



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**MONITOREO DE DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO
EL SISTEMA DE EXTENSÓMETROS ARTESANALES**

Edgar Leonardo Alfonso López Castillo

Asesorado por el Ing. Juan Pablo Oliva Hernández

Guatemala, octubre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MONITOREO DE DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO
EL SISTEMA DE EXTENSÓMETROS ARTESANALES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EDGAR LEONARDO ALFONSO LÓPEZ CASTILLO
ASESORADO POR EL ING. JUAN PABLO OLIVA HERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MONITOREO DE DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO EL SISTEMA DE EXTENSÓMETROS ARTESANALES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 12 de noviembre de 2012.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a vertical line, positioned above the name.

Edgar Leonardo Alfonso López Castillo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



CENTRO DE ESTUDIOS SUPERIORES
DE ENERGÍA Y MINAS
- CESEM -
Tel.: 24 18 91 39

Guatemala, 22 de septiembre de 2015

Ingeniero

Julio Roberto Luna Aroche

Director Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas

Facultad de Ingeniería

USAC

Estimado Ingeniero Luna:

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación titulado: **"MONITOREO DE DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO EL SISTEMA DE EXTENSÓMETROS ARTESANALES"** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil, EDGAR LEONARDO ALFONSO LÓPEZ CASTILLO, quien se identifica con número de carnet 2007-14835.

El trabajo en mención satisface los requisitos que exige la facultad, por lo cual recomiendo que se continúe con los trámites para la aprobación de la misma.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Juan Pablo Oliva Hernández

Ing. Civil Col. No. 6661

Asesor

Docente – Investigador/CESEM



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



CENTRO DE ESTUDIOS SUPERIORES
DE ENERGÍA Y MINAS
- CESEM -
Tel.: 24 18 91 39

Guatemala, 25 de septiembre del 2015.

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director, Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería/USAC

Ingeniero Montenegro:

Hago de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación titulado:
**"MONITOREO DE DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO EL SISTEMA DE
EXTENSÓMETROS ARTESANALES"** desarrollado por el estudiante de Ingeniería
Civil, EDGAR LEONARDO ALFONSO LÓPEZ CASTILLO, quien se identifica con
número de carnet 2007-14835.

En mi carácter de revisor considero que el presente trabajo de graduación
cumple con los requisitos para ser APROBADO.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Julio Roberto Luna Aroche
DIRECTOR

Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas
Facultad de Ingeniería / USAC
REVISOR





USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Juan Pablo Oliva Hernández y del Coordinador del Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas Ing. Julio Roberto Luna Aroche, al trabajo de graduación del estudiante Edgar Leonardo Alfonso López Castillo, titulado **MONITOREO DE DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO EL SISTEMA DE EXTENSÓMETROS ARTESANALES** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, octubre 2015

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua

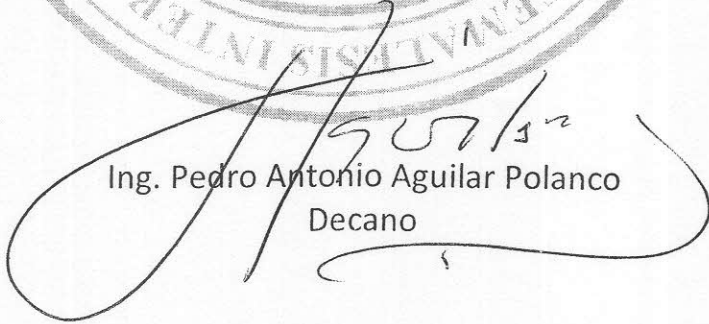




DTG. 543.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **MONITOREO DE DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO EL SISTEMA DE EXTENSÓMETROS ARTESANALES**, presentado por el estudiante universitario: **Edgar Leonardo Alfonso López Castillo**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2015

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Ser supremo, creador de la sabiduría y dador de la salud, proporcionados en el transcurso de mi vida.
Mis padres	Edgar López Paz y Eva Castillo Rodas, a quienes debo lo que soy; mi mejor ejemplo de vida, sin quienes este acto no hubiera sido posible.
Mis tías Rosa Ileana Castillo Rodas y Miryan Yaneth Castillo Maldonado	Ejemplo de perseverancia y lucha, quienes motivaron la culminación de mi carrera; las recordaré por siempre en mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis padres	Por su paciencia y amor al haberme criado y guiado a través del camino de la excelencia.
Mis hermanos	Eva López Castillo, Jorge De León Castillo y Diego López Castillo, por su apoyo incondicional en el transcurso de mi diario vivir.
Mis abuelas, tíos, tías y primos	Por su apoyo incondicional y motivación.
Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala	Institución formadora de grandes profesionales; quienes impulsamos un cambio en la sociedad guatemalteca.
Mis asesores	Ing. Juan Pablo Oliva e Ing. Julio Luna Aroche, por su apoyo incondicional, paciencia y motivación durante el desarrollo del presente trabajo de graduación.
Comisión Nacional de Reducción contra Desastres	Por haberme brindado la oportunidad de acceder a la instrumentación necesaria para el adecuado desenvolvimiento del presente trabajo de graduación.

Mis amigos

Hansel García, Eleazar Méndez, Lester Luna, Manuel Tun, Byron Poz y mis demás amigos y compañeros, por su apoyo a lo largo de mi trayectoria académica superior.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MOVIMIENTO DE LADERAS.....	1
1.1. Conceptos básicos de geotecnia.....	2
1.2. Mecánica del movimiento	5
1.3. Clasificación de movimientos de laderas.....	12
1.3.1. Desprendimientos o caídas	16
1.3.2. Vuelcos o desplomes.....	17
1.3.3. Deslizamientos	18
1.3.4. Expansiones laterales.....	18
1.3.5. Flujos	20
1.3.6. Movimientos complejos	21
1.3.7. Reptación.....	22
2. DESLIZAMIENTOS.....	25
2.1. Concepto de deslizamiento	28
2.2. Clasificación de los deslizamientos	28
2.2.1. Deslizamientos rotacionales	29
2.2.2. Deslizamientos traslacionales.....	32
2.3. Partes principales de un deslizamiento	33

2.3.1.	Zona de desprendimiento.....	34
2.3.2.	Zona de acumulación	35
2.3.3.	Corona.....	36
2.3.4.	Escarpes	36
2.3.5.	Superficie de falla.....	36
3.	CAUSAS DE DESLIZAMIENTO	39
3.1.	Factores condicionales.....	40
3.1.1.	Causas geológicas	40
3.1.2.	Causas geomorfológicas	43
3.1.2.1.	Erosión por escorrentía o flujo subterráneo	43
3.1.2.2.	Remoción de vegetación.....	46
3.1.2.3.	Otras causas	47
3.2.	Factores detonantes.....	49
3.2.1.	Causas naturales	49
3.2.1.1.	Avenidas y períodos cortos e intensos de lluvia.....	50
3.2.1.2.	Erupciones volcánicas.....	53
3.2.1.3.	Sismos	55
3.2.2.	Causas antrópicas.....	62
3.2.2.1.	Excavaciones y movimiento de tierra	63
3.2.2.2.	Minería y explotación de canteras.....	65
3.2.2.3.	Sobrecarga y descarga excesiva	69
4.	MÉTODOS DE MONITOREO Y EQUIPOS	73
4.1.	Tipos de monitoreo.....	75
4.1.1.	Monitoreo preventivo	75

4.1.2.	Monitoreo de deslizamiento activo.....	76
4.2.	Instrumentación para monitoreo de deslizamientos	77
4.3.	Monitoreo por extensómetros	79
4.3.1.	Monitoreo por extensómetros artesanales.....	87
4.3.1.1.	Tipos de extensómetros	88
4.3.2.	Extensómetros utilizados en Guatemala	93
4.3.2.1.	Descripción del funcionamiento de la instrumentación.....	97
4.4.	Calibración del equipo	100
5.	SISTEMATIZACIÓN DEL MÉTODO DE MONITOREO	105
5.1.	Niveles de alerta.....	105
5.2.	Estructura del método.....	110
5.2.1.	Determinación del tipo de deslizamiento	111
5.2.2.	Investigación de las causas de origen del deslizamiento	112
5.2.3.	Determinación de los materiales geológicos involucrados en el deslizamiento	114
5.2.4.	Medición del desplazamiento diferencial del deslizamiento.....	116
5.2.5.	Evaluación de riesgos que genera el deslizamiento local y regionalmente	116
5.3.	Muestreo de datos.....	118
5.4.	Puntos de colocación del equipo	121
5.5.	Análisis de datos	123
5.5.1.	Desplazamientos relativos.....	124
5.5.2.	Curva de deformación-tiempo.....	127
5.5.3.	Punto de ruptura	131

5.6.	Recomendaciones por parte de las autoridades competentes	142
CONCLUSIONES.....		145
RECOMENDACIONES		149
BIBLIOGRAFÍA.....		151
ANEXOS.....		157

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagramas de esfuerzo-deformación	3
2.	Diagrama de deformación-tiempo para cargas sostenidas por un largo plazo.	4
3.	Relación de fuerzas actuantes y fuerzas resistentes en una ladera	6
4.	Inicio de una falla progresiva.....	7
5.	Evolución de la falla progresiva.....	9
6.	Esquema dinámico del flujo de materiales.....	10
7.	Ejemplo de desprendimientos	17
8.	Ejemplo de vuelcos.	18
9.	Ejemplo de expansiones laterales.....	19
10.	Ejemplo de flujos.....	21
11.	Ejemplo de movimientos complejos	22
12.	Ejemplo de reptación	23
13.	Nomenclatura de talud y ladera	25
14.	Partes generales de un talud o ladera	26
15.	Deslizamiento de suelos	28
16.	Desplazamiento de rotación en una ladera.....	30
17.	Deslizamientos rotacionales sucesivos.....	31
18.	Deslizamiento rotacional en suelos residuales.....	31
19.	Deslizamiento de traslación	33
20.	Nomenclatura de las partes del deslizamiento.....	34
21.	Esquema general de erosión debida al agua superficial.....	45

22.	Deslizamientos relacionados con alteraciones a la vegetación	48
23.	Presiones de poros sobre una superficie de falla potencial para diferentes condiciones de drenaje	54
24.	Proceso de un deslizamiento debido a la licuefacción de un manto débil	57
25.	Relación entre el área afectada por deslizamientos y magnitud de un sismo.....	60
26.	Relación entre la distancia al área epicentral y magnitud de un sismo para la ocurrencia de un deslizamiento	61
27.	Zonas de concentración de esfuerzos en un talud vertical en un sismo	62
28.	Diagrama general del efecto de un corte.....	64
29.	Efectos de modificación de la topografía	65
30.	Modelo de deslizamiento al realizar cortes para extracciones a cielo abierto	67
31.	Talud con pendiente excesiva en un proceso de relleno	70
32.	Rellenos urbanos, susceptibles a procesos de erosión	71
33.	Deslizamiento ocasionado por la colocación de un relleno sobre un coluvión	71
34.	Esquema de un extensómetro de sonda	80
35.	Esquema de un extensómetro instalado en un pozo fijo.....	81
36.	Extensómetro para medir convergencias con cinta	82
37.	Colocación de un extensómetro superficial eléctrico para medición de deformaciones de fisuras	83
38.	Monitoreo utilizando extensómetro mecánico y pasadores	86
39.	Extensómetro artesanal utilizando contrapeso	92
40.	Extensómetro artesanal	94
41.	Extensómetro artesanal con alarma de disparo.....	95
42.	Pasadores para extensómetro artesanal	96

43.	Esquema de construcción de extensómetro artesanal.....	98
44.	Diagrama de flujo del sistema de monitoreo propuesto	106
45.	Gráfico deformación-tiempo	128
46.	Gráfico deformación-tiempo con datos depurados.....	131
47.	Gráficas típicas de los cambios del valor inverso de la velocidad respecto del tiempo sobre la superficie de la ladera justo antes de la ruptura	134
48.	Método gráfico para predecir el tiempo en llegar al punto de ruptura en el caso que $\alpha \neq 2$	136
49.	Gráfico inverso de la velocidad–tiempo	142

TABLAS

I.	Clasificación de los procesos de remoción de masa según el material y el mecanismo de movimiento.....	13
II.	Sistema de clasificación unificado de deslizamientos	14
III.	Clasificación de los procesos de remoción de masa según la velocidad de movimiento	15
IV.	Umbrales de precipitación para desencadenamiento de nuevos movimientos de ladera.....	51
V.	Umbrales de precipitación para desencadenamiento de movimientos de ladera en la reactivación o aceleración de movimientos.....	52
VI.	Relación entre precipitaciones y desencadenamiento de movimientos de ladera	53
VII.	Posibilidad de movimientos causados por sismos	59
VIII.	Categorías de instrumentos para medición de deformaciones	78
IX.	Extensómetros mecánicos para medición de fisuras	85
X.	Desplazamientos registrados en campo	125

XI.	Desplazamientos con datos depurados	129
XII.	Velocidades y el inverso de la velocidad	140

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ϕ	Ángulo de fricción interna
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro cuadrado
c	Cohesión
A	Constante utilizada en el método de Rose y Hungr
ϵ	Deformación unitaria
Dr	Diámetro del deslizamiento
σ	Esfuerzo
τ	Esfuerzo cortante provisto por el suelo
SI	Factor de caracterización litológica
Sh	Factor de caracterización por humedad
Sr	Factor de caracterización topográfica
FC	Factor de corrección
Tp	Factor de intensidad de precipitación
Ts	Factor de intensidad sísmica
H	Factor de susceptibilidad al riesgo
°	Grados sexagesimales
h	Hora
1/v	Inverso de la velocidad
Km ²	Kilómetro cuadrado
Lr	Longitud del deslizamiento
m	Metro
mm	Milímetro

min	Minutos
a	Pendiente utilizada en la gráfica de Fukuzono
%	Porcentaje
%P	Porcentaje de precipitación
α	Potencia utilizada en la gráfica de Fukuzono
s	Segundo
Símb	Símbolo
t	Tiempo
t_0	Tiempo inicial
tr	Tiempo de ruptura
v	Velocidad
v_0	Velocidad inicial

GLOSARIO

Antrópico	Lo relativo al hombre entendido, utilizado sobre todo en contextos científicos.
Artesanal	Referente al trabajo realizado de forma manual por una persona sin el auxilio de automatizaciones.
ASTM	American Society of Testing and Materials (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales).
Avalancha	Desplazamiento de una capa de tierra ladera debajo de manera repentina y veloz, que puede incorporar parte del sustrato y de la cobertura vegetal de la pendiente.
Avenida	Elevación del nivel de un curso de agua significativamente mayor que el flujo medio de este.
Calibración	Proceso de comparar los valores obtenidos por un instrumento de medición con la medida correspondiente de un patrón de referencia.
Conred	Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres.

DGPS	<i>Differential GPS</i> (sistema diferencial de coordenadas GPS).
DInSAR	<i>Differential interferometric synthetic aperture radar</i> (interferometría diferencial con radar de apertura sintética).
Falla	Fractura en el terreno a lo largo del cual hubo movimiento de uno de los lados respecto del otro.
Geotecnia	Estudio y aplicación de las propiedades físicas de los materiales naturales de la corteza terrestre a proyectos de la ingeniería civil.
Geomorfología	Rama de la geografía física y de la geología que tiene como objeto el estudio de las formas de la superficie terrestre enfocado a describir, entender su génesis y su actual comportamiento.
GPS	<i>Global positioning system</i> (sistema de posicionamiento global).
InSAR	<i>Interferometric synthetic aperture radar</i> (interferometría con radar de apertura sintética).
ISRM	International Society for Rock Mechanics (Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas).

Licuefacción	Paso de un componente de estado sólido a estado líquido, en este caso se hace referencia específicamente al suelo.
Monitoreo	Acción de controlar o supervisar una situación a través de sensores que permitan visualizar algún proceso.
Movimiento de ladera	Desplazamiento de materiales formadores de laderas, originado bajo la influencia de la gravedad y sin el empleo de transporte alguno.
Roca	Sustrato formado por elementos que pueden ser separados sin un aporte significativamente alto de energía, generados a través de partículas fuertemente consolidadas a través de fuerzas naturales.
SAT	Sistemas de alerta temprana.
Suelo	Sustrato físico sobre el que se realizan las obras, del que importan las propiedades fisicoquímicas, especialmente las propiedades mecánicas, generado a través del proceso de meteorización y/o degradación de rocas.

RESUMEN

En el presente trabajo académico inicialmente se da a conocer la teoría general que rige la mecánica del movimiento de las laderas por medio de la consulta de libros de texto y gráficos concernientes al tema. Prosiguiendo con la línea teórica se dan a conocer las distintas causas que generan los deslizamientos (factores condicionantes), así como las causas que generan la activación de los mismos (factores detonantes). Posteriormente se explica la metodología de monitoreo utilizando los extensómetros mecánicos, haciendo un énfasis especial en los extensómetros artesanales utilizados por la Conred.

Luego se presenta la normativa propuesta de calibración para el uso de los extensómetros artesanales realizando una adaptación de la normativa ASTM E83, así como un diagrama de flujo donde se representan gráficamente los procedimientos propuestos para el correcto desarrollo de la metodología, la cual es objeto el presente trabajo académico, así como las características esenciales que debe poseer un deslizamiento para ser investigado bajo la metodología propuesta.

Por último se presenta la metodología para el análisis de los datos, así como el desarrollo de un ejemplo que presenta desde la depuración de los datos generados por los extensómetros hasta la predicción del tiempo de ruptura para el deslizamiento en análisis.

OBJETIVOS

General

Realizar una propuesta de un sistema de monitoreo para deslizamientos en el país de Guatemala, que abarque desde la medición hasta la interpretación de los datos generados a través de extensómetros mecánicos artesanales, los cuales deben ser de bajo costo y de fácil construcción así como de fácil utilización.

Específicos

1. Comprender y dominar conceptos básicos sobre los diferentes movimientos de laderas, especialmente los deslizamientos, desde su formación hasta las distintas causas que los puedan activar.
2. Conocer los distintos métodos para el monitoreo de deslizamientos, así como la instrumentación que existe en el mercado para desarrollar los mismos.
3. Implementar una metodología aproximada para predecir el tiempo de ruptura en los deslizamientos activos, a través de los datos generados por los extensómetros artesanales.
4. Representar gráficamente la secuencia de actividades que conlleva el proceso de monitoreo para su fácil interpretación e implementación dentro de las comunidades mayormente afectadas.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería civil es una disciplina en la cual se aplican conocimientos fisicomatemáticos y mecánicos para el diseño y construcción de una gran diversidad de estructuras. Sin embargo, es necesario estudiar los posibles riesgos que puedan existir en el entorno de la construcción para prevenir que las mismas estén sometidas a situaciones no consideradas en el diseño original, generando de esta manera la importancia del estudio de los movimientos de ladera.

Los movimientos de ladera están definidos como el desplazamiento del suelo transportado por la gravedad, siendo generados y activados por distintos factores, dentro de los cuales se encuentran las causas climatológicas, es decir las lluvias y avenidas; geológicas, debido a las características físicas de los materiales constitutivos; topográficas, según la agresividad en los cambios de pendiente del terreno; y antrópicas, debido a la sobrecarga producida por exceso de construcciones sobre la ladera, o bien descarga excesiva producida por la deforestación y los cortes súbitos para construcción de plataformas.

El monitoreo de deslizamientos bajo cualquier tipo de método puede detectar manifestaciones de inestabilidad que pudiesen ocurrir en las laderas. Un monitoreo preventivo apropiado puede identificar movimientos producidos por inestabilidad a temprana edad, de esta manera, poder tomar acciones apropiadas para la mitigación de posibles problemas que se puedan suscitar y afecten poblaciones que habiten en lugares de alto riesgo, o bien tomar medidas preventivas para atenuar las posibles consecuencias de un deslizamiento que afecte un tramo de carretera.

Asimismo, un monitoreo realizado luego de ocurrir las manifestaciones iniciales del movimiento en la ladera puede proveer información importante acerca del tipo de movimiento, así como su comportamiento; de la misma manera se puede predecir el tiempo que necesita para culminar su desplazamiento, siendo en muchas ocasiones súbitas.

El énfasis de este trabajo de graduación está basado en un método de monitoreo apropiado para las condiciones de Guatemala, utilizando extensómetros mecánicos fabricados de manera artesanal reflejando un bajo costo de construcción, y siendo diseñados para facilitar su utilización. De la misma manera se propone un método para la adecuada generación de datos, así como la interpretación y el análisis de los mismos.

1. MOVIMIENTO DE LADERAS

La forma de la superficie de la Tierra está sujeta a cambios significativos a través del tiempo debido a una serie de procesos dinámicos. Dichos procesos son consecuencia de la interacción entre la fuerza de la gravedad y la energía provista por agentes externos, los cuales pueden propiciar que los movimientos se aceleren bajo condiciones específicas. A tales desplazamientos se les cataloga como “movimientos de laderas”, los cuales son estudiados a través de la geomorfología, encargada también de estudiar los procesos de formación de las laderas y la composición de sus materiales.

En términos generales los movimientos de laderas, también conocidos como “movimientos de masas” o “remoción de masa”. Peck (1894) y Varnes (1958) los definen como: “Un desplazamiento de materiales formadores de laderas, originado bajo la influencia de la gravedad y sin el empleo de transporte alguno”. Otra de las definiciones utilizadas en el medio para puntualizar el tema de los movimientos de laderas puede ser: “Una serie de reajustes del terreno para conseguir el equilibrio ante un cambio de condiciones”.

Por lo tanto, se puede definir un movimiento de ladera como la serie de desplazamientos que sufre el material que forma una ladera, inducida por factores propios de la misma y activada por factores físicos externos, siendo la fuerza motriz predominante del movimiento la gravedad de la Tierra.

Las definiciones anteriores hacen referencia a conceptos de fuerzas físicas y el equilibrio de las mismas. Como bien se sabe, cualquier sólido o

líquido que se encuentre sobre la superficie terrestre está influenciado por el efecto de la fuerza gravitatoria. Una porción de masa de suelo o roca permanece estable si la fuerza de la gravedad es contrarrestada por las fuerzas reactivas que ejercen el terreno y los cuerpos adyacentes, por esta razón es conveniente conocer los principios físicos fundamentales de la geotecnia, que según Das (2001) se define como “el estudio y aplicación de las propiedades físicas de los materiales naturales de la corteza terrestre a proyectos de la ingeniería civil” para lograr entender mejor dicho fenómeno.

1.1. Conceptos básicos de geotecnia

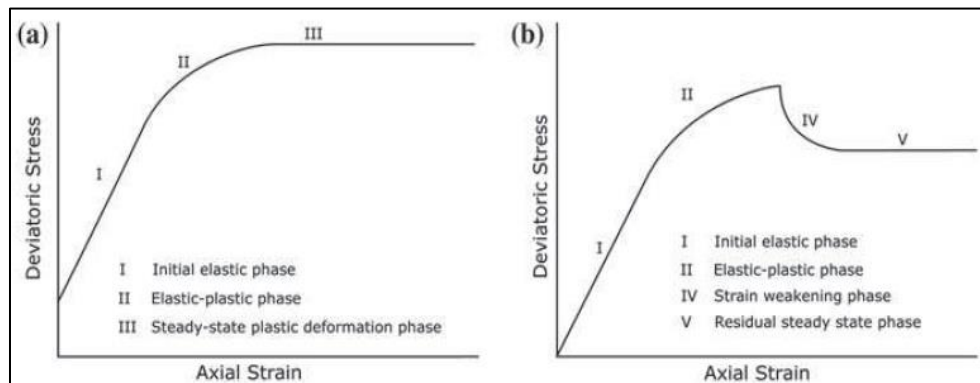
Según las leyes newtonianas, un movimiento es producido por el desequilibrio que existe sobre el conjunto de fuerzas que actúan sobre la masa analizada; originando a su vez una serie de deformaciones en los límites del cuerpo. Dichas deformaciones producen esfuerzos dentro de los poros del suelo, los cuales se encuentran llenos de aire y agua en distintas proporciones, dando lugar a deformaciones no elásticas debido a la falta de homogeneidad del material.

Según la teoría, principalmente existen dos tipos de esfuerzos: el esfuerzo axial y el esfuerzo de cizalla quienes interactúan a lo largo de cada unidad infinitesimal dentro de un cuerpo. Además, cada material sometido a esfuerzo posee diferentes propiedades físicas que dan lugar a la clasificación de los materiales en dos grandes grupos: frágiles (figura 1a) o dúctiles (figura 1b), según sea su comportamiento al momento de la falla.

La mayoría de materiales geológicos que conforman los deslizamientos pueden presentar ambos tipos de falla si se generan las circunstancias apropiadas, dependiendo mayormente de la presión de confinamiento a la que

se encuentren sometidos. Sin embargo, las fallas frágiles son más representativas para los estratos superficiales debido a que la presión de confinamiento en ese punto es casi nula.

Figura 1. **Diagramas de esfuerzo-deformación**



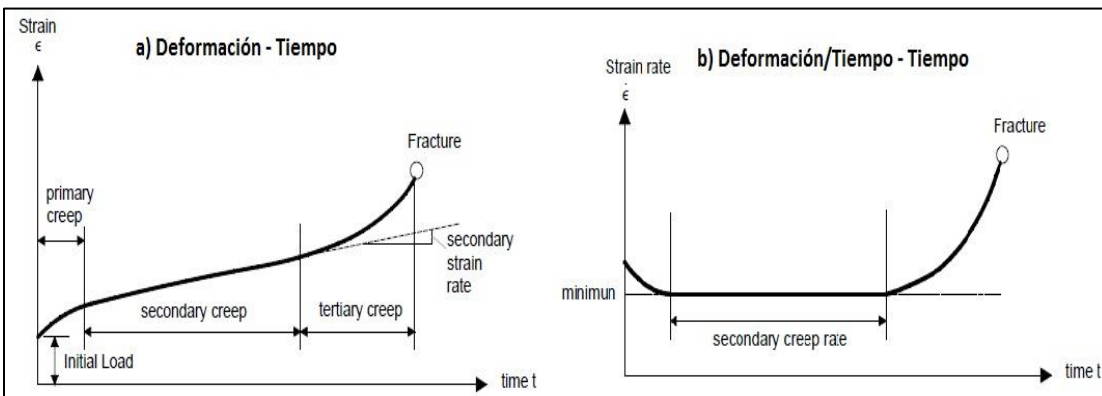
Fuente: THIEBES, Benni. *Landslide analysis and early warning systems*. p. 11.

Según se aprecia en la gráfica, los materiales frágiles tienen una alta resistencia inicial a los esfuerzos axiales. El material predominante en los movimientos de laderas suele ser suelo y roca, los cuales son catalogados como materiales frágiles.

Sin embargo, los suelos se pueden deformar de manera continua cuando están sujetos a una misma carga por un largo plazo, aun cuando dichas cargas estén por debajo de la resistencia de tales materiales. Para tales situaciones, los materiales se representan bajo una curva idealizada que muestra claramente cómo el material sufre una serie de continuas deformaciones bajo la acción de una carga prolongada a través del tiempo. Por esta razón, una evaluación de la deformación producida por cargas sostenidas durante un largo tiempo (*creep*) genera resultados más apegados a la realidad al momento de

evaluar movimientos de laderas que ensayos de carga y descarga a velocidades regulares.

Figura 2. **Diagrama de deformación-tiempo para cargas sostenidas por un largo plazo**



Fuente: BUSSLINGUER, Matthias. *Landslide time-forecast methods*. p. 9.

Por otra parte, los esfuerzos de corte también son determinantes para la iniciación de los movimientos de masas. Según la teoría de la resistencia del suelo de Mohr-Coulomb, el esfuerzo de corte depende tanto de la resistencia al esfuerzo axial como de dos factores dependientes del tipo de suelo y de las condiciones del mismo: el ángulo de fricción interna (ϕ) y la cohesión (c).

Una ladera se mantiene estable siempre y cuando la resistencia a deslizarse a lo largo de una superficie de falla sea mayor que el peso propio del bloque influenciado por la gravedad pendiente abajo. Toda vez dicha relación fundamental no se cumpla, la ladera empieza a moverse a través de un factor detonante. Dependiendo del material predominante de la ladera, se inician las deformaciones del ciclo del *creep* descrito a continuación: en la primera etapa ocurren deformaciones abruptas en un corto espacio de tiempo, seguido de una

deformación que se mantiene casi constante durante la mayor parte del período; para luego terminar con un incremento de deformaciones que crece de manera casi exponencial hasta concluir en el colapso total.

Una vez producido el desequilibrio y se inicien las deformaciones del ciclo del *creep*, los materiales tienden a comportarse de manera muy similar, obviando las características físicas propias y siguiendo el comportamiento de las razones de crecimiento del *creep* respecto del tiempo de la figura 2. Por esta razón, en los métodos de predicción del colapso de los distintos movimientos de laderas son necesarias únicamente las mediciones y algunos instrumentos para generar pronósticos acertados.

Los métodos actuales utilizan, mayormente, el segundo período de variación del *creep* para predecir el tiempo restante para alcanzar el colapso, ya que es durante dichas etapas que se logran evidenciar varios indicadores que dan la pauta para reconocer el inicio de un movimiento de ladera. Además, en dicho período la rapidez, las deformaciones respecto del tiempo, es casi una constante, lo cual se ha comprobado empíricamente bajo fenómenos recreados artificialmente a escalas menores.

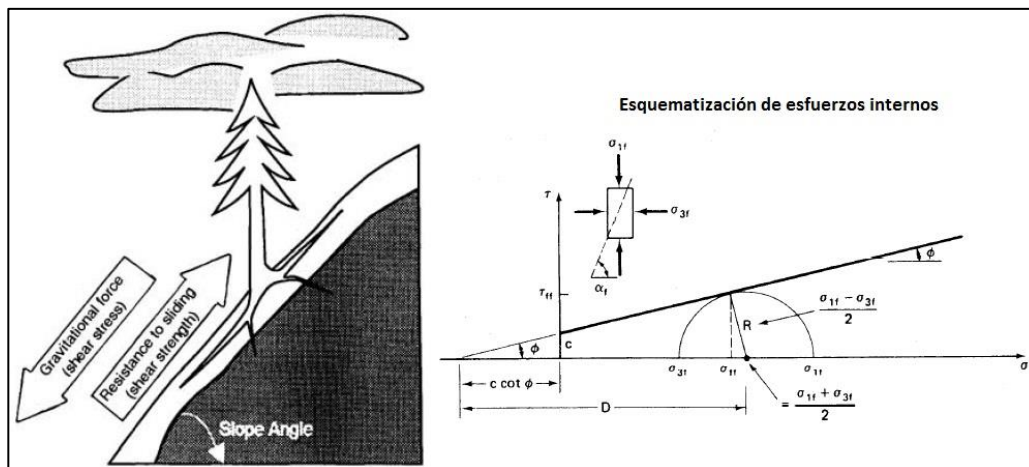
1.2. Mecánica del movimiento

La mecánica del movimiento obedece a tres factores importantes ya mencionados:

- Cohesión (c): es la capacidad que poseen las partículas del suelo de mantenerse unidas en virtud de fuerzas internas. La cohesión es mayor mientras más partículas finas posea el suelo.

- Ángulo de fricción interna (ϕ): relacionada esencialmente con la fuerza de fricción que se genera entre las partículas individuales, o bien entre la masa en análisis y la superficie de falla.
- Esfuerzo axial resistente medido sobre el plano de falla (σ): generada ya sea por características propias del material o anclajes de vegetación existente.

Figura 3. **Relación de fuerzas actuantes y fuerzas resistentes en una ladera**



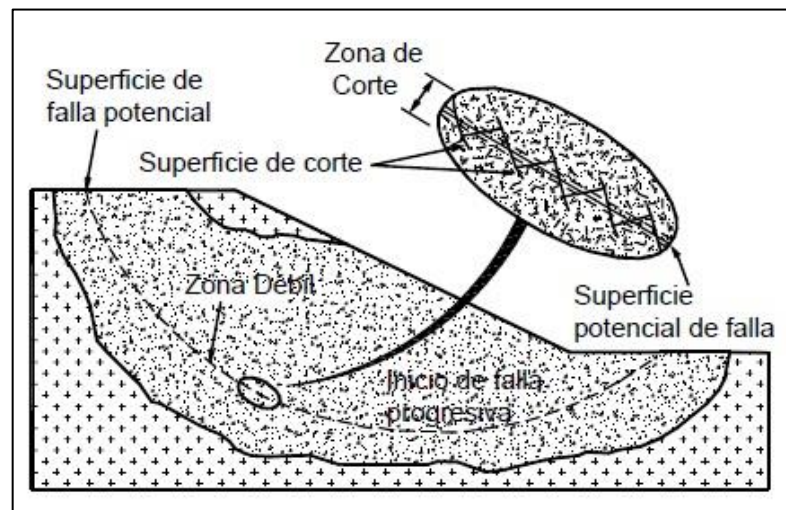
Fuente: Ministry of Forests. *A guide for management of landslide-prone terrain in the pacific northwest*. p. 6.

La forma en que dichos factores interactúan en un talud es representada en la figura 3. Como bien se dijo antes, toda vez exista un desequilibrio en laderas compuestas de suelo principalmente, la masa empieza a deslizarse y se comporta siguiendo una deformación establecida. La ocurrencia de una falla obedece a un proceso que depende de dos factores afectados por el espacio y

tiempo: susceptibilidad del talud, o condición actual del talud; y modificación de condiciones originales, ya sea por el deterioro o factores detonantes.

Luego de generarse la modificación por cualquier de los dos factores mencionados, el proceso de fallamiento inicia. En la mayoría de los casos, las fallas no surgen de manera repentina en la superficie, sino que toman cierto tiempo, el cual puede durar de minutos a años, comprobando de esta manera la gráfica de las deformaciones bajo cargas sostenidas por un largo plazo.

Figura 4. **Inicio de una falla progresiva**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 48.

El proceso de fallamiento inicia con deformaciones o agrietamientos aislados relacionados con la concentración de esfuerzos, usualmente generados en la subsuperficie de la ladera. Al inicio del movimiento, es muy posible que estas deformaciones progresivas afecten volúmenes aislados del talud, pero a medida que avanza el proceso de fallamiento las principales deformaciones se concentran en una superficie a lo largo de la cual se produce

la rotura del material, tal es denominada superficie de falla, ver figura 4. Esta, con el tiempo, va progresando en longitud.

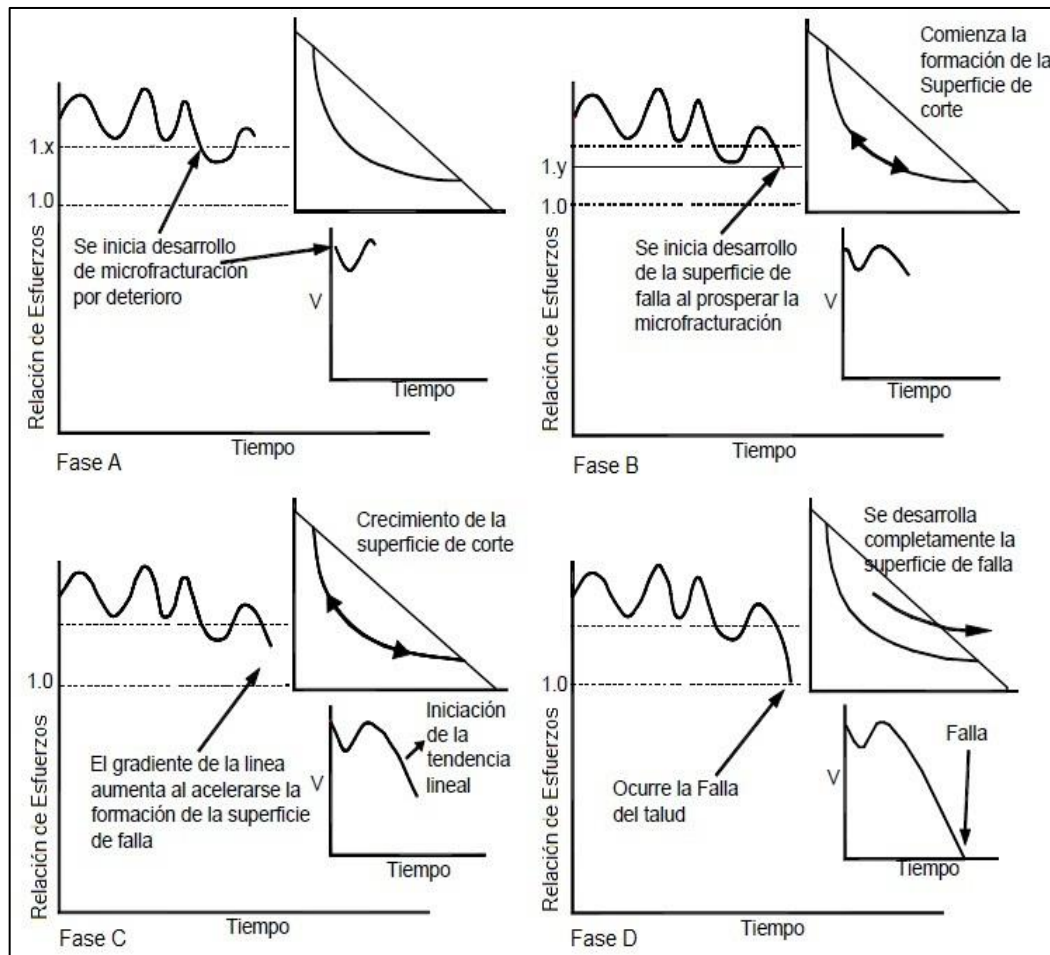
Si la resistencia del suelo es superada totalmente en cualquier punto de la superficie de falla, el mismo se fractura localmente. Pathak, Gharti, Singh y Hiratsuka (2007) realizaron un estudio que demuestra que al suceder esto, el esfuerzo aplicado en el punto de falla se reduce y su diferencia es transferida a los puntos adyacentes, los cuales a su vez tratan de fracturarse; tal proceso se conoce como redistribución de esfuerzos, la cual se genera antes del inicio del ciclo de las deformaciones bajo cargas sostenidas por un largo plazo, *creep*.

En el proceso de falla progresiva, según Suarez (2005), la relación de esfuerzos resistentes y actuantes va cambiando conforme el tiempo, como se ilustra en la figura 5:

- A medida que las presiones de poros disminuyen, hay una relación crítica de esfuerzos en la cual se inicia una superficie de cortante mediante la formación o crecimiento de microgrietas que pueden estar distribuidas a lo largo de la superficie de falla o en puntos específicos (fase A).
- La densidad de las microgrietas alcanza un punto donde se inicia una interacción entre estas, lo cual conduce a un aumento en el nivel de esfuerzos entre microgrietas, que inducen el desarrollo de una superficie de falla (fase B). Este proceso puede ocurrir en uno o varios sitios a lo largo de la superficie de falla.
- El aumento de la superficie sometida a un esfuerzo de cizalla mayor genera una disminución en la relación de esfuerzos al pasar el material de su resistencia máxima a una resistencia residual afectada por la

transferencia de esfuerzos. Esta fase equivale a una fatiga progresiva caracterizada por movimientos muy pequeños en la masa deslizada. La falla no se ha desarrollado totalmente en esta etapa. El aumento de la longitud de la superficie fallada continúa a medida que se reduce la longitud no fallada.

Figura 5. Evolución de la falla progresiva

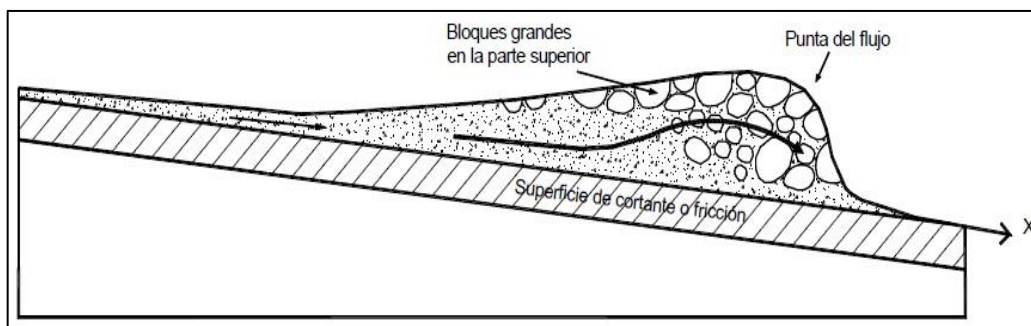


Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 50.

- Eventualmente, se alcanza un punto en el cual el esfuerzo en la porción no fallada empieza a aumentar hiperbólicamente (fase C).
- Al producirse el aumento hiperbólico en los esfuerzos, la evolución del movimiento ya no depende del agrietamiento y se inicia un proceso de formación de una superficie de falla lisa o de una sección de falla de espesor significativo (fase D).

Una vez el movimiento de ladera se ha activado y se ha generado la superficie de falla, el material que compone la ladera inicia su movimiento conducido por la gravedad para, finalmente, ser depositado. Durante este último período puede ocurrir una posible reactivación del movimiento generado a través de un nuevo fallamiento, en la cual se presentan las mismas etapas de la creación de la superficie de falla de manera cíclica.

Figura 6. **Esquema dinámico del flujo de materiales**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 53.

Los movimientos posfallas son movimientos en los cuales la energía inicial es máxima y va disminuyendo progresivamente. La energía del movimiento se disipa con el rompimiento, desmoronamiento o desaceleración por fricción del

movimiento inicial. Cuando la energía inicial de la falla se transforma en un porcentaje importante de energía cinética, la distancia del recorrido puede adquirir una dimensión relativamente grande (ver figura 6).

Con base en estudios, se han obtenido relaciones entre el volumen de la masa fallada y la longitud de recorrido para avalanchas de roca y flujos de arcilla, con lo cual se han podido establecer las siguientes observaciones:

- La relación entre el volumen de falla y la distancia de recorrido dependen del nivel de humedad o saturación de los materiales.
- La distancia de recorrido, generalmente aumenta con el volumen de la masa fallada.
- La energía y la longitud de recorrido aumenta con la altura del deslizamiento.

En el caso de los movimientos activados por sismos, la energía producida por un evento sísmico puede generar energías cinéticas superiores a las de un evento estático. La energía del sismo suele transmitirse al movimiento.

Además, algunos movimientos de masa de gran magnitud corresponden a movimientos antiguos, los cuales se han reactivado o se encuentran todavía en movimiento lento (segunda fase del *creep*). Generalmente, esas laderas se clasifican geológicamente como coluviones y en ocasiones, como formaciones geológicas independientes.

1.3. Clasificación de movimientos de laderas

Existe una gran variedad de clasificaciones de los procesos de remoción de masa, las cuales se han basado en distintos aspectos físicos del fenómeno tales como:

- Tipo y tamaño del material involucrado, tales como tipo de roca, suelo y estructuras internas.
- Atributos geomorfológicos, tales como la superficie de ruptura y el área de depósito.
- Atributos geométricos, tales como profundidad, longitud, altura, pendiente del talud.
- Condiciones locales del fenómeno, tales como clima, humedad.
- Tipo y velocidad de movimiento, tales como rápida, lenta, moderada.
- Mecanismo de disparo, tales como sismos, lluvias intensas.

Antiguamente, la clasificación más común para los procesos de remoción de masa estaba basada en el mecanismo de movimiento y fue propuesta por Varnes (1978). A su vez, Hutchinson (1988) realizó una clasificación diferenciando los materiales involucrados en el fenómeno.

Actualmente la clasificación más utilizada y aceptada internacionalmente es una combinación de ambas propuestas mencionadas anteriormente (ver

tabla I). De acuerdo con esta clasificación, los diferentes movimientos se subdividen de acuerdo a los materiales formadores.

Tabla I. **Clasificación de los procesos de remoción de masa según el material y el mecanismo de movimiento**

Mecanismo de movimiento	Tipo de material involucrado			
	Tipo	Roca (rock)	Derrubios (debris)	Suelo (soil)
Desprendimiento o (<i>fall</i>)		Desprendimiento de roca. (<i>rockfall</i>)	Desprendimiento de derrubios. (<i>debris fall</i>)	Desprendimiento de suelos. (<i>soil fall</i>)
Vuelco (<i>topple</i>)		Vuelco de roca. (<i>rock topple</i>)	Vuelco de derrubios. (<i>debris topple</i>)	Vuelco de suelos. (<i>soil topple</i>)
Deslizamiento (<i>slide</i>)		Deslizamiento de roca. (<i>rock slide</i>)	Deslizamiento de derrubios. (<i>debris slide</i>)	Coladas de barro o suelo. (<i>mudslides</i>)
Expansión lateral (<i>spreading</i>)		Expansiones laterales en rocas. (<i>rock spreading</i>)	Expansiones laterales en derrubios. (<i>debris spreading</i>)	Expansiones laterales en suelos. (<i>soil spreading</i>)
Flujos (<i>flow</i>)		Flujo de rocas. (<i>rock flow</i>)	Corrientes de derrubios. (<i>debris flow</i>)	Flujos de tierra, arena o suelo. (<i>soil flow</i>)
Complejo (<i>complex</i>)		Alud de rocas. (<i>rock avalanche</i>)	Flujo deslizante. (<i>flow slide</i>)	Rotación con flujo de tierras. (<i>slump-earthflow</i>)

Fuente: ALCÁNTARA, Irasema. *Landslides ¿deslizamientos o movimientos de ladera?* p. 10.

Dicha clasificación ha sido utilizada por diversos autores, entre los cuales cabe destacar a Wieczorek y Snyder (2009) quienes han tratado de crear un sistema de clasificación unificado para los deslizamientos. Este consiste en nombrar con una letra la época de la cual data la actividad más reciente, el material dominante y el mecanismo de movimiento dominante (ver tabla II).

Tabla II. **Sistema de clasificación unificado de deslizamientos**

Época de la actividad más reciente		Material dominante		Mecanismo de movimiento dominante	
Símb	Definición	Símb	Definición	Símb	Definición
A	Activo. (<i>active</i>)	R	Roca. (<i>rock</i>)	L	Desprendimiento. (<i>fall</i>)
R	Reactivado. (<i>reactivated</i>)	S	Suelo. (<i>soil</i>)	T	Vuelco. (<i>topple</i>)
S	Suspendido. (<i>suspended</i>)	E	Tierra, lodo (<i>earth</i>)	S	Deslizamiento. (<i>slide</i>)
H	Inactivo-histórico. (<i>dormant-historic</i>)	D	Debris, escombros. (<i>debris</i>)	P	Expansión lateral. (<i>spreading</i>)
Y	Inactivo-joven. (<i>dormant-young</i>)			F	Flujo. (<i>flow</i>)
M	Inactivo-maduro. (<i>dormant-mature</i>)				
O	Inactivo-antiguo. (<i>dormant-old</i>)				
T	Estabilizado. (<i>stabilized</i>)				
B	Abandonado. (<i>abandoned</i>)				
L	Ruinas, reliquia. (<i>relic</i>)				

Fuente: elaboración propia.

Por último, otra clasificación muy utilizada es la que está basada en la velocidad del movimiento. Tal clasificación fue propuesta por la Sociedad de Geomecánica Australiana (2002) y es utilizada para predecir daños y posibles problemas sociales.

Tabla III. **Clasificación de los procesos de remoción de masa según la velocidad de movimiento**

Clase	Descripción	Velocidad típica	Daños esperados y posibles reacciones de la población
1	Extremadamente rápido.	>5 m/s	Desastres de violencia mayor; edificios destruidos por impacto del material desplazado; muchas muertes; escapes improbables.
2	Muy rápido.	>3 m/s	Algunas vidas perdidas; la velocidad es muy alta para permitir que todas las personas escapen.
3	Rápido.	>1.8 m/h	Son posibles evacuaciones de escape; estructuras destruidas.
4	Moderado.	>13 m/mes	Algunas construcciones temporales y estables pueden ser temporalmente sostenidas.
5	Lento.	>1.6 m/año	Construcciones temporales pueden ser iniciadas durante el movimiento; estructuras estables pueden ser sostenidas con un mantenimiento frecuente si el movimiento no es demasiado durante la fase de aceleración de las partículas.
6	Muy lento.	>15 mm/año	Algunas estructuras permanentes no son dañadas por los movimientos.
7	Extremadamente lento.	<15 mm/año	Imperceptible con instrumentos; las construcciones pueden ser posibles con precaución.

Fuente: THIEBES, Benni. *Landslide analysis and early warning systems*. p. 8.

1.3.1. Desprendimientos o caídas

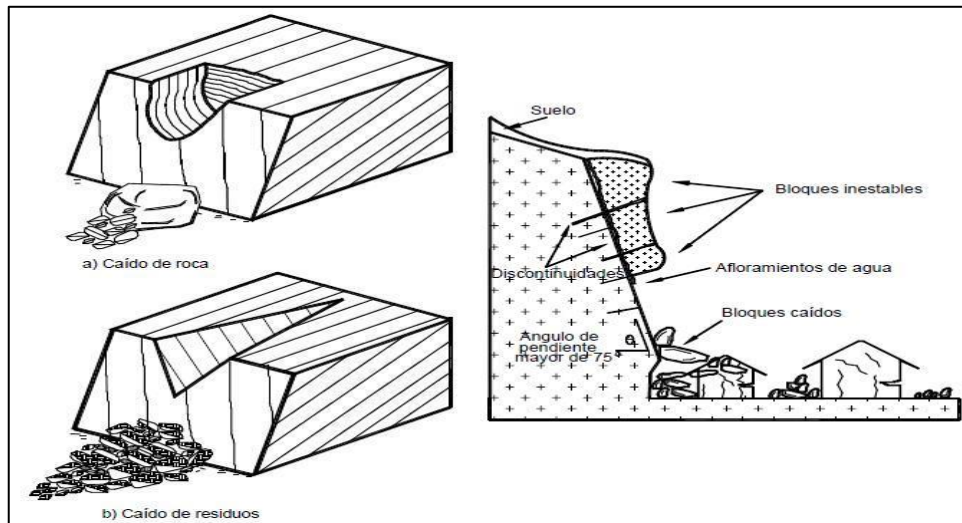
Los desprendimientos son movimientos en caída libre muy rápidos de bloques o masas rocosas independizadas por planos de discontinuidad preexistentes (tectónicos, superficies de estratificación, grietas de tracción, entre otros). Son frecuentes en laderas de zonas montañosas escarpadas, en acantilados y, en general, en paredes rocosas, siendo frecuentes las roturas de cuña y en bloques formados por varias familias de discontinuidades.

Los factores que los provocan son la erosión y pérdida de apoyo o descalce de los bloques previamente independizados o sueltos, el agua en las discontinuidades y grietas, las sacudidas sísmicas, entre otros. Este tipo de movimiento se origina por el desprendimiento del material de una superficie inclinada, el cual puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir en la dirección ladera abajo posteriormente. El material considerado no incluye las pequeñas partículas, resultado del intemperismo.

Aunque los bloques desprendidos pueden ser de poco volumen, al ser procesos repentinos suponen un riesgo importante en vías de comunicación y edificaciones en zonas de montaña y al pie de acantilados. Pueden darse también desprendimiento de masas de suelos en taludes verticales, generalmente a favor de grietas de tracción generadas a causa del estado tensional o de grietas de retracción por desecación del terreno.

La velocidad de estos movimientos puede ser rápida a extremadamente rápida, a excepción de cuando la masa desplazada sufre socavamiento o incisión, y el desprendimiento o caída es precedido por deslizamientos o vuelcos que separan el material desplazado de la masa intacta.

Figura 7. Ejemplo de desprendimientos



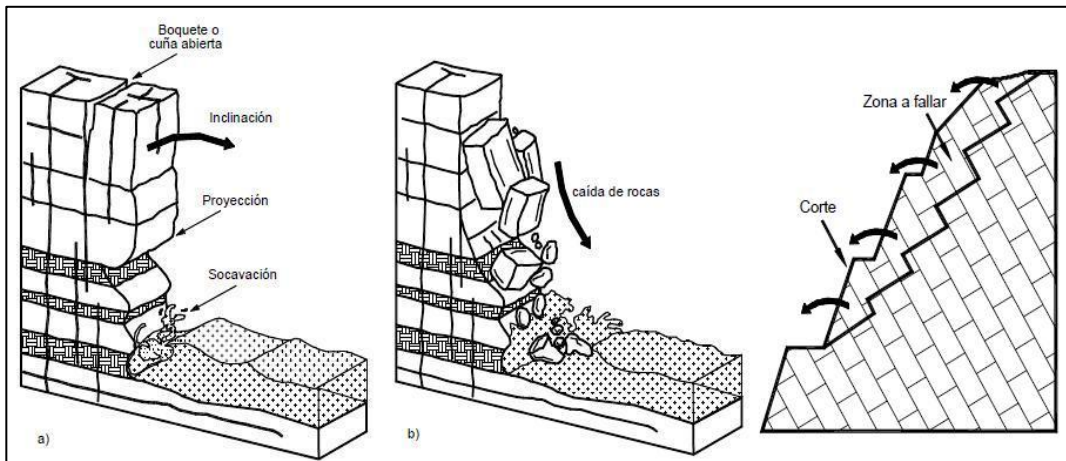
Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 8.

1.3.2. Vuelcos o desplomes

Un vuelco consiste en la rotación de una masa de suelo, detritos o roca en torno a un eje o pivote determinado por su centro de gravedad. Su movimiento es hacia adelante o hacia la parte externa, por lo cual involucra inclinación o basculamiento, pero no implica colapsamiento. Se producen cuando los estratos buzcan en sentido contrario a la ladera, por estar fracturados en bloques o por rotura de la zona de pie de la ladera.

Frecuentemente ocurren en una o más superficies, en materiales que poseen un sistema de discontinuidades preferencial como diaclasas, grietas de tensión, o frentes rocosos con estratos verticalizados (superficies columnares).

Figura 8. **Ejemplo de vuelcos**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 11.

1.3.3. **Deslizamientos**

Los deslizamientos son movimientos laterales que ocurren sobre una superficie reconocible de ruptura. Si las superficies de ruptura son curvas, se asocian a deslizamientos rotacionales; mientras que si las superficies de ruptura son planas, se clasifica como un deslizamiento traslacional. La velocidad y extensión de este tipo de movimientos es muy variable.

1.3.4. **Expansiones laterales**

Estos movimientos son el resultado de la fracturación y expansión de suelos o masa de roca compactas, debido a la licuefacción del material infrayacente o por procesos de extrusión lateral del material subyacente.

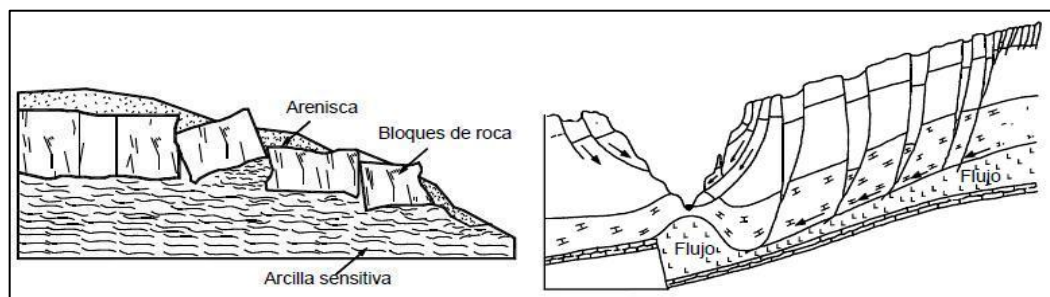
Ocurren cuando bloques o masas conformados de materiales gruesos, muy coherentes y cementados, tales como fragmentos de rocas o grava están

inmersos en una matriz de materiales más finos, blandos y deformables tales como las arcillas. El proceso continúa de forma que las capas superiores se fragmentan generándose grietas, desplazamientos diferenciales, vuelcos, entre otros; presentando las zonas afectadas un aspecto caótico, es decir que la superficie de cizallamiento no está bien definida. El movimiento puede ser desencadenado por movimientos rotacionales o por efectos sísmicos.

Dependiendo del origen de los movimientos, la masa involucrada puede desplazarse rápida o lentamente. Los movimientos que son debidos a la pérdida de resistencia del material subyacente deformados bajo el peso de bloques rígidos, se desplazan muy lentamente a favor de pendientes muy bajas. Mientras que movimientos provocados por licuefacción del material infrayacente, provocan que la masa involucrada se mueva rápida y retrogresivamente.

Este tipo de movimientos ocurre principalmente en laderas suaves, tales como ambientes lacustres y marinos de poca profundidad, los cuales se localizan en las márgenes de los antiguos casquetes de hielo en las costas de Noruega, Alaska y Canadá.

Figura 9. **Ejemplo de expansiones laterales**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 20.

1.3.5. Flujos

Los flujos o coladas son movimientos de masas de suelos (flujos de barro o tierra), derrubios (coladas de derrubios o *debris flow*) o bloques rocosos (coladas de fragmentos rocosos) con abundante presencia de agua, donde el material está disgregado y se comporta como un “fluido”, sufriendo una deformación continua, sin presentar superficies de rotura definidas. Los flujos suelen ser consecuencia de deslizamientos o ser inducidos por desprendimientos.

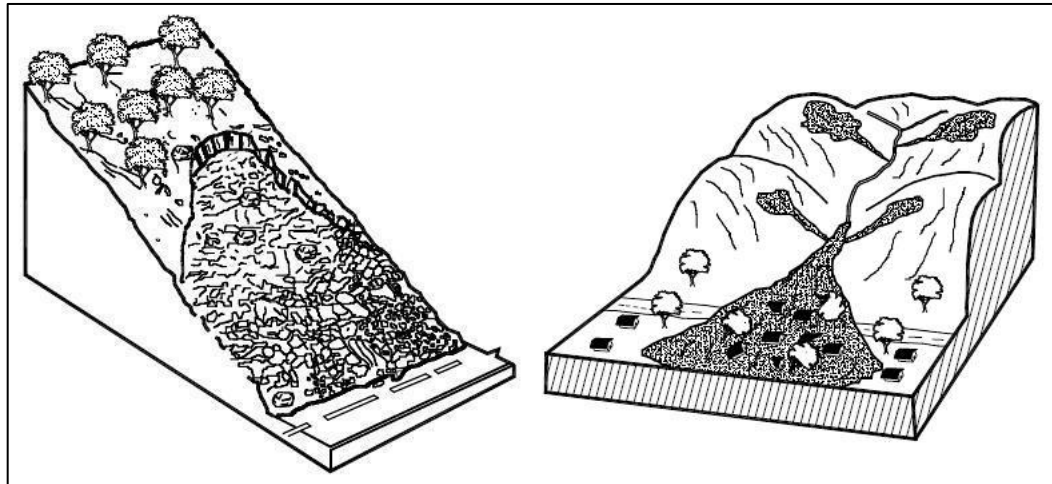
El agua es el principal agente detonante, por la pérdida de resistencia que se da en materiales poco cohesivos. Principalmente, afectan a suelos arcillosos susceptibles que sufren una considerable pérdida de resistencia al ser movilizados; estos movimientos, poco profundos en relación con su extensión, presentan una morfología tipo glaciar y pueden tener lugar en laderas de bajas pendientes, incluso menores de 10°.

Las coladas de barro o tierra se dan en materiales predominantemente finos y homogéneos, y su velocidad puede alcanzar varios metros por segundo; algunos factores detonantes suelen ser más susceptibles para ciertos materiales predominantes en la colada, por ejemplo los depósitos de materiales finos volcánicos son especialmente susceptibles a la pérdida de resistencia por saturación en agua, mientras que suelos tipo *loess* y arenas secas suelen tener flujos inducidos por movimientos sísmicos causantes de la ruptura de los débiles enlaces entre partículas.

Los flujos de derrubios son movimientos que engloban a fragmentos rocosos, bloques, cantos y gravas en una matriz fina de arenas, limos y arcillas. Tienen lugar en laderas cubiertas por material suelto o no consolidado como el

caso de los depósitos de morrenas glaciares, especialmente aquellos que no tienen cobertura vegetal. Por otro lado, algunos autores incluyen la solifluxión como un flujo producido por los procesos de hielo-deshielo que, por los cambios de temperatura diarios o estacionales, afecta el agua contenida en los suelos finos en regiones frías.

Figura 10. **Ejemplo de flujos**



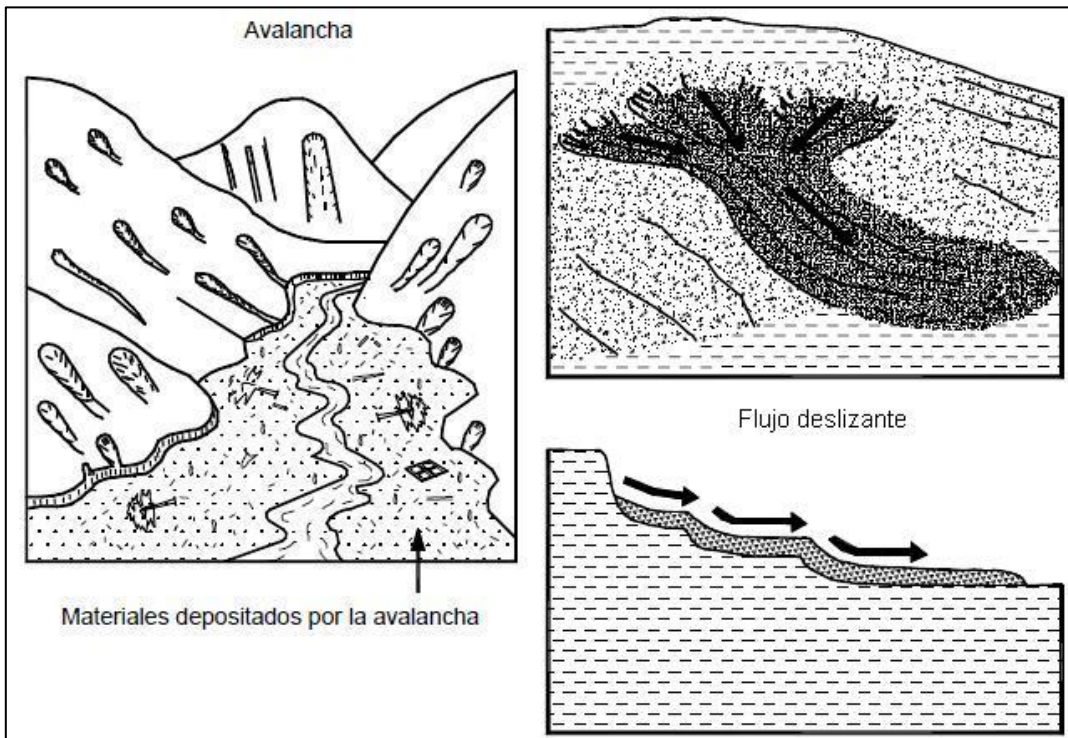
Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 24.

1.3.6. **Movimientos complejos**

Los movimientos complejos ocurren cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al ir desplazándose ladera abajo, entre los más importantes cabe destacar los aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes. Las avalanchas consisten en la movilización a gran distancia de grandes masas de rocas y detritos, los cuales viajan a gran velocidad. Los flujos deslizantes son el resultado del colapso repentino y de gran extensión de una

masa de material granular o de detritos que viajan a velocidades rápidas o extremadamente rápidas, como resultado de un efecto perturbador.

Figura 11. **Ejemplo de movimientos complejos**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 25.

1.3.7. Reptación

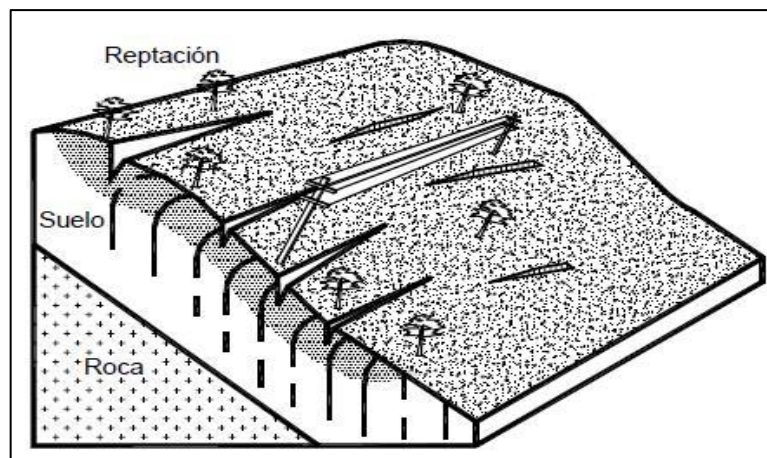
Aun cuando la mayoría de clasificaciones actuales no mencionan la reptación, es importante hacer la salvedad de que la reptación es un fenómeno que se aprecia en muchos lugares de Guatemala. Debido a algunas características de este movimiento, muchos autores han clasificado la reptación como un flujo, aun cuando este proceso posee particularidades específicas.

La reptación consiste en movimientos del suelo subsuperficial desde muy lentos a extremadamente lentos sin una superficie definida de falla. La profundidad del movimiento puede ser desde pocos centímetros hasta varios metros. Generalmente, el desplazamiento horizontal es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno.

La reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos traslacionales. Comúnmente ocurre en las laderas con pendiente baja a media. Se le atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en los suelos, usualmente arcillosos, muy blandos o alterados, con características expansivas.

Las evidencias de reptación consisten en la inclinación de postes y cercas y la inclinación o curvatura de los troncos de los árboles y arbustos. Como los movimientos son muy lentos, la mejor forma de analizar el proceso de reptación es mediante el monitoreo y el uso de inclinómetros.

Figura 12. **Ejemplo de reptación**



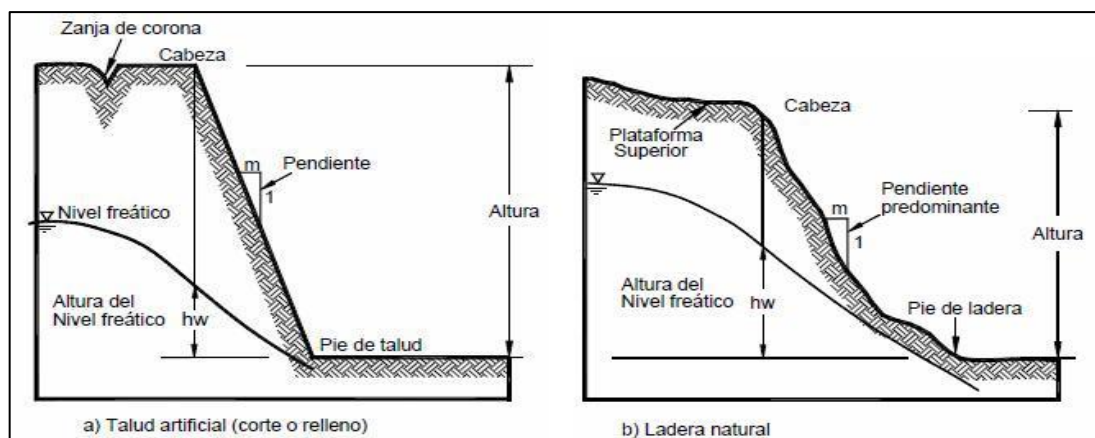
Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 13.

2. DESLIZAMIENTOS

Los deslizamientos corresponden a una clasificación de los movimientos de ladera. Como el nombre lo indica, los mismos se originan a partir de una ladera o talud, por lo que es importante definir antes dicho concepto.

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que presenta una pendiente o cambios significativos de altura. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (ver figura 13). Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas.

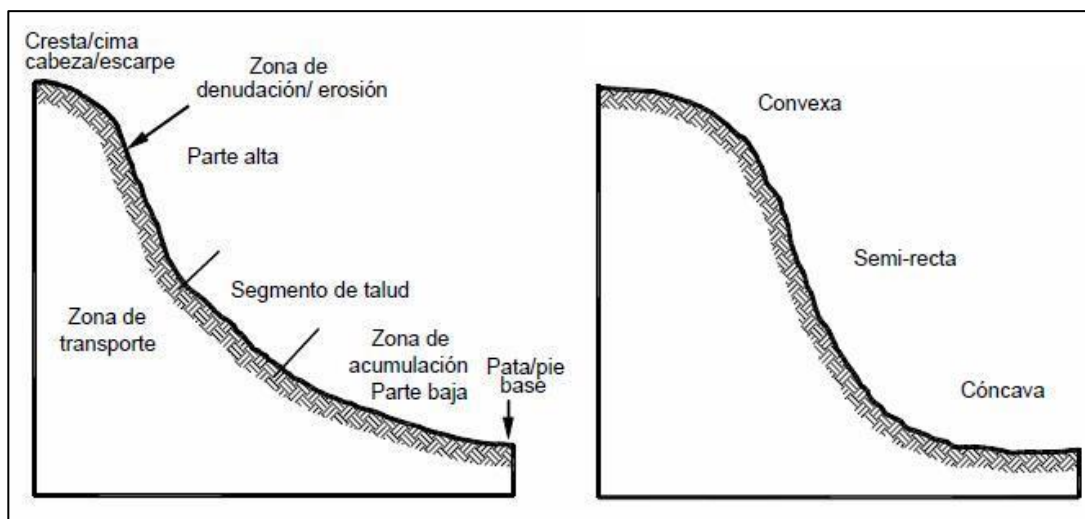
Figura 13. Nomenclatura de talud y ladera



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 3.

Existen algunos términos para definir las partes de un talud. El talud comprende una parte alta o superior convexa con una cabeza, cima, cresta o escarpe, donde se presentan procesos de denudación o erosión; una parte intermedia semirecta y una parte baja o inferior cóncava con un pie, pata o base, en la cual ocurren principalmente procesos de depositación (ver figura 14). En un talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos:

Figura 14. Partes generales de un talud o ladera



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 3.

- Pie, pata o base: corresponde al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud o ladera. La forma del pie de una ladera es generalmente cóncava.
- Cabeza, cresta, cima o escarpe: se refiere al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte superior del talud o ladera. Cuando la pendiente de este punto hacia abajo es semivertical o de alta pendiente, se le

denomina “escarpe”. Los escarpes pueden coincidir con coronas de deslizamientos. La forma de la cabeza generalmente es convexa.

- Altura: distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza generalmente no son accidentes topográficos bien marcados.
- Altura de nivel freático: distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua (la presión en el agua es igual a la presión atmosférica). La altura del nivel freático se acostumbra medirla debajo de la cabeza del talud.
- Pendiente: medida de la inclinación de la superficie del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación basada en la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical.

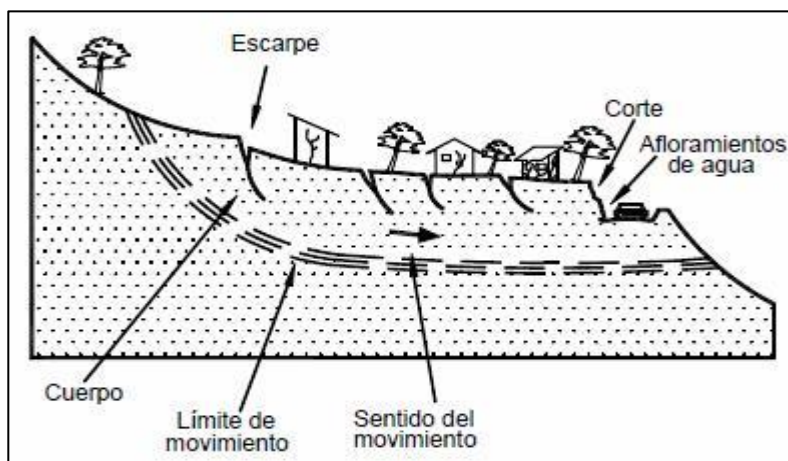
Los suelos o rocas más resistentes generalmente forman laderas de mayor pendiente y los materiales de baja resistencia o blandos, tienden a formar laderas de baja pendiente. También existen otros factores topográficos en los taludes, los cuales se requiere definir, tales como: longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de la cuenca de drenaje, los cuales pueden tener influencia sobre el comportamiento geotécnico del talud.

Es posible que fallen las laderas o taludes que han permanecido estables por muchos años debido a cambios topográficos, sísmicos, a los flujos de agua subterránea, a los cambios en la resistencia del suelo, la meteorización o a factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad causando a su vez un deslizamiento.

2.1. Concepto de deslizamiento

El deslizamiento de una masa consiste en una serie de desplazamientos debido a esfuerzos de cizalla a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente dentro de una zona relativamente delgada. Los deslizamientos en masa pueden ser de una sola masa coherente que se mueve, o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes.

Figura 15. Deslizamiento de suelos



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 14.

El movimiento puede ser progresivo, es decir, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla, sino que se va generando en un proceso gradual.

2.2. Clasificación de los deslizamientos

Los deslizamientos se pueden subdividir en tres subtipos denominados: deslizamientos rotacionales, deslizamientos traslacionales o planares y

deslizamientos compuestos de rotación y traslación. Esta diferenciación está basada en el comportamiento singular de cada uno, por lo que genera distintos tipos de estabilización en las laderas.

2.2.1. Deslizamientos rotacionales

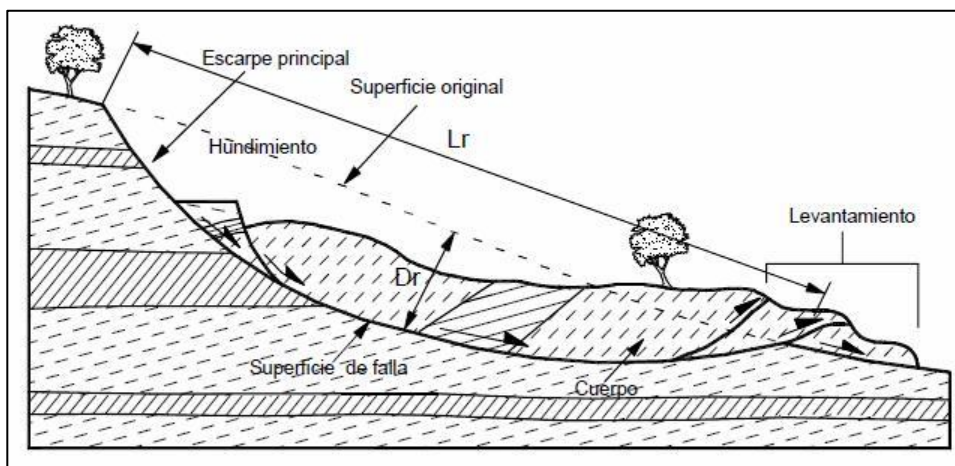
En un desplazamiento rotacional, la superficie de falla es cóncava hacia arriba y el movimiento es rotacional respecto del eje paralelo a la superficie y transversal al deslizamiento.

El centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento. Visto en planta, el deslizamiento de rotación posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, lo cual genera, comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento. La cabeza del movimiento se desnivela hacia atrás y los árboles se inclinan, de forma diferente, en la cabeza y en el pie del deslizamiento.

- Curvatura de la superficie de falla: los deslizamientos estrictamente rotacionales (círculos de falla) ocurren usualmente en suelos homogéneos, sean naturales o artificiales y debido a su facilidad de análisis son el tipo de deslizamiento más estudiado en la literatura. En las zonas tropicales cuando existe rotación, la superficie de falla generalmente es curva, pero no necesariamente circular, y está relacionada con la presencia de materiales residuales donde la resistencia al corte de los materiales aumenta con la profundidad. Sin embargo, en las zonas de meteorización muy profunda y en los rellenos de altura significativa, algunas superficies de falla se asemejan a

círculos. En la mayoría de los desplazamientos rotacionales se forma una superficie cóncava en forma de “cuchara” (ver figura 16). Los desplazamientos rotacionales generalmente tienen una relación D_r/L_r entre 0,15 y 0,33 (Skempton y Hutchinson, 1969).

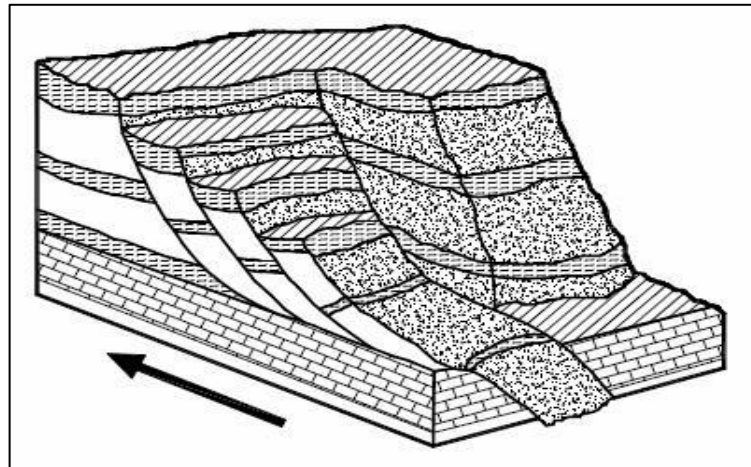
Figura 16. **Desplazamiento de rotación en una ladera**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 15.

- El desplazamiento aparentemente: es semivertical y tiene muy poca rotación. No obstante, se puede observar que la superficie original del terreno gira en la dirección de la corona del talud, aunque otros bloques giren en la dirección opuesta. La formación de los escarpes semiverticales en los deslizamientos de rotación facilita la ocurrencia de movimientos retrogresivos o progresivos hacia arriba. Dentro del deslizamiento ocurren otros desplazamientos curvos que forman escarpes secundarios y ocasionalmente, ocurren varios desplazamientos sucesivos en su origen, pero que conforman una zona de desplazamientos rotacionales independientes (ver figura 17).

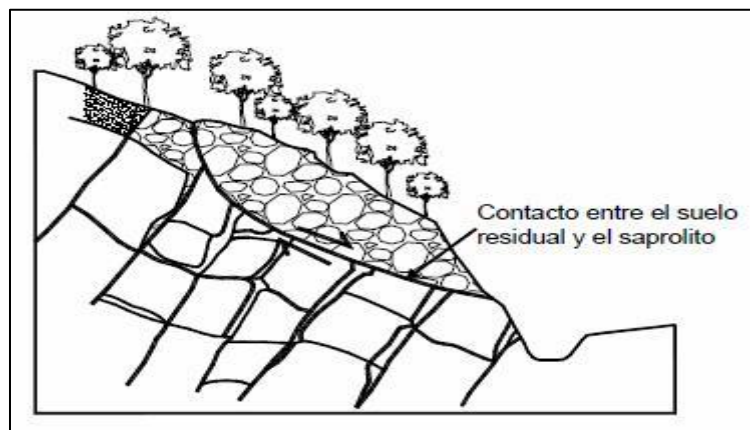
Figura 17. **Deslizamientos rotacionales sucesivos**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 15.

Los casos más conocidos de deslizamientos de rotación se presentan en suelos arcillosos blandos con perfil profundo y en suelos residuales con perfiles meteorizados de gran espesor (ver figura 18).

Figura 18. **Deslizamiento rotacional en suelos residuales**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 17.

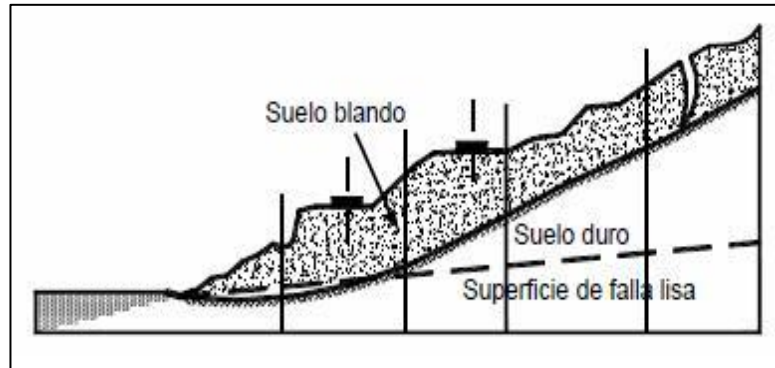
También se presentan con frecuencia en los terraplenes. Generalmente, la forma y localización de la superficie de falla está influenciada por las discontinuidades y juntas o planos de estratificación. El efecto de estas discontinuidades debe tenerse muy en cuenta en el momento que se haga el análisis de estabilidad. Las superficies de falla pueden ser tangentes o secantes a esas zonas de debilidad.

2.2.2. Deslizamientos traslacionales

En el deslizamiento traslacional, la masa se desliza hacia afuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo (ver figura 19). Los movimientos traslacionales generalmente, tienen una relación D_r/L_r de menos de 0,1. En muchos desplazamientos de traslación, la masa se deforma y/o se rompe y puede convertirse en flujo, especialmente en las zonas de pendiente fuerte.

- Influencia de la estructura sobre los deslizamientos de traslación: los movimientos de traslación son comúnmente controlados por superficies débiles tales como fallas, juntas, fracturas, planos de estratificación, foliación, o por el contacto entre la roca y los suelos blandos o coluviones. A los movimientos sobre discontinuidades sencillas en roca, se les denominan deslizamientos de bloque, los cuales conforman unidades coherentes o grupos de unidades coherentes. Cuando ocurren a lo largo de dos discontinuidades, se les conocen como deslizamientos de cuña y cuando se presentan sobre varios niveles de una familia de discontinuidades, se les puede denominar falla en escalera.

Figura 19. **Deslizamiento de traslación**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 18.

- Deslizamientos de traslación en suelos residuales: en los suelos residuales las diferencias en la meteorización profundas propician la presencia de los deslizamientos de traslación. Las superficies de falla generalmente coinciden con las zonas de cambio a la resistencia al cortante por efecto de la meteorización. Por ejemplo, en los suelos residuales de rocas ígneas y metamórficas con perfiles de meteorización profundos, son comunes los deslizamientos profundos sobre superficies de falla semi-planas. Los deslizamientos de traslación en suelos residuales, generalmente son rápidos y pueden terminar en flujos.

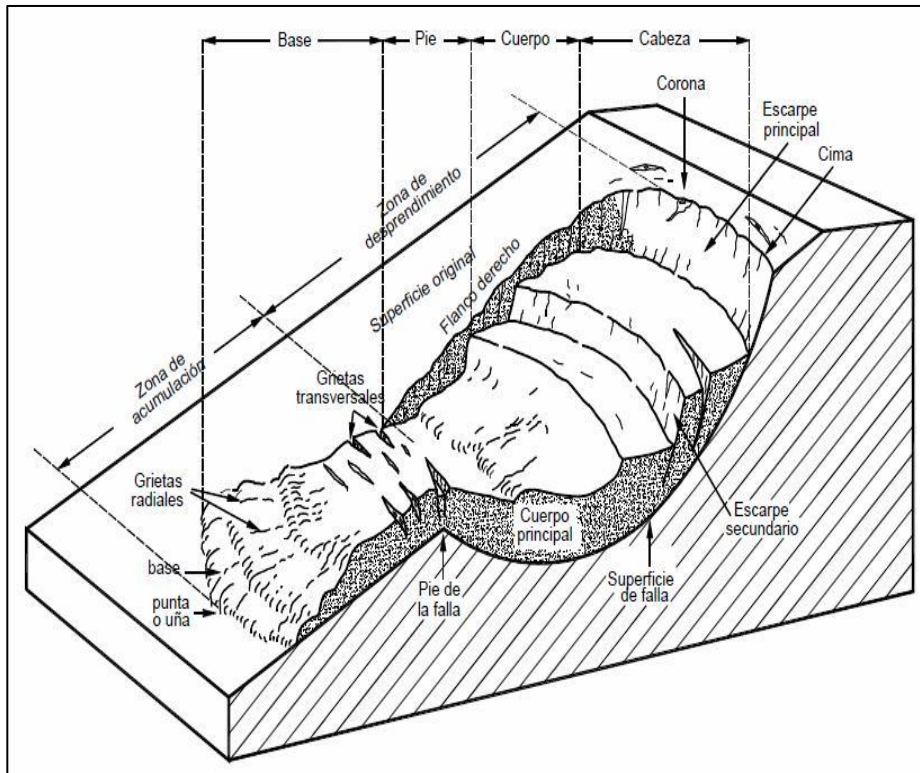
2.3. Partes principales de un deslizamiento

En la figura 20 se muestra un deslizamiento típico o desplazamiento en masa. Las partes principales son las siguientes:

2.3.1. Zona de desprendimiento

Área dentro de la cual, el material desplazado se encuentra por debajo de la superficie original del terreno. Está formada por las siguientes partes secundarias:

Figura 20. Nomenclatura de las partes del deslizamiento



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 4.

- **Cuerpo principal del deslizamiento:** es el material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla. Se pueden presentar varios cuerpos de masa en movimiento.

- Superficie original del terreno: talud existente antes de ocurrir el movimiento. Puede considerarse como tal la superficie de un antiguo deslizamiento estabilizado.
- Costado o flanco: un lado (perfil lateral) del movimiento. Se debe diferenciar entre el flanco derecho y el izquierdo. Para describir un deslizamiento se recomienda utilizar la orientación geográfica (norte, sur, este, oeste); pero si se emplean las palabras derecha e izquierda, deben referirse al deslizamiento observado desde la corona hacia el pie.

2.3.2. Zona de acumulación

Área en la que el material desplazado se dispone por encima de la superficie original del terreno. Está formada por las siguientes partes secundarias:

- Pie de la superficie de falla: la línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- Base: porción de material desplazado, que se apoya sobre el terreno original a partir del pie de la superficie de falla.
- Punta o uña: el punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima. Además es el límite del material desplazado más alejado del escarpe principal.

2.3.3. Corona

Lugar geométrico de los puntos más altos del contacto, adyacente a la parte superior del escarpe principal. El material que se encuentra en el sitio está prácticamente inalterado. Está formada por las siguientes partes secundarias:

- Cabeza: parte superior de la masa de material que se mueve. La cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud. Se encuentra inmediatamente debajo de la cima.
- Cima: el punto más alto de la cabeza; es el contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.

2.3.4. Escarpes

- Escarpe principal: superficie que se forma sobre el terreno no deslizado en la periferia del deslizamiento. Se desarrolla a causa del movimiento del material deslizado hacia abajo y adentro respecto del material intacto. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material conforma la superficie de la falla.
- Escarpe secundario: superficie escarpada que se forma dentro del material desplazado debido a movimientos diferenciales del mismo. En un deslizamiento pueden formarse varios escarpes secundarios.

2.3.5. Superficie de falla

Es el área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado. El suelo por debajo de la superficie de la falla no se

mueve, mientras que el que se encuentra por encima de esta, se desplaza. En algunos movimientos no existe superficie de falla. Al finalizar la zona de movimiento, se encuentra la superficie de separación, la cual limita el material desplazado del terreno original.

3. CAUSAS DE DESLIZAMIENTO

Una ladera está sometida a diversos factores que controlan la susceptibilidad de movimiento de la misma a lo largo de su existencia. Es importante entender dichos factores debido a dos razones: la primera es anticipar los cambios que pudiesen surgir a través del tiempo en las propiedades de los materiales que la conforman, así como las condiciones externas a las cuales estará sujeta la ladera. La segunda razón es el entendimiento de los elementos esenciales que conducen a la falla del talud para evitar la repetición de los mismos, y así impedir la recreación de la condición que originó el movimiento.

La necesidad de comprender tales factores ha dado lugar a diversas categorizaciones de los mismos, de las cuales la más conocida hasta la fecha es la clasificación realizada por Terzaghi (1996), quien listó las causas del origen del movimiento en: externas, denominadas como causas detonantes; e internas, denominadas como causas condicionales. Dichas causas modifican los esfuerzos cortantes que son producidos internamente en las laderas, tanto resistentes como actuantes.

Es importante hacer notar que la iniciación del movimiento es ocasionado por una serie de circunstancias necesarias para el desarrollo del mismo, en las cuales se ven involucrados tanto causas detonantes como condicionales. Por lo tanto, al estudiar el desarrollo de falla en una ladera se deben considerar factores causales, es decir la combinación de diversas causas y no únicamente la acción independiente de las mismas.

En la mayoría de los casos son varias las causas que contribuyen al movimiento de una ladera; aunque con frecuencia se atribuyen a la acción de algún factor desencadenante, las inestabilidades no se hubieran producido de no existir una serie de condiciones predeterminadas que favorezcan al fenómeno.

3.1. Factores condicionales

Los factores condicionales, llamados también factores pasivos o internos, son aquellos que impactan directamente en el incremento o decremento de la resistencia al corte provisto por la ladera, tales factores dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno. Estos, a su vez, determinan la predisposición de una ladera a ser inestable, ya sea por las condiciones originales que presenten, o bien por los factores que modifiquen lentamente las condiciones iniciales.

Dentro de los factores condicionantes se encuentran el relieve y las propiedades físicas y resistentes de los materiales (directamente relacionadas con la litología), así también los diferentes estratos y las discontinuidades que se pudiesen presentar en los perfiles estratigráficos. De la misma manera, las características geomorfológicas, estructuras geológicas y las condiciones hidrogeológicas de la ladera son fundamentales para la predisposición a la inestabilidad.

3.1.1. Causas geológicas

A lo largo de extensos períodos las laderas se han ajustado a una serie de fuerzas que actúan constantemente sobre ellas, desarrollando de esta manera un delicado equilibrio estático entre las fuerzas gravitacionales que tienden a

atraer el material suelto y las varias fuerzas internas resistentes que proveen el esfuerzo cortante. Las laderas en dicho estado, son altamente sensibles a los factores modificadores que cambian la relación fuerza/esfuerzo desarrollada a través del tiempo geológico.

Por lo tanto, las causas geológicas comprenden todas aquellas condiciones originales que se presentan en la ladera, desde el relieve hasta los materiales que la conforman en cada uno de sus estratos. La granulometría y la mineralogía (en los cuales gobierna la cohesión), el ángulo de fricción interna, el contenido de agua en el material suelto y la presión de agua dentro de los poros son factores que también determinan la estabilidad. Tales factores interventores son participativos entre sí, y la importancia o efectividad de controlar el tipo y grado de inestabilidad de la ladera depende de la geología local.

Tales condiciones pueden ser mapeadas sobre la superficie del deslizamiento y del suelo a entorno, además se pueden explorar las condiciones subsuperficiales a través de perforaciones y exploraciones a cielo abierto. Las propiedades mecánicas pueden ser determinadas por medio de ensayos. A continuación una breve descripción de los factores mencionados anteriormente:

- El relieve o topografía del terreno es un parámetro que juega un papel muy definitivo en el tema de los deslizamientos, ya que es necesaria cierta pendiente para que se produzcan los movimientos gravitacionales, Las regiones montañosas que presentan depresiones lineales muy pronunciadas son los puntos de origen más propensos a los movimientos de laderas. No obstante, dependiendo de otros factores, es suficiente una pendiente de unos pocos grados para que se produzcan inestabilidades.

- La estabilidad en materiales no cohesivos depende primordialmente del ángulo de fricción interna del material que conforma la ladera, siendo más propensos los suelos con pendientes mayores o iguales al ángulo de fricción interna; mientras que en los suelos cohesivos, la estabilidad es controlada en su mayoría por la mineralogía de la arcilla y el contenido de humedad del mismo, en tales suelos un escaso incremento del contenido de agua dentro de los poros produce una deformación acelerada.
- Los macizos de rocas sedimentarias (como las lutitas y areniscas) desarrollan un alto grado a la cohesión y movilidad debido a rápida intemperización; tales materiales son susceptibles a movimientos casi imperceptibles debido a sus bajas velocidades aun en pendientes muy bajas. Los macizos de rocas intrusivas (como granitos y dioritas) y metamórficas (como esquisto y mármol) suelen poseer baja cohesión y son propensos a desarrollar movimientos repentinos a altas velocidades en pendientes muy altas.
- La cubierta vegetal de los taludes influye en la cantidad e intensidad de las lluvias al llegar a la superficie. Los sistemas de raíces de los árboles u otra vegetación puede aumentar la resistencia al corte de la ladera, siendo estos más representativos en estratos superficiales que en estratos profundos. En algunas zonas con pendientes muy altas, el anclaje de las raíces puede llegar a ser el factor dominante en el mantenimiento del equilibrio de la ladera.

3.1.2. Causas geomorfológicas

Las laderas están sujetas a procesos de intemperización a lo largo de toda su existencia, los cuales contribuyen a desgastar de manera parsimoniosa la morfología de la superficie. El resultado de tales procesos es una disminución en la resistencia al cortante del material, haciendo que se originen situaciones en las cuales sean más susceptibles las laderas al arranque de un movimiento, aunque originalmente las mismas no estuviesen catalogadas como inestables.

3.1.2.1. Erosión por escorrentía o flujo subterráneo

La erosión es el desprendimiento, transporte y deposición de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua. El flujo puede concentrarse en canales debido a la topografía del terreno, produciendo o profundizando de esta manera surcos y cárcavas. Los procesos de erosión son muy comunes en suelos residuales poco cementados o en suelos aluviales (formados a través de deposición), especialmente los compuestos por limos y arenas finas, en su mayoría en laderas donde la cobertura vegetal ha sido removida.

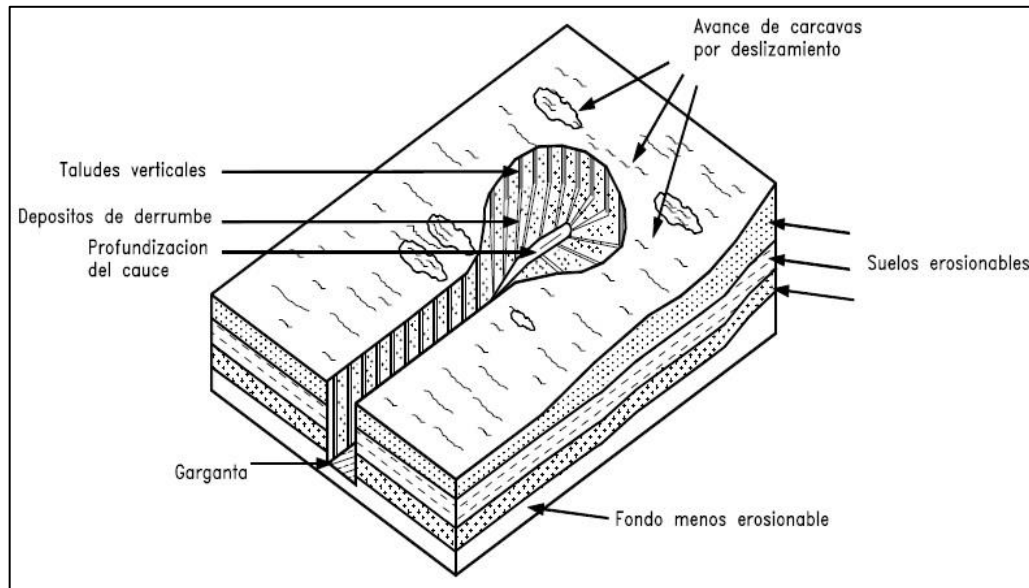
Los procesos geomorfológicos pueden ser documentados por mapas preexistentes, fotografías aéreas, mapeos de deslizamientos, o por las cuidadosas observaciones de la población local.

La erosión es causada en el suelo durante casi todos los procesos del ciclo hidrológico, tales como la precipitación, escorrentía y el flujo de agua subsuperficial; dicho proceso se vuelve aún más crítico cuando son lluvias intensas de larga duración. Esta diversidad da lugar a una clasificación de

erosión: la causada por agua superficial y la producida por el agua subsuperficial.

- Erosión debida a agua superficial, causada por la precipitación y flujo superficial del agua (escorrentía). En esta división se encuentra el proceso de erosión laminar, la erosión en surcos, la erosión en cárcavas y la erosión interna (ver figura 21).
 - La erosión laminar es iniciada por el impacto de las gotas de agua de lluvia contra la superficie del suelo, complementada por la fuerza de la escorrentía, produciendo un lavado de la superficie del terreno como un todo, sin formar canales definidos.
 - Los surcos de erosión se forman en la concentración del flujo de agua en caminos preferenciales, determinados por la topografía del terreno, arrastrando las partículas y dejando canales de poca profundidad generalmente paralelos.
 - Las cárcavas constituyen el estado más avanzado de erosión, se forman cuando un surco se profundiza o amplía creando canales en forma de “V” o “U”. Las cárcavas facilitan el avance lateral y frontal por medio de desprendimientos de masas de material en los taludes de pendiente alta que conforman el perímetro de la cárcava.
 - La erosión interna es producida por el flujar del agua dentro de los ductos concentrados dentro del suelo, la cual da origen a derrumbamientos o colapsos que pueden generar un hundimiento del terreno o la formación de una cárcava.

Figura 21. **Esquema general de erosión debida al agua superficial**



Fuente: *Geotécnica de Taludes*, <http://es.scribd.com/doc/37403400/Geotecnica-de-Taludes#scribd>. Consulta: 17 de enero de 2013.

- La erosión por corrientes subsuperficiales forman parte del comportamiento hidrogeológico de los materiales, el cual está asociado a sus características litológicas y estructurales y al grado de alteración y meteorización, aspectos en íntima relación con las condiciones climáticas de una zona determinada. Los factores que están íntimamente relacionados con tal erosión son los siguientes:
 - La recarga del agua subsuperficial es el resultado de la entrada del líquido a través de materiales fracturados. En regiones lluviosas es frecuente la presencia de importantes espesores de materiales alterados y meteorizados sobre sustratos rocosos, y de niveles freáticos elevados que influyen decisivamente en las condiciones de estabilidad. Un caso de erosión específica puede

ocurrir en los sitios de afloramiento de agua, formando pequeñas cavernas y taludes negativos, los cuales a su vez pueden producir desprendimientos de masas de suelo.

- La relación de descarga del agua es probablemente el factor con mayor más significativo en los aspectos hidrológicos. Si la relación entre el factor de flujo subsuperficial es menor que el factor de infiltración por períodos extensos, el peso del flujo acumulado sobre estratos impermeables puede dar lugar a una configuración de la superficie subterránea y causar planos de falla sobre la cual ocurren movimientos de masa. Tales fallas ocurren después de lluvias extensas o períodos de desglaciación.

3.1.2.2. Remoción de vegetación

La vegetación local en una ladera influye en la cantidad e intensidad con la cual la lluvia llega a la superficie, en la cantidad de agua almacenada en los estratos débiles y en el esfuerzo resistente a lo largo de la superficie de falla.

- El efecto directo de la intercepción del agua precipitada sobre los estratos débiles probablemente no es muy grande, especialmente en áreas donde el clima presenta lluvias prolongadas y continuas. Sin embargo, durante pequeñas tormentas la intercepción se vuelve muy efectiva, teniendo una influencia directa en la cantidad de agua que pudiese infiltrarse.
- El efecto de la evapotranspiración en áreas de baja precipitación (menor a 750 mm) es bastante significativa, aunque tal factor depende particularmente de la región y las lluvias. La evapotranspiración reduce

significativamente el grado de saturación resultante de las primeras tormentas. De la misma manera, este efecto disminuye con el paso de las lluvias, ya que la deficiencia de agua en el suelo es satisfecha.

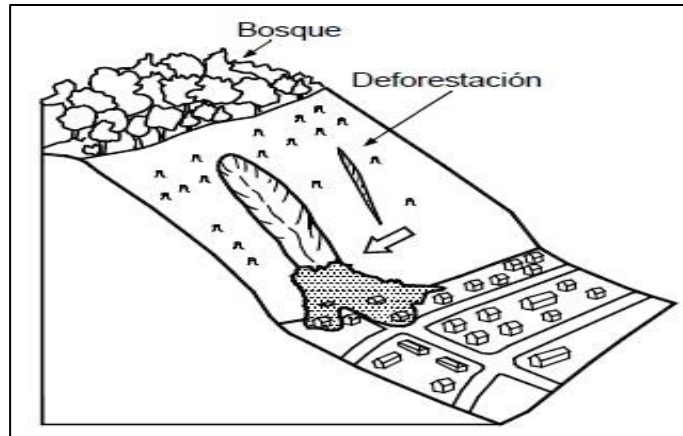
- El efecto más importante es provisto por el sistema de raíces de la vegetación sobre la ladera. El anclaje de las raíces aumenta la resistencia al cortante provisto por el suelo, abriéndose paso entre fracturas en las capas rocosas, confinando de esta manera las zonas de inestabilidad. En estratos más profundos, el efecto de anclaje de las raíces deja de ser importante dando paso a los parámetros dominantes de los factores mecánicos del suelo.

Por lo tanto, se puede observar que en lugares cálidos y secos, la evapotranspiración puede llegar a ser un factor previsor, así como también en pendientes muy pronunciadas donde el anclaje de las raíces puede llegar a ser determinante para mantener la estabilidad de la ladera. Por lo tanto, en tales áreas la remoción de la vegetación local es crítica para evitar el inicio de un movimiento de masa (ver figura 22).

3.1.2.3. Otras causas

Dentro de las causas significativas que se pueden mencionar a grandes rasgos está el levantamiento de ciertas áreas geográficas debido al desplazamiento de las placas tectónicas, o bien a surgimiento de actividad volcánica dentro del área, tales movimientos pueden provocar que en las zonas más alejadas del punto de empuje se originen deslizamientos.

Figura 22. **Deslizamientos relacionados con alteraciones a la vegetación**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 323.

Otro factor relevante es la descomposición por desecación de los estratos inferiores que contengan estratos que posean un alto contenido de arcilla. Este proceso está dado por un cambio de humedad que genera procesos de agrietamiento, tales grietas determinan la extensión y ubicación de la superficie de falla y tienen un efecto muy importante en la posibilidad de un deslizamiento.

Un proceso similar se da en las regiones kársticas, donde se inducen interacciones químicas entre el agua y la masa del suelo. El agua subterránea, en su paso a través del suelo no-saturado, disuelve gran cantidad de gases. Este proceso aumenta su acidez y químicamente la hace más agresiva. El agua acidizada puede disolver rocas solubles como caliza, dolomita, yeso, halita y sylvita, componentes importantes de la zona kársticas. El proceso de disolución puede conducir a la formación de cavernas, fisuras kársticas y cavidades, que a su vez inducen a hundimientos superficiales.

3.2. Factores detonantes

Los factores detonantes, llamados también desencadenantes o activos, pueden ser considerados como causas externas que provocan o desencadenan las inestabilidades y son responsables, por lo general, de la magnitud y velocidad de los movimientos. Estos factores alteran el equilibrio de las fuerzas a las que está sometida la ladera, incrementando repentinamente los esfuerzos cortantes cerca de la superficie de falla del talud.

Los factores detonantes se clasifican en dos partes, según la fuente que los originó; pueden ser causas naturales ocasionadas por eventos o desastres propios de la naturaleza, tales como lluvias intensas y terremotos, o bien causas antrópicas si son debido a procesos en los cuales ha intervenido el ser humano.

3.2.1. Causas naturales

Las causas naturales o procesos geofísicos propiamente dichos, son eventos que no se pueden evitar ni predecir la fecha de ocurrencia con exactitud. Sin embargo, tales se pueden estudiar y ser documentados a través de pluviógrafos, sismógrafos o piezómetros para analizar posibles cambios en la estructura de la ladera.

Observaciones cuidadosas locales a través de cambios en pozos y fisuras en columnas estratigráficas pueden llegar a ser sustitutos aceptables, indicando el cambio a través del tiempo de las propiedades mecánicas de los estratos que conforman la ladera.

3.2.1.1. Avenidas y períodos cortos e intensos de lluvia

El desencadenamiento de los movimientos de ladera por causas meteorológicas y climáticas está relacionado fundamentalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones y con el régimen climático. En consecuencia, debe considerarse la respuesta del terreno a precipitaciones intensas durante horas, las cuales pueden provocar avenidas en los ríos, y la respuesta estacional (épocas secas y lluviosas a lo largo del año) o plurianual (ciclos húmedos y de sequía). Dicho factor es tan importante que diez de los veinticinco deslizamientos catastróficos registrados en el siglo XX fueron accionados debido a lluvias intensas.

Las avenidas magnifican el efecto desestabilizador de las laderas, provocando a su vez deslizamientos y flujos de barro o derrubios, que afectan a materiales a suelos, y desprendimiento de bloques rocosos previamente independizados del macizo, siendo frecuentes también las reactivaciones de antiguos movimientos. Se han establecido límites de intensidad y duración de lluvia para el origen de movimientos de laderas, los cuales son presentados en la tabla IV y V como indicador del efecto del agua en diferentes zonas.

Los períodos de lluvia prolongados (semanas o meses), suelen dar lugar a un incremento importante de los fenómenos de inestabilidad en zonas susceptibles. En la tabla VI se presentan valores de precipitación establecidos con base en el análisis de varios casos específicos para varios tipos de movimiento de ladera. Tales activaciones dependen primordialmente de las características climáticas y meteorológicas de la región, así como de la orografía local.

Tabla IV. **Umbral de precipitación para desencadenamiento de nuevos movimientos de ladera**

Tipo de movimiento y país		Intensidad horaria	Intensidad diaria	Precipitación acumulada
Movimientos de nueva generación				
Flujos de barro y tierra	Hong Kong	>40 mm	>50 mm >100 mm	>50 mm (15 días)
	Japón		>125 mm	>182 mm (2 días)
	Italia		86 mm	260 mm (15 días) 325 mm (30 días)
	Brasil	60 mm	>125 mm	>0.4 P _{anual} (precipitación anual) >675 mm (3 días)
Flujos de derrubios	Estados Unidos			>250 mm (3 días)
	España	213 mm		52 mm durante el evento
Otros tipos de movimiento	Japón	20 mm		10-150 mm durante el evento
	Estados Unidos			>180 mm durante el evento
	Italia			290-400 mm (15 días) 360-450 mm (30 días)
	Francia			>300 mm (60 días)
	España		205 mm	>500 mm (3 días) 476 mm (2 días)
	España	>60 mm	>150 mm >180 mm	>300 mm (clima atlántico)

Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis. *Ingeniería geológica*. p. 634.

Uno de los principales efectos del agua en la superficie del suelo es el incremento de su densidad debido al incremento del contenido del agua en

este, y por ende el aumento de los esfuerzos cortantes ejercidos por el material. Además, el agua infiltrada en las grietas formadas en el talud, sirve de lubricante para desplazar las superficies entre sí. Dicha agua también influye en los materiales adyacentes a los planos de falla, magnificando el efecto de disminución de las propiedades mecánicas de los estratos, pudiendo cambiar de estado sólido a plástico, y algunas veces hasta líquido.

Tabla V. **Umbral de precipitación para desencadenamiento de movimientos de ladera en la reactivación o aceleración de movimientos**

Tipo de movimiento y país		Precipitación acumulada
Reactivación o aceleración de movimientos		
Diversos tipos de movimientos	Italia	>520 mm (60 días) Pequeños deslizamientos.
	Francia	>900 mm (100 días) Grandes deslizamientos.
	España	>250 mm (90 días)
	España	320 mm (15 días)

Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis. *Ingeniería geológica*. p. 634.

Por otra parte está el aumento de la presión de poros en las zonas de saturación, el cual se refleja en un decremento de la resistencia al cortante provisto por el material, ya que la presión efectiva disminuye debido al aumento de agua dentro de cada poro. Por tal razón, la presión de los poros es nula sobre la superficie y máxima en el interior del talud.

Tabla VI. **Relación entre precipitaciones y desencadenamiento de movimientos de ladera**

Tipo de movimiento	Precipitación anual (mm)		Precipitación en los 3-4 meses previos (mm)		
	Total en el año previo	Media anual de la serie	Total en los meses previos	%P total del año previo	%P media anual de la serie
Deslizamiento	500 a 1000	500 a 800	300 a 500	50–60 %	≤30 %
Flujos de tierra	500 a 800	600 a 700	300 a 450	50–80 %	50–60 %
Flujos de derrubios	≥1300	1100 a 1200	350 a 650	30–50 %	50–120 %
Caídas	250 a 700	220 a 450	100 a 250	≤30 %	50–130 %

Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis. *Ingeniería geológica*. p. 634.

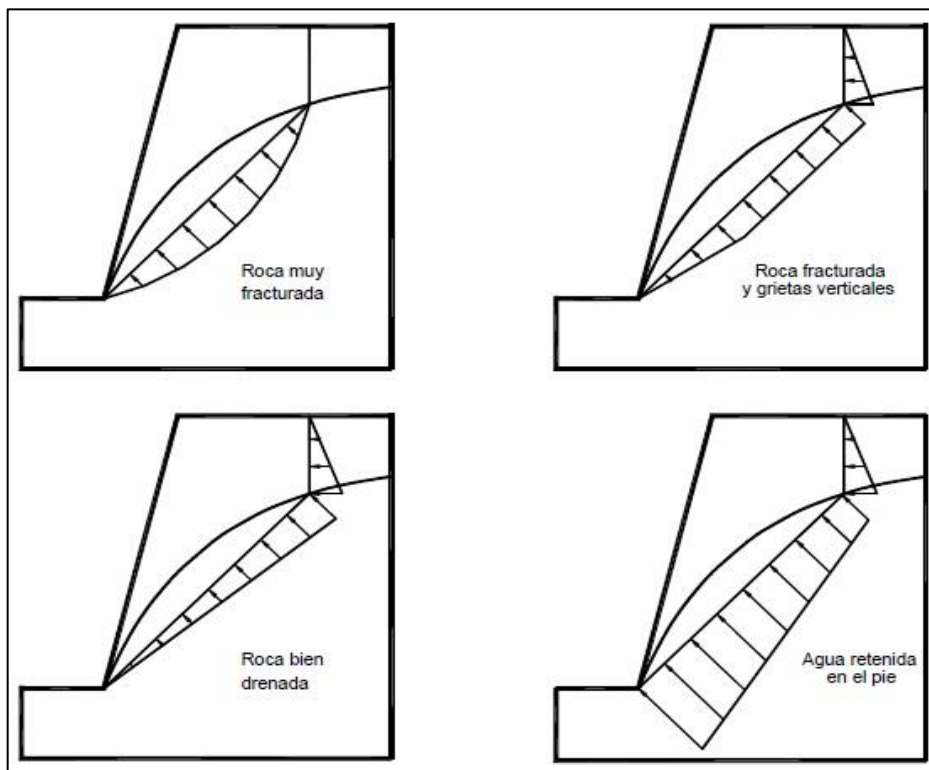
Es posible medir el valor de las presiones de poros utilizando piezómetros. Si no hay flujo de agua, la presión es hidrostática y la medida del piezómetro coincide con el nivel freático; pero si existe flujo, las presiones no son hidrostáticas. Para el análisis de presiones de poros sobre una superficie de falla, se deben tener en cuenta las condiciones de drenaje que presenta el talud. Cuando el drenaje es eficiente, se cumple la condición de flujos mínimos sobre la superficie; pero si el drenaje es deficiente, o bien existe material impermeable, se puede presentar un aumento importante de la presión de los poros al pie del talud (ver figura 23).

3.2.1.2. Erupciones volcánicas

El vulcanismo local puede provocar deslizamientos o avalanchas rocosas y de derrubios de gran magnitud y velocidad en las laderas de los conos de los volcanes. Dependiendo de las características geotécnicas, de la pendiente y del

contenido de agua en los materiales, estos pueden fluir alcanzando grandes distancias. Previo a la erupción de los volcanes, se producen generalmente sismos frecuentes de pequeña magnitud relacionados con el ascenso de masas de magma debajo del volcán. Los deslizamientos pueden estar relacionados físicamente con la erupción y coinciden con grandes explosiones en la cima del volcán.

Figura 23. **Presiones de poros sobre una superficie de falla potencial para diferentes condiciones de drenaje**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 211.

En las primeras etapas de la erupción, las cenizas y los piroclastos son depositados sobre las laderas y constituyen depósitos o nuevos domos

proclives a los procesos de deslizamiento y flujo ante la ocurrencia de lluvias que saturan estos materiales. El depósito de materiales aumenta las pendientes de los taludes y los deslizamientos pueden continuar por varios meses después de la erupción. En ocasiones, la altura del domo disminuye debido a los deslizamientos y se produce el movimiento de grandes volúmenes de residuos que cubre varios kilómetros cuadrados del área.

El problema más grande de los deslizamientos ocurre en las zonas altas con nieve. El deshielo, como consecuencia de la actividad volcánica, puede fusionarse a altas temperatura con el material expulsado, entre estos se encuentran los flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas (*surges*), flujos de lava o caída de piroclastos.

La erupción sobre los glaciares puede generar flujos de lodo, los cuales pueden aumentar de tamaño y características a medida que avanzan ladera abajo, llevando consigo nieve, hielo, agua, lodo y rocas que encuentran a su paso. Las paredes de los valles son socavadas y los materiales aluviales de los ríos y cañadas pueden ser incorporados al flujo.

3.2.1.3. Sismos

Los sismos son fenómenos naturales causados por movimientos en las fallas geológicas en la corteza terrestre; durante su duración someten a los taludes a aceleraciones tanto horizontales como verticales, los cuales son el resultado de variaciones cíclicas del propio movimiento.

Los movimientos sísmicos pueden provocar movimientos de todo tipo en las laderas, dependiendo de las características de los materiales, de la magnitud y de la intensidad del mismo. Desprendimientos de bloques,

deslizamientos, flujos y avalanchas de rocas pueden ocurrir durante las sacudidas sísmicas. Antiguos deslizamientos en condiciones cercanas al equilibrio límite pueden ser reactivados por las fuerzas sísmicas. Además pueden producirse procesos de licuefacción, afectando también a deslizamientos antiguos con materiales sueltos, saturados y sin cohesión.

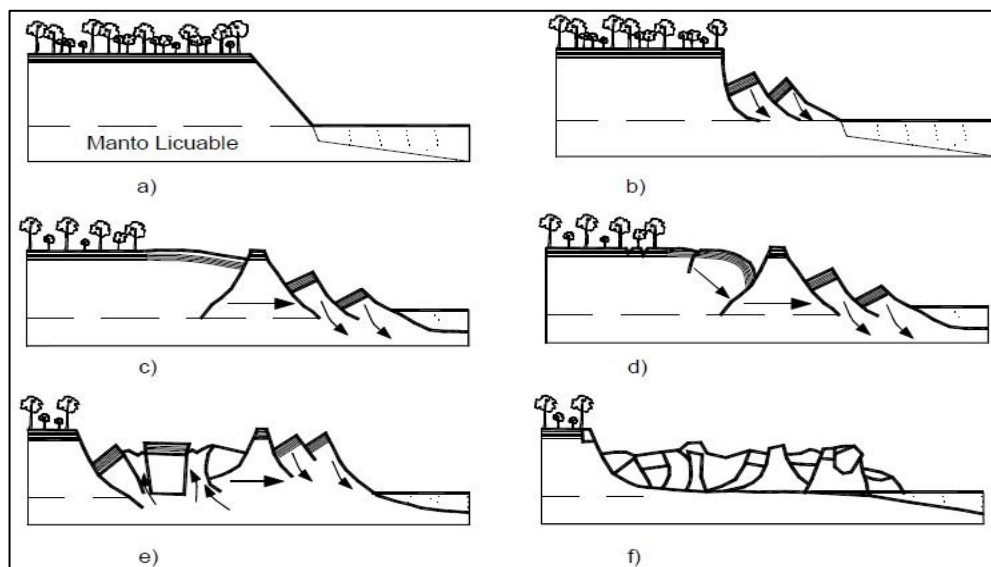
En el caso de los sismos, existe el triple efecto de aumento del esfuerzo cortante, disminución de la resistencia por aumento de la presión de poros y deformación, asociados con la onda sísmica; debido a esta razón el sismo es el factor que desencadena los movimientos de ladera en las zonas sísmicas, siendo disparados nueve de los veinticinco deslizamientos catastróficos registrados en el siglo XX debido a eventos sísmicos. Los factores que deben tenerse en cuenta para los análisis de taludes y laderas expuestos a eventos sísmicos son los siguientes:

- El valor de las fuerzas sísmicas aplicadas sobre las masas de suelo potencialmente deslizables.
- La disminución de la resistencia debida a las cargas vibratorias, las cuales inducen las deformaciones cíclicas. La resistencia puede disminuirse en más del 50 % en suelos sensitivos y en la mayoría de los casos, la disminución de resistencia puede llegar a un 20 % durante el sismo.
- El aumento de la presión de poros especialmente en los suelos limosos y de arenas finas, en los cuales puede producir una disminución de resistencia tal, que produzca el fenómeno de licuefacción. Los mantos de arenas saturadas sueltas, son muy vulnerables a tal efecto. Los rellenos

o capas de materiales que se encuentran sobre estos suelos pueden deslizarse durante los terremotos (ver figura 24).

- El aumento de la fuerza sísmica generado por la amplificación de los mantos de suelos blandos.
- La posibilidad de ocurrencia de fenómenos de resonancia relacionados con la similitud entre la frecuencia natural de vibración del talud y del evento sísmico.
- La magnitud de las deformaciones en la masa del suelo.

Figura 24. **Proceso de un deslizamiento debido a la licuefacción de un manto débil**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 269.

Las situaciones adquieren alto grado de criticidad cuando se combinan altas susceptibilidades, debidas a factores topográficos, geológicos, climáticos y sísmicos; por ejemplo en Guatemala, durante el terremoto del 4 de febrero de 1976, se contabilizaron más de diez mil movimientos de masa, entre caídas y deslizamientos de residuos de taludes casi verticales, ya que el movimiento sísmico rompió la cohesión de suelos blandos o cementación de los materiales duros pero frágiles.

Debido a que las características más conocidas en los sismos son la magnitud e intensidad de los mismos, es importante determinar una relación entre tales y los movimientos de masa.

- La magnitud es una medida cuantitativa e instrumental del tamaño del evento, relacionada con la energía sísmica liberada durante el proceso de ruptura de la falla. La magnitud es una constante única que se asigna a un sismo dado y es independiente del sitio en observación. Richter definió la magnitud en función de la máxima magnitud de la onda sísmica, integrando correcciones de la lectura por medio de la distancia a la cual se ubica el instrumento.
- La intensidad sísmica es un concepto que se aplica a la identificación del grado de destrucción o efectos locales de un terremoto, siendo por lo tanto una medida relativa de la fuerza sísmica en un punto determinado. La escala de intensidad fue desarrollada por Mercalli, siendo directamente proporcional a la magnitud del mismo e inversamente proporcional a la distancia del epicentro.

Existen fórmulas para relacionar la magnitud y la intensidad en el área epicentral como la propuesta por Gutenberg y Richter (1954), siendo esta

totalmente empírica y por lo tanto no es precisa; sin embargo demuestra que existe una relación entre ambas cantidades:

$$Magnitud = 1 + \frac{1}{3} Intensidad$$

. Existe un estudio (Keefer, 1984) el cual relaciona algunos movimientos de masa con la magnitud del sismo (ver tabla VII); además existe una relación gráfica entre la magnitud de la aceleración sísmica y el área de Km² que ha sido afectada por el fenómeno (ver figura 25), así también es lógico esperar que la actividad del deslizamiento disminuya al aumentar la distancia al área epicentral, hasta llegar al punto en que la distancia es lo suficientemente grande para no provocar un movimiento de masa (ver figura 26).

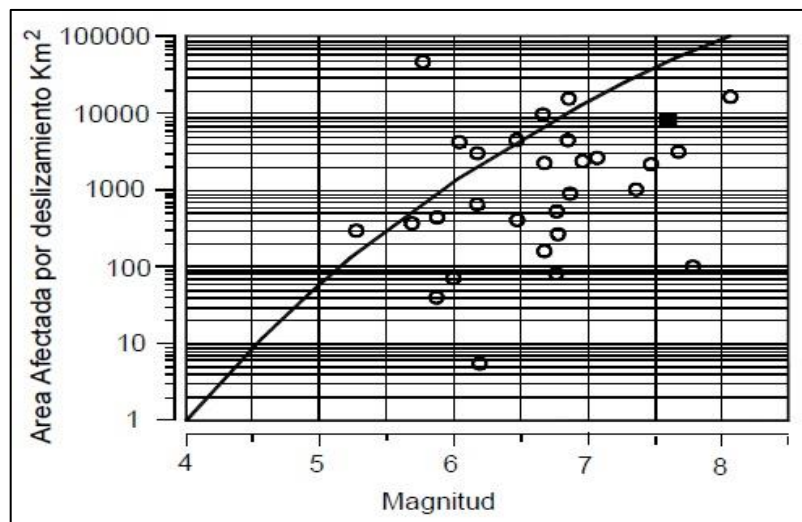
Tabla VII. **Posibilidad de movimientos causados por sismos**

Magnitud del sismo	Tipo de movimiento de masa producido
4,0	Caídos de roca, deslizamientos de roca, caídos de suelo y alteración de masas de suelo.
4,5	Deslizamiento traslacionales, deslizamientos rotacionales y bloques de suelo.
5,0	Flujos de suelo, expansiones laterales, deslizamientos subacuáticos.
6,0	Avalanchas de roca.
6,5	Avalanchas de suelo.

Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 270.

No obstante, tal como se ha mencionado, la ocurrencia de un deslizamiento relacionado al sismo depende de la intensidad del mismo y de factores topográficos, geológicos e hidrogeológicos. Asimismo, otro factor muy perceptivo a las fuerzas sísmicas es la topografía del terreno. Un talud que posea una pendiente muy pronunciada es más probable que esta se vea afectada y proceda a la inestabilidad al momento de ser afectada por las ondas sísmicas (ver figura 27); sin embargo este factor depende del tipo de material predominante de la ladera y de las propiedades y condiciones actuales a las que está sometida durante el sismo.

Figura 25. **Relación entre el área afectada por deslizamientos y magnitud de un sismo**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 289.

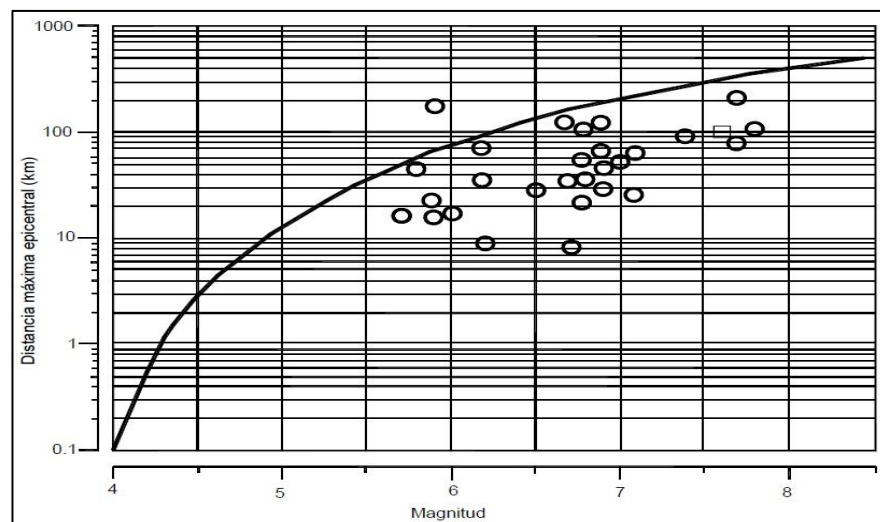
Es importante recordar que las fuerzas inducidas por los sismos generan esfuerzos cíclicos, dado que las ondas no viajan únicamente en una dirección, sin contar la cantidad de ondas que se desarrollan durante un sismo

dependiendo del tipo de suelo donde se desarrollen y de la distancia a la cual se encuentre el epicentro.

Por último, es importante hacer mención que muchos deslizamientos son causados por el efecto de lluvias después de un fuerte sismo. El deterioro que los mismos causan a la estructura de las rocas y de los suelos facilitan la activación de los deslizamientos posteriores por lluvias.

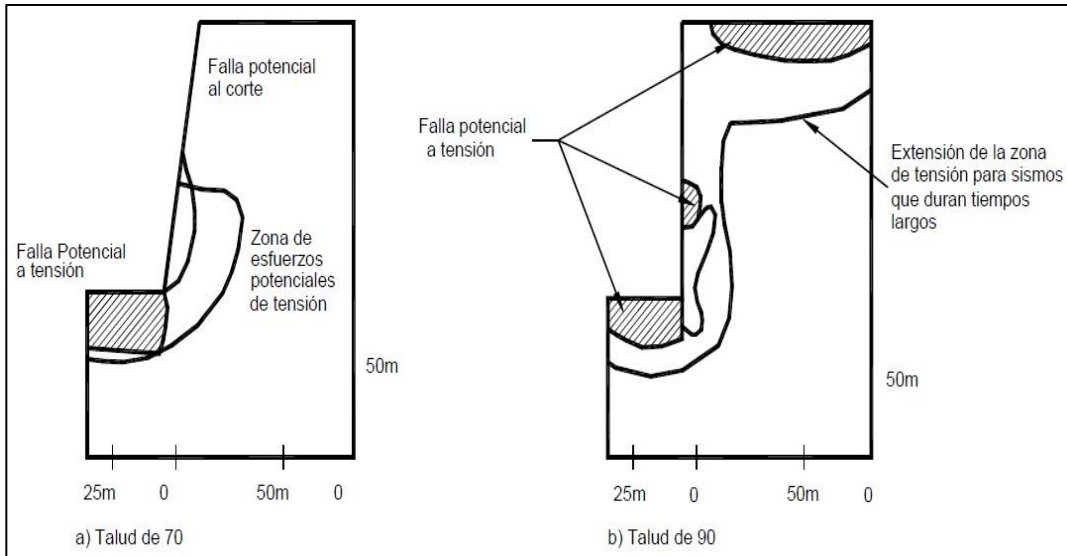
El agrietamiento causado por los sismos facilita la infiltración del agua y, por lo tanto la formación de presiones de poros altas en las grietas profundas. Es común que los deslizamientos en la temporada de lluvias, después del sismo, sean de mayor magnitud que los propios del sismo. Es por esto que se dice que la susceptibilidad a los deslizamientos aumenta después de un sismo de gran magnitud.

Figura 26. **Relación entre la distancia al área epicentral y magnitud de un sismo para la ocurrencia de un deslizamiento**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 290.

Figura 27. **Zonas de concentración de esfuerzos en un talud vertical en un sismo**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 284.

3.2.2. Causas antrópicas

Las actuaciones humanas ocupan un lugar importante dentro de los factores que modifican las condiciones y las fuerzas que actúan sobre las laderas. A lo largo de la historia, el hecho de realizar obras de ingeniería ha generado conflictos con activistas pronaturaleza; siendo en este último siglo intensificado debido a malas interpretaciones, o bien malas planificaciones de los proyectos que se han ejecutado, lo cual ha llevado al ingeniero encargado a integrar y ampliar el impacto ambiental que tendrán sus proyectos con el entorno que les rodea, ya sea para disminuir o anular los efectos negativos que tuviesen en el medio.

Las excavaciones, la construcción de presas y embalses, las sobrecargas de edificios, estructuras, terraplenes, rellenos o depósitos de ripio sobre las laderas y las voladuras en zonas cercanas, entre otros, modifican los estados tenso-deformacionales del terreno y sus propiedades geotécnicas, generando inestabilidades. Tales procesos pueden ser documentados por observaciones en el sitio y a través de los registros de excavación y construcción del sitio. La identificación separada de los deslizamientos naturales y artificiales es útil para plantear razonamientos teóricos y administrativos.

Las principales causas de desestabilización son los cambios de geometría y pendiente, los cambios en las condiciones hidrogeológicas y las fuerzas estáticas externas. En menor medida se encuentran las cargas dinámicas y las excavaciones subterráneas bajo las laderas.

3.2.2.1. Excavaciones y movimiento de tierra

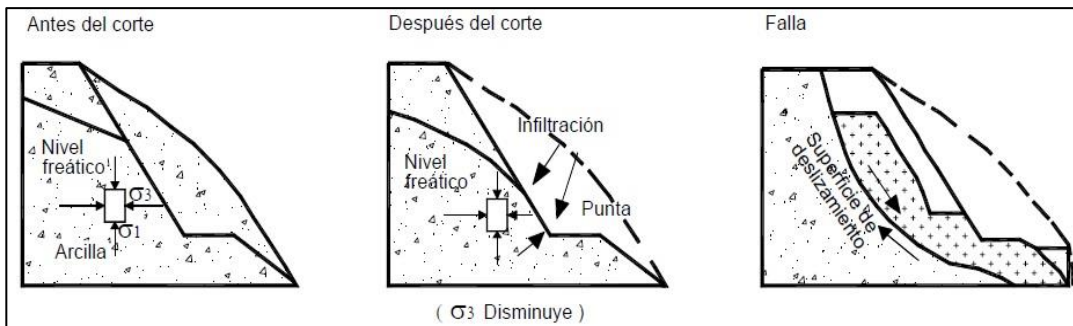
Las excavaciones y movimientos de tierra se refieren a la creación de plataformas o fosas para usos constructivos tales como cimentaciones o nivelaciones para obras de ingeniería. Las excavaciones superficiales, como se les ha denominado en el presente trabajo para vías de comunicación y transporte, así como cimentaciones poco profundas variando los perfiles de equilibrio de las laderas, los cuales pueden desencadenar movimientos, dependiendo de otros factores condicionantes, como la estructura geológica, la resistencia del suelo o el contenido de agua en el terreno (ver figura 28).

En las laderas con inestabilidades naturales antiguas o activas, o en condiciones cercanas al equilibrio límite, la excavación de taludes frecuentemente provoca la reactivación o aceleración de los movimientos. Las excavaciones más desfavorables son las realizadas a pie de las laderas (por

soportar esta zona las mayores tensiones (ver figura 26), situación frecuente en la construcción de vías de comunicación por valles o por zonas bajas de las laderas.

Las excavaciones influyen igualmente en la alteración del sistema de drenaje superficial y en la modificación del comportamiento hidrogeológico de la ladera, al variar los niveles freáticos y los flujos, o dar lugar a la acumulación de agua en determinadas zonas. Tal circunstancia ocurre durante el riego de los jardines o las rupturas de tuberías de agua potable o drenaje, ocasionando cambios en el comportamiento hidrogeológico induciendo caudales al flujo subterráneo.

Figura 28. **Diagrama general del efecto de un corte**



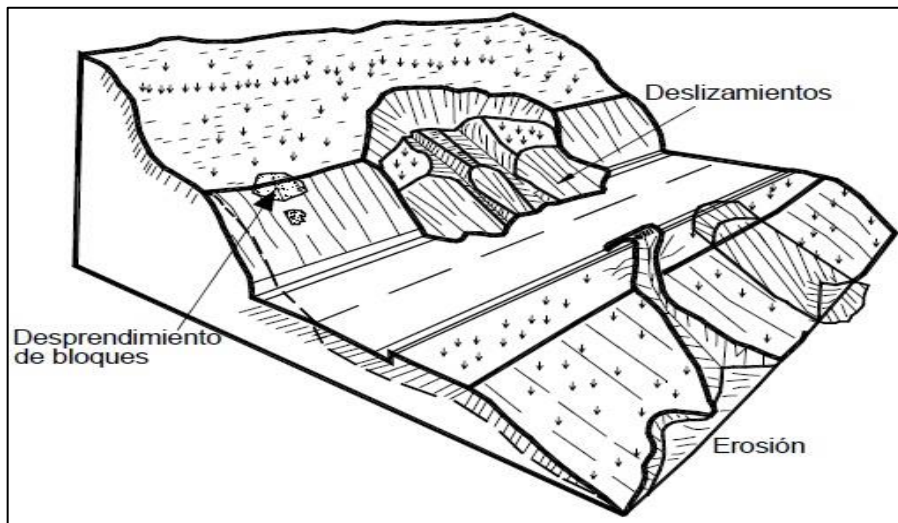
Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 311.

El proceso de urbanización de áreas no apropiadas aumenta el riesgo de ocurrencia de un deslizamiento. A pesar de las limitantes topográficas, las laderas son muy atractivas para proyectos de urbanización, ya sea por la escasez de tierra para habitar o bien para la construcción de proyectos cuantiosos de viviendas. Adicionalmente a esto, sobre las laderas se construye

una gran cantidad de obras de infraestructura como calles, andenes, alcantarillados y acueductos (ver figura 29).

Para tales obras se requiere una gran cantidad de movimiento de tierra: excavaciones y rellenos, además de un estudio detallado de geotecnia, el cual mediante estudios hidrogeológicos, direcciones de fracturas y proyecciones estereográficas pueden dar un ángulo adecuado para el corte de los taludes y de la misma manera estabilizarlo mediante métodos menos costosos y más efectivos.

Figura 29. **Efectos de modificación de la topografía**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 314.

3.2.2.2. Minería y explotación de canteras

La minería y la explotación de canteras de materiales producen grandes movimientos de suelo para lograr la extracción de materia prima necesaria para el ámbito de la construcción. La minería utiliza procesos dinámicos para realizar

túneles dentro del área a explotar, mientras que la explotación de canteras se realiza a cielo abierto, movilizand o grandes cantidades de material hacia áreas de proceso.

La explotación a cielo abierto genera cortes en los taludes, la cual produce varios cambios sustanciales en el estado de la formación residual. Las excavaciones generan cambios topográficos y concentraciones de esfuerzos de cortante y en ocasiones, descubren superficies críticas para los deslizamientos, como estratificación, fracturas y planos de cambio de meteorización.

El fenómeno incluye la relajación de los niveles de esfuerzos a compresión y el aumento de esfuerzos al corte, exposición del material meteorizado al aire y a los cambios de humedad, alteración de propiedades por cambios fisicoquímicos causados por la exposición al aire y la humedad y la modificación de las presiones negativas en el agua acumulada en los poros (ver figura 30). Por tal razón es necesario generar gradación en los cortes o bermas, realizando un estudio previo y observando el ángulo de reposo del material a extraer.

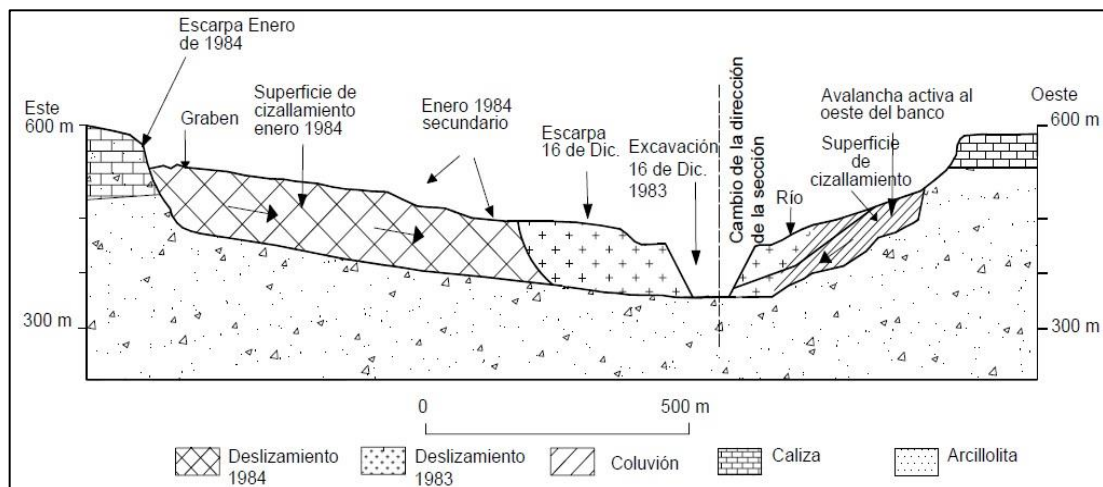
Los materiales que mayormente son explotados en el ámbito constructivo son las tobas, de las cuales se extraen ciertos mantos puzolánicos con altas concentraciones de sílice para la creación de cementos; las lutitas, de las que se obtiene la mayoría de arcillas para la creación de la mayoría de refractarios; y la caliza, que a través de procesos mecánicos se obtiene a partir de ella la mayoría de agregados gruesos para la formación de concretos, o a través de procesos fisicoquímicos se crea cal necesaria para la fabricación de unidades de mampostería y distintos morteros.

En la explotación minera, se encuentran mayormente la creación de excavaciones subsuperficiales o túneles, de los cuales se extraen minerales de

la veta en estudio. La generación de dichos túneles se realiza mediante perforaciones o bien, explosivos que pueden llegar a causar inestabilidad en las grietas de rocas superiores o inferiores.

Las excavaciones subterráneas constituyen una alteración en el estado original del terreno, lo que por parte del suelo se ve reflejado en movimientos, con el fin de restablecer su equilibrio tensional, dando origen a asentamientos, solevantamientos o en su defecto desplazamientos horizontales entre fallas activadas, siendo cada vez más difíciles de controlar a medida que el recubrimiento o la distancia entre la cota de la clave y la cota en la superficie es menor.

Figura 30. **Modelo de deslizamiento al realizar cortes para extracciones a cielo abierto**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 317.

Las deformaciones causadas por las excavaciones subsuperficiales están clasificadas en dos tipos, por una parte se encuentran las deformaciones que

sufre el suelo superficial que se encuentra dentro del área de influencia de la excavación y por otra se encuentra la deformación que sufren las estructuras u obras civiles construidas bajo la superficie.

Las deformaciones que se producen en la superficie y que son originadas por alteraciones en el equilibrio interno y no por sobrecargas que se aplican directamente sobre la estructura constituyen un fenómeno conocido con el nombre de subsidencia, el cual es generalmente el más estudiado a diferencia de las deformaciones subterráneas debido a los efectos peligrosos que pueden tener sobre otras estructuras, siendo más críticas debido a la repercusión que pueden tener sobre las cimentaciones, ocasionando peligrosos asentamientos.

Las deformaciones que sufren las estructuras subterráneas dependen de varios factores, siendo aminorados al realizar extracciones de material en forma alterna de filas y columnas para no desestabilizar laderas completas. Tales factores se listan a continuación:

- La geometría: es decir la profundidad del túnel y el espesor del recubrimiento en el terreno resistente.
- El tipo de sostenimiento de las claves para la formación del túnel.
- La heterogeneidad del terreno alrededor de la construcción del túnel.
- La presencia del agua en materiales superiores como laterales.
- El proceso constructivo, es decir el tipo de instrumentos excavadores, huecos que quedan entre zonas excavadas y revestimientos, así como la velocidad de avance del instrumento.

- La deformabilidad relativa del suelo interactivo, respecto de los materiales de revestimiento del túnel.

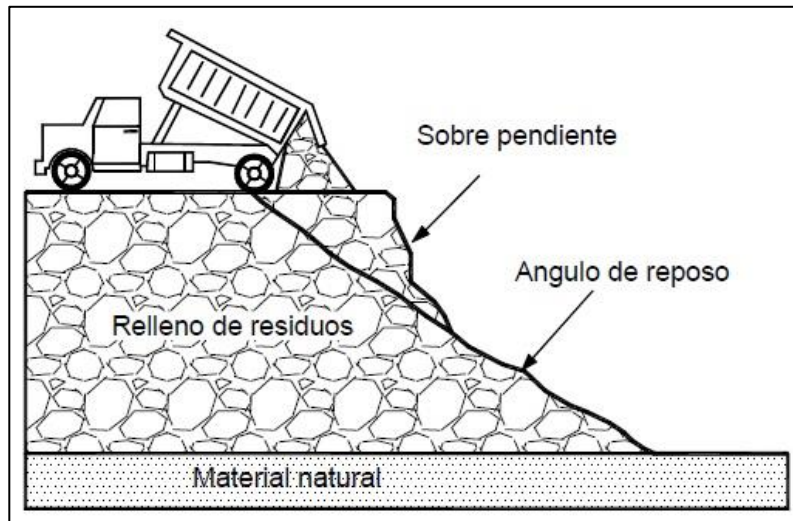
3.2.2.3. Sobrecarga y descarga excesiva

La sobrecarga y descarga consiste en remover o colocar una cantidad excesiva de peso, ya sea equivalente por el volumen de material, volumen de vegetación o series de construcciones en la corona o pie del talud. Tal fenómeno puede presentar dos variantes: la primera en la cual se ve implicada la cantidad de peso asociada a una carga o bien descarga, y la segunda en la cual se encuentra involucrada la velocidad del movimiento asociada a la carga en cuestión. Cualquiera de las dos variantes ocasiona un desequilibrio, el cual se deriva en un movimiento de masa, suponiendo que tales factores sobrepasan las condiciones de estabilidad del talud.

La primera variante, siendo esta la descarga excesiva puede encontrarse cuando se realizan cortes demasiado excesivos tanto al pie del talud como en la parte superior del mismo o bien remoción de vegetación local del talud. Por otra parte está la carga excesiva de material, relleno que puede no ser controlado ocasionando movimientos o accionando movimientos antiguos.

Regularmente los rellenos son colocados directamente sobre los taludes y no son compactados o bien compactados inadecuadamente, lo cual permite la sobrecarga de las laderas y la saturación y colapso de los suelos sueltos, facilitando escurrimientos de suelo, flujo de los suelos sueltos saturados y formación de cárcavas por erosión (ver figura 31).

Figura 31. Talud con pendiente excesiva en un proceso de relleno

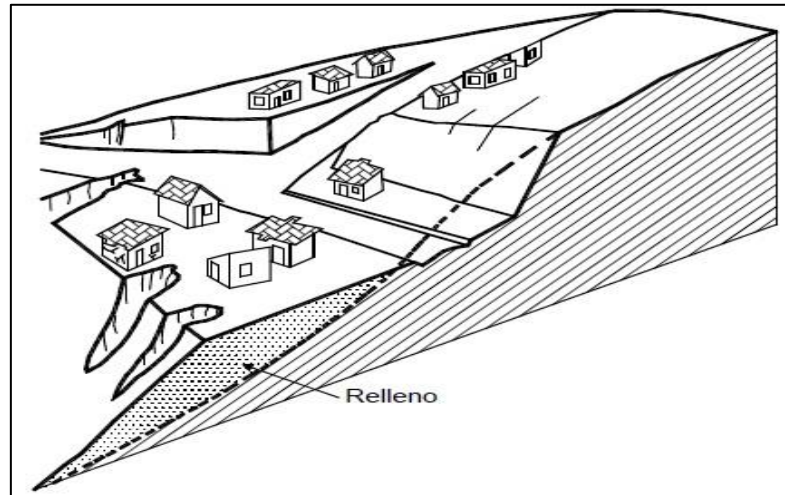


Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 317.

Los rellenos generalmente son más porosos y menos permeables que los suelos naturales, lo cual facilita la infiltración y genera acumulaciones de agua en los poros. Además son menos cementados y su estructura es más susceptible a deterioro o colapso por eventos sísmicos; el contacto entre el suelo natural y el relleno constituyen una línea de debilidad en la cual se concentran los flujos de agua y se generan agrietamientos por diferencia en las características de deformación y comportamiento sísmico. Adicionalmente son muy susceptibles a los procesos de erosión (ver figura 32).

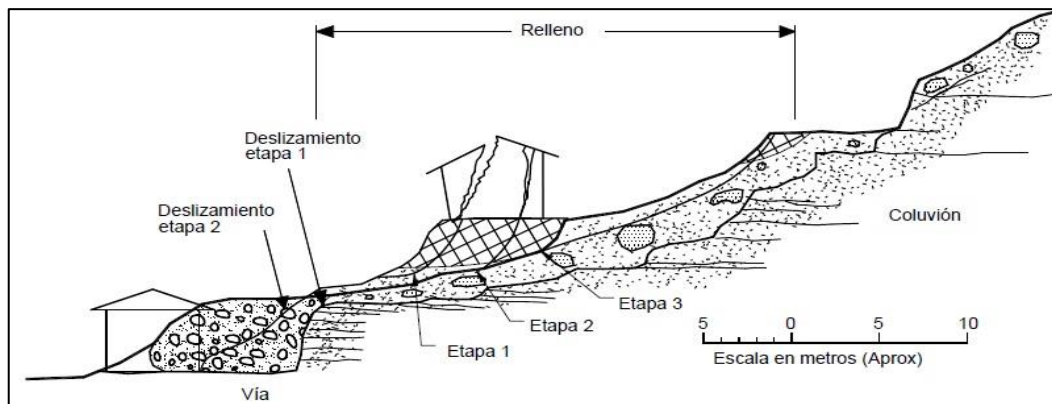
La mayoría de deslizamientos en rellenos ocurre a lo largo del contacto corte-relleno. En ocasiones, se colocan rellenos sobre suelos blandos como coluviones o depósitos aluviales recientes y el suelo sobre el cual se coloca el relleno, puede fallar al cortante (ver figura 33).

Figura 32. **Rellenos urbanos, susceptibles a procesos de erosión**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 317.

Figura 33. **Deslizamiento ocasionado por la colocación de un relleno sobre un coluvión**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 318.

La velocidad con la cual se realizan los cortes y rellenos puede afectar grandemente la estabilidad del talud. Por naturaleza, los cuerpos rocosos o de

suelo se estabilizan a través del tiempo, ocasionando pequeños movimientos de fallas o acomodaciones de estratos; sin embargo tales movimientos pueden llegar a ser tan lentos que muchas veces no son apreciables a la vista humana. Al realizarse sobrecargas y descargas de volúmenes excesivos, dicho tiempo se vuelve insuficiente para lograr una estabilidad mínima, derivando de esta manera movimientos de masa.

4. MÉTODOS DE MONITOREO Y EQUIPOS

Una ladera está sometida a diversos componentes que controlan la estabilidad de la misma aun cuando no se desplacen en cantidades significativas. Cada factor puede ser monitoreado y cuantificado, por lo tanto un monitoreo completo incluye la medición de muchos factores que se desenvuelven simultáneamente dentro de la ladera.

Muchas veces el monitoreo detallado con instrumentación no es posible debido a la falta de asesoramiento técnico o presupuesto insuficiente para la adquisición de instrumentación específica e investigación subsuperficial. Además, el monitoreo con instrumentación a menudo no es práctico a menos que una zona de muestra representativa esté involucrada a un examen intensivo para este propósito en específico. Para dicho caso, es necesario contar con dos tipos de antecedentes generales para seleccionar zonas de riesgo potenciales y posibles intervalos del período de retorno del deslizamiento.

En primer lugar, es de vital importancia conocer los inventarios de deslizamientos previamente ocurridos a través de periódicos, mapas geológicos y regionales, así como fotografías históricas de la zona. En segundo lugar, las observaciones de los deslizamientos actuales que son registrados y mapeados deberían compararse con los inventarios de acontecimientos históricos antes mencionados, a través de un monitoreo que involucre factores significativos como la deformación, velocidad de movimiento, presión hidrostática subsuperficial, variaciones anuales del nivel de agua subterránea, erosión en arroyos y ríos, intensidad y duración de la precipitación en el área, orientación

preferencial entre estratos, registros de actividad sísmica cercana, gravedad y frecuencia de incendios, velocidad del viento y construcciones en terrenos cercanos.

Para algunos deslizamientos puede que no sea posible reconocer un evento de activación específico a simple vista debido a algunos factores detonantes del subsuelo o eventos indistinguibles tal como la debilitación del estrato superficial a través de la profundización de las raíces de los árboles de la zona, que pueden convertirse en obvios luego de la ocurrencia del deslizamiento.

Debido a la cantidad de información que puede recolectarse en un área, el monitoreo no debe basarse únicamente en la colocación de instrumentos en puntos aleatorios, sino que en la ubicación de los mismos siguiendo un proceso lógico para la obtención de datos relevantes que puedan ayudar a diagnosticar la causa del movimiento, o bien la prevención del mismo.

La importancia de un correcto monitoreo puede incluso tomar un papel muy importante en la construcción de obras ingenieriles a través de la colocación de la instrumentación adecuada en túneles o estructuras sobre suelos inestables. Los datos recolectados, al ser procesados de una manera óptima, pueden ayudar a disminuir costos innecesarios que pudiesen surgir dentro de los proyectos que se encuentran en ejecución.

Debido a la amplitud de variables que se presentan en un deslizamiento, el presente trabajo de graduación está limitado a la investigación de la instrumentación necesaria para realizar mediciones de deformaciones en las laderas afectadas.

4.1. Tipos de monitoreo

Los monitoreos, tanto para laderas como para cualquier otro fenómeno de índole natural, se pueden clasificar en dos partes: los que se dan antes de la ocurrencia del fenómeno, preventivos, y los que se realizan cuando el fenómeno ya ha sido activado, activos. La importancia de ambas radica en la prevención de pérdidas humanas así como de bienes materiales, ya que en nuestro país se tienden a habitar y utilizar las zonas de alto riesgo a la incidencia de fenómenos naturales.

4.1.1. Monitoreo preventivo

Los monitoreos preventivos son aquellos que se realizan cuando el fenómeno no se ha desenlazado en las laderas. Regularmente se utiliza en laderas que se consideran de riesgo moderado o alto ante la ocurrencia de movimientos de masa. Tales zonas se ubican a través de estudios geológicos realizados por fotografías aéreas de los diversos puntos, de mediciones de buzamientos de fallas, fracturas o pliegues de la zona y de estudios pluviométricos e hidrogeológicos cercanos o en el lugar de interés. También se ubican a través de lugares en los cuales ya se ha producido un movimiento de masa con anterioridad, lo que puede dar lugar a una reactivación del mismo.

Como se ha mencionado antes, la importancia de esto radica en la prevención de pérdidas humanas y bienes materiales, dando lugar a la concientización de los habitantes de la zona a través de capacitaciones y de un adecuado ordenamiento territorial para evitar que se expandan hacia áreas en las que pudiesen desencadenarse movimientos de masa. Así como las evacuaciones de la población en caso que la activación del movimiento sea inminente.

Es importante cultivar una cultura de prevención, ya que en el medio no existe suficiente educación ante tales situaciones debido a que es requerido de un alto capital inicial para efectuar las mediciones necesarias, así como de recurso humano calificado para que las efectúe. A largo plazo, esta inversión es compensada con un enorme porcentaje en la caución de pérdidas humanas y materiales del lugar, sin incluir el valor agregado que se inculca a la población para esta o cualquier situación similar.

4.1.2. Monitoreo de deslizamiento activo

Los monitoreos de deslizamiento activos son aquellos que se realizan cuando el movimiento ha iniciado y la velocidad es perceptible al ojo humano. La mayoría de los movimientos de masa se desencadenan tan rápido que es sumamente difícil poder establecer monitoreos en tiempo para registrar los desplazamientos de los mismos, por lo que no existen muchas bases de datos de movimientos activos desplazados a altas velocidades, a menos que sean estudios realizados en ambientes controlados.

Sin embargo, cuando un movimiento tiene velocidades bajas o moderadas, es posible colocar dispositivos para monitorear el deslizamiento, aun cuando este ya haya sido activado, y poder predecir un comportamiento en base a datos estadísticos obtenidos de movimientos similares.

Muchos de los mecanismos que se utilizan, pueden ser empleados en ambos tipos de monitoreos, preventivos y activos, dependiendo de las condiciones bajo las cuales se esté desarrollando el movimiento de ladera. No obstante, cuando los movimientos surgen repentinamente o bien alcanzan velocidades muy altas, es mejor utilizar mecanismos que no involucren recurso

humano dentro del área, es decir métodos de monitoreo que permitan tomar medidas de una forma indirecta, o bien no presencial.

4.2. Instrumentación para monitoreo de deslizamientos

Existen diversos instrumentos o mecanismos para monitorear los movimientos de masa. Según se mencionó anteriormente el objetivo principal de los instrumentos presentados en este trabajo es obtener los distintos desplazamientos diferenciales que se originan en los movimientos de masa, aun cuando existen diversos factores que inciden en la activación de tal fenómeno. Tales instrumentos pueden variar en su forma de funcionamiento, entre los cuales están instrumentos hidráulicos, neumáticos, eléctricos y mecánicos.

Toda medición realizada involucra error e incertidumbre, por lo cual es importante considerar que las mediciones deberán estar sometidas a un análisis lógico antes de su procesamiento, el cual debe incluir diversos factores que pudiesen causar una desviación de la medida tomada en campo con la medida real, tales como la inexperiencia de los técnicos realizando mediciones, una calibración inapropiada del instrumento, errores debidos al mal clima, temperatura o vibración, la variación de medición entre dos personas, el ruido y la precisión del instrumento.

Dada la gran variedad de instrumentos que dispone el mercado para la medición de deformaciones, se han desarrollado diversos métodos aplicables en el campo de los movimientos de masa. En la tabla VIII se presentan los instrumentos mayormente utilizados agrupados en diferentes categorías según su funcionamiento y el tipo de deformación que pueden registrar.

Tabla VIII. **Categorías de instrumentos para medición de deformaciones**

Categoría	Tipo de deformación medida					
	DH	DV	DA	DR	DS	DSS
Métodos topográficos. <ul style="list-style-type: none"> • Sensores ópticos tradicionales tales como teodolito, nivel o estación total. • Métodos fotogramétricos a control remoto. • Sistema GPS. 	X	X	X		X	
Extensómetros superficiales. <ul style="list-style-type: none"> • Calibradores de fisuras. • Calibradores de convergencia. 	X	X	X		X	
Clinómetros.				X	X	X
Extensómetros de sonda.	X	X	X			X
Extensómetros fijos en terraplén.	X	X	X			X
Extensómetros fijos en pozo.	X	X	X			X
Inclinómetros.	X	X	X	X		X
Medidores de deformación transversal.	X	X	X			X
Medidores con nivel líquido.		X				X
Indicadores luminosos.	X	X	X		X	X
Medidores de convergencia para fosas de derrubios.	X					X
Reflectometría con regularización de tiempo.	X	X	X		X	X
Sensores de fibra óptica.	X	X	X		X	X
Monitoreo por emisiones acústicas.	X	X	X			X
DH: deformación horizontal. DV: deformación vertical. DA: deformación axial. DR: deformación rotacional. DS: deformación superficial. DSS: deformación subsuperficial.						

Fuente: DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. p. 200.

Hasta este punto se ha tratado de una forma general el tema de los movimientos de ladera, sin embargo la información proporcionada está enfocada especialmente en el tema de los deslizamientos tanto rotacionales

como traslacionales. A continuación se desarrolla la instrumentación detallada de la cual es objeto el presente trabajo de investigación, es decir los extensómetros artesanales; no obstante, en los anexos se desarrollan los demás métodos e instrumentos mayormente utilizados en el ámbito del monitoreo de deslizamientos en la mayoría de países del mundo.

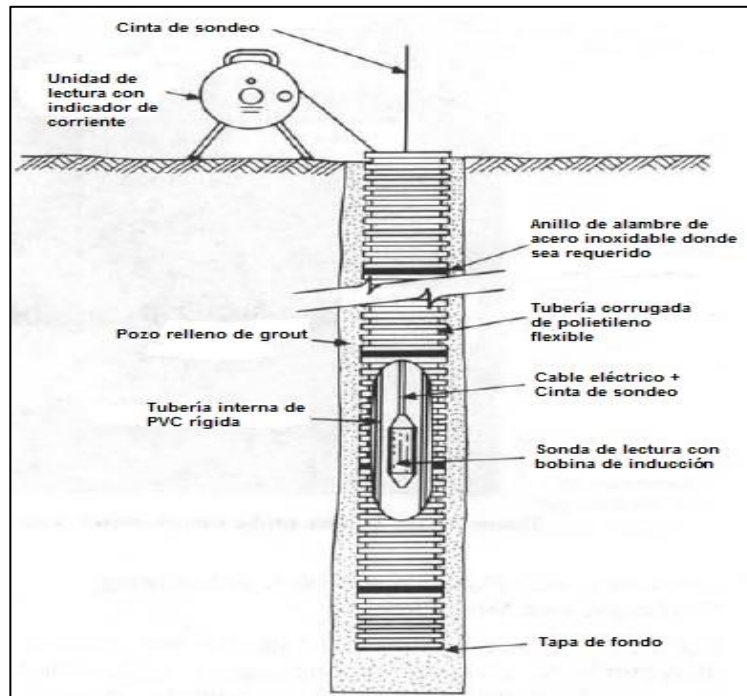
4.3. Monitoreo por extensómetros

Los extensómetros son instrumentos utilizados para medir la deformación, debida a cualquier fuerza externa que modifique el cuerpo en estudio, entre dos puntos establecidos. Dentro del campo de la instrumentación para el monitoreo de laderas, existen distintos tipos de extensómetros. Básicamente, existen dos tipos: los extensómetros verticales y los extensómetros horizontales.

Entre los extensómetros verticales, están aquellos que funcionan con una sonda, los extensómetros instalados en un terraplén fijo y los instalados dentro de un pozo fijo.

Los extensómetros de sonda están definidos como aquellos instrumentos que se utilizan para monitorear el diferencial de distancia entre dos o más puntos a lo largo de un eje común por medio de una sonda que es transportada a través de una tubería (ver figura 34). Los puntos de medición son identificados a lo largo de la tubería de manera mecánica o eléctrica por la sonda, y la distancia entre los puntos es determinada por las mediciones de la posición de la sonda. Para determinar el dato de la deformación absoluta, al menos un punto debe estar localizado en un lugar fuera de la zona que está siendo afectada por el movimiento de suelo, o bien determinar la posición de dicho punto a través de métodos topográficos.

Figura 34. Esquema de un extensómetro de sonda



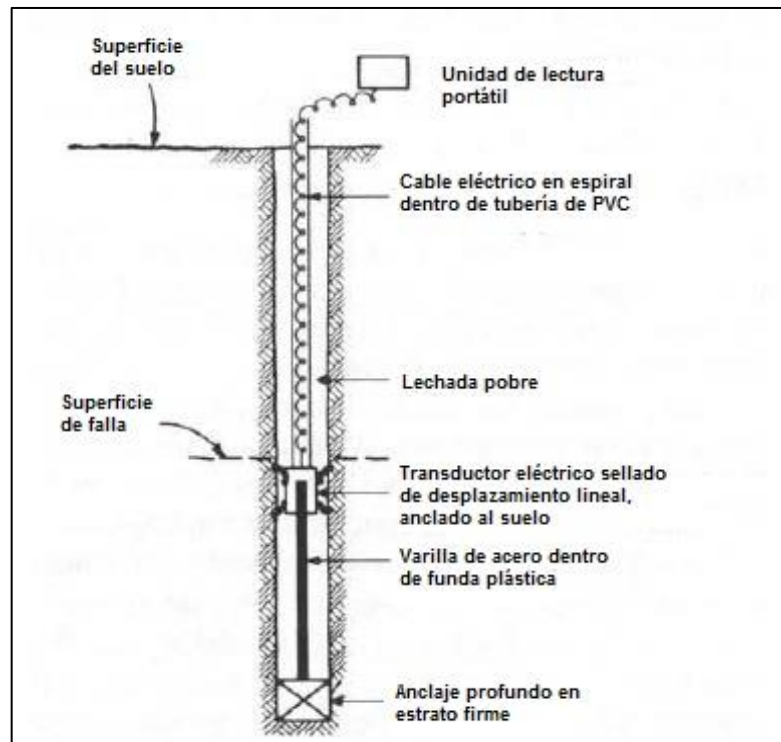
Fuente: DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. p. 223.

Los extensómetros instalados en un terraplén fijo o en un pozo fijo son similares a los anteriores, con la diferencia de que estos no necesitan una tubería debido a que dentro de la unidad de lectura existe un transductor capaz de medir la tensión a la que está siendo sometido el cable medidor y convertirla en una medida de longitud. Es importante mencionar que los extensómetros que son instalados en un pozo fijo medirán deformaciones a lo largo del eje del pozo perforado (ver figura 35). Ambos tipos de extensómetros son utilizados para mediciones en estratos subsuperficiales.

Por otra parte, están los extensómetros superficiales los cuales son dispositivos que son utilizados para realizar monitoreos del cambio de la

distancia entre dos puntos en la superficie del terreno, o bien en la superficie de una excavación. Existen de dos tipos: los extensómetros para medir convergencias, los cuales se utilizan regularmente en el monitoreo de túneles, y los de mediciones de fisuras, que se utilizan en el monitoreo de laderas y fallas en roca o monitoreo de estructuras de concreto.

Figura 35. **Esquema de un extensómetro instalado en un pozo fijo**

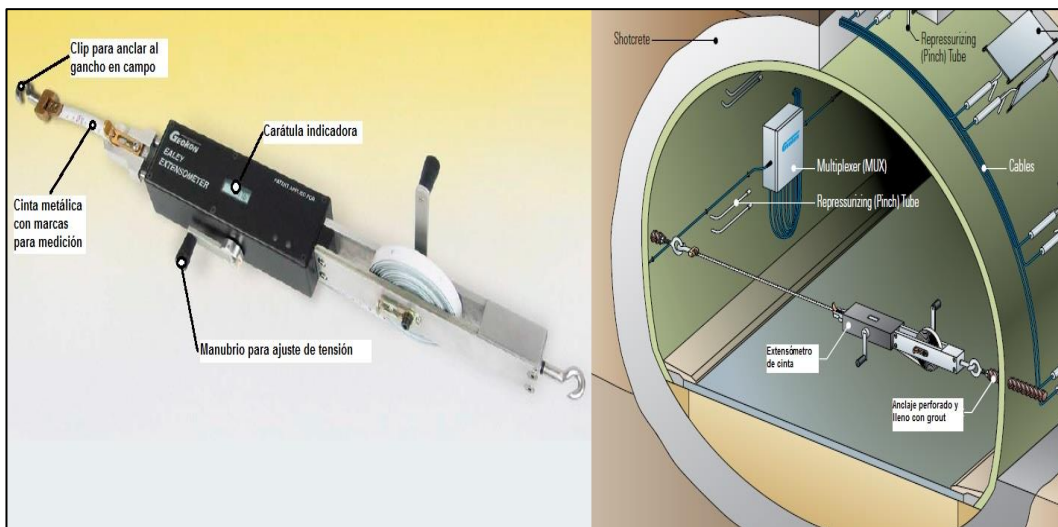


Fuente: DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. p. 243.

Los extensómetros medidores de convergencia (ver figura 36), usualmente consisten en una cinta, alambre, varilla o tubería en serie con un indicador de deformación. El medidor es usualmente portátil y está ligado al momento de la lectura a los anclajes permanentes montados al final de cada claro sometido a

medición. Se deben proveer fundas protectoras para los anclajes; además es importante revisar la estabilidad de todos los medidores regularmente ya sea utilizando un bastidor rígido para calibración provisto por el fabricante, o bien realizando una lectura de un claro con una medida constante. Preferiblemente, se debe realizar este último, ya que provee una revisión completa del medidor y no únicamente de la pieza que contiene el indicador de deformación.

Figura 36. **Extensómetro para medir convergencias con cinta**

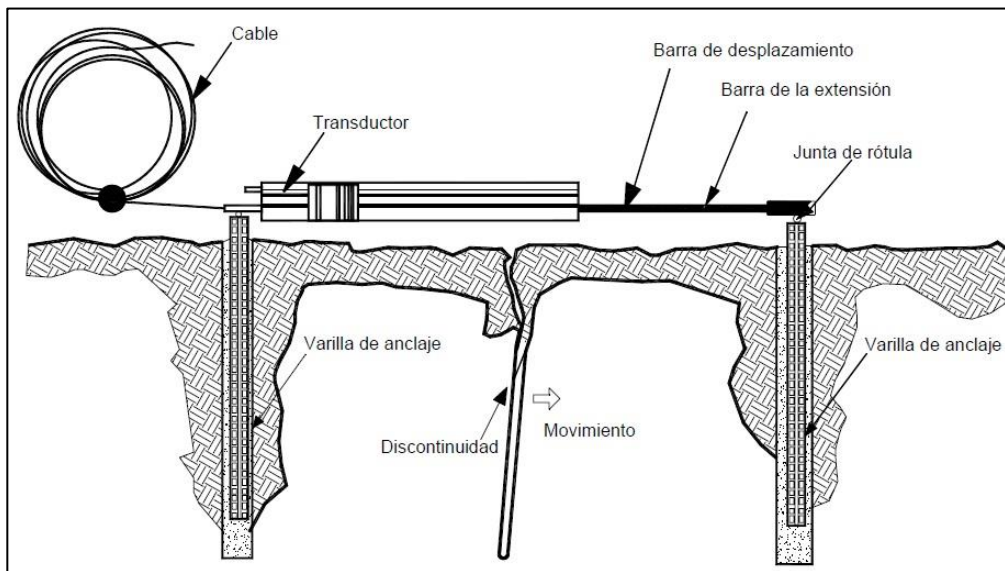


Fuente: GEOKON INC. *Geokon/Ealey tape extensometer, model 1610*. p. 1.

Los extensómetros superficiales son utilizados para la medición de todo tipo de fisuras por tensión, desde las originadas en los suelos precisando el inicio de un movimiento de ladera, hasta en concreto y otro tipo de estructuras tales como los pavimentos o revestimientos de los túneles, así como en fallas y grietas en rocas. Estas observaciones, en el ámbito del movimiento de ladera, pueden proveer una información muy útil acerca del comportamiento en el subsuelo, y usualmente el monitoreo superficial es más factible

económicamente que la realización de un monitoreo subsuperficial, debido que requieren la perforación de pozos fijos y otras técnicas para su implementación.

Figura 37. **Colocación de un extensómetro superficial eléctrico para medición de deformaciones de fisuras**



Fuente: DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. p. 213.

Existen dos tipos de extensómetros para medición de fisuras, los cuales están divididos según su mecanismo de funcionamiento: los extensómetros eléctricos y los mecánicos. Los primeros son utilizados cuando el acceso al punto de monitoreo está muy comprometido dada la topografía del terreno, o bien cuando se necesita realizar un monitoreo continuo por medio de dispositivos remotos. Para estos casos se tienen dos opciones viables que a continuación se describen.

- La colocación de un transductor de desplazamiento lineal eléctrico, el cual que puede estar unido a un soporte en un lado de la discontinuidad, mientras que se coloca un apoyo fabricado fijo sobre una superficie de referencia por el otro lado.
- La ubicación de los puntos de anclaje fijos, situados en ambos lados de la discontinuidad, mientras que el transductor de desplazamiento lineal eléctrico está unido a cualquiera de los puntos de anclaje a través de una articulación tipo rótula (ver figura 37).

Los extensómetros mecánicos para la medición de fisuras pueden ser fabricados de una gran cantidad de materiales. Regularmente, esta es la forma más económica que existe para realizar monitoreos en cualquier tipo de estructura. A continuación se presenta un resumen en la tabla IX de los distintos tipos de extensómetros mecánicos que pueden utilizarse.

Es importante mencionar que el monitoreo por medio de extensómetros mecánicos requiere la presencia del personal en el área de estudio para realizar la toma de medidas de las deformaciones cada cierto tiempo. Regularmente, este trabajo es asignado a pobladores que residan cerca del punto de observación, previa explicación y capacitación de la forma de lectura de los instrumentos. Los métodos más sencillos están categorizados como mecánicos artesanales, debido a que se debe realizar la construcción de los mismos en el lugar o bien, construir el instrumento en un taller artesanal antes de monitorear cualquier evento. Estos instrumentos presentan precisiones más pobres.

Mientras tanto los extensómetros mecánicos, que son fabricados y calibrados por empresas reconocidas como “RST Instruments”, “Geokon”, “Rieker Inc.”, o “Sherborne Sensors”, son utilizados cuando se requiere una

mayor precisión y la separación de la grieta o el vano analizado es demasiado grande para una regla metálica o un calibrador.

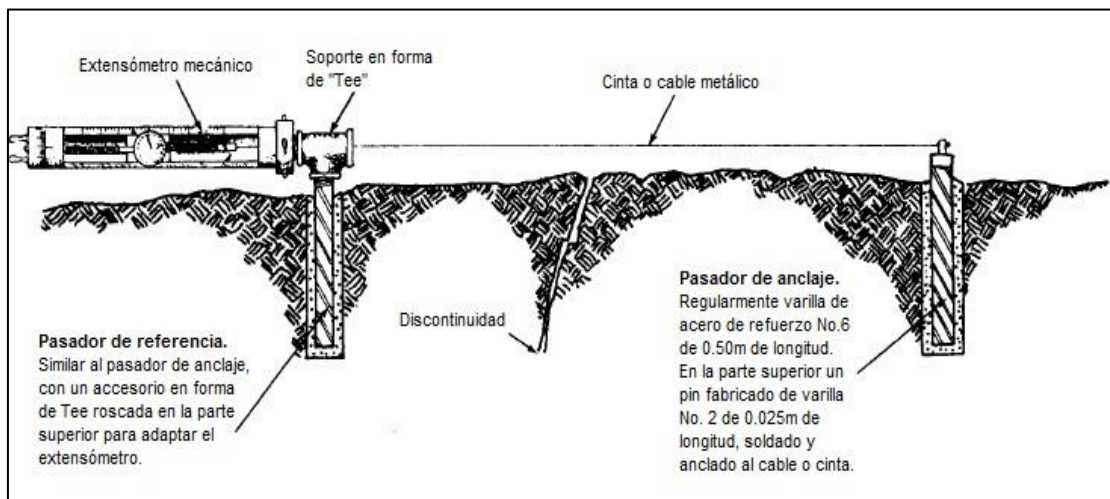
Tabla IX. **Extensómetros mecánicos para medición de fisuras**

Método	Ventajas	Limitaciones	Precisión Aproximada
Estacas de madera	Económico. Pueden ser utilizadas por cualquier personal.	Datos cualitativos. Interpretación poco fiable.	Tosca
Placas de vidrio Placas de yeso	Económico.	Usualmente, datos cualitativos únicamente.	± 1,0 mm
Pasadores y cinta métrica	Económico.		± 3,0 mm
Pasadores y regla metálica.	Económico.	Dimensión del claro limitada.	± 0,5 mm
Pasadores y calibrador.	Económico.	Dimensión del claro limitada.	± 0,3 mm
Pasadores y cable tensionado por un peso.	Económico. Puede ser adaptado con una alarma de disparo.		± 0,1 mm
Pasadores y extensómetro mecánico.			± 0,1 mm
Medidor de grilla graduada.	Económico.	Dimensión del claro limitada.	± 1 mm
Deformímetro		Dimensión del claro limitada.	± 0,003 mm – 0,05 mm
Indicador de cuadrante.		Dimensión del claro limitada.	± 0,003 mm – 0,03 mm

Fuente: DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. p. 210.

Regularmente los extensómetros se colocan entre dos pines, uno dentro del área de movimiento de masa y el otro fuera de la superficie que se está movilizand. Dichos pines sujetan una cinta o un cable el cual está conectado, en el extremo inmóvil, al extensómetro mecánico para el registro del desplazamiento diferencial que está ocurriendo entre los dos pines (ver figura 38). Además se puede adicionar un indicador de cuadrante sobre una ménsula que recorra la discontinuidad, hasta llegar a un punto de referencia fijo, con el fin de medir el asentamiento diferencial que pueda producirse en ambos puntos.

Figura 38. **Monitoreo utilizando extensómetro mecánico y pasadores**



Fuente: DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. p. 212.

Por último están los medidores de grilla graduada, conocidos también como medidores calibrados, los cuales consisten en dos láminas transparentes plásticas traslapadas colocadas una a cada lado de la discontinuidad. La lámina superior tiene dibujadas unas líneas cruzadas, las cuales se superponen sobre una grilla graduada dibujada en la lámina inferior. El movimiento es determinado

a través de la observación de la posición del cruce de líneas de la placa superior con respecto a la inferior.

4.3.1. Monitoreo por extensómetros artesanales

Debido a que la utilización de extensómetros mecánicos es el medio más económico que existe para monitorear movimientos de ladera, se ha optado por fabricar extensómetros artesanales funcionales, los cuales deben cumplir con las siguientes características: económicamente accesibles, asequibles en su manera de construcción y sencillos en su forma de lectura, para poder implementarlos en los lugares donde existen indicios de un movimiento de masa.

En este caso, el término artesanal se refiere a un instrumento realizado bajo pocos o ningún requerimiento de calidad en cuanto a materiales y sistemas de calibración. Por esta razón, dentro del criterio del técnico evaluador, la precisión de dichos instrumentos puede considerarse nula hasta el punto de utilizar dichos instrumentos únicamente para recolectar datos de manera cualitativa, es decir verificar que la masa de suelo en análisis en realidad se está desplazando.

Regularmente, los primeros dispositivos que se instalan en posibles movimientos de masa son extensómetros artesanales de los cuales se toman valores que son utilizados para analizar, si es necesario colocar instrumentación más precisa en el lugar y realizar un estudio más profundo en caso de que exista un riesgo inherente a largo plazo; o bien, realizar un plan de emergencia para la evacuación de la población afectada debido al desplazamiento veloz que se manifiesta en la ladera.

4.3.1.1. Tipos de extensómetros

Existen diversas formas de construir un extensómetro de manera artesanal a través de la vasta diversidad de materiales que presenta el mercado. El tipo de extensómetro a construirse dependerá en gran manera de la situación en la que se esté desarrollando el movimiento de masa, es decir la velocidad a la que se está desplazando el suelo.

Primeramente, se encuentran los extensómetros que proveen de información muy tosca, es decir de carácter cualitativo, los cuales se utilizan para afirmar que existe un movimiento de masa activo y no solamente grietas o fisuras en el suelo debidas a fenómenos físicos tales como sismos o erupciones cercanas.

Entre estos tales tipos es común la utilización de estacas de madera por los geólogos en ambientes mineros. El método consiste en instalar estacas de madera dentro de las fisuras, de tal manera que queden muy ajustadas. Periódicamente, un técnico es enviado a visualizar dichas estacas para comprobar el estado de las mismas.

Para estas observaciones se presentan dos tipos de posibles situaciones: la primera es observar que efectivamente la estaca de madera sigue de una manera ajustada dentro de la fisura, lo cual significa que la misma no se ha hecho más ancha, indicando que la ladera no se ha desplazado en ese lapso de tiempo. La segunda situación se presenta cuando la estaca ya no se encuentra ajustada dentro de la grieta o fisura, esto puede indicar que el movimiento de ladera está empezando a activarse y por lo tanto es necesario monitorearla por medios más exactos.

Sin embargo, las condiciones climáticas en el lugar pueden afectar el estado de la estaca. Es decir, lluvias continuas sobre el área pueden meteorizar el estrato de suelo o roca donde se ha encontrado la fisura, haciéndola a su vez más ancha, sin que esta variación represente un movimiento de ladera recientemente activado. Además en lugares donde existen temperaturas muy altas, la madera tiende a reducir sus dimensiones debido a que dicho material es muy susceptible a cambios de temperatura, logrando de esta forma que la estaca no conserve sus dimensiones originales.

Otro método de monitoreo es la utilización de placas de vidrio o yeso para detectar un movimiento de ladera. Este consiste en colocar placas de vidrio o de tablayeso sobre los lugares donde se ha encontrado la fisura y anclarla a ambos lados de la misma. Debido a que ambos materiales ofrecen poca resistencia a la tensión, se romperán fácilmente si una de las masas se empieza a desplazar. El método es bastante económico y regularmente se utiliza en movimientos de ladera que se presume que desarrollarán velocidades sumamente bajas tales como reptaciones.

Dicho método presenta aún otra ventaja sobre el anterior, el cual es poder medir el desplazamiento relativo de la grieta sobre las placas que han sido fracturadas por el mismo. Por esta razón se coloca en movimientos muy lentos, ya que las distancias deben ser lo suficientemente cortas para medirse fácilmente con un calibrador o vernier sobre la superficie del material fracturado. En movimientos con velocidades más altas, este método resulta inútil.

Por otra parte, se debe tomar en cuenta que el material como el yeso sufre rápidos procesos de desgaste debido a la meteorización. Además, es importante la señalización adecuada de dichas placas para que ninguna persona pueda pisarlas por accidente y quebrarlas, debido a que tales

materiales presentan poca resistencia a la flexión. Asimismo se debe tener un especial cuidado con la fauna de los alrededores, ya que estos también pueden pisar las placas o, en el peor de los casos, corroerlas.

Por último, se presenta el método de extensómetros utilizando pasadores como referencia. Estos son mayormente utilizados en el medio debido a la cantidad de información que provee el método respecto de los anteriores, aunque involucre más recurso y técnica en cuanto a su construcción.

Como se ha mencionado anteriormente, un extensómetro debe consistir de dos soportes: uno "fijo" ubicado en un punto distante del escarpe principal del deslizamiento y un soporte "móvil" ubicado en la zona del deslizamiento estudiado, unidos por medio de un cable o cordón que permita deformarse ante el movimiento presentado y un dispositivo de lectura visual de fácil acceso y comprensión para realizar las mediciones diferenciales y poder registrarlas.

Con base en lo anterior, se pueden construir distintos tipos de dispositivos que cumplan con tales requisitos. Regularmente, son fabricados de metal debido a la variedad de formas que brinda el mercado, a la versatilidad que posee dicho material para ser manufacturado y a la resistencia que ofrece a la intemperización. De igual manera, el cable y el dispositivo de lectura generalmente son metálicos, en donde el último puede referirse a una regla graduada o bien una cinta métrica.

El método consiste en la colocación de dos soportes anclados firmemente al estrato o estratos superficiales de suelo o roca de la ladera, el sistema de anclaje y el tipo y las dimensiones de los pasadores dependerá de la condición del suelo y de la estructura a ser monitoreada, debido a que se debe asegurar

la máxima rigidez en las fijaciones para que permanezcan ancladas mientras se desarrolla en sistema de monitoreo

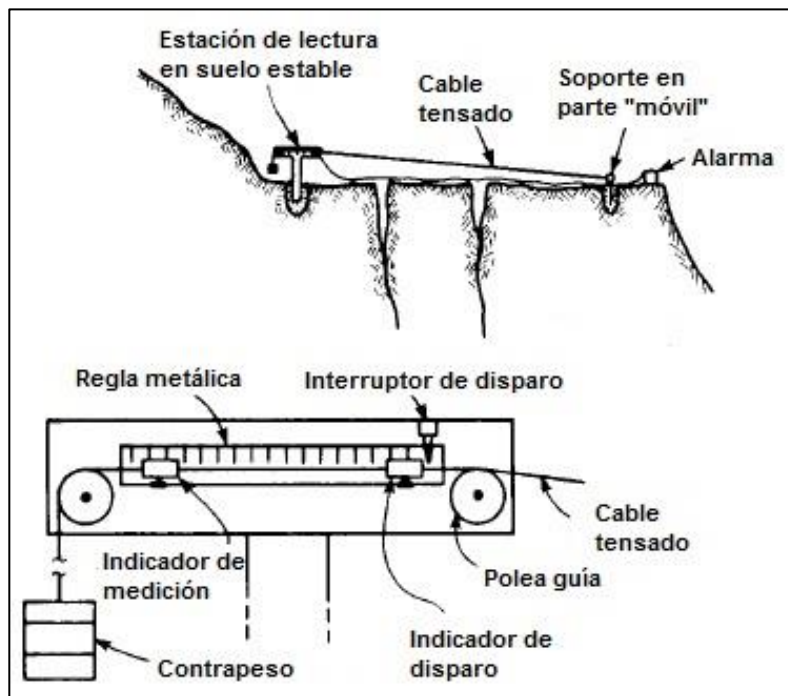
Los extensómetros que son colocados usualmente en lugares donde se espera una lenta velocidad de movimiento utilizan como dispositivo de lectura un calibrador, cinta métrica o bien una regla metálica. Por lo general, las longitudes de los claros de los mismos son cortas y las dimensiones necesarias tanto para los soportes como para el cable son pequeñas.

Algunos autores sugieren pasadores de un cuarto de pulgada de diámetro (0,006 m) y una longitud de una pulgada (0,025 m) de longitud fuera de la superficie con una cabeza más ancha en la parte superior cuando se trata de estratos rocosos duros que no presentan problemas de erosión. El anclaje debe de ser barrenado al estrato rocoso y fijado con resina epóxica a la roca. Mientras que para suelo o roca blanda o estratos que presenten erosión, los pasadores deben de ser de media pulgada de diámetro (0,013 m) y de una longitud de veinte pulgadas (0,500 m) sobre la superficie del terreno, la fijación puede ser con epóxico si se trata de rocas, o bien utilizando una lechada de concreto cuando se trata de suelo.

De forma alternativa en lugares donde se espera una velocidad de movimiento más alta o bien se desconoce la misma, se colocan pasadores y cables más rígidos y de mayor longitud, debido a que la mayoría de veces, se presentan asentamientos diferenciales muy grandes entre la corona y el cuerpo principal del deslizamiento. En estos casos, se suele construir una estación de lectura en la parte "fija" de los soportes, la cual consiste en la colocación de una polea sobre el mismo y un contrapeso añadido al cable, para asegurar que este se mantendrá siempre sometido a tensión, además de la construcción de un

bloque guía soldado al cable sobre una regla metálica como dispositivo indicador para la lectura de la deformación (ver figura 39).

Figura 39. **Extensómetro artesanal utilizando contrapeso**



Fuente: DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. p. 211.

Por último, en movimientos donde se estima una velocidad alta o se desconoce la misma, o bien en lugares donde el deslizamiento puede afectar a poblaciones cercanas, es usual colocar una alarma que se dispare cuando el desplazamiento diferencial del movimiento ha llegado a cierta magnitud que se considere crítica, con el fin de iniciar una evacuación inmediata de los pobladores cercanos hacia centros de albergue u otra infraestructura alejada del movimiento activo.

4.3.2. Extensómetros utilizados en Guatemala

En Guatemala, la Coordinadora Nacional contra la Reducción de Desastres, por sus siglas Conred, es la encargada de monitorear fenómenos naturales que puedan poner en riesgo a la población guatemalteca. Dentro de dicha institución, existe un departamento que monitorea a través de extensómetros fabricados de manera artesanal los posibles deslizamientos que puedan ocurrir en las zonas más vulnerables del país que puedan poner en alto peligro a comunidades cercanas.

La institución ha fabricado dos tipos de extensómetros para suplir dicha necesidad: el primero consiste en una estructura de acero, ver figura 40, que posee una polea en su interior, en la cual se desliza un tensor elástico de tipo industrial de media pulgada de diámetro (0,013 m) que está sujeto a la estructura de acero en uno de sus lados mientras que por el otro lado se encuentra soldado en su terminal un cable de acero de un cuarto de pulgada de diámetro (0,006 m), el cual emerge por un extremo de la estructura hacia el soporte “móvil” que se encuentra sobre el deslizamiento. En la parte superior, existe un indicador unido al cable, el cual atraviesa una ranura y muestra el desplazamiento diferencial sobre una regla metálica que ha sido remachada sobre la estructura metálica.

Dicho instrumento no posee contrapeso físico, sin embargo la función del tensor elástico interno es precisamente generar resistencia al movimiento para que el cable se mantenga siempre tenso al momento de instalarse. Además posee argollas en los extremos para instalar cuatro pasadores, los cuales incrustan el extensómetro firmemente al suelo para evitar que el soporte “fijo” se desplace o bien que el instrumento sea objeto de pillaje.

Figura 40. **Extensómetro artesanal**



Fuente: instalaciones de Conred, 2014.

El segundo dispositivo es una alarma de disparo, ver figura 41, el cual posee también una estructura de acero que posee en su interior un circuito conectado un cable de acero, el cual al sobrepasar cierto desplazamiento crítico envía una señal por medio de un cable TSJ hacia otro dispositivo, que activa una alarma ubicada en una vivienda cercana fuera de la zona de movimiento, para que pueda darse aviso a los pobladores expuestos en el área afectada y a los técnicos encargados de la Conred.

Los pasadores que utilizan como soportes están elaborados de tubo proceso ligero de dos pulgadas de diámetro (0,050 m), galvanizados para evitar que estos sean afectados por la corrosión debida a la humedad del suelo y de las condiciones climáticas del entorno en que son instalados.

Los pasadores tienen en un extremo una argolla soldada de hierro para fijar el cable en ellos, además de cumplir con la función de tope de cuando se instalan en el extensómetro. En el otro extremo, han sido golpeados a manera de generar una punta que facilite su inserción en el suelo (ver figura 42).

Figura 41. **Extensómetro artesanal con alarma de disparo**



Fuente: instalaciones de Conred, 2014.

Las longitudes de los pasadores fabricados usualmente miden 1,00 m de longitud. Sin embargo estos varían dependiendo del lugar donde se instalarán, ya que ocasionalmente en la corona del deslizamiento existen asentamientos diferenciales muy altos, razón por la cual es necesario colocar pasadores de mayor longitud para evitar que el cable entre en contacto con la corona del deslizamiento y se generen datos falsos sobre el movimiento.

Figura 42. **Pasadores para extensómetro artesanal**



Fuente: instalaciones de Conred, 2014.

Todo el equipo en mención es fabricado en los talleres de la Conred e instalado por los técnicos especializados de Conred en los lugares de interés que se procederán a monitorizar. Por otra parte, esta institución se dedica a capacitar a los pobladores de las comunidades afectadas o cercanas para que, a través de su apoyo, se pueda realizar un monitoreo constante de la instrumentación colocada en el lugar.

Además, como se mencionó anteriormente, la alarma de disparo del extensómetro es instalada en una vivienda cercana al área de estudio, la cual pertenece a un miembro del Consejo Comunitario de Desarrollo, por sus siglas Cocode, el cual ha sido capacitado por el personal de la Conred para dar aviso

e instrucciones a la comunidad que se encuentra en peligro debido al movimiento de masa.

4.3.2.1. Descripción del funcionamiento de la instrumentación

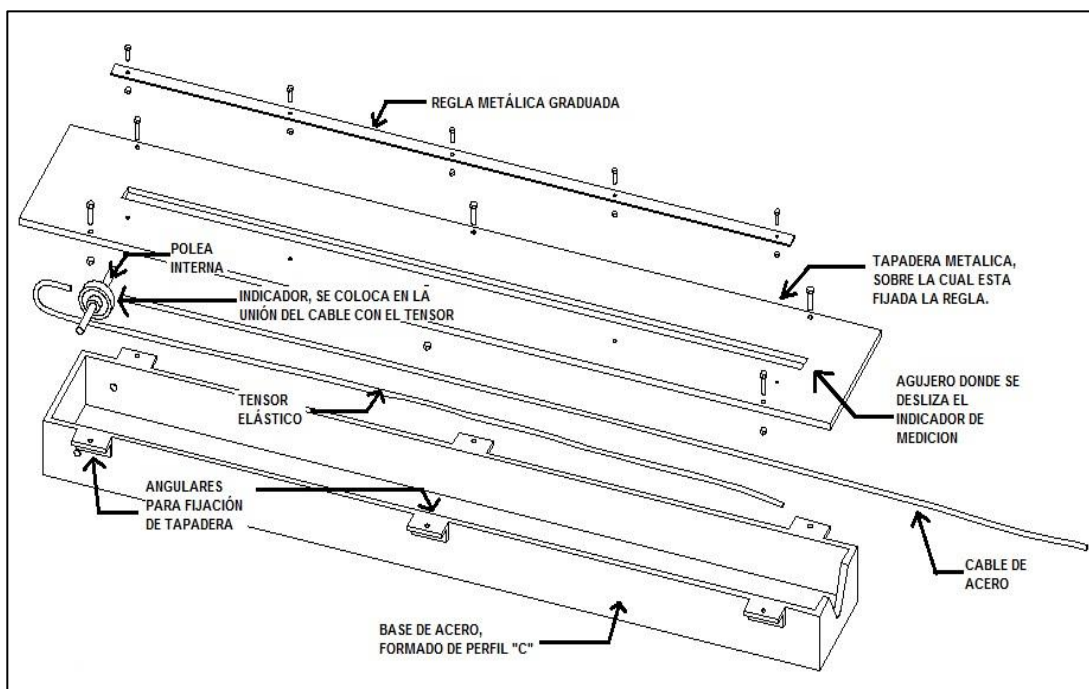
Básicamente, la instrumentación descrita anteriormente es la que se utiliza en el ámbito del monitoreo de laderas a nivel estatal, dado a que la Conred ha sido la institución encargada de monitorizar dichos fenómenos. Organizaciones tales como la unidad de Geología de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (Cesem) y la Sociedad Geológica de Guatemala han realizado estudios sobre la generación de deslizamientos utilizando otros métodos, o bien realizando análisis e interpretación de los datos facilitados por la Conred.

La Conred ha fabricado dos tipos de extensómetros para monitorear las laderas, los cuales se utilizan para generar diferente información, sin embargo el extensómetro que se postula para el método actual es aquel que consiste en una estructura de acero con una polea interna sobre la cual se desliza un tensor elástico de tipo industrial que está sujeto a la estructura de acero en uno de sus extremos mientras que se encuentra soldado a un cable de acero en el otro extremo. Sobre el cable de acero existe un indicador artesanal, el cual atraviesa una ranura y refleja el desplazamiento diferencial sobre una regla metálica que ha sido remachada sobre la estructura del extensómetro. La figura 43 muestra el esquema del extensómetro separado en sus respectivas piezas.

El cuerpo del extensómetro puede fabricarse con lámina metálica de diferentes espesores (se encontró en la visita un ejemplar fabricado de metal extraído del chasis de un vehículo) o bien utilizar un perfil tipo C, al cual se le

añaden angulares pequeños para poder recibir la tapadera metálica. Dentro del cuerpo se encuentra una polea en la cual circula el tensor elástico de tipo industrial. Dicho tensor está fabricado de un elástico reforzado con hilos de polipropileno, lo cual le permite sufrir elongaciones de hasta el 300 % sin llegar a la ruptura, soportando esfuerzos últimos a la tracción de 400 Kg/cm². El tensor es sujetado en un extremo por una varilla en forma de gancho dentro del cuerpo del extensómetro y, en el otro, a la base del indicador metálico.

Figura 43. Esquema de construcción de extensómetro artesanal



Fuente: elaboración propia.

Otra función más del indicador es evitar que el tensor retroceda más allá de la polea, lo cual se logra fabricando una base anular que sea más ancha que la abertura de la polea. Por otra parte, el cable es sujetado en el otro extremo de la base del indicador, funcionando dicha base como unión entre ambos

materiales; mientras que por el otro extremo es sujetado por el pasador que fue colocado en el área del movimiento de ladera. El cable de acero emerge del extensómetro a través de un agujero realizado en una de las caras del cuerpo.

En la tapadera metálica se realiza una ranura para que el indicador pueda correr a través de ella, la cual se debe alinear con la regla metálica. Es de suma importancia que el tensor quede en una posición estirada y fija para evitar problemas de calibración al momento de utilizar el instrumento. De otra manera, el tensor puede encogerse y necesitaría un esfuerzo inicial para que el instrumento inicie a medir deformaciones diferenciales asociadas al movimiento de ladera, las cuales utilizaría para regresar a una postura tensa.

Se recomienda utilizar el extensómetro artesanal para realizar monitoreos de movimientos de velocidad moderada y lenta. En movimientos rápidos, muy rápidos o extremadamente rápidos, rara vez es posible colocar algún dispositivo físico que permita monitorizar la velocidad del fenómeno, mientras que para movimientos muy lentos o extremadamente lentos no es posible realizar mediciones exactas debido a la poca precisión que presenta dicho instrumento para mediciones milimétricas. Sin embargo podría utilizarse siempre y cuando el monitoreo se realice con menos frecuencia para dar lugar al instrumento a registrar una cantidad de desplazamiento mayor.

Por último, la norma ASTM E83, la cual regula la calibración de los extensómetros, recomienda no construir dispositivos mecánicos autónomos de grandes longitudes. Esto debido al efecto negativo que puede producir la frecuencia natural del cable en extensiones mayores, generando oscilaciones no deseadas que puedan dificultar la toma de datos y dar lugar a un error en la lectura de los mismos. Hasta la fecha no se ha reportado ningún problema de este tipo con los materiales utilizados en el extensómetro artesanal.

4.4. Calibración del equipo

La importancia de la calibración de cualquier instrumento de medición radica en la exactitud de los valores que presenta al momento de su utilización. Básicamente, cualquier instrumento puede calibrarse de alguna u otra manera. Para el extensómetro artesanal no existe método alguno para realizar este procedimiento, por lo que se propone un método adaptado a la normativa internacional que rige tales parámetros.

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés ASTM, posee un artículo en el cual plantean una normativa específica para la calibración de un extensómetro. La norma E83 comprende los procedimientos para la clasificación de sistemas de medición a través de extensómetros, dependiendo de la magnitud de sus errores, la norma está orientada tanto a instrumentos con implementos electrónicos y dispositivos auxiliares de medición, así como dispositivos que funcionan bajo condiciones mecánicas autónomas, el cual es el caso del extensómetro en estudio.

La norma define dos tipos especializados de extensómetros: los utilizados para medir deformaciones negativas, es decir bajo esfuerzos de compresión, y los utilizados para medir deformaciones de movimiento, que por lo general no utilizan una longitud de referencia específica, llamados deflectómetros. El extensómetro artesanal está catalogado dentro del segundo grupo debido a que precisa registrar la deformación ocasionada únicamente con el movimiento, compararla con la longitud de la masa total sería inútil ya que las deformaciones unitarias encontradas serían despreciables debido a su mínima magnitud, e ineficientes debido a la gran extensión de material que debiera recorrer el extensómetro.

Además, la norma también clasifica los distintos sistemas de medición por medio de extensómetros en tres diferentes:

- El sistema de extensómetro tipo 1 es aquel sistema que define tanto la longitud de referencia del elemento en estudio, así como la longitud de la deformación del mismo, reflejando en sus lecturas la suma de ambos.
- El sistema de extensómetro tipo 2 es aquel que define únicamente la longitud de la deformación del elemento fijo.
- El sistema de extensómetro tipo 3 está caracterizado por consistir en instrumentos que utilizan el principio radiométrico, registrando únicamente deformaciones según el estado de la superficie del elemento.

Antes de calibrar cualquier equipo, es necesario comprobar que todos los componentes estén funcionando correcta y adecuadamente. Se debe examinar exhaustivamente todas las partes asociadas al movimiento que genera el equipo, tales como el tensor elástico, la polea interna y el cable de acero, y comprobar que no se encuentren demasiado desgastadas; de ser así, dichas piezas deben reemplazarse. También debe de realizarse una limpieza para remover todo el polvo que se haya acumulado debido al uso normal del instrumento, así como un mantenimiento al eje de la polea interna.

El extensómetro artesanal registra mediciones con un indicador metálico sobre una regla graduada, la cual toma mediciones del orden de $\pm 0,001$ m. Sin embargo, el indicador sobre la regla está elaborado de manera artesanal, por lo que registrar mediciones de dicho orden puede generar errores; se recomienda

entonces registrar mediciones del orden de $\pm 0,005$ m para asegurar mediciones correctas.

El objetivo primordial de la verificación es definir si las mediciones realizadas por este instrumento están dentro del margen de error permisible. Esto se logra comparando una medida registrada por el extensómetro artesanal con la medición de un dispositivo de mayor exactitud, tales como una cinta métrica o un telemetro láser. La norma E83 determina que la longitud real debe medirse con un instrumento que tenga una precisión de al menos la mitad de la precisión del extensómetro analizado, para lo cual una cinta métrica o un telemetro digital cumplen con dicho requisito debido a que la precisión de los mismos es de $\pm 0,001$.

La norma establece que los deflectómetros, debido a que no poseen una longitud de referencia específica, deben calibrarse utilizando valores aleatorios que puedan ser medidos por el dispositivo. Se deben escoger al menos cinco valores diferentes, sin incluir el cero. Tales valores deben cumplir con una condición: la diferencia de dos valores sucesivos no debe ser mayor que un tercio de la diferencia entre el valor máximo y mínimo escogido, se recomienda utilizar un valor mínimo de 0,10 m y un valor máximo de 0,90 m esto con el fin de tener un amplio margen de valores para mediciones y para observar el comportamiento con mediciones de diferentes tamaños.

Según la norma, la calibración debe realizarse mientras el instrumento está trabajando de manera habitual en el campo. Por esta razón, es recomendable fijar el instrumento en un valor aproximado a 0,10 m inicialmente para luego realizar la misma medición, con cinta métrica o telemetro láser, bajo un método indirecto, el cual consiste en la medición de la longitud de referencia con otro instrumento distinto al extensómetro en calibración. Dicho

extensómetro debe desmontarse para dar lugar al nuevo instrumento, midiendo la distancia que existe entre las marcas generadas por la colocación del extensómetro sobre el suelo.

Cada valor escogido para la calibración debe medirse de manera indirecta al menos dos veces bajo el mismo procedimiento, registrando en cada medición los siguientes valores en una tabla:

- Medición de deformación real: en la primera columna se registran los valores de la deformación obtenidos a través de la cinta métrica o teodolito láser.
- Medición de deformación calibrada: en la siguiente columna se registran los valores de la deformación obtenidos a través del extensómetro artesanal.
- Error de corrección: en la tercera columna se registran las diferencias que existen entre la medición de deformación calibrada y la medición de deformación real, considerando los signos resultantes.
- Error relativo: en la cuarta columna se registran los cocientes entre el error de corrección y la medición de la deformación real, considerando los signos resultantes.

Por lo tanto el factor de calibración o corrección es el inverso del promedio obtenido del error relativo más uno, es decir:

$$FC = (\overline{Error\ relativo} + 1)^{-1}$$

Con base en los valores mínimos que puede registrar el extensómetro artesanal se puede clasificar como un extensómetro de clase “D” debido a que se cataloga como un sistema de extensómetro tipo 2. El error mínimo permisible para un extensómetro de clase “D” es de $\pm 0,01$ m respecto de la medición real o bien un error relativo de ± 1 %. Si alguno de estos parámetros no se cumple es necesario comprobar el estado del tensor elástico ya que es el elemento que posee menos resistencia a la fluencia y un alto valor en su deformabilidad.

La norma recomienda realizar verificaciones anuales de cada instrumento. En ningún caso el lapso de verificación deberá sobrepasar los 18 meses, a menos que el instrumento esté siendo utilizado en un monitoreo de un período mayor a los 18 meses. En dicho caso, la calibración se realizará inmediatamente después de la finalización del monitoreo. Además, toda vez que se realice una reparación o ajuste mecánico en el instrumento, el mismo deberá ser sometido a un proceso de calibración antes de ser utilizado en algún monitoreo.

5. SISTEMATIZACIÓN DEL MÉTODO DE MONITOREO

La palabra sistematización se refiere a la creación de un método con base a un conjunto de principios que se encuentran relacionados entre sí para alcanzar un objetivo en común. El monitoreo, utilizando extensómetros artesanales, no cuenta con un técnica metodológica de uso, aunque es empleado en el ámbito del movimiento de laderas valiéndose de conocimientos empíricos debido a que la instrumentación no se encuentra normada por ninguna institución ya que su construcción es totalmente artesanal. Por esta razón es importante generar un sistema para la utilización de dicho instrumento para generar información más concreta al momento de analizar los deslizamientos. Dicho sistema está representado en la figura 44.

5.1. Niveles de alerta

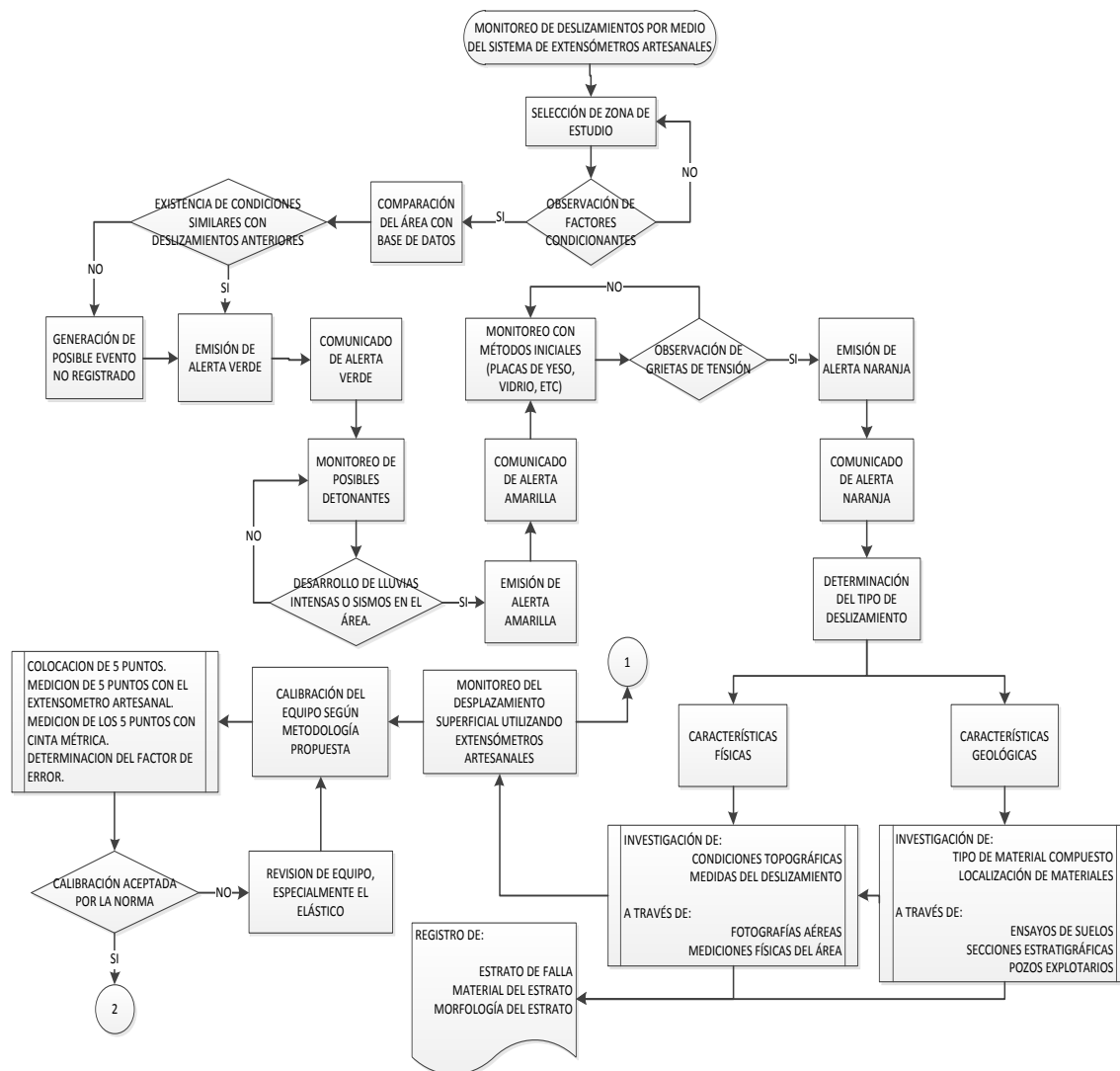
Guatemala es conocido a nivel mundial como un país con tendencia a múltiples amenazas naturales, entre las cuales se encuentran los deslizamientos. Por lo tanto, al crear la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres, Conred, le fue asignada la tarea de prevenir, mitigar, atender y participar en la rehabilitación y reconstrucción de los daños derivados de la presencia de los desastres.

Para dar seguimiento a sus funciones, la Conred ha implementado sistemas de alerta temprana, SAT, los cuales se encargan de generar y comunicar información que permita a una estructura comunitaria organizada tomar decisiones de manera preventiva, tales como la evacuación. Además, es a través de tal sistema y por medio de programas de organización y

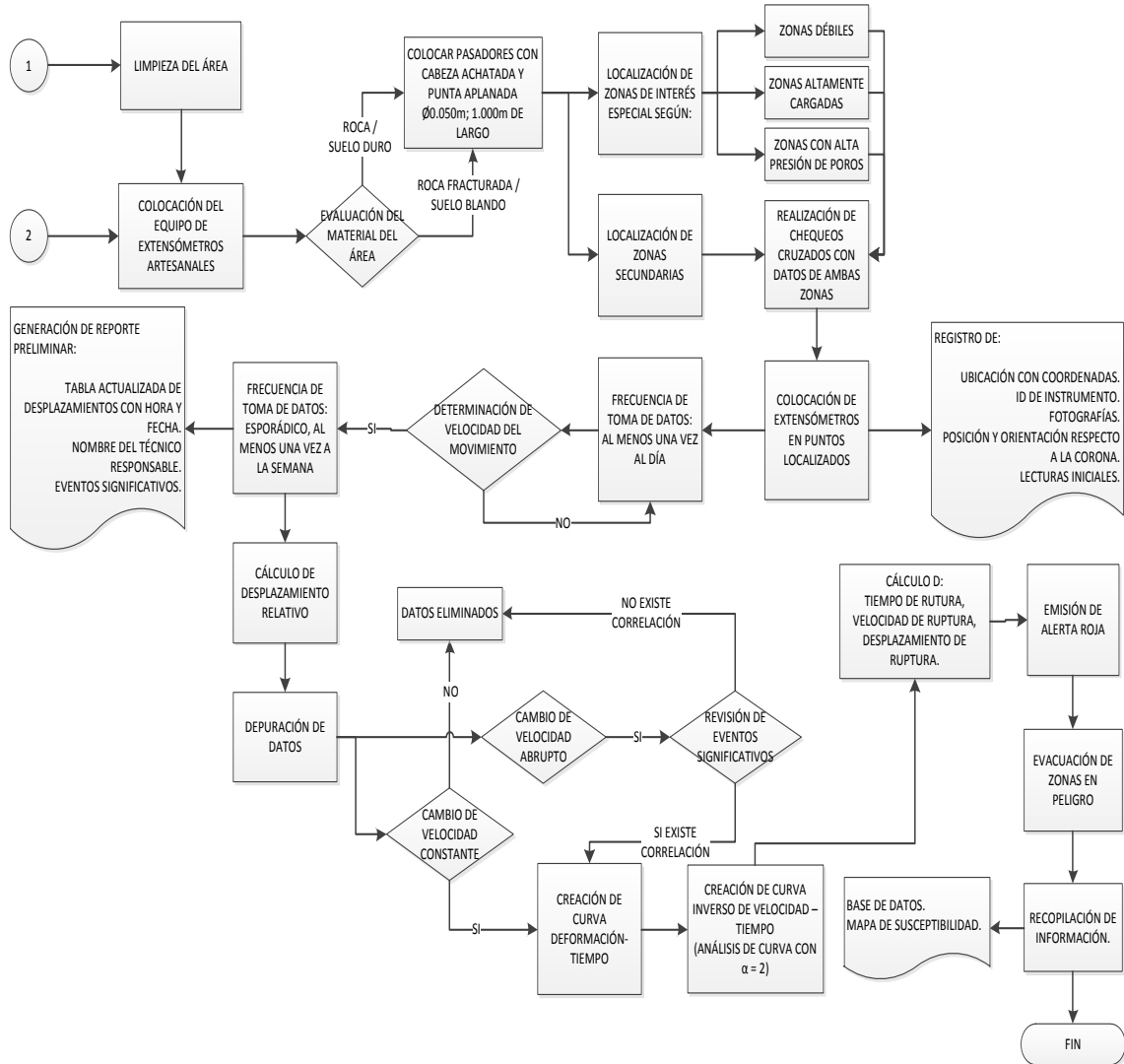
capacitación a tales comunidades, así como la tecnificación y el adiestramiento del personal en el uso de la instrumentación necesaria para monitorear los desastres.

Las fases que siguen los sistemas de alerta temprana comprenden cinco etapas cíclicas:

Figura 44. Diagrama de flujo del sistema de monitoreo propuesto



Continuación de la figura 44.



Fuente: elaboración propia.

- **Monitoreo:** la Conred define esta fase como la medición y la observación sistemática, continua y permanente de la manifestación de determinado fenómeno. Sin embargo, dado el contexto del presente trabajo de graduación, es en esta fase donde se lleva a cabo la observación de

todo aquel factor detonante que pueda originar un deslizamiento, tales como períodos de lluvia prolongados o actividad sísmica intensa.

- **Pronóstico:** utilizando los datos recolectados en el monitoreo de eventos anteriores en condiciones similares, se pueden generar pronósticos con base a modelos matemáticos para la ocurrencia de los movimientos de laderas. La importancia de las regresiones matemáticas es lograr predecir umbrales de actividad para la ocurrencia de movimientos de ladera.
- **Emisión de alerta:** al determinar la posibilidad de superación de los umbrales límite en los modelos matemáticos, se emite una alerta hacia los líderes de las comunidades que se determinen en riesgo inminente, así como también a entidades locales que puedan brindar apoyo durante las evacuaciones. Es durante esta fase de los SAT donde se han observado las apariciones de las primeras grietas u otras evidencias del inicio de movimiento en una ladera. El monitoreo de la misma a través de extensómetros debe ser constante más allá de este punto.
- **Comunicación de alerta:** una vez emitida la alerta es importante que se comunique en cada comunidad que se han determinado en riesgo inminente.
- **Evacuación:** en caso que los pronósticos generados con los métodos presentados posteriormente (Saito o Fukuzono) con base en los datos actualizados frecuentemente demuestren que el deslizamiento sea inminente es imperativa la evacuación de las comunidades afectadas hacia los albergues establecidos temporalmente.

En el momento que se genera una situación que implique un desastre natural, la Conred puede activar cualquiera de las alertas que existen a nivel nacional, las cuales son dos: la alerta institucional, la cual opera únicamente para su personal así como para enlaces institucionales del sistema; mientras que la alerta pública opera para cada persona del país o región, dependiendo de la magnitud del evento. A su vez, las alertas están divididas en cuatro:

- Alerta verde: durante la misma las actividades siguen de manera usual, lo cual no debe ser motivo para dejar la vigilancia del origen de cualquier evento. Bajo esta alerta se mantiene toda aquella comunidad que se encuentre en terrenos que estén afectados por algún factor condicionante para generar un movimiento de ladera.
- Alerta amarilla: se ha detectado el origen de algún evento, por lo que es necesario tener prevención y preparación ante cualquier situación que se pueda suscitar, así como atender las recomendaciones de las autoridades. Bajo esta alerta se mantienen las comunidades que vivan en laderas potenciales a deslizamientos y que han estado expuestas a períodos de lluvia intensa o actividad sísmica intensa de mediana o alta magnitud. Es durante esta fase que se recomienda mantener un monitoreo preventivo constante de los factores detonantes que puedan activar el deslizamiento.
- Alerta naranja: es inminente la generación del peligro, sin embargo aún no se ha originado el mismo. Bajo cualquier signo de peligro observado, es recomendada la evacuación de las zonas de peligro y el traslado hacia albergues provisionales. así como seguir las instrucciones de las autoridades. Bajo esta alerta se mantienen las comunidades que han detectado grietas en las laderas, generando pequeños escarpes, así

como la detección de pequeñas grietas en viviendas que se encuentren construidas sobre las laderas. Es en este momento donde se recomienda colocar la instrumentación para monitorear los desplazamientos diferenciales que puedan originarse en las grietas.

- Alerta roja: durante la misma es necesaria la evacuación de zonas de peligro, así como la permanencia de los evacuados en refugios provisionales. La sujeción a las instrucciones emitidas por las autoridades es fundamental. Bajo esta alerta se mantienen las comunidades que han detectado grietas en las laderas, generando escarpes muy grandes, así como la detección de grandes grietas en varias viviendas que se encuentren construidas sobre las laderas o bien cuando las comunidades advierten que los niveles de agua de los pozos locales han comenzado a disminuir en medio de época lluviosa.

5.2. Estructura del método

Primordialmente, un método de monitoreo para un deslizamiento activo posee cinco elementos básicos o signos vitales (Wieczorek y Snyder, 2009) que pueden ser acoplados a regiones generales.

Existen diversas formas de generar la información para cada signo vital a evaluar, sin embargo un método de evaluación más complejo repercutirá en un costo mayor.

Por otra parte, la complejidad del método está relacionada con la cantidad de información que puede recolectarse del movimiento de ladera, por lo tanto con una complejidad alta es posible generar una base de datos más amplia y

detallada, que con métodos de evaluación más simples. Estos signos vitales incluyen:

5.2.1. Determinación del tipo de deslizamiento

El primer signo vital importante para la examinación de un movimiento es la determinación del tipo de deslizamiento que ha ocurrido, el cual puede ser determinado mediante la observación en campo de las características físicas del deslizamiento, el tipo de material del movimiento inicial y el tipo de movimiento dominante. La identificación del deslizamiento consiste en la examinación directa en campo o la inspección de fotografías del deslizamiento tomadas por el personal evaluador, debido a que en ocasiones no es posible el acceso al cuerpo interno del deslizamiento y a que las altas pendientes que puedan existir en el terreno.

Las fotografías en mención se deben tomar encajando puntos de referencia físicos, los cuales pueden utilizarse para realizar mediciones del deslizamiento. Además, la documentación del deslizamiento a través de fotografías es útil para la comparación con cualquier otro deslizamiento para detectar similitudes y diferencias con el nuevo movimiento.

Además, es importante la determinación del tamaño del deslizamiento; dichas mediciones deben incluir la longitud, ancho y pendiente para un mapeo preciso sobre un mapa topográfico. Por otra parte, debe determinarse el espesor del material movilizado debido a que una evaluación del volumen total de la masa desplazada puede ayudar en la evaluación de la distancia total de desplazamiento o bien, de una posible reactivación en el futuro. La medición es realizada a través de personal que recorre el cuerpo del deslizamiento con cintas métricas para generar la información previamente mencionada.

La evaluación física, así como el muestreo fotográfico, deben de realizarse inmediatamente después de la iniciación del movimiento, debido a que una observación constante del movimiento activo puede ayudar a una correcta caracterización del tipo de deslizamiento. No es recomendable retrasar la observación inicial algunos días o meses, debido a que el deslizamiento podría reiniciarse y no tener datos acertados acerca del primer movimiento.

De la misma manera, cuando se realizan mediciones físicas sobre el deslizamiento es importante generar dicha información desde el primer día de activación, continuamente, para determinar si el movimiento aún persiste. Estos datos son utilizados para verificar si el tamaño de la masa deslizada está cambiando, lo cual podría ser un indicador de un riesgo en aumento.

5.2.2. Investigación de las causas de origen del deslizamiento

Usualmente, la activación de un deslizamiento involucra eventos meteorológicos y sismológicos que afectan la subsuperficie generada en los estratos de los distintos materiales geológicos. La identificación del factor detonante es importante, sin embargo esta tarea puede dificultarse en ocasiones, por ejemplo si se observa que una ladera empieza a deslizarse durante un sismo o una tormenta, el factor detonante puede ser fácilmente identificado.

La recolección de la información meteorológica para la documentación de un deslizamiento puede realizarse de dos maneras: la primera es utilizar la información que proveen las instituciones encargadas de monitorear los cambios climáticos en nuestro país, en este caso el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (por sus siglas,

Insivumeh), quienes proporcionan boletines con la información general acerca de la cantidad e intensidad de precipitación así como también magnitudes e intensidades sísmicas que son registradas en cada estación meteorológica que poseen.

La segunda manera para monitorear los efectos naturales en un deslizamiento es la construcción de una estación meteorológica sencilla cerca del área afectada. Dicha estación debe poseer al menos un pluviómetro y un sismógrafo, instrumentos que pueden ser fabricados artesanalmente. La construcción de dicha estación debe realizarse en un punto donde la vegetación o estructuras del lugar no interfieran con el registro de la información meteorológica. Además, dicho punto debe estar sobre un terreno estable, de fácil acceso y que se encuentre fuera del alcance de escombros generados por el deslizamiento. Es necesario un mantenimiento regular en el caso de realizar monitoreos continuos.

En el caso de utilizar información que no es generada directamente en el área del deslizamiento, es importante realizar correcciones e interpolaciones con estaciones cercanas para detectar el valor aproximado de precipitación sobre el área. Se hace mención de un valor aproximado debido a que existen factores físicos que pueden alterar este dato, tales como la velocidad del viento, la temperatura, las diferencias de altitud y distancia entre la estación que genera la información y el área del deslizamiento. En el caso de los valores sísmicos, es importante conocer el punto donde se originó el mismo, así como la profundidad para realizar correcciones igualmente.

La información deberá ser obtenida de una manera continua una vez haya iniciado el movimiento. Regularmente, el registro de intensidad de precipitación es llevado a cabo cada 24 horas, exceptuando las ocasiones en las que se

generan tormentas, en las cuales se recomienda una lectura de datos cada hora. De la misma manera, la información generada por el sismógrafo deberá ser registrada cada hora, exceptuando los momentos donde se generan sismos en los cuales se recomienda un registro continuo a lo largo de toda la duración del fenómeno.

La información recolectada deberá ser analizada, incluyendo para dicho fin los datos que involucren intensidades de precipitación de días, semanas o meses anteriores, y comparada con registros de desplazamientos para establecer adecuadamente el factor detonante del deslizamiento, y finalmente registrada. La importancia de la correcta documentación acerca de los efectos climáticos sobre el movimiento de laderas radica en generar información útil para comparar con deslizamientos que se originen en el futuro que muestren características similares.

5.2.3. Determinación de los materiales geológicos involucrados en el deslizamiento

La evaluación de los materiales geológicos puede ser realizada fácilmente a través de un método directo, un examen físico de los materiales en la zona, o bien a través de un método indirecto, en el cual se generan secciones estratigráficas por medio de la inducción de la información que se presenta en los mapas geológicos de la zona. De cualquier manera, la visita de geólogos al campo debe ser obligatoria para la recolección de muestras del estrato superficial que participa en el deslizamiento. En la medida de lo posible, es recomendable tratar de recolectar la mayor cantidad de muestras de los estratos involucrados.

Las muestras recolectadas de suelo o roca deben trasladarse al laboratorio para determinar la densidad específica y el porcentaje de contenido de agua de los materiales geológicos. Además, se pueden hacer ensayos secundarios para verificar la resistencia a corte, la cohesión *in situ* del material, el porcentaje de vacíos y la cantidad de contaminación orgánica que pueda existir dentro del material.

Usualmente, en deslizamientos superficiales, es decir menores a tres metros de profundidad, es posible identificar el estrato de falla a través de una inspección externa, sin embargo cuando ocurren deslizamientos profundos es necesaria la inspección de los estratos a través de un pozo exploratorio, lo cual encarece en gran manera el método. Por otra parte, es necesaria la inspección visual del geólogo en estratos intemperados superficiales para determinar si existe una alta infiltración de precipitación a través de grietas que presente el material.

La evaluación de los materiales geológicos que conforman el deslizamiento debe realizarse lo más pronto posible, evitando que el personal evaluador corra algún tipo de riesgo. Como se ha visto anteriormente, se puede recolectar información crítica cuando el movimiento justo inicia a activarse. Dicha información puede ser importante para detectar el tipo de deslizamiento, así como para emitir advertencias acerca del peligro que genera el movimiento. Por último, es importante realizar este muestreo antes que el deslizamiento haya completado el movimiento mayor, o bien antes de que el mismo se reactive.

5.2.4. Medición del desplazamiento diferencial del deslizamiento

Existen diversos métodos para registrar la medición del desplazamiento que se está desarrollando en el movimiento de ladera, los cuales involucran distintos instrumentos que han sido enumerados en su mayoría en el capítulo anterior. Entre los más utilizados están los extensómetros mecánicos y artesanales, el método de GPS o bien DGPS, tecnología InSAR y DInSAR, e inclinómetros. Estos últimos pueden proporcionar, además de registrar el desplazamiento diferencial en la superficie, datos del movimiento que ocurre en la superficie de falla. Es importante anotar que un instrumento más complejo puede proporcionar mayor información del movimiento, pero esto repercute en el costo generado en el recurso humano y equipo utilizados para el monitoreo.

Por último, es importante proteger y señalizar cualquier instrumento que se coloque en el área. Esto se realiza con pintura de colores brillantes o bien cercos de alambre espigado alrededor de las ubicaciones de los instrumentos. Además, los pozos que se realizan para la instalación de piezómetros o inclinómetros deben de ser protegidos por tapaderas metálicas y plástico para evitar derrumbes dentro del mismo. El cableado del equipo de instrumentación que se coloca, tal es el caso de los extensómetros de disparo, deben de ser protegidos por tubos *conduit* para evitar que los cables se rompan o sean objeto de pillaje. Este tema se amplía en las secciones 5.3. y 5.4.

5.2.5. Evaluación de riesgos que genera el deslizamiento local y regionalmente

El último signo vital se refiere al estudio del comportamiento del deslizamiento activo, es decir al análisis de los datos recolectados para generar

información pertinente, tal como la velocidad y tiempo esperado de ruptura a través de modelos estadísticos. Dichos temas se amplían en el inciso 5.5.

Por último se realiza una recopilación de la información obtenida a través de las visitas de campo, la cual es plasmada en un mapa donde se encuentren delimitadas las zonas que generen un riesgo mayor que afecte a las poblaciones cercanas. Mora y Vahrson (1991) idearon un método para generar un mapa que refleje la susceptibilidad a la ocurrencia de un deslizamiento, realizando una superposición de valores de influencia asignados a los factores más comunes de generación de deslizamientos.

Los factores que se proponen en el método se dividen en dos: los condicionantes, que consisten en una combinación de la topografía del terreno (S_r), el factor litológico de los estratos superficiales (S_l) y un factor que representa las condiciones de humedad relativa del suelo (S_h). Por otra parte, se presentan los factores detonantes consistentes en la intensidad sísmica (T_s) y la intensidad de precipitación (T_p). El método puede ser modificado para introducir la influencia y el efecto que tienen las causas antrópicas sobre el terreno.

Para cada factor es asignado un índice de influencia, dependiendo de las repercusiones que puedan tener las condiciones. Es decir, para pendientes muy elevadas (mayores a 800 m/km^2) es asignado un valor de 5 al factor S_r ; mientras que para pendientes muy bajas (desde 0 hasta 75 m/km^2) es asignado un valor de 0 al factor S_r . Una vez asignado el valor del factor a cada región, se procede a unificarlos en una ecuación que pueda medir el riesgo de ocurrencia del deslizamiento:

$$H = (S_r \times S_l \times S_h) \times (T_s + T_p)$$

Los valores para H varían desde 0 hasta 1875 unidades, los cuales son catalogados como clase I, es decir riesgo despreciable, si el valor es 6 o menor y como clase VI, es decir riesgo demasiado alto, si el valor sobrepasa 1250.

El método propuesto por Mora y Vahrson (1991) es una manera rápida, sencilla y económica de ubicar las zonas más susceptibles a deslizamientos, sin embargo el autor recomienda no utilizar dicho método para predecir los lugares en los cuales ocurrirán deslizamientos ni para pronosticar el tipo de deslizamiento que pueda suceder en determinada zona; sino únicamente para determinar la tendencia general y la distribución espacial de las laderas potencialmente inestables.

5.3. Muestreo de datos

La Sociedad Internacional para Mecánica de Rocas, ISRM por sus siglas en inglés, ha normado las técnicas para monitorear los movimientos superficiales y subsuperficiales con distintos instrumentos. El artículo titulado: “Métodos sugeridos para monitorizar los movimientos superficiales a través de discontinuidades”, publicado por la ISRM (2007), recopila cuatro distintos métodos que incluyen diversas sugerencias dadas por el autor.

Debido a que el autor recomienda que sus anotaciones sean utilizadas únicamente como una guía, se propone adaptar un método cuya instrumentación se asemeje al extensómetro artesanal, principalmente en la forma de operación, siendo este el monitoreo de desplazamientos a través de pasadores y cinta métrica. Además del funcionamiento similar, la precisión recomendada de ambos métodos es bastante similar, siendo ± 2 mm para el primero y $\pm 2,5$ mm para el extensómetro artesanal.

Luego de la localización y ubicación de los extensómetros, cuyas recomendaciones se plasman en la sección 5.4, es importante realizar una apropiada instalación de los mismos.

La forma, el tipo de material y las dimensiones de los pasadores que soportarán el equipo deberán ser apropiados para proveer soporte al sistema del extensómetro artesanal según la condición del suelo, asegurando que el anclaje del pasador al suelo permanecerá fijo e inamovible, mientras se lleva a cabo el monitoreo. El ISRM sugiere utilizar pasadores de 0,005 m de diámetro y 0,020 m de largo para concreto o superficies rocosas, mientras que para suelos o rocas blandas opina que se deben utilizar pasadores de 0,015 m de diámetro y 0,500 m de largo.

Sin embargo, la instrumentación que utiliza el método de monitoreo por cinta métrica es demasiado liviana en comparación con el extensómetro artesanal. Por otra parte, el ISRM registra también un método utilizando un extensómetro superficial eléctrico, cuya instrumentación es más similar al extensómetro artesanal; para este método se sugieren pasadores típicos entre 0,020 m y 0,030 m de diámetro y entre 0,50 m y 1,50 m de largo fabricados de materiales resistentes a la corrosión para evitar que las lecturas sean distorsionadas debido a efectos ambientales. Por lo cual conviene seguir utilizando los mismos pasadores de acero inoxidable de 0,050 m de diámetro y 1,000 m como mínimo que se utilizan por parte de la Conred.

Es recomendable construir los pasadores con puntas aplanadas en un extremo para su fácil inserción en el suelo, mientras que en el otro extremo la punta debería ser achatada, simulando el perfil de un clavo. Además, se recomienda esmerilar varias líneas cruzadas fabricando una especie de corruga

en la parte superior, con el fin de evitar corrimientos entre el instrumento y el pasador.

Antes de realizar la instalación de los pasadores, es necesario que la superficie esté limpia de cualquier material suelto que se encuentre en el área. Dependiendo del material predominante del deslizamiento, es posible que se necesite cementar los pasadores al suelo blando o bien realizar una perforación en estratos rocosos para luego cementar los pasadores; en ambos casos es necesaria una limpieza del polvo o material que pueda interferir con la adherencia del mortero. En caso que la línea imaginaria trazada entre el pasador fijo y móvil se encuentre obstaculizada por materia vegetal o suelo, es necesaria la limpieza y compactación del mismo. Es importante que no existan impedimentos en el trayecto del extensómetro artesanal.

Una vez se hayan instalado todos los extensómetros con sus respectivos pasadores, es importante llevar a cabo un reporte de instalación que contenga la siguiente información:

- La ubicación de los extensómetros en un croquis o mapa: identificación del instrumento, fotografías, así como también la posición y orientación de la corona del deslizamiento monitorizado.
- Detalles del punto de medición: los materiales y los procedimientos de instalación utilizados.
- Las lecturas iniciales de cada instrumento: es recomendable dejar una lectura inicial para evitar cualquier problema que pueda causar la relación entre la polea interna y el tensor elástico.

Durante el proceso inicial de monitoreo, es necesario realizar mediciones frecuentes para identificar la actividad del sitio y la razón a la cual cambian las lecturas. Una vez se haya determinado la velocidad del movimiento, se pueden efectuar inspecciones más esporádicas, realizando al menos una visita a la semana para revisar el extensómetro artesanal; y una visita al área una vez por día para registrar actividades inusuales ambientales. Las lecturas deben de ser registradas y comparadas inmediatamente con los registros anteriores para detectar algún incremento de velocidad repentina.

Por último, se debe generar y actualizar el reporte de monitoreo, en un período no mayor de dos días desde el registro de los desplazamientos, el cual debe contener como mínimo la siguiente información:

- Una tabla actualizada de las lecturas de los desplazamientos registrados durante el día identificando el punto de medición, la fecha y hora del registro y la temperatura.
- Los nombres de los técnicos responsables del registro de las mediciones, así como la firma de aprobación del ingeniero responsable del programa de monitoreo.
- Eventos significativos que hayan sucedido durante el día, tales como precipitaciones o sismos intensos, que puedan contribuir al entendimiento de la posible causa de activación del deslizamiento.

5.4. Puntos de colocación del equipo

La instalación de los instrumentos en campo debe ser guiada y asesorada por técnicos con experiencia en el tema, debido a que el criterio de los mismos

puede repercutir significativamente en los datos que registren a través de los instrumentos. La ISRM recomienda realizar monitoreos visuales con métodos más sencillos y económicos, tales como las placas de vidrio o yeso, con el fin de analizar a grandes rasgos el comportamiento del deslizamiento, así como su patrón de movimiento.

El objetivo principal que busca cumplir el técnico es el de seleccionar ubicaciones que reflejen el comportamiento predicho del deslizamiento, generando información compatible con el método de análisis de datos que se utilizará cuando se interpreten los datos. Un enfoque práctico para la selección de ubicaciones de instrumentos conlleva los siguientes pasos:

- Las zonas de interés especial son identificadas tales como zonas estructuralmente débiles, zonas altamente cargadas, o zonas donde se prevé una alta presión de poros. Si no existen tales zonas en el área, se procede a elegir a través de secciones transversales del terreno, puntos donde se considere que pueda registrarse un comportamiento representativo de toda la masa.
- El ISRM recomienda que la distancia entre instrumentos dentro de las zonas de interés especial sea al menos de 3 metros, colocándolos de manera perpendicular a la discontinuidad, y como máximo una separación de 20 metros entre el soporte fijo y el soporte móvil para evitar problemas de oscilaciones en el cable. Se deben ubicar, al menos, tres instrumentos para cada monitoreo en longitudes equidistantes, aunque la cantidad de instrumentos dependerá mayoritariamente de la longitud de la corona del deslizamiento.

- Luego, de ser posible, se procede a colocar instrumentos que registren información secundaria que pueda complementar los datos registrados por los instrumentos anteriores, es decir que proporcionen información suficiente para detectar movimientos menores que puedan surgir dentro de la masa.
- Siempre que sea posible y el presupuesto lo permita, es recomendable realizar chequeos cruzados con otro tipo de método, por ejemplo ubicar extensómetros que registren el movimiento principal del deslizamiento y además tener un registro de algunos puntos a través del DGPS para revisar que la información que registran los primeros este se pueda corroborar con el registro de los segundos.
- Si bien es sabido, el monitoreo de una ladera involucra distintos parámetros a evaluar, y para cada parámetro existe un instrumento específico. Por lo tanto, es recomendable evitar la saturación de instrumentos en un área reducida, debido a que se pueden generar condiciones de inestabilidad y debilidad al momento de instalar las fijaciones o realizar las perforaciones necesarias para que cada instrumento opere de manera eficiente.

5.5. Análisis de datos

Una vez se ha recolectado la información de los instrumentos es necesario el análisis y depuración de datos que puedan perjudicar la precisión en el pronóstico de la ocurrencia del deslizamiento. Tales pronósticos pueden dividirse en dos según el tiempo de predicción: los pronósticos a largo plazo, los cuales se realizan mediante mapas de evaluación de riesgos donde se ubican

los deslizamientos clasificados como potencialmente activos en un futuro dadas sus condiciones de inestabilidad.

Por otra parte, se encuentran los pronósticos a corto y mediano plazo, los cuales se generan a partir de información generada en tiempo real del movimiento, es decir monitoreos preventivos de rutina en laderas potencialmente activas, los cuales podrían registrar el comportamiento de un deslizamiento con un lento movimiento, es decir unos pocos centímetros al año.

Recientemente, se han realizado diversos estudios a través de modelos matemáticos y estadísticos generando una predicción del momento en el cual fallará el suelo de la ladera, desencadenando un deslizamiento. La mayoría de las metodologías están basadas en una extrapolación de datos registrados, principalmente en las mediciones *in situ* de las deformaciones diferenciales que se han registrado a lo largo de los monitoreos preventivos en el área de interés.

5.5.1. Desplazamientos relativos

Teóricamente, un desplazamiento relativo es la medición de la distancia recorrida por una partícula entre dos puntos a partir de un sistema de referencia específico.

Los resultados obtenidos en un monitoreo a través de los extensómetros son mediciones absolutas desde el desplazamiento inicial. Por lo tanto, para calcular el desplazamiento relativo, basta con realizar la diferencia entre el dato registrado actualmente y el dato inmediato anterior:

$$\text{Desplazamiento}_i = \text{Lectura}_i - \text{Lectura}_{i-1}$$

En campo, es complicado colocar el extensómetro artesanal en una medición inicial igual a cero. Generalmente, se coloca en un valor redondeado distinto de cero, con el fin de evitar complicaciones en las mediciones y sobre todo, en los cálculos de los desplazamientos relativos.

Tabla X. **Desplazamientos registrados en campo**

FECHA Y HORA	LECTURA EN EXTENSÓMETRO (cm)	OBSERVACIONES	MOVIMIENTO EFECTIVO (cm)	DESPLAZAMIENTO ACUMULADO (cm)	TIEMPO (días)	VELOCIDAD (cm/año)	
08:45	17/09/2009	35,0	-----	0,0	102,7	0	0,0000
15:32	21/09/2009	34,6	-----	0,4	103,1	4	36,5000
12:34	22/09/2009	34,5	-----	0,1	103,2	1	36,5000
10:29	23/09/2009	34,3	-----	0,2	103,4	1	73,0000
09:05	24/09/2009	34,3	-----	0,0	103,4	1	0,0000
14:51	25/09/2009	33,5	-----	0,8	104,2	1	292,0000
11:37	26/09/2009	31,7	-----	1,8	106,0	1	657,0000
10:22	27/09/2009	30,9	-----	0,8	106,8	1	292,0000
09:19	28/09/2009	30,7	-----	0,2	107,0	1	73,0000
16:47	29/09/2009	30,4	-----	0,3	107,3	1	109,5000
14:53	30/09/2009	30,2	-----	0,2	107,5	1	73,0000
12:51	01/10/2009	29,8	-----	0,4	107,9	1	146,0000
11:29	05/10/2009	29,1	-----	0,7	108,6	4	63,8750
08:35	06/10/2009	29,1	-----	0,0	108,6	1	0,0000
09:56	07/10/2009	27,8	-----	1,3	109,9	1	474,5000
15:39	08/10/2009	27,8	-----	0,0	109,9	1	0,0000
08:45	09/10/2009	27,7	-----	0,1	110,0	1	36,5000
15:32	12/10/2009	27,4	-----	0,3	110,3	3	36,5000
12:34	13/10/2009	27,3	-----	0,1	110,4	1	36,5000
10:29	14/10/2009	27,2	-----	0,1	110,5	1	36,5000
09:05	15/10/2009	27,1	-----	0,1	110,6	1	36,5000
14:51	16/10/2009	27,1	-----	0,0	110,6	1	0,0000
11:37	19/10/2009	26,6	-----	0,5	111,1	3	60,8333
10:22	20/10/2009	26,6	-----	0,0	111,1	1	0,0000
09:19	21/10/2009	25,3	-----	1,3	112,4	1	474,5000
16:47	22/10/2009	25,2	-----	0,1	112,5	1	36,5000
14:53	23/10/2009	25,2	-----	0,0	112,5	1	0,0000
11:29	27/10/2009	24,7	-----	0,5	113,0	4	45,6250
11:35	30/10/2009	22,7	-----	2,0	115,0	7	104,2857
08:35	04/11/2009	19,8	-----	2,9	117,9	5	211,7000
09:56	05/11/2009	19,8	-----	0,0	117,9	1	0,0000
15:39	06/11/2009	19,6	-----	0,2	118,1	1	73,0000
08:45	10/11/2009	19,4	-----	0,2	118,3	4	18,2500
15:32	11/11/2009	19,2	-----	0,2	118,5	1	73,0000
12:34	12/11/2009	18,8	-----	0,4	118,9	1	146,0000
10:29	13/11/2009	18,3	-----	0,5	119,4	1	182,5000
09:05	16/11/2009	18,1	Lluvias moderadas en el área.	0,2	119,6	3	24,3333
14:51	23/11/2009	17,6	-----	0,7	120,3	7	36,5000
11:37	24/11/2009	18,1	Recalibración de equipo.	0,0	120,3	1	0,0000

Continuación de la tabla X.

FECHA Y HORA	LECTURA EN EXTENSÓMETRO (cm)	OBSERVACIONES	MOVIMIENTO EFECTIVO (cm)	DESPLAZAMIENTO ACUMULADO (cm)	TIEMPO (días)	VELOCIDAD (cm/año)	
11:37	24/11/2009	35,0	Recalibración de equipo.	0,0	120,3	1	0,0000
10:22	26/11/2009	34,8	-----	0,2	120,5	2	36,5000
09:19	27/11/2009	33,7	-----	1,1	121,6	1	401,5000
16:47	13/12/2009	31,8	-----	1,9	123,5	16	43,3438
14:53	21/12/2009	31,1	-----	0,7	124,2	8	31,9375
12:51	22/12/2009	30,9	-----	0,2	124,4	1	73,0000
11:29	24/12/2009	30,8	-----	0,1	124,5	2	18,2500
08:35	29/12/2009	23,0	-----	7,8	132,3	5	569,4000
09:56	30/12/2009	22,9	-----	0,1	132,4	1	36,5000
15:39	05/01/2010	14,8	Lluvias intensas en el área.	8,1	140,5	6	492,7500
08:45	06/01/2010	14,5	Lluvias moderadas en el área.	0,3	140,8	1	109,5000
15:32	07/01/2010	14,5	-----	0,0	140,8	1	0,0000
12:34	08/01/2010	14,4	-----	0,1	140,9	1	36,5000
10:29	12/01/2010	14,2	-----	0,2	141,1	4	18,2500
09:05	14/01/2010	14,0	-----	0,2	141,3	2	36,5000
14:51	15/01/2010	14,0	-----	0,0	141,3	1	0,0000
11:37	18/01/2010	13,6	-----	0,4	141,7	3	48,6667
10:22	19/01/2010	13,4	Lluvias intensas en el área.	0,2	141,9	1	73,0000
09:19	20/01/2010	12,4	-----	1,0	142,9	1	365,0000
16:47	21/01/2010	10,9	-----	1,5	144,4	1	547,5000
14:53	22/01/2010	10,6	Lluvias moderadas en el área.	0,3	144,7	1	109,5000
12:51	23/01/2010	10,5	-----	0,1	144,8	1	36,5000
11:29	24/01/2010	10,3	-----	0,2	145,0	1	73,0000
08:35	25/01/2010	10,2	-----	0,1	145,1	1	36,5000
09:56	26/01/2010	10,1	-----	0,1	145,2	1	36,5000
15:39	27/01/2010	10,1	-----	0,0	145,2	1	0,0000
08:45	28/01/2010	10,0	-----	0,1	145,3	1	36,5000
15:32	29/01/2010	9,8	-----	0,2	145,5	1	73,0000
12:34	30/01/2010	9,8	-----	0,0	145,5	1	0,0000
10:29	31/01/2010	9,7	-----	0,1	145,6	1	36,5000
09:05	01/02/2010	9,6	-----	0,1	145,7	1	36,5000
14:51	05/02/2010	9,1	-----	0,5	146,2	4	45,6250
11:37	06/02/2010	9,0	-----	0,1	146,3	1	36,5000
10:22	07/02/2010	8,9	-----	0,1	146,4	1	36,5000
09:19	08/02/2010	8,7	-----	0,2	146,6	1	73,0000
16:47	09/02/2010	8,6	-----	0,1	146,7	1	36,5000
14:53	10/02/2010	8,5	-----	0,1	146,8	1	36,5000
12:51	11/02/2010	8,4	Lluvias moderadas en el área.	0,1	146,9	1	36,5000

Fuente: MAYORGA TORRES, Tannia. *Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (modificado con datos hipotéticos)*. p.189.

5.5.2. Curva de deformación-tiempo

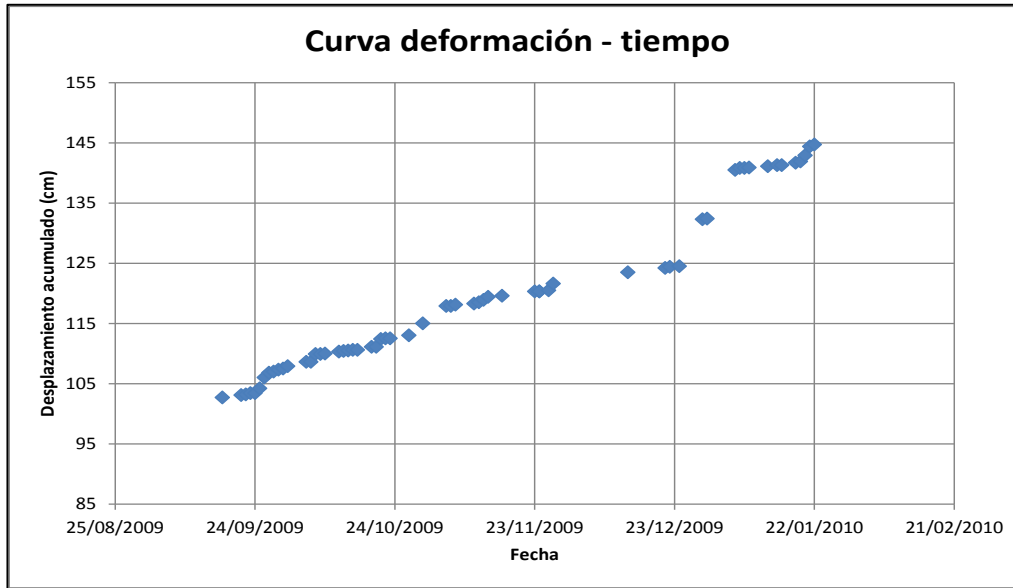
La curva de deformación-tiempo muestra el comportamiento del deslizamiento a lo largo de todo el período de monitoreo, la cual es el resultado de plotear en una gráfica los desplazamientos relativos acumulados sobre el eje de las ordenadas y el tiempo transcurrido entre cada registro de desplazamiento sobre el eje de las abscisas.

Debido a que siempre existe la posibilidad de que existan errores de cualquier índole, es necesario realizar una depuración de los datos antes de presentar datos finales y concluyentes. Una forma de depurar los datos es generar cálculos parciales de la velocidad del deslizamiento. Usualmente, las velocidades que se tienen entre sí son muy similares; sin embargo es posible que dentro de los datos registrados puedan hallarse velocidades que estén muy alejadas de la velocidad promedio de los datos, por esta razón los mismos deben desecharse. Esto con el fin de no reflejar comportamientos extraños debido a mediciones erróneas o inapropiadas.

Cabe mencionar que es posible que algunos de estos datos concuerden con algún fenómeno exterior que pudo haber activado algún desplazamiento acelerado en el deslizamiento, por lo que es importante comparar las fechas de las anotaciones de la bitácora con aumentos abruptos en las velocidades. Sin embargo, en tales casos las siguientes velocidades registradas de los días subsecuentes tienden a incrementar rápidamente, lo cual implica que el fenómeno tiene una repercusión en varios datos y no únicamente en un caso aislado.

Continuando con el ejemplo hipotético, se presentan a continuación los datos graficados, sin haber generado la depuración de los mismos.

Figura 45. Gráfico deformación-tiempo



Fuente: MAYORGA TORRES, Tannia. *Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (modificado con datos hipotéticos)*. p.189.

Con base en lo observado en la gráfica existen datos que están fuera de la tendencia promedio de la gráfica, por lo que es necesario realizar una depuración de los mismos. Para la eliminación de los datos, se recomienda realizar el cálculo de las velocidades a través de la ecuación:

$$Velocidad_i = Movimiento\ efectivo_i \div Tiempo_i \cdot 365$$

A partir de estos datos, se procede a calcular la media aritmética (100,13 cm/año) y la desviación estándar (150,14 cm/año) de la muestra.

Los datos a ser depurados serán aquellos que sobrepasen la sumatoria de la media aritmética y la desviación estándar (250,27 cm/año). Por lo tanto, la tabla de datos quedaría ajustada de la siguiente manera:

Tabla XI. Desplazamientos con datos depurados

FECHA Y HORA	LECTURA EN EXTENSÓMETRO (cm)	OBSERVACIONES	MOVIMIENTO EFECTIVO (cm)	DESPLAZAMIENTO ACUMULADO (cm)	TIEMPO (días)	VELOCIDAD (cm/año)	
08:45	17/09/2009	35,0	-----	0,0	102,7	0	0,0000
15:32	21/09/2009	34,6	-----	0,4	103,1	4	36,5000
12:34	22/09/2009	34,5	-----	0,1	103,2	1	36,5000
10:29	23/09/2009	34,3	-----	0,2	103,4	1	73,0000
09:05	24/09/2009	34,3	-----	0,0	103,4	1	0,0000
09:19	28/09/2009	34,1	-----	0,2	103,6	4	18,2500
16:47	29/09/2009	33,8	-----	0,3	103,9	1	109,5000
14:53	30/09/2009	33,6	-----	0,2	104,1	1	73,0000
12:51	01/10/2009	33,2	-----	0,4	104,5	1	146,0000
11:29	05/10/2009	32,5	-----	0,7	105,2	4	63,8750
08:35	06/10/2009	32,5	-----	0,0	105,2	1	0,0000
15:39	08/10/2009	32,5	-----	0,0	105,2	2	0,0000
08:45	09/10/2009	32,4	-----	0,1	105,3	1	36,5000
15:32	12/10/2009	32,1	-----	0,3	105,6	3	36,5000
12:34	13/10/2009	32,0	-----	0,1	105,7	1	36,5000
10:29	14/10/2009	31,9	-----	0,1	105,8	1	36,5000
09:05	15/10/2009	31,8	-----	0,1	105,9	1	36,5000
14:51	16/10/2009	31,8	-----	0,0	105,9	1	0,0000
11:37	19/10/2009	31,3	-----	0,5	106,4	3	60,8333
10:22	20/10/2009	31,3	-----	0,0	106,4	1	0,0000
16:47	22/10/2009	31,2	-----	0,1	106,5	2	18,2500
14:53	23/10/2009	31,2	-----	0,0	106,5	1	0,0000
11:29	27/10/2009	30,7	-----	0,5	107,0	4	45,6250
11:35	30/10/2009	28,7	-----	2,0	109,0	7	104,2857
08:35	04/11/2009	25,8	-----	2,9	111,9	5	211,7000
09:56	05/11/2009	25,8	-----	0,0	111,9	1	0,0000
15:39	06/11/2009	25,6	-----	0,2	112,1	1	73,0000
08:45	10/11/2009	25,4	-----	0,2	112,3	4	18,2500
15:32	11/11/2009	25,2	-----	0,2	112,5	1	73,0000
12:34	12/11/2009	24,8	-----	0,4	112,9	1	146,0000
10:29	13/11/2009	24,3	-----	0,5	113,4	1	182,5000
09:05	16/11/2009	24,1	Lluvias moderadas en el área.	0,2	113,6	3	24,3333
14:51	23/11/2009	23,6	-----	0,7	114,3	7	36,5000
11:37	24/11/2009	24,1	Recalibración de equipo.	0,0	114,3	1	0,0000
11:37	24/11/2009	35,0	Recalibración de equipo.	0,0	114,3	1	0,0000
10:22	26/11/2009	34,8	-----	0,2	114,5	2	36,5000
16:47	13/12/2009	32,9	-----	1,9	116,4	17	40,7941
14:53	21/12/2009	32,2	-----	0,7	117,1	8	31,9375
12:51	22/12/2009	32,0	-----	0,2	117,3	1	73,0000
11:29	24/12/2009	31,9	-----	0,1	117,4	2	18,2500

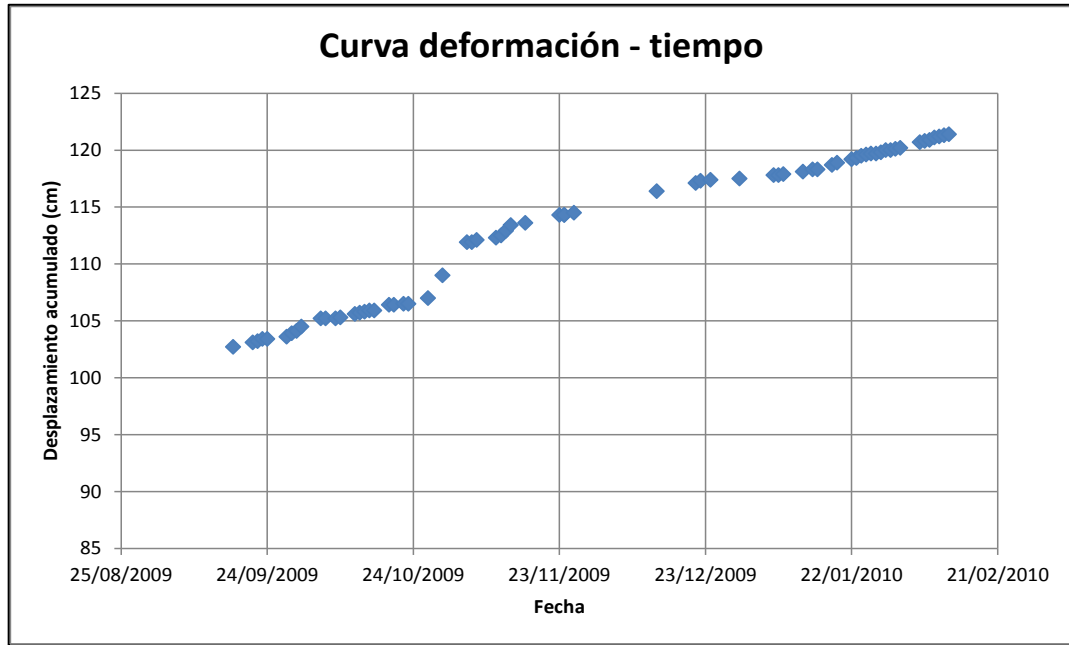
Continuación de la tabla XI.

FECHA Y HORA	LECTURA EN EXTENSÓMETRO (cm)	OBSERVACIONES	MOVIMIENTO EFECTIVO (cm)	DESPLAZAMIENTO ACUMULADO (cm)	TIEMPO (días)	VELOCIDAD (cm/año)	
09:56	30/12/2009	31,8	-----	0,1	117,5	6	6,0833
08:45	06/01/2010	31,5	Lluvias moderadas en el área.	0,3	117,8	7	15,6429
15:32	07/01/2010	31,5	-----	0,0	117,8	1	0,0000
12:34	08/01/2010	31,4	-----	0,1	117,9	1	36,5000
10:29	12/01/2010	31,2	-----	0,2	118,1	4	18,2500
09:05	14/01/2010	31,0	-----	0,2	118,3	2	36,5000
14:51	15/01/2010	31,0	-----	0,0	118,3	1	0,0000
11:37	18/01/2010	30,6	-----	0,4	118,7	3	48,6667
10:22	19/01/2010	30,4	Lluvias intensas en el área.	0,2	118,9	1	73,0000
14:53	22/01/2010	30,1	Lluvias moderadas en el área.	0,3	119,2	3	36,5000
12:51	23/01/2010	30,0	-----	0,1	119,3	1	36,5000
11:29	24/01/2010	29,8	-----	0,2	119,5	1	73,0000
08:35	25/01/2010	29,7	-----	0,1	119,6	1	36,5000
09:56	26/01/2010	29,6	-----	0,1	119,7	1	36,5000
15:39	27/01/2010	29,6	-----	0,0	119,7	1	0,0000
08:45	28/01/2010	29,5	-----	0,1	119,8	1	36,5000
15:32	29/01/2010	29,3	-----	0,2	120,0	1	73,0000
12:34	30/01/2010	29,3	-----	0,0	120,0	1	0,0000
10:29	31/01/2010	29,2	-----	0,1	120,1	1	36,5000
09:05	01/02/2010	29,1	-----	0,1	120,2	1	36,5000
14:51	05/02/2010	28,6	-----	0,5	120,7	4	45,6250
11:37	06/02/2010	28,5	-----	0,1	120,8	1	36,5000
10:22	07/02/2010	28,4	-----	0,1	120,9	1	36,5000
09:19	08/02/2010	28,2	-----	0,2	121,1	1	73,0000
16:47	09/02/2010	28,1	-----	0,1	121,2	1	36,5000
14:53	10/02/2010	28,0	-----	0,1	121,3	1	36,5000
12:51	11/02/2010	27,9	Lluvias moderadas en el área.	0,1	121,4	1	36,5000

Fuente: MAYORGA TORRES, Tannia. *Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (modificado con datos hipotéticos)*. p.189.

Por lo tanto la curva deformación-tiempo, graficando los datos evaluados en la tabla anterior, queda de la siguiente manera:

Figura 46. **Gráfico deformación-tiempo con datos depurados**



Fuente: MAYORGA TORRES, Tannia. *Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (modificado con datos hipotéticos)*. p.189.

5.5.3. Punto de ruptura

El punto de ruptura es el límite que tiene cualquier material, en el cual su composición molecular interna se desprende abruptamente bajo la acción de esfuerzos muy altos. En el caso de las laderas es en el punto de ruptura cuando el material tiende a segregarse, originando el fenómeno del deslizamiento.

Como se mencionó en el capítulo I, los deslizamientos siguen un comportamiento similar al momento de activarse en función de la tasa de crecimiento de la deformación respecto del tiempo.

La mayoría de métodos para la predicción del momento de ocurrencia del deslizamiento están basados, principalmente, en la segunda fase del *creep* debido a que es en esta donde la tasa de crecimiento de la deformación se mantiene regularmente constante. Esto hace que tales métodos sean más exactos y generen tiempo para la evacuación de posibles localidades habitadas, que estén en la zona de alcance del deslizamiento.

Aunque existen métodos basados en datos registrados en la primera y tercera fase del *creep*, los mismos no son utilizados con regularidad, ya que, debido a la escasez de datos y comportamientos en formas no lineales, generan bastante incerteza en cuanto a la fecha de ocurrencia del fenómeno y no se logran concebir planes de evacuación apropiados debido a la premura, respectivamente. Por lo tanto, el presente trabajo de graduación se enfocará en métodos que registren datos de desplazamientos cuando el deslizamiento transcurra la segunda fase del *creep*.

Saito (1965) propuso una fórmula empírica para la predicción del tiempo en el cual la ladera llegará al punto de ruptura. Basado en estudios precedentes, concluye que puede predecirse el tiempo en el cual el deslizamiento se originará sin importar el material del que se componga la ladera. Únicamente basándose en la tasa de deformación respecto del tiempo que sufre la ladera y asumiendo que la tasa de la deformación se mantiene constante en la segunda fase del *creep*, concibe que la relación entre el tiempo en alcanzar la ruptura y la tasa de deformación está dada por:

$$\log_{10}t_r = 2.33 - 0.916\log_{10}\varepsilon \pm 0.59$$

En donde, t_r es igual al tiempo de ruptura en unidades de minutos y ε se refiere a la tasa de crecimiento constante de la deformación respecto del tiempo en unidades $10^{-4}/\text{min}$.

Sin embargo, Fukuzono (1985) presenta un nuevo método para la predicción de la ocurrencia del deslizamiento. Basándose en los estudios anteriores de Saito (1961) y en datos experimentales tomados de modelos a escala en ambientes controlados de lluvia, determina que el tiempo de ruptura puede determinarse calculando el inverso de la velocidad a la que se desplaza la ladera.

Por lo tanto, el método desarrollado por Fukuzono (1985), al considerar la pequeña variación que presenta la tasa de crecimiento del desplazamiento respecto del tiempo en el segundo estado del *creep*, logra desarrollar un método mucho más exacto en cuanto a la predicción del tiempo restante para el punto de ruptura.

Con la información anterior, los movimientos de ladera se pueden clasificar en tres casos distintos los cuales son mostrados en la figura 47: una gráfica con tendencia lineal la cual se desarrolla cuando el suelo presenta las condiciones ideales para que la tasa de crecimiento de la deformación respecto del tiempo sea constante; o bien cuando presentan pequeñas variaciones ya sea en forma creciente, representada por una gráfica con curvatura convexa, o en forma decreciente, representada por una gráfica con curvatura cóncava.

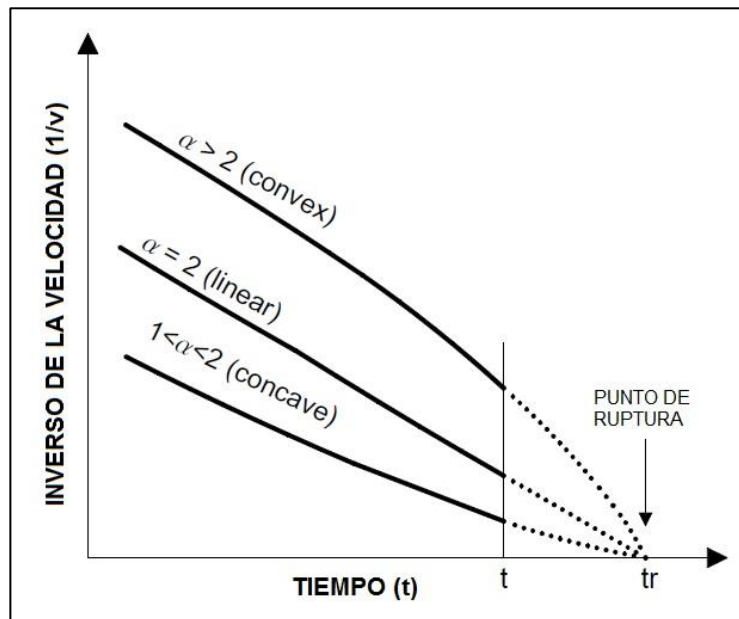
Tales gráficas están dadas por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{v} = \left\{ a(\alpha - 1)^{\frac{1}{\alpha-1}} \right\} \cdot (t_r - t)^{\frac{1}{\alpha-1}}$$

De la cual: v representa la velocidad de la superficie de la ladera en centímetros por minuto, t_r representa el tiempo de ruptura en minutos, t es un tiempo opcional y aleatorio; y a & α son constantes que se obtienen al plotear una línea de tendencia potencial en un gráfico que contenga la velocidad sobre el eje de las abscisas y la aceleración sobre el eje de las ordenadas, obteniendo entonces la siguiente ecuación:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a \left(\frac{dx}{dt} \right)^\alpha$$

Figura 47. **Gráficas típicas de los cambios del valor inverso de la velocidad respecto del tiempo sobre la superficie de la ladera justo antes de la ruptura**



Fuente: FUKUZONO, T. *A new method for predicting the failure time of a slope*. Proc. IVth International conference and field workshop on landslides. p.146.

Donde, por definición, la segunda derivada del desplazamiento respecto del tiempo es la aceleración y la derivada del desplazamiento respecto del tiempo es la velocidad.

Según las condiciones físicas de la ladera como los estratos por los que está compuesta, o el factor detonante que active el movimiento, el comportamiento que puede desarrollar a su vez puede estar catalogado en cualquiera de las tres gráficas anteriores. Para un valor de $\alpha = 2$, se puede determinar el tiempo restante para que ocurra el punto de ruptura, intersectando dicha función con el eje de las abscisas, o bien realizando un cálculo sencillo a través de la siguiente ecuación:

$$t_r = \frac{t_2 \cdot (1/v)_1 - t_1 \cdot (1/v)_2}{(1/v)_1 - (1/v)_2}$$

La anterior representa la intersección de la gráfica desarrollada por Fukuzono con el eje de las abscisas.

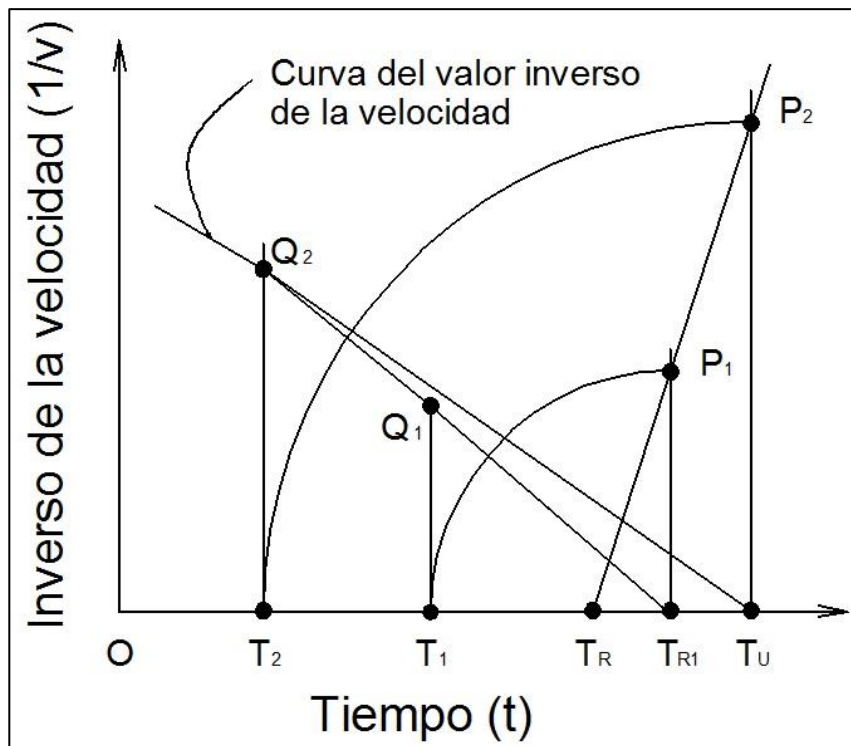
Por otra parte, existe una solución más compleja cuando el valor de $\alpha \neq 2$., la cual se obtiene de la diferenciación de la ecuación de la gráfica respecto del tiempo y resolviendo para el caso donde $1/v = 0$, quedando:

$$t_r = \frac{t_2 \cdot \frac{(1/v)_1}{[d(1/v)/dt]_1} - t_1 \cdot \frac{(1/v)_2}{[d(1/v)/dt]_2}}{\frac{(1/v)_1}{[d(1/v)/dt]_1} - \frac{(1/v)_2}{[d(1/v)/dt]_2}}$$

Siendo la expresión $[d(1/v)/dt]$, la razón del inverso de la velocidad respecto del tiempo.

Debido a la complejidad de ambas soluciones, en especial la segunda, y contemplando que los valores de a y α pueden ser medidos con exactitud tan solo días antes de que el punto de ruptura ocurra; Fukuzono (1985) desarrolla una solución aproximada para la resolución de dichas ecuaciones mediante un método gráfico desarrollado en la figura 48.

Figura 48. **Método gráfico para predecir el tiempo en llegar al punto de ruptura en el caso que $\alpha \neq 2$**



Fuente: FUKUZONO, Teruki. *A new method for predicting the failure time of a slope*. Proc. IVth International conference and field workshop on landslides. p.147.

Teniendo dibujada la curva producto de plotear el inverso de la velocidad en las ordenadas y el tiempo en las abscisas (t_1 y t_2), se escogen dos puntos sobre la curva, Q_1 y Q_2 , de manera que se trazan dos líneas tangentes a la

curva dibujada que pasen por los puntos en mención; las mismas son prolongadas hasta intersectar el eje de las abscisas generando los puntos T_{L1} y T_{L2} , respectivamente.

Luego, con centro en T_{L1} se traza un semicírculo que posea un radio igual a la distancia que existe entre T_{L1} y t_1 ; además se traza una línea perpendicular al eje de las abscisas desde el punto T_{L1} . El punto donde se intersecta la semicircunferencia con la línea perpendicular será llamado P_1 . De esta manera, la distancia que existe entre T_{L1} y t_1 , será la misma que T_{L1} y P_1 . Se realiza un procedimiento similar para encontrar el punto P_2 , el cual se genera con los valores de t_2 y T_{L2} .

Una vez encontrados los puntos P_1 y P_2 , se traza una recta que une ambos puntos, siendo esta prolongada hasta que intersecte el eje de las abscisas. Este punto será conocido como T_r , el cual es una solución aproximada del tiempo que resta para que ocurra el punto de ruptura.

Posteriormente, otros autores¹ han construido modelos que incluyen los esfuerzos longitudinales, esfuerzos de cizalla, la ubicación geodésica, el ángulo de la ladera u otros factores externos; sin embargo, los mismos han sido modificaciones de los estudios de Saito o Fukuzono, o bien han tomado como base los fundamentos originales de sus técnicas para el desarrollo de nuevas metodologías.

A su vez, Rose y Hungr (2006) realizaron varios estudios aplicados al campo de la minería, utilizando los modelos de Fukuzono para predecir el

¹ Autores como Voight (1988), Kawamura (1985), Xiaoping (1996) o Crosta y Agliardi (2002) han propuesto diferentes metodologías para la predicción de la ocurrencia del punto de ruptura, o bien han generado umbrales de velocidad en movimientos que tienden a ser muy rápidos incluyendo uno o varios datos mencionados.

tiempo restante del punto de ruptura de tres grandes deslizamientos que poseían entre uno a dieciocho millones de metros cúbicos de volumen.

En sus estudios realizaron la misma simplificación que utilizó Saito (1961) inicialmente, la cual consiste en que la variación de la deformación respecto del tiempo durante el segundo *creep* se mantiene constante. Tal simplificación se alcanza cuando se asume que $\alpha = 2$ en los modelos de Fukuzono (1985); bajo dicha circunstancia la ecuación se transforma en una más simple:

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{v_0} - A(t_r - t_0)$$

Donde la constante A es el valor de la pendiente de la línea de tendencia que posea el valor de R^2 más cercano a 1. Despejando el tiempo de ruptura de dicha ecuación, condición que se obtiene cuando $1/v$ es igual a cero:

$$t_r = \frac{1}{A \cdot v_0} + t_0$$

De dicha ecuación, realizando ajustes matemáticos, se originan dos ecuaciones: una que prediga la velocidad máxima alcanzada al momento de la ruptura y otra que prediga la abertura máxima de la grieta al momento de ruptura.

$$v_r = \left[\frac{1}{v_0} - A(t - t_0) \right]^{-1}$$

$$x_r = \frac{1}{A} \cdot \left\{ \ln \left(\frac{1}{v_0} \right) - \ln \left[\frac{1}{v_0} - A(t - t_0) \right] \right\}$$

Las mismas se utilizan para comparar el comportamiento, a través de gráficas, que se registra diariamente del deslizamiento, con el comportamiento esperado del movimiento, y así reconocer la ocurrencia de cambios potenciales que puedan suceder en el transcurrir del tiempo.

A través de su experiencia en el campo, Rose y Hungr (2006) concluyeron que dicho método no puede ser utilizado para movimientos de laderas con rocas, como material dominante, que contengan fallas frágiles y que puede utilizarse con extrema precaución en movimientos que posean pequeñas fracturas en rocas más fuertes.

También debe mantenerse en mente la posibilidad de que existan cambios repentinos impulsados por factores ajenos; esto da lugar a que el monitoreo se mantenga de manera constante la mayor cantidad del tiempo hasta que ocurra la ruptura. Existe también el caso contrario donde el movimiento de ladera disminuye hasta cesar, momento en el cual es notorio que el deslizamiento no ocurrirá, tal como sucedió durante el estudio elaborado por Saito (1961), mientras se realizaba la construcción de la línea férrea principal de Tōkaidō.

Por último, Rose y Hungr (2006) comprobaron, a través de estudios de otros autores, que asumir que el comportamiento del deslizamiento es constante durante la segunda fase del *creep* genera un poco de imprecisión, sin embargo la utilización de las curvas hiperbólicas de Fukuzono (1985) limita demasiado el uso del método debido a su complejidad, lo cual vuelve impráctico el método debido a la cantidad de cálculos complicados que estas conllevan. Por lo tanto, para obtener una precisión mayor, los autores recomiendan la actualización de las gráficas con ajustes lineales de manera continua, para identificar la tendencia de la curvatura o bien, señalar el inicio de los cambios de tendencia del movimiento.

Prosiguiendo con el ejemplo, al calcular los datos de la velocidad promedio (obtenida de dividir el valor de la distancia acumulada con el tiempo acumulado), se puede observar que el movimiento para el ejemplo propuesto ha ido disminuyendo conforme el paso del tiempo, lo cual indica que el deslizamiento ha iniciado a detenerse, o bien continúa en la segunda fase del *creep*, significando esto que debe proseguirse el monitoreo hasta establecer qué está sucediendo en realidad con el mismo.

Tabla XII. **Velocidades y el inverso de la velocidad**

FECHA	LECTURA EN EXTENSÓMETRO (cm)	MOVIMIENTO EFECTIVO (cm)	DESPLAZAMIENTO ACUMULADO (cm)	TIEMPO (días)	TIEMPO ACUMULADO (min)	VELOCIDAD PROMEDIO (cm/min)	VELOCIDAD INVERSA (min/cm)
17/09/2009	35,0	0,0	102,7	0	-	-	-
21/09/2009	34,6	0,4	103,1	4	5 760	0,0179	55,87
22/09/2009	34,5	0,1	103,2	1	7 200	0,0143	69,77
23/09/2009	34,3	0,2	103,4	1	8 640	0,0120	83,56
24/09/2009	34,3	0,0	103,4	1	10 080	0,0103	97,49
28/09/2009	34,1	0,2	103,6	4	15 840	0,0065	152,90
29/09/2009	33,8	0,3	103,9	1	17 280	0,0060	166,31
30/09/2009	33,6	0,2	104,1	1	18 720	0,0056	179,83
01/10/2009	33,2	0,4	104,5	1	20 160	0,0052	192,92
05/10/2009	32,5	0,7	105,2	4	25 920	0,0041	246,39
06/10/2009	32,5	0,0	105,2	1	27 360	0,0038	260,08
08/10/2009	32,5	0,0	105,2	2	30 240	0,0035	287,45
09/10/2009	32,4	0,1	105,3	1	31 680	0,0033	300,85
12/10/2009	32,1	0,3	105,6	3	36 000	0,0029	340,91
13/10/2009	32,0	0,1	105,7	1	37 440	0,0028	354,21
14/10/2009	31,9	0,1	105,8	1	38 880	0,0027	367,49
15/10/2009	31,8	0,1	105,9	1	40 320	0,0026	380,74
16/10/2009	31,8	0,0	105,9	1	41 760	0,0025	394,33
19/10/2009	31,3	0,5	106,4	3	46 080	0,0023	433,08
20/10/2009	31,3	0,0	106,4	1	47 520	0,0022	446,62
22/10/2009	31,2	0,1	106,5	2	50 400	0,0021	473,24
23/10/2009	31,2	0,0	106,5	1	51 840	0,0021	486,76
27/10/2009	30,7	0,5	107,0	4	57 600	0,0019	538,32
30/10/2009	28,7	2,0	109,0	7	67 680	0,0016	620,92
04/11/2009	25,8	2,9	111,9	5	74 880	0,0015	669,17
05/11/2009	25,8	0,0	111,9	1	76 320	0,0015	682,04
06/11/2009	25,6	0,2	112,1	1	77 760	0,0014	693,67
10/11/2009	25,4	0,2	112,3	4	83 520	0,0013	743,72
11/11/2009	25,2	0,2	112,5	1	84 960	0,0013	755,20
12/11/2009	24,8	0,4	112,9	1	86 400	0,0013	765,28
13/11/2009	24,3	0,5	113,4	1	87 840	0,0013	774,60
16/11/2009	24,1	0,2	113,6	3	92 160	0,0012	811,27
23/11/2009	23,6	0,7	114,3	7	102 240	0,0011	894,49
24/11/2009	24,1	0,0	114,3	1	103 680	0,0011	907,09

Continuación de la tabla XII.

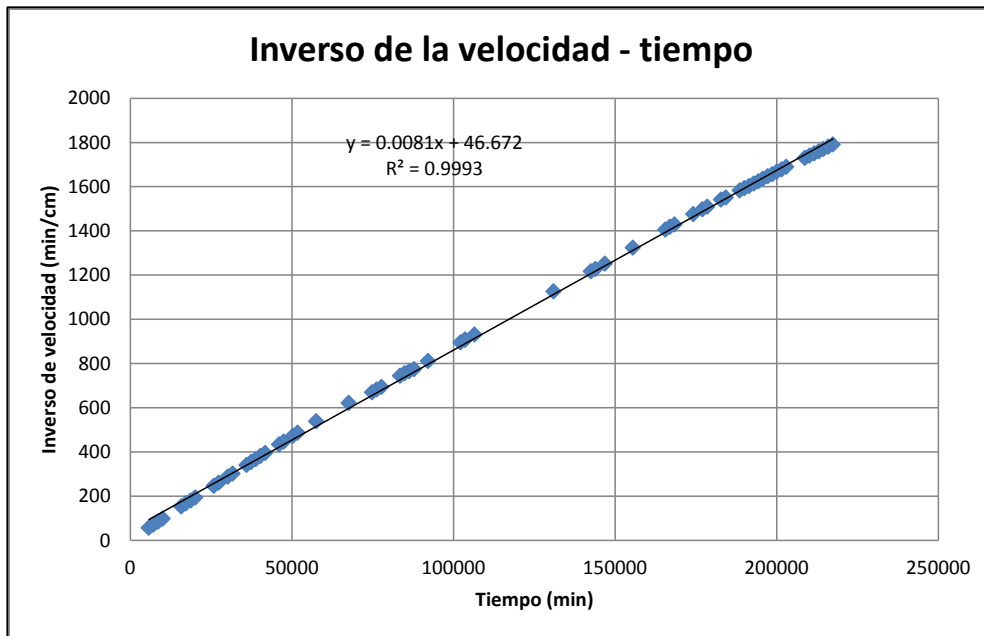
FECHA	LECTURA EN EXTENSÓMETRO (cm)	MOVIMIENTO EFECTIVO (cm)	DESPLAZAMIENTO ACUMULADO (cm)	TIEMPO (días)	TIEMPO ACUMULADO (miles de min)	VELOCIDAD PROMEDIO (cm/min)	VELOCIDAD INVERSA (min/cm)
24/11/2009	35,0	0,0	114,3	1	103 680	0,0011	907,09
26/11/2009	34,8	0,2	114,5	2	106 560	0,0011	930,66
13/12/2009	32,9	1,9	116,4	17	131 040	0,0009	1 125,77
21/12/2009	32,2	0,7	117,1	8	142 560	0,0008	1 217,42
22/12/2009	32,0	0,2	117,3	1	144 000	0,0008	1 227,62
24/12/2009	31,9	0,1	117,4	2	146 880	0,0008	1 251,11
30/12/2009	31,8	0,1	117,5	6	155 520	0,0008	1 323,57
06/01/2010	31,5	0,3	117,8	7	165 600	0,0007	1 405,77
07/01/2010	31,5	0,0	117,8	1	167 040	0,0007	1 418,00
08/01/2010	31,4	0,1	117,9	1	168 480	0,0007	1 429,01
12/01/2010	31,2	0,2	118,1	4	174 240	0,0007	1 475,36
14/01/2010	31,0	0,2	118,3	2	177 120	0,0007	1 497,21
15/01/2010	31,0	0,0	118,3	1	178 560	0,0007	1 509,38
18/01/2010	30,6	0,4	118,7	3	182 880	0,0006	1 540,69
19/01/2010	30,4	0,2	118,9	1	184 320	0,0006	1 550,21
22/01/2010	30,1	0,3	119,2	3	188 640	0,0006	1 582,55
23/01/2010	30,0	0,1	119,3	1	190 080	0,0006	1 593,29
24/01/2010	29,8	0,2	119,5	1	191 520	0,0006	1 602,68
25/01/2010	29,7	0,1	119,6	1	192 960	0,0006	1 613,38
26/01/2010	29,6	0,1	119,7	1	194 400	0,0006	1 624,06
27/01/2010	29,6	0,0	119,7	1	195 840	0,0006	1 636,09
28/01/2010	29,5	0,1	119,8	1	197 280	0,0006	1 646,74
29/01/2010	29,3	0,2	120,0	1	198 720	0,0006	1 656,00
30/01/2010	29,3	0,0	120,0	1	200 160	0,0006	1 668,00
31/01/2010	29,2	0,1	120,1	1	201 600	0,0006	1 678,60
01/02/2010	29,1	0,1	120,2	1	203 040	0,0006	1 689,18
05/02/2010	28,6	0,5	120,7	4	208 800	0,0006	1 729,91
06/02/2010	28,5	0,1	120,8	1	210 240	0,0006	1 740,40
07/02/2010	28,4	0,1	120,9	1	211 680	0,0006	1 750,87
08/02/2010	28,2	0,2	121,1	1	213 120	0,0006	1 759,87
09/02/2010	28,1	0,1	121,2	1	214 560	0,0006	1 770,30
10/02/2010	28,0	0,1	121,3	1	216 000	0,0006	1 780,71
11/02/2010	27,9	0,1	121,4	1	217 440	0,0006	1 791,10

Fuente: MAYORGA TORRES, Tannia. *Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (modificado con datos hipotéticos)*. p.189.

De la misma manera, la gráfica del inverso de la velocidad contra el tiempo no presenta un decremento, sino al contrario incrementa. Con lo cual se concluye que el deslizamiento de los datos presentados en el ejemplo ha disminuido la velocidad de movimiento y puede preverse que se detenga o bien

que continúe moviéndose lentamente hasta que alcance la fase donde presente una ruptura.

Figura 49. **Gráfico inverso de la velocidad–tiempo**



Fuente: MAYORGA TORRES, Tannia. *Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (modificado con datos hipotéticos)*. p.189.

5.6. Recomendaciones por parte de las autoridades competentes

Por último, las recomendaciones que tiene a disposición la Conred hacia la población en general en caso de un deslizamiento son listadas a continuación:

- Antes de un deslizamiento es recomendable evaluar el entorno en el que se habita, así como identificar lugares donde pueden presentarse deslizamientos. Luego, se debe determinar si el terreno es

potencialmente inestable; esto se realiza ubicando grietas, filtraciones de agua, árboles inclinados, pisos agrietados, escalones, entre otros. Además es necesaria la información con autoridades y vecinos acerca de registros históricos de deslizamientos que hayan acontecido en el lugar. Por último, es necesario conocer los planes de respuesta tanto familiar como local, así como tener lista la mochila de 72 horas.

- Durante un deslizamiento es recomendable no cruzar, bajo ningún motivo, el área afectada; al contrario se debe alejar a la comunidad lo más posible debido a que los materiales sueltos pueden seguir cayendo. También es necesario permanecer en un lugar seguro y seguir las indicaciones de las autoridades. Por último, se recomienda informar sobre los alcances que haya tenido el deslizamiento en la infraestructura cercana, tales como tendido eléctrico o instalaciones hidrosanitarias, así como también el alcance del deslizamiento en carreteras o cuencas de ríos.
- Después de un deslizamiento es recomendable reforestar el terreno dañado para prevenir que se originen nuevos movimientos, así como también permanecer alejado del escarpe principal o secundario del deslizamiento. También se recomienda revisar las cuencas de ríos cercanas o quebradas para determinar si existe represamiento del cauce. Por último es necesario cumplir con las indicaciones de las autoridades, quienes determinan el momento adecuado para regresar a las viviendas.

CONCLUSIONES

1. La propuesta del método de monitoreo con extensómetros artesanales es la adaptación de dos de los métodos sugeridos para el monitoreo de movimientos superficiales en una ladera, propuestos por Dunnicliff. Los mismos fueron escogidos debido a que la precisión y la forma de operación de los instrumentos involucrados son similares al extensómetro artesanal desarrollado por la Conred.
2. La propuesta del sistema de monitoreo incluye una adaptación de la norma ASTM E-83, bajo la cual están regulados los sistemas de medición con base a extensómetros. Por último, se plasma un método de análisis de datos de manera simplificada para generar información útil en el desenvolvimiento de tareas para reducción de desastres.
3. El concepto de movimiento de laderas usualmente es confundido con el de deslizamiento al realizar traducciones del inglés, debido a que una misma palabra puede traducirse en cualquiera de los dos términos. Se ha recalcado la diferencia de ambos términos, enfatizando en que un deslizamiento es un tipo específico del género de movimiento de laderas. De la misma manera, se han dado a conocer los factores usuales que pueden ocasionar el desencadenamiento de un movimiento de ladera así como la caracterización de los diferentes movimientos que se pueden originar, entre ellos los deslizamientos, debido a los materiales predominantes, pendientes pronunciadas u otros factores que comprometan las laderas.

4. El monitoreo de laderas es un tema que ha cobrado auge en las últimas décadas debido a las grandes pérdidas económicas y humanas que ha generado en diferentes países del mundo. Debido a que existen diferentes tipos de movimientos de laderas, se ha generado una variedad de instrumentos para evaluar distintos parámetros que resultan ser esenciales en cada tipo individual de movimiento.

5. Entre la instrumentación dedicada a la medición de desplazamientos diferenciales, se han mencionado los inclinómetros, mediciones por medio de estaciones de GPS con correcciones diferenciales, el uso de dispositivos que funcionen a larga distancia para evitar el uso de recurso humano en el área de riesgo, o bien instrumentos tradicionales como los diferentes tipos de extensómetro. Sin embargo, es importante recordar que los movimientos de laderas están condicionados a varias causas y no solamente supeditados al desplazamiento, por lo que es necesaria la presencia de instrumentación variada en el área.

6. El pronóstico del tiempo restante para la ocurrencia del punto de ruptura de un deslizamiento es un tema que ha sido frecuentemente mencionado en los simposios sobre movimientos de laderas en la última década. En el presente trabajo de graduación se han dado a conocer los métodos fundamentales que desarrollaron Saito y Fukuzono para generar información útil en esta área. El primero se ha basado en la tasa de variación de la deformación respecto del tiempo mientras que el segundo ha utilizado el valor inverso de la velocidad para determinar el tiempo de ruptura. Ambos métodos se han propuesto debido a su utilidad en el campo y su facilidad de comprensión y tabulación.

7. La presentación del proceso del método de monitoreo por medio de un diagrama de flujo facilita la comprensión del mismo, ya que al presentar la información por medio de gráficas, esta son mejor asimiladas por el cerebro, en contraste con el texto simple. Esto implica que puede ser utilizado para dar a conocer la metodología a un mayor grupo de personas simultáneamente, quienes no necesitan poseer una vasta experiencia técnica en el manejo de deslizamientos, únicamente conceptos básicos sobre el tema, los cuales están registrados también al inicio del presente trabajo de graduación.

RECOMENDACIONES

1. Debido a que la geología y geomorfología de Guatemala es demasiado variada, se pueden originar movimientos de ladera donde los desplazamientos subsuperficiales sean mayores a los superficiales, por lo que se recomienda no utilizar el método de monitoreo por extensómetros artesanales de manera aislada, sino incluir al menos dos inclinómetros sencillos en las áreas a monitorizar, o bien realizar un estudio de campo para comprobar que no existan fallas frágiles en los estratos rocosos de la ladera con el fin de evitar datos erróneos.
2. Se deben crear pequeñas estaciones de registro pluviográfico y sísmico cerca de las zonas que se tienen catalogadas como potencialmente riesgosas. Esto con el fin de generar una base de datos que puedan ayudar más adelante a conocer los umbrales de precipitación y actividad sísmica en lugares similares para el origen de un deslizamiento.
3. Es necesario implementar la normativa de calibración en los extensómetros utilizados actualmente en la Conred, con el fin de realizar mediciones más exactas y encontrar deficiencias, si es que existieran, en los complementos que hacen que funcione el extensómetro con el fin de implementar accesorios que hagan más eficiente el instrumento considerando siempre que el costo del mismo no se eleve demasiado.
4. Dar a conocer, en caso de su implementación, el método completo a todo el personal involucrado a través de diagramas ya que esto genera un mejor panorama del mismo y coadyuva a que el personal se involucre

de manera eficiente en las tareas asignadas prosiguiendo hacia un mismo objetivo.

5. Se debe realizar una comprobación del método bajo condiciones reales en el campo, con el fin de evaluar si las mediciones de los extensómetros poseen la suficiente precisión para ser utilizados bajo el método de pronóstico de ocurrencia del deslizamiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALCÁNTARA AYALA, Irasema. *Landslides: ¿Deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología*. Investigaciones geográficas. 41a ed. México: Universidad Autónoma de México, 2000. 18 p.
2. American Society of Testing and Materials. *Standard Practice for Verification and Classification of Extensometer System*. United States of America: ASTM, 2002. 13 p.
3. BUSSLINGER, Matthias. *Landslide time-forecast methods*. HSR University of Applied Sciences. Switzerland: Institut für Bau and Umwelt, 2009. 31 p.
4. CACYA DUEÑAS, Lourdes Delia. *Métodos de evaluación de los deslizamientos*. Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Instituto Geofísico del Perú, V. S., 2004. 11 p.
5. CHATWIN, Stephen; HOWES, Daniel. *A Guide for management of landslide-prone terrain in the Pacific Northwest*. 2a ed. United States of America: Research Branch Ministry of Forests, 1994. 220 p.

6. CHEN, Zuyu; ZHANG, Jianmin; LI, Zhongkui. *Landslides and engineered slopes, from the past to the future*. United Kingdom: Taylor & Francis Group, 2008. 2124 p.
7. CORNEJO SALAZAR, Dora Alicia. *Sistema de monitoreo remoto para el control de deslizamientos*. Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Instituto Geofísico del Perú, V.S., 2004. 9 p.
8. DAS, Braja. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. United States of America: Thompson International, 2001. 594 p.
9. DE BLASSIO, Fabio Vittorio. *Introduction to the physics of landslides*. United States of America: Springer Science + Business Media B.V., 2011. 408 p.
10. DUNCAN, Michael; WRIGHT, Stephen. *Soil strength and slope stability*. 13a ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2005. 310 p.
11. DUNNICLIFF, John. *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. United States of America: Wiley-Interscience Publication, 1988. 577 p.
12. _____. *Suggested methods for surface monitoring of movements across discontinuities. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974 – 2006*. Turkey: Kozan Ofset Matbaacilik San., 2007. 628 p.

13. FUKUZONO, Teruki. *A New method for predicting the failure time of a slope*. IVth International Conference and Field Workshop on Landslides. Japan: National Research Center for Disaster Prevention, 1985. 5 p.
14. GONZÁLEZ de VALLEJO, Luis. *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Educación, 2002. 744 p.
15. HOLTZ, Robert; KOVACS, William. *An Introduction to geotechnical engineering*. United States of America: Prentice-Hall Inc., 2001. 733 p.
16. MAYORGA TORRES, Tannia. *Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (Radar de Apertura Sintética)*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Córdoba. Argentina: Universidad Nacional de Córdoba, 2013. 229 p.
17. MENDOZA LÓPEZ, Manuel; DOMÍNGUEZ MORALES, Leobardo. *Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento*. México: CENAPRED, 2002. 80 p.
18. MORA, Sergio; VAHRSON, Wilhelm. *Modelo determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos en grandes áreas utilizando indicadores morfodinámicos*. Costa Rica: Universidad Nacional de Heredia, 1991. 30 p.

19. POPESCU, Mihail. *Landslides Causal Factors and Landslides Remedial Options*. Illinois Institute of Technology. United States of America: Illinois Institute of Technology, 2000. 21 p.
20. ROSE, Nick; HUNGR; Oldrich. *Forecasting potencial slope failure in open pit mines – contingency planning and remediation*. United States of America: International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006. 10 p.
21. SAITO, Masashi. *Forecasting the time of occurrence of a slope ailure*. Japanese National Railways. Japan: Japanese National Railways, 2005. 4 p.
22. SILLERICO, Eleanor. *La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción*. Informes de la Construcción, volumen 62. Madrid: Informes de la Construcción, 2010. 6 p.
23. SUÁREZ DIAZ, Jaime. *Deslizamientos: Análisis geotécnico*. Colombia: Geotecnología, S.A.S., 2005. 582 p.
24. TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph. *Soil mechanics in engineering practice*. 3a ed. United States of America: Jhon Wiley & Sons, Inc, 1996. 549 p.
25. THIEBES, Benni. *Landslides analysis and early warning systems*. United States of America: Springer Theses, 2012. 266 p.

26. Transportation Research Board. *Use of Inclinometer for geotechnical instrumentation on transportation projects*. United States of America: Transportation Research Board, 2008. 79 p.
27. TURCOTTE, Donald; SCHUBERT, Gerald. *Geodynamics*. 2a ed. United States of America: Cambridge University Press, 2002. 848 p.
28. WIECZOREK, Gerald; SNYDER, James. *Monitoring slope movements*. United States of America: Geological Society of America, 2009. 25 p.

ANEXOS

Anexo 1. **Instrumentación utilizada en el monitoreo de deslizamientos en laderas: monitoreo por inclinómetros**

Los inclinómetros son dispositivos que pueden medir la deformación angular normal al eje de un tubo introducido en el suelo por medio de una sonda que atraviesa dicha tubería. La sonda contiene un sensor gravitacional diseñado para medir la inclinación resultante respecto a la vertical. La tubería puede ser instalada dentro de un pozo o bien hincada en suelo suave, y en la mayoría de las aplicaciones es colocada siguiendo una alineación cercana a la vertical.

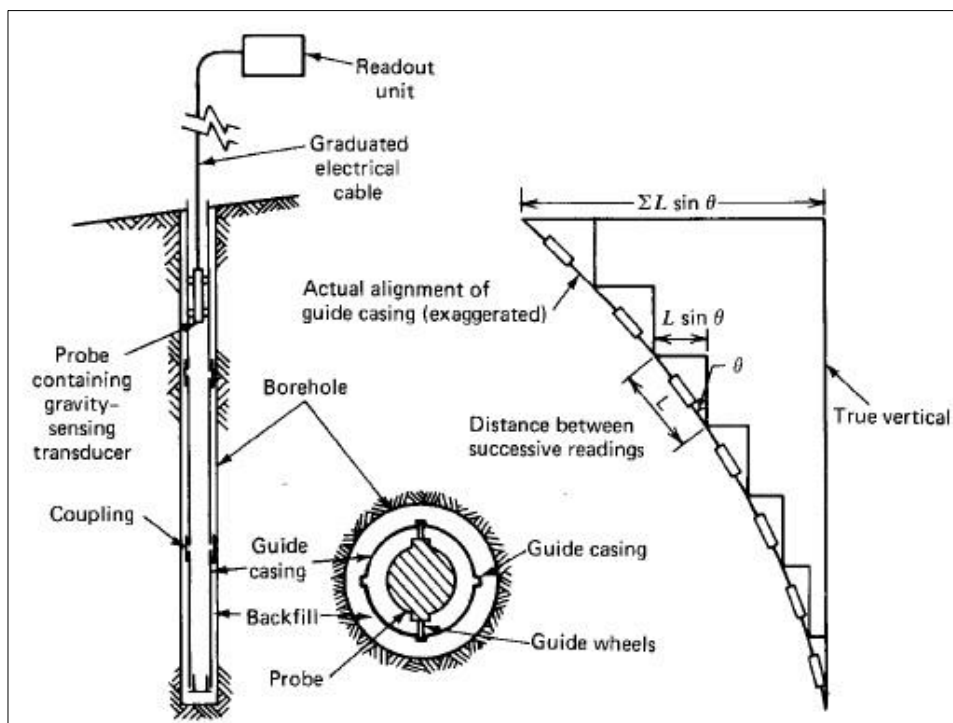
Entre las aplicaciones típicas para estos dispositivos están:

- La determinación de la zona de movimiento del deslizamiento.
- El monitoreo de la magnitud y velocidad del movimiento horizontal de terraplenes de presas, terraplenes en suelos suaves, excavaciones a cielo abierto o túneles.
- El monitoreo de la deformación de mamparas divisorias, pilotes o muros de contención.

Los inclinómetros son instrumentos complejos que no se limitan a mediciones perpendiculares al plano vertical, sino que pueden ser utilizados dentro de tuberías horizontales para mediciones de asentamientos entre estratos, o dentro de tuberías inclinadas para realizar monitoreos en las escolleras de los diques. Además pueden ser utilizados para medir posiciones absolutas lo cual resulta útil cuando se trata de determinar la posición de pilotes.

La mayoría de inclinómetros en el mercado poseen cuatro componentes principales que se muestran en la siguiente figura:

Anexo 1a. **Principio de operación de un inclinómetro**



Fuente: DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. p. 252.

- Una carcasa que funciona como guía (*“guide casing”*) instalada permanentemente puede estar construida de plástico, aluminio, fibra de vidrio o acero. Cuando se necesita realizar mediciones de deformaciones horizontales, la guía se coloca de una manera lo más próxima a la vertical. La guía usualmente posee ranuras de seguimiento para controlar la orientación de la sonda.
- Una sonda portátil que contiene un transductor de detección gravitacional. (*“Probe containing gravity-sensing transducer”*).
- Una unidad de lectura portátil que funciona como fuente de alimentación y registra la inclinación de la sonda. (*“Readout unit”*).
- Un cable graduado que une la sonda con la unidad de lectura portátil, el cual está sostenido por una polea para asegurar el suave deslizamiento dentro de la guía. (*“Graduated electrical cable”*).

Además, la figura anterior expone la forma de operación de un inclinómetro, la cual se describe a continuación: una vez se ha realizado la instalación de la carcasa que funciona como guía vertical, la sonda se introduce y desciende hasta el fondo de la misma en donde se realiza la primera lectura.

Posteriormente, se procede a alzar la sonda para tomar lecturas adicionales mientras se incrementa la elevación de la misma hasta llegar a la parte superior de la guía. La diferencia entre las lecturas iniciales y las finales definen si existe algún cambio en la alineación de la guía para generar un factor de corrección. La deformación horizontal absoluta es medida a través de sencillos cálculos generados a partir de la diferencia angular entre dos puntos de interés.

Anexo 1b. **Cuadro comparativo entre distintos tipos de inclinómetros**

Tipo de inclinómetro	Ventajas	Limitaciones	Precisión Aprox.
Inclinómetro con transductor de servoacelerómetros de fuerza balanceada	Alto récord de experimentación exitosa.		±1 – 30 mm en 30 m
	Versiónes disponibles con lecturas automáticas, registros y depuración de datos.		
	Versiónes disponibles para registrar mediciones horizontales.		
Inclinómetro con indicador de pendiente Serie 200B	Alto récord de experimentación exitosa.	La versión estándar trabaja de manera uniaxial.	±8 – 25 mm en 30 m
		No posee versión con lecturas automáticas.	
		El producto ha sido discontinuado.	
Inclinómetro con transductor con galgas de resistencias.		Posibilidad de errores debido a la humedad, temperatura y conexiones eléctricas.	±0,5 – 25 mm en 30 m
		Discontinuado por la mayoría de fabricantes.	
Inclinómetro con transductor de alambre vibratorio.	Alto récord de experimentación exitosa.	Técnicas muy complicadas para reducir la posibilidad de errores.	±3 – 13 mm en 30 m
		Discontinuado por la mayoría de fabricantes.	
Inclinómetro con transductor de nivel electrolítico.		El tamaño del transductor limita el uso de mediciones en planos horizontales.	±50 mm en 30 m
		Poco récord de experimentación.	
Probeta de corte.	Simple y de bajo costo.	Poca precisión.	Muy tosco.
		No puede medir inclinaciones. No logra determinar valores en puntos de baja curvatura.	

Fuente: DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. p. 253.

Existen diferentes tipos de inclinómetros en el mercado, la mayoría de los mismos pueden medir el ángulo de inclinación en ambos ejes perpendiculares al plano vertical, consiguiendo con esto una medición de los desplazamientos transversales y longitudinales para lograr una mejor precisión en la longitud real del vector desplazamiento; los mismos son presentados en una tabla comparativa donde se muestran los dispositivos más utilizados en el mercado internacional.

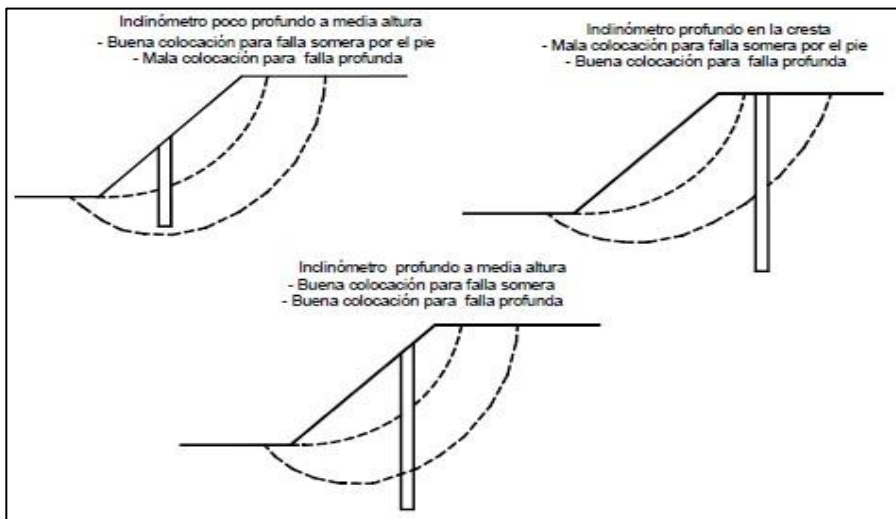
La localización del inclinómetro respecto a la superficie de falla juega un papel importante en el criterio del técnico que instala el dispositivo, ya que una colocación inadecuada puede generar datos confusos. Al momento de colocar la guía, es importante realizarlo en un punto que pueda registrar la mayor cantidad de información del deslizamiento. Algunos autores recomiendan una instalación del inclinómetro de manera profunda y a media altura para monitorizar las superficies de fallas tanto somera como profunda, si es que existe.

Una vez instalada la carcasa guía, debe rellenarse el espacio anular que se encuentra entre el tubo y el agujero de la perforación con un sistema de inyección para asegurar que los movimientos de la guía reflejen realmente los desplazamientos del suelo y además asegurar que el instrumento se encuentre apoyado en toda su longitud.

Dicho proceso se realiza a través de la inyección de alguna lechada, de preferencia sin grava o arena, para garantizar que todos los espacios sean llenados. Para evitar que la guía salga a flote por el ingreso de la lechada alrededor, es recomendable que esta se llene de agua para que el empuje hidrostático que provoca la lechada no expulse la guía. Es importante que la lechada sea más densa que los estratos duros, y más blanda que los estratos

suaves, según la estratificación del punto que se está monitorizando, para evitar que la rigidez de la lechada afecte las mediciones.

Anexo 1c. **Localización de un inclinómetro respecto a la superficie de falla**



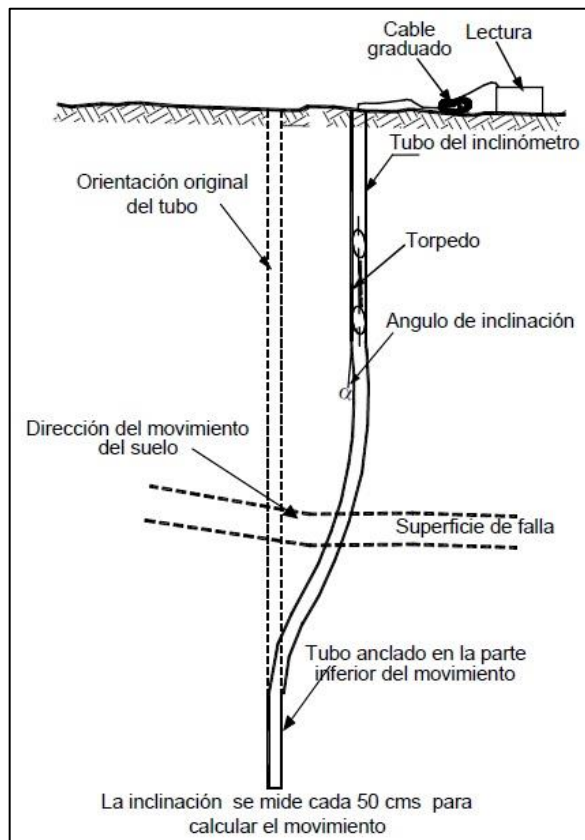
Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 510.

Una vez la lechada se ha cementado, se procede a recolectar los datos que brinda el instrumento. La recolección de datos generalmente requiere dos técnicos especializados en el manejo del instrumento. El procedimiento para tomar datos del instrumento en campo es el siguiente:

- Se hace una prueba con la sonda para verificar que no existan bloqueos dentro de la guía hasta unos 6.00 metros por debajo del nivel del agua. Es recomendable utilizar una sonda falsa para este propósito, esto con el fin de no dañar la original en caso se encuentre alguna obstrucción generada por la lechada o el ingreso de algún material ajeno.

- La sonda se deja un tiempo prudencial dentro de la guía para que se normalice con la temperatura del agua; se recomienda dejar la sonda sumergida alrededor de 10 minutos.

Anexo 1d. **Esquema de utilización de un inclinómetro**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 505.

- Se procede a realizar las mediciones de los ángulos de desviación a cada 0,50 metros, empezando desde el fondo hasta llegar a la superficie. Se anotan las desviaciones registradas en ambas direcciones perpendiculares al plano vertical.

- Se remueve totalmente la sonda de la guía, se gira a 180° sobre el eje vertical, y se procede a realizar las mismas mediciones utilizando la metodología anterior, incluyendo la espera de 10 minutos para que se normalice la temperatura de la sonda. Los resultados de la segunda medición deberán ser los mismos que en la primera, cambiando únicamente la dirección de las desviaciones; este último paso se realiza suponiendo que el instrumento que se esté utilizando logre mediciones biaxiales.

Teóricamente, la suma algebraica de ambas mediciones deberá ser cero; sin embargo, generalmente se presentan algunas diferencias. Es importante la medición inicial de cada estación para poder definir el margen de error que pudiese tener el instrumento, ya sea por el tipo de uso, por cambios muy susceptibles en la temperatura o por el mal manejo del instrumento por parte de los operadores.

Como cualquier instrumento, es importante tener ciertos cuidados especiales con el inclinómetro cuando se esté utilizando tales como:

- La sonda no debe golpearse contra superficies duras para evitar el daño en los sensores. Si accidentalmente se golpea la sonda, deberá revisarse inmediatamente realizando calibraciones de comprobación.
- No se debe permitir el ingreso de humedad a las conexiones eléctricas, es decir con la parte superior del cable graduado y la unidad de lectura portátil. Por esta razón no debe conectarse el cable a la sonda en presencia de lluvias o de humedad excesiva.

- El transporte del cable es importante; deberá movilizarse de tal forma que no se quiebre para evitar posibles atascamientos dentro de la guía.
- La sonda y las poleas se revisarán frecuentemente. Se deberán limpiar con un cepillo suave para remover cualquier sólido que haya quedado dentro de las mismas, secar y aceitarse antes de proceder a guardarse nuevamente en su caja. En caso de que las poleas fijas o las chumaceras estén dañadas, deberán reemplazarse.

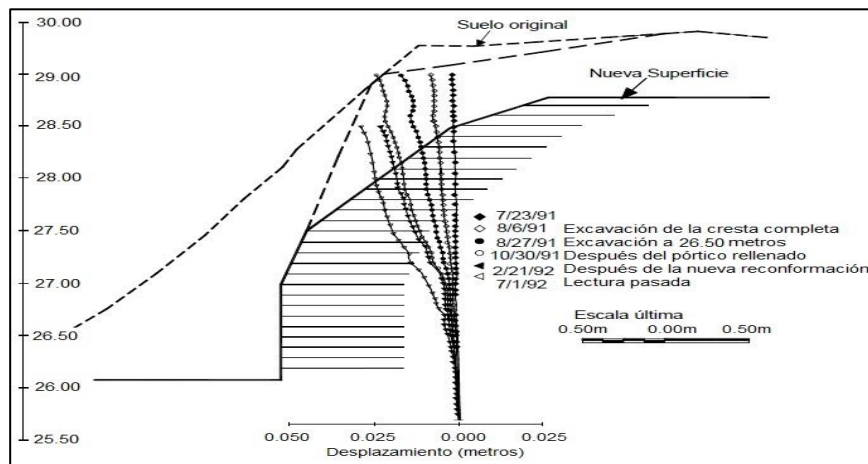
Los inclinómetros son probablemente la herramienta más útil y disponible para un analista de deslizamientos; por esta razón deberán colocarse preferiblemente inclinómetros siempre y cuando sea económicamente factible.

Con la información recolectada de tales instrumentos es posible determinar:

- La localización y forma de la superficie de falla y la profundidad a la que se encuentra.
- El espesor de la superficie de falla suele variar entre 0,30 hasta 1,50 metros, lo cual se utiliza para el diseño de pilotes al cortante, así como también la selección de muestras para ensayos de laboratorio y la posible localización de otros tipos de instrumentación.
- La representación del movimiento, es decir la cantidad del desplazamiento y su dirección, así como también la velocidad del mismo, se logra obtener con la sumatoria de las variaciones de la inclinación en las profundidades adyacentes a la superficie de falla.

- Adicionalmente, se pueden instalar inclinómetros dentro o junto a los pilotes para medir la deflexión de estos debido a la acción de los deslizamientos y poder estimar el momento flector a la que está siendo sometido el pilote a través de la definición general del esfuerzo por flexión.

Anexo 1e. **Ejemplo de interpretación de información de un inclinómetro junto a una excavación**



Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 509.

Se presenta en la figura anterior un ejemplo de la interpretación de los datos obtenidos a través del instrumento y una sección de una excavación que se supervisó bajo dicho método.

Fuente: DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. p. 251-255.

Fuente: SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. p. 502-510.

Anexo 2. **Instrumentación utilizada en el monitoreo de deslizamientos en laderas: monitoreo por GPS**

El Sistema de Posicionamiento Global, por sus siglas en inglés GPS, permite determinar la ubicación de un punto en cualquier parte del globo terráqueo con una precisión de hasta milímetros. La precisión del GPS depende del método que se utiliza para posicionar un punto, la mayor precisión se obtiene cuando se utiliza un GPS diferencial, de otra manera normalmente la precisión generada es de unos pocos metros.

Fue originalmente concebido como una herramienta para tácticas militares terrestres y marítimas, así como para navegación aérea. En las últimas décadas, dicha tecnología ha generado grandes avances en el área de topografía, transporte y seguridad y se ha logrado desarrollar hasta tal punto que la mayoría de dispositivos de comunicación móvil cuentan con un receptor GPS para su uso.

El método que se utiliza en el monitoreo de deslizamientos, denominado como GPS diferencial (DGPS), proporciona a los equipos de usuario correcciones de los datos recibidos de los satélites GPS, con el fin de proporcionar una mayor precisión en la posición calculada.

El sistema consiste de tres partes:

- Una red de 24 satélites en órbita sobre el planeta a 20,200 kilómetros, con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de la Tierra.

- Una o más estaciones monitorizadas terrestres, de las cuales se conoce su ubicación con una alta precisión, están compuestas por un receptor GPS, un microprocesador para calcular los errores del sistema GPS y para generar la estructura del mensaje que se envía a los receptores y un transmisor para establecer un enlace de datos unidireccional hacia los receptores de los usuarios finales.
- Los equipos de usuario o unidades móviles, compuestas por un receptor GPS y el receptor de enlace de datos desde la estación monitorizada.

El sistema DGPS opera una red de GPS autónomos, los cuales están conectados por medios inalámbricos y son independientes de las influencias meteorológicas, requiriendo únicamente una buena visibilidad. Este método novedoso contrasta con las técnicas geodésicas tradicionales mayormente usadas, las cuales emplean campañas de adquisición de datos a intervalos regulares, usualmente meses, y trabajan mediante la determinación de ángulos y distancias entre puntos, usando instrumentos ópticos tales como teodolitos y/o distanciómetros ópticos.

Las señales de radio emitidas por la estación monitorizada son utilizadas de manera interferométrica, es decir que realizan mediciones a partir de las interferencias que producen dichas señales para generar posiciones relativas con base en la triangulación de las estaciones. El equipo de usuario capta las señales de al menos tres satélites de la red, de los cuales recibe señales indicando la identificación y la hora del reloj de cada uno de ellos. Luego, la estación monitorizada enlaza con el equipo de usuario para realizar las correcciones. Estas observaciones resultantes son posteriormente procesadas para obtener la diferencia entre las estaciones colocadas y la lectura inicial del equipo de usuario.

En la actualidad, hay una tendencia general en los sistemas de monitoreo ambiental, la cual trata de realizar operaciones de manera más automática y autónoma. Esto permite la medición, registro, procesamiento de datos e interpretaciones que son efectuadas por equipos diferentes en distintas ubicaciones en un tiempo casi real, lo cual resulta muy conveniente ya que las señales de GPS suelen tener un tiempo de validez debido al error producido por la disponibilidad selectiva.

El DGPS posiciona una cantidad de pequeñas unidades móviles de medición que incluyen un GPS, instaladas a lo largo de toda la ladera a ser monitoreada, además de una o más estaciones monitorizadas fijas instaladas fuera del área de acción que se prevé que poseerá el movimiento de masa. Dependiendo del tipo de movimiento que pueda ocurrir, las unidades móviles están individualmente conectadas a la estación monitorizada por un cable, radio o un modem celular. La estación monitorizada provee la recolección de datos supervisando la correcta operación de la red, a la cual se puede acceder por medio de un canal de comunicación la cual incluye una conexión a internet.

La lenta dinámica asociada con los movimientos de ladera (desde milímetros hasta centímetros de desplazamiento al año) no requiere de altas frecuencias de adquisición de datos. Si el objetivo es observar posibles movimientos de ladera, es suficiente con realizar mediciones que varían en intervalos de diez a veinte minutos por unidad remota, para ser procesados y obtener la medición de la posición. La estación monitorizada tiene la tarea de recolectar los datos de todos los receptores de la red mientras revisa que las unidades remotas operen correctamente. Los datos de DGPS serán procesados juntos, y los resultados consistirán en las posiciones relativas de las diversas unidades remotas con respecto de la estación monitorizada. Por lo mismo, es

indiferente el valor asumido de latitud y longitud sin ser estos factores que afecten la calidad de las mediciones internas.

Por otra parte, existe la posibilidad de integrar sensores adicionales, cuando el caso específico así lo requiera, al método de DGPS dado que la arquitectura del sistema lo permite. El GPS es un módulo de recepción de frecuencia simple o doble que se caracteriza por un bajo consumo de energía y buena sensibilidad. Para esto la unidad debería de estar equipada con tres puertos análogos y dos digitales. Como parte de la configuración inicial de la estación, estos canales adicionales de medición pueden estar definidos en términos de intervalos de medición, escala y resolución.

Los sensores adicionales son principalmente útiles para tener una mayor precisión, un sensor adicional en este sistema generalmente sirve para compensar una o más interrupciones inherentes a la medición del GPS. Uno de los sensores mayormente utilizados es el distanciómetro láser, el cual se utiliza cuando se tiene una baja visibilidad del horizonte y es difícil divisar el punto requerido. Se utiliza para medir la distancia entre el punto requerido y otros puntos conocidos e integrar dicho punto a la red de medición, de esa manera se logra compensar la pérdida de precisión y calidad de la estación GPS que no tiene las condiciones adecuadas de trabajo.

De lo anterior se deduce que al referirse a sensores adicionales, se hace referencia a otros tipos de sensores ópticos para manejo de información topográfica. Debido a lo innovador del método DGPS, se encuentran diversas ventajas sobre otros métodos utilizando sensores ópticos:

- Con el DGPS, la visibilidad y la distancia entre los puntos a medir no son requerimientos fundamentales.

- La utilización del sistema DGPS es independiente en gran medida de las condiciones meteorológicas y ambientales del lugar.
- El sistema DGPS no muestra dificultad al ponerlo en funcionamiento en operación automática durante largos períodos de tiempo, tanto en el aspecto económico como en su capacidad operativa al aire libre.

A continuación se presenta una comparación entre el sistema DGPS y los sistemas basados en sensores ópticos tradicionales:

Anexo 2a. **Comparación entre DGPS y sensores ópticos tradicionales**

Condiciones de campo	DGPS en fase con post-procesamiento	Sensores tradicionales ópticos
Dependencia de la temperatura y presión ambiental.	Baja	Alta
Dependencia de las condiciones atmosféricas y meteorológicas.	Baja	Alta
Velocidad de medición entre puntos de interés.	Decenas de minutos	Segundos, minutos
Visibilidad entre los puntos de interés.	No requerida	Requerida
Aplicaciones al aire libre.	No presenta ningún problema	Con limitaciones
Exactitud de una medición.	Menor a 10 mm	Depende del instrumento, regularmente es menor a 4 mm

Fuente: CORNEJO SALAZAR, Dora Alicia. *Sistema de monitoreo remoto para el control de deslizamientos*. p.177.

Además, es trascendental la correcta construcción de los puntos de referencia para realizar mediciones coherentes y apropiadas al movimiento. El

punto más importante para cualquier medición ya sea con el DGPS o bien con algún sensor óptico tradicional es el banco de marca. El banco de marca o *datum* de referencia es un punto inamovible en el espacio que se utilizará para analizar las diferencias de localización de los puntos de medida y deberá estar colocado junto con la estación monitorizada terrestre en un lugar fuera del alcance del movimiento de ladera.

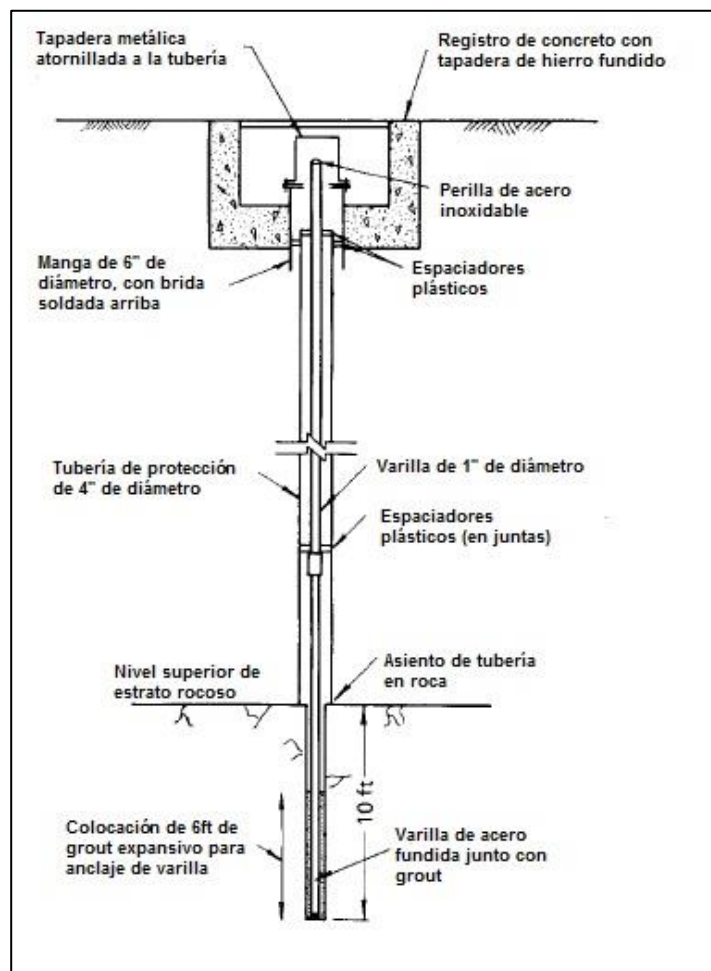
Es de suma importancia verificar que el lugar donde se esté colocando el banco de marca sea un suelo estable y que no se vea afectado por condiciones externas, tales como el cambio del nivel freático o efectos térmicos debido al clima local, que contribuyan a errores por asentamientos o deformaciones térmicas. Esto se logra con la construcción de un banco de marca que esté anclado profundamente preferiblemente en roca. Los bancos de marca que se anclan en estratos poco profundos probablemente sufrirán desviaciones y tal movimiento podrá interferir con la precisión del sistema.

Un banco de marca profundo consiste en una varilla de acero anclada en el fondo, rodeada por una tubería de mayor diámetro, con el fin de que la varilla y el tubo no tengan contacto entre sí y, de esta manera, evitar que la varilla sufra algún arrastre por los movimientos de suelo que pudieran ocasionarse. Además, se deberán colocar espaciadores plásticos entre la varilla y el tubo que la proteja para evitar que la varilla sufra alguna deflexión lateral debido a la longitud libre que esta posea dentro de la tubería.

Por otra parte, puede optarse por la construcción de otro tipo de puesto de control, el cual se utiliza generalmente para registrar diferencias de medidas horizontales. Esta estación de control consiste en la construcción de un pedestal de concreto reforzado lo suficientemente profundo de tal manera que no provoque desviaciones horizontales, y en la parte superior se coloca un

perno y una placa de acero, los cuales se utilizan como punto de referencia. No es recomendable la construcción de dicho tipo de puesto de control sin antes haber realizado un estudio del suelo donde se construirán, para evitar posibles asentamientos que pudiesen afectar la elevación original del pedestal.

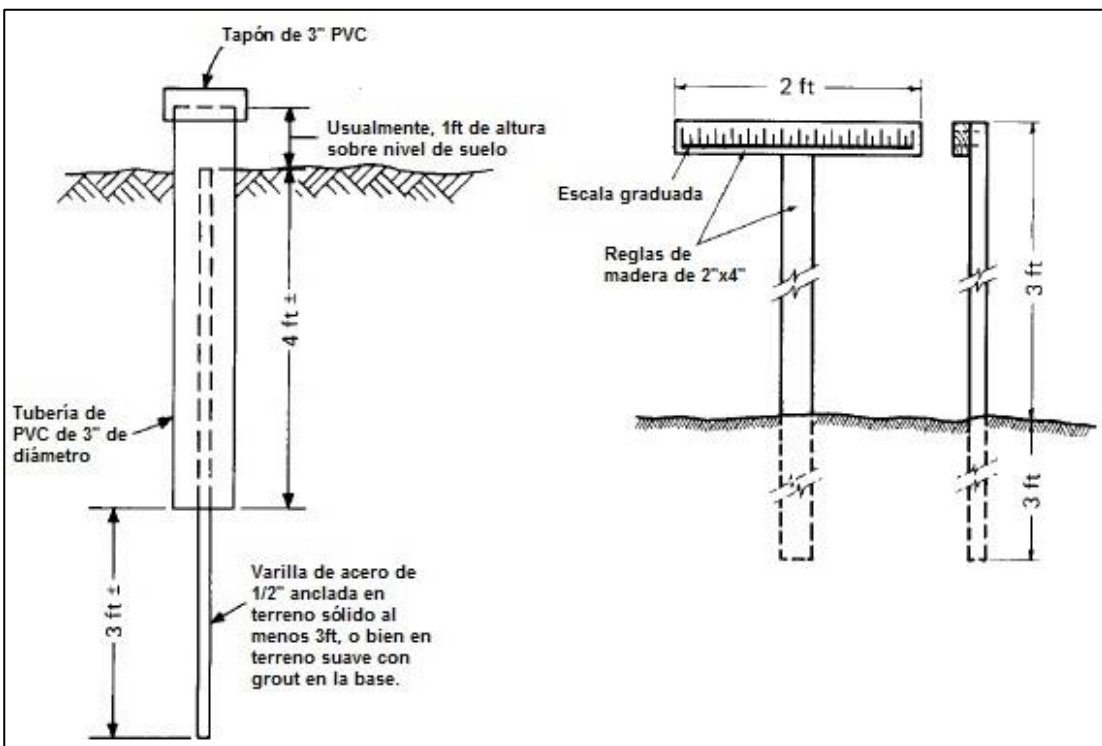
Anexo 2b. Instalación de un banco de marca en roca



Fuente: DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. p. 207.

Por último, es importante la apropiada construcción de los puntos de medida ya que los mismos estarán colocados en el suelo de la ladera que se estará analizando. El punto de medida o estaca de control es un término que se refiere al punto que se encuentra en movimiento debido a la deformación producida por el movimiento de ladera. El requisito principal de dichos puntos es que puedan funcionar apropiadamente durante el tiempo que se estará monitorizando la ladera, lo cual implica que se deben construir con materiales que no sean efímeros y que posean resistencia a los efectos atmosféricos que pudieran originarse.

Anexo 2c. Diferentes modelos de estacas de control



Fuente: DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. p. 209.

Las estacas de control deberán anclarse por debajo de la capa vegetal que pudiera existir en la superficie de la ladera bajo análisis, así como por debajo de la zona de levantamiento por heladas y cambios de humedad debido al clima, con el fin de evitar los ciclos naturales de contracción y dilatación del suelo en condiciones normales atmosféricas.

Existen diversas formas de construir las estacas de control para el monitoreo de deslizamientos. Se puede insertar una varilla de acero de 1/2" en el suelo y protegerla con una tubería y un tapón de PVC para evitar que la intemperización oxide la misma; este modelo de estaca de control es muy útil debido a la larga longevidad del acero, sin embargo es muy común que las mismas sufran debido a actos de vandalismo. Por otra parte, se encuentran las estacas de madera, las cuales son muy versátiles y económicas aunque no soportan la humedad por períodos extensos.

Fuente: DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. p. 205-210.

Fuente: CORNEJO SALAZAR, Dora Alicia. *Sistema de monitoreo remoto para el control de deslizamientos*. p.176-178.

Anexo 3. **Instrumentación utilizada en el monitoreo de deslizamientos en laderas: monitoreo por control remoto**

En la última década, se han realizado avances acerca del monitoreo de laderas a través de nuevas tecnologías para visualizar de manera anticipada los lugares en donde se está más propensa la creación de movimientos de suelos. Tales tecnologías se han desarrollado a través de sensores a control remoto, los cuales permiten recoger información por medio de equipos que no están en contacto directo con el objeto de investigación.

Los aparatos utilizados a través de dicha técnica varían desde la utilización de cámaras, radares y radiómetros; estos trabajan dentro del espectro electromagnético que va desde las ondas largas de radio hasta las cortas ondas de los rayos gamma y ondas de radiación cósmica.

En la última década se han realizado experiencias con una nueva técnica de monitoreo sobre las deformaciones que pudiesen ocurrir en la superficie del terreno, a partir de imágenes adquiridas desde satélite por sensores activos en la región las microondas denominada DInSAR, por sus siglas en inglés, la cual se fundamenta en la detección de pequeñas variaciones de altitud a partir del cálculo de la diferencia de fase de pares de imágenes radar sobre una misma área de estudio.

La interferometría SAR (InSAR) y su variante DInSAR, son técnicas basadas en el proceso y análisis de imágenes de radar de apertura sintética (SAR). Los SAR son sensores de los denominados activos, que registran

imágenes de alta resolución espacial. Una antena de apertura sintética o virtual, consiste en un vector de sucesivas y coherentes señales de radar que son transmitidas y recibidas por una pequeña antena que se mueve a lo largo de un determinado recorrido de vuelo u órbita. El procesamiento de la señal usa las magnitudes y fases de la señal recibida sobre pulsos sucesivos para crear una imagen.

Anexo 3a. Características de los principales sensores SAR

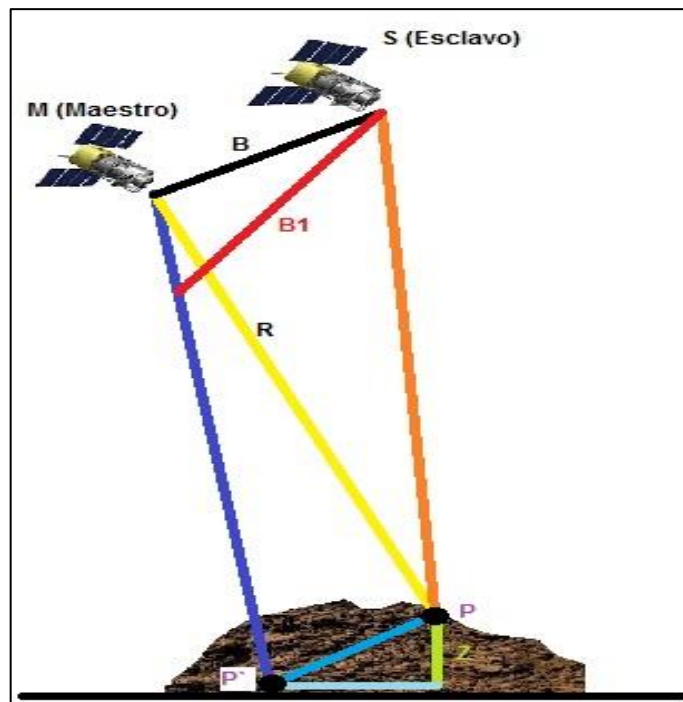
Satélite	Longitud de onda (cm)	Ángulo de incidencia (°)	Resolución espacial (m)	Ciclo de repetición (días)	Altitud de órbita (Km)	País
ERS-1	5-6 {c-band}	23,5	25.0	3, 5 & 176	782 – 785	Europa
ERS-2	5-6 {c-band}	23,5	25.0	35	780	Europa
JERS-1	23,5 {l-band}	35,0	18.0	44	568	Japón
RADARSAT	5-6 {c-band}	37,0	10.0	24	793 – 821	Canadá
ENVISAT	5-6 {c-band}	21,0 & 38,0	25.0	35	800	Europa
RADARSAT-2	{c-band}	20,0 – 49,0	3.0 – 100.0	2 – 3	798	Canadá
TERRASAR-X	3,10 {x-band}	20,0 – 45,0	1.0 – 18.0	11	512 – 530	Alemania

Fuente: SILLERICO, Eleanor. *La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción*. p. 48.

A partir de la interferometría, los datos obtenidos son las distancias entre el satélite y la superficie del terreno, calculados mediante la medición de tiempos y desfases. En síntesis, los SAR son sistemas de radares que generan

imágenes de alta resolución. La interferometría SAR es una técnica de procesamiento de imagen que permite generar, a través de dos pases interferométricos del sensor SAR, el modelo digital de elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés) y la coherencia relativa a través de un sistema de información geográfica. Así pues InSAR consiste en medir las diferencias de fase entre el satélite y la tierra en dos pasos del satélite por la misma zona.

Anexo 3b. Funcionamiento de técnica InSAR



Fuente: SILLERICO, Eleanor. *La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción*. p. 50.

Estas diferencias de fase están en función de la distancia y pueden ser debidas básicamente a dos motivos: en primer lugar, a la diferencia de posición entre las dos trayectorias, lo cual permite medir la topografía del terreno; en segundo lugar, a un desplazamiento de la zona observada entre las dos

adquisiciones. De lo cual se deduce que la interferometría SAR es una técnica que permite la detección de movimientos y deformaciones de la superficie terrestre. La señal reflejada se ve afectada por varios parámetros tales como la atmósfera, el ruido y los movimientos en la superficie; por esta razón la fase interferométrica está dada por la suma de estos efectos y la topografía natural del terreno.

La interferometría SAR diferencial, es una variante del proceso anterior. Se trata de una técnica de proceso de imagen que permite la generación de mapas de desplazamiento del terreno y el cálculo de la coherencia relativa, a partir de varios pasos del sensor SAR por una misma zona de estudio.

El análisis DInSAR puede ser multitemporal, es decir que se adquieren los pares de imágenes necesarios para ejecutar el InSAR a lo largo del tiempo, para seguir movimientos de varios meses o años. Existen distintas técnicas para el procesado DInSAR; por ejemplo, la obtención de los desplazamientos se realiza a partir de las zonas alejadas del fenómeno, zonas que se suponen libres de cambios y con geometría constante, lo que permite filtrar ciertas diferencias “no reales”, producidas por cambios atmosféricos. A partir de las zonas alejadas se va integrando hacia el centro de la zona de estudio, obteniendo los desplazamientos totales.

La técnica DInSAR se utiliza para detectar y medir movimientos muy pequeños de la superficie. Para poder detectar deformaciones tan pequeñas hay que deshacerse de la componente de la topografía que plantea el método InSAR. Después de descomponer la fase interferométrica obtenida se calcula la magnitud del movimiento, logrando detectar movimientos micrométricos.

Esta técnica ha tenido un gran crecimiento a partir del 2003, mostrando una tendencia ascendente en cuanto al uso de la misma y esperando que se realice una optimización debido al perfeccionamiento tecnológico de los sensores. El campo de mayor aplicación de dicha técnica, en relación con la medición de deformaciones superficiales, es el de los movimientos de ladera, así como subsidencias provocadas por minería y sismos. Sin embargo; dicha técnica también puede ser útil en el campo de los asentamientos debidos a la extracción del agua del subsuelo y a la actividad volcánica.

Una de las ventajas más notables de la técnica DInSAR es que puede cubrir áreas tan grandes de hasta diez mil kilómetros cuadrados, facilitando la recolección y procesamiento de gran cantidad de datos con un bajo costo. La posibilidad de detectar desplazamientos del orden micrométrico hace que la técnica sea viable en la monitorización de casi cualquier estructura geológica. No obstante, la técnica se basa en la extracción de la información de un par de imágenes adquiridas en distintos lapsos de tiempo, por lo que puede ocurrir que la frecuencia de muestreo sea superior a la frecuencia de adquisición de imágenes, lo cual provoca problemas en proyectos donde se necesite recolectar información a diario.

Debido a la extensa variedad de casos particulares para los cuales se puede utilizar dicha técnica, se han desarrollado varias evoluciones del método DInSAR, entre los más utilizados se pueden listar los siguientes:

- InSAR de dispersión persistente (PSInSAR). Realiza mediciones de movimientos del terreno en puntos de dispersión persistentes, los cuales se seleccionan previamente y se caracterizan por ser permanentes y destacados tales como los tejados de edificios, estructuras metálicas y elementos naturales.

- InSAR con reflectores de esquina (CRInSAR). Utiliza reflectores de esquina de bajo costo para que actúen como puntos de dispersión permanentes artificiales construidos a propósito.
- InSAR con transmisores activos de tipo compacto (CATInSAR). Utiliza dispositivos automáticos que transmiten una señal de radar del satélite que está en órbita. Esta transmisión es registrada por el satélite de la misma manera que un haz se refleja en un reflector de esquina. Los transmisores compactos activos son más sencillos de instalar que los reflectores de esquina, son menos vulnerables estructuralmente y supone un considerable ahorro de costos.

Fuente: SILLERICO, Eleanor. *La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción*. p. 45-55.