poblacional y la complejidad geológica de la región, son motivo importante para monitorear los riesgos latentes.

1.1.3 Litología

Gran parte de los materiales naturales expuestos en la ciudad de Tijuana son de origen sedimentario, generados por la interacción de ambientes marinos, fluviales y aluviales en la región. Solamente el Cerro Colorado y el Cerro de la Abeja contrastan por su origen volcánico (López Álvarez, 2001). Estas rocas se identifican de manera sencilla a lo largo de todo el relieve accidentado de las sierras y mesetas que rodean la mancha urbana. La gran mayoría de laderas y escarpes de la ciudad cuentan con estratos compuestos por distintos tipos de suelo y rocas sedimentarias. Estos estratos subyacen en la mayoría de la ciudad debajo del característico material de relleno, que pone en evidencia la mala praxis de la población en general, pues este tipo de material no supone una base o cimentación sólida y confiable a las estructuras que llega a soportar.

La distribución y descripción de la litología en la ciudad que se presenta en este trabajo se basa en el informe de microzonificación sísmica de la zona urbana de la ciudad, presentado en el 2009 (Acosta Chang, Arellano Zepeda, & Ruiz Cruz , 2009), esto debido a la sencillez con la que se explican y clasifican los principales rasgos litológicos.

- *Limolita-arenisca*. Roca de origen sedimentario ubicada en la zona noroeste de la ciudad y parte del norte. Compuesta esencialmente de areniscas y limolitas. Forman estratos débiles y susceptibles a la erosión.
- *Basalto*. Roca de origen volcánico localizada paralelamente a la costa, al sur de la zona de Sierras Alargadas, forma una franja desde el suroeste hasta los límites municipales en el sur de la ciudad.
- *Arenisca-Conglomerado*. Rocas de orígenes sedimentarios que afloran al noroeste de la ciudad (conforman gran parte de zona de Sierras Alargadas), en el cauce del río Tijuana (al noreste de la Zona Río y en las inmediaciones de la Mesa de Otay), y al oeste de la ciudad (Sierra de la Presa y Sierra de la Gloria). Este tipo de material concentra el mayor número de movimientos de ladera.
- *Aluvión*. Consiste en depósitos limosos, arenosos y pequeñas rocas; provenientes del arrastre de los afloramientos cercanos. Se encuentran dentro de los cauces de ambos ríos de la ciudad (Zona Río).
- *Conglomerado*. Roca sedimentaria compuesta por granos de rocas transportadas y unidas por un núcleo de material más fino (Caballero Miranda, s.f.). Se encuentra en las mismas zonas geomorfológicas que la Arenisca-Conglomerado y con mayor presencia sobre la Mesa de Otay.
- *Roca ígnea*. Destaca el granito, la granodiorita y la andesita de los cuerpos volcánicos del Cerro Colorado y Cerro de las Abejas.

La clasificación y descripción anterior no difiere de otras referencias, como lo es el atlas de riesgos naturales del municipio de Tijuana 2014 y las cartas geológicas del Servicio Geológico Mexicano. Este último presenta un nivel de detalle más especializado, el cual queda un tanto fuera del objetivo de la presente obra, pero se recomienda consultar en caso de que sea necesario. En la figura 1 se puede observar la distribución de la clasificación anterior, haciendo énfasis que la mayoría de las estructuras escarpadas de la ciudad están compuestas en su mayoría por rocas sedimentarias; arenisca y conglomerados.

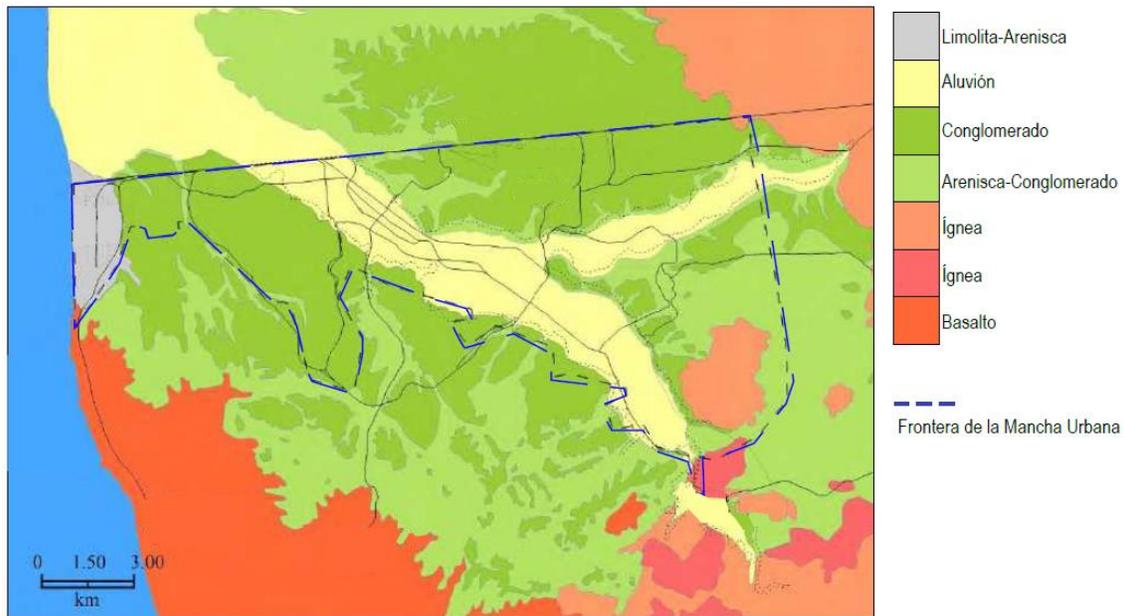


Figura 1. Litología general de la ciudad de Tijuana (Acosta Chang, Arellano Zepeda, & Ruiz Cruz , 2009).

1.1.4 Características del suelo

Es pertinente aclarar el concepto de *suelo* antes de mencionar su clasificación y distribución dentro de la ciudad de Tijuana. La idea más adecuada para aclarar las dudas que rodean el significado de los suelos la presenta el doctor Juárez Badillo en el primer tomo del libro de Mecánica de Suelos (Juárez Badillo, *Mecánica de Suelos 1: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*, 2005):

“Suelo” es un término del que hacen uso diferentes profesionistas. La interpretación varía de acuerdo con sus respectivos intereses. Para el Agrónomo, por ejemplo, la palabra se aplica a la parte superficial de la corteza capaz de sustentar vida vegetal, siendo esta interpretación demasiado restringida para el Ingeniero. Para el Geólogo es todo material intemperizado en el lugar en que se encuentre y con contenido de materia orgánica cerca de la superficie; esta definición peca de parcial en Ingeniería, al no tomar en cuenta los materiales transportados no intemperizados posteriormente a su transporte.

La percepción anterior explica con sencillez la razón por la que existen distintos sistemas de clasificación de suelos, pues cada sistema identifica, ordena y nombra ciertos materiales

dependiendo del interés y aplicación de los mismos. Cada sistema debe cubrir las necesidades correspondientes a los trabajos que se basan en sus resultados. En ingeniería, por ejemplo, es preciso un sistema que base su clasificación en las propiedades mecánicas de los suelos. El sistema que satisface de manera adecuada las necesidades ingenieriles es el denominado Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el cual, a grandes rasgos, divide a los suelos de acuerdo al tamaño de sus partículas, límites de consistencia y distribución de los distintos tamaños presentes en la muestra de interés (Juárez Badillo, *Mécanica de Suelos 1: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*, 2005). La explicación detallada de la clasificación SUCS, así como su metodología y propiedades mecánicas relacionadas a sus resultados no competen al objetivo de este trabajo, por este motivo, no se ahondará en la manera en la que se clasifican los suelos. Si es interés del lector es recomendable consultar las referencias mencionadas para profundizar en el tema.

Por consiguiente, en este trabajo se entenderá la palabra suelo como el conjunto de partículas orgánicas e inorgánicas que comparten una estructura organizada, contemplando: el tamaño de las mismas, el contenido de agua y el contenido de aire; estos últimos de gran interés debido a que juegan un papel determinante en las propiedades y comportamiento mecánico del suelo.

Desafortunadamente los suelos de la ciudad de Tijuana no cuentan con la cantidad suficiente de estudios que sirvan de apoyo adecuado para determinar con exactitud la clasificación, distribución y localización de los mismos, tal es el caso de los suelos del Valle de México, donde los numerosos estudios han permitido zonificar la ciudad de México. En dicha zonificación es fácil encontrar la información que satisfaga las necesidades de la ingeniería civil a una gran escala, es decir, para proyectos de carácter más específicos siempre es recomendable realizar los estudios pertinentes (Juárez Badillo, *Mécanica de Suelos 2: Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos*, 2016).

En el caso de la ciudad de Tijuana la mayoría de información existente deriva de los estudios que laboratorios y compañías privadas realizan para sus propios fines. La existencia de datos públicos es escasa, de difícil acceso o no se encuentran dentro de la clasificación del SUCS, la cual cumple con los criterios para este trabajo escrito.

La localización y distribución de los suelos que se presenta en este trabajo de tesis se basan en la información señalada en el trabajo del CICESE en el atlas de riesgos naturales del 2014. Además,

se complementa con las consideraciones de 1999 del Reglamento para la Extracción y Nivelación de Terrenos en el Municipio, las cuales se adaptan al propósito de este apartado.

El ARNM 2014 señala que las condiciones del relieve de la ciudad han permitido el desarrollo de seis tipos de suelo que entran dentro de la clasificación FAO/UNESCO de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Esta clasificación tiene una perspectiva encaminada al aprovechamiento agrícola de los suelos, considerando su origen, su composición química, física y biológica (FAO, 2018).

Las unidades edáficas encontradas en el municipio de Tijuana son:

- *Litosol (L)*. Suelos muy delgados, del orden de 10 cm de espesor, susceptibles a la erosión. Son particularmente comunes en zonas montañosas. Este tipo de suelo es el que predomina en un 52% del área del municipio.
- *Vertisol crómico (Vc)*. Estos suelos ocupan el 27.5% de la superficie del municipio. Se caracterizan por su alto contenido de arcillas que se expanden con la humedad y contraen con la sequía, se le conoce como suelos expansivos.
- *Xerosol háptico (Xh)*. Se caracterizan por tener una capa superficial de tono claro y pobre en humus. Son poco susceptibles a la erosión. Representan un 5.38% del área del municipio.
- *Fluvisol eútrico (Je)*. Formado por depósitos aluviales recientes, se observan en el 3.83% del territorio municipal.
- *Regosol calcárico (Re)*. Materiales no consolidados y blandos, poco contenido de materia orgánico. De color en seco, generalmente marrón y marrón rojizo en presencia de humedad. Se distribuyen en el 3.24% del área municipal.
- *Feozem calcárico*. El material que se presenta un menor porcentaje de área del Municipio.

Esta clasificación es escasa de la información apropiada para esta investigación, la cual necesita un poco más de certeza en determinar la presencia de suelos que entren en la clasificación del SUCS, por ejemplo; gravas, arenas, limos y arcillas. Con base en el informe técnico contenido en el anexo I del Reglamento para la Extracción y Nivelación de Terrenos en el Municipio, de 1999, se pretende complementar la información de los párrafos anteriores. Es decir, tratar de tener la certidumbre de la presencia de materiales gruesos o finos en las zonas geomorfológicas de interés.

El informe mencionado define 4 zonas con características estratigráficas y de propiedades similares de sus suelos; en base a una relación de sondeos recopilados y perfiles estratigráficos realizados hasta 1999. Las zonas descritas son, Zonas de los Ríos, de Playas, de Otay y de Lomas.

- Zona de los Ríos. Coincide con la zona geomorfológica de la llanura aluvial costera del ARNM 2014, la cual comprende el cauce y márgenes de los ríos Tijuana y Alamar. Se caracteriza por la abundancia de arenas sueltas de tamaño uniforme y en su mayoría saturadas por el nivel freático. La subyacen capas conformados por conglomerados y rocas sedimentarias.
- Zona de Playas. Es la meseta marina más joven de la ciudad, la conforma un estrato de siete y ocho metros de espesor, formado por arcillas y limos de muy baja plasticidad.
- Zona de Otay. Es la meseta marina más antigua de Tijuana y se caracteriza por una capa de dos a tres metros de espesor, formada por arcillas muy duras, preconsolidadas por secado. Esta zona forma parte de la Meseta Compleja, zona geomorfológica señalada en el ARNM 2014.
- Zona de Lomas. Es la más extensa y con la menor densidad de estudios (hasta 1999). Se encuentran evidencias de arenas y gravas muy compactas, pero a su vez los perfiles estratigráficos que acompañan el reglamento indican presencia de arena arcillosa y arena limosa. Dentro de esta división se encuentran aquellas zonas que no se ubicaron en las 3 anteriores, tal es el caso de las Sierras de La Presa y de La Gloria, así como el Cerro Colorado.

Hasta el momento solo se ha descrito de manera somera las zonas y la clasificación de los suelos presentes en la ciudad de Tijuana sin relacionarlos con las regiones de interés de este trabajo. Estas zonas son aquellas donde se han presentado la mayor cantidad de movimientos de masa, por lo tanto, el aliciente de esta sección es relacionar las características de los suelos de la ciudad con las regiones de mayor incidencia de desastres por inestabilidad de laderas. Para ello, se hace una comparación entre las distintas distribuciones y localizaciones de las referencias citadas en este apartado y las zonas geomorfológicas más importantes de la ciudad. De esta manera, se tendrá una idea más certera de las características de los materiales que rodean las zonas de mayor riesgo. Estas zonas se distribuyen en su mayoría a lo largo de las Sierras alargadas o meseta compleja con

lomeríos. Los casos registrados se abordarán en la siguiente sección. La Tabla 2 presenta la relación de los suelos característicos de Tijuana y los rasgos del relieve predominantes.

Tabla 2. Tipos de suelo y roca predominantes en las distintas zonas geomorfológicas de la ciudad de Tijuana.

(a). (CICESE, 2014)

(b). (Gobierno Municipal de Tijuana, 1999)

(c). (Acosta Chang, Arellano Zepeda, & Ruiz Cruz , 2009)

Zona Geomorfológica	Localización	Tipo de suelo predominante		Tipo de roca predominante
		ARNM 2014 ^(a) (FAO/UNESCO)	Zonificación Estratigráfica ^(b) 1999 (SUCS)	ARNM 2014 / Microzonificación sísmica ^(c)
Zona Río	Márgenes de los ríos Tijuana y alamar	Zona Urbana	Aluvión, arenas sueltas y saturadas	Aluvión
Mesa de Otay	Al norte de la ciudad	Mayor presencia de vertisol y litosol a los márgenes	Arcillas muy duras y presencia de arcillas arenosas, hasta 3 m de espesor	Conglomerado - Arenisca
Sierras Alargadas	Oeste y suroeste de la ciudad	Mayor presencia de vertisol	Arenas, gravas, arena arcillosa y arena limosa	Conglomerado - Arenisca y presencia de rocas ígneas al sureste
Sierra de La Presa	Este de la ciudad	Mayor presencia de litosol y vertisol a los márgenes	Arenas, gravas, arena arcillosa y arena limosa	Conglomerado - Arenisca y presencia de rocas ígneas
Sierra de La Gloria	Noreste y este de la ciudad	Mayor presencia de litosol y vertisol a los márgenes	Arenas, gravas, arena arcillosa y arena limosa	Conglomerado - Arenisca y presencia de rocas ígneas
Cerro Colorado	Este de la ciudad	Litosol	Sin información	Rocas ígneas

Como se puede observar en la Tabla 2, en la zona de las Sierras Alargadas ambas referencias coinciden que existe una gran presencia de arcillas, componente característico del vertisol (CICESE, 2014), así como de arenas sueltas, gravas, arenas arcillosas y limosas con un grado de compactación que varía de suelto a medianamente compacto (Gobierno Municipal de Tijuana, 1999).

La manera más fácil de relacionar toda la información descrita en esta sección es por medio de la ilustración de la figura 2 que muestra un corte simplificado del relieve de la ciudad de Tijuana y los materiales predominantes de cada expresión geomorfológica.

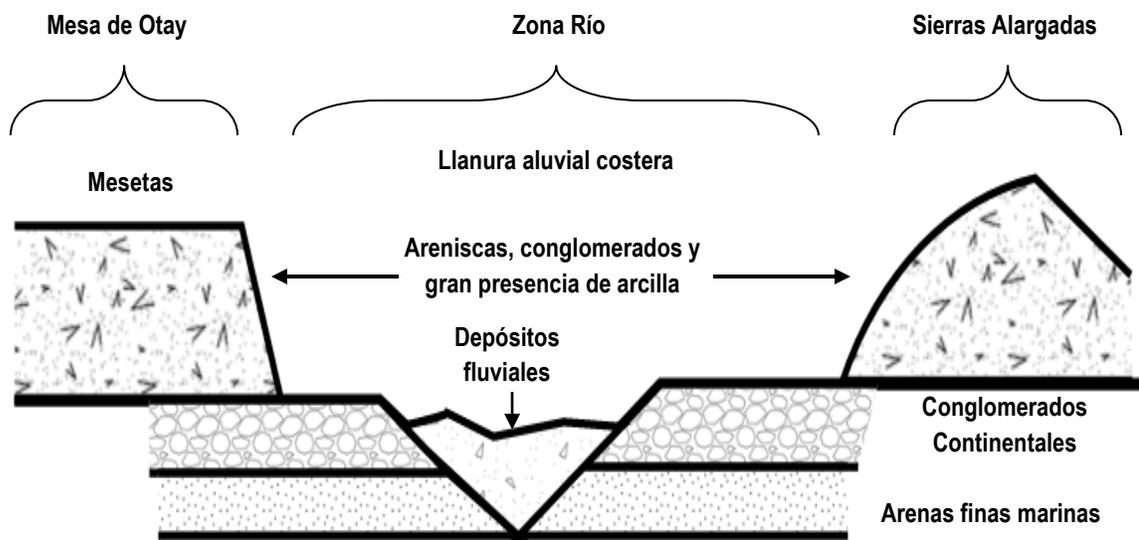


Figura 2. Geología simplificada de la ciudad de Tijuana, Baja California (Gobierno Municipal de Tijuana, 1999).

1.2 Eventos históricos y casos relevantes

Bajo el contexto regional ya mencionado el crecimiento de la ciudad de Tijuana tiene una explicación un poco más clara: el desarrollo urbano inició en las zonas bajas del cauce del río Tijuana y con el tiempo los asentamientos humanos se concentraron en las áreas de laderas y mesetas de la ciudad, mayoritariamente de manera ilegal. Paulatinamente buscaron la regularización y la introducción de servicios públicos. En tales colonias se realizaron prácticas de autoconstrucción, cortes y movimientos de tierra sin la asistencia técnica mínima, generando con el tiempo las condiciones adecuadas para que se presente la inestabilidad de laderas.

Desde 1998 se tiene registro de la manifestación de los problemas de inestabilidad en las colonias de origen irregular y en algunas colonias con aparente diseño y ejecución adecuados, lamentablemente son pocos los casos que se han revisado a detalle y mínimos aquellos que han servido como motivación para la toma de acciones concretas para corregir o minimizar los efectos destructivos. Desgraciadamente la mayoría de los eventos son foco de atención temporal por parte de la ciudadanía, autoridades y de los medios de comunicación, convirtiéndose solamente en datos estadísticos de la ciudad y marcando la vida de los habitantes afectados, sin trascender en la mayoría de los casos, en una solución adecuada (Ayuntamiento de Tijuana, 2016).

A partir de 1998 al 2005 se registraron en Tijuana 143 colonias afectadas, algunas con reincidencia en algunas áreas, considerando 58 sitios en riesgo por deslizamientos (Ayuntamiento de Tijuana, 2016). El ARNM 2014 muestra 23 eventos históricos con un total de 395 estructuras dañadas o consideradas en riesgo hasta el año 2014. Estas cifras aun aumentado considerablemente hasta el 2018, llegando a 33 eventos registrados por la Dirección de Protección Civil Municipal. Los sitios afectados se muestran en la figura 3, proporcionada por la autoridad mencionada.



Figura 3. Ubicación de los eventos históricos de inestabilidad de laderas en Tijuana hasta el 2018 (Proporcionada por la Dirección de Protección Civil Municipal).

En la figura 3 se puede observar que la mayor concentración de zonas afectadas por la inestabilidad de laderas se ubica dentro de la región geomorfológica de las Sierras Alargada al sur de la mancha urbana. Esto indica que las características de los lomeríos de las Sierras Alargadas influyen en la ocurrencia del fenómeno natural de origen geológico que interesa en este trabajo. No por ello, otras partes de la ciudad quedan exentas a los problemas de inestabilidad de laderas. De prestarse las condiciones para que el movimiento de masa ocurra, cualquier parte de la ciudad es vulnerable.

Ningún evento ha sido completamente igual a otro, aun así, guardan ciertas similitudes, ya sea por las características de la zona afectada o por los agentes que condicionan o desencadenan los movimientos. De todos los desastres sucedidos algunos destacan por el daño ocasionado o por el impacto que reflejo a la ciudadanía, tal es el caso de los siguientes ejemplos.

Durante los años de 1992, 1998, 2000 y 2002 se reportaron problemas de inestabilidad de laderas en las colonias Cumbres del Rubí, Ignacio Ramírez y Ampliación Tejamen, de la Delegación San Antonio de los Buenos, dentro de la zona de las Sierras Alargadas. El problema se acrecentó con los sucesos del 30 de diciembre del 2002 y finales de enero del 2003, donde 79 viviendas se registraron como pérdida total (CICESE, 2014) significando prácticamente la desaparición del asentamiento humano localizado en la colonia Cumbres del Rubí y afectaciones importantes en las colonias Ignacio Ramírez y Ampliación Tejamen. Este evento marco una pauta para que las autoridades modificaran el Programa de Desarrollo Urbano de la ciudad, definiendo la zona afectada como área verde, para recreación pasiva informal, la cual estaba destinada desde un principio para uso habitacional (IMPLAN, 2005). Con esta modificación las autoridades aseguraron que la zona en cuestión no se considere legalmente habitable y así evitar futuros desastres. En la figura 4 se observa el cambio radical en el entorno de la colonia e ilustra de mejor manera la magnitud del daño generado por el deslizamiento registrado.

Cabe recalcar que el impacto provocado por los daños del evento de Cumbres del Rubí, llevo al grado de emitir una petición por parte del Gobierno del Estado para una declaratoria de desastre natural para efectos de la operación del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN). Esto debido a la afirmación por parte de las autoridades locales que manifestaron que las atenciones de los daños superaron la capacidad operativa y financiera de la entidad (SEGOB, 2003).

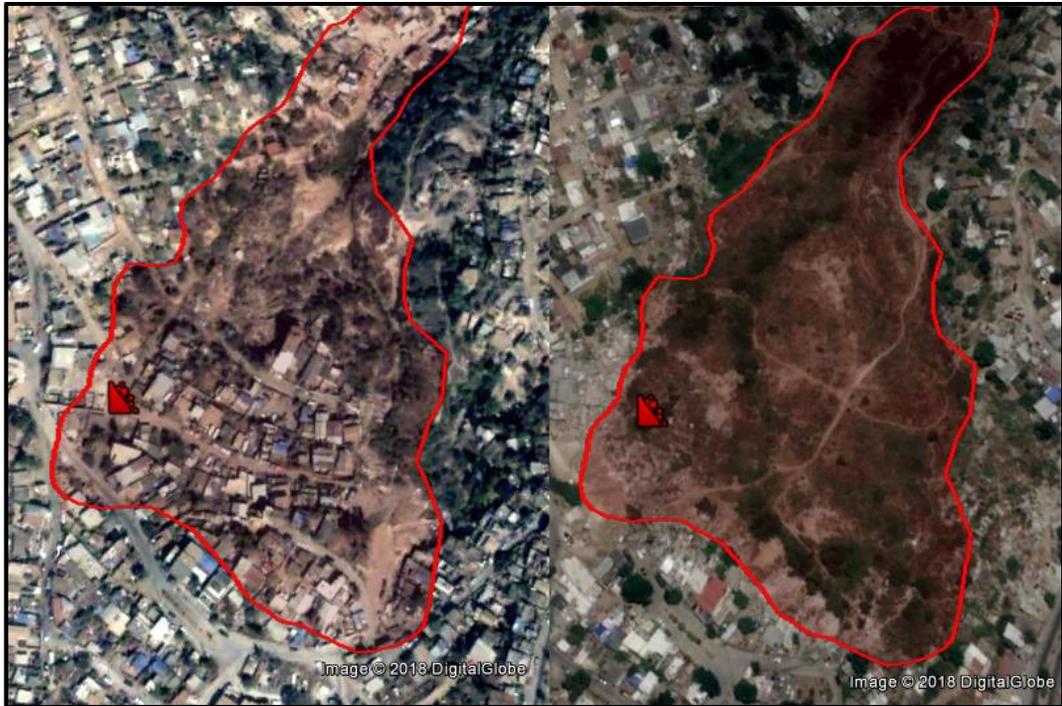


Figura 4. Imágenes satelitales de la colonia Cumbres del Rubí, en Tijuana. Del lado izquierdo se muestra una imagen del 6 de noviembre del 2002, del lado derecho se muestra una imagen del 25 de junio del 2017. El área delimitada en rojo representa la zona de afectación.

Otro caso relevante se presentó en el 2001 en la misma delegación, dentro del fraccionamiento Lomas del Río. Donde 13 edificios de 5 niveles cedieron completamente ante el movimiento de tierra que ocurrió en dicha ubicación. Los estragos del evento fueron mínimos debido a que los inmuebles se encontraban completamente deshabitados, su construcción estaba a punto de terminar y la venta de los espacios estaba en proceso. Las pérdidas se limitaron a ser de carácter material y económico para la empresa constructora. Este ejemplo debió ser considerado piedra angular para cualquier desarrolladora de conjuntos habitacionales en la ciudad, tomando en cuenta los riesgos naturales presentes por las características particulares de cada zona. Lamentablemente no fue así, con el pasar de los años se presentaron más casos de imprudencia que evidenciaron la mala práctica profesional y falta de supervisión por parte de las autoridades. A principio del mes de marzo del 2017, 17 casas de 2 niveles relativamente nuevas colapsaron en el Fraccionamiento Valle Sur de la misma delegación. Los inmuebles presentaron inicialmente agrietamientos y hundimientos importantes que fueron avanzando hasta la pérdida de verticalidad de las casas, estos daños se ilustran en la figura 5. De la noche a la mañana 17 familias perdieron su patrimonio (Corvera, 2017).



Figura 5. Daño en las casas del Fraccionamiento Valle Sur, Tijuana, Baja California (Corvera, 2017).

El ejemplo más reciente de los problemas provocados por la inestabilidad de laderas y además desencadenado por la acción humana, es el caso de Lomas del Rubí. Donde 168 casas fueron declaradas pérdida total después de un deslizamiento presentado en febrero del 2018. Este evento se considera de los más representativos por la cantidad de infraestructura dañada, familias desplazadas y complejidad sociopolítica que rodea la situación. Además, la enorme atención mediática alrededor del desastre y la evidente sensibilidad por parte de la ciudadanía gracias a la difusión de información dentro de los medios de comunicación actuales (redes sociales); Lomas del Rubí se ha convertido en el estandarte de los problemas de inestabilidad de laderas de la ciudad de Tijuana, debido a la proporción de los daños provocados, la posible responsabilidad por parte de terceros en desencadenar el movimiento y la escasa o nula capacidad de las autoridades correspondientes a la planeación y desarrollo urbano en responder ante contingencias de esta índole.

Lomas del Rubí presenta un panorama desolador y triste que representa las consecuencias de una errónea convivencia con el entorno de la ciudad fronteriza de Tijuana. En la figura 6 y la figura 7 se puede observar parte de los daños ocurridos en febrero del 2018.



Figura 6. Colonia Lomas del Rubí antes y después del deslizamiento. En la parte superior se muestra una imagen satelital de la colonia antes del movimiento de masa (Google Earth). En la imagen inferior se observa el panorama actual de la colonia (Fotogrametría por DRON, autoría propia).



Figura 7. Daños en la colonia Lomas del Rubí (Autoría propia, junio 2018).

La manera en la que un deslizamiento cambia radicalmente la imagen de una comunidad es impresionante. El daño provocado, las estructuras colapsadas, años de inversión de las familias afectadas sepultados por toneladas de material y la desolación que rodea a los habitantes desplazados son el contexto que rodea el fenómeno natural que asedia constantemente a la ciudad de Tijuana. Una ciudad rodeada por laderas inevitablemente presentara problemas de inestabilidad, pero los efectos devastadores pueden disminuirse o evitarse y es una obligación conjunta de autoridades y ciudadanía procurar que así sea.

1.3 Daños y pérdidas económicas asociadas

Podemos tipificar dos clases de efectos derivados de un fenómeno natural: directos e indirectos. Los daños directos se producen en el momento del desastre o a las pocas horas; en cambio los daños indirectos se manifiestan a lo largo de un periodo temporal que, a partir de la ocurrencia del fenómeno, puede extenderse varios años (Pérez Fructuoso, 2007).

El impacto asociado a los problemas generados por la inestabilidad de laderas varía en función del volumen de masa trasladada y la presencia de vida y recursos susceptibles a los daños. Un deslizamiento ocurrido en la parte inhabitada o poco poblada de una sierra no tendrá las mismas afectaciones que un evento acontecido dentro de una zona urbana altamente poblada o en las

inmediaciones de cierto tipo de infraestructura tipificada como primordial para la sociedad, por ejemplo, vías de comunicación o redes carreteras, presas y sistemas de abastecimiento de agua potable. Cabe recalcar que los daños asociados no tienen relación alguna con el nivel socioeconómico de la población, como lo menciona Romo Aguilar en el 2002, de igual manera se presentan altos grados de riesgo en zonas de bajo, mediano y alto nivel de ingreso en la ciudadanía.

En Tijuana, como en diversas partes del país, los daños directos e indirectos asociados a la inestabilidad de laderas generan impactos negativos de distinta índole en ámbitos socio-económicos y ambientales. Además de las pérdidas de vida, daño general al entorno, las afectaciones por colapso parcial o total de viviendas y estructuras son cada vez más frecuentes. Las concentraciones de áreas habitadas en zonas de alto riesgo han elevado el nivel de exposición de cualquier tipo de infraestructura presente.

La lista de daños provocados por deslizamientos o caídos en la ciudad puede variar desde el deterioro de viviendas y vialidades, clausura de proyectos irregulares o sin la supervisión adecuada, familias o colonias completamente desplazadas, hasta la pérdida de vidas humanas. Esto demuestra que un área urbana es más susceptible a los efectos por deslizamientos que un área poco desarrollada.

En el periodo de junio – agosto del 2018 se facilitó el acceso por parte de la Dirección de Protección Civil Municipal a las zonas afectadas por los eventos de inestabilidad de laderas de las colonias Lomas del Rubí y Reforma. Durante estas visitas fue posible identificar los siguientes daños provocados por el movimiento de masa en las laderas.

- Daños directos. Los efectos inmediatos que se pueden observar de los sitios afectados inicia con la pérdida total de más de 150 viviendas y terrenos localizados en las inmediaciones del movimiento. Infraestructura de servicios básicos como postes de luz, líneas de energía eléctrica, líneas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado presentan un daño irreparable y representan una pérdida total para los organismos de servicios públicos. Se suma a la merma la infraestructura de servicios privados como líneas telefónicas y equipos pertenecientes a los sistemas de cableado para televisión e internet. Calles y avenidas yacen destruidas en medio de la masa removida junto con las pertenencias personales de las familias afectadas, las cuales no tuvieron oportunidad de rescatar por diversos motivos,

como se observa en la figura 8. Tales bienes varían desde muebles hasta vehículos sin posibilidad de recuperarse. Podemos incluir en esta breve lista el cambio radical en la imagen de las colonias dañadas, la vida cotidiana de las personas alrededor del sitio tiene que cambiar y adaptarse a las nuevas condiciones impuestas por la zona de riesgo. Afortunadamente en este periodo y para los casos citados no se registraron pérdidas humanas, gracias a la oportuna intervención de las autoridades municipales.



Figura 8. Daños directos en una casa habitación y calle Literatos de la colonia Reforma (Autoría propia).

- Daños indirectos. El efecto más relevante derivado de los casos de Lomas del Rubí y colonia Reforma, es el desplazamiento de más de 150 familias afectadas. Es decir, cada una de las personas que perdieron su patrimonio deben esforzarse para reubicarse en otra parte de la ciudad, con o sin apoyo de las autoridades. El impacto psicológico que sufrieron estas familias no debe de subestimarse. Lógicamente los predios afectados no volverán a tener valor habitacional y posteriormente pasaran a ser terrenos abandonados, estos sitios son propensos a convertirse en focos de inseguridad pública, pues albergaran distintos agentes de riesgo para la población: basura, plagas e individuos en condición de calle. A

este factor se suma la presencia de rapiña y actos delictivos producto del abandono de las propiedades afectadas.

Las listas anteriores no son verdad absoluta ni representan la gama de daños directos e indirectos provocados por la inestabilidad de laderas, pero son algunas de las manifestaciones que se observaron durante los meses de junio, julio y agosto en la colonia Lomas del Rubí y Reforma.

Cada uno de los daños directos o indirectos tienen un impacto inmediato o paulatino en la economía local, esto se refleja en pérdidas económicas para la sociedad en general y distintos niveles de autoridad. En México, uno de los casos más representativos ocurrió en octubre de 1999: a consecuencia de las lluvias torrenciales en los estados de Puebla, Hidalgo y Veracruz, se desencadenaron cientos de procesos de movimiento de masa. El impacto ocasionado en la Sierra Norte de Puebla arrojó un total de 2 325 miles de millones de pesos en daños directos e indirectos (Galindo Serrano & Alcántara Ayala, 2015). Dentro de los costos por daños directos se encuentra la infraestructura de carácter habitacional, educativo, salud, servicios, transporte y comunicaciones y de sectores productivos. De los daños indirectos destaca la atención a la emergencia.

El evento de la Sierra Norte de Puebla es un recordatorio de la magnitud a la que puede llegar un fenómeno natural de origen geológico. En la ciudad de Tijuana no se tiene registro de un evento de tal magnitud, pero no demerita la cantidad de daños que provocan los deslizamientos en la región. En cuestión de números no se tiene un registro de alcance público que refleje las pérdidas financieras de los distintos deslizamientos y caídos documentados en la ciudad, pero es de esperarse que la suma ascienda a los cientos de millones de pesos. Considerando el valor de las estructuras destruidas, la infraestructura variada perdida y la enorme inversión por parte de las autoridades para mitigar los efectos negativos.

CAPÍTULO 2. RIESGO POR INESTABILIDAD DE LADERAS

2.1 Conceptos básicos asociados al riesgo

El bienestar y la seguridad de un asentamiento humano se debe en gran medida al nivel de adaptación a las condiciones físicas que lo rodean, su estabilidad dependerá de su capacidad para resistir, mitigar, adecuarse o evolucionar conforme a la dinámica del entorno. Para tratar de entender la relación de los seres humanos con los peligros asociados a su medio físico, existen diversos conceptos y estudios que se manejan con el fin de darle un valor cualitativo y, ya de manera más especializada, un valor cuantitativo a dicha relación. El riesgo, la vulnerabilidad y las amenazas son algunos de los términos asociados a los desastres. Cada profesionalista, especialista o autor ajusta sus marcos conceptuales de acuerdo a su área de interés. Existen diversos estudios y una gran cantidad de metodología e información relacionada con la gestión del riesgo, para este trabajo profundizar en tal grado queda fuera del alcance planteado, por lo tanto, este capítulo solo retomaremos algunas nociones fundamentales y su relación entre sí, para sustentar las bases necesarias que rodean al concepto del riesgo por inestabilidad de laderas.

2.1.1 Desastres

La Ley General de Protección Civil señala que los desastres son el resultado de la ocurrencia de uno o más agentes perturbadores severos y/o extremos de origen natural o de la actividad humana, que acontecen en un tiempo y lugar determinado, causando daños que por su magnitud exceden la capacidad de respuesta de la comunidad afectada. Entendiendo a los agentes perturbadores como cualquier acontecimiento que pueda impactar a un sistema afectable, en este caso cualquier población o entorno, y llegue a transformar su estado normal a un estado de crisis o daños (García Alanis, 2002). Esta situación implica una desorganización de los patrones normales de vida en la zona afectada, contemplando cualquier clase de daños y el sufrimiento de las personas, la flora y la fauna circundante. Lo anterior determina la necesidad de asistencia y de intervención inmediata (Vázquez Paulino, Backoff Pohls, Gonzalez Moreno, & Morales Bautista, 2016).

Los agentes perturbadores más comunes que derivan en la ocurrencia de un desastre son los llamados fenómenos naturales, entendiéndolos como el resultado de la dinámica natural del ecosistema, que a nuestra percepción van más allá del comportamiento regular de la naturaleza. En México, el Sistema Nacional de Protección Civil reconoce, de acuerdo a su origen distintos agentes perturbadores (figura 9). No obstante, en tal sentido surgen y se analizan día con día nuevos agentes que puedan entrar en dicha clasificación, debido al crecimiento demográfico, asentamientos irregulares, variación de patrones socioculturales y el constante desarrollo tecnológico, que llegan a modificar las calamidades y repercuten a la sociedad de manera distinta cada vez (García Alanis, 2002). Por otro lado, existen los fenómenos originados por la acción humana, denominados fenómenos antropogénicos o de origen antrópico.

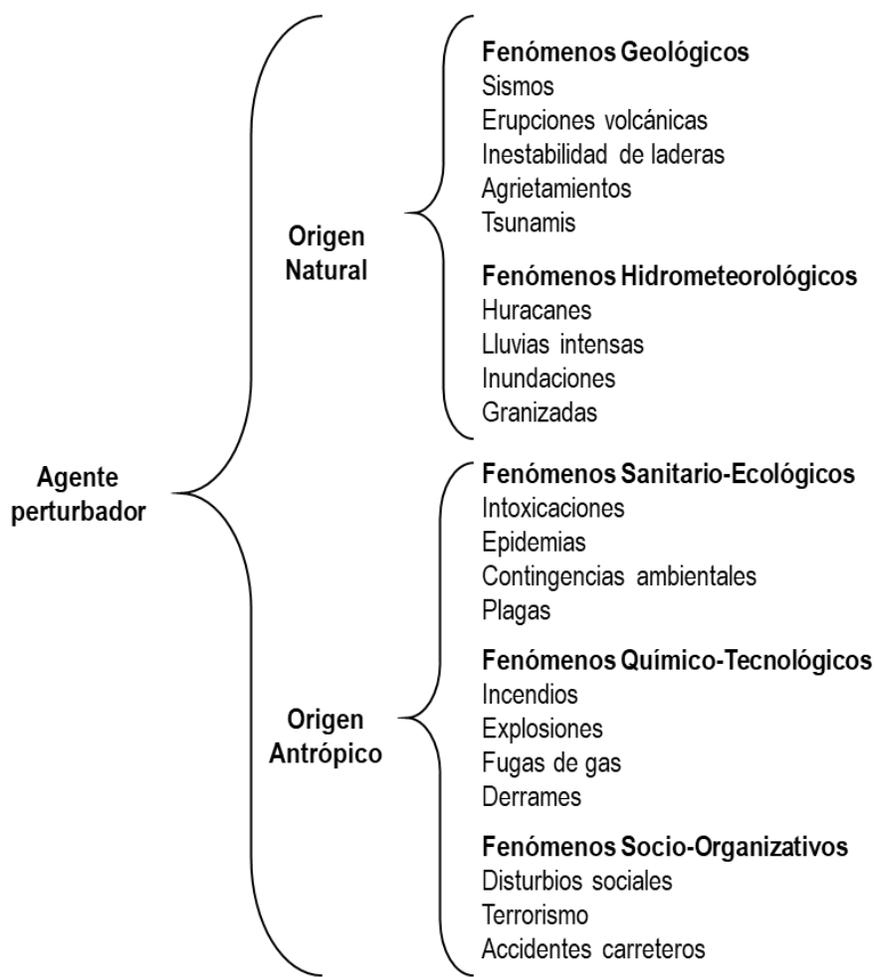


Figura 9. Clasificación de los agentes perturbadores. Elaboración propia (Ley General de Protección Civil, 2012).

Dentro de los fenómenos de origen natural de orden geológico podemos ubicar a los problemas generados por la inestabilidad de laderas, diferenciándolos de los sismos y las erupciones volcánicas. Cabe recalcar que ambos son frecuentes factores que desencadenan los problemas de inestabilidad de laderas.

2.1.2 Riesgo

De acuerdo con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), organismo de las Naciones Unidas, el riesgo es definido como la magnitud probable de daño de un ecosistema específico o en algunos de sus componentes, en un periodo determinado, ante la presencia de una específica actividad con potencial peligroso. Esta idea se entenderá como los daños probables sobre un sistema afectable, resultado de la interacción entre su vulnerabilidad y la presencia de un agente perturbador (Ley General de Protección Civil, 2012).

Así entonces, el riesgo estará en función de dos componentes, la vulnerabilidad del sistema y la amenaza potencial de un agente perturbador.

$$Riesgo = Amenaza \times Vulnerabilidad \quad (1)$$

2.1.3 Amenaza

La amenaza se entiende como cualquier fenómeno o proceso de cualquier origen, cuya ocurrencia puede generar efectos dañinos o una serie de afectaciones para cualquier entidad. Por lo tanto, será cualquier agente que represente un inminente daño a un sistema afectable (García Alanis, 2002).

Si aplicamos esta sencilla manera de conceptualizar la amenaza en un problema de inestabilidad de laderas en la ciudad de Tijuana:

- La amenaza se verá reflejada en el volumen de suelo o roca propenso a desplazarse o desprenderse del cuerpo de una ladera, derivado de una lista de factores condicionantes y

desencadenantes. La amenaza será entonces, el deslizamiento, caído o derrumbe de una ladera.

2.1.4 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es definida como la disposición interna a ser afectado por una amenaza (CEPAL, 2002), se refleja como la propensión o susceptibilidad de un sistema afectable a sufrir daños o pérdidas ante la presencia de un agente perturbador, determinada por distintos enfoques, como dimensiones físicas, sociales y políticas. Se expresa comúnmente en escalas desde 0 (sin daño) hasta 1 (pérdida total).

La vulnerabilidad depende de distintos factores que diversos autores como Wilches-Chaux en 1993 y Cardona en el 2001 catalogan como dimensiones de la vulnerabilidad. En el documento de Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales, de la CEPAL en el 2002, señala de manera sencilla los siguientes factores que condicionan a la vulnerabilidad:

- *Grado de exposición*, que es el tiempo y modo en que se somete un sistema a los efectos de una actividad potencialmente riesgosa, esto es, cuánta energía potencialmente destructiva recibe y por cuánto tiempo.
- La *Protección* son defensas del sistema que permiten reducir o eliminar la afectación que podría causar una amenaza.
- La *Reacción inmediata* es la capacidad del sistema para reaccionar, protegerse y eliminar el daño en el momento en que se presenta la amenaza.
- La *Recuperación básica* es el restablecimiento de las condiciones esenciales de subsistencia de los componentes del sistema.
- *Reconstrucción* es cuando se recupera el equilibrio y las condiciones normales del sistema, su retorno a la condición previa o algo deseable sería a una nueva condición más evolucionada y menos vulnerable.

La capacidad de recuperación básica y de reconstrucción constituyen la resiliencia (CEPAL, 2002), o capacidad de cualquier sistema para reponerse después de haber sido alterado por una amenaza o situación de crisis (García Alanis, 2002).

De nuevo ejemplificando los conceptos anteriores en un caso de deslizamiento de laderas, los factores mencionados asociados al problema serán:

- Toda la población que habita sobre la pendiente de una ladera, sus pertenencias y propiedades, infraestructura pública y privada ubicada dentro de zonas de riesgo de la ciudad, representando un alto grado de exposición ante un deslizamiento de laderas.
- La presencia de infraestructura diseñada con fines de contención, como muros o bermas y la vegetación apropiada que pueda servir como medios para detener un movimiento de masa representan la protección del sistema.
- A pesar de la actuación e intervención de los cuerpos de emergencia en la ciudad y la escasa participación, por desconocimiento, de la ciudadanía ante la ocurrencia de un deslizamiento, se contempla en la reacción inmediata del sistema. En este sentido cabe recalcar que la ausencia de un mecanismo de alerta inmediata y la poca preparación de la comunidad influye en la incapacidad de reacción de la ciudad.
- Esencialmente las poblaciones de las zonas afectadas no cuentan con la capacidad autónoma de lograr condiciones de sobrevivencia ante la ocurrencia de un deslizamiento, idealmente, deben existir acciones municipales, estatales y federales que garanticen las condiciones básicas de subsistencia para los afectados.
- La zona del deslizamiento se convierte en un área inhabitable, la presencia de infraestructura urbana queda prohibida por el riesgo presente. Las familias afectadas son desplazadas y reubicadas en nuevos asentamientos, donde pueden tratar de recuperar sus condiciones de vida; el proceso es paulatino y puede demorar varios años, por lo tanto, la reconstrucción es lenta.

Con este ejemplo podemos determinar que el desastre provocado por un deslizamiento se atribuye a la elevada vulnerabilidad de la sociedad Tijuanaense, el grado de exposición y las pocas o nulas medidas de protección y prevención.

2.1.5 Prevención de desastres

Las amenazas son inherentes a todas las actividades que realiza el ser humano. Lo que realmente hace la diferencia depende de la respuesta y acciones previas adoptadas con el fin de mitigar o eliminar los efectos de la ocurrencia de un desastre, esto se traduce en un conjunto de disposiciones y medidas anticipadas cuya finalidad estriba en impedir o disminuir los efectos que se producen. Esto, entre otras acciones, se realiza a través del monitoreo y vigilancia de los agentes perturbadores y de la identificación de las zonas vulnerables del sistema afectable; población y entorno, con la idea de prever los posibles riesgos para establecer mecanismos de acción que permitan evitar o mitigar los efectos destructivos (García Alanis, 2002).

Prevenir un desastre es adelantar acciones para reducir la amenaza o la vulnerabilidad que ponen en riesgo a una comunidad, mediante la intervención en uno o más de los factores que las constituyen. De acuerdo a la CEPAL la prevención de desastres se puede alcanzar con el control de la amenaza y por reducción de la vulnerabilidad del sistema afectable.

La primera opción es en esencia una propuesta ideal, pensar en controlar los agentes que pueden provocar daños a un sistema podría llevar a la solución del problema y reducir en su totalidad las consecuencias de la ocurrencia de un agente perturbador. En el contexto de la prevención de desastres, controlar los fenómenos de origen natural es algo impensable o imposible en la actualidad. Las alternativas en este rubro se reducen en controlar las actividades o eventos detonadores de los fenómenos, y esto solamente se puede dar en algunos casos, como los eventos climatológicos; pues se puede reducir parcialmente las actividades que inciden negativamente en el clima. Se debe tener claro que los seres humanos no podemos impedir la presencia de ciertas amenazas naturales, como las de origen geológico: la actividad sísmica y volcánica.

Por otra parte, la prevención de desastres por reducción de la vulnerabilidad se enfoca en la intervención de los factores que determinan la susceptibilidad de un sistema a ser afectado. Y esto implica: reducir tiempos e intensidades de exposición o alejar completamente a una población de la zona amenazada. Invertir y mejorar las acciones de protección. Mejorar la capacidad de reacción inmediata mediante mecanismos de monitoreo y alerta temprana, organización y preparación comunitaria y apoyo integral a los esfuerzos realizados por los departamentos de emergencia de la

ciudad. Crear políticas y mecanismos que garanticen la respuesta de recuperación básica y reconstrucción de las zonas afectadas, logrando la recuperación definitiva o el aprendizaje necesario para reducir los efectos de futuras contingencias.

A diferencia del control de las amenazas, que solamente es posible en algunos casos, reducir los factores que determinan el grado de vulnerabilidad de una población siempre es posible. El objetivo de la prevención es lograr mitigar o eliminar los efectos provocados por la ocurrencia de un fenómeno natural, en este caso de origen geológico. Los mayores esfuerzos de prevención se deben enfocar en la reducción de los factores de vulnerabilidad.

2.2 Necesidad de invertir recursos en la prevención de desastres

De manera objetiva se deben evaluar las amenazas a las que se expone la población, para tener un conocimiento certero del grado de vulnerabilidad y el posible efecto negativo relacionado con la incidencia de dichas amenazas. De esa manera será posible determinar cuál sería la mejor decisión previa como respuesta ante la amenaza detectada, en el mejor de los casos, marcará la diferencia entre la tranquilidad y la angustia de la población. Para determinar las acciones a seguir, distintos especialistas como García Alanís en el 2002, coinciden que se deben realizar constantes tareas de monitoreo y vigilancia de las características de los agentes perturbadores y las condiciones de vulnerabilidad de la población que pueden aumentar la probabilidad de ocurrencia de un desastre; como la identificación de las zonas vulnerables del sistema afectable. Esto con el fin de prever las posibles consecuencias y establecer así mecanismos y estrategias que permitan evitar o mitigar los efectos destructivos.

En este contexto resalta la seguridad, que en esencia, es la garantía para los seres humanos de poder vivir en plenitud en ausencia de cualquier amenaza que ponga en riesgo cualquiera de sus derechos fundamentales (MILENIO, 2017). Además de ser un problema de desarrollo, la prevención de desastres es una condición esencial en la seguridad humana y su garantía compete predominantemente al nivel gubernamental. Será integral y eficaz en la medida en que los distintos órdenes de gobierno logren integrar acciones en sus distintos frentes y la gestión ciudadana en torno a los objetivos de seguridad pública, personal y ambiental. Vale la pena señalar que la

responsabilidad respecto a la prevención de desastres no recae exclusivamente sobre las autoridades, en una comunidad donde se realice una correcta gestión de información y mecanismos de prevención no se tendrán los efectos esperados si la mayoría de los habitantes no cuentan con una cultura de prevención, no son partícipes de dichos mecanismos y predomina una actitud de indiferencia ante los acontecimientos de dicha magnitud. La eficacia de los sistemas de prevención debe implicar a todos, desde los ciudadanos, hasta los líderes políticos, pasando por instituciones gubernamentales, sector privado, organizaciones de la sociedad civil, organismos académicos, científicos y técnicos (Clark, 2012).

Por otra parte, como consecuencia del crecimiento poblacional, más personas e infraestructura se ven expuestas a los efectos de los desastres. De acuerdo al informe presentado en el 2015 por el Overseas Development Institute (ODI por sus siglas en inglés), se estima que el promedio de pérdidas internacionales anuales por desastres entre 1991 y 2010 fue de 117 mil millones de dólares (con el valor monetario del 2010). Estas estimaciones no incluyen las pérdidas indirectas, que aumentarían considerablemente estas cifras. Bajo este contexto, se han gastado en el mismo periodo 13.65 mil millones de dólares en la asistencia para la reducción de riesgos por desastres, el cual representa aproximadamente el 13% del financiamiento internacional de asistencia para desastres. En contraste, la mayoría del financiamiento, 66.9 mil millones de dólares (66%), se destina a respuestas de emergencia, mientras que el resto aproximado al 21% se destina a la reconstrucción y la rehabilitación (figura 10).

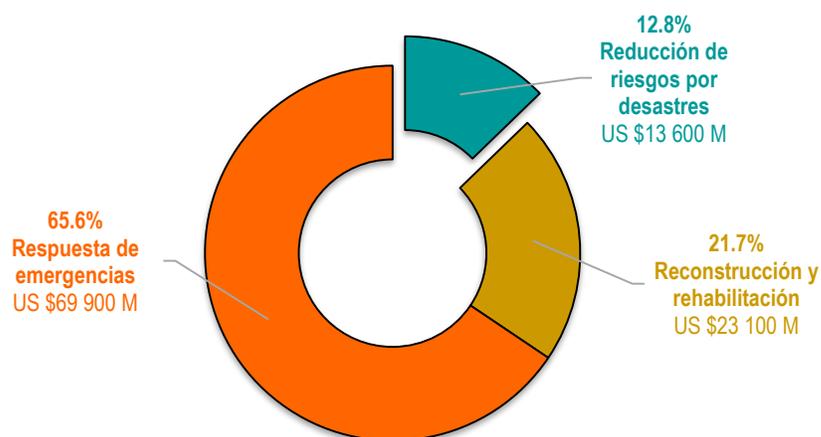


Figura 10. Distribución de la asistencia para el financiamiento de desastres en el periodo 1991-2010 (ODI, 2015).

Con respecto a lo antes planteado, es evidente que el gasto invertido en relación a los desastres se realiza ampliamente *a posteriori*. Es decir, el enfoque internacional se declina por modelos de reacción ante emergencias y se ve reflejado en los montos de inversión internacional para la asistencia, donde los programas de prevención y preparación para desastres representan un pequeño porcentaje del financiamiento. De acuerdo a la información presentada por la ODI en el 2015, se destinan más recursos a apoyar la preparación y la recuperación que a entender las vulnerabilidades fundamentales de cada comunidad que llevan a los desastres.

Lamentablemente en la ciudad de Tijuana se sigue esta misma tendencia: predominan modelos de reacción ante las emergencias, enfocando acciones en las respuestas de asistencia inmediata y en las capacidades de rehabilitación. Es necesario encaminar esfuerzos hacia un enfoque más preventivo. Clark señala desde una perspectiva del desarrollo, que la reducción del riesgo por desastres es vital para construir un futuro más equitativo y sostenible. Para ello es necesario lograr inversiones en prevención y preparación, no solamente en reacción y rehabilitación, de esta manera lograr reforzar la resistencia de la sociedad ante los desastres.

Es necesario financiar los sistemas de prevención adecuados para la reducción de riesgos asociados a la ocurrencia de problemas de inestabilidad de laderas en la ciudad de Tijuana, además, debe de apoyarse por las medidas integrales necesarias que respalden dichos sistemas. Esto con el fin de producir los conocimientos e información adecuada; como evaluaciones de riesgo y vulnerabilidad y sistemas de información. Asimismo, generar trabajos de investigación, innovación y transferencia tecnológica que apoyen con un grado de certeza a las decisiones relacionadas con la reducción de riesgos asociados a los problemas de inestabilidad de laderas en la ciudad.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LADERAS

3.1 Fallas posibles sobre una ladera

Los problemas de inestabilidad de laderas son parte de los fenómenos de origen geológico más destructivos que se presentan en nuestro país. Representan una de las amenazas más peligrosas para la vida y el entorno natural de cualquier asentamiento, producen cambios radicales en la morfología del relieve y tienen la capacidad de dañar cualquier infraestructura que se encuentre al paso del movimiento de masa. El volumen total de daños se puede comparar, e incluso superar, al de los sismos y las inundaciones.

La mayoría de los movimientos de ladera en la ciudad de Tijuana se pueden catalogar como desastres extensivos; refiriéndose a aquellos fenómenos de pequeña escala que generan pérdidas de vida menores a 25 personas y menos de 300 viviendas destruidas. El impacto de los daños producidos por la inestabilidad de laderas suelen llamar la atención de los medios locales y posiblemente regionales, sin necesidad de recurrir al apoyo nacional o internacional. El problema de esta clase de fenómenos es su frecuencia cada vez mas alta; los eventos pequeños implican periodos cortos de recuperación y merman la posibilidad de resistir fenómenos de mayor magnitud. La recurrencia de esta clase de desastres disminuye la capacidad de desarrollo de las zonas y poblados afectados, y conducen a una inexorable acumulación de vulnerabilidades, lo cual deriva en efectos más agudos durante la ocurrencia de desastres más grandes (UNISDR, 2017).

En este capítulo se pretende ampliar el marco conceptual que respecta a las características y calificación de los distintos movimientos provocados por la inestabilidad de laderas. Es pertinente mencionar que el estudio de los procesos inherentes al movimiento de laderas concierne a una gran variedad de disciplinas, los trabajos arrojados han sido desarrollados a lo largo de los años y por distintos autores internacionales. El siguiente apartado se basa en la terminología presentada por Cruden y Varnes en 1993, la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (IAEG por sus siglas en inglés) y trabajos desarrollados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres.

3.1.1 Nomenclatura de una ladera

Cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que han de adoptar las estructuras de tierra se le conoce como talud o ladera, éstas poseen pendientes o cambios de altura significativos. Aquella pendiente cuyo origen deriva de manera artificial por la acción del hombre se define como “talud” y “ladera” cuando su conformación tuvo como origen un proceso natural (Juárez Badillo, *Mécanica de Suelos 2: Teoría y Aplicaciones de la Mécanica de Suelos*, 2016).

Suárez Díaz en el 2009 menciona que los taludes y laderas se definen por distintas secciones o partes, las cuales comprenden una zona superior, una parte intermedia semirecta y una parte baja o inferior (figura 11). Dichos elementos se definen a continuación:

- *Corona, hombro o cima.* Se refiere al sitio ubicado en la parte superior donde existe un cambio brusco de pendiente, generalmente presentan una forma cóncava en las laderas. Cuando la pendiente de este punto hacia abajo es muy cercana a la vertical, se le denomina escarpe.
- *Pie.* Corresponde al lugar donde se presenta un cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud o ladera.
- *Altura.* Distancia vertical que existe entre el pie de la estructura y la corona. Generalmente se encuentra bien definida en los taludes, pero su identificación se complica en las laderas debido a que el pie y la corona no son zonas bien establecidas.
- *Pendiente.* Se define como la medida de la inclinación que presenta la ladera o el talud. Se registra en grados, en porcentaje o en una relación $x:1$, siendo x la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical.
- *Altura del nivel freático.* Es la distancia vertical medida desde el pie de la ladera o talud hasta el nivel del agua medido debajo de la corona. En dicho nivel de agua, la presión es igual al cero manométrico, es decir, existe una presión igual a la atmosférica.

En cada país o región se utilizan algunos vocablos propios para definir la nomenclatura mencionada anteriormente.

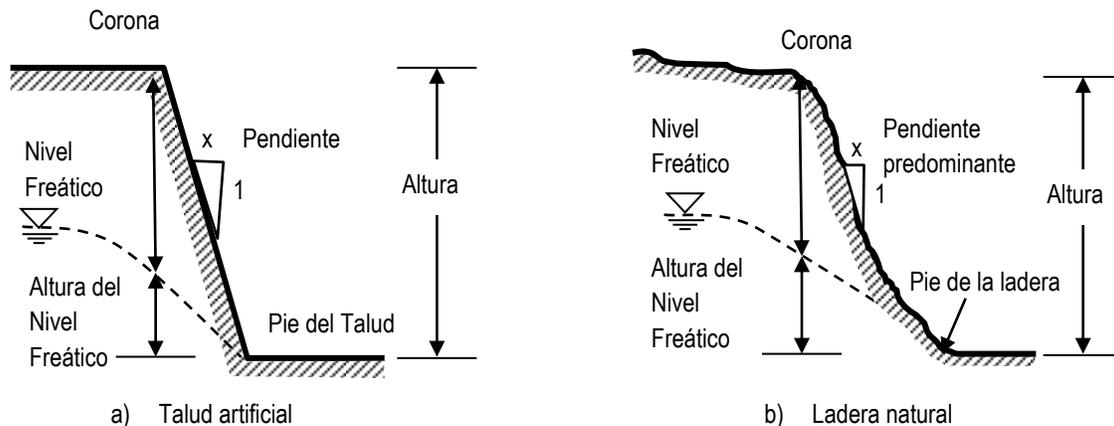


Figura 11. Nomenclatura de taludes y laderas.

3.1.2 Clasificación de los movimientos

Se entiende como movimiento de ladera aquellos desplazamientos de roca, suelo o partículas que afectan la estructura de un talud o ladera. Estos desplazamientos en sentido descendente son consecuencia, la mayoría de las veces, de la acción de la gravedad sobre los materiales que componen el cuerpo de la estructura.

Existen distintos términos que hacen alusión a los problemas originados por la inestabilidad de laderas, de tal manera que conceptos tales como procesos de remoción en masa, movimientos de ladera, movimientos de masa, procesos gravitacionales, movimientos de terrenos, deslaves y deslizamientos son empleados ampliamente para indicar que una ladera no es estable (CENAPRED, 2008). Es necesario aclarar que en este trabajo el concepto de deslizamiento no se utiliza como una expresión que englobe todos los mecanismos de falla posibles en una ladera. Tanto en sus características como en su origen, se rige por ciertos procesos distintos de los demás movimientos de ladera.

La clasificación de movimientos se presenta de acuerdo a lo señalado en el 2009 por Suárez Díaz en el primer capítulo de su libro de Deslizamientos, basándose en el sistema propuesto por Varnes en 1978.

Caído o Derrumbes

Se describen como desprendimientos abruptos de suelo y fragmentos de roca desde un talud o ladera de pendiente fuerte o muy cercana a la vertical. Estos desplazamientos de masa de cualquier tamaño se producen principalmente por caída libre, a saltos o rodando. Representan un riesgo importante para cualquier elemento que se situó debajo de la pendiente o el escarpe (figura 12).

El movimiento es muy rápido y puede o no, ser precedido por movimientos menores dentro del cuerpo de la ladera que conduzcan a la separación de los materiales. Generalmente es notoria la presencia de agrietamientos en la corona del talud o ladera, lo cual indica un deterioro en la estabilidad de la estructura.

De acuerdo a Suárez Díaz, los movimientos tienden a comportarse en caída libre cuando la pendiente predominante es mayor de 75° , en taludes o laderas de ángulo menor, los materiales desprendidos frecuentemente rebotan o “saltan” y en las pendientes menores de 45° los materiales tienen a rodar.

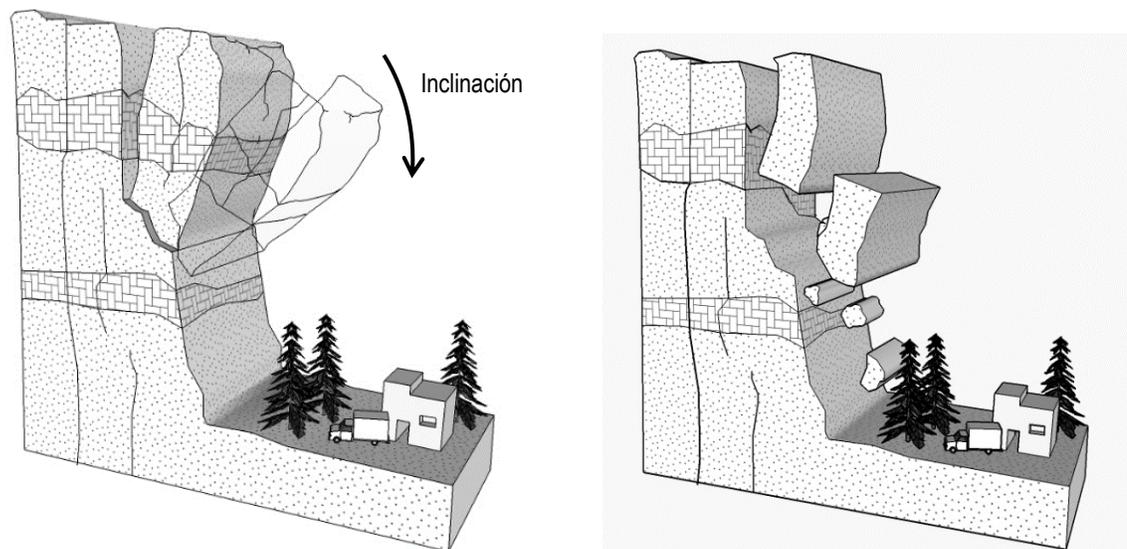


Figura 12. Volcamiento y caídos de material en laderas de pendiente mayor a 75° (Suárez Díaz, 2009).

Dentro de esta clasificación ubicaremos los movimientos de inclinación o volcamiento, que si bien su mecanismo consiste en la rotación de bloques de material hacia el frente del talud o ladera,

comúnmente terminan en caídos o derrumbes (Mendoza López, Domínguez Morales, Noriega Rioja, & Guevara Ortiz, 2002). Las características geológicas y geomorfológicas determinan la naturaleza del desprendimiento del material en el cuerpo del talud. Por lo general, estos movimientos son lentos o extremadamente lentos al inicio del proceso y aumentan su velocidad con el tiempo.

Reptación

La reptación consiste en movimientos lentos o muy lentos de suelo sin una superficie definida de falla (figura 13). La profundidad del movimiento puede variar desde unos cuantos centímetros hasta varios metros. Comúnmente, ocurre en laderas con pendiente muy tenue y su desplazamiento es de unos pocos centímetros al año, afectando a grandes áreas de terreno.

El desarrollo de la reptación se le atribuye a los procesos de humedecimiento y secado de suelos, usualmente arcillosos, con características expansivas, producto de la incidencia climática. Al entrar en contacto con una cantidad considerable de agua, los suelos saturados de los taludes o laderas tratan de fluir, generando un proceso de reptación. Es común que la reptación preceda a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos, siendo un indicativo adecuado de un posible problema si se identifican a tiempo los indicios de un movimiento.

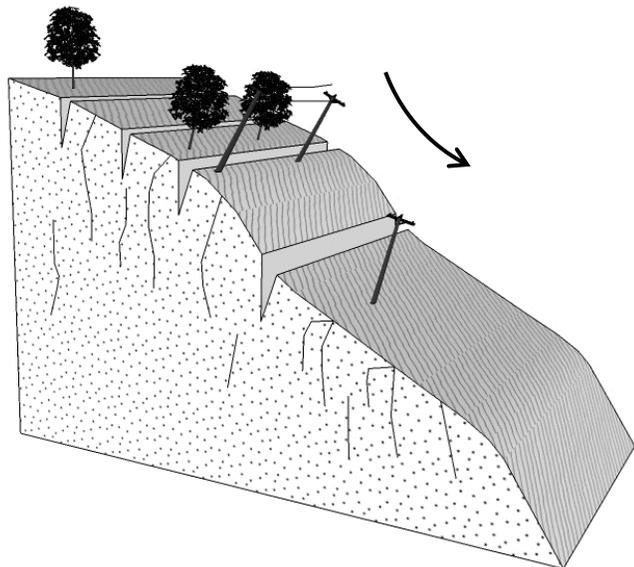


Figura 13. Reptación de una ladera (Suárez Díaz, 2009).

Flujos

En un flujo se presentan movimientos relativos de partículas, o bloques pequeños, dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie, como se puede observar en la figura 14. Los flujos pueden ser desde muy lentos a muy rápidos, con presencia de humedad o sin ella. Los movimientos muy lentos pueden asimilarse en ocasiones, a los fenómenos de reptación y la diferencia consiste en que los flujos se puede identificar fácilmente una separación entre el material que se mueve y el subyacente, mientras en la reptación la velocidad del movimiento disminuye con la profundidad, sin que exista una superficie que defina el movimiento.

La ocurrencia de flujos está asociada con la saturación de los materiales superficiales, frecuentemente activados por la presencia de lluvia o deshielos.

En el informe técnico presentado en el 2002 el CENAPRED señala la siguiente distinción de flujos:

- *Flujos de lodo.* Consisten en masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo muy rápidamente, y que contiene por lo menos 50% de granos de arena, limo y partículas arcillosas.
- *Flujos de tierra o suelo.* Similar a los flujos anteriores, pero con un contenido de 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, fragmentos de rocas y vegetación con aire y agua, formando una masa viscosa o fluida que se desplaza pendiente abajo.
- *Lahar.* Flujo de suelos o detritos que se originan en las laderas de un volcán, generalmente disparado por lluvias intensas que erosionan depósitos volcánicos, deshielo repentino por actividad volcánica, o bien por rotura o desbordamiento de represas de agua.

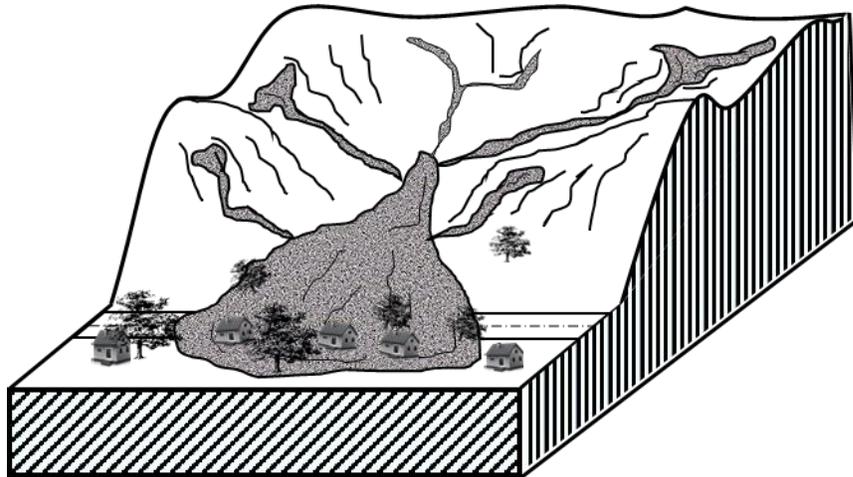


Figura 14. Flujo de material sobre una ladera (Suárez Díaz, 2009).

Hundimientos

Los hundimientos son movimientos comúnmente verticales de masas de suelo, las cuales ocurren una disminución de volumen general del terreno. Los procesos de hundimiento de gran magnitud se clasifican como parte de los movimientos en masa o deslizamientos, aunque no necesariamente se presenten en una ladera o talud. Pueden ser de gran magnitud o relativamente pequeños.

La ocurrencia de los hundimientos obedece a diferentes causas, desde la estructura geológica del terreno hasta la presencia de agentes externos que provoquen el debilitamiento del material.

Deslizamientos

Este mecanismo consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies supuestas, cóncavas o planas, conocidas como superficie de falla. Los deslizamientos pueden ser una sola masa que se mueve o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes. Éste movimiento generalmente presenta un carácter progresivo en su mecanismo, es decir, no inicia simultáneamente a lo largo de toda la posible superficie de falla, sino que se va generando en un proceso gradual.

De estos movimientos de ladera se pueden distinguir los denominados deslizamientos rotacionales, deslizamientos traslacionales o planares y deslizamientos compuestos. La diferencia entre ellos es importante para poder definir el sistema de análisis y el tipo de estabilización que se puede emplear en la ladera afectada.

En un desplazamiento rotacional la superficie de falla principal resulta de una curva imaginaria cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo de la ladera (figura 15). El material desplazado se desliza por encima de la superficie de falla produciendo un área superior de hundimientos y otra inferior donde se acumula el material resultante del movimiento en el pie de la ladera. Generalmente, el escarpe debajo de la corona tiende a ser vertical, lo cual facilita la ocurrencia de movimientos posteriores, como caídos o derrumbes. Dentro del movimiento principal ocurren otros desplazamientos curvos que forman escarpes secundarios y ocasionalmente se presentan distintos movimientos sucesivos que conforman una zona de deslizamientos rotacionales independientes (figura 17).

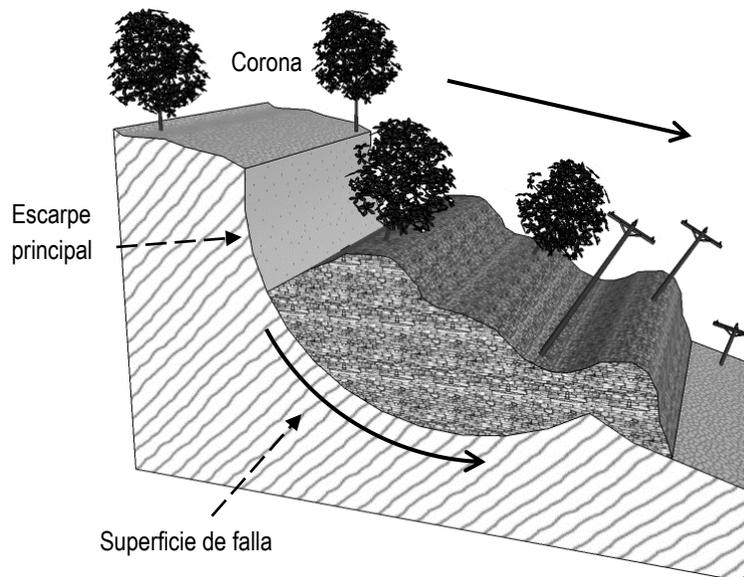


Figura 15. Deslizamiento rotacional típico (Suárez Díaz, 2009).

Los deslizamientos estrictamente rotacionales (superficies de falla circulares) ocurren usualmente en suelos homogéneos, sean naturales o artificiales y debido a su relativa facilidad de análisis son el

tipo de deslizamiento más estudiado. Los casos más conocidos de deslizamientos se presentan en suelos arcillosos.

En el desplazamiento de traslación la masa se desliza hacia afuera y hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y la presencia de un movimiento rotacional es casi nula. Estos movimientos ocurren comúnmente bajo la presencia de un plano de discontinuidad en la estructura del suelo, como pueden ser fallas, juntas o fracturas. Generalmente en estos deslizamientos las superficies de falla coinciden con las zonas de cambio en la resistencia al cortante, es decir, en los cambios estratigráficos del suelo, como se puede observar en la figura 16. Por ejemplo, en laderas compuestas por material sedimentario que descansa sobre una formación de macizo rocoso, el plano donde cambia la roca o el suelo medianamente duro a un suelo poco compactado es susceptible a convertirse en una posible superficie de falla.

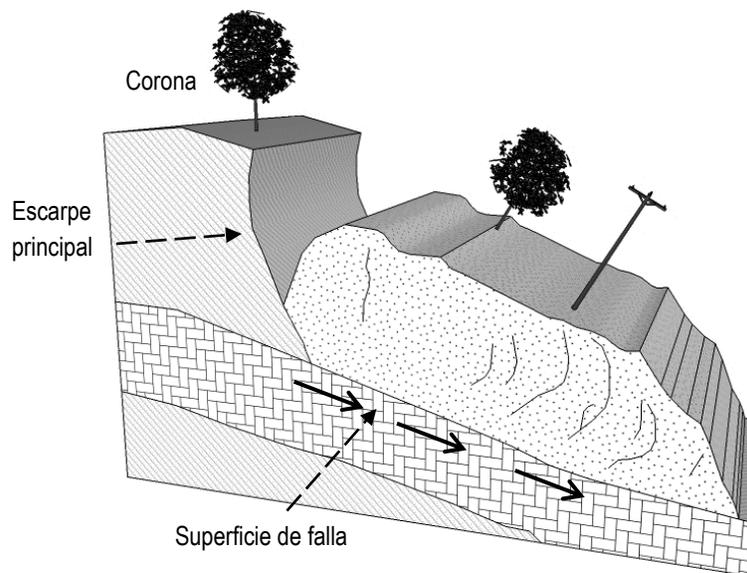


Figura 16. Deslizamiento traslacional (Suárez Díaz, 2009).

Un movimiento de rotación se distingue de un desplazamiento planar por el hecho de que la masa desplazada en un deslizamiento rotacional tiende a estabilizarse al bajar en la pendiente de la ladera y en un deslizamiento traslación, el material puede avanzar indefinidamente a lo largo de toda la ladera hasta llegar al pie de la misma. Otra diferencia importante entre los movimientos se relaciona con la posible aplicación de los diversos sistemas de estabilización; algunos de ellos son viables en deslizamientos rotacionales y poco efectivos en los traslacionales.

Por último, es común que un movimiento de ladera provoque la ocurrencia de otro proceso, dependiendo de las condiciones geológicas y las características de los materiales involucrados serán los tipos de movimientos subsecuentes. A estos desplazamientos se les conoce como compuestos (figura 17). No derivan solamente de los deslizamientos, pueden incluir movimientos de caídos, hundimientos o reptación por igual.

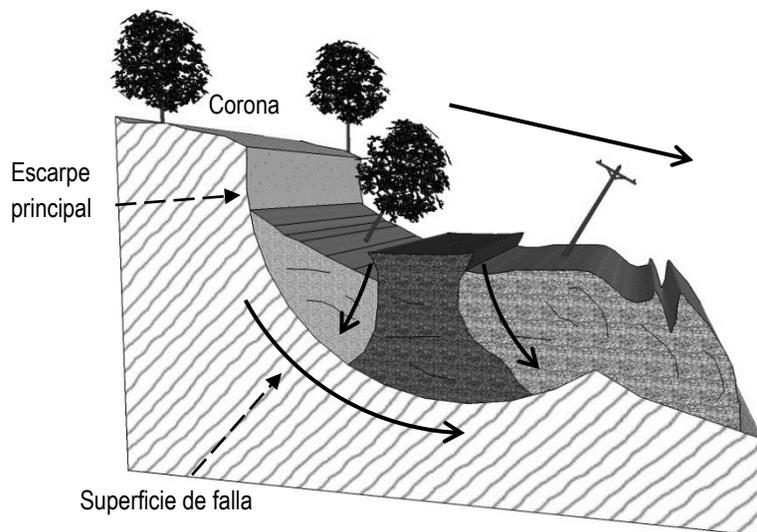


Figura 17. Deslizamientos independientes en un desplazamiento rotacional (Suárez Díaz, 2009).

En la ciudad de Tijuana, la ocurrencia de deslizamientos es más frecuente que cualquier otro tipo de movimientos de masa, esto debido a las características de los suelos mencionadas con anterioridad y los agentes externos e internos que definen la condición de inestabilidad.

3.1.3 Nomenclatura de un deslizamiento

Al momento de presentarse un deslizamiento existen distintas partes que pueden ser localizadas a lo largo de todo el cuerpo de la ladera afectada (figura 18). Estas zonas son descritas por Suárez Díaz en el 2009 basándose en la investigación de Cruden y Varnes en 1993 y el glosario de deslizamientos presentado por la UNESCO en 1993 (International Geotechnical Societies, 1993).

Los puntos que se mencionaran más adelante no son exclusivos de los deslizamientos, la mayoría de ellos se presentan de la misma manera en movimientos como caídos, volcamientos y

reptaciones. Por la razón anterior, en algunas referencias se hace mención de esta nomenclatura como una descripción general de los movimientos de ladera, para fines de este trabajo la terminología presentada tendrá como finalidad describir las partes de un deslizamiento.

- *Corona*. Consiste en la parte más alta del material inalterado. Coincide con la corona de la ladera o talud.
- *Escarpe principal*. Superficie casi vertical del terreno inalterado, producida por el movimiento del material deslizado. Es la parte visible de la superficie de falla.
- *Cima*. Es el contacto entre el material del escarpe principal y la corona del deslizamiento. Es el punto más alto del escarpe.
- *Cabeza*. Zona superior del deslizamiento, situado a lo largo del contacto entre el material desplazado y el escarpe principal. Comprende la parte superior del material que se deslizo.
- *Escarpes secundarios*. Superficies casi verticales localizadas dentro del material desplazado por el deslizamiento. Son producto de movimientos independientes en el material deslizado.
- *Superficie de falla*. Área por debajo del movimiento que delimita el volumen del material desplazado. El suelo por debajo de la superficie permanece sin moverse.
- *Pie de la superficie de falla*. Se define como la zona de transición entre la superficie de falla y la superficie natural u original de la ladera. Normalmente esta línea se encuentra cubierta por el material deslizado.
- *Cuerpo principal*. Es la parte del material desplazado que se sitúa encima de la superficie de falla, localizada entre el escarpe principal y el pie de la superficie de falla.
- *Base*. Porción del deslizamiento que se desplazó más allá del pie de la superficie de falla, el cual cubre la superficie original del terreno en la parte inferior del deslizamiento.
- *Punta*. Se define como el punto de la base que se encuentra más alejado de la cima.
- *Zona de reducción o desprendimiento*. El área del deslizamiento dentro de la cual el material desplazado se encuentra por debajo de la superficie original del terreno y por encima de la superficie de falla. En este lugar se sitúa el cuerpo principal del deslizamiento.
- *Zona de acumulación*. Se define como el área donde se localiza la base del deslizamiento.
- *Superficie original del terreno*. Superficie de la ladera que existía antes de la ocurrencia del movimiento.

- *Costado o Flanco*. Área del material adyacente a los lados de la superficie de falla. Se recomienda describir los flancos usando la orientación geográfica del sitio (Norte, Sur, Este, Oeste), de utilizar los términos izquierdo y derecho, deben referirse a los flancos vistos desde la corona a la base.

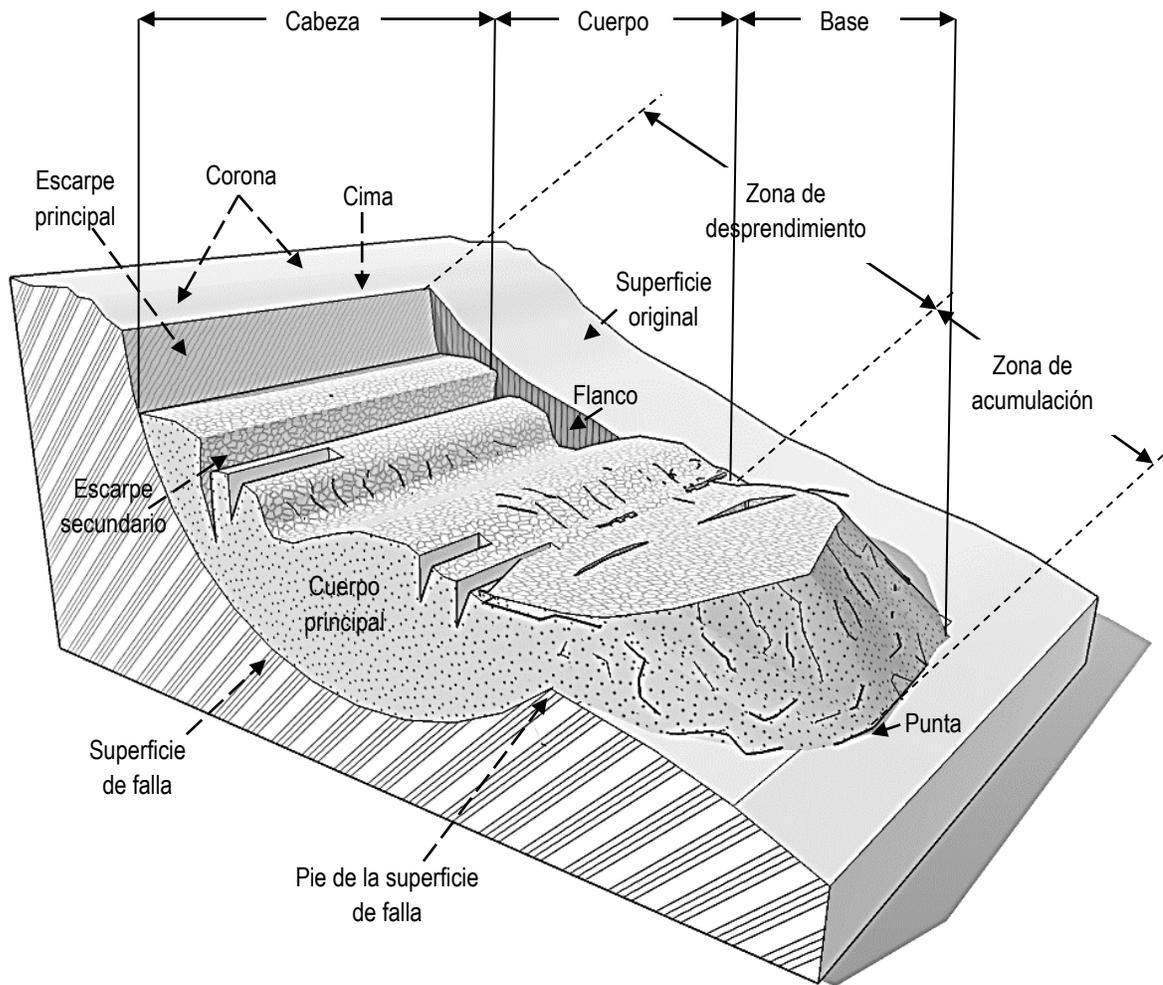


Figura 18. Nomenclatura de un deslizamiento típico (Suárez Díaz, 2009).

Para determinar la extensión del deslizamiento se recomienda utilizar las dimensiones presentadas por la IAEG (figura 19).

- *Ancho de la masa desplazada (Wd)*. Ancho máximo de la masa desplazada, perpendicular a la longitud *Ld*.

- *Ancho de la superficie de falla (W_r)*. Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento, perpendicular a la longitud L_r .
- *Longitud de la masa deslizada (L_d)*. Distancia mínima entre la punta y la cabeza.
- *Longitud de la superficie de falla (L_r)*. Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.
- *Profundidad de la masa desplazada (D_d)*. Máxima profundidad de la masa desplazada medida perpendicularmente al plano conformado por W_d y L_d hasta la superficie de falla.
- *Profundidad de la superficie de falla (D_r)*. Máxima longitud perpendicular al plano conformado por W_r y L_r medida desde la superficie original del terreno hasta la superficie de falla.
- *Longitud total (L)*. Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.
- *Longitud de la línea central (L_c)*. Distancia que hay desde la punta hasta la corona del deslizamiento, equidistante de los flancos del movimiento.

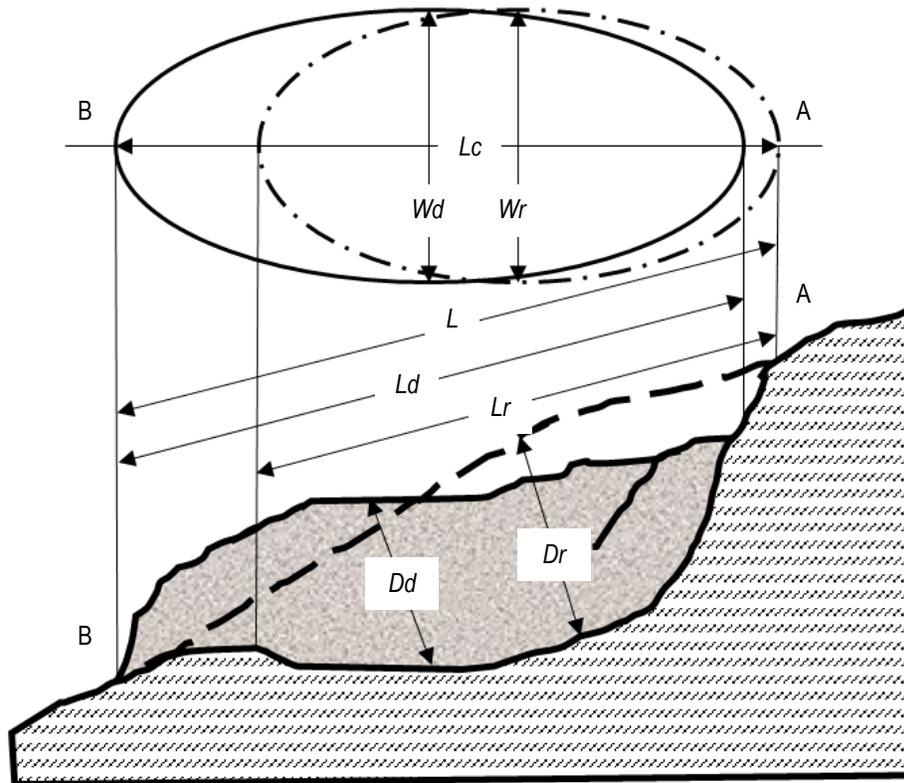


Figura 19. Dimensiones de un deslizamiento (International Geotechnical Societies, 1993).

3.1.4 Caracterización de un movimiento

Al momento de presentar una descripción más certera de cualquier movimiento de ladera es recomendable definir las características que respectan en cuanto a su estado de actividad, estilo, velocidad, tipo de material involucrado y humedad perceptible en el sitio (Suárez Díaz, 2009).

Tipo de material

Para dar una idea general de los materiales que componen el cuerpo de un determinado movimiento de ladera, se pueden utilizar los siguientes términos.

- *Roca*. Se define como roca al material del movimiento cuando es observable la presencia mayoritaria de material con visible dureza y firmeza.
- *Residuos*. Se denomina residuos o detritos al material que contiene una significativa proporción de material granular grueso.
- *Suelos finos*. Se identifica a los materiales con más del 50% de finos (Material que pasa por la malla número 200 de acuerdo al SUCS), su humedad es relativamente baja y no tiene consistencia líquida.
- *Lodos*. Se denomina lodo a un material con más del 50% de finos (Material que pasa por la malla número 200 de acuerdo al SUCS), con humedad cercana o superior al límite líquido. Este tipo de material es común en los flujos de laderas.

Humedad

Suárez Díaz propone cuatro términos para definir las condiciones de humedad visibles en el sitio del movimiento:

- *Seco*. No es visible la presencia de humedad ni agua en el material.
- *Húmedo*. Contiene algo de humedad, pero no posee agua libre y puede comportarse de manera plástica.

- *Saturado*. Contiene suficiente agua para comportarse en parte, como líquido y posee cantidades visibles de líquido que pueden salir del material al contacto con la mano.
- *Sobresaturado*. Contiene la cantidad de agua suficiente para hacer fluir al material, aun en pendientes bajas.

Estilo del movimiento

Cruden y Varnes en 1993 establecieron una nomenclatura para describir la actividad de un movimiento cuando se presentan diferentes tipos de desplazamientos:

- *Complejo*. Un movimiento complejo es aquel que presenta al menos, un par de movimientos distintos. Por ejemplo, reptación e inclinación.
- *Compuesto*. Se refiere al caso en el cual ocurren simultáneamente varios tipos de movimientos en diferentes áreas de la masa desplazada.
- *Múltiple*. Corresponde al desplazamiento que muestra movimientos repetidos del mismo tipo, generalmente ampliando la superficie de falla.
- *Sucesivo*. Se denomina sucesivo a los movimientos repetidos que no comparten una superficie de falla.
- *Sencillo*. Se presenta un solo tipo de movimiento de ladera.

Estado de actividad del movimiento

De acuerdo al estado de actividad en el que se encuentre el movimiento al momento de visitar el sitio afectado, principalmente para deslizamientos (figura 20), se recomienda hacer uso de la siguiente clasificación:

- *Activo*. Deslizamiento que se está moviendo en el momento que se está observando el sitio afectado.
- *Reactivado*. Movimiento que nuevamente se activa después de un estado de inactividad. Generalmente se reactivan aquellos deslizamientos que se encuentran sobre una superficie de falla antigua.

- *Suspendido*. Se les conoce a aquellos desplazamientos que han estado activos durante el último año, pero que actualmente no presentan actividad.
- *Inactivo*. Movimiento que lleva varios años sin actividad aparente.
- *Dormido*. Aquel desplazamiento inactivo donde aparentemente permanecen las causas del movimiento.
- *Estabilizado*. En el caso de que una ladera se ha protegido con la infraestructura adecuada y el movimiento se ha detenido, se le conoce como estabilizado.
- *Relicto*. Se les denomina a aquellos desplazamientos de ladera que se encuentran por debajo de diferentes condiciones geomorfológicas y climáticas que han ocurrido hace varios miles de años.

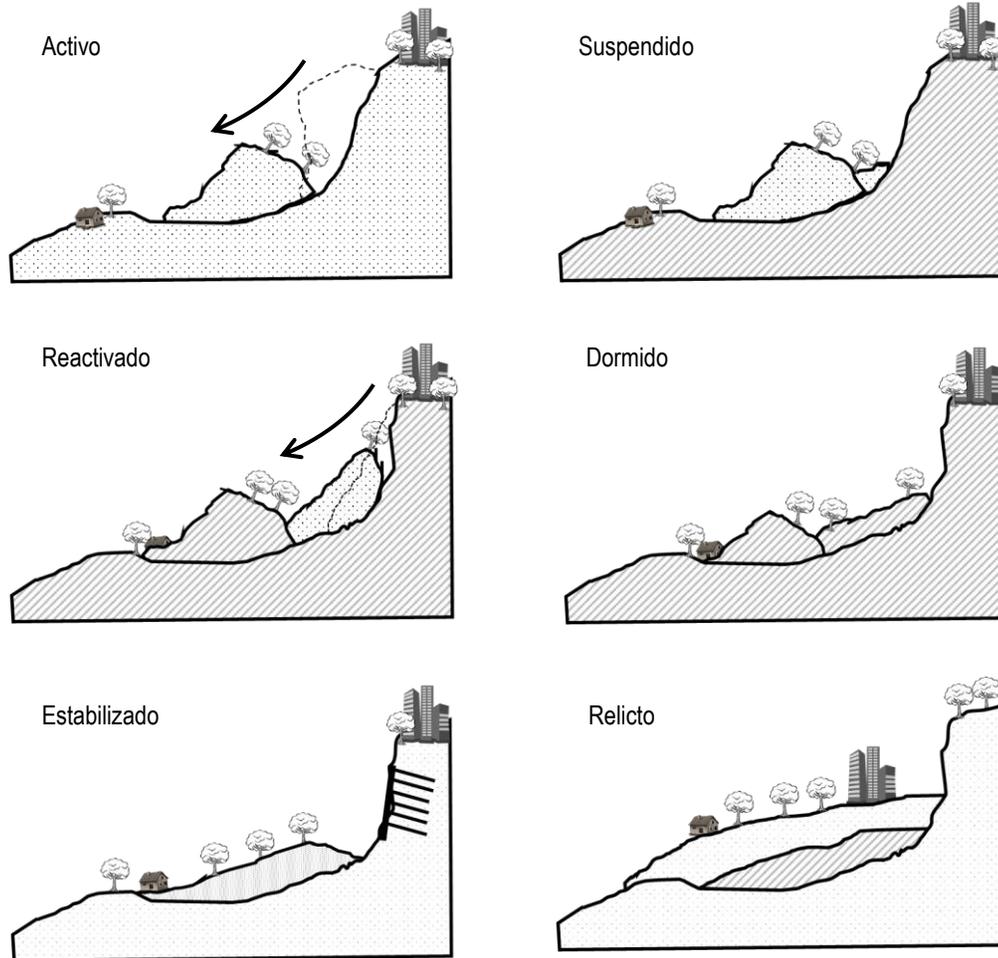


Figura 20. Clasificación de los movimientos de ladera de acuerdo a su estado de actividad (Suárez Díaz, 2009).

Es recomendable aclarar la sutil diferencia entre un movimiento dormido de uno suspendido. La manera más sencilla de identificarlos es por medio de la vegetación que se encuentra sobre la masa desplazada. Cuando se observa tanto en el cuerpo del desplazamiento como en el escarpe principal presencia de vegetación desarrollada, usualmente se habla de un movimiento durmiente. La masa desplazada tiene años sin actividad por lo cual permite el crecimiento de vegetación nueva. Cuando aún es notoria la vegetación dañada por el movimiento y no se observa crecimiento nuevo, comúnmente se trata de un movimiento suspendido (Cruden & Varnes, 1993).

Secuencia del movimiento

Con la frecuencia se hace alusión al progreso de los movimientos que inicia en un área afectada y pueden avanzar o repetirse en una determinada dirección. Suárez Díaz y otros recomiendan utilizar la siguiente terminología:

- *Progresivo*. La superficie de falla se extiende en la misma dirección del movimiento.
- *Retrogresivo*. La superficie de falla se extiende en dirección opuesta al movimiento.
- *Ampliándose*. El área afectada se extiende hacia una u otra dirección de los flancos del movimiento.
- *Alargándose*. La zona afectada crece al agregarse continuamente, volumen de material desplazado.
- *Confinado*. Se refiere a los movimientos que tienen un escarpe visible pero no así, una superficie de falla.
- *Disminuyendo*. El volumen del material que está siendo desplazado, no aumenta y disminuye con el tiempo.

Velocidad del movimiento

La velocidad del movimiento define el tiempo que tarda el material afectado en desplazarse. Ésta velocidad tiene una gran influencia sobre el poder destructivo de un movimiento de ladera. Los desplazamientos que producen catástrofes de gran impacto, ocasionalmente con la presencia de pérdidas de vidas humanas e infraestructura, corresponden a movimientos extremadamente rápidos

donde la posibilidad de evacuación es poco probable. Por otro lado, los movimientos extremadamente lentos son imperceptibles, sin la instrumentación adecuada y representan un riesgo muy bajo para la población (Suárez Díaz, 2009).

La velocidad de un movimiento generalmente es lenta al inicio y gradualmente, o instantáneamente, aumenta. Todo depende de las características del desplazamiento.

La importancia de la velocidad radica en la oportunidad de monitorear el desarrollo del problema y así permitir la toma de decisiones correctas para mitigar o eliminar los daños. En la Tabla 3 se muestra la escala de velocidad presentada en el trabajo de Suárez Díaz.

Tabla 3. Escala de velocidades de los movimientos de laderas.

Descripción	Velocidad		Impacto del movimiento
	(mm/s)	(m/t)	
Extremadamente rápido	5×10^3	5 m/s	Desastre de gran violencia
Muy rápido	5×10^1	3 m/min	Pérdida de algunas vidas, gran destrucción
Rápido	5×10^{-1}	1.8 m/h	Es posible el escape y evacuación, estructuras, posesiones y equipos destruidos
Moderado	5×10^{-3}	13 m/mes	Estructuras poco sensibles pueden mantenerse
Lento	5×10^{-5}	1.6 m/año	Estructuras poco sensibles pueden sobrevivir a través de mantenimiento
Muy lento	5×10^{-7}	16 mm/año	Algunas estructuras permanentes no son dañadas y sufren agrietamientos por el movimiento,
Extremadamente lento			No hay daños en estructuras construidas con criterios de ingeniería adecuados. Movimientos imperceptibles

Todos los parámetros mencionados anteriormente sirven para describir con mayor detalle algún movimiento de ladera que se desee observar. De esta manera el entendimiento de los problemas de inestabilidad de laderas se vuelve más completo, delimitando los factores importantes a la hora de describir un movimiento de masa. En la Tabla 4 se resume la manera en la que se puede caracterizar un momento de ladera.

Tabla 4. Glosario para la caracterización de movimientos en masa.

Tipo	Material	Humedad	Estado de actividad	Secuencia	Estilo	Velocidad
Caído	Roca	Seco	Activo	Progresivo	Sencillo	Extremadamente lento
Inclinación o volcamiento	Residuos	Húmedo	Reactivado	Retroprogresivo	Sucesivo	Muy lento
Reptación	Lodo	Saturado	Suspendido	Ampliándose	Múltiple	Lento
Flujo	Suelos finos	Sobresaturado	Inactivo	Alargándose	Compuesto	Moderado
Hundimiento			Dormido	Confinado	Complejo	Rápido
Deslizamiento			Estabilizado	Disminuyendo		Muy rápido
			Relicto			Extremadamente rápido

Bajo el mismo orden de ideas es posible describir el evento de Lomas del Rubí en la ciudad de Tijuana, bajo una observación preliminar y con las características visibles en la zona afectada. Por lo tanto, en la colonia Lomas del Rubí de la ciudad de Tijuana, Baja California se aprecia la presencia de un deslizamiento rotacional de suelos finos secos. El movimiento hasta octubre de 2018 se puede describir con un estado de actividad suspendido y de carácter múltiple, su desplazamiento sigue un comportamiento progresivo con tendencia a ampliarse.

3.2 Factores condicionantes para la inestabilidad de laderas

En apariencia, la mayoría de las laderas son estructuras geológicas estables, pero bajo ciertas condiciones se convierten en sistemas dinámicos que representa, como ya se mencionó, un enorme riesgo para la población. La inestabilidad en una ladera o talud se debe al desequilibrio entre las fuerzas internas que se oponen a cualquier movimiento y las fuerzas externas que actúan sobre el terreno, de tal manera que las fuerzas desestabilizadoras o motoras superan a las fuerzas estabilizadoras o resistentes. Este desequilibrio puede derivar a una modificación de fuerzas existentes, las cuales condicionan una ladera a la inestabilidad y la exponen a la aplicación de nuevas fuerzas externas, estáticas o dinámicas, que logran desencadenar los movimientos ya mencionados (González de Vallejo, 2002).

La importancia de conocer lo que ocurre interna y externamente en una ladera, radica en poder diagnosticar de manera más certera su comportamiento y por consiguiente, tener la capacidad de tomar las decisiones adecuadas que respectan a temas de prevención y medidas de remediación (Suárez Díaz, 2009).

Los factores que rigen los movimientos de masa son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre la estructura. A estos factores que tienen la capacidad de determinar la estabilidad o inestabilidad de una ladera, se les conoce como factores condicionantes. Generalmente estos elementos dependen de la naturaleza, estructura y forma del talud o ladera.

Los factores más reconocidos por distintos autores son los relacionados con la geometría de la ladera (pendiente y altura), factores geológicos; los cuales condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad (estratigrafía y geomorfología), factores hidrogeológicos (asociados con la presencia de agua en la estructura interna del cuerpo de la ladera), presencia de vegetación en la zona, incidencia del clima y los factores relacionados con el comportamiento mecánico de los materiales, los cuales serán mencionados en el siguiente capítulo.

En este sentido, cabe mencionar que la intervención humana comúnmente rige en la inestabilidad, pasando de un factor condicionante a un disparador de los movimientos de masa. De igual forma se hace mención de algunas actividades humanas que participan en el acondicionamiento de inestabilidad en una ladera.

3.2.1 Factores geométricos

La incidencia de los procesos geológicos y climáticos crean el relieve de la tierra y definen la estructura de cualquier ladera. Es común que las laderas adopten pendientes naturales que tienden a un equilibrio. Estas pendientes con el paso del tiempo y la intervención de diversos agentes externos, son propensas a generar movimientos de material, como se puede observar en la figura 21. No obstante, en ciertas ocasiones y dependiendo de la intervención de otros factores es suficiente una pendiente muy tenue para dar lugar a determinados tipos de movimientos (González de Vallejo, 2002).



Figura 21. Altura y pendiente pronunciada de la ladera afectada por un movimiento en junio de 2018 en la colonia Anexo Reforma en Tijuana, B.C (Imagen obtenida de Google Earth).

Al aumentar la pendiente, frecuentemente aumentan las fuerzas que tratan de desestabilizar la estructura de la ladera. Los taludes y laderas de alta pendiente son más propensos a la ocurrencia de un movimiento, pues las fuerzas gravitacionales tienen más influencia a medida que la inclinación de la estructura aumenta.

De igual manera la altura juega un papel importante dentro de los factores geométricos que condicionan la inestabilidad; al aumentar la distancia de la corona al pie de la ladera, aumenta la cantidad de material propenso a desestabilizarse.

3.2.2 Factores geológicos y geomorfológicos

Las propiedades físicas y resistentes de cada tipo de material que conforma una ladera rigen el comportamiento de los suelos antes los distintos esfuerzos que se presentan. Aspectos como la alternancia de materiales de diferente litología, competencia, grado de alteración y presencia de capas de suelos blandos o de estratos duros, controlan los tipos y disposición de las superficies de falla. De la misma forma en las laderas compuestas por material que se pueda considerar homogéneo generalmente presentan cierto grado de compactación, cementación y granulometría que se predisponen a generar zonas de debilidad y circulación de agua (González de Vallejo, 2002).

La litología determina las características de cada capa de material que conforma la estructura de la ladera y define ciertos patrones de comportamiento en el material. En cada plano de estratificación o cambio de litología se presenta la oportunidad para la presencia de una posible superficie de falla, especialmente cuando el cambio de estratificación es muy brusco. Por ejemplo, mantos de material blando como arena arcillosa sobre mantos de material duro.

Por otro lado, es común que las zonas más propensas a convertirse en posibles superficies de falla sean las debilidades existentes en la estructura del suelo o roca. Estas superficies propias de la geología y geomorfología de la ladera se conforman por las discontinuidades, fracturas, fallas y los ya mencionados planos de estratificación.

La presencia de discontinuidades en define ciertos bloques individuales de material que se mantienen unidos entre sí por las características propias del material. Estos bloques se vuelven propensos a los desplazamientos de ladera cuando las condiciones de inestabilidad se presentan. El hecho de que existan estas discontinuidades y bloques implica un comportamiento anisótropico del cuerpo de la ladera, es decir, el comportamiento de los bloques de material será distinto de acuerdo a la dirección en donde se presenten las fuerzas desequilibrantes.

Otro aspecto importante en términos geológicos, es el buzamiento de las fallas o discontinuidades en una ladera. La inclinación de las distintas capas o bloques de material que conforman la estructura, es determinante para condicionar una zona de inestabilidad. Como se puede observar en la figura 22 la presencia de planos estratigráficos o discontinuidades buzando hacia el frente de un talud, predispone dichas zonas a ser propensas a un posible movimiento.

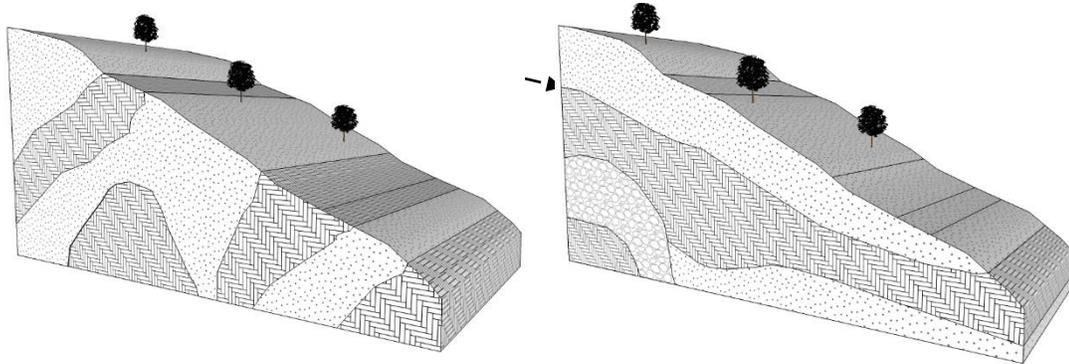


Figura 22. Influencia del buzamiento favorable (Izquierda) y desfavorable (Derecha) en una ladera.

Los distintos cambios y singularidades en la estructura geológica condicionarán los múltiples mecanismos de inestabilidad, predisponiendo el material a ser afectado por cualquier otro agente perturbador.

3.2.3 Factores hidrogeológicos

El agua es el agente que más efectos negativos produce en una ladera, generando la mayor parte de los problemas de inestabilidad; arrastres, erosión superficial o interna y la generación de presiones internas o mejor conocida como presión de poro.

La presencia de agua en una ladera resulta en la reducción de la resistencia de los materiales que la conforman, aumentando las fuerzas motoras que generan la inestabilidad. Los efectos más importantes que señala González de Vallejo son:

- Reducción de la resistencia al cortante del suelo.

- Aumento en la presión de poro.
- Aumento del peso del material saturado.
- Erosión interna por el flujo interno del agua.
- Posibles cambios en la composición mineralógica de los materiales.

Es posible afirmar que el agua es el factor condicionante más peligroso en términos de estabilidad de cualquier talud o ladera. Su presencia se asocia con la ocurrencia de lluvias extraordinarias o fugas en zonas habitadas y al agua correspondiente a la superficie del nivel freático. Este último depende de distintos factores, entre los que se encuentra la permeabilidad de los materiales, la estructura geológica del talud o ladera y las condiciones climáticas que varían año con año. De tal manera que en la temporada de sequía el suelo se mantiene parcialmente saturado, incluso generándose tensión en el agua contenida en los espacios vacíos del suelo, lo que define una resistencia al cortante relativamente aceptable, al ocurrir precipitaciones intensas y prolongadas, se pierde dicha tensión y se genera la presión de poro, la cual debilita la estructura de la ladera (Mendoza López, Domínguez Morales, Noriega Rioja, & Guevara Ortiz, 2002).

La presencia y cantidad de agua dentro de una ladera influye de manera importante en la resistencia de sus materiales, condicionando la estructura ante una posible falla por inestabilidad.

3.2.4 Cobertura vegetal y meteorización

Suárez Díaz en el 2009 señala que la vegetación cumple distintos efectos de protección en la mayoría de los taludes. Representa una capa protectora ante la erosión y afecta los procesos de evapotranspiración y de infiltración del agua. Por lo tanto, las condiciones hidrometeorológicas de una ladera se ven influenciadas por la presencia de vegetación.

El hecho de que exista una capa vegetal sobre una pendiente genera un efecto de estabilización en la superficie del terreno, por el relativo refuerzo que aportan las raíces de la vegetación (figura 23). De igual manera, la producción de materia orgánica puede ayudar a cementar las partículas del suelo. Es evidente que la ausencia o desprendimiento de esta capa natural puede generar problemas de inestabilidad en una ladera o talud.

Por otra parte, la exposición del suelo y/o roca ante los procesos de alteración del entorno deriva, entre otras cosas, en la degradación del material superficial de la ladera. Volviéndolo más propenso ante la ocurrencia de un movimiento.

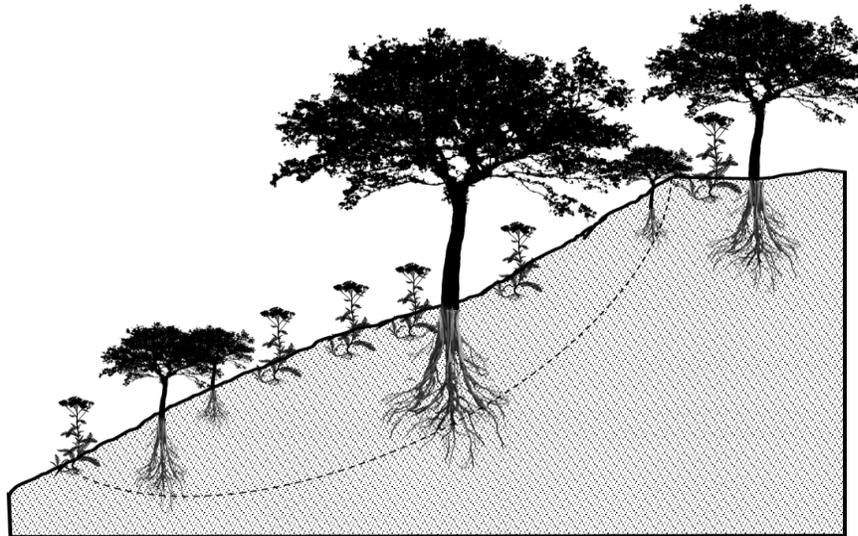


Figura 23. Efecto de la vegetación en la estabilidad de una ladera (Suárez Díaz, 2009).

3.2.5 Factores antrópicos

Gran parte de las intervenciones humanas ocupan un lugar importante dentro de los factores que modifican las condiciones de estabilidad. Cabe recalcar que la mayoría de estas acciones suelen desencadenar los movimientos de ladera, pero algunas pueden clasificarse dentro de los factores que condicionan la inestabilidad y posteriormente convertirse en el agente que inicia un mecanismo de falla.

La falta de conocimiento o la omisión voluntaria de las consideraciones técnicas adecuadas para la construcción de cualquier edificación, puede provocar la inestabilidad de laderas. Algunas acciones consideradas como condicionantes son la modificación del curso o el impedimento de las corrientes de agua, los cambios de irrigación o el drenaje de aguas residuales que son depositadas en el mismo talud, la deforestación y remoción de la capa vegetal.

La aplicación de sobrecargas a lo largo de la pendiente y corona de una ladera es quizá la acción que más influye en la inestabilidad de laderas, tal es el caso de los asentamientos sobre las mismas,

como se puede observar en la figura 24. Si las condiciones de la estructura ya son desfavorables con la existencia de distintos factores que ya se mencionaron, tal es la presencia de suelos blandos, discontinuidades propensas a convertirse en superficies de falla y una pendiente pronunciada, aumentar el riesgo de activar un movimiento de ladera con la edificación de inmuebles que evidentemente aportan peso al ya debilitado terreno, es sin duda producto de una mala planeación y de igual manera, una deficiente supervisión.



Figura 24. Ejemplo común de sobrecarga en una ladera. Aportada por la presencia de asentamientos en una colonia de Tijuana, Baja California (Google Earth).

Este sobrepeso representa un aumento considerable a las fuerzas motoras que sin duda alguna condicionan la estabilidad de una ladera.

En resumen, los factores condicionantes serán aquellas características propias o inducidas en una ladera, que predisponen a la estructura a sufrir un movimiento de masa provocado por algún agente externo, al cual se le denomina factor o agente desencadenante. Generalmente los factores condicionantes son los que provocan que una ladera se vuelva inestable, y no siempre, son los que desencadenan los movimientos del terreno. En la Tabla 5 se muestran algunos de los factores y su influencia en las condiciones de una ladera.

Tabla 5. Influencia de distintos factores condicionantes en los materiales y estructura de una ladera (González de Vallejo, 2002).

Factores	Influencias y efectos
Geométricos (pendiente y altura)	Distribución del peso a lo largo de la superficie
Litología	Densidad, resistencia y comportamiento hidrogeológico
Estructura geológica y discontinuidades	Resistencia, comportamiento anisótropico, zonas de debilidad
Capa vegetal	Modificaciones en el balance hídrico y protección contra la erosión
Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión superficial, generación de zonas de debilidad
Sobrepeso	Cambio en la distribución del peso
Presencia de agua	Variación en la resistencia de los materiales y aumento de peso

3.3 Factores desencadenantes en la inestabilidad de laderas

Hasta este punto ha quedado claro que las propiedades o características físicas que dependen del origen y comportamiento de los materiales que componen una ladera, así como la estructura y geometría de la misma, son las condiciones que determinan la susceptibilidad al deterioro del sistema y a la posible acción de factores detonantes que desencadenen algún tipo de movimiento.

Estos factores detonantes o desencadenantes, también conocidos como disparadores, se pueden considerar como agentes externos que provocan los mecanismos de falla y movimientos de inestabilidad de laderas, y son responsables, por lo general, de la magnitud y velocidad de los movimientos. Los desplazamientos de material, con frecuencia, no se producen sin que existan las condiciones que favorecen el fenómeno, señaladas en los párrafos anteriores.

Una ladera puede presentar las condiciones de inestabilidad necesarias para la incidencia de un deslizamiento, pero sin la influencia de algún agente o fuerza externa que active el movimiento, la

ladera puede no necesariamente presentar problemas de desplazamiento. Esto no implica que la estructura deje de representar una zona de riesgo latente para la población.

La manera en la que un factor desencadenante influye en la inestabilidad depende del grado de deterioro que este produzca a la estructura y materiales que componen a una ladera. Con esto se hace referencia a la alteración física, en algunas ocasiones química, de los materiales y el subsecuente desprendimiento, remoción o desplazamiento de los mismos. Los efectos del deterioro pueden ser lentos o rápidos y la incidencia de los movimientos puede dispararse de manera inmediata o de forma progresiva.

El resultado general de la intervención de los factores detonantes es un aumento en los esfuerzos de cortante que afectan a los materiales. Estos esfuerzos incrementan a lo largo de la superficie de falla hasta que ocurre el movimiento (Suárez Díaz, 2009).

Los agentes externos más importantes que pueden generar la activación de un movimiento son las lluvias intensas y prolongadas, la actividad sísmica o volcánica y la modificación de las condiciones geométricas, con frecuencia siendo esta última, consecuencia de la actividad humana, así como los cambios en las condiciones hidrogeológicas (fugas de agua y cambios en las corrientes naturales) y la presencia de sobrecargas en el entorno.

Quedando claro que la principal causa de los movimientos del terreno se debe a la acción de la gravedad, la suma de condiciones de inestabilidad y la incidencia de los factores desencadenantes, son parte del proceso que da como resultado la ocurrencia de un posible desastre. En este sentido radica la importante necesidad de conocer y entender las características de los factores que rigen la inestabilidad de laderas, con el fin de evitar o controlar los procesos de inestabilidad o en dado caso tener la certeza para alertar y preparar las medidas de protección ante desastres de esta índole.

3.3.1 La lluvia como agente detonante

La mayoría de los deslizamientos que han impactado a la población de México, está asociada a inestabilidades de suelos blandos, provocadas por lluvias intensas y prolongadas. La ciudad de Tijuana no es la excepción.

El agua que entra en contacto con el terreno da lugar a los efectos ya mencionados en los factores condicionantes: aumento en la presión de poro, aumento en peso de los materiales, disminución de la resistencia al cortante y procesos de erosión superficial e interna. Estos procesos son ocasionados por la infiltración del agua de lluvia, que además, produce flujos conocidos como subsuperficiales (González de Vallejo, 2002) y flujos subterráneos en las laderas. La cantidad de agua que se logre infiltrar depende de la intensidad y duración de la precipitación, el contenido de agua del terreno previo a las lluvias, presencia de discontinuidades en la estructura, presencia de vegetación en la superficie y de las características propias de los materiales involucrados como la granulometría, grado de compactación y permeabilidad.

La infiltración del agua en la ladera provoca entonces que el suelo alcance un grado de saturación indeseado, esto genera que la presión que ejerce el agua en los poros del suelo reduzca los esfuerzos efectivos entre las partículas sólidas, disminuyendo a su vez la resistencia al cortante del suelo (Suárez Díaz, 2009). En la figura 25 se puede observar el efecto que produce el agua que logra infiltrarse en la estructura del suelo de una ladera. El aumento en la presión de poro dependerá en gran medida de la permeabilidad de cada material. En suelos con permeabilidad alta, los cambios pueden ocurrir de manera casi inmediata o en muy poco tiempo, sumado al hecho del aporte de una lluvia prolongada. En suelos con permeabilidad baja, los cambios son más lentos, pero la presencia de discontinuidades como fisuras, grietas o fallas repercute en la permeabilidad, por ejemplo, en laderas compuestas por masas arcillosas.

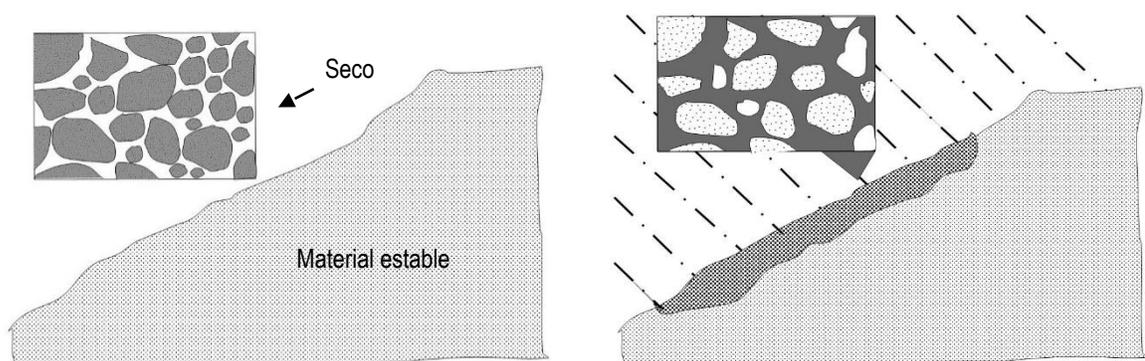


Figura 25. Presencia del agua en el suelo de una ladera (Suárez Díaz, 2009).

La reducción en la resistencia debida a la presión de poro, sumado al hecho del evidente aumento en la densidad de los materiales que resulta en el incremento de peso de los mismo, explica la generación de los movimientos de ladera. La falta de vegetación, presencia de materiales con alta permeabilidad y discontinuidades en la estructura geológica juegan un papel fundamental por aumentar la capacidad de infiltración y movilización de materiales (González de Vallejo, 2002).

Otro proceso relacionado con la presencia de humedad en las laderas, se le conoce como cambio de volumen por expansión y contracción del suelo. Generalmente, este proceso se produce en suelos con alto contenido de arcilla, como los que se presentan en la ciudad de Tijuana. Aunque las precipitaciones de la región no lleguen a disparar un movimiento inmediato, la infiltración de agua y posterior drenaje, provoca una expansión y contracción de la estructura del suelo. Estos cambios de volumen producen agrietamientos y perdida de resistencia en el material. De manera instantánea este efecto no llega a representar un problema, las consecuencias se darán al paso de los años y con una recurrencia de este tipo de cambios volumétricos, que terminarán por debilitar y condicionar posteriormente la inestabilidad de una ladera.

3.3.2 Sismicidad

Los movimientos tectónicos pueden generar cualquier tipo de movimiento en una ladera, dependiendo de las características de los materiales, las condiciones de inestabilidad predispuestas, la magnitud del sismo y la distancia al epicentro. Desafortunadamente la ciudad de Tijuana se encuentra localizada en con una actividad sísmica recurrente, lo cual implica que los movimientos telúricos puedan ser disparadores potenciales de los problemas de inestabilidad de laderas.

Los sismos producen aceleraciones horizontales y verticales sobre las laderas, los cuales resultan en variaciones de carga instantáneas a lo largo de todo el cuerpo de la estructura. Dichas interacciones pueden activar de manera inmediata la movilización de bloques, deslizamientos, flujos o caídos de material. Por otro lado, si el grado de inestabilidad no es tal que produzca movimientos instantáneos, la ocurrencia de un evento sísmico puede producir agrietamientos y fracturas en una ladera. Dichas discontinuidades son propensas a convertirse en nuevas superficies de falla que, si bien no activan los desplazamientos del material, si aumentan las condiciones de inestabilidad.

Otro efecto desfavorable producido por la actividad sísmica, se presenta en suelos finos saturados. El sismo genera presiones de poro “instantáneas”, las cuales producen como ya se mencionó, la pérdida de resistencia en la estructura del suelo. Dicha pérdida puede llegar al grado de debilitar al suelo completamente, derivando en un comportamiento similar al de un líquido. Este fenómeno es conocido como licuación o licuefacción.

La fuerza que genera un sismo puede llegar al grado de reactivar deslizamientos antiguos. Un caso de este tipo se presentó en 1999 en el poblado de Miguel Hidalgo, Zapotitlán de Salinas, Puebla. Como consecuencia de un sismo de magnitud 7.0, con epicentro al suroeste de Tehuacán, Puebla, una masa con una extensión aproximada de 1 km² se deslizó, provocando la destrucción total de la zona afectada (CENAPRED, 2008).

La ciudad de Tijuana se encuentra expuesta ante la incidencia de fenómenos hidrometeorológicos que aporten lluvias intensas y prolongadas y además se ubica dentro una zona de alta actividad sísmica. La posibilidad de que dos fenómenos de tal magnitud coincidan en la ciudad suena bastante alejada, pero la exposición de la ciudad y el riesgo que representan, seguirá latente.

3.3.3 Actividad humana

Sin duda alguna, el factor desencadenante más frecuente en la ciudad de Tijuana, son las actividades humanas. Éstas agudizan o agravan la ocurrencia de los deslizamientos. Las principales causas de desestabilización que provocan las manos del hombre, son los cambios en la pendiente y la estructura de una ladera. Debido a los trabajos de movimientos y remoción de masas. Además de las infiltraciones concentradas producto de las pérdidas en los sistemas de agua potable y sistemas de alcantarillado.

En referencia a las infiltraciones concentradas en las zonas urbanas (figura 26), dichas fuentes se relacionan con la fuga de agua producto de la rotura o escape de los sistemas de abastecimiento y alcantarillado, ya sea en tuberías, tanques, cisternas, letrinas o descargas irregulares en los cuerpos de las laderas. Es difícil detectar la fuente de la fuga en una zona urbana, dado la variedad de las posibilidades de origen y la presencia de distintas estructuras. La disminución de este tipo de detonantes depende de una acción conjunta y participativa de la población en general.



Figura 26. Problema generado por una fuga de agua en la colonia anexa Miramar, Tijuana, B.C (Elenes, 2015).

Por otro lado, las excavaciones o cortes en las laderas pueden provocar el movimiento del terreno. La magnitud y velocidad del desplazamiento dependerá de los otros factores condicionantes, como lo es la estructura geológica y la presencia de discontinuidades. La remoción de masa en la estructura de una ladera rompe con el confinamiento del material que la compone y rompe el equilibrio interno de la estructura. Éste efecto se ve potenciado si existe la presencia de condiciones de inestabilidad en la ladera. Los trabajos más desfavorables son los realizados al pie del talud, situación frecuente en la construcción de vías de comunicación en la ciudad y de unidades habitacionales en las inmediaciones de los lomeríos del municipio. De la misma manera, una práctica peligrosa y frecuente por la población Tijuanaense, son los trabajos de cortes casi verticales al pie de una ladera, un ejemplo se ilustra en la figura 27.

El hecho de que los trabajos de remoción de masa en una ladera representen un riesgo geológico importante, no significa que no se puedan realizar. Para ello es necesario el apoyo de personal técnico capacitado, sumado al esfuerzo interdisciplinario de especialistas que supervisen de manera adecuada los trabajos señalados.



Figura 27. Corte al pie de una ladera en la colonia Pedregal de Matamoros, Tijuana, B.C. Producto de dicho trabajo irregular y sin supervisión resultaron 5 viviendas dañadas en septiembre 2018 (Uniradio, 2018).

Por otra parte, la aplicación de sobrecargas al cuerpo de una ladera, representan otro detonador importante. Si las condiciones de inestabilidad ya están presentes, la aplicación de cargas permanentes o temporales (generadas por el paso de vehículos o maquinaria pesada, rellenos o depósitos de material y residuos) pueden activar los problemas de inestabilidad. En la fotografía de la figura 24 se aprecia un ejemplo de la aplicación de sobrecargas permanentes, aplicadas por la presencia de asentamientos en la pendiente de una ladera de la ciudad de Tijuana. Esta sobrecarga cambia la distribución del peso de los materiales y los estados de esfuerzo en la ladera, aumentando los agentes favorables al movimiento de masa en la estructura, disminuyendo la resistencia asociada y, por consiguiente, generar la desestabilización de la ladera (Suárez Díaz, 2009). Para evitar estos incrementos significativos en los esfuerzos sobre el talud, es recomendable separar las cargas la mayor distancia posible de la corona de la ladera. Para ejemplificar lo anterior, se puede observar en la figura 5 los daños provocados a las viviendas localizadas en la corona de una ladera en la ciudad de Tijuana.

La inestabilidad de laderas comúnmente es producto de la incidencia de procesos complejos. Por su gran extensión y frecuencia en la ciudad, representan un riesgo geológico importante. Por otro lado, algunos de los movimientos generados por la inestabilidad de laderas son quizá los fenómenos

naturales de origen geológico más previsible y más sensibles a las medidas de corrección y mitigación para la prevención de los daños que conllevan (González de Vallejo, 2002). Esto será posible en la medida que los factores condicionantes y desencadenantes que intervienen en la inestabilidad de laderas sean identificados y monitoreados bajo un sistema adecuado. En el caso del vulcanismo como factor desencadenante, no se desglosa en este trabajo por ser un agente con poca o nula incidencia en la ciudad de Tijuana.

El resumen de los factores más comunes en la influencia de inestabilidad de laderas, se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Factores influyentes en la inestabilidad de laderas, adaptado de González de Vallejo (2002).

Factores condicionantes	Factores desencadenantes
Condiciones iniciales: Composición, textura y estructura	Actuación de cargas accidentales: Movimientos sísmicos
Fracturas y fallas	Vibraciones por explosivos, maquinaria y paso vehicular
Planos de estratificación	Deslizamientos cercanos
Fallas geológicas	Pérdida de confinamiento en el material:
Materiales duros sobre materiales blandos	Erosión al pie de la ladera
Alternancia de materiales con diferente permeabilidad	Lluvias
Cambios en los materiales por meteorización:	Erosión interna o subterránea
Desintegración física	Sobrecargas naturales:
Hidratación de materiales arcillosos	Aumento de peso por causa de las lluvias
Plastificación de arcillas	Acumulación de materiales arrastrados
Presencia de agua en el cuerpo de la ladera	Vegetación
Cambios en la estructura:	Sobrecargas antrópicas:
Por agrietamiento	Rellenos, escombros y acopio de materiales
Por meteorización	Edificios, viviendas o cualquier estructura
Por deforestación	Otras acciones antrópicas:
Presencia de vegetación	Excavaciones
Excavación de madrigueras de animales	Cortes inadecuados
Deslizamientos antiguos	Construcciones mal supervisadas
	Fugas de agua
	Infiltración de agua de lluvia:
	Presión de poro
	Erosión interna

CAPÍTULO 4. PROPUESTA PARA EL MONITOREO DE LADERAS

4.1 Antecedentes

Como se ha mencionado hasta este momento, los procesos provocados por la inestabilidad de laderas forman parte de los fenómenos geológicos más destructivos y complejos. Afectando el entorno físico, económico y social de la población. Evitar los efectos perjudiciales de estos fenómenos es el fin último de cualquier trabajo de investigación relacionado con los movimientos de ladera, lo cual conlleva a identificar sus características, entender los mecanismos de falla y la relación que guardan con los factores que rigen la inestabilidad y los factores que desencadenan los desplazamientos.

Para lograr dichos objetivos es necesario conocer, en virtud de lo posible, la mayoría de las características que rodean a los procesos de inestabilidad de laderas. De acuerdo con González de Vallejo en el 2002, la importancia de estos estudios radica en la aplicación de los siguientes puntos:

- Investigación detallada que deriva en la información adecuada para el diseño de medidas correctivas o estabilizadoras para la mitigación o reducción de los daños. Dando como resultado el diseño, planeación y construcción de infraestructura adecuada.
- Análisis de las causas y de los factores que controlan y desencadenan los procesos en una zona, con la finalidad de lograr la prevención de daños provocados por los movimientos de ladera.
- Realización de cartografía de zonas inestables o potencialmente inestables, para aplicaciones preventivas.

En relación con los dos últimos puntos que señala González de Vallejo, es donde tienen lugar los trabajos de monitoreo. Al igual que distintos conceptos que se han utilizado en este trabajo escrito, el monitoreo tiene un significado general, pero que puede ser planteado de manera que sea más adecuado al marco teórico de cualquier disciplina. Para fines de este trabajo, se hace alusión al concepto que señala la guía de mejores prácticas para la educación en el riesgo de minas, presentado por la UNICEF en el 2005. En dicho documento se define al monitoreo como aquella actividad que se encarga de supervisar periódicamente un proceso, sistema o actividad. Con el

objetivo de identificar si los resultados de dicho proceso se están desarrollando de acuerdo con el plan, con el fin de tomar acciones oportunas para corregir cualquier deficiencia detectada.

En tal sentido, el monitoreo de laderas se entenderá como aquellas acciones que se encargan de supervisar periódicamente el comportamiento de las laderas, con el fin de identificar oportunamente la ocurrencia de los procesos de inestabilidad. La detección de los factores condicionantes y posibles detonadores debe ser una actividad imperativa dentro de los trabajos de monitoreo, así como la creación de un inventario de movimientos previos, los cuales apoyaran en la localización de zonas con antecedentes y posible susceptibilidad a desplazamientos nuevos.

Siguiendo las ideas planteadas por la UNICEF y diversos autores, el sistema de monitoreo de laderas, entre otras cosas debe:

- Ser relevante, objetivo, transparente y disponible para la aplicación de sus resultados.
- Ser sistemático y continuo. Recopilando la información de manera organizada, metódica y bien planeada, para propiciar la obtención de resultados confiables.
- Ser útil y ser utilizado.
- Asegurar que la información obtenida sea resultado de los trabajos adecuados y restringidos a la capacidad de las herramientas, instrumentos y personal disponible en el momento.

El objetivo final de las actividades de monitoreo de laderas debe ser siempre mitigar y prevenir los efectos catastróficos provocados por los procesos de inestabilidad. Para lograr tal meta, es necesario hacer uso de la observación de campo y la aplicación de herramientas e instrumentación adecuada para detectar cualquier anomalía en la estabilidad de una ladera.

Con base a lo planteado hasta el momento, es adecuado mencionar el posible enfoque que puede adoptar un sistema de monitoreo basado en conocimientos de geotecnia. Mendoza López y otros establecen la idea de que un sistema de instrumentación que arroje resultados certeros acerca del comportamiento de una ladera u otra estructura parecida, está en función de que los instrumentos midan no solo los efectos, tales como los desplazamientos o deformaciones, sino también las causas, a través de la medición de las variables internas o causantes de dicho comportamiento. Un sistema de monitoreo completo es aquel que no solamente mide deformaciones, desplazamientos o sonidos provocados por los deslizamientos o caídos, sino también registrar las variaciones de los agentes causales, tales como presiones de poro y aceleraciones en el subsuelo; en este caso se

estaría adoptando un enfoque explicativo. Cuando sólo se recurre al registro y supervisión de los síntomas de inestabilidad por medio, por ejemplo, de mediciones topográficas, se adopta un enfoque denominado fenomenológico. El cual tiene como objetivo identificar la presencia de problemas de inestabilidad de laderas.

Los trabajos de monitoreo no están completos con el hecho de registrar las mediciones obtenidas, para realizar una labor de monitoreo ideal, es necesaria la interpretación adecuada de la información conseguida. Por lo tanto, la participación comprometida de un grupo reducido de profesionales es esencial para complementar los trabajos de monitoreo, involucrándose en las distintas etapas del sistema. Esto implica desde la planeación y el desarrollo, hasta el análisis y la interpretación de datos y su reporte.

A lo largo de los años y como producto del conocimiento adquirido con la ocurrencia de los movimientos de ladera, se han desarrollado distintos proyectos nacionales e internacionales que han plantado antecedentes importantes en este rubro: como son los trabajos realizados a lo largo de todo el país por el CENAPRED; los esfuerzos aportados por algunas instituciones académicas como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en regiones asoladas por este fenómeno geológico, tal es el caso de la creación del Atlas de Inestabilidad de Laderas en Teziutlán, Puebla (Alcántara Ayala, Garnica Peña, Coll-Hurtado, & Gutierrez De MacGregor, 2017); y los distintos atlas de riesgos naturales de orden municipal y estatal. Fuera del país organizaciones como el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), (USGS, 2018) y el Sistema de Información para la Gestión del Riesgo y Cambio Climático (SIRE) en Colombia (IDIGER, 2018), tienen años de experiencia y sistemas organizados que se dedican por completo a la reducción y control permanente del riesgo por desastres. Implementando incluso sistemas de alertamiento que apoyan importantemente a los trabajos de prevención, y en su caso, de evacuación.

El desarrollo y avance tecnológico de los diversos instrumentos y técnicas de monitoreo, resultan en una mejora para la aplicación de sistemas automáticos de medición y monitoreo, como las que ya se aplican en los ejemplos anteriores. El progreso de dichos sistemas es el reflejo de la importancia depositada de cada comunidad a la creación de conocimiento que se aplique a la prevención de desastres.

4.1.1 Alcance y limitaciones

Con base a lo mencionado anteriormente, es necesario recordar que uno de los objetivos primordiales de esta propuesta es la prevención de los daños provocados por la ocurrencia de un movimiento de ladera en la ciudad de Tijuana, por lo tanto, el enfoque que se recomienda adoptar es meramente fenomenológico. No se pretende despreciar la explicación del origen del movimiento, pero no es prioridad.

El sistema se proyecta para su aplicación en la mayor cantidad de zonas con posible riesgo por inestabilidad de laderas en la ciudad de Tijuana. De esta manera, la instrumentación más avanzada y sofisticada queda fuera del alcance del proyecto, al elevar los posibles costos de inversión, funcionamiento y mantenimiento. En este sentido, se propone utilizar el equipo más sencillo y eficaz para lograr capturar la mayor cantidad de información en tiempo y forma, en base a inspecciones periódicas que resulten en la aportación a los fines de Protección Civil.

Queda claro que los trabajos de monitoreo e instrumentación ideal son aquellos con un enfoque explicativo y determinístico, debido a que arrojan datos más confiables acerca de las propiedades de los materiales, condiciones y comportamiento interno de las laderas. Generando la información detallada para el diseño, planeación y aplicación de trabajos de corrección y retención en las laderas. Este tipo de monitoreo queda fuera del alcance de esta propuesta, limitándose a la identificación, medición y registro del comportamiento superficial de las laderas, prestando gran importancia a la detección de los síntomas de inestabilidad, los cuales se mencionan en el siguiente apartado. Para lograr lo anterior se recomienda auxiliarse del equipo y personal estrictamente necesario.

Por lo tanto, la propuesta de monitoreo que se presenta en este trabajo escrito se limita a la identificación de las manifestaciones superficiales de la inestabilidad de laderas, debido a la gran cantidad de zonas que se aspira atender. Además, este proyecto pretende contar con el enorme apoyo que ha aportado hasta el momento el Departamento de Protección Civil Municipal de Tijuana, por lo que, quedara limitado a los recursos que disponga la dirección de dicho departamento.

4.2 Síntomas de una ladera inestable

La manifestación de un problema de inestabilidad se ve reflejado en el comportamiento superficial de una ladera y cualquier estructura asentada en ella, esto como resultado de los cambios en la estabilidad de las características internas de la estructura. Quedando claro que la intención de la propuesta presente, es detectar dichas manifestaciones antes que dar un enfoque explicativo de su presencia, es necesario mencionar cuales son los síntomas más comunes que permiten percibir la ocurrencia de un posible movimiento de masa. Dichas expresiones de la inestabilidad no solamente deben detectarse al inicio de un deslizamiento, la finalidad es proporcionar la información necesaria para identificar en qué lugares y de qué manera se pueden presentar. De esta forma se logra poner una mayor atención al comportamiento superficial de las laderas previo a la presencia de un deslizamiento y a su vez, aportar un poco al sentido de la prevención que se pretende alcanzar.

No existe una lista concreta como tal de los indicios de la inestabilidad de laderas, pero distintos autores recomiendan identificar y supervisar periódicamente ciertas manifestaciones, si bien la mayoría no tiene una caracterización establecida, generalmente se repiten en el comportamiento inestable de una ladera. Estas observaciones son útiles para determinar una posible zona de movimiento, establecer un posible mecanismo de falla y determinar un cierto nivel de riesgo en el área afectada. De esta manera es factible definir un cierto nivel de urgencia para una posible evacuación o simplemente determinar los síntomas que se deben monitorear, además de precisar los periodos de tiempo más adecuados para las revisiones.

Dentro de las manifestaciones de inestabilidad existen diversos procesos a los que se les conoce como deterioro, deformación o desintegración de los materiales que conforman a la ladera. Estos procesos derivan de la influencia de los factores desencadenantes en la estructura (Suárez Díaz, 2009). La gran mayoría de ellos se relacionan con los cambios que sufren las características internas de la ladera, como ejemplo esta la presión de poro y la disminución en la resistencia de los materiales. Existen otros procesos de deterioro que se manifiestan en la parte superficial de las laderas, los cuales son de vital importancia para la oportuna detección de un proceso de inestabilidad.

Desmoronamiento y caída de granos.

Dependiendo de la naturaleza del material pétreo o tipo de suelo que conforma a una ladera, es posible que se presente la caída de granos individuales de la masa de la estructura (figura 28). Generalmente, se relaciona con la desintegración física de granos o rocas más grandes, como producto de la exposición a los embates del entorno (meteorización) y su presencia es más visible y común en escarpes o laderas de gran pendiente (Suárez Díaz, 2009). Cuando la estructura está bajo un proceso de inestabilidad, el movimiento generado provoca que las partículas más endebles en la superficie cedan ante la fuerza de la gravedad y comiencen a caer y producir un efecto de desmoronamiento. Esta caída de material se puede presentar de manera ocasional, paulatina o permanente, dependiendo de las características del movimiento. Es importante tener la capacidad de diferenciar el desmoronamiento y la caída de material producto de un proceso de inestabilidad, de un proceso de meteorización.

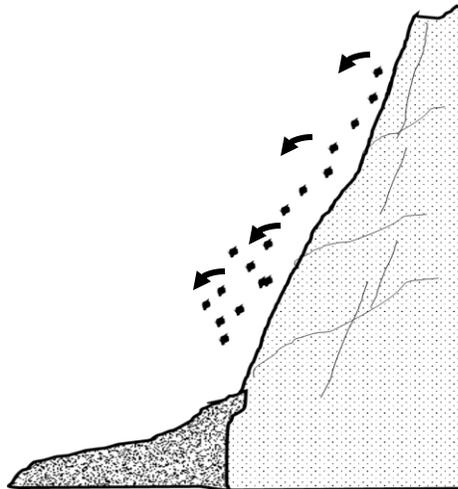


Figura 28. Caída de granos y formación de una zona de acumulación (Suárez Díaz, 2009).

Agrietamientos

Quizá el indicio más frecuente y conocido de la inestabilidad, es la presencia de grietas a lo largo del cuerpo de una ladera. La existencia de grietas es la señal más común de un proceso de deterioro de los materiales en la superficie de la ladera y, por ende, uno de los síntomas más observados en el monitoreo de laderas.

La mayoría de los suelos poseen una resistencia a la tensión muy baja y la presencia de esfuerzos de este tipo, producto de los mecanismos de falla, deriva en la existencia de grietas de tensión. Como se puede observar en la figura 29, por lo regular, estas discontinuidades se presentan en la parte superior de la ladera (corona) como manifestación de un posible movimiento de masa que provoca un estado de tensiones en esa zona (Juárez Badillo, *Mécanica de Suelos 2: Teoría y Aplicaciones de la Mécanica de Suelos*, 2016). De igual manera, su presencia no se limita a esta parte de las laderas.

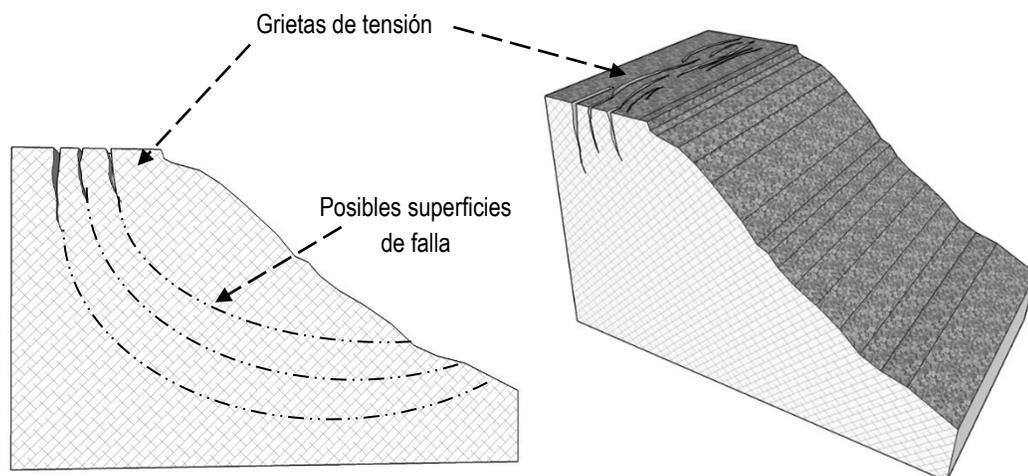


Figura 29. Grietas de tensión presentes en la corona de una ladera.

La evolución de una grieta de tensión en la corona, dependerá de las características del deslizamiento. Si la velocidad con la que las dimensiones de la discontinuidad aumentan considerablemente, indica una clara actividad del movimiento en la ladera. Además, de manifestar una velocidad importante del movimiento. El comportamiento de las grietas de tensión que lleguen a presentarse a los costados del posible deslizamiento, dependerá de las mismas condiciones que las grietas de la corona.

Identificar esta clase de discontinuidades en el terreno es de suma importancia para lograr delimitar la zona afectada y tomar las medidas precautorias necesarias (figura 30).



Figura 30. Grietas de tensión registradas antes del evento del 2018 en Lomas del Rubí (Imagen superior) (Dirección de Protección Civil Municipal). Fotogrametría tomada del deslizamiento (Imagen inferior).

Hundimientos y levantamientos

Cualquier movimiento de material en una ladera provoca un cambio en las condiciones superficiales del terreno. Uno de los reflejos de estos movimientos es la presencia de hundimientos en distintas partes de la estructura, como resultado de distintos mecanismos internos que generan la inestabilidad. De la misma manera, la acumulación del material en movimiento y los

desplazamientos progresivos en la ladera genera una condición que eleva o levanta parte del terreno, como se observa en las figuras 31 y 32.



Figura 31. "Levantamiento" del terreno en la colonia Reforma. Derivado del movimiento de ladera del 2018.

Este tipo de manifestaciones tienen la capacidad de dañar la infraestructura presente en la ladera. Por lo tanto, es necesario tener la capacidad de identificar los daños provocados por un movimiento de ladera y los que derivan de cualquier otro factor.



Figura 32. Hundimiento en las calles de la colonia Sánchez Taboada (Durán, 2016).

La magnitud de los hundimientos o levantamientos dependerá de las características del movimiento (velocidad, estilo, humedad, material), además son un síntoma adecuado para detectar el estado del desplazamiento. Es decir, si los hundimientos o levantamientos presentan, por ejemplo, indicio de crecimiento o ampliación, es señal de que el movimiento presenta un estado activo y es necesario tomar las medidas cautelares adecuadas, como continuar con una supervisión con periodos de tiempo más pequeños o una evacuación urgente, si es el caso.

Presencia de humedad

La ciudad de Tijuana se caracteriza por ser una región semiárida, con poca presencia de lluvias al año. Esto se refleja con poca o nula humedad natural en los suelos del municipio. Con esta condición es fácil identificar áreas con la presencia de humedad atípica en las laderas. Como se ha explicado hasta el momento, la existencia de agua en la estructura de una ladera representa uno de los factores influyentes más peligrosos, por lo tanto, identificar áreas húmedas o saturadas que generalmente no lo están, es de vital importancia. Detectar la presencia de agua indica una posible fuga en los sistemas de servicio de la ciudad o que un movimiento de masa provocó la fuga, producto de un daño a la infraestructura del servicio. Cualquiera que sea el caso, es importante detectarlos y tomar las medidas adecuadas.

Daños estructurales

La manera más sencilla de detectar un posible movimiento de masa, radica en los efectos nocivos que se reflejan en las estructuras asentadas en el cuerpo de la ladera (figura 33). Distintos factores pueden provocar que cualquier edificación presente diferentes daños en su estructura. Distinguirlos de los síntomas de un proceso de inestabilidad dependerá de la habilidad del observador para relacionarlos con los procesos de deterioro de las laderas y los desplazamientos generados por la inestabilidad.

Los daños más comunes son las grietas de tensión presentes en la estructura de una edificación, generalmente, dichas grietas se forman perpendicularmente a la dirección del movimiento (figura 34) y su acelerado crecimiento es un indicativo de un desplazamiento activo en la ladera. De la misma

manera, el agrietamiento de techos, losas y cimentaciones representa una manifestación clara de un proceso de inestabilidad.



Figura 33. Daños reflejados en una vivienda de la colonia Sánchez Taboada (Proporcionada por la Dirección de Protección Civil Municipal).

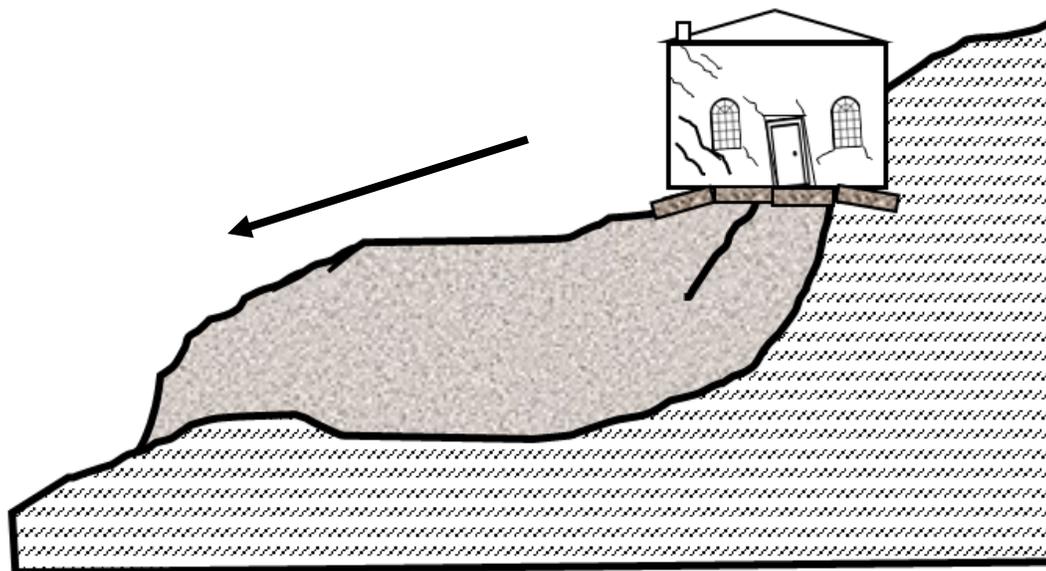


Figura 34. Ejemplo de la presencia de grietas de tensión en una casa dañada por un movimiento de ladera y marcos de puertas y ventanas afectados.

El agrietamiento de losas (figura 35), la sensación de una pérdida de verticalidad dentro de las estructuras, puertas y ventanas que no cierran con facilidad y espacios visibles entre los marcos de las mismas (figura 34), pueden indicar la ocurrencia de un movimiento de ladera, que se expresa como distintos detalles que ocasionalmente se vuelven parte de la vida cotidiana de los usuarios. Por ello es importante prestar atención ante estos síntomas.



Figura 35. Daño observado en la losa de una vivienda en la colonia Reforma, producido por el evento del 2018.

Para terminar con los síntomas superficiales que se reflejan en las estructuras o elementos presentes en una ladera, se hace alusión al indicio, que a consideración, es el más evidente. La inclinación de cualquier elemento vertical presente en el cuerpo de una ladera, es tal vez, el síntoma más representativo de un movimiento de masa. La pérdida de verticalidad (figura 36), al igual que cualquier otro síntoma, puede generarse de manera casi inmediata o progresiva con una velocidad casi imperceptible. Es por ello, que se debe prestar gran importancia al monitoreo de la verticalidad de cualquier elemento artificial o natural en la zona. Los árboles son el ejemplo perfecto: un árbol inclinado muestra la dirección del movimiento e indica un estado activo del mismo, en cambio, un

árbol con cambio de dirección en su crecimiento manifiesta un desplazamiento antiguo que se encuentra inactivo.

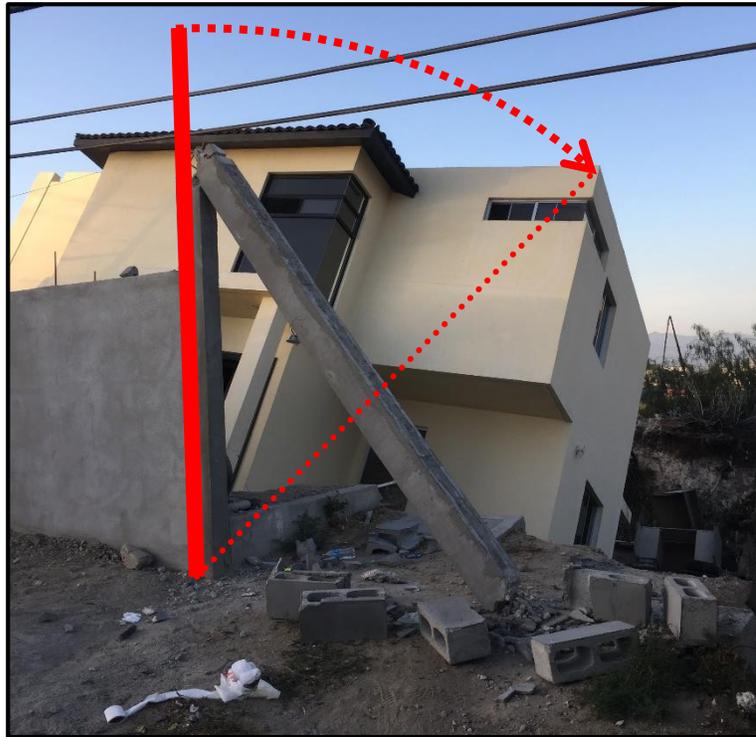


Figura 36. Ejemplo exagerado en la pérdida de verticalidad de una vivienda de la colonia Reforma, en el evento del 2018.

La identificación de los síntomas mencionados anteriormente, así como la consecuente supervisión periódica de los mismos, representa parte de los trabajos de monitoreo del comportamiento superficial de una ladera. Detectar en tiempo y forma tales manifestaciones para generar la información correspondiente a cada sitio vulnerable, puede hacer la diferencia para los trabajos de prevención adecuados.

4.3 Sobre la instrumentación

Para que las actividades de monitoreo tengan éxito, el uso de la instrumentación y los procedimientos a realizar deben de estar bien encaminados, en pocas palabras, debe quedar claro cuáles son los parámetros específicos que se van a medir y supervisar. Pues si no se sabe qué y

dónde medir, inclusive sabiendo cómo, lo más probable es que no se mida lo que se debe medir (Mendoza López, Domínguez Morales, Noriega Rioja, & Guevara Ortiz, 2002). En este contexto es necesario que se identifiquen las carencias y límites del sistema, evitando resultados imprecisos o parciales. Con respecto a lo antes mencionado, CENAPRED recomienda respetar la idea de que los instrumentos más convenientes para este tipo de trabajo son siempre los más simples; si es posible, elegir los equipos más sencillos (instrumentos mecánicos a eléctricos) para evitar la posibilidad de aumentar el error a causa del uso de equipo más complejo. Además de priorizar los recursos económicos, los cuales siempre son restringidos. Inclusive los recursos humanos se presentan en menor disponibilidad a medida que el grado de sofisticación de los instrumentos aumenta.

Es preciso aclarar la importancia de respetar un principio básico de la medición, el cual consiste en buscar que la presencia del propio instrumento no altere las variables que está midiendo y evitar a toda costa que no genere una discontinuidad que sea propensa a transformarse en superficie de falla o que la propia acción de monitoreo no se convierta en un agente perturbador (Mendoza López, Domínguez Morales, Noriega Rioja, & Guevara Ortiz, 2002).

El primer paso para elegir la clase de instrumentación y herramientas para un sistema de monitoreo, es determinar qué tipo de medición se requiere, de esta manera es más sencillo seleccionar el instrumento específico que mejor se adapte a las necesidades del estudio. Para el caso de la ciudad de Tijuana, donde el monitoreo de sus laderas tiene como principal objetivo la prevención, se ha llegado a la conclusión que la supervisión del comportamiento de las laderas será meramente superficial. De esta manera se limita el sistema al control y supervisión al monitoreo de parámetros y características superficiales.

4.4 Metodología de trabajo

La prevención de los daños provocados por los movimientos de masa en la ciudad de Tijuana, será siempre el fin principal del sistema de monitoreo de laderas propuesto en este trabajo escrito. Esto es posible por medio de la supervisión y vigilancia del comportamiento superficial de la misma. De acuerdo con este objetivo primordial, se propone identificar, registrar y supervisar magnitudes correspondientes a los movimientos superficiales de una ladera, la presencia de agrietamientos

superficiales en el terreno y edificaciones localizadas en las zonas de interés, así como la pérdida de verticalidad en cualquier elemento disponible para su supervisión.

Obtener un registro periódico de las características antes mencionadas dará como resultado el conocimiento referente al comportamiento superficial de una ladera, reflejado en el control de las magnitudes observadas, registradas y supervisadas. Los periodos de tiempo de supervisión dependerán de la evolución de la inestabilidad, obedeciendo a la velocidad con que se desarrolle el mecanismo de inestabilidad. De esta manera, los datos registrados reflejarán el estado activo o inactivo de una ladera, y de ser el caso, la velocidad con la que se desarrolla el movimiento.

No existe un procedimiento estandarizado que determine los trabajos de monitoreo de laderas, pero, distintas instituciones y especialistas nacionales e internacionales han publicado diferentes recomendaciones para los trabajos de supervisión de taludes o laderas, inclusive algunos países, incluyendo latinoamericanos, ya hacen uso de sistemas avanzados de monitoreo y alertamiento de laderas. Para la propuesta de este trabajo escrito, se adaptan las sugerencias del CENAPRED, en el informe técnico sobre monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento del 2002, así como del manual de taludes publicado en 1987 por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y las publicaciones de Suárez Díaz en el 2009. De las recomendaciones consultadas a los autores mencionados anteriormente, solo se toman en cuenta aquellas que mejor se adecuan al enfoque fenomenológico de este trabajo, es decir, la instrumentación y metodología seleccionada se aplicará al monitoreo de los síntomas superficiales de la inestabilidad de laderas en la ciudad de Tijuana.

En otro sentido, cabe recalcar la relevancia de la investigación previa al trabajo de campo. Antes de realizar cualquier reconocimiento de sitio, es importante recopilar y analizar toda la información disponible de la zona de estudio, considerando cualquier tipo de mapa al alcance, como también, datos meteorológicos, sísmicos y registros pluviométricos (Coliente Tlaxcalteca, 2010). De esta manera, los trabajos de campo se verán complementados con la información contextualizada al sitio de interés, por ende, las operaciones de monitoreo serán más efectivas.

Bajo el mismo orden de ideas, para los trabajos de monitoreo de laderas en la ciudad de Tijuana, se recomienda apoyarse en el atlas de riesgos naturales del municipio 2014, para la identificación de

zonas de mayor riesgo en la ciudad. De la misma manera, se exhorta a consultar la información recabada hasta el momento, por la Dirección de Protección Civil Municipal.

Como en cualquier otro trabajo de investigación, se sugiere vaciar los datos en un formato que facilite su registro en el campo, así como su posterior interpretación.

4.4.1 Identificación de los factores influyentes en la inestabilidad de laderas

Una vez localizada el área de estudio en la cual se pretenden iniciar los trabajos de monitoreo, no se recomienda comenzar sin identificar los factores que pueden, o ya condicionan, la inestabilidad en una ladera. Bajo el mismo contexto, es necesario detectar los posibles factores desencadenantes que pueden activar algún movimiento en la ladera de interés. De tal manera que los trabajos de supervisión del comportamiento superficial de las laderas, se verán complementados con el conocimiento de los factores que pueden influir en los procesos de inestabilidad. Con esto se pretende llevar un control de los agentes perturbadores presentes en el área de interés.

Durante el reconocimiento de campo, la brigada designada para los trabajos de monitoreo debe contar con la capacidad de identificar los principales factores condicionantes en una ladera. Se sugiere como mínimo, detectar la presencia de pendientes pronunciadas, tipo y estado de los materiales, presencia de sobrecargas, identificación de alguna estructura geológica desfavorable y presencia de vegetación.

En las zonas urbanizadas, detectar factores geológicos puede resultar más complicado, por lo cual se recomienda apoyarse en la información preexistente de la zona, tal es el caso de mapas geológicos, topográficos, alguna estratigrafía publicada o cualquier documento complementario. Para el caso de las zonas con presencia urbana, el hecho de contar con infraestructura asentada en la ladera, ya se puede considerar como un factor condicionante de origen antrópico.

Por otro lado, la detección de factores desencadenantes se llevará a cabo por medio de una inspección visual en la zona de interés, identificando aquellos agentes que tienen la capacidad de afectar la estabilidad de una ladera. Es el caso de la presencia de fugas de agua, sobrecargas y trabajos de remoción de masa. La detección de este tipo de agentes permitirá llevar un control de las

actividades más adecuadas en el área estudiada. Dadas las circunstancias geográficas y condiciones climáticas de la región, inevitablemente se debe tener en cuenta la posible ocurrencia de actividad sísmica y precipitaciones extraordinarias.

4.4.2 Monitoreo del movimiento superficial

La supervisión de los movimientos superficiales consiste en detectar y vigilar la magnitud de los desplazamientos laterales y verticales en el cuerpo de la ladera. Para ello, se recomienda el uso de métodos basados en la medición de referencias, con el uso de equipos ópticos o electrónicos convencionales de topografía. La elección de cualquier sistema de medida y de equipos a utilizar dependerá de la precisión que se desee alcanzar y de la magnitud de los movimientos que se pretende observar, para el caso de laderas, los movimientos a registrar suelen ser bastante grandes, por lo que puede ser suficiente obtener una precisión de pocos centímetros (IGME, 1987).

Estos métodos permiten llevar un seguimiento más directo de los desplazamientos en un área susceptible, teniendo como referencia bancos fijos ubicados fuera de la zona inestable. Es importante asegurar que los bancos o puntos fijos estén fuera del área que sea susceptible al desplazamiento. Para asegurar la inmovilidad de dichos puntos, es recomendable situar otros bancos de referencia más alejados.

Para esta clase de trabajo será fundamental el uso del nivel fijo o nivel topográfico, al igual que el equipo denominado estación total, los cuales se pueden observar en la figura 37. El nivel fijo es un instrumento altimétrico diseñado para determinar el desnivel existente entre la línea horizontal visualizada a través del equipo y cualquier punto sobre la superficie del terreno proyectado de manera perpendicular hacia la misma línea visual. Para establecer dicho desnivel se registra la magnitud de la distancia mediante unas regletas o estadales graduados que se colocan en el punto de interés. De esta manera se registra la altura de un punto en la superficie, referido al equipo topográfico.

Por otro lado, la estación total es un instrumento óptico-electrónico que reúne en una sola unidad, tres funciones básicas. Una vez estacionado, puede medir automáticamente los ángulos horizontales, verticales y la distancia al punto de interés. Los valores son presentados

inmediatamente a través de una pantalla de cristal líquido y el microprocesador integrado, realiza de manera simultánea los cálculos de distancia horizontal y de desnivel. Los valores calculados pueden ser almacenados, ya sea en la memoria interna del aparato o en una memoria externa. Facilitando el procesamiento de los datos (Mozo y Tenorio, 2004). Al igual que el nivel fijo, la estación total se auxilia de un estadal complementado con un cristal óptico localizado en la parte alta del mismo, denominado prisma. El aparato transmite una señal de luz infrarroja o láser que se refleja en el prisma y de esta manera obtiene los datos mencionados anteriormente.



Figura 37. Nivel fijo y regleta graduada a la izquierda, prisma sencillo al centro y estación total a la derecha (Imágenes obtenidas de internet).

El monitoreo topográfico para la ciudad de Tijuana se sugiere realizar por medio de nivelación diferencial y colimación de referencias. El procedimiento es sencillo, al elegir el sitio donde se colocará un banco fijo fuera del área de estudio, se establecerá una línea visual por medio del equipo topográfico y a lo largo de dicha línea imaginaria se colocarán los bancos topográficos que servirán de testigos en el movimiento de la ladera. Dichas líneas imaginarias se deben localizar a lo largo de ejes o líneas longitudinales y transversales dentro del área de interés, como se observa en la figura 38.

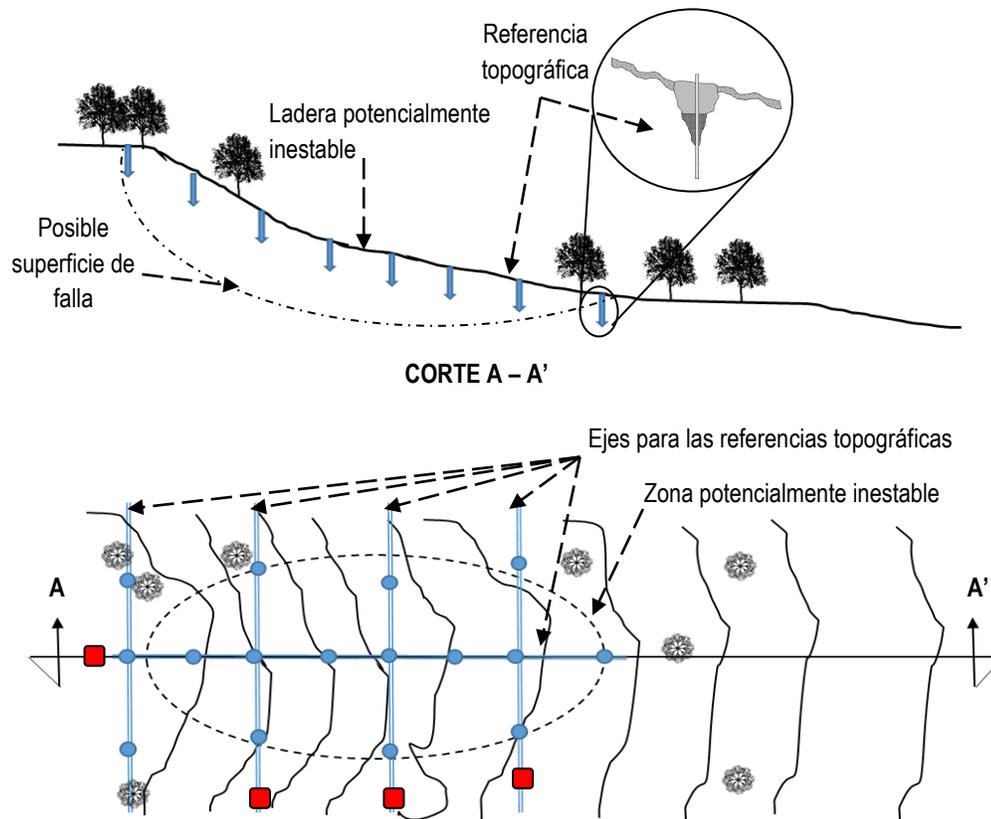


Figura 38. Arreglo ideal para la colocación de referencias topográficas en una ladera. En color azul los bancos de referencia que se han de monitorear, en color rojo los bancos fijos fuera de la zona potencialmente inestable. (Mendoza López, Domínguez Morales, Noriega Rioja, & Guevara Ortiz, 2002).

Los puntos testigos del movimiento serán referidos en planta y elevación, a los bancos fijos localizados en los extremos de esos ejes. Sobre cada punto se colocará el estadal y con ayuda del nivel fijo o la estación total, se determina el desnivel del banco referido al punto fijo (figura 39). Los desplazamientos laterales y verticales se obtendrán de la misma manera. Es importante señalar que sobre las líneas visuales se debe observar sin ningún impedimento ambos extremos del eje de nivelación o colimación. La cantidad de ejes longitudinales y transversales dependerá del tamaño y accesibilidad de la zona de estudio, de ser posible al menos uno longitudinal en dirección del movimiento y varios transversales, de acuerdo a las recomendaciones de CENAPRED.

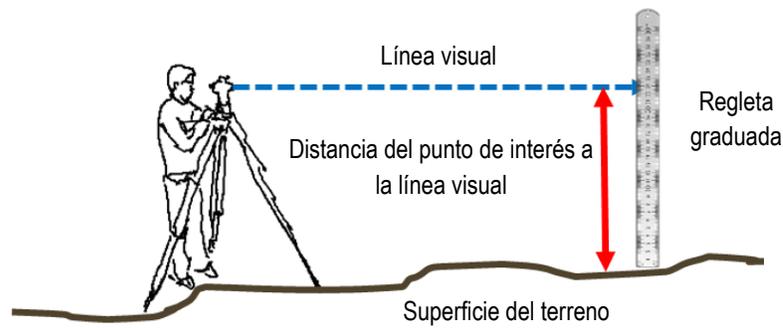


Figura 39. Aplicación del equipo topográfico para el monitoreo de referencias.

En laderas con presencia de infraestructura vial se recomienda colocar los testigos a lo largo de las calles o banquetas. Si la brigada de trabajo considera necesario colocar un banco topográfico en algún sitio de interés, este debe ser referido siempre a los bancos fijos en la periferia del área de estudio. Para los puntos de referencia se recomienda utilizar cualquier elemento que quede bien anclado a la superficie, para evitar que la influencia del entorno afecte en las mediciones o sea fácilmente removido o robado. En el caso de superficies de concreto, el uso de clavos bien anclados puede ser suficiente, en caso de terreno natural se sugiere utilizar barras metálicas hincadas mínimo 60 centímetros y aseguradas con alguna clase de mortero.

Una vez definidas la posición y la elevación inicial de cada punto de referencia, se realizan posteriormente y de manera periódica, las mediciones topográficas del sitio, con el fin de conocer la evolución de los desplazamientos, en el caso de presentarse. La periodicidad de esos levantamientos dependerá de la velocidad con la que se desarrolle la inestabilidad, generando así, la información idónea del sitio para basar un alertamiento, actividades de prevención o el inicio de acciones de evacuación.

4.4.3 Monitoreo del agrietamiento superficial

La aparición de grietas en la superficie de una ladera, como en las estructuras aledañas, puede originarse por distintas razones, no precisamente por la ocurrencia de un movimiento de masa. Es importante detectar aquellas grietas de reciente formación o en crecimiento dentro de la zona con

posibilidades de sufrir un deslizamiento. Sobre estas discontinuidades se concentrarán los trabajos de monitoreo, identificando aquellas que presenten un aumento en sus dimensiones y registrando la magnitud de su abertura. El control de estos parámetros servirá como un indicativo ideal de la presencia de un movimiento de ladera, y en su caso, de la velocidad relativa de los desplazamientos en la zona donde se localicen las grietas.

Generalmente, las fisuras recientes presentan bordes afilados o con puntas, no cuentan con material que rellene su interior y se observa nula presencia de vegetación reciente. En cambio, como se puede observar en la figura 40, las grietas antiguas se encuentran rellenas de cualquier tipo de material, en algunos casos existe la presencia de vegetación y los bordes de las mismas son redondeados.

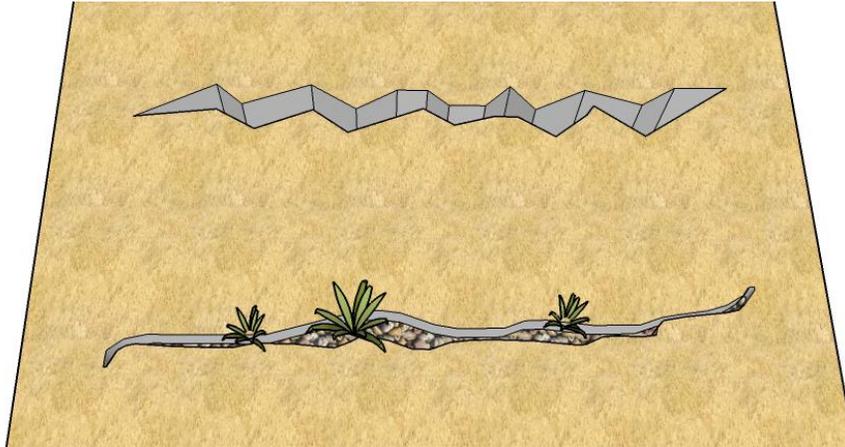


Figura 40. Ejemplo de una grieta reciente en la parte superior y una antigua en la parte inferior.

La instrumentación para el monitoreo de las grietas, se colocará sobre aquellas discontinuidades que ha criterio de la brigada o el especialista a cargo, considere de interés para detectar el movimiento del terreno. De preferencia en la zona de la corona de la ladera y en la infraestructura localizada en el posible cuerpo del deslizamiento. La mayoría de los instrumentos consisten en elementos anclados firmemente en los puntos cuya distancia se desea supervisar, la magnitud del agrietamiento se puede medir con utensilios bastante sencillos como los denominados testigos de yeso hasta herramientas más complejas como regletas deslizantes o extensómetros electrónicos. Para esta propuesta se recomienda el uso de tres sistemas o equipos de control para detectar grietas en crecimiento y registrar la magnitud de las aberturas.

La manera más sencilla de detectar el crecimiento de una grieta y, por ende, la actividad de un deslizamiento, es mediante el uso de los llamados testigos de yeso. Dichos testigos consisten en elementos elaborados *in situ* con yeso convencional y agua, que se colocan sobre la abertura de una grieta, de preferencia con una longitud menor a un centímetro y medio para evitar que el yeso fresco se deposite en el interior e implique utilizar más material. No existen procedimientos estandarizados ni alguna clase de norma que rijan la manera de colocar un testigo, ni las características de los mismos. Por lo tanto, en base a la experiencia adquirida, se recomienda colocar testigos de yeso con forma rectangular, cuya dimensión más amplia sea suficiente para abarcar ambos costados de la grieta, mínimo 2 ó 3 centímetros, y su espesor sea como mínimo de 2 centímetros, como se observa en la figura 41. De esta manera se garantiza que el testigo no se fisure por fraguado o la poca resistencia a la flexocompresión o pandeo, que implique una sección más esbelta.

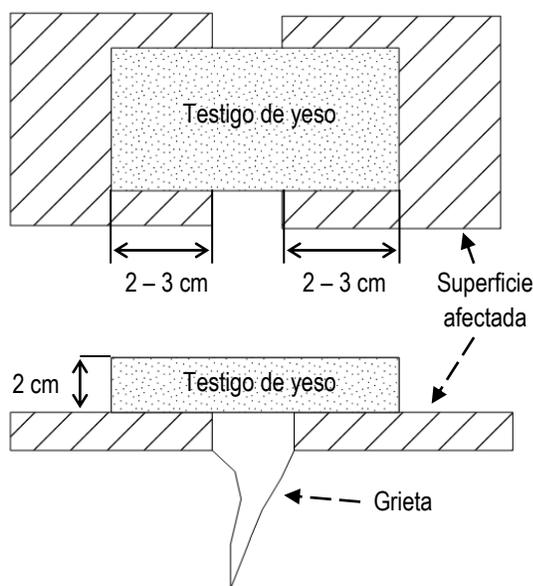


Figura 41. Dimensiones recomendadas para un testigo de yeso.

En el momento que el testigo sufra un agrietamiento con la misma dirección al de la grieta monitoreada, es un indicativo de la actividad de la ladera. Se debe registrar la hora, fecha y magnitud de la abertura, al igual que las dimensiones del testigo, estas medidas corresponden a las lecturas iniciales y la supervisión periódica dependerá de la velocidad con la que se registre la abertura del testigo (figura 42).



Figura 42. Testigo colocado en la colonia Reforma de la ciudad de Tijuana. En la imagen de la derecha se puede observar el movimiento de la grieta reflejado en el testigo.

Pasando a un sistema un poco más elaborado, pero igual de sencillo y de bajo costo, CENAPRED recomienda medir la magnitud de los movimientos superficiales de la ladera, para dar seguimiento periódico a cualquier abertura y desnivel, principalmente a las grietas de tensión. El método consiste en colocar puntos de referencia, de preferencia estacas de madera o barras metálicas ancladas al terreno, en los que se puede medir la separación de ambas, utilizando cintas o flexómetros. Para determinar el desplazamiento vertical del terreno, se colocará al momento de anclar las barras, una marca que indicará el nivel inicial de la referencia vertical (figura 43).

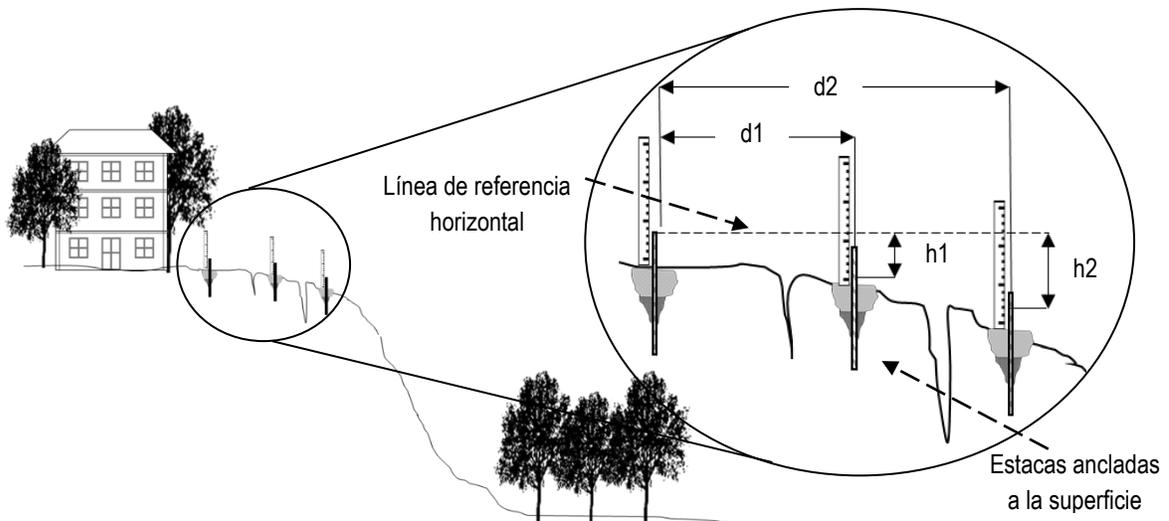


Figura 43. Aplicación de estacas para el monitoreo de las grietas en la corona de una ladera. El desplazamiento lateral se mide entre estacas ($d1$ y $d2$) y el vertical entre las marcas iniciales y la línea de referencia ($h1$ y $h2$) (Mendoza López, Domínguez Morales, Noriega Rioja, & Guevara Ortiz, 2002).

Posteriormente, con cada revisión y con la ayuda de una manguera transparente rellena de agua, conocida como nivel móvil o nivel de albañil, se tomará registro del desplazamiento vertical del terreno. De esta manera, las mediciones periódicas se comparan con la primera lectura, lo que permitirá conocer el desplazamiento progresivo de la masa en movimiento. Es altamente recomendable, referir por lo menos una de las marcas a un punto fijo externo a la zona, para tener una mayor certidumbre del movimiento.

Las referencias o estacas, de acuerdo a la recomendación del CENAPRED, deben colocarse de tal manera que queden firmemente ancladas al terreno, a una profundidad aproximada de un metro y dependiendo del material donde se vayan a fijar, es adecuado utilizar mortero de cemento para fijarlas, como se puede apreciar en la figura 44. De esta manera se garantiza que las mediciones no se vean afectadas por la influencia del clima y el entorno, además de evitar que sean fácilmente removidas o robadas.

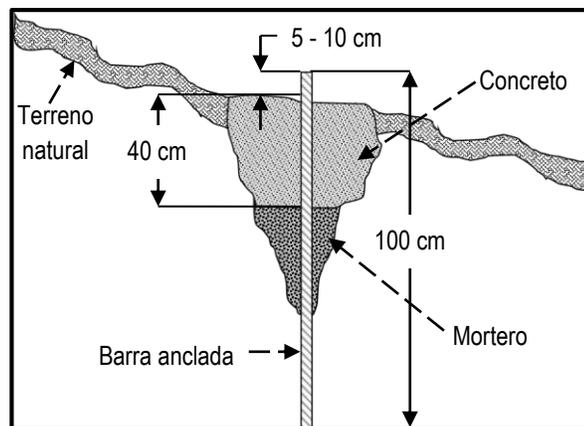


Figura 44. Arreglo sugerido para la colocación de referencias superficiales (Mendoza López, Domínguez Morales, Noriega Rioja, & Guevara Ortiz, 2002).

El último método que se propone para monitorear las grietas superficiales, utiliza herramientas denominadas fisurómetros o regletas deslizantes. Estas consisten en dos regletas de plástico transparente, paralelas entre sí, fijas en sus extremos a cada lado de la grieta (figura 45). En una de las regletas se traza una malla reticular, subdividida si se desea mejorar la precisión. En la otra regleta se traza un cursor o línea de referencia que se hace coincidir con el centro o cruce de los ejes principales de la retícula, durante su colocación. Los movimientos posteriores del cursor indican un desplazamiento relativo del terreno con respecto a una lectura previa (Mendoza López, Domínguez Morales, Noriega Rioja, & Guevara Ortiz, 2002). Existen fisurómetros comerciales que

pueden ser adquiridos si se desea una medición más exacta de los desplazamientos, pero la aplicación del principio con el que funcionan las regletas, puede generar una gran cantidad de variaciones de estas herramientas, lo cual dependerá de la imaginación y creatividad del personal técnico a cargo de los trabajos de monitoreo.

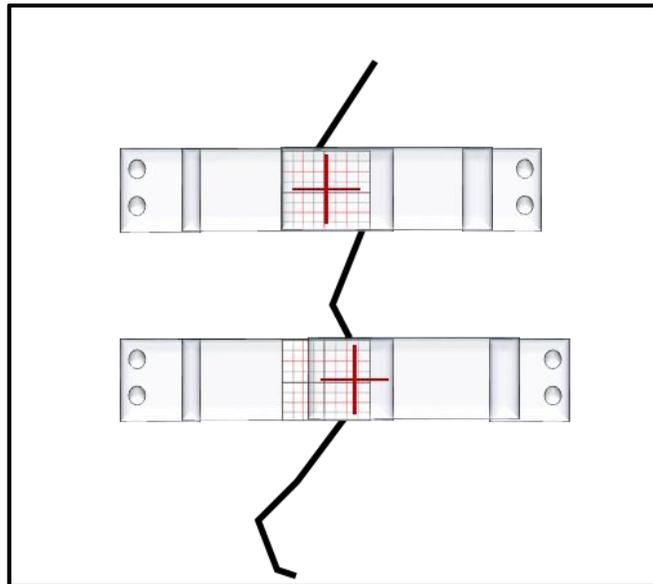


Figura 45. Colocación y funcionamiento de las regletas deslizantes.

4.4.4 Monitoreo de la inclinación de elementos superficiales

Para determinar la pérdida de verticalidad de los elementos localizados en la superficie de la ladera, los cual dará un indicio de la presencia de un proceso de inestabilidad, se recomienda el uso de herramientas sencillas que permitan detectar la inclinación de los elementos. Suárez Díaz sugiere utilizar un nivel de burbuja sencillo, que sea capaz de indicar la tendencia del movimiento en la superficie. Estas referencias se pueden ubicar sobre el terreno afectado o dentro de alguna edificación afectada, en placas de concreto o yeso que garanticen cierta estabilidad (figura 46). De la misma manera el nivel de burbuja se puede colocar en cualquier elemento vertical, como los árboles o postes de luz presentes en el área de estudio. Basta con colocar una marca al momento de la colocación y monitorear periódicamente el avance de la burbuja. De esta manera se muestra la manifestación de un movimiento superficial en la ladera.

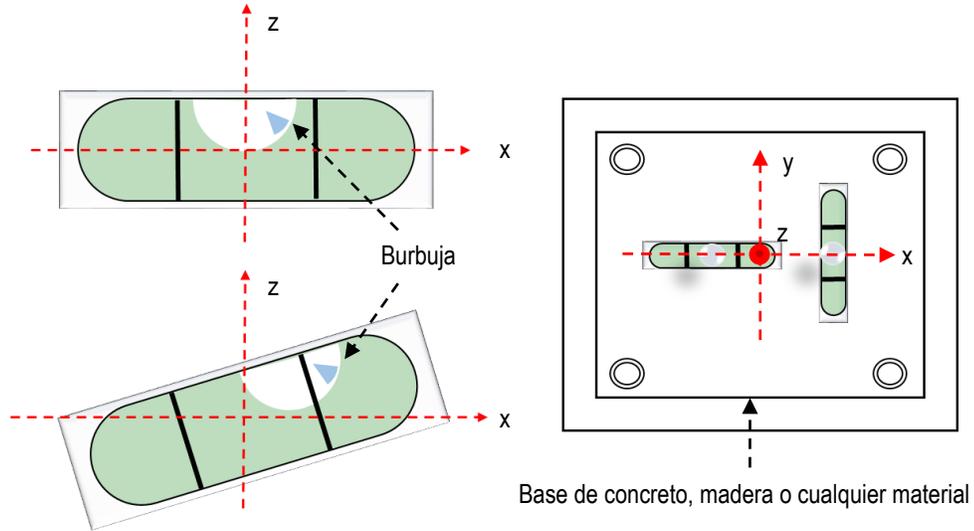


Figura 46. Arreglo sugerido para monitorear la verticalidad de algún elemento sobre la superficie de una ladera, utilizando niveles de burbuja sencillos (Suárez Díaz, 2009).

Por otro lado, si no se desea utilizar referencias fijas que llegasen a ser alteradas o removidas, se propone medir periódicamente el cambio de inclinación de algún elemento vertical, como lo son postes, arboles, muros o cualquier objeto fijo y con relativa firmeza. Tal acción se logrará por medio de cualquier equipo móvil con la capacidad de medir ángulos en una superficie. El equipo más sencillo se le conoce como inclinómetro manual o medidor de ángulos, el cual se coloca sobre la superficie deseada y muestra el ángulo de inclinación respecto a la vertical (figura 47). De tal forma que se puede obtener el cambio en la inclinación relativa de la superficie de una ladera sin la necesidad de fijar el equipo a la superficie.



Figura 47. Buscador comercial de ángulos (Porter, s.f.).

4.5 Gestión de la información

Registrar y organizar los datos arrojados por la supervisión del comportamiento superficial de una ladera, serán tareas inútiles si aquella información no se ve reflejada en acciones que se encaminen al objetivo principal del sistema de monitoreo. El esfuerzo conjunto de un equipo de trabajo será en vano si los datos obtenidos no son depurados, analizados y distribuidos por los medios necesarios para darle un uso adecuado. En este sentido radica la importancia de la gestión en los trabajos de monitoreo, esto implica desde asignar al personal adecuado para obtener la información adecuada, darle una correcta aplicación a la información, que esta sea accesible para todo el personal involucrado, depurar los datos innecesarios y distribuir adecuadamente la información obtenida.

Como resultado de las inspecciones periódicas, utilizando como base la metodología mencionada en los apartados anteriores, se deben distinguir e identificar aquellas zonas con un alto riesgo de sufrir los efectos nocivos de la inestabilidad de laderas. Complementando los trabajos previos por el CICESE, publicados en el atlas de riesgos municipal. De esta manera, se deben corroborar los sitios más propensos y eliminar o agregar zonas vulnerables de acuerdo al criterio del equipo.

Para llevar un control adecuado de la información recabada, se sugiere generar un inventario de las zonas monitoreadas, proyectándolas en mapas existentes o creando la cartografía indicada. Esto con el fin de facilitar la identificación de zonas vulnerables y de esta manera enfocar la atención necesaria a dichas áreas. Los resultados del monitoreo se deben vaciar en el inventario creado, colocando los datos recabados en la zona de estudio correspondiente, es decir, la información registrada debe corresponder al sitio donde se realizó la inspección. El número de puntos de referencia, localización de los mismos, factores influyentes identificados en el área de estudio, desplazamientos registrados y observaciones generales de la visita al sitio, son algunos de los datos que deben formar parte del archivo correspondiente a cada sitio monitoreado. Esto se puede manejar de distintas maneras, es recomendable agrupar la información en carpetas digitales y contar siempre con un respaldo físico. Cada sitio monitoreado debe contar con su carpeta o agrupación de información registrada, actualizándose cada vez que se realicen los trabajos de supervisión.

De acuerdo al criterio del pequeño equipo de especialistas que conformen el sistema de monitoreo, se recomienda contar con un inventario de la infraestructura y población vulnerable en la zona de estudio. El fin de dicho inventario se justifica con el pleno conocimiento de los elementos

susceptibles a sufrir daños por los procesos de inestabilidad. Estos censos, se pueden llevar a cabo por la misma brigada o apoyarse en los trabajos realizados por cualquier otra dependencia o institución.

Se debe recalcar la importancia de ciertas variables de control que permitan correlacionar los resultados con la toma de decisiones fundamentales a fin de evitar un desastre; la más usual es la velocidad del movimiento superficial, reflejado en los movimientos relativos en la superficie, la cual debe ser evaluada junto con la ocurrencia de colapsos y daños menores en la zona de estudio (Mendoza López, Domínguez Morales, Noriega Rioja, & Guevara Ortiz, 2002).

La frecuencia con la que los instrumentos deben monitorearse dependerá de la velocidad mencionada, CENAPRED recomienda ante condiciones normales, la medición sea una vez por semana; de dos a tres veces por semana ante un ligero aceleramiento, momento en el que se puede declarar, de acuerdo a los criterios del equipo de trabajo, una etapa precautoria. Ante un periodo de inminente riesgo, procederán mediciones diarias y continuas; desde luego cuidando siempre la seguridad de la brigada encargada del monitoreo.

Cada cierto tiempo, se debe realizar un reporte de cada uno de los sitios monitoreados, con el fin de presentar la información obtenida y evaluar el nivel de riesgo de cada sitio para determinar la prioridad de los trabajos de supervisión y de ser necesario, comenzar con los trabajos de prevención, alertamiento o evacuación. Es claro que la toma de decisiones no le corresponde solamente al personal de la brigada de monitoreo, por ello, es necesario corroborar, analizar y distribuir la información en tiempo y forma a los organismos competentes.

En este punto es indispensable distinguir los trabajos de monitoreo superficial que se pretenden llevar a cabo, de los trabajos de inspección especializados y específicos que tienen como objetivo arrojar información detallada del estado de una ladera. Dichas inspecciones, son realizadas por empresas técnicas especializadas. Si los resultados de los trabajos de monitoreo superficial, detectan un proceso de inestabilidad de laderas en una etapa temprana, se puede sugerir la aplicación de inspecciones especiales, tal es el caso de tomas de muestra y análisis de estabilidad específicos. De llevar a cabo este relevo de información en tiempo y forma, puede derivar en la aplicación de trabajos de mitigación o corrección en las laderas afectadas. Previniendo de esta manera, en forma parcial o total, un desastre en la zona de estudio.

El trabajo de monitoreo propuesto debe incluir los esfuerzos y participación activa de la población de la ciudad de Tijuana. Para lograr dicho objetivo, es necesario procesar la información recabada y presentarla de manera entendible y amigable a los habitantes de la ciudad. Un sistema ideal lo conformarían los trabajos de inspección eficientes, la gestión de información adecuada, distribución de los datos actualizados, a través de medios interactivos para la población y así aportar a la formación de conocimiento y participación activa de los habitantes.

El ejemplo perfecto se puede consultar en la página virtual del Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) en COLOMBIA, el cual, entre otras cosas, realiza trabajos de monitoreo de laderas, agrupa la información adecuada referente al riesgo, vulnerabilidad y desastres asociados a los deslizamientos en la región de Bogotá. La dependencia presenta todo lo anterior en un mapa interactivo y completamente accesible para la población en general. Dicha información procura estar actualizada a los acontecimientos de la región. De tal manera, que cada habitante puede consultar los resultados de la gestión del monitoreo de laderas y asociarlos al riesgo al que pueden estar expuestos.

CAPÍTULO 5. TRABAJOS COMPLEMENTARIOS

La supervisión del comportamiento superficial de las laderas en la ciudad de Tijuana, propuesta hasta el momento, pretende aportar esfuerzos en los trabajos de prevención de desastres provocados por la incidencia de problemas de inestabilidad de laderas. Siendo una iniciativa sencilla que aspira a derivar en proyectos con mayor alcance y capacidad para apoyar a la población de la ciudad, además de propiciar el desarrollo de sistemas de monitoreo cada vez más avanzados. Hasta este momento, y debido a las limitaciones planteadas, se propone atacar el problema por medio de 3 ejes sencillos; la supervisión de los movimientos superficiales, control y vigilancia de los agrietamientos superficiales y monitoreo de los cambios en la inclinación de cualquier elemento localizado en una zona con posibilidades de sufrir algún movimiento de masa. Todo lo anterior se logrará por medio del uso del equipo estrictamente necesario. Queda claro que es inherente al monitoreo, identificar con conocimiento los factores que pueden influir en la estabilidad de las laderas.

Este sistema, idealmente, generará el conocimiento adecuado para mejorar cualquier metodología aplicada al mismo. Bajo este contexto, se presenta la siguiente información en con el objetivo de describir los procesos que pueden complementar los trabajos del sistema de monitoreo propuesto.

5.1 Metodología complementaria

5.1.1 Mediciones pluviométricas

Como se ha mencionado hasta el momento, la presencia de agua en la estructura interna de una ladera forma parte de los factores desencadenantes más peligrosos en los procesos de inestabilidad. Existen distintas fuentes que pueden ocasionar la infiltración de agua al interior de una ladera, siendo la precipitación el agente más importante, y por consecuencia, la relación entre los procesos de inestabilidad y la precipitación acumulada, lluvia antecedente, intensidad de las precipitaciones y su duración, han sido motivo de múltiples estudios e investigaciones (Domínguez Morales, Castañeda Martínez , & González Huesca , 2016).

Entender la relación entre la precipitación y su influencia en las características internas de una ladera, supone un concepto ideal para prever la incidencia de un movimiento de masa provocado por la presencia de lluvias. Lograr este objetivo a niveles ideales de precisión y certeza implica utilizar la instrumentación más avanzada y recurrir a técnicas de muestreo y caracterización de materiales que se verá reflejado en un aumento en los costos del sistema de monitoreo. Por ello, es recomendable acudir a los niveles más sencillos que permitan relacionar algunas propiedades de la lluvia con la incidencia de un problema de inestabilidad.

Domínguez Morales y colaboradores, en el 2016 publicaron los resultados de un análisis de umbrales de lluvia que resultan en la activación de deslizamientos en distintas regiones susceptibles del país. La determinación de dichos umbrales se basó en el análisis estadístico de precipitación acumulada y su relación con la ocurrencia de deslizamientos históricos. De esta manera, definieron valores límite críticos o intervalos de precipitación a partir de los cuales la situación de estabilidad de la zona podría considerarse como crítica. El umbral de precipitación media mensual para la ciudad de Tijuana, resultado del análisis del periodo comprendido desde 1941 hasta el 2005, se define entre 17.5 mm y 35 mm. Esto significa que para la ciudad de Tijuana y de acuerdo al periodo temporal mencionado, por debajo de los 17.5 mm de lluvia el proceso de un deslizamiento en la ciudad no ocurre. Mientras que los 35 mm de precipitación mensual representan el nivel por encima del cual un proceso de inestabilidad tiene altas probabilidades de ocurrir.

El trabajo publicado por Domínguez Morales es el reflejo del esfuerzo realizado por obtener una relación estadística entre lluvias y deslizamientos. Al obtener dichos valores límites de precipitación, se pueden definir e implementar estrategias de prevención de desastres en las zonas de estudio, por ende, en los sitios identificados como de alto riesgo. Esto representa una metodología sencilla que puede implementarse en la ciudad de Tijuana, midiendo la precipitación que llegue a presentarse en la región. Para ello es necesario el uso de aparatos de medición conocidos como pluviómetros, los cuales consisten, básicamente, en recipientes expuestos a la intemperie, los cuales captan el agua producto de la lluvia (Mendoza López, Domínguez Morales, Noriega Rioja, & Guevara Ortiz, 2002). La complejidad del aparato puede variar de acuerdo a la precisión con la que se pretende realizar las mediciones, existen equipos bastante avanzados y complejos, comúnmente utilizados en las estaciones meteorológicas, de igual manera, es posible aplicar el concepto del pluviómetro para desarrollar medidores más sencillos y de fácil acceso.

Colocar cualquier tipo de equipo pluviométrico en las zonas monitoreadas de la ciudad, puede representar un trabajo complementario con una gran aportación para prevenir los daños provocados por un deslizamiento, desencadenado por la presencia de lluvias.

La implementación de cualquier relación estadística o conceptual, en función de la presencia de lluvias y la ocurrencia de un deslizamiento, dependerá del nivel de precisión con el que se desee contar en el sistema de monitoreo. Profundizar en esta clase de planteamientos no es parte de los objetivos de este trabajo escrito, pero es recomendable acudir a las referencias adecuadas para lograr complementar cualquier trabajo de monitoreo.

5.1.2 Tecnología GPS

Los avances tecnológicos dentro de los campos de la topografía y navegación se han ido desarrollando con el paso del tiempo, al grado de implementar herramientas y equipos que trabajen de manera más eficiente, reduciendo el tiempo en campo y el costo de los trabajos. Tal es el caso de los sistemas de posicionamiento global o GPS, por sus siglas en inglés. Un receptor GPS recibe las señales emitidas por una red de satélites artificiales que orbitan sobre la Tierra, esta señal permite calcular la posición relativa del satélite con respecto al receptor. Cuando se recibe la señal de distintos satélites, mínimo tres, es posible conocer mediante triangulación la posición sobre el globo terráqueo, del equipo GPS (Villalpando Tovalín, 2016).

El marco conceptual que rodea a los sistemas de posicionamiento global es bastante extenso y sigue ampliándose con el desarrollo tecnológico y su respectiva generación de conocimiento, para fines de esta propuesta no se ahondara más en dichos temas. Solo se recomienda utilizar cualquier equipo GPS sencillo que apoye en los trabajos de monitoreo. El posicionamiento de las referencias topográficas, así como de cualquier testigo o herramienta implementada en el sistema de monitoreo, representa un trabajo complementario que puede facilitar a la brigada de trabajo, para la localización de las referencias supervisadas, sobre todo en espacios con poca intervención urbana. De igual manera, el uso de un equipo GPS, junto con la gestión de información recabada, será de gran ayuda para la generación de mapas e informes.

5.1.3 Aplicación de un equipo Geo-radar

Dentro de los estudios de exploración geofísica, existen diversos métodos para obtener información sobre las características de los perfiles del subsuelo. Es una de las formas más rápidas y relativamente económicas de obtener información. Dichos métodos se basan en la medición de la variación de la velocidad de propagación de ondas sísmicas o de la resistividad electromagnética en los suelos y rocas (Coliente Tlaxcalteca, 2010). Interpretando y correlacionando los datos arrojados se deducen las posibles propiedades del subsuelo. Esta clase de estudios son preliminares mas no definitivos, no reemplazan los sondeos y estudios geológicos convencionales, mejor dicho, los complementan.

Coliente Tlaxcalteca enlista los distintos métodos geofísicos para el reconocimiento del subsuelo, de acuerdo al parámetro que se desea investigar: gravimétricos (densidad), magnéticos (susceptibilidad magnética), eléctricos (resistividad), electromagnéticos (conductividad eléctrica y permeabilidad magnética), sísmicos (velocidad de propagación de ondas sísmicas) y radiactivos (niveles de radiación natural o inducida).

Para cumplir el objetivo principal del sistema de monitoreo propuesto, el cual consiste en prevenir los daños provocados por algún proceso de inestabilidad de laderas, es necesario realizar los trabajos de la manera más rápida y eficaz posible, limitándose por su puesto a las capacidades de la brigada y el equipo disponible.

Si se encuentra dentro de los alcances del sistema de monitoreo, se recomienda la aplicación de algún método geofísico de exploración, el cual no consista en alguna prueba invasiva en el área de estudio, que tenga posibilidades de convertirse en un factor desencadenante. De la misma manera, se sugiere elegir aquel que no implique un alto grado de dificultad en su aplicación y manejo, buscando desde luego, reducir los costos de operación.

En este sentido, el radar de penetración terrestre o Geo-radar, podría ser el método más adecuado. Consiste en emitir un pequeño pulso electromagnético hacia el suelo. Una fracción del pulso emitido viaja a través del subsuelo mientras que otra parte de la energía es reflejada hacia la superficie (figura 48).

Cuando la onda emitida encuentra heterogeneidad en las propiedades electromagnéticas del subsuelo (planos estratigráficos, fracturas, discontinuidades, huecos, infraestructura subterránea) parte del pulso se refracta y dichos reflejos son captados por un receptor y de ahí son procesados para su posterior interpretación.

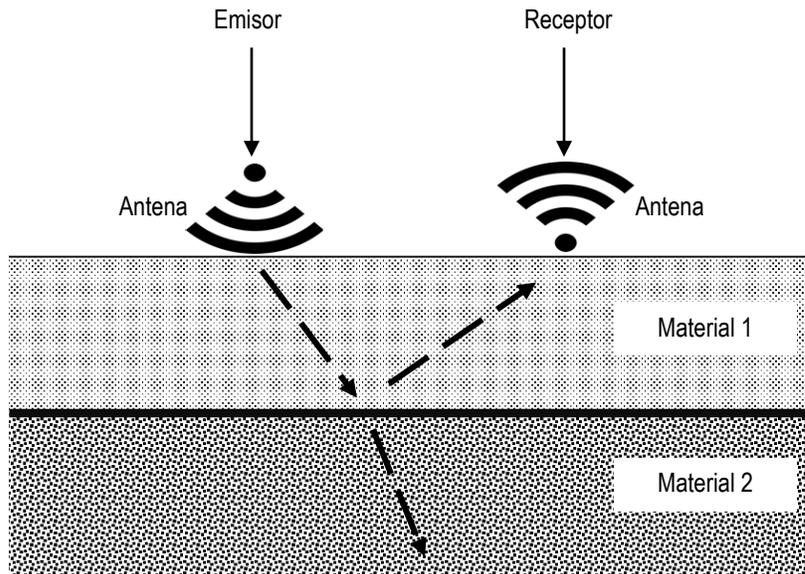


Figura 48. Principio básico del radar de penetración estándar (Peniche Espejel, 2008).

Mientras el procedimiento de emisión y recepción de los pulsos se lleva a cabo, el equipo se desplaza sobre la superficie. De esta manera, a diferencia de otros métodos de exploración geofísica, no es necesario invadir el subsuelo para acoplar los dispositivos (Peniche Espejel, 2008). Sus ventajas principales son la rapidez de toma de datos y versatilidad de los distintos tipos de equipos disponibles. La interpretación de los registros se basa en la caracterización de la textura, amplitud, continuidad y terminación de las reflexiones. Los resultados se visualizan como en la figura 49, donde se puede observar la interpretación de un estudio realizado por un equipo radar de penetración terrestre comercial, modelo *Quantum multi-frecuencia*.

Como se mencionó anteriormente, los resultados obtenidos por un Geo-radar en la ciudad de Tijuana, no serán definitivos y en la medida de lo posible deben ser corroborados por algún método de exploración directa, pero su aplicación representa un trabajo complementario idóneo para presentar una idea parcial de las condiciones superficiales del subsuelo en una ladera.

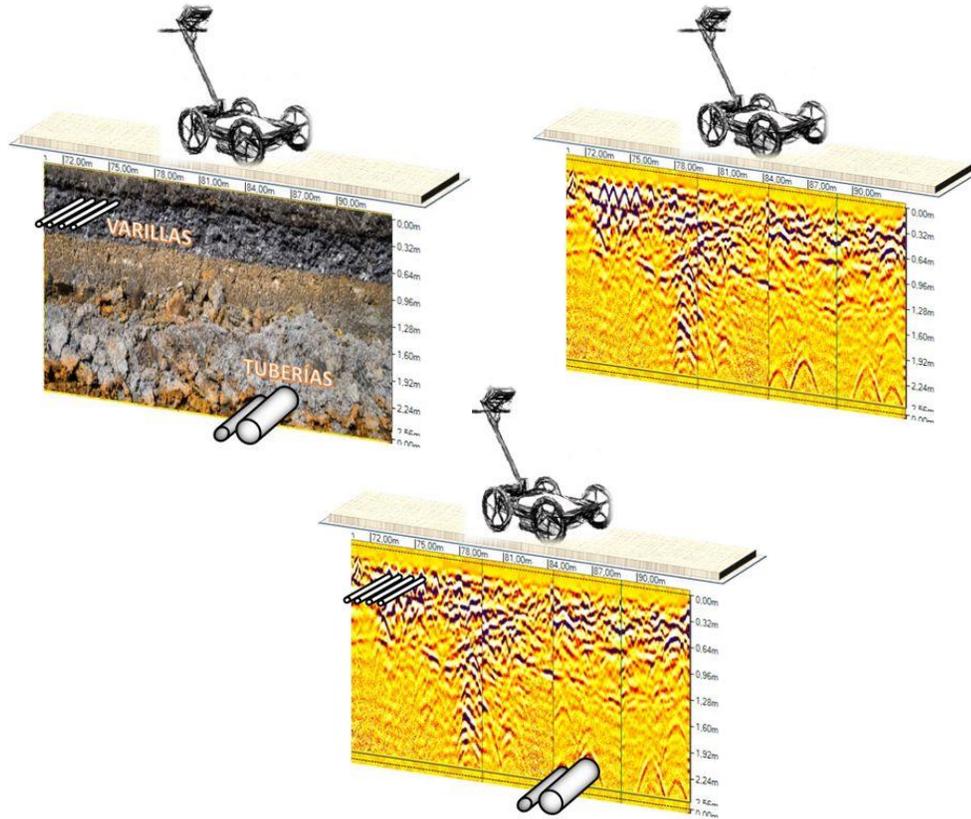


Figura 49. Aplicación e interpretación de los datos reflejados por el radar GPR Quantum multi-frecuencia (Investigaciones subterráneas, s.f.).

5.2 Generación de mapas y aplicación de Sistemas de Información Geográfica

5.2.1 Zonificación

La zonificación consiste en identificar y dividir el terreno en áreas homogéneas y la calificación de cada una de estas áreas, de acuerdo al grado real o potencial de riesgo o susceptibilidad. La zonificación es una herramienta muy útil para la toma de decisiones, especialmente en las primeras etapas de planeación de un proyecto (Suárez Díaz, 2009). Esta clasificación surge como resultado de una investigación previa de las zonas de interés o por la gestión de información obtenida por algún tipo de trabajo de campo, en este caso, de los trabajos de monitoreo propuestos. En cualquier caso, se realiza un mapeo y zonificación con base en los factores que constituyen un problema de inestabilidad de laderas.

Existen diferentes métodos y procedimientos para lograr identificar los factores influyentes en la inestabilidad de ladera y determinar el nivel de riesgo que representan para el área de estudio. Una de las instituciones nacionales que ha empeñado esfuerzos titánicos para desarrollar, mejorar y lograr estandarizar procesos relacionados con la gestión de riesgos naturales, el CENAPRED, presentó en el 2014 una metodología para elaborar mapas de peligro por precipitación para la inestabilidad de ladeas a escala regional, dicha metodología se basa en identificar factores condicionantes, que consideran básicos, los cuales tendrán diferente influencia relativa sobre la estabilidad del terreno y por tanto el grado de susceptibilidad a la inestabilidad.

Una vez identificados los factores condicionantes, se debe realizar un proceso de ponderación de acuerdo a las características de dichos factores, el cual dará como resultado una calificación o sumatoria que definirá el grado de susceptibilidad de deslizamiento a la ladera de estudio. Los factores que considera CENAPRED para atribuir un valor relativo a cada una de sus características, son aquellos relacionados con la topografía, características geotécnicas, geológicas y geomorfológicas, presencia de vegetación y uso de suelo, además de considerar los antecedentes históricos. En la Tabla B.1 del anexo B, se puede observar con mayor detalle las características y valores relativos que CENAPRED asigna a los distintos factores involucrados.

En la Tabla 7 se muestran los valores que definen el grado de susceptibilidad del área de estudio, de acuerdo a la sumatoria generada por los valores mencionados anteriormente. Para asignar dichos atributos, la precisión y certidumbre de los valores, dependerá de la capacidad y preparación del personal asignado. Por lo cual se recomienda trabajar en conjunto con profesionales involucrados en la gestión de riesgos y la brigada de monitoreo. De esta manera, los trabajos de supervisión del comportamiento superficial de las laderas, propuestos en este documento, pueden aportar a la generación de mapas que zonifiquen la ciudad de Tijuana, complementando el inventario existente.

Tabla 7. Estimación del grado de la susceptibilidad de deslizamiento (González Huesca & Nieto, 2014).

Grado	Descripción	Suma de 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

5.2.2 Sistemas de Información Geográfica

También conocidos como SIG, son sistemas que logran integrar y analizar distintos niveles de información geográfica, permitiendo visualizar los datos obtenidos en un mapa. Esto se lleva a cabo a través de capas de atributos o cobertura de datos que se van superponiendo unas a otras según la información se requiera (figura 50). De dicho proceso se obtiene un mapa temático y la mayoría de las veces, interactivo, es decir, la representación gráfica de un tema en específico (González Huesca & Nieto, 2014).

En este contexto, los SIG son una herramienta muy útil para la elaboración e interpretación de mapas de zonificación de riesgo por inestabilidad de laderas, ya que permite almacenar y manipular la información referente a los distintos factores del terreno como capas de datos. Las ventajas principales de su aplicación de acuerdo al criterio de González Huesca y Nieto son: la capacidad de almacenamiento, capacidad de presentar los datos de manera independiente, visualización gráfica y georeferenciada y la posibilidad de manejar la información de forma sencilla, ya sea para la elaboración de investigaciones o en su defecto para la actualización de mapas.

El uso de SIG para la elaboración de mapas en la ciudad de Tijuana, permitirá almacenar y manejar la información referente a los trabajos de monitoreo aportando un enfoque espacial e interactivo, el cual podría representar un elemento importante para la difusión de información accesible para la población. Para el manejo de las herramientas proporcionadas por los SIG, es recomendable contar con personal capacitado y mantener una constante actualización de conocimientos referente al uso y manejo de dichos sistemas.

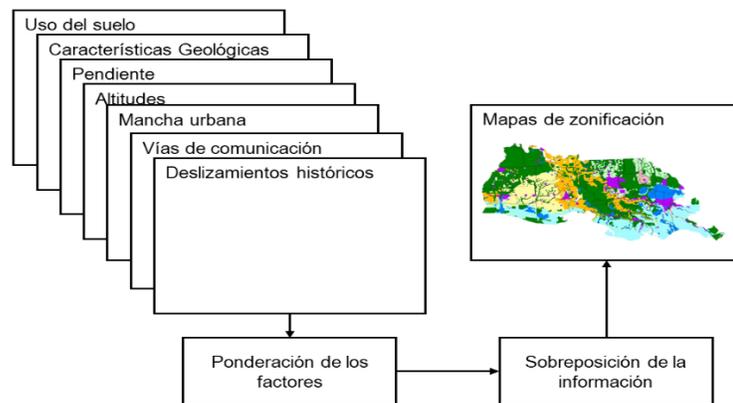


Figura 50. Procedimiento usual para la generación de mapas de riesgo, utilizando SIG.

5.3 Sistemas automáticos y de alerta temprana

5.3.1 Sistemas automatizados de monitoreo

Un sistema automático de monitoreo permite reconocer las condiciones de una ladera, supervisando de manera segura y a distancia dichos parámetros, esto se logra por medio de sensores, instrumentación de mayor complejidad y la comunicación entre el sistema en campo y una computadora donde se realiza propiamente el monitoreo, congregando los datos de los diversos sensores. El mismo sistema o la intervención del personal asignado realiza el procesamiento de la información y su análisis. De esta manera, de ser necesario, se toman las decisiones adecuadas de acuerdo al análisis realizado, todo desde una distancia segura, ahorrando tiempo y costos de operación (Mendoza López, Domínguez Morales, Noriega Rioja, & Guevara Ortiz, 2002).

Desde luego, el costo inicial de un sistema automatizado es mucho mayor, por la complejidad de la instrumentación necesaria, y en el caso de la aplicación para la ciudad de Tijuana, la cantidad de sensores y equipos necesarios aumentará considerablemente dicho costo. Además de agregar un sistema de transmisión de datos que puede incluir desde líneas telefónicas hasta radio transmisores y receptores satelitales. En un principio, este tipo de implementación queda fuera del alcance de la propuesta presente, pero representa un objetivo que debe alcanzarse en un futuro para mejorar los procedimientos necesarios que aporten a la prevención de desastres originados por la incidencia de movimientos de masa en la ciudad de Tijuana

En la figura 51 se muestra el esquema de un sistema automatizado de monitoreo, adoptado en la prefectura de Oita en Japón, dicho esquema lo presento en el 2002 Mendoza López y colaboradores. Se compone básicamente en sensores ubicados en el sitio de interés que recolectan la información y a su vez es procesada por una oficina de campo, compuesta por una computadora. En dicha oficina se encuentra una línea telefónica por donde se comunica con el centro de observación que se encarga de analizar los datos y tomar las decisiones adecuadas.

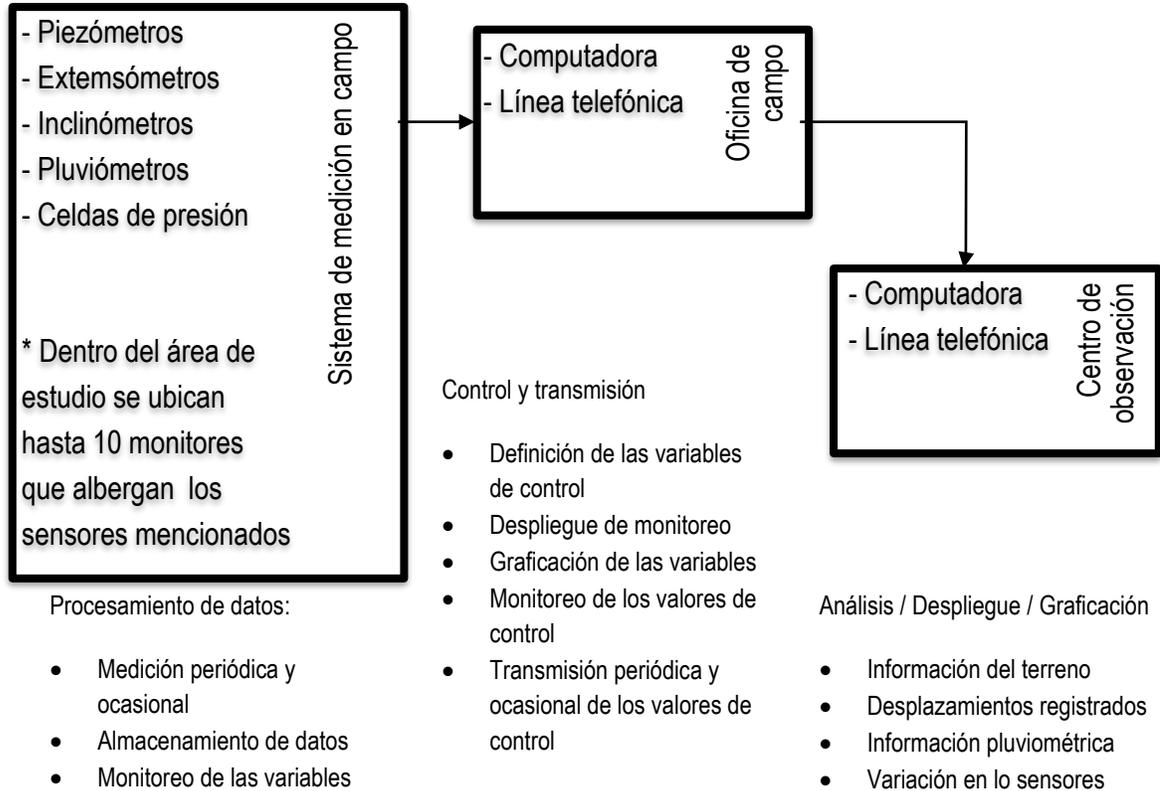


Figura 51. Sistema de monitoreo de laderas en la prefectura de Oita, Japón. Modificado de Mendoza López y colaboradores en el 2002.

El monitoreo en tiempo real, con equipo e instrumentación controlada a distancia, podrá dotar de mayor velocidad al sistema para la toma de decisiones adecuadas, antes, durante y después de ocurrido un deslizamiento. Las brigadas de monitoreo no tendrán que exponerse ante los riesgos asociados a los trabajos de supervisión en laderas inestables. Para el caso de la ciudad de Tijuana, la implementación de un sistema automático, se sugiere para casos específicos o laderas que representen alta prioridad para la población. Buscando para un futuro, contar con el equipo, sistemas de comunicación y personal capacitado para la aplicación de sistemas automatizados.

5.3.2 Sistemas de alerta temprana

Cuando existe la posibilidad de contar con la infraestructura necesaria para colocar los sensores que registren las características más significativas en un evento de inestabilidad de laderas, es necesario desarrollar un sistema que permita recopilar y administrar la información acerca del comportamiento de la estructura de la ladera, comunicar en forma oportuna dicha información al personal capacitado y asignado para facilitar la toma de decisiones y tener la posibilidad de alertar de forma pertinente a la población vulnerable. En la figura 52 se puede observar el esquema que ilustra el funcionamiento de un sistema de alerta temprana, según Cordero Carballo, en el 2012.



Figura 52. Esquema operacional de un sistema de alerta temprana, adaptado de Cordero Carballo y UNESCO, 2012.

Cordero Carballo y Espinoza Carazo definen lo mencionado en el párrafo anterior, como un sistema de alerta temprana (SAT), cuya organización puede ser tan simple o compleja como se requiera, pero deben contar como mínimo con tres componentes básicos: un sistema de instrumentación, adaptado para el tipo de agente desencadenante que se desea monitorear; un sistema informático que reciba los datos y permita su análisis y un sistema de alarma que avise del peligro inminente.

Para lograr los objetivos del sistema de alerta es necesario contar con la participación de un pequeño panel de expertos o el desarrollo del denominado sistema experto. La intervención de especialistas, mínimo un ingeniero geotecnista y una persona preparada en el aspecto de la gestión

de riesgos, se encargarán de garantizar una interpretación y toma de decisiones correctas. Si la instrumentación es mal colocada, genera datos innecesarios o trabaja adecuadamente pero no se interpreta la información recabada, su utilidad queda en entredicho y su costo, se tornará en gastos inútiles. De ahí que sea indispensable contemplar dentro del equipo de trabajo, sobre todo al momento de implementar un sistema de alerta temprana, a los profesionales idóneos que aseguren el éxito en: el diseño, colocación, monitoreo y mantenimiento de la instrumentación, incluyendo los sistemas de comunicación, si es el caso; análisis e interpretación de la información recabada y la toma de decisiones para los niveles de alertamiento a la población (Mendoza López, Domínguez Morales, Noriega Rioja, & Guevara Ortiz, 2002).

El sistema experto funciona de manera similar, éste reúne datos y reglas que se usan como fundamento para la toma de decisiones, se puede considerar como un algoritmo enfocado a la correcta toma de decisiones de acuerdo a la información registrada en la zona de interés. El desarrollo de un sistema experto implica el esfuerzo conjunto de un grupo multidisciplinario de ingenieros y especialistas en la gestión de riesgos. Podemos considerar al sistema experto como el máximo desarrollo en un sistema automatizado, donde los datos serán obtenidos de manera automática por la instrumentación colocada, el mismo sistema interpretará los datos y realizará la toma de decisiones de acuerdo a la base de conocimientos relacionados con la inestabilidad de laderas.

Los sistemas de alerta temprana basarán sus procedimientos de acuerdo al parámetro que estén registrando, el más común, publicado por Cordero Carballo, define niveles de alarma en función de las velocidades de desplazamiento en las laderas monitoreadas, presentando el esquema mostrado en la Tabla 8.

Tabla 8. Esquema de niveles de alarma y respuesta adaptado de Cordero Carballo, 2012.

Nivel de alarma	Actividades y alarmas	Respuesta
Nivel 1 Situación normal	Variaciones menores Ninguna alarma	Equipo técnico solamente Mantenimiento técnico
Nivel 2 Alerta	Variaciones importantes en uno o más sensores	Incrementar frecuencia de información, comparar diferentes sensores Notificar a experto geotécnico

Tabla 8. Continuación: Esquema de niveles de alarma y respuesta adaptado de Cordero Carballo, 2012.

Nivel de alarma	Actividades y alarmas	Respuesta
Nivel 3 Incrementar alerta	Incrementos en la velocidad de desplazamientos observados en múltiples sensores	Revisión continua de información en oficina y campo, presencia de experto en oficina Informar a instituciones encargadas de atención de emergencias
Nivel 4 Alta amenaza	Incrementos en la velocidad de desplazamientos observados en múltiples sensores	Incrementar la preparación, análisis continuo de información Alertar a la población para estar preparada para evacuación
Nivel 4 Situación crítica	Incremento continuo de desplazamiento en taludes	Evacuación

La tecnología para los sistemas de alertamiento, representa el desafío más grande, debido a los tiempos de reacción que pueden variar desde unos pocos segundos, en áreas cercanas a la ruptura de la falla, a minutos en zonas más alejadas, por lo tanto, en caso de optar por implementar un sistema de tal magnitud, se debe adaptar a un nivel local, a cada proyecto particular (Cordero Castillo & Espinoza Carazo, 2012). Bajo este contexto, se recomienda iniciar con lo que el inventario de sistemas de alerta temprana, presentado por la UNESCO en Costa Rica, denomina SAT comunitario. Este se basa en la participación activa de voluntarios oriundos de las comunidades que habitan en la zona donde se pretende establecer el SAT. Cumplen funciones en la respuesta, pero también participan en tareas de prevención: con la operación, mantenimiento y registro de instrumentación sencilla implementada en el lugar. El papel del voluntario en el control y monitoreo es fundamental, y se ve reflejado en un beneficio a la población vulnerable (UNESCO, 2012).

La participación organizada por parte de la comunidad y la constante comunicación con los administradores del SAT, es esencial para el éxito del sistema. Corresponde a los encargados del sistema de monitoreo, capacitar a los voluntarios, para permitir el avance en el conocimiento asociado a la inestabilidad de laderas y el uso de la información que lleguen a recabar. De esta manera, se puede avanzar paso a paso, en el desarrollo de un sistema adecuado para la ciudad de Tijuana.

5.4 Uso de dispositivos aéreos pilotados a distancia

La Dirección General de Aeronáutica Civil en México (DGAC) define a las aeronaves no tripuladas como aeronaves pilotadas a distancia (RPA por sus siglas en inglés) o comúnmente conocidas como DRON. El sistema de aeronave pilotada a distancia o RPAS / Drones, está compuesto por la aeronave y todo lo asociado con el equipo de soporte para su operación, tal como la estación de control, datos de enlace, telemetría, equipo de navegación y comunicación, mecanismo de lanzamiento y recuperación, entre otros. Además de considerarse a la persona que controla el dispositivo, denominada piloto en tierra, y cuando aplique, con apoyo de una computadora para operar el dron de forma segura. Toda la reglamentación, limitaciones, requerimientos, clasificación y tipo de uso de los drones, se estipula en la circular publicada por la DGAC, en el 2017, se recomienda ampliamente acudir a dicha referencia para tener un mayor conocimiento del uso y manejo correcto de los drones en México.

Parte de los trabajos complementarios dentro de la investigación de campo en la geología, como en otras áreas de la ingeniería, radica en el uso de fotografías aéreas, también conocido como fotogrametría área, la cual consiste en la generación de mapas de grandes extensiones de territorio. Haciendo uso de distintas aeronaves modificadas para tal fin, y con el avance de la tecnología, diferentes dispositivos digitales para obtener una mejor calidad de las imágenes aéreas. Definir la metodología asociada a la fotogrametría y las distintas herramientas y equipos que se utilizan para tal fin, no forma parte de los objetivos de este trabajo escrito, por lo tanto, se recomienda acudir a las referencias adecuadas para ahondar más en el tema.

Al interpretar de manera correcta las fotografías áreas, se vuelve una herramienta muy importante para la obtención de información referente a las características geométricas, geológicas y geomorfológicas visibles, así como de movimientos superficiales en el terreno estudiado. Para su aplicación en el monitoreo de laderas, las fotografías áreas permiten obtener una vista tridimensional del área, un mejor entendimiento de los cauces naturales localizados en la zona de interés, localizar los elementos naturales o artificiales más vulnerables y delimitar la posible zona de riesgo (Suárez Díaz, 2009). Queda claro que cualquier información que se tome de las fotografías áreas debe corroborarse con trabajo de campo y debe evitarse en la medida de lo posible, basar algún trabajo en la información obtenida de las fotografías sin la validación en campo.

Un ejemplo del aporte que puede proporcionar un dispositivo aéreo pilotado a distancia, se obtuvo en junio del 2018. Como parte del servicio social realizado en la Dirección de Protección Civil Municipal de Tijuana, en dicho periodo, para la toma de fotografías aéreas en el deslizamiento ocurrido en la colonia Lomas del Rubí. En dicho levantamiento se utilizó un dispositivo *PHANTOM 3* multi-rotor de 4 hélices, con una cámara montada. El cual realizó el recorrido mostrado en la figura 53 a una altura de 60 metros respecto al punto de partida; capturando un total de 73 fotografías traslapadas como se muestran en la figura 54, con una resolución de 1.8 cm por pixel. Dando como resultado la imagen del deslizamiento de la figura 6, donde se puede observar con relativa facilidad las distintas zonas del movimiento y brindar la oportunidad de comprender las dimensiones del desastre provocado por el desplazamiento del terreno.



Figura 53. Recorrido realizado por el dron en la colonia Lomas del Rubí, en junio del 2018.



Figura 54. Traslape de las fotografías tomadas en junio del 2018, en la colonia Lomas del Rubí.

El sobrevuelo mencionado se realizó con un objetivo demostrativo y con el apoyo y supervisión de la Dirección de Protección Civil Municipal. No se generaron planos o mapas detallados del deslizamiento. Las imágenes capturadas sirvieron para visualizar el daño desde una perspectiva aérea, una vista más amplia del evento en tiempo real.

Apoyar los trabajos de monitoreo de laderas en la ciudad de Tijuana, con el uso de los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia, permitirá a las brigadas de monitoreo tener una idea más clara respecto al sitio de estudio, la brigada tendrá la oportunidad de ubicar el lugar en un contexto más allá de la percepción que implican las inspecciones visuales realizadas en los recorridos a pie. Será posible relacionar el área de interés a una escala más amplia, permitiendo la posible identificación de factores influyentes o síntomas de inestabilidad que fácilmente pueden ser pasados por alto en los recorridos comunes. De igual manera, el personal asignado tendrá la oportunidad de delimitar, de

acuerdo a lo observado en la imagen, y corroborar de manera presencial, la posible zona de afectación, con datos obtenidos al momento.

Lo anterior significa una gran ventaja respecto a las imágenes satelitales, que, en caso de sitios específicos, su resolución dificulta una inspección más adecuada. Del mismo modo, las fecha en la que fueron tomadas, da pie a contrastar con los eventos actuales. A diferencia de los resultados que puede arrojar el uso de drones, los cuales permiten una inspección en el momento que se realiza el sobrevuelo. De esta manera, se puede observar el cambio en el comportamiento superficial de la ladera estudiada con el paso de las inspecciones periódicas. Al igual que con las revisiones del monitoreo superficial, es posible asignar un periodo semanal para condiciones normales, dos a tres veces por semana con la presencia de un movimiento y diariamente en condiciones críticas.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DEL POSIBLE MECANISMO DE FALLA

6.1 Propiedades mecánicas de los suelos

Dentro de los factores que condicionan la estabilidad de laderas, falta mencionar aquellos asociados al comportamiento intrínseco de los materiales que las componen. Para este trabajo se hará mención de las características mecánicas más importantes de los materiales presentes en laderas, formadas en su mayoría por suelos, dado que, en la ciudad de Tijuana, gran parte de los lomeríos de la región se conforman por gravas, arenas o suelos finos.

Es preciso dejar en claro que el objetivo de este capítulo es demostrar la influencia de ciertos factores condicionantes y desencadenantes en la estabilidad de una ladera, las propiedades de las que se hará mención, no engloban el extenso marco teórico de la mecánica de suelos. En este apartado se hará mención de aquellos parámetros relacionados con la resistencia al esfuerzo cortante en suelos, que se definen más adelante, con respuesta cohesiva–friccionante.

6.1.1 Concepto de esfuerzo

El marco conceptual asociado a la teoría del estado de esfuerzo es bastante amplio, por lo cual, una descripción detallada del mismo no forma parte de los objetivos de este trabajo. Solamente se hace mención de aquellos conceptos indispensables para respaldar y comprender el criterio de Coulomb, el cual explica la relación existente entre los esfuerzos actuantes en un material y su condición de falla (envolvente de falla o de resistencia). Tal teoría resulta necesaria para el análisis elegido en este trabajo, del posible mecanismo de falla en una ladera

Empero, es necesario dejar en claro la noción de esfuerzo, el cual, se puede definir de manera más sencilla con el siguiente ejemplo de mecánica de materiales. Suponiendo que, en una barra sometida a una carga axial P se hace un corte perpendicular al eje de la barra, como se muestra en la figura 55.

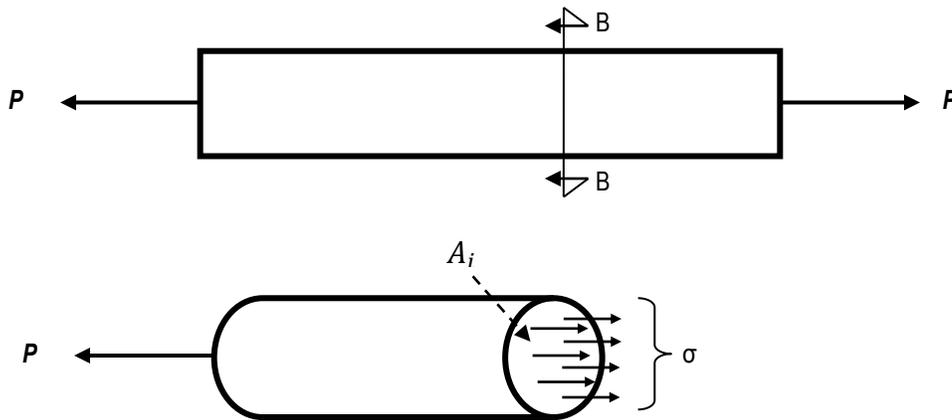


Figura 55. Concepto de esfuerzo.

Debido a la reacción del material a la sollicitación P , por equilibrio de fuerzas, en la sección transversal deben presentarse fuerzas por unidad de área que reciben el nombre de esfuerzos normales y se denotan comúnmente por la letra griega sigma (σ). Si se supone una distribución uniforme en la sección transversal, es posible calcular la magnitud de los esfuerzos dividiendo la carga aplicada entre el área inicial de la sección analizada. Por lo tanto, los esfuerzos se pueden calcular de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{P}{A_i} \quad (2)$$

Donde P es la carga axial y A_i es el área inicial de la sección transversal. Ya que el esfuerzo σ actúa en dirección perpendicular a la superficie del corte, se le conoce como esfuerzo normal. Dicho concepto se retomará más adelante, para su definición dentro de la mecánica de suelos. Dado que el esfuerzo se determina por el cociente de la fuerza entre el área de la sección transversal, detenta unidades de fuerza por cada unidad de área. Empleando el Sistema Internacional, la fuerza se expresa en newtons (N) y el área en metros cuadrados (m^2). De esta manera, el esfuerzo se determina en unidades de newtons por metro cuadrado (N/m^2), o pascals (Pa) (Gere & Timoshenko, 1986).

El esfuerzo resultante, no es exclusivo de cargas axiales. Cuando en un cuerpo actúan fuerzas paralelas o tangenciales a la superficie del cuerpo, la respuesta del material se ve reflejada por medio de fuerzas, de igual manera, tangenciales a la superficie. A este tipo de esfuerzo se le conoce como esfuerzo cortante. De manera similar, el esfuerzo cortante se determina mediante el cociente de las fuerzas cortantes y la superficie donde actúan dichas cargas. Se acostumbra representarlos con la letra griega tau (τ).

La respuesta de los materiales que conforman el cuerpo sólido de los suelos, no se ve reflejada únicamente por medio del esfuerzo normal, en el comportamiento mecánico de los suelos, la reacción a distintas sollicitaciones implica otra clase de esfuerzos. Para comprender de mejor manera esta situación, se hará alusión a las notas sin publicar, de Padilla Velázquez (2015).

Analizando un cuerpo, como un sistema bajo ciertas cargas externas, en condiciones ideales de equilibrio estático, la respuesta del cuerpo se dará en forma estática lineal. De manera que a ciertas fuerzas aplicadas corresponda un solo valor de deformación. Con dichas consideraciones se supone que las fuerzas externas se equilibran con las fuerzas internas (figura 56).

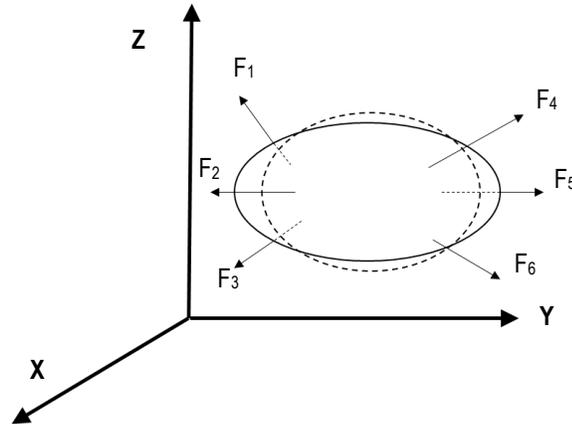


Figura 56. Cuerpo esforzado en equilibrio (sistema) (Padilla Velázquez, 2015).

Como consecuencia de un análisis vectorial, en un punto localizado en una sección de corte imaginario al cuerpo de la figura anterior, es posible representar la influencia sobre el plano imaginario, de un vector esfuerzo, el cual es resultado de la reacción del sistema a las sollicitaciones aplicadas, véase la figura 57. Dicha influencia se ve reflejada en el plano imaginario, como los

componentes escalares del vector esfuerzo, los cuales recibirán su nombre según actúen: normales al plano imaginario o contenidos en el mismo. Para la componente normal se reserva la letra griega sigma (σ), y tau (τ) para las componentes actuantes sobre el mismo plano o conocidas como esfuerzos cortantes.

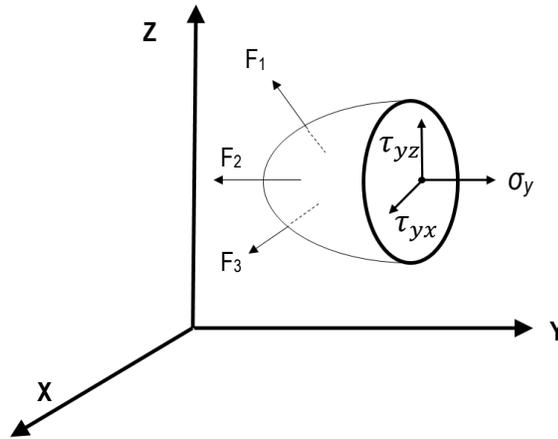


Figura 57. Componentes escalares del vector esfuerzo (Padilla Velázquez, 2015).

En la figura 58 se puede observar las componentes escalares del denominado tensor esfuerzo, el cual expresa la distribución y magnitud de los esfuerzos internos en un cubo diferencial. Este puede representar una partícula infinitamente pequeña, perteneciente a la estructura sólida de un suelo.

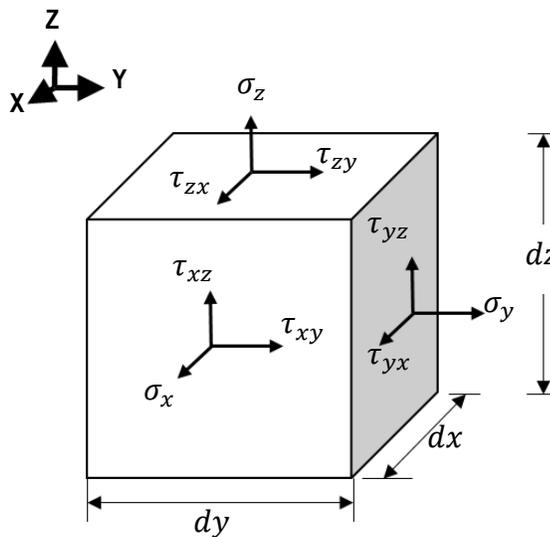


Figura 58. Componentes escalares del tensor esfuerzo (Padilla Velázquez, 2015).

Dado que los suelos se consideran siempre bajo compresiones importantes, es costumbre cambiar la convención de signos con respecto a la mecánica del medio continuo. Definiendo los esfuerzos positivos para la mecánica de suelos como se muestra en la figura 59.

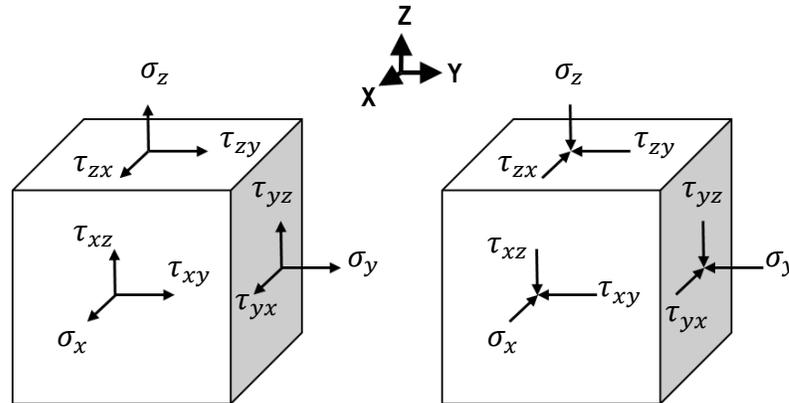


Figura 59. Convención de signos para Mecánica del medio continuo (izquierda) y Mecánica de suelos (derecha) (Padilla Velázquez, 2015).

Por lo tanto, se definen como esfuerzos positivos a aquellos que actúan en caras positivas, y se representan con sentido contrario al de su eje paralelo del sistema de referencia. La convención es válida tanto para esfuerzos normales como para esfuerzos cortantes.

6.1.2 Resistencia al esfuerzo cortante

La capacidad de cualquier estructura, incluyendo a las laderas, para soportar cargas sin llegar a la falla, se le conoce como resistencia. De igual manera, se puede definir como el valor máximo que dicha sollicitación puede alcanzar antes de que suceda la falla de la estructura.

Juárez Badillo menciona que una de las teorías de falla más importantes para la mecánica de suelos, sugiere que un material falla cuando el esfuerzo cortante, τ , en cualquier sección, adquiere un valor, s , que depende del esfuerzo normal actuante en el plano que ocurre. Dicha relación se describe en la ecuación general de la denominada ley de Coulomb.

$$s = c + \sigma \tan \phi \quad (3)$$

Donde: s , representa la resistencia al esfuerzo cortante del suelo (N/m^2), c , la cohesión del suelo (N/m^2), σ , el esfuerzo normal actuante (N/m^2) y ϕ el ángulo de fricción interna ($^\circ$).

El término cohesión, Coulomb lo define como otra fuente de resistencia al cortante propia de los materiales. Lo anterior lo planteó después de realizar un sencillo experimento en el que colocaba en sus manos una muestra de arena seca y suelta, la cual se puede considerar con un esfuerzo normal igual a cero ($\sigma = 0$), por lo tanto, presenta una resistencia, $s = 0$. Por el contrario, al tomar un fragmento de arcilla, la conclusión es distinta; es evidente que la arcilla no deslizaría entre los dedos, de modo que ese material exhibe resistencia al esfuerzo cortante aun en condiciones en que el esfuerzo normal exterior es nulo (Juárez Badillo, *Mécanica de Suelos 1: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*, 2005). La cohesión se entenderá entonces como una medida de las fuerzas moleculares entre las partículas del suelo; en pocas palabras, representa la resistencia al cortante producida por la cementación o adherencia entre las partícula (Suárez García , 2006).

En suelos granulares, como las arenas, la cohesión suele considerarse despreciable o nula, aunque en ciertas condiciones puede aportar cierta resistencia. En este sentido, el parámetro que rige, junto con la presencia de un esfuerzo normal σ , es el denominado ángulo de fricción interna ϕ , el cual representa matemáticamente el coeficiente de rozamiento entre las partículas del suelo. Dicho ángulo ésta en función de la uniformidad de las partículas, de su tamaño y de la forma y distribución de los granos (Coliente Tlaxcalteca, 2010).

Tanto la cohesión como el ángulo de fricción interna se consideran constantes intrínsecas de los materiales que conforman el esqueleto de los suelos. En suelos formados por fragmentos de roca, gravas y arenas, considerados con resistencia al esfuerzo cortante con respuesta puramente “friccionante”, el valor máximo que puede inducir a la falla es función solamente del esfuerzo normal actuante y el ángulo de fricción interna, como se muestra a continuación:

$$s' = \sigma' \tan \phi' \tag{4}$$

La ecuación 4 respalda el pequeño experimento de Coulomb donde coloca una muestra de arena en su mano, siendo nulo el esfuerzo normal actuante, los granos de arena se deslizaron completamente entre sus dedos. En cambio, para los suelos finos saturados con respuesta puramente “cohesiva”,

como en suelos arcillosos saturados, su resistencia, denominada no drenada (s_u), dependerá mayoritariamente de la resistencia aportada por la tensión del agua entre sus partículas, siendo su ley de resistencia:

$$s_u = c \quad (5)$$

Para suelos parcialmente saturados o secos cementados, su respuesta se considera como “cohesivo-friccionante”, al presentar características mixtas antes mencionadas. Por lo que su envolvente de falla se determina por la ley de Coulomb en la ecuación 3. Dicha envolvente de falla determina los valores límite que puede tomar el esfuerzo cortante de un suelo, en función de los parámetros antes mencionados. Para el caso de suelos con respuesta cohesiva su envolvente de falla se observa en la figura 60; la representación gráfica de la envolvente para suelos con respuesta friccionante se muestra en la figura 61 y para suelos con respuesta cohesivo-friccionante se ejemplifica en la figura 62.

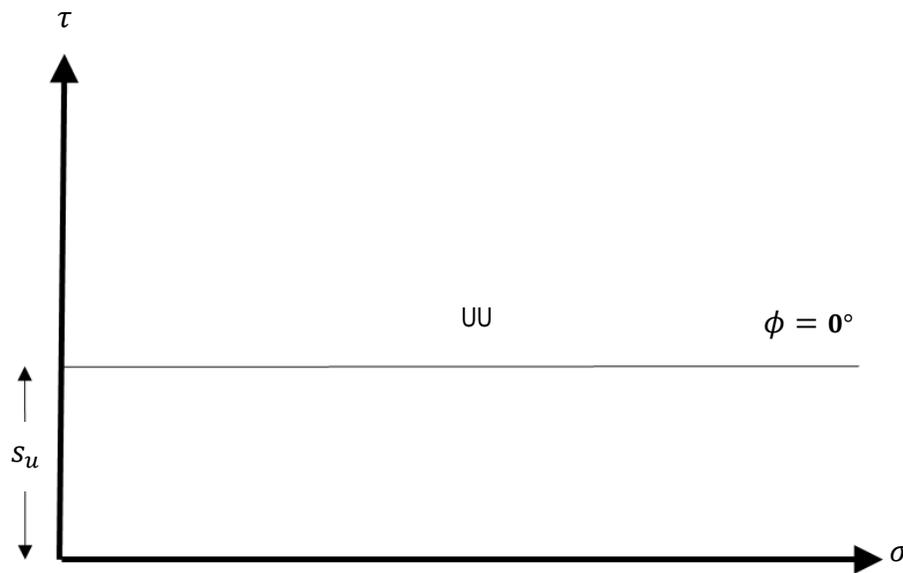


Figura 60. Suelo fino saturado con respuesta cohesiva por posible falla no drenada (Padilla Velázquez, 2015).

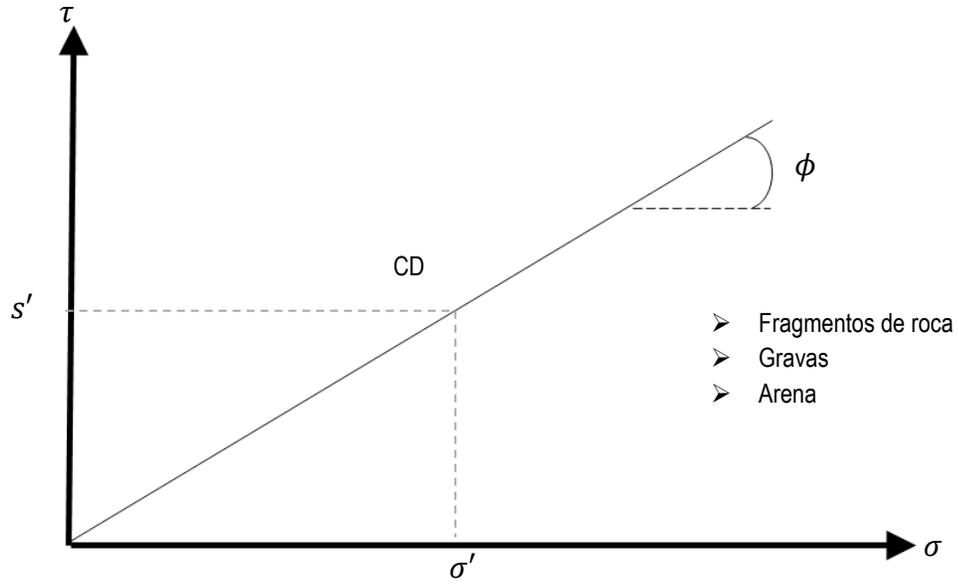


Figura 61. Suelo granular con respuesta friccionante (Padilla Velázquez, 2015).

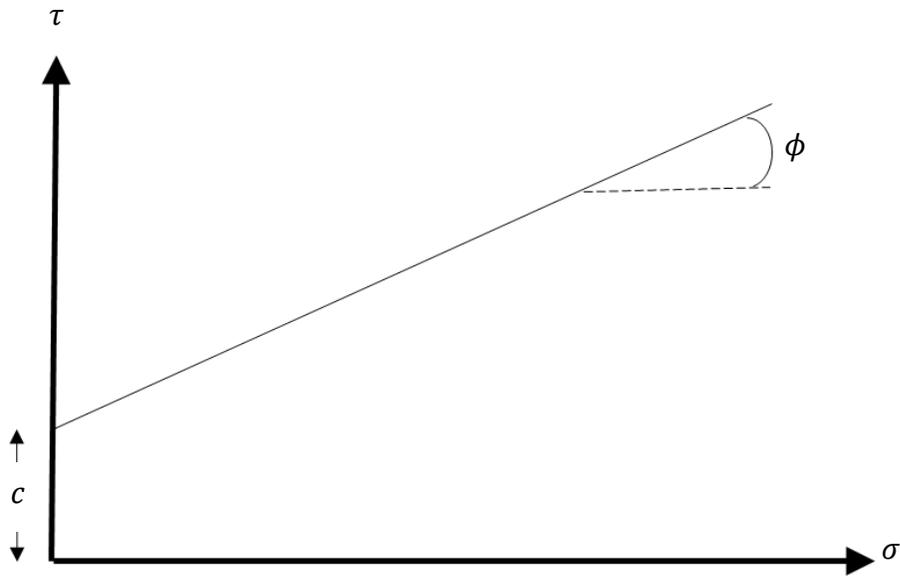


Figura 62. Suelos parcialmente saturados o secos cementados con respuesta cohesivo-friccionante (Padilla Velázquez, 2015).

La aplicación de la ley de Coulomb no siempre condujo a diseños satisfactorios de estructuras de suelo, debido a que la respuesta de los mismos difería en ocasiones con lo previsto en los cálculos. Esto cambió después de la aportación de Terzaghi con la definición de los esfuerzos efectivos (σ').

$$\sigma = \sigma' + u \tag{6}$$

En dicha consideración se aprecia, la influencia trascendental del agua contenida en el suelo, donde u representa la presión en el agua. El agua no puede soportar esfuerzos cortantes sustanciales, la resistencia al corte de un suelo saturado es resultado de los esfuerzos efectivos del esqueleto del suelo.

Bajo el criterio mencionado, es importante considerar siempre la influencia del agua contenida en el suelo, pero para objetivos de este trabajo, el método de análisis elegido cumplirá su cometido haciendo uso de la ley de Coulomb con esfuerzos totales.

6.2 Factor de seguridad

Una vez defina la resistencia de un material a una cierta sollicitación, se compara este valor máximo con el valor correspondiente a las condiciones reales. Resultado de dicha comparación, surge el concepto de factor de seguridad, de manera rudimentaria se puede definir como el cociente entre la resistencia máxima posible de cualquier estructura entre la resistencia actuante:

$$\text{Factor de Seguridad} = FS = \frac{\text{Resistencia máxima posible}}{\text{Resistencia actuante}} \quad (7)$$

En cualquier estructura, las cargas que puede soportar realmente deben ser mayores que las fuerzas a las que será sometida. Es por ello, que el factor de seguridad siempre debe ser mayor a la unidad, para impedir la falla del mismo.

Desde el punto de vista de la geotecnia, la estabilidad de una ladera o talud se define en términos de un factor de seguridad. Generalmente, el proceso de análisis consiste en comparar el esfuerzo cortante desarrollado a lo largo de la llamada superficie probable de falla crítica, con la resistencia al cortante del suelo; utilizando cualquier método de análisis que implique la intervención de la mayoría de los factores que afecten a la estabilidad y suponiendo distintas superficies de falla (Coliente Tlaxcalteca, 2010). Los elementos que definan el factor de seguridad variarán dependiendo de la metodología elegida, en algunos casos se comparan las fuerzas resistentes y actuantes de una

ladera, en superficies probables de falla circulares donde existe un centro de giro, el factor se obtiene de comparar los momentos resistentes y de los momentos motores. Cualquiera que sea el método de análisis elegido, el factor de seguridad será determinado por la comparación de cualquier elemento que aporte resistencia al movimiento de material y aquellos factores que pueden provocar el desplazamiento de la ladera.

Cuando el factor de seguridad de un talud o ladera es igual a la unidad, se puede considerar que la estructura se encuentra en un estado de falla inminente. Generalmente, y de acuerdo a un criterio personal, un factor de seguridad mayor o igual a 1.5 se considera adecuado, si la falla del mismo no implica daños a poblaciones cercanas. De presentarse un asentamiento humano cerca de una ladera o talud, el factor de seguridad recomendado debe ser igual o mayor a 2 (Padilla Velázquez, 2017).

6.3 Método de análisis

Parte importante de la ingeniería consiste en modelar matemáticamente el comportamiento de taludes o laderas, con el objetivo de analizar las condiciones idóneas que permitan asegurar la estabilidad de la estructura. Existe una gran cantidad de metodologías para la modelación del comportamiento mecánico de los taludes y laderas, y de acuerdo a Suárez Díaz, los objetivos principales del análisis de los taludes son los siguientes: determinar las condiciones de estabilidad o inestabilidad de la estructura, averiguar los posibles mecanismos potenciales de falla, determinar la influencia que tienen algunos factores condicionantes y desencadenantes en los mecanismos de activación, y por último, lograr diseñar taludes o estructuras de estabilización óptimas en términos de seguridad, funcionalidad y economía.

Dentro de la metodología disponible, se encuentra lo que se conoce como análisis del equilibrio límite. En esencia estos métodos implican proponer posibles mecanismos de falla y aplicar los criterios de resistencia del material a tal sistema, de tal manera que se pretende obtener la posibilidad o no de que el mecanismo supuesto de falla llegue a presentarse, con las condiciones de resistencia propuestas. Para este análisis, se toma en cuenta un movimiento de la masa deslizando como un cuerpo rígido, suponiendo que la máxima resistencia al corte se presenta de manera

simultánea y homogénea a lo largo de toda la superficie de falla supuesta. Es decir, el mecanismo de falla no ocurre de manera progresiva a lo largo de la posible superficie de falla, considerando el desplazamiento del suelo de manera uniforme (Juárez Badillo, *Mécanica de Suelos 2: Teoría y Aplicaciones de la Mécanica de Suelos*, 2016). Esta clase de procedimiento es el más empleado en la práctica, por la facilidad de aplicación a fallas de diferente naturaleza, además, que el uso de herramientas computacionales ahorran tiempo en las iteraciones necesarias para el factor de seguridad.

La mayoría de los métodos de análisis de equilibrio límite coinciden en la comparación de fuerzas o momentos resistentes y actuantes sobre una posible superficie de falla. Entre ellos destacan los métodos de Bishop, Janbú, Spencer, Morgenstern y Price, Sarma y de Fellenius. Las variaciones principales de los diversos métodos se rigen por la superficie de falla propuesta y la manera en la que interactúan internamente las fuerzas sobre la superficie de falla, además, cada procedimiento cumple de menor o mejor manera, de acuerdo a las características de los suelos implicados.

Bajo el mismo orden de ideas, es necesario recordar que el objetivo de este capítulo es comparar las condiciones de estabilidad de una ladera bajo la influencia de algunos factores condicionantes o desencadenantes, por medio de la metodología más adecuada. Profundizar en todos y cada uno de los métodos existentes para el análisis de equilibrio límite queda fuera de los objetivos de este trabajo. Se recomienda al lector recurrir a la bibliografía adecuada para ahondar en los procedimientos de análisis mencionados, tanto como le sea necesario.

Para cumplir con el fin de este trabajo, se ha optado por elegir el análisis de estabilidad por el método de dovelas de Fellenius. Dado que, en la ciudad de Tijuana, los suelos más representativos de las zonas consideradas como de alto riesgo, cumplen con los parámetros necesarios para aplicar la metodología mencionada.

6.3.1 Análisis de estabilidad por el método de dovelas de Fellenius

Este procedimiento forma parte de los conocidos Métodos Suecos, que comprenden a todos los procesos de análisis de estabilidad que consideran una falla de rotación, en donde se propone una posible superficie de falla como arco de circunferencia.

El método de dovelas realiza un análisis de esfuerzos totales, para el caso de suelos que exhiban parámetros de cohesión ($c \neq 0$) y fricción ($\phi \neq 0$), es decir, que presenten una respuesta cohesivo-friccionante al esfuerzo cortante y que obedecen a la ecuación 3. El método se describe, con referencia a Juárez Badillo, en los siguientes párrafos.

En primer lugar, se propone una posible circunferencia de falla a elección y la masa de material en la parte superior a la superficie de falla se divide en tajas verticales o dovelas, como se observa en la figura 63.

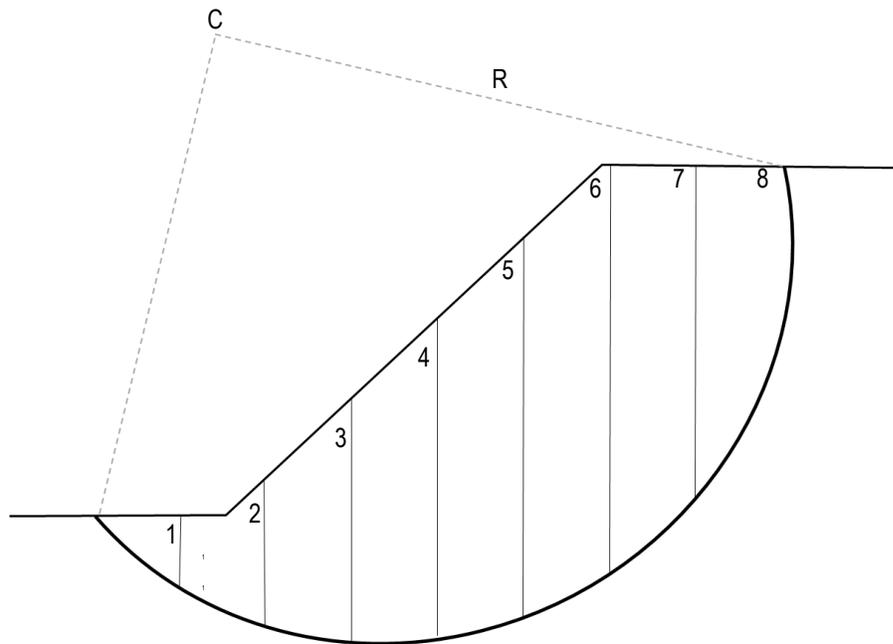


Figura 63. Procedimiento de las dovelas de Fellenius.

El número de dovelas depende de la precisión requerida para el análisis, hasta cierto punto, cuestión de elección. Entre mayor sea el número de dovelas, los resultados del análisis se vuelven más confiables. El equilibrio de fuerzas de cada dovela se puede analizar como se muestra en el diagrama de cuerpo libre de la figura 64, donde actúa el peso de la dovela con espesor unitario, W_i ; las reacciones normal y tangencial del suelo a lo largo de la superficie de falla ΔL_i , N_i y T_i respectivamente.

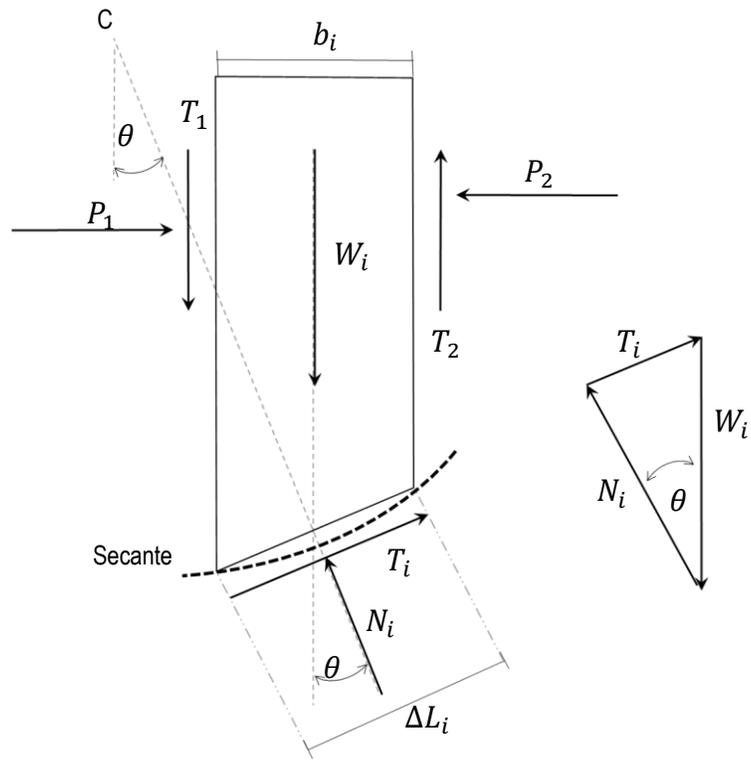


Figura 64. Diagrama de cuerpo libre en la i -ésima dovela.

De donde se puede deducir que:

$$N_i = W_i \cos \theta \quad (8)$$

$$T_i = W_i \sen \theta \quad (9)$$

$$\Delta L_i = \frac{b_i}{\cos \theta} \quad (10)$$

Las dovelas adyacentes a la i -ésima, estrictamente, ejercen cierta influencia sobre ésta, que pueden representarse como fuerzas normales P_1 y P_2 y por tangenciales T_1 y T_2 . En el análisis de Fellenius se razona la hipótesis de que la influencia de las fuerzas P_1 y P_2 , T_1 y T_2 son despreciables. Esta hipótesis equivale a considerar que cada dovela actúa en forma independiente de las demás y que N_i y T_i equilibran a W_i .

El cociente $N_i/\Delta L_i$ se considera una buena aproximación al valor del esfuerzo normal σ_i , actuante sobre la secante ΔL_i , que se supone constante en esa longitud. Con este valor de σ_i es posible obtener la resistencia al cortante de la dovela i , s_i :

$$s_i = c + \sigma_i \tan \phi \quad (11)$$

Siendo c y ϕ constantes obtenidas del material que conforma la ladera analizada. La fuerza resistente aportada por la dovela, resulta de multiplicar s_i por la longitud de la secante ΔL_i . Dicha fuerza aporta al momento resistente total, multiplicando al brazo de palanca R , el cual corresponde al radio de la circunferencia de falla. Siendo el momento resistente la sumatoria de la resistencia al esfuerzo cortante s_i , que se desarrolla en la superficie de deslizamiento de cada dovela:

$$M_R = R \sum s_i \Delta L_i \quad (12)$$

El momento motor se debe al peso de cada una de las dovelas, el cual se conforma por sus componentes N_i y T_i . Dado que N_i se encuentra en la dirección del centro del arco circular de la superficie de falla, no aporta al momento motor del sistema. Por lo cual, el momento motor es función, de la componente tangencial del peso, T_i .

$$M_m = R \sum T_i \quad (13)$$

En el caso de presentarse sobrecargas a lo largo del talud o de la corona de la ladera, su momento respecto al centro de giro de la circunferencia de falla se calcula de la manera usual y se añade al dado por la expresión 13.

El factor de seguridad para este procedimiento, se obtiene de comparar el momento resistente aportado sobre la superficie de falla propuesta y el momento motor resultante del peso de cada una de las dovelas (y las sobrecargas existentes).

$$FS = \frac{\text{Momento resistente}}{\text{Momento motor}} = \frac{M_R}{M_m} = \frac{R \sum s_i \Delta L_i}{R \sum T_i} = \frac{\sum s_i \Delta L_i}{\sum T_i} \quad (14)$$

$$FS = \frac{\sum S_i \Delta L_i}{\sum T_i} \quad (14)$$

El método de Fellenius pretende determinar el factor de seguridad que se obtiene para cada arco de posible falla propuesto. Para ello es necesario proponer distintas circunferencias de posible falla para detectar aquella que se considere crítica. En general es recomendable que el ingeniero con poca experiencia no regatee esfuerzo ni tiempo en los cálculos a efectuar (Juárez Badillo, *Mécanica de Suelos 2: Teoría y Aplicaciones de la Mécanica de Suelos*, 2016).

6.4 Ejemplo de análisis de estabilidad por el método de dovelas de Fellenius

6.4.1 Consideraciones para el planteamiento del problema

El procedimiento del siguiente ejercicio para ejemplificar la influencia de ciertas condiciones desfavorables en la estabilidad de laderas, se desarrolla por medio de la metodología de dovelas de Fellenius planteada anteriormente. El objetivo del ejercicio radica en la obtención del factor de seguridad para una superficie posible de falla (bajo distintas condiciones). El primer ejemplo proyecta un talud sin la presencia de algún agente disparador de movimientos de masa, en contraste, al siguiente ejercicio. Se desarrolla después (en otros ejemplos) bajo la presencia de dos agentes desencadenantes de origen antrópico, considerados los más comunes en la ciudad de Tijuana.

Dado que el fin de este apartado es comparar la influencia sobre el factor de seguridad, de dos de los agentes disparadores más frecuentes en la ciudad, en esta ocasión, se presenta una posible superficie de falla, considerándola como la superficie crítica. Es decir, no se invirtieron esfuerzos, como se debe hacer, en buscar la circunferencia de falla con el menor factor de seguridad.

Al no contar con información adecuada acerca de las propiedades mecánicas del suelo localizado en los lomeríos de la ciudad de Tijuana, se optó por proponer parámetros de suelos considerados con respuesta al resistente cohesivo-friccionante. El nivel freático para todos los casos, se considera muy por debajo de la base de la ladera, por lo tanto, no influye en los cálculos realizados.

Para finalizar, la masa de suelo localizada en la ladera del ejercicio, se considera totalmente homogénea. Asimismo, se incluyen las consideraciones respectivas al método de análisis elegido. Nos proponemos además, cerrar los resultados a por lo menos 3 cifras significativas.

6.4.2 Ejemplo 1. Ladera sin presencia de factores desfavorables

Para este ejercicio, se plantea una ladera de 60 metros de altura, con geometría igual a la mostrada en la figura 65, constituida por material clasificado como de respuesta cohesivo-friccionante, cuyas características son las siguientes: $\phi = 18^\circ$, $c = 11.96$ kPa, densidad igual a 1.82 Mg/m³. La superficie supuesta de falla es la que se muestra, con un radio $R = 150.66$ m. La gravedad del sitio se toma con un valor de 9.81 m/s².

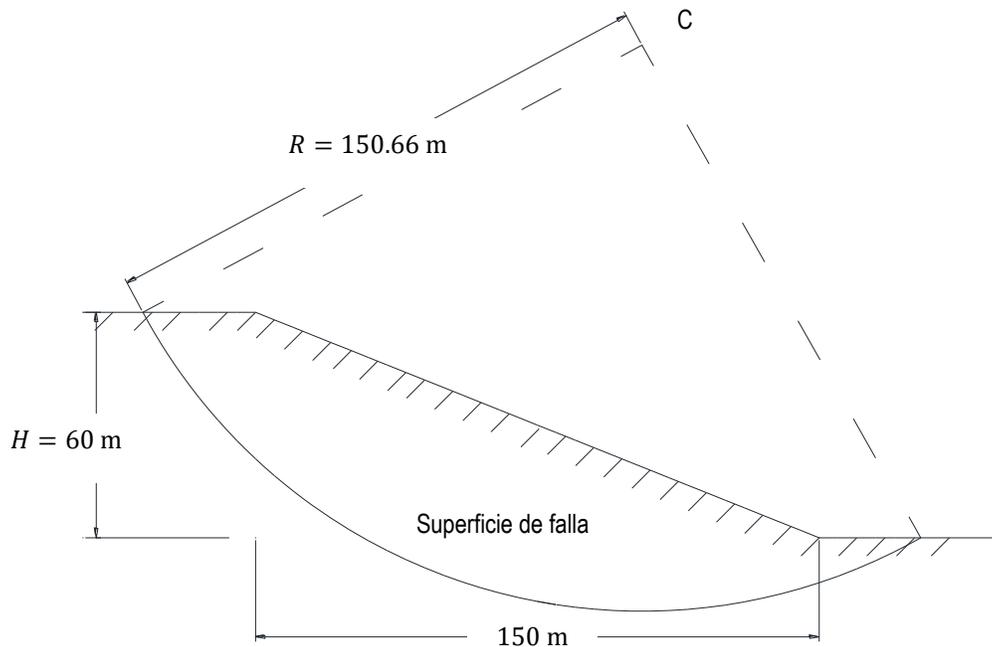


Figura 65. Geometría propuesta para la ladera del ejercicio.

Para obtener el factor de seguridad asociado a la circunferencia de falla mostrada, se optó por dividir la masa de suelo localizada sobre la superficie de falla, en 40 dovelas de 5 metros de ancho y una dovela restante de 7.06 metros. Logrando la configuración mostrada en la figura 66.

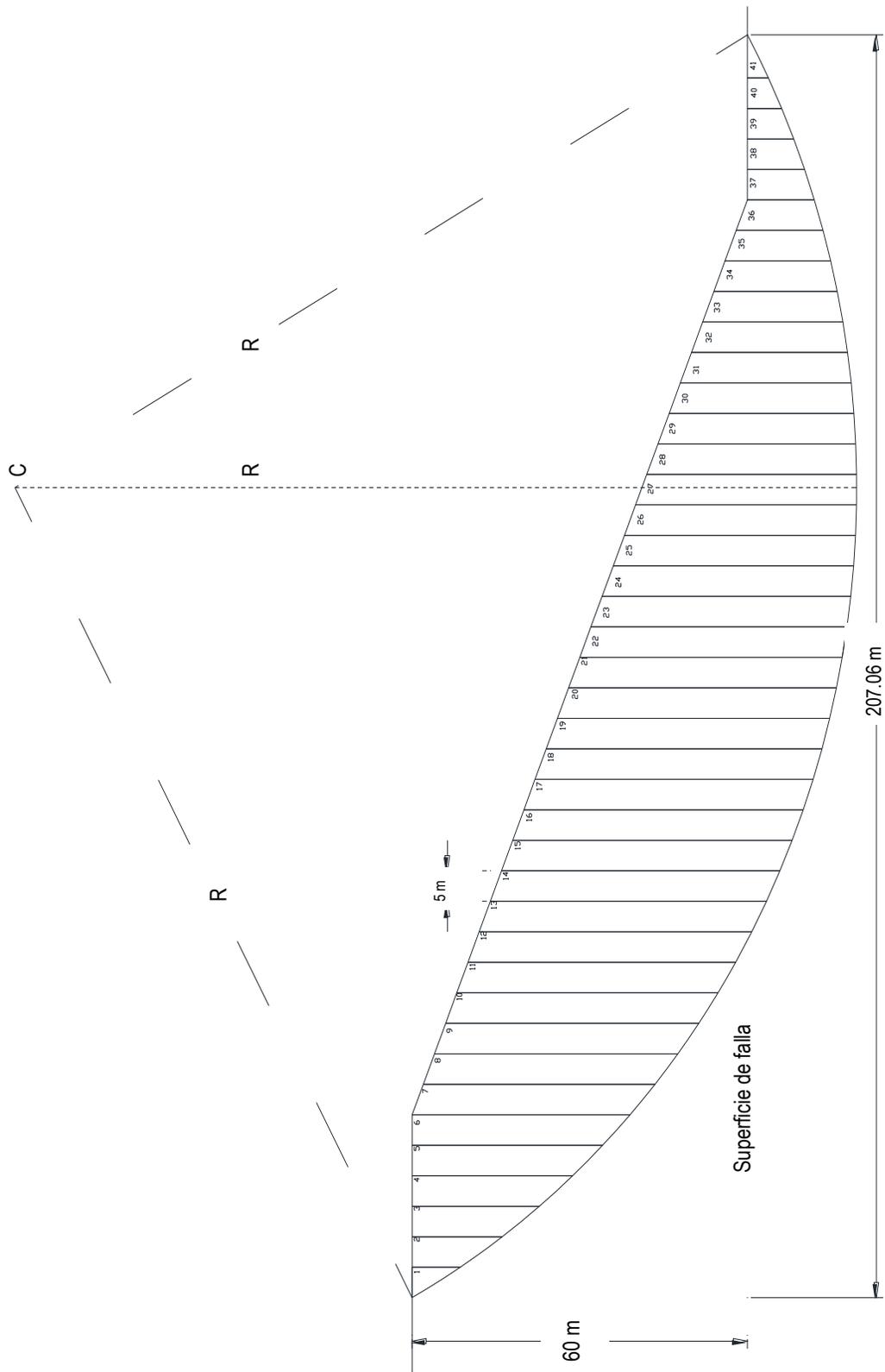


Figura 66. Configuración de las dovelas para el desarrollo de este ejercicio.

Con el propósito de demostrar el procedimiento de análisis, se elige a la dovela 6 para obtener paso a paso los resultados necesarios para determinar el factor de seguridad asociado a la superficie de falla propuesta. El diagrama de cuerpo libre se muestra en la figura 67.

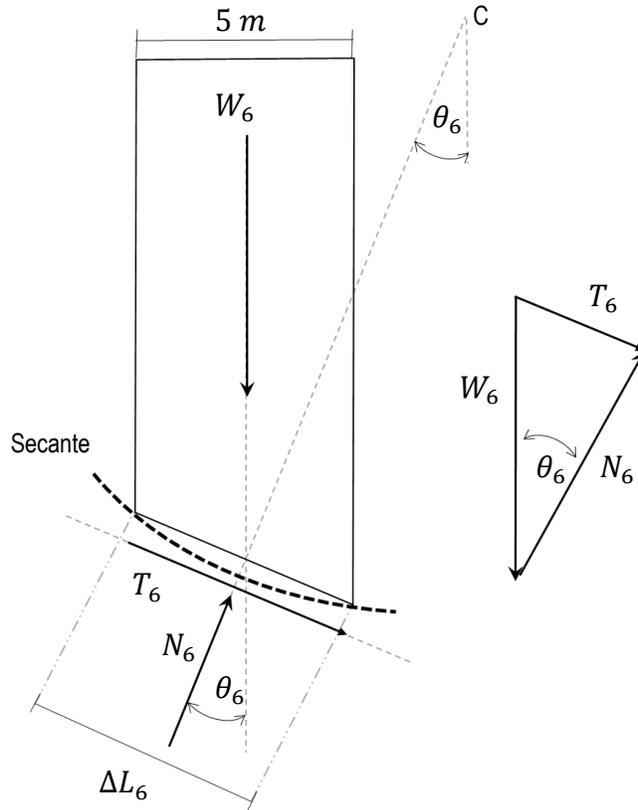


Figura 67. Diagrama de cuerpo libre para la dovela 6.

Para determinar el peso W_6 , es necesario definir las dimensiones de la dovela, con la mayor exactitud posible. Actualmente, el desarrollo de herramientas computacionales facilita este trabajo, haciendo uso de un software de diseño, es posible obtener las dimensiones requeridas para este ejercicio, de acuerdo a la geometría planteada. Ya que se considera a la dovela tan pequeña, su área lateral se puede aproximar a la de un trapecio, con las dimensiones arrojadas por la configuración elegida. De tal manera que el área A_6 se obtiene de la siguiente forma:

$$A_6 = \frac{h(a + b)}{2} = \frac{5 \text{ m}(34.12 \text{ m} + 39.01 \text{ m})}{2}$$

$$A_6 = 182.825 \text{ m}^2$$

Siendo a y b , la base menor y base mayor del trapecio formado por la dovela 6. Dichas dimensiones se obtuvieron con apoyo del software mencionado. Ahora, el peso W_6 , se obtiene de multiplicar el volumen de la dovela por la densidad del suelo y la gravedad del sitio. Para obtener el volumen, recordando que se realiza un análisis unitario, el área lateral obtenida se multiplica por un metro de ancho.

$$V_6 = A_6(1\text{m}) = 182.825 \text{ m}^3$$

$$W_6 = V_6 \rho g = (182.825 \text{ m}^3) \left(1.82 \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$$

$$W_6 = 3264.194 \text{ kN}$$

El peso de la dovela 6, en su equivalencia a toneladas fuerza es:

$$W_6 = 3264.194 \text{ kN (0.1019716)}$$

$$W_6 = 332.855 \text{ t}_f$$

En este trabajo, se pretende trabajar con unidades aplicables a la Ingeniería Civil dentro del Sistema Internacional, por lo tanto, el peso continuará expresado en kN. El propósito de su equivalencia es meramente demostrativo.

El ángulo θ que se mide desde el centro de la circunferencia de radio R a la mitad de la base de la dovela, respecto a la vertical, en el punto de aplicación del equilibrio de fuerzas para la dovela 6, en este caso es de 44° . Con dicho valor y el recién calculado peso de la dovela, se puede obtener con las ecuaciones 8 y 9, las componentes del peso en la dovela:

$$N_6 = W_6 \cos \theta = 3264.194 \text{ kN} \cos 44^\circ$$

$$N_6 = 2348.065 \text{ kN}$$

$$T_6 = W_6 \sin \theta = 3264.194 \text{ kN} \sin 44^\circ$$

$$T_6 = 2267.500 \text{ kN}$$

Para obtener la magnitud de la secante ΔL_6 se utiliza la ecuación 10:

$$\Delta L_6 = \frac{b_6}{\cos \theta} = \frac{5 \text{ m}}{\cos 44^\circ} = 6.951 \text{ m}$$

El esfuerzo normal actuante en la dovela se obtiene de la siguiente manera:

$$\sigma_6 = \frac{N_6}{\Delta L_6(1\text{m})} = \frac{2348.065 \text{ kN}}{6.951 \text{ m} (1 \text{ m})}$$

$$\sigma_6 \approx 337.802 \text{ kPa}$$

El valor de ΔL_6 se obtuvo con apoyo del software de dibujo. Una vez obtenido el valor del esfuerzo normal en la dovela 6, es posible determinar la resistencia al cortante de la dovela sobre la superficie de posible falla con la ecuación 11:

$$s_6 = c + \sigma_6 \tan \phi = 11.96 \text{ kPa} + (337.802 \text{ kPa}) \tan 18^\circ$$

$$s_6 = 121.718 \text{ kPa}$$

La fuerza de resistencia en la dovela 6 que se opone al movimiento sobre la superficie de falla, se obtiene de multiplicar la resistencia s_6 por la superficie en donde actúa, en este caso ΔL_6 y para un ancho unitario (por simplificación se omite la colocación de la unidad):

$$s_6 \Delta L_6 = 121.718 \text{ kPa} (6.951 \text{ m})(1\text{m})$$

$$s_6 \Delta L_6 = 846.062 \text{ kN}$$

La aportación al momento resistente total, se obtiene con el producto de la fuerza anterior y el brazo de palanca, el cual está determinado por el radio R de 150.66 metros:

$$M_{R6} = R s_6 \Delta L_6 = 150.66 \text{ m}(846.062 \text{ kN})$$

$$M_{R6} = 127.467 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Por otro lado, el momento motor que aporta el peso de la dovela para el mecanismo de falla, se obtiene al multiplicar su componente tangencial por el mismo brazo de palanca

$$M_{m6} = R T_6 = 150.66 \text{ m}(2267.500 \text{ kN})$$

$$M_{m6} = 341.621 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

En este momento es conveniente mencionar que la fuerza motora para este caso, se considera positiva si produce momento en el sentido opuesto a las manecillas del reloj (será negativo en el sentido contrario). Es decir, las fuerzas motoras en la base de las dovelas a la izquierda del centro de la circunferencia de falla serán positivas y favorecerán al movimiento de masa, las fuerzas a la derecha del centro, serán negativas y se opondrán al movimiento de la ladera.

El análisis realizado para la dovela 6, se repite para todas las demás y los resultados se muestran en la Tabla 9. El factor de seguridad para este caso se obtiene aplicando la ecuación 14 y con base a los resultados que se tomaron de la tabla.

$$FS = \frac{M_R}{M_m} = \frac{\sum s_i \Delta L_i}{\sum T_i} = \frac{(38\ 717.293 \text{ kN})}{(33\ 971.967 \text{ kN})}$$

$$FS = 1.140$$

El valor del factor de seguridad, indica que la estabilidad de la ladera, bajo las consideraciones planteadas, no se encuentra en estado inminente de falla, pero el valor está muy cercano a la unidad. Estrictamente, el factor de seguridad nos indica que no es recomendable ninguna actividad humana cerca de la ladera planteada.

Los resultados de los demás ejemplos, se analizan junto con el anterior, en el último apartado de este capítulo.

Tabla 9. Resultados del análisis de estabilidad para el ejemplo 1.

Dovela	ΔL_i m	Área m ²	W_i kN	θ °	$\cos \theta$	$\sin \theta$	$\tan \phi$	$N_i = W_i \cos \theta$ kN	$\sigma_i = N_i / \Delta L_i$ kPa	$s_i = c + \sigma_i \tan \phi$ kPa	$s_i \Delta L_i$ kN	$T_i = W_i \sin \theta$ kN
1	9.98	22.15	395.50	59.00	0.5150	0.8572	0.3249	203.70	20.41	18.59	185.55	339.01
2	9.02	62.37	1113.60	56.00	0.5592	0.8290	0.3249	622.72	69.04	34.39	310.21	923.22
3	8.32	97.66	1743.57	53.00	0.6018	0.7986	0.3249	1049.31	126.12	52.94	440.45	1392.48
4	7.78	129.09	2304.78	50.00	0.6428	0.7660	0.3249	1481.48	190.42	73.83	574.41	1765.56
5	7.35	157.38	2809.93	47.00	0.6820	0.7314	0.3249	1916.37	260.73	96.68	710.57	2055.05
6	6.95	182.83	3264.19	44.00	0.7193	0.6947	0.3249	2348.06	337.80	121.72	846.07	2267.50
7	6.70	201.40	3595.84	42.00	0.7431	0.6691	0.3249	2672.23	398.84	141.55	948.39	2406.09
8	6.46	212.76	3798.72	39.00	0.7771	0.6293	0.3249	2952.16	456.99	160.45	1036.48	2390.61
9	6.25	222.33	3969.60	37.00	0.7986	0.6018	0.3249	3170.26	507.24	176.77	1104.83	2388.96
10	6.07	230.28	4111.51	35.00	0.8192	0.5736	0.3249	3367.95	554.85	192.24	1166.91	2358.27
11	5.91	236.75	4226.91	32.00	0.8480	0.5299	0.3249	3584.62	606.53	209.04	1235.40	2239.92
12	5.77	241.84	4317.79	30.00	0.8660	0.5000	0.3249	3739.32	648.06	222.53	1283.99	2158.90
13	5.65	245.65	4385.84	28.00	0.8829	0.4695	0.3249	3872.47	685.39	234.66	1325.82	2059.03
14	5.55	248.26	4432.44	26.00	0.8988	0.4384	0.3249	3983.85	717.81	245.19	1360.81	1943.06
15	5.46	249.73	4458.78	24.00	0.9135	0.4067	0.3249	4073.30	746.03	254.36	1388.80	1813.55
16	5.38	250.13	4465.84	22.00	0.9272	0.3746	0.3249	4140.66	769.64	262.03	1409.73	1672.93
17	5.31	249.49	4454.48	20.00	0.9397	0.3420	0.3249	4185.84	788.29	268.09	1423.57	1523.52
18	5.24	247.86	4425.42	18.00	0.9511	0.3090	0.3249	4208.82	803.21	272.94	1430.20	1367.53
19	5.19	245.28	4379.26	16.00	0.9613	0.2756	0.3249	4209.62	811.10	275.50	1429.86	1207.09
20	5.14	241.77	4316.53	14.00	0.9703	0.2419	0.3249	4188.31	814.85	276.72	1422.34	1044.26
21	5.10	237.35	4237.67	12.00	0.9781	0.2079	0.3249	4145.07	812.76	276.04	1407.81	881.06
22	4.94	232.05	4143.04	10.00	0.9848	0.1736	0.3249	4080.10	825.93	280.32	1384.79	719.43
23	5.05	225.88	4032.93	8.00	0.9903	0.1392	0.3249	3993.69	790.83	268.92	1358.02	561.28
24	5.03	218.86	3907.60	6.00	0.9945	0.1045	0.3249	3886.19	772.60	262.99	1322.86	408.45
25	5.01	211.00	3767.20	4.00	0.9976	0.0698	0.3249	3758.03	750.11	255.68	1280.98	262.79
26	5.00	202.30	3611.89	2.00	0.9994	0.0349	0.3249	3609.69	721.94	246.53	1232.66	126.05
27	5.00	192.77	3441.72	0.00	1.0000	0.0000	0.3249	3441.72	688.34	235.62	1178.08	0.00
28	5.00	182.41	3256.74	2.00	0.9994	0.0349	0.3249	3254.75	650.95	223.47	1117.33	-113.66
29	5.01	171.22	3056.91	4.00	0.9976	0.0698	0.3249	3049.47	608.68	209.73	1050.75	-213.24
30	5.02	159.19	2842.17	6.00	0.9945	0.1045	0.3249	2826.60	563.07	194.91	978.46	-297.09

Tabla 9. Continuación: Resultados del análisis de estabilidad para el ejemplo 1.

Dovela	ΔL_i m	Área m ²	W_i kN	θ °	$\cos \theta$	$\sin \theta$	$\tan \phi$	$N_i = W_i \cos \theta$ kN	$\sigma_i = N_i / \Delta L_i$ kPa	$s_i = c + \sigma_i \tan \phi$ kPa	$s_i \Delta L_i$ kN	$T_i = W_i \sin \theta$ kN
31	5.04	146.32	2612.40	8.00	0.9903	0.1392	0.3249	2586.98	513.29	178.74	900.84	-363.58
32	5.07	132.60	2367.43	10.00	0.9848	0.1736	0.3249	2331.46	459.85	161.38	818.17	-411.10
33	5.10	118.01	2107.01	12.00	0.9781	0.2079	0.3249	2060.96	404.11	143.26	730.64	-438.07
34	5.14	102.55	1830.86	14.00	0.9703	0.2419	0.3249	1776.48	345.62	124.26	638.69	-442.93
35	5.18	86.18	1538.64	16.00	0.9613	0.2756	0.3249	1479.03	285.53	104.73	542.52	-424.11
36	5.24	68.89	1229.90	18.00	0.9511	0.3090	0.3249	1169.71	223.23	84.49	442.73	-380.06
37	5.30	55.64	993.42	20.00	0.9397	0.3420	0.3249	933.51	176.13	69.19	366.70	-339.77
38	5.37	46.41	828.59	22.00	0.9272	0.3746	0.3249	768.25	143.06	58.44	313.85	-310.39
39	5.45	36.15	645.43	24.00	0.9135	0.4067	0.3249	589.63	108.19	47.11	256.76	-262.52
40	5.54	24.73	441.45	26.00	0.8988	0.4384	0.3249	396.77	71.62	35.23	195.18	-193.52
41	8.00	13.55	241.98	28.00	0.8829	0.4695	0.3249	213.65	26.71	20.64	165.10	-113.60

Σ 38717.293 33971.967

6.4.3 Ejemplo 2. Ladera bajo condiciones desfavorables

En este apartado, se utiliza la misma geometría y los mismos parámetros del suelo de la ladera del ejercicio anterior. La diferencia radica en considerar dos condiciones desfavorables para la estabilidad de la ladera. En primera instancia, se propone un corte a 90° sobre el pie de la ladera, actividad frecuente en la ciudad de Tijuana. La segunda consideración implica la presencia de sobrecargas en la corona y la pendiente de la ladera, simulando la existencia de casas asentadas sobre el cuerpo de los lomeríos en la ciudad. Por último, se realiza un análisis considerando las dos opciones anteriores de manera simultánea.

Opción A.

El corte, de aproximadamente 20 metros de altura, se propone justo debajo del centro de la circunferencia de falla, como se puede observar en la figura 68. El procedimiento de análisis es exactamente igual al del primer ejemplo. Solamente se considera la nueva configuración de las dovelas.

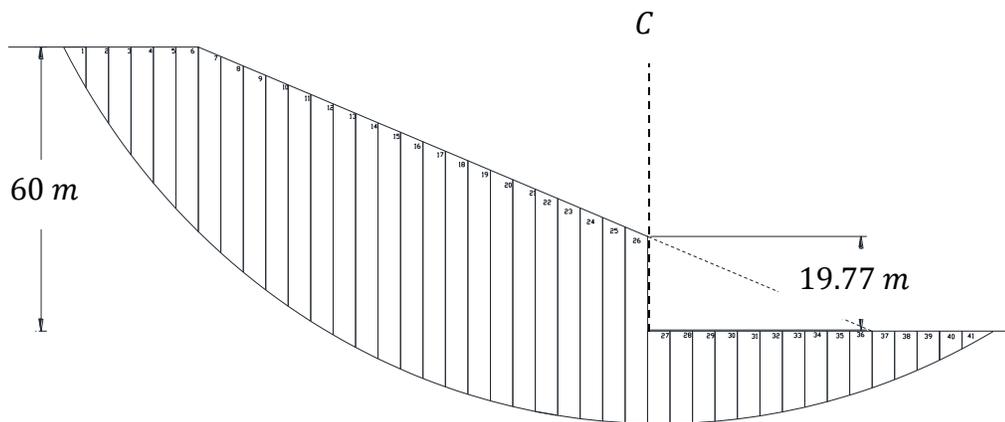


Figura 68. Configuración de las dovelas para la opción A. Considerando un corte cerca del pie de la ladera.

Tabla 10. Resultados del análisis de estabilidad para la opción A. Considerando un corte cerca del pie de la ladera.

Dovela	ΔL_i m	Área m ²	W_i kN	θ °	cos θ	sen θ	tan ϕ	$N_i = W_i \cos \theta$ kN	$\sigma_i = N_i / \Delta L_i$ kPa	$s_i = c + \sigma_i \tan \phi$ kPa	$s_i \Delta L_i$ kN	$T_i = W_i \sin \theta$ kN
1	9.98	22.15	395.50	59.00	0.5150	0.8572	0.3249	203.70	20.41	18.59	185.55	339.01
2	9.02	62.37	1113.60	56.00	0.5592	0.8290	0.3249	622.72	69.04	34.39	310.21	923.22
3	8.32	97.66	1743.57	53.00	0.6018	0.7986	0.3249	1049.31	126.12	52.94	440.45	1392.48
4	7.78	129.09	2304.78	50.00	0.6428	0.7660	0.3249	1481.48	190.42	73.83	574.41	1765.56
5	7.35	157.38	2809.93	47.00	0.6820	0.7314	0.3249	1916.37	260.73	96.68	710.57	2055.05
6	7.00	182.83	3264.19	44.00	0.7193	0.6947	0.3249	2348.06	335.44	120.95	846.85	2267.50
7	6.70	201.40	3595.84	42.00	0.7431	0.6691	0.3249	2672.23	398.84	141.55	948.39	2406.09
8	6.46	212.76	3798.72	39.00	0.7771	0.6293	0.3249	2952.16	456.99	160.45	1036.48	2390.61
9	6.25	222.33	3969.60	37.00	0.7986	0.6018	0.3249	3170.26	507.24	176.77	1104.83	2388.96
10	6.07	230.28	4111.51	35.00	0.8192	0.5736	0.3249	3367.95	554.85	192.24	1166.91	2358.27
11	5.91	236.75	4226.91	32.00	0.8480	0.5299	0.3249	3584.62	606.53	209.04	1235.40	2239.92
12	5.77	241.84	4317.79	30.00	0.8660	0.5000	0.3249	3739.32	648.06	222.53	1283.99	2158.90
13	5.65	245.65	4385.84	28.00	0.8829	0.4695	0.3249	3872.47	685.39	234.66	1325.82	2059.03
14	5.55	248.26	4432.44	26.00	0.8988	0.4384	0.3249	3983.85	717.81	245.19	1360.81	1943.06
15	5.46	249.73	4458.78	24.00	0.9135	0.4067	0.3249	4073.30	746.03	254.36	1388.80	1813.55
16	5.38	250.13	4465.84	22.00	0.9272	0.3746	0.3249	4140.66	769.64	262.03	1409.73	1672.93
17	5.31	249.49	4454.48	20.00	0.9397	0.3420	0.3249	4185.84	788.29	268.09	1423.57	1523.52
18	5.24	247.86	4425.42	18.00	0.9511	0.3090	0.3249	4208.82	803.21	272.94	1430.20	1367.53
19	5.19	245.28	4379.26	16.00	0.9613	0.2756	0.3249	4209.62	811.10	275.50	1429.86	1207.09
20	5.14	241.77	4316.53	14.00	0.9703	0.2419	0.3249	4188.31	814.85	276.72	1422.34	1044.26
21	5.10	237.35	4237.67	12.00	0.9781	0.2079	0.3249	4145.07	812.76	276.04	1407.81	881.06
22	4.94	232.05	4143.04	10.00	0.9848	0.1736	0.3249	4080.10	825.93	280.32	1384.79	719.43
23	5.05	225.88	4032.93	8.00	0.9903	0.1392	0.3249	3993.69	790.83	268.92	1358.02	561.28
24	5.03	218.86	3907.60	6.00	0.9945	0.1045	0.3249	3886.19	772.60	262.99	1322.86	408.45
25	5.01	211.00	3767.20	4.00	0.9976	0.0698	0.3249	3758.03	750.11	255.68	1280.98	262.79
26	5.00	202.30	3611.89	2.00	0.9994	0.0349	0.3249	3609.69	721.94	246.53	1232.66	126.05
27	5.00	97.77	1745.57	0.00	1.0000	0.0000	0.3249	1745.57	349.11	125.39	626.97	0.00

Tabla 10. Continuación: Resultados del análisis de estabilidad para la opción A. Considerando un corte cerca del pie de la ladera.

Dovela	ΔL_i m	Área m ²	W_i kN	θ °	cos θ	sen θ	tan ϕ	$N_i = W_i \cos \theta$ kN	$\sigma_i = N_i / \Delta L_i$ kPa	$s_i = c + \sigma_i \tan \phi$ kPa	$s_i \Delta L_i$ kN	$T_i = W_i \sin \theta$ kN
28	5.00	97.41	1739.13	2.00	0.9994	0.0349	0.3249	1738.07	347.61	124.91	624.53	-60.69
29	5.01	96.22	1717.85	4.00	0.9976	0.0698	0.3249	1713.66	342.05	123.10	616.72	-119.83
30	5.02	94.19	1681.65	6.00	0.9945	0.1045	0.3249	1672.44	333.16	120.21	603.45	-175.78
31	5.04	91.32	1630.42	8.00	0.9903	0.1392	0.3249	1614.56	320.35	116.05	584.88	-226.91
32	5.07	87.60	1563.99	10.00	0.9848	0.1736	0.3249	1540.23	303.79	110.67	561.09	-271.58
33	5.10	83.01	1482.11	12.00	0.9781	0.2079	0.3249	1449.72	284.26	104.32	532.04	-308.15
34	5.14	77.55	1384.51	14.00	0.9703	0.2419	0.3249	1343.38	261.36	96.88	497.97	-334.94
35	5.18	71.18	1270.82	16.00	0.9613	0.2756	0.3249	1221.59	235.83	88.59	458.87	-350.29
36	5.24	63.89	1140.63	18.00	0.9511	0.3090	0.3249	1084.80	207.02	79.23	415.14	-352.47
37	5.30	55.64	993.42	20.00	0.9397	0.3420	0.3249	933.51	176.13	69.19	366.70	-339.77
38	5.37	46.41	828.59	22.00	0.9272	0.3746	0.3249	768.25	143.06	58.44	313.65	-310.39
39	5.45	36.15	645.43	24.00	0.9135	0.4067	0.3249	589.63	108.19	47.11	256.76	-262.52
40	5.54	24.73	441.45	26.00	0.8988	0.4384	0.3249	396.77	71.62	35.23	195.18	-193.52
41	8.00	13.55	241.98	28.00	0.8829	0.4695	0.3249	213.65	26.71	20.64	165.10	-113.60
										Σ	35841.320	34855.140

Como resultado del análisis de estabilidad, mostrado en la Tabla 10, el factor de seguridad para este caso es:

$$FS_A = \frac{M_{RA}}{M_{mA}} = \frac{\sum s_i \Delta L_i}{\sum T_i} = \frac{(35\ 841.320\ \text{kN})}{(34\ 855.140\ \text{kN})}$$

$$FS_A = 1.028$$

Opción B.

La gran mayoría de asentamientos en la ciudad de Tijuana, están ubicados en la zona de lomeríos del municipio. Para simular esta situación, se consideran cargas puntuales con la configuración que muestra la figura 69.

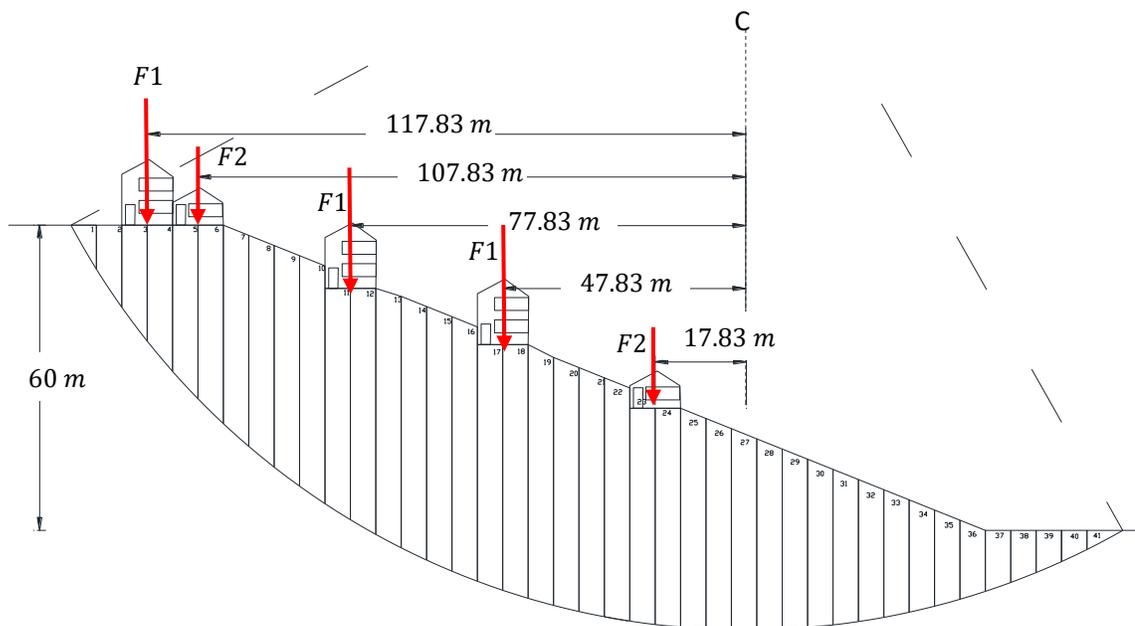


Figura 69. Configuración de las dovelas para la opción B. Considerando sobrecargas puntuales a lo largo del cuerpo de la ladera.

Para obtener las cargas puntuales, se consideraron casas con un área total de construcción de 100 metros cuadrados y un peso unitario de 1 tonelada fuerza por cada metro cuadrado. Dando como resultado, cargas de 200 toneladas fuerza y 100 toneladas fuerza, para casas de dos niveles y un nivel, F_1 y F_2 de la figura 69, respectivamente. Tales fuerzas, generan momentos desfavorables

para la estabilidad de la ladera, los cuelas aportan un aumento considerable al momento motor total M_m . El momento motor M_m , es el mismo del ejemplo 1, solamente se agregan las sobrecargas mencionadas.

$$M_{mB} = R \sum T_i + \text{Momentos}_{\text{Por sobrecargas}}$$

Para determinar el momento provocado por las sobrecargas, basta con multiplicar el brazo de palanca correspondiente a cada sollicitación puntual.

Momentos_{Por sobrecargas}

$$= 200 t_f(117.83\text{m} + 77.83\text{m} + 47.83\text{m}) + 100t_f(107.83 \text{ m} + 17.83\text{m})$$

$$\text{Momentos}_{\text{Por sobrecargas}} = 61\,264 t_f \cdot \text{m} \left(\frac{1 \text{ kN}}{0.1019716 t_f} \right)$$

$$\text{Momentos}_{\text{Por sobrecargas}} = 600\,794.731 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto, el momento motor total para este caso:

$$M_{mB} = 150.66 \text{ m} (33\,971.967\text{kN}) + 600\,794.731 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{mB} = 5\,719\,011.279 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Despreciando los pequeños cortes realizados para la colocación de las casas en la ladera (figura 69), el momento resistente total M_R para la opción B, es igual al momento resistente del ejemplo 1.

$$M_{R\,B} = 150.66 \text{ m} (38\,717.293 \text{ kN})$$

$$M_{R\,B} = 5\,833\,147.292 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Es preciso dejar todas las cifras para mayor exactitud a la hora del cociente del factor de seguridad, el cual se obtiene, con los resultados anteriores, de la siguiente manera:

$$FS_B = \frac{M_{RB}}{M_{mB}} = \frac{R \sum s_i \Delta L_i}{R \sum T_i + \text{Momentos}_{\text{por sobrecargas}}} = \frac{5\,833\,147.292 \text{ kN} \cdot \text{m}}{5\,719\,011.279 \text{ kN} \cdot \text{m}}$$

$$FS_B = 1.02$$

Opción C.

Proyectando las dos situaciones anteriores, la configuración más desfavorable se muestra en la figura 70. El análisis es similar al de la opción B; las sobrecargas aumentan el momento motor total del ejercicio que considera solamente el corte de la ladera, M_{mA} .

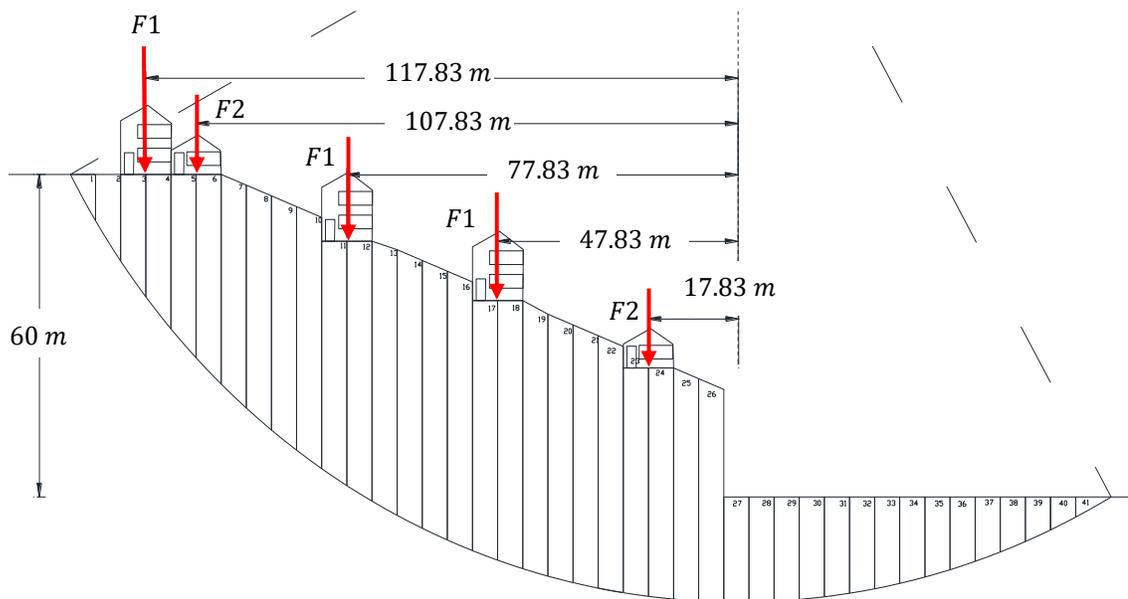


Figura 70. Configuración de dovelas para la opción C. Considerando sobrecargas en el cuerpo de la ladera y un corte al pie de la misma.

El momento resistente total, M_{RC} , es el mismo de la opción A, sin considerar las sobrecargas.

$$M_{RC} = M_{RA} = 150.66 \text{ m (35 841.320 kN)}$$

$$M_{RC} = 5\,399\,853.271 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

El momento motor total, M_{mC} , es el mismo de la opción A, sumando las sobrecargas consideradas. El cálculo de las mismas, ya se realizó en la opción anterior, por lo tanto, el momento motor es:

$$M_{mC} = M_{mA} + \text{Sobrecargas} = R \sum T_i + \text{Momentos}_{\text{por sobrecargas}}$$

$$M_{mC} = 150.66 \text{ m (34 855.140 kN)} + 600\,794.731 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{mC} = 6\,002\,730.123 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Por último, se determina el factor de seguridad para el caso donde se considera un corte al pie de la ladera y la presencia de asentamientos en la corona y pendiente de la misma.

$$FS_C = \frac{M_{RC}}{M_{mC}} = \frac{5\,399\,853.271 \text{ kN} \cdot \text{m}}{6\,002\,730.123 \text{ kN} \cdot \text{m}}$$

$$FS_C = 0.899$$

6.4.4 Análisis de resultados

Evidentemente, el factor de seguridad para cada caso, se ve afectado bajo las condiciones planteadas, véase la Tabla 11. El primer ejemplo, el cual no considera alguna presencia desfavorable, arroja un indicador de estabilidad muy bajo, el factor de seguridad es cercano a la unidad. De acuerdo a lo planteado en este capítulo, el valor del factor queda por debajo del 1.5 mínimo aceptable para las condiciones estáticas del problema. Estrictamente, las fuerzas resistentes son suficientes para impedir el movimiento, pero la presencia de algún factor desencadenante puede influir de manera desfavorable a la estabilidad de la estructura. Tal es el caso, del corte al pie de la

ladera o la existencia de infraestructura habitacional en el cuerpo de la misma. Por separado, cada factor afecta de manera importante a la estabilidad del sistema, disminuyendo el factor de seguridad casi hasta la unidad. En otras palabras, la presencia de sobrecargas con el arreglo planteado o la existencia de un corte como se mencionó en el ejercicio, inducen a la ladera a un estado de inminente falla. Las fuerzas que aportan al mecanismo de falla, son muy cercanas a la resistencia total de la ladera, provocando que la misma se encuentra en condiciones de inestabilidad.

Por último, gracias al análisis realizado, la enorme influencia que aportan ciertos factores condicionantes y desencadenantes en una ladera con las características planteadas, es más palpable. La presencia de casas ubicadas en la corana y parte del cuerpo de la pendiente, sumada al hecho de que se realice un corte a 90° al pie de la misma, arrojan un factor de seguridad menor a la unidad, lo cual indica que la ladera se encuentra bajo condiciones de inevitable falla, con las características planteadas. La resistencia del sistema no es suficiente para impedir el desplazamiento de la masa deslizante. Es importante aclarar, que los cálculos realizados no toman en cuenta los efectos de un posible sismo, por ello se hace mención a las condiciones estáticas.

Tabla 11. Factores de seguridad para los ejercicios planteados (casos estaticos).

Ejemplo	Descripción	F.S
1	Ladera sin presencia de factores desfavorables	1.14
2.A	Ladera con un corte al pie de la misma	1.028
2.B	Ladera con presencia de sobrecargas	1.02
2.C	Ladera con presencia de sobrecargas y un corte al pie de la misma	0.899

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Ante la ocurrencia, cada vez más evidente y frecuente, de problemas ocasionados por la inestabilidad de laderas, vale la pena analizar la viabilidad de aplicación de un sistema de monitoreo, y su posible desarrollo, a un sistema de alerta temprana para la ciudad de Tijuana. Argumentar que el análisis de la necesidad debe ser el primer paso, es un razonamiento fútil. La necesidad es clara, en el municipio fronterizo es indispensable dar un paso hacia adelante, que guie a cualquier sistema con un enfoque preventivo y eliminar la dependencia de aquellos con fuerte tendencia reactiva. Por ello nace la idea de plantear las bases de un sistema de monitoreo para la ciudad. Indicando los cimientos de un proyecto sencillo, con objetivos trascendentales.

En este documento se ha planteado la metodología básica para supervisar el comportamiento superficial de una ladera. Recomendando seguir los pasos descritos en los tres ejes principales del sistema propuesto; monitoreo de los desplazamientos superficiales, supervisión del agrietamiento superficial y observación y monitoreo de la pérdida de verticalidad en elementos localizados en la posible zona de afectación. Además, se ha sugerido la instrumentación y equipo necesario para cumplir con el alcance proyectado. Es claro que la lista no abarca la gran variedad de la que puede hacer uso la brigada asignada a los trabajos de monitoreo, pero siempre es recomendable iniciar con la herramienta más sencilla, que ayude a formar el criterio adecuado al personal designado.

Del mismo modo, a lo largo de todo el trabajo se han mencionado y analizado los distintos factores que influyen en la estabilidad de una ladera, procurando definir las causas y consecuencias de los mecanismos de falla que pueden presentarse en la ciudad de Tijuana. Todo lo anterior tiene como finalidad brindar un panorama más amplio y fácilmente digerible de los aspectos que rodean a tan complejo fenómeno de origen natural.

De la misma manera, la información que se presenta tiene como finalidad aportar a la formación de conocimiento, que, a consideración personal, es el mínimo necesario para lograr identificar aquellas manifestaciones tempranas que den indicios de un proceso de inestabilidad futuro. De igual manera, se despliegan las bases para saber cómo medir la magnitud de los síntomas de inestabilidad, con el uso de equipo improvisado hasta instrumentación más sofisticada.

Es importante mencionar que la instrumentación y equipo sugerido no debe utilizarse indiscriminadamente en cada sitio que se desee estudiar. Elegir la metodología más adecuada dependerá de una correcta planeación y diseño, fundamentada en el conocimiento del posible mecanismo de falla de una ladera y los factores que tienen influencia directa en la zona de interés. Por ello se recomienda realizar un diagnóstico adecuado del posible comportamiento de cada ladera supervisada y apoyarse en la información existente, ya que cada sitio tiene sus propias características, así como los agentes que tienen cierta injerencia en el lugar.

Respecto al capítulo que abarca el análisis de estabilidad por medio de la metodología descrita por Fellenius, el objetivo es claro, comparar la influencia de dos de los factores de origen antrópico más frecuentes en la ciudad de Tijuana: las sobrecargas y los trabajos de remoción de masa sin un diseño adecuado y faltos de supervisión. Quedo claro que, con el simple hecho de existir una ladera, con parámetros físicos específicos, representa un riesgo latente, aunque no exista sistema vulnerable que aporte negativamente a la estabilidad del terreno. La mala planeación urbana, el acelerado y descontrolado crecimiento poblacional y la falta de conocimiento al momento de realizar trabajos de movimientos de tierra, que aparentan ser sencillos, si bien no individualmente, pero si en conjunto, aportan de manera importante en la inestabilidad de una ladera, llegando a provocar el desplazamiento de cantidades considerables de masa que generen un desastre en la zona afectada. Con el método de dovelas de Fellenius para el análisis de equilibrio límite, es posible analizar de manera sencilla, como se hizo en este documento, distintos escenarios que se consideren de riesgo para la población.

Toda la información, sugerencias y recomendaciones escritas hasta el momento pretenden fundamentar un sistema apropiado que aporte los medios técnicos y profesionales mínimos para la toma de decisiones en temas relacionados con la Protección Civil, y de esta manera, tanto las autoridades correspondientes como la población participativa, cuenten con el criterio que les permita establecer las líneas de acción más adecuadas. Haciendo énfasis, en la creación simultánea de un sistema comunitario, que permita la participación voluntaria y bien fundamentada de ciudadanos interesados y comprometidos.

A lo largo del desarrollo de este trabajo, se logró crear un vínculo entre la visión de la Ingeniería Civil y las necesidades latentes de una ciudad agobiada por la ocurrencia devastadora de los procesos de inestabilidad de laderas. La participación entusiasta de técnicos y profesionistas capacitados,

encaminados a la prevención de desastres, no es un tema exclusivo de las autoridades y de sociedades voluntarias. Cada individuo desde su enfoque personal, tiene la oportunidad y obligación de aportar a la creación de una sociedad que logre prevenir parcialmente o por completo, los daños provocados por un desastre. Desde el punto de vista de la Ingeniería Civil, este documento aspira a cumplir con dicho objetivo para apoyar a la población de la ciudad de Tijuana, Baja California.

ANEXO A. MAPAS COMPLEMENTARIOS



Figura A.1. Ubicación geográfica de la ciudad de Tijuana.

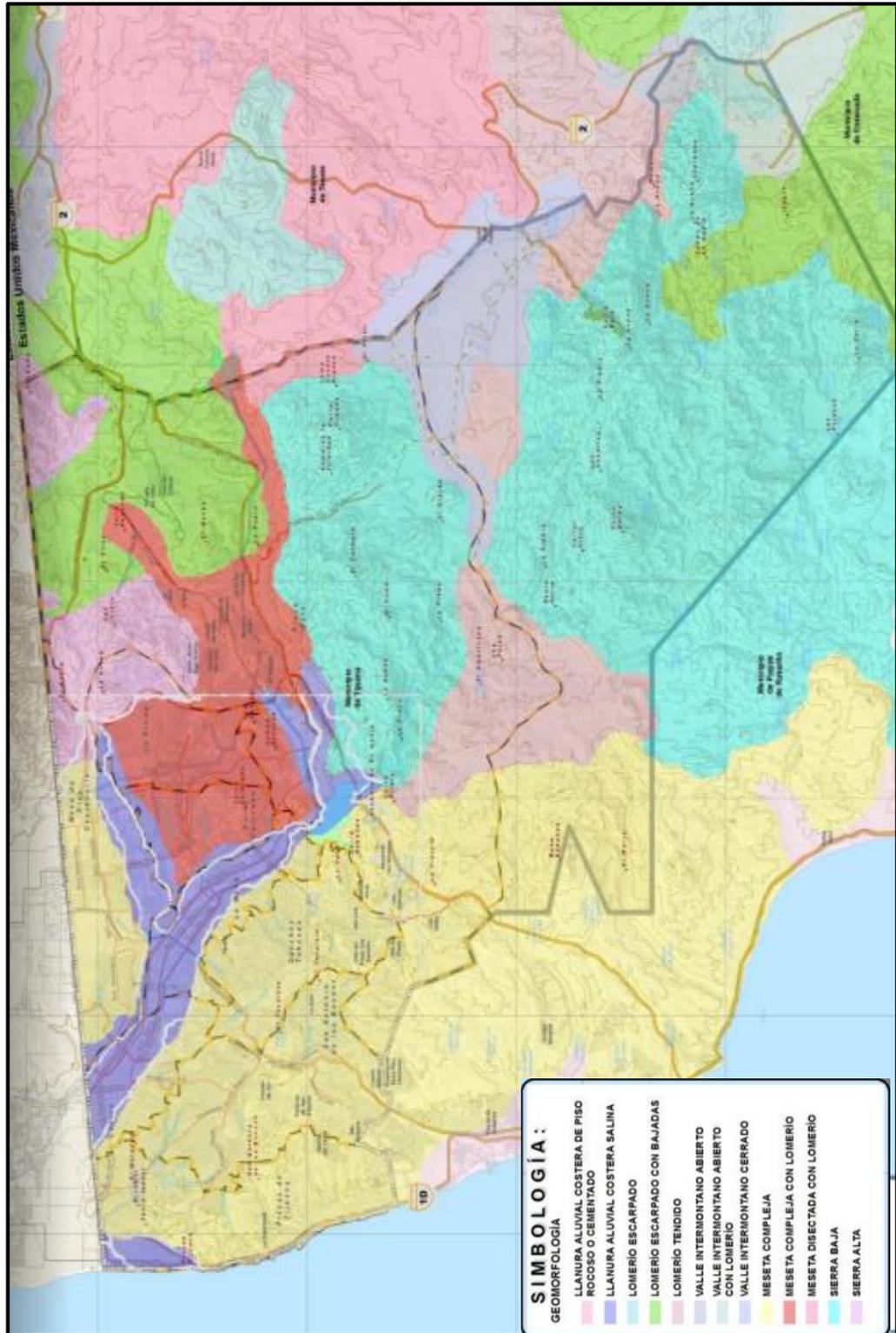


Figura A.2. Zonas geomorfológicas predominantes de la ciudad de Tijuana (CICESE, 2014).

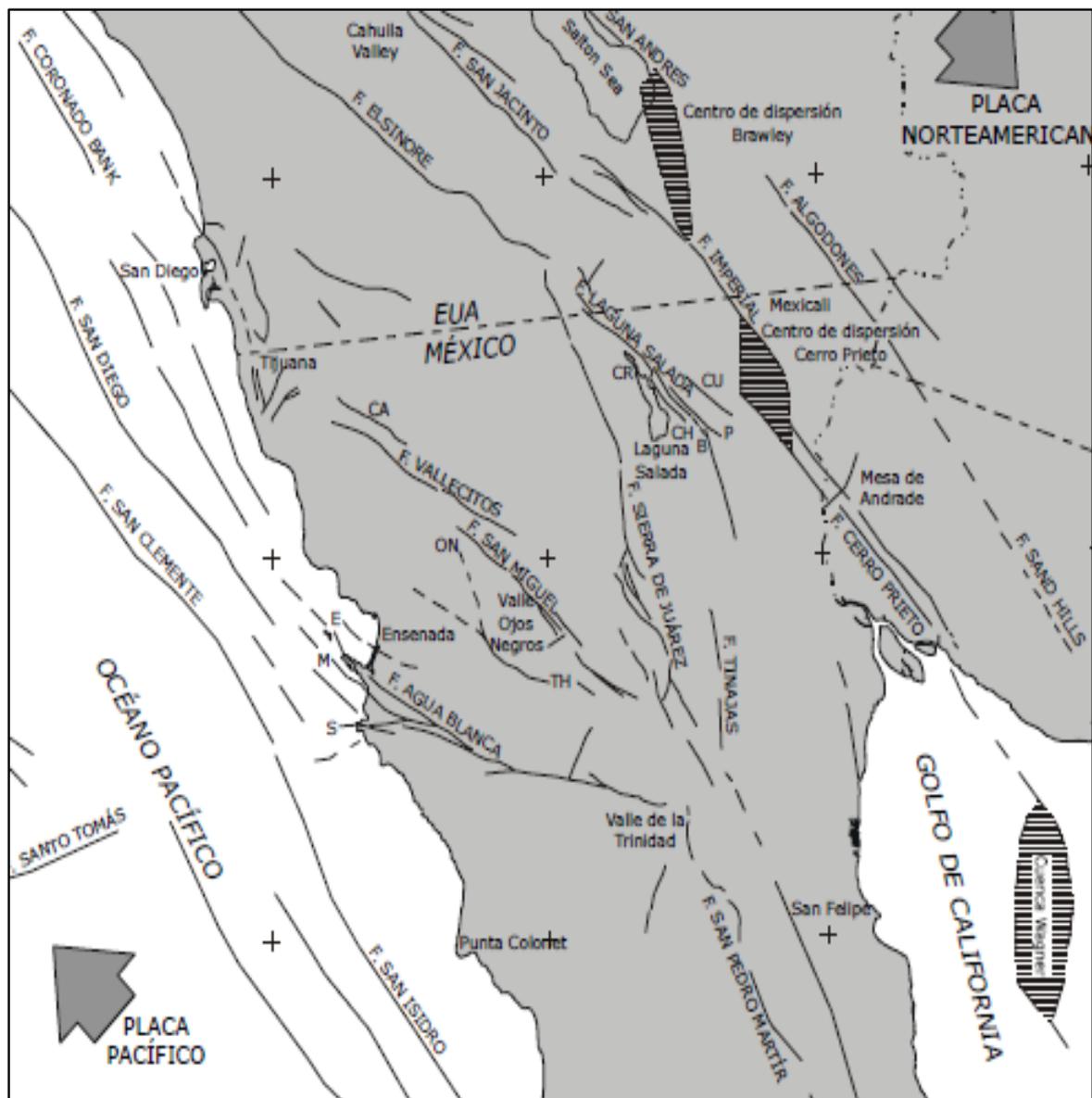


Figura A.3. Fallas regionales del Norte de Baja California (Cruz Castillo, 2002).

ANEXO B. CONTENIDO COMPLEMENTARIO

Tabla B.1. Formato para la estimación de la susceptibilidad por inestabilidad de laderas (González Huesca & Nieto, 2014).

Factores Topográficos e Históricos			
Factor	Intervalo o categoría	Atributo relativo	Observaciones
Inclinación de los taludes	Más de 45°	2.00	Estimar el valor medio. Utilizando la herramienta adecuada
	35° a 45°	1.80	
	25° a 35°	1.40	
	15° a 25°	1.00	
	Menos de 15°	0.50	
Altura	Menos de 50 m	0.60	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Uso de planos, cartas topográficas. Niveles dudosos con GPS
	50 a 100 m	1.20	
	100 a 200 m	1.60	
	Más de 200	2.00	
Antecedentes de deslizamientos en el sitio	No se sabe	0.3	Reseñas verosímiles de lugareños
	Algunos someros	0.4	
	Sí, incluso con fecha	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
	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas	1.2 a 2.0	
	Suelos arcillosos consistentes o arenos limosos compuestos	0.5 a 1.0	
	Rocas sedimentarias (areniscas y conglomerados) y tobas competentes	0.3 a 0.6	
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita)	0.2 a 0.4	
Espesor de la capa de suelo	Menos de 5 m	0.5	Revisar 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	

Tabla B.1. Continuación: Formato para la estimación de la susceptibilidad por inestabilidad de laderas (González Huesca & Nieto, 2014).

Factor	Intervalo o categoría	Atributo relativo	Observaciones	
Factores Geotécnicos				
Aspectos estructurales en formaciones rocosas	Echado de la discontinuidad	Menos de 15°	0.3	Considerando 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 de la discontinuidad.	Más de -10°	1	Considerar la dirección de las discontinuidades más representativas
Más de 30°		0.2		
10° a 20°		0.3		
	Menos de 5°	0.5		
Factores Morfológicos y Ambientales				
Evidencias geomorfológicas de "huecos" en laderas contiguas	Inexistentes	0.00	Formas de conchas o de embudo (flujos)	
	Volúmenes moderados	0.50		
	Grandes volúmenes faltantes	1.00		
Vegetación y uso de la tierra	Zona urbana	2.00	Considérese no sólo la ladera, sino también la plataforma en la cima	
	Cultivos Anuales	1.50		
	Vegetación intensa	0.00		
	Vegetación moderada	0.80		
	Rocas con raíces de arbustos en sus fracturas	2.00		
	Área deforestada	2.00		
Régimen del agua en la ladera	Nivel freático superficial	1.00	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud	
	Nivel freático inexistente	0.00		
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o plataforma	1.00		

REFERENCIAS

- Acosta Chang, J. G., Arellano Zepeda, G., & Ruiz Cruz, E. (2009). *Microzonación sísmica en la zona urbana de Tijuana*. Informe Final, CICESE, Departamento de Sismología, Tijuana.
- Alcántara Ayala, I., Garnica Peña, r., Coll-Hurtado, A., & Gutierrez De MacGregor, M. (Agosto de 2017). Inestabilidad de laderas en Teziutlán, Puebla. Factores inductores del riesgo de desastres. *Investigaciones Geográficas* (93), 30-32.
- Ayuntamiento de Tijuana. (29 de noviembre de 2016). *Declaratoria de destino de áreas de riesgo*. Recuperado el 25 de septiembre de 2018, de tijuana.gob:
<http://www.tijuana.gob.mx/dependencias/cabildo/pdf/sesion/46-11.pdf>
- Caballero Miranda, C. I. (s.f.). *Rocas Sedimentarias*. Recuperado el 22 de septiembre de 2018, de Notas de clase de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias.
- Cardona A., O. (1993). *Evaluación de la Amenaza, la Vulnerabilidad y el Riesgo*. Recuperado el 1 de octubre de 2018, de Desenredando:
<http://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/html/cap3.htm>
- CENAPRED. (2008). *Inestabilidad de Laderas*. Serie Fascículos, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Ciudad de México.
- CEPAL. (2002). *Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales*. Santiago de Chile, Chile: Naciones Unidas.
- CICESE. (2014). *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tijuana 2014*. Tijuana, Baja California: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Clark, H. (15 de agosto de 2012). *La importancia de reducir el riesgo de desastres para fortalecer las naciones*. Recuperado el 2 de octubre de 2018, de Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo:
<http://www.undp.org/content/undp/es/home/ourperspective/ourperspectivearticles/2012/08/15/building-resilience-the-importance-of-disaster-risk-reduction.html>
- Coliente Tlaxcalteca, A. (2010). *Inestabilidad en laderas y taludes*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México.
- Cordero Castillo, D. A., & Espinoza Carazo, R. (noviembre de 2012). Sistemas de alerta temprana para monitoreo de deslizamientos. *Infraestructura vial, XIV*(25), 14-19. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5051938>
- Corvera, S. (1 de marzo de 2017). *Casas se hunden hasta un metro en Valle Sur*. Obtenido de Síntesis TV: <http://sintesistv.com.mx/casas-se-hunden-metro-valle-sur/>

- Cruden , D., & Varnes, D. (1993). *Landslides: Investigation and Mitigation*. Denver.
- Cruz Castillo, M. (2002). *Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México*. Resumen, Unión Geofísica Mexicana, Instituto Mexicano del Petróleo, Tijuana.
- DAGA S.L. (s.f.). *Monitor de fisuras*. Recuperado el 10 de noviembre de 2018, de Comercial de Ingeniería DAGA S.L: <https://www.dagasl.es/hormfis9.htm>
- DGAC. (2017). *Requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano*. Circular, SCT, Dirección General de Aeronáutica Civil, Ciudad de México.
- Domínguez Morales, L., Castañeda Martínez , & González Huesca . (2016). *Análisis de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos y sus posibles aplicaciones en un Sistema de Alerta Temprana por Inestabilidad de Laderas*. CENAPRED, Subdirección de Dinámica de Suelos y Procesos Gravitacionales , Ciudad de México.
- Durán, L. (10 de abril de 2016). *Lluvias agravan hundimiento de calles en Sánchez Taboada*. Recuperado el 25 de octubre de 2018, de Frontera. Info: <https://www.frontera.info/EdicionEnLinea/Notas/Noticias/10042016/1069523-Lluvias-agravan-hundimiento-de-calles-en-Sanchez-Taboada.html>
- Elenes, A. (18 de mayo de 2015). *Fuga de agua no atendida causó deslave de casa en Tijuana*. Recuperado el 15 de octubre de 2018, de UnoNoticias: <https://www.unotv.com/noticias/estados/noroeste/fugadeaguanoatendidacausdeslavedecasaentijuana-722969/?fbclid=IwAR2ph4BHNGbBsV6JTCGi-ACF6LvmHWNXJM9vUcq0a1cUhfjpT7Biu4YBO4>
- FAO. (2018). *Portal de Suelos de la FAO*. Recuperado el 25 de septiembre de 2018, de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/es/>
- Galindo Serrano, J., & Alcántara Ayala, I. (diciembre de 2015). Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México. *Investigaciones geográficas*(88).
- García Alanis, M. (2002). *Crisis y situaciones de alto impacto. Autoayuda e intervención*. Tijuana, Baja California: Propia.
- Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (1986). *Mecánica de materiales* (Segunda ed.). Belmont: Grupo Editorial Iberoamérica.
- Gobierno Municipal de Tijuana. (4 de junio de 1999). Normas de movimientos de tierras para la aplicación del Reglamento para la extracción y nivelación de terrenos del municipio: Anexo I y II. *Periódico Oficial del Estado de Baja California*(24).

- González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
- González Huesca, A. E., & Nieto, T. A. (2014). *Metodología para elaborar mapas de riesgo por precipitación, por inestabilidad de laderas a nivel regional 2013*. Anexo: Guía de contenido mínimo para el Atlas Nacional de Riesgos, CENAPRED, Subdirección de riesgos geológicos, Ciudad de México.
- IDIGER. (2018). *Sistema de Información para la Gestión del Riesgo y Cambio Climático*. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de SIRE: <http://www.sire.gov.co/inicio>
- IGME. (1987). *Manual de Taludes* (Primera ed.). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- IMPLAN. (22 de abril de 2005). Declaratoria de destinos en las Colonias Cumbres del Rubí y Ampliación Tejamen, de la Ciudad de Tijuana, Baja California. *Periodico Oficial del Estado de Baja California*(19), págs. 58-69.
- INEGI . (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Baja California 2017*. Tijuana, Baja California: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (s.f.). *Fisiografía*. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de INEGI: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/fisiografia/>
- International Geotechnical Societies. (1993). *Multilingual Landslide Glossary*. Richmond, Canada: BiTech Publishers .
- Investigaciones subterráneas. (s.f.). *Interpretación de los datos del Georadar, Radargramas*. Recuperado el 16 de noviembre de 2018, de Investigaciones subterráneas: <http://www.invesub.com.mx/gprdata.html>
- Jiménez de Luis, Á. (s.f.). *¿Cómo funciona el GPS?* Recuperado el 13 de noviembre de 2018, de MuyInteresante: <https://www.muyinteresante.es/revista-muy/noticias-muy/articulo/como-funciona-el-gps-101471589444>
- Juárez Badillo, E. (2005). *Mécanica de Suelos 1: Fundamentos de la Mecánica de Suelos* (Segunda ed., Vol. I). Ciudad de México: Limusa.
- Juárez Badillo, E. (2016). *Mécanica de Suelos 2: Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos* (Segunda ed., Vol. II). Ciudad de México: Limusa.
- Ley General de Protección Civil. (6 de junio de 2012). Capítulo I. Disposiciones Generales. *Diario Oficial de la Federación*.
- López Álvarez, L. A. (2001). *Diagnóstico de riesgos urbanos en el área metropolitana de Tijuana*. Tijuana, Baja California, México: Dirección Municipal de Protección Civil.
- Mendoza López, M. J., Domínguez Morales, L., Noriega Rioja, I., & Guevara Ortiz, E. (2002). *Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento*. Informe Técnico, Centro

Nacional de Prevención de Desastres, Coordinación de Investigación: Área de Ingeniería Estructural y Geotecnia, Ciudad de México.

- MILENIO. (29 de abril de 2017). *La seguridad como derecho humano y obligación fundamental del Estado*. Recuperado el 1 de octubre de 2018, de MILENIO DIARIO:
<http://www.milenio.com/opinion/varios-autores/derechos-humanos/la-seguridad-como-derecho-humano-y-obligacion-fundamental-del-estado>
- Mozo y Tenorio, V. (12 de abril de 2004). *Cursos Abiertos*. Recuperado el 29 de octubre de 2018, de Topografía moderna con estación total:
http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/13378/decd_4130.pdf?sequence=1
- ODI. (marzo de 2015). *Financiamiento para la reducción del riesgo de desastres: 10 cosas que debe saber*. Recuperado el 2 de octubre de 2018, de Overseas Development Institute:
<https://www.odi.org/sites/odi.org.uk/files/odi-assets/publications-opinion-files/9524.pdf>
- Padilla Velázquez, R. R. (2015). *Notas de clase de Fundamentos de Mecánica del medio continuo*. UNAM, Facultad de Ingeniería. Ciudad de México : No publicadas .
- Peniche Espejel, J. (2008). *Modelado de la respuesta de GPR de una tierra estratificada empleando método WKBJ*. Tesis de licenciatura, UNAM, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México.
- Peña Rincón, C. A. (2014). *Monitoreo y Modelo Sistémico a Deslizamiento Superficial de Suelos para Manizales*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Manizales.
- Pérez Fructuoso, M. (septiembre de 2007). *Estudios. Daños económicos e impacto de los desastres naturales o antrópicos*. Recuperado el 30 de septiembre de 2018, de Gerencia de Riesgos y Seguros: http://www.mapfre.com/fundacion/html/revistas/gerencia/n098/estud_01.html
- Porter. (s.f.). *Transportador y localizador Johnson de ángulo magnético*. Recuperado el 10 de noviembre de 2018, de Porter distribuidora: <https://porter.com.py/johnson-400220-transportador-localizador-angulos-magnetico>
- Romo Aguilar, M. (1996). *Riesgos Naturales y Vulnerabilidad Social en Tijuana. B.C.* Tesis de maestría, El Colegio de la Frontera Norte , Tijuana.
- SEGOB. (28 de 02 de 2003). *DOF:28/02/2003*. Recuperado el 26 de septiembre de 2018, de Diario Oficial de la Federación:
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=705328&fecha=28/02/2003
- SGM. (9 de diciembre de 2017). *GEOINFOMEX-SGM*. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de Servicio Geológico Mexicano: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>

- Suárez Díaz, J. (2009). *Deslizamientos: Análisis Geotécnico* (Vol. I). Colombia: U. Industrial de Santander.
- Suárez García, O. (2006). *Susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la Sierra Madre Oriental*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México.
- UNESCO. (2012). *Inventario y caracterización de los Sistemas de Alerta Temprana Guatemala*. UNESCO-CEPRENAC, UNESCO, San José, San José.
- UNICEF. (Noviembre de 2005). *IMAS de Educación en el Riesgo de las Minas. Monitoreo*. Recuperado el 25 de octubre de 2018, de UNICEF.org:
https://www.unicef.org/colombia/pdf/Minas_parte7_07_p.pdf
- Uniradio. (13 de septiembre de 2018). *Otro caso de particular que corta ladera; casas en riesgo de derrumbe*. Recuperado el 15 de octubre de 2018, de Uniradio Informa:
https://www.uniradioinforma.com/noticias/tijuana/539564/otro-caso-de-particular-que-corta-ladera-casas-en-riesgo-de-derrumbe.html?utm_source=Boletin&utm_medium=Email&utm_campaign=Newsletter
- UNISDR. (2017). *Lineamientos y recomendaciones para la implementación del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres en el Sector Agrícola y Seguridad Alimentaria y Nutricional. América Latina y el Caribe*. Recuperado el 3 de octubre de 2018, de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres:
https://www.unisdr.org/files/50526_lineaminetos061016.pdf
- USGS. (2018). *Landslide Hazards*. Recuperado el 21 de septiembre de 2018, de USGS science for a changing world: <https://www.usgs.gov/natural-hazards/landslide-hazards/monitoring>
- Vázquez Paulino, J., Backoff Pohls, M., Gonzalez Moreno, & Morales Bautista. (2016). *Establecer la vulnerabilidad y evaluar el riesgo por deslizamientos, inundaciones pluviales y socavación de puentes en la Red Federal de Carreteras*. Publicación Técnica, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila.
- Villalpando Tovalín, F. (2016). *Modelo de deslizamientos de terreno utilizando GPS y percepción remota: Caso Ahualulco, S. L. P.* Tesis de maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Posgrado en Geociencias Aplicadas, San Luis Potosí.
- Wright, R. D., & Vela, R. (2005). *Tijuana River Watershed Atlas*. San Diego, California: San Diego State University Press.