



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

POSGRADO EN GEOGRAFÍA

Procesos de remoción en masa:

Instrumentación,
monitoreo y modelación

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A :

LIC. RICARDO JAVIER GARNICA PEÑA

ASESOR: DRA. IRASEMA ALCÁNTARA AYALA



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F., 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Dedico con muchísimo cariño
este trabajo a las personas que más
quiero y que siempre me han apoyado:
Mamá, Papá y mi hermana Claudia.
Gracias.*

AGRADECIMIENTOS

A mi asesora, ***Dra. Irasema Alcántara Ayala***, por su apoyo, orientación, confianza y por todo aquello que nos permitió unirnos, no sólo como asesor-estudiante, sino también como amigos. Gracias por confiar en mí.

A mis sinodales, ***Mtra. Oralia Oropeza Orozco, Dr. Jean-François Parrot, Dr. José López García y al Dr. Mario Arturo Ortiz Pérez***, por la revisión de este trabajo y por sus observaciones y consejos que permitieron el enriquecimiento de esta tesis.

A la ***Universidad Nacional Autónoma de México***, por brindarme la oportunidad de continuar mis estudios y mi desarrollo profesional. Asimismo, por el apoyo económico otorgado por medio de los proyectos PAPIIT-DGAPA-UNAM, IN310002-3 "Efectos espacio-temporales de la deforestación en la inestabilidad de laderas: un enfoque de prevención de desastres" e IN304306 "Construcción y fragmentación de un rompecabezas llamado riesgo: prevención de desastres en comunidades indígenas de la Sierra Norte de Puebla".

Al ***CONACyT*** por el apoyo económico otorgado, el cual facilitó la realización de este estudio, así como por la oportunidad de participar en el proyecto 49844 "Precipitación e inestabilidad de laderas en la Sierra Norte de Puebla: instrumentación y prevención de desastres"

Al ***Instituto de Geografía***, por facilitar el uso de las instalaciones y al ***Posgrado en Geografía***.

A mis amigos el ***Mtro. Roberto Borja Baeza, la Lic. Marlene López Mendoza, el Lic. Omar Esteban Chávez y la Mtra. Jovanna Castilla***) por su amistad y aquellos momentos que hemos vivido a lo largo de esta carrera.

A mis grandes amigos por más de 10 años, ***Brenda, Fabián y Mauricio (¡What!)***, por su amistad y por todas las ocasiones en las cuales nos divertimos.

Y a todas aquellas personas que han estado ahí para apoyarme.

¡Gracias!

CONTENIDO

Resumen.....	I
--------------	---

Capítulo 1. Introducción

1.1 Marco contextual.....	1
1.1.1 Antecedentes.....	1
1.1.2 Justificación.....	2
1.1.3 Relevancia.....	3
1.1.4 Conjetura.....	4
1.1.5 Objetivos.....	4
1.2 Resumen capitular.....	5
1.3 Caracterización de la zona en estudio.....	6
1.3.1 Evolución geológica de la Sierra Norte de Puebla.....	10
1.3.2 Geomorfología.....	12
1.3.3 Clima e hidrografía.....	12
1.3.4 Población.....	15

Capítulo 2. Procesos de remoción en masa en la sierra norte de Puebla: relevancia y escenarios futuros

2.1 Conceptualización de los procesos de remoción en masa.....	17
2.2 Factores que influyen en los procesos de remoción en masa.....	21
2.3 Efectos e importancia de los procesos de remoción en masa.....	22
2.4 Procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla.....	23
2.5 Precipitación e inestabilidad.....	28

Capítulo 3. Modelación

3.1 Conceptualización.....	30
3.2 Características de los modelos.....	30
3.3 Las funciones de los modelos.....	31
3.4 Tipos de modelos.....	31
3.5 Modelos en geomorfología.....	32
3.6 Modelos en los procesos de remoción en masa.....	36
3.7 Índice de estabilidad y modelo infinito de estabilidad de laderas.....	40
3.8 Consideraciones finales.....	42

Capítulo 4. Instrumentación

4.1 Introducción.....	44
4.1.1 Experimentos y pruebas en campo en el ámbito de la geomorfología.....	44
4.1.2 Experimentos en geomorfología.....	44

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN

4.2 Instrumentación y monitoreo de laderas.....	45
4.2.1 Requerimientos básicos de una instrumentación.....	49
4.2.2 Métodos de monitoreo de laderas.....	50
4.2.2.1 Morfometría de laderas.....	50
a) Forma de la ladera	
b) Microtopografía superficiales del terreno	
c) Levantamientos topográficos	
d) Mediciones del agrietamiento en el terreno	
4.2.2.2 Mediciones <i>in situ</i> del estudio de la falla de la ladera.....	53
a) Sondeo subsuperficial	
b) Determinación de la superficie de deslizamiento	
4.2.2.3 Factores hidrológicos.....	57
a) Monitoreo de la precipitación	
b) Monitoreo de la infiltración	
c) Monitoreo del nivel freático y la presión del agua en el subsuelo	
4.2.2.4 Estudios de gabinete, laboratorio, modelación y simulación.....	66
a) Pruebas geotécnicas	
b) Modelación y simulación	
4.3 Sistemas de monitoreo y alertamiento automatizados.....	67
4.3.1 Sistemas automáticos de monitoreo.....	68
a) Sistemas semiautomáticos	
b) Sistemas automáticos	
4.4 Consideraciones finales.....	72
Capítulo 5. Instrumentación y monitoreo de la ladera experimental (metodología)	
5.1 Introducción.....	73
5.2 Características de la ladera experimental.....	73
5.3 Instalación de la estación meteorológica.....	76
5.4 Levantamiento topográfico a detalle.....	78
5.5 Pruebas <i>in situ</i> de las propiedades de los materiales.....	81
a) Conductividad hidráulica	
5.6 Pruebas de laboratorio.....	85

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN

5.6.1 Cohesión y ángulo de fricción interna.....	87
5.6.2 Determinación de la cohesión y el ángulo de fricción interna de las muestras colectadas.....	89
a) Cohesión y ángulo de fricción interna	
b) Límites plástico y líquido, e índice de plasticidad	
c) Granulometría	
5.7 Instalación de tensiómetros semiautomáticos.....	95

Capítulo 6. Modelación y análisis de estabilidad de la ladera

6.1 Introducción.....	104
6.2 Programa PCRaster.....	104
6.2.1 Modelación dinámica.....	105
6.3 Proceso de modelación y resultados.....	107
6.3.1 Resultados.....	109
Conclusiones	114
Referencias	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Localización de la zona en estudio.....	7
Figura 1.2. Mapa topográfico general del municipio de Tlatlauquitepec.....	8
Figura 1.3. Mapa de pendientes de la Sierra Norte de Puebla y la localización de algunos procesos de remoción ocurridos.....	9
Figura 1.4. Mapa geológico del municipio de Tlatlauquitepec.....	11
Figura 1.5. Mapa morfogénico del municipio de Tlatlauquitepec.....	13
Figura 1.6. Mapa de pendientes del municipio de Tlatlauquitepec.....	16
Figura 2.1. Imágenes de un proceso de caída.....	19
Figura 2.2. Imágenes de un proceso de vuelco.....	19
Figura 2.3. Imágenes de un proceso de deslizamiento rotacional.....	19
Figura 2.4. Imágenes de un proceso de deslizamiento translacional.....	20
Figura 2.5. Imágenes de un proceso de flujo.....	20
Figura 2.6. Imágenes de un proceso de expansión lateral.....	20
Figura 2.7. Deslizamiento en el municipio de Tlatlauquitepec.....	23
Figura 2.8. Proceso de remoción en masa ocurrido en 1999 en el municipio de Zapotitlán de Méndez.....	24
Figura 2.9. Proceso de remoción en masa ocurrido en 1999 en el municipio de San Esteban Cuautempan.....	24
Figura 2.10. Daños en vivienda ocasionados por la ocurrencia de un proceso de remoción en masa en el municipio de Zapotitlán de Méndez.....	25
Figura 2.11. Proceso de remoción en masa en el municipio de Zacatlán.....	26
Figura 2.12. Proceso de remoción en masa en el municipio de Tlatlauquitepec....	26
Figura 2.13. Proceso de remoción en masa en el municipio de Zacatlán.....	26
Figura 2.14. Proceso de remoción en masa en el municipio de Zacatlán.....	26
Figura 2.15. Proceso de remoción en masa en la localidad de la Unión, Tlatlauquitepec.....	27
Figura 2.16. Proceso de remoción en masa en la localidad de la Unión, Tlatlauquitepec.....	27
Figura 2.17. Proceso de remoción en masa en una localidad del municipio de Tlatlauquitepec.....	27
Figura 2.18. Proceso de remoción en masa en localidades del municipio de San Esteban Cuautempan.....	27
Figura 2.19. Proceso de remoción en masa en localidades del municipio de San Esteban Cuautempan.....	27
Figura 3.1. Programa CHASM.....	38
Figura 3.2. Programa SLIDE.....	38
Figura 3.3. Programa GALENA.....	38
Figura 3.4. Programa SINMAP.....	38
Figura 3.5. Modelo infinito de estabilidad de laderas.....	41
Figura 4.1. Relación aproximada entre intensidad de lluvia y deslizamientos de laderas en Hong Kong.....	49

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

Figura 4.2. Representación conceptual del instrumento para levantamientos de microtopografía.....	52
Figura 4.3. Extensómetro eléctrico para el monitoreo de grietas.....	54
Figura 4.4. Principio de funcionamiento del dispositivo TDR.....	57
Figura 4.5. Estación meteorológica tipo Davis.....	58
Figura 4.6. Hietograma.....	59
Figura 4.7. Infiltrómetro de doble anillo.....	61
Figura 4.8. Tensiómetro electrónico.....	62
Figura 4.9. Uso de un piezómetro.....	64
Figura 4.10. Representación de la instalación y uso de un piezómetro.....	64
Figura 4.11. Representación de un sistema automático de monitoreo.....	68
Figura 4.12. Sistema de monitoreo de laderas de Japón.....	70
Figura 4.13. Sistema de monitoreo de laderas en Francia.....	71
Figura 4.14. Representación del monitoreo realizado por la USGS.....	72
Figura 5.1. Localización de la ladera en estudio.....	75
Figura 5.2. Fotografía de la parcela experimental.....	76
Figura 5.3. Fotografía de la parcela experimental.....	76
Figura 5.4. Pantalla de registro de la estación meteorológica.....	77
Figura 5.5. Localización de la estación meteorológica.....	77
Figura 5.6. Registro diario de la precipitación en la localidad de La Unión.....	78
Figura 5.7. Puntos registrados durante el levantamiento topográfico de la ladera en estudio.....	80
Figura 5.8. Modelo digital de elevación de la ladera creado en el programa ILWIS	80
Figura 5.9. El modelo tridimensional de la ladera en estudio elaborado en el programa Surfer.....	81
Figura 5.10. Rangos de conductividad hidráulica en varios tipos de suelos y rocas	83
Figura 5.11. Permeámetro Guelph.....	85
Figura 5.12. Perfil de la ladera en la cual se extrajeron las muestras de suelo.....	86
Figura 5.13. Perfil de la ladera en la cual se extrajeron las muestras de suelo.....	86
Figura 5.14. Muestras cúbicas extraídas del perfil.....	87
Figura 5.15. Muestras cúbicas extraídas del perfil.....	87
Figura 5.16. Muestras cilíndricas extraídas del perfil.....	87
Figura 5.17. Muestras cilíndricas extraídas del perfil.....	87
Figura 5.18. Gráfica de la ecuación de Coulomb.....	88
Figura 5.19. Vista lateral de una copa de Casagrande.....	92
Figura 5.20. Vista frontal de una copa de Casagrande.....	92
Figura 5.21. Perfil de la zona en estudio y los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio.....	94
Figura 5.22. Curva granulométrica de los materiales a diferente profundidad.....	96
Figura 5.23. Tensiómetros estándar.....	97
Figura 5.24. Tensiómetros automatizados.....	97
Figura 5.25. Tarjeta de registro de datos “data logger”.....	98

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

Figura 5.26. Proceso de calibración de los transductores usados para automatizar los tensiómetros.....	99
Figura 5.27. Representación general del sistema de monitoreo a través de tensiómetros automatizados.....	100
Figura 5.28. Instalación y configuración de la tarjeta de registro de datos.....	101
Figura 5.29. Relación de los registros de lluvia y succión del agua en la ladera experimental.....	102
Figura 5.30. Relación de los registros de lluvia y succión del agua en la ladera experimental.....	102
Figura 5.31. Incrementos en la succión debido al bajo contenido de humedad en el suelo.....	103
Figura 6.1. Esquema de trabajo en el programa PCRaster. En la sección derecha se anotan los pasos que debe ejecutar el modelo.....	105
Figura 6.2. Función SIG incluida en PCRaster que permite visualizar y editar mapas.....	106
Figura 6.3. Sección dinámica en la cual se anotan los cálculos a realizar para determinar el factor de seguridad.....	108
Figura 6.4. Factor de Seguridad real de la ladera, de acuerdo a los parámetros recabados.....	110
Figura 6.5. Factor de Seguridad como resultado de una modificación del 100 % en los valores de las variables y la precipitación.....	111
Figura 6.6. Relación entre la cohesión y el ángulo de fricción interna con el cambio en el factor de seguridad (FS).....	112
Figura 6.7. Relación entre los cambios en la pendiente, profundidad y peso del suelo con el factor de seguridad (FS).....	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de los procesos de remoción en masa, EPOCH, 1993.....	18
Tabla 2.2. Algunas de las causas que influyen en la inestabilidad de laderas.....	21
Tabla 3.1. Programas usados en la modelación de estabilidad de laderas.....	39
Tabla 3.2. Clases en función del índice de estabilidad.....	41
Tabla 5.1. Rangos promedio de conductividad hidráulica.....	82
Tabla 5.2. Valores de conductividad hidráulica obtenidos en la ladera en estudio.	85
Tabla 5.3. Valores promedio de cohesión y ángulo de fricción interna.....	89
Tabla 5.4. Resultados obtenidos de las pruebas realizadas a las muestras de suelo colectadas.....	93
Tabla 5.5. Contenido de agua en las muestras de suelo colectadas.....	93
Tabla 6.1. Valores de los parámetros empleados en el modelo.....	108
Tabla 6.2. Variaciones en los valores de los parámetros más importantes y su relación con los cambios en el factor de seguridad.....	111

RESUMEN

En México, como en todo el mundo, los desastres resultan de la combinación de fenómenos naturales y de la vulnerabilidad de la población expuesta, particularmente de aquellas comunidades con altos niveles de marginación. De manera paralela, dichos desastres se han intensificado por la influencia de las actividades antrópicas, tales como el cambio de uso del suelo, la urbanización y la contaminación, entre otros.

Los procesos de remoción en masa –comúnmente conocidos como deslizamientos o derrumbes- representan una amenaza frecuente para la población. Entre otros factores, lo anterior es consecuencia de una creciente urbanización en zonas no aptas, como son las laderas montañosas con materiales poco resistentes, así como de la influencia del incremento de la precipitación, expresión directa de los cambios en los patrones climáticos. Ambos aspectos, es decir, el crecimiento urbano sin planeación, y el aumento de la precipitación, han sido determinantes en la ocurrencia de desastres por procesos de remoción en masa.

Este estudio se concentra en la Sierra Norte de Puebla, ya que al estar caracterizada por un relieve con fuerte pendiente, una geología heterogénea, lluvias estacionales de gran intensidad y una población con un alto nivel de marginación, ha sido una de las regiones más afectadas por inestabilidad de laderas en años recientes.

La inestabilidad de laderas ocasionada por procesos de remoción en masa difícilmente puede ser evitada. Sin embargo, dado el impacto que estos procesos han tenido recientemente en el área en estudio, es importante establecer una estrategia de monitoreo de laderas que permita conocer la dinámica hidrológica del suelo como respuesta a eventos de precipitación extraordinaria. Lo anterior es ingrediente esencial en la determinación de umbrales de precipitación locales que sirvan como insumos para establecer sistemas de alerta en tiempo real.

Concretamente, este trabajo tuvo el propósito de promover la inquietud y la necesidad de emplear técnicas de instrumentación y monitoreo de laderas, así como de sentar las bases de su aplicación, en el contexto de la prevención de desastres. Por ende, los objetivos planteados fueron: (a) Conocer las técnicas de instrumentación empleadas para el monitoreo de inestabilidad de laderas; (b) Establecer una estrategia básica de instrumentación de laderas en la Sierra Norte de Puebla; (c) Análisis de escenarios potenciales de inestabilidad de laderas para el área de estudio.

A pesar de la serie de obstáculos enfrentados en el campo, los procesos involucrados durante las etapas de adquisición-calibración de equipo, así como de instrumentación, permitieron ilustrar los beneficios que conlleva la recolección de datos esenciales de manera continua y precisa para poder entender la dinámica de la inestabilidad de laderas. Esta última, de acuerdo con los escenarios potenciales presentados está controlado básicamente por las propiedades de los materiales, expresadas mediante la cohesión, la fricción y la permeabilidad.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Marco Contextual

1.1.1 Antecedentes

Los desastres se presentan de forma constante en diversas partes del mundo. Si bien, en muchos casos su intensidad y magnitud determinan el grado de afectación en la población, la determinante cuantitativa de los efectos adversos es la vulnerabilidad de los asentamientos humanos. Es bien sabido que cualquier cambio en la superficie de la Tierra, ya sea natural o por acción del hombre, modifica el entorno terrestre. En años recientes estas modificaciones al paisaje han producido un incremento a nivel mundial en la ocurrencia de las amenazas naturales.

Un desastre se caracteriza por ser un evento destructivo que afecta de forma significativa a la población, puede implicar pérdidas de vida o la alteración de fuentes de sustento y funcionamiento. La incidencia de un desastre está en función de un factor muy importante: el riesgo, el cual se define como la posibilidad latente de que ocurran daños como consecuencia de un fenómeno natural o humano. El nivel de riesgo dependerá de dos aspectos relevantes: la amenaza y la vulnerabilidad. Blaikie *et al.* (1994) define a la amenaza como todos aquellos fenómenos naturales que pueden afectar a la población, ya sea de forma individual o como resultado de la combinación de distintos eventos, en función de diferentes grados de intensidad y severidad. Entre las amenazas de tipo natural se encuentran los sismos, las inundaciones, los tornados, las sequías, las nevadas, los procesos de remoción en masa, los huracanes y las erupciones volcánicas, por sólo mencionar algunos. Por otro lado, la vulnerabilidad es entendida como el grado de susceptibilidad de la población a ser afectada por algún agente externo como resultado de sus condiciones sociales, económicas, políticas y culturales inherentes; así como de su nivel de resiliencia para confrontar, mitigar y sobreponerse a los efectos de distensión de los peligros –en este caso de origen natural- a los cuales está expuesta (Alcántara Ayala, 2002). De esta manera el riesgo está en función de la combinación de la amenaza y el grado de vulnerabilidad de la población.

La historia del planeta se ha creado a lo largo de diversas manifestaciones de la dinámica terrestre, ésta reflejada a través de erupciones volcánicas, sismos, inundaciones y una gran cantidad de procesos naturales que crean y modifican la superficie de la Tierra. Entre esos procesos se ubican los de remoción en masa o gravitacionales, los cuales siempre han existido, sin embargo, es hoy cuando estos procesos adquieren gran relevancia debido al impacto que tienen sobre las actividades del ser humano.

1.1.2 Justificación

Actualmente los procesos de remoción en masa tienen gran impacto social y económico, razón por la cual se ha vuelto una constante el estudio y análisis de dichos fenómenos. La base de la ocurrencia de estos procesos se establece a partir de las características físicas de los materiales formadores de las laderas montañosas, así como de la influencia que tienen ciertos agentes o procesos en la estabilidad de los mismos.

Asimismo, es importante mencionar la relación que la dinámica del clima tendrá y tiene hoy día con los procesos de remoción en masa, y a su vez, de estos últimos con los impactos sociales y económicos, por lo que el cambio climático ha tomado gran relevancia.

Por un lado, los cambios en el clima mundial se están reflejando a través del incremento de las precipitaciones intensas (IPCC sitio web) en zonas en las cuales la lluvia no era un problema para la población. Actualmente este incremento en la intensidad está propiciando también un aumento en la ocurrencia de procesos de remoción en masa y por consiguiente en las consecuentes afectaciones. Además, es importante señalar la modificación al paisaje natural debido a las actividades humanas, mismas que están degradando los ecosistemas, y ocupando sitios, a través de una creciente urbanización, en los cuales son recurrentes los procesos de ladera. Esto ha traído como resultado una intensificación en el impacto negativo a la población; un ejemplo muy claro, es la ampliación de las zonas deforestadas, principalmente aquellas ubicadas en laderas de fuerte pendiente, las cuales pierden parte de la cobertura vegetal que las protege del impacto directo de las gotas de lluvia y que además brinda estabilidad a los materiales formadores.

Con la idea de entender los diferentes peligros o amenazas naturales y su impacto en la sociedad se han desarrollado diversas investigaciones, tanto en el ámbito social como en el físico. Esto ha posibilitado la elaboración de planes de prevención, principalmente en países *desarrollados*, así como también en los países *dependientes*, sin embargo, en estos últimos no se cuenta con la cantidad necesaria de recursos por lo que la mitigación no es adecuada, ya que en muchas ocasiones el número de población afectada es mayor que en los países *desarrollados*, en los cuales los costos económicos tienden a ser mayores (huracán Katrina por ejemplo).

En el caso específico de la Sierra Norte de Puebla, los desastres asociados a los procesos de remoción en masa son de gran relevancia debido a las cuantiosas pérdidas humanas y materiales, así como daños a la infraestructura y a poblaciones con altos índices de marginación. Esta situación fue detonada en octubre de 1999, a consecuencia

de la ocurrencia de cientos de procesos de remoción en masa desencadenados por lluvias extraordinarias (Bitrán, 2000), y posteriormente en 2005 a raíz del huracán *Stan*. En este tenor es evidente que la combinación del carácter geológico-geomorfológico y climático, la vulnerabilidad de la población y el impacto antrópico expresado por la deforestación, la construcción de caminos, etc., originan un escenario ideal para la construcción de desastres en la Sierra Norte de Puebla.

1.1.3 Relevancia

La comprensión de la dinámica de los fenómenos naturales ha conllevado la necesidad de desarrollar diversas técnicas de instrumentación y monitoreo. Este avance se ha dado particularmente para fenómenos tales como la actividad volcánica y sísmica, así como el comportamiento de los ríos durante la época de crecidas. El mejoramiento de las técnicas de instrumentación y monitoreo ha permitido contribuir al establecimiento de mecanismos relacionados con la prevención de desastres, lo cual ha sido primordialmente aplicado al monitoreo volcánico y sísmico, además de la instrumentación de cuencas para investigar la dinámica fluvial.

De manera particular, en México, es bien conocido el amplio desarrollo de las técnicas de instrumentación y monitoreo en tiempo real de diversos volcanes activos (ej. Popocatepetl), e igualmente en zonas de gran actividad sísmica (www.cenapred.gob.mx). Algunos de los resultados obtenidos en este tipo de estudios han contribuido a la creación de sistemas de alerta temprana, y por ende han servido como herramientas para la prevención de desastres.

A pesar de lo anterior, en el caso específico de la inestabilidad de laderas, la relevancia del desarrollo de técnicas de instrumentación y monitoreo no ha sido lo suficientemente valorada ni apoyada. En diversas partes del mundo se desarrollan y aplican distintas técnicas que tienen el objetivo de conocer, de manera detallada, el comportamiento espacial y temporal de las laderas con la finalidad de entender su dinámica en el ámbito de la estabilidad, y así poder crear sistemas de alerta temprana. Estas técnicas incluyen el estudio de laderas tanto estables como inestables con el firme propósito de conocer los mecanismos particulares que dan origen al desplazamiento del terreno, particularmente durante eventos de precipitación de gran magnitud y baja frecuencia.

A partir de considerar dicha situación, el objetivo primordial de este trabajo se centra en el desarrollo de una propuesta metodológica que proporcione los lineamientos básicos para la aplicación de técnicas de instrumentación y monitoreo de laderas. Para ello es de gran importancia llevar a cabo la calibración correcta de los instrumentos, ya que esto permitirá la adquisición de datos e información reales, los cuales en una etapa posterior serán ingrediente primordial del análisis de las condiciones de estabilidad. Dicho enfoque, es presentado de acuerdo con la problemática de inestabilidad de laderas que existe en México, y de forma específica en la Sierra Norte de Puebla. De igual manera, se pretende

reconocer el comportamiento hidrológico del suelo durante periodos de precipitación intensa en el área de estudio, así como su influencia en la ocurrencia de procesos de remoción en masa, a partir de la generación de posibles escenarios de inestabilidad.

Concretamente, este trabajo tiene el propósito de inducir la inquietud y la necesidad de emplear técnicas de instrumentación y monitoreo de laderas, así como de sentar las bases de su aplicación, todo ello enmarcado en el contexto de la prevención de desastres.

1.1.4 Conjetura

La inestabilidad de laderas ocasionada por procesos de remoción en masa difícilmente puede ser evitada. Sin embargo, dado el impacto que estos procesos han tenido recientemente en la Sierra Norte de Puebla, es importante establecer una estrategia de monitoreo de laderas que permita conocer la dinámica hidrológica del suelo como respuesta a eventos de precipitación extraordinaria. Lo anterior es ingrediente esencial en la determinación de umbrales de precipitación locales que sirvan como insumos para establecer sistemas de alerta en tiempo real.

1.1.5 Objetivos

Generales

- A. Conocer las técnicas de instrumentación empleadas para el monitoreo de inestabilidad de laderas.
- B. Establecer una estrategia básica de instrumentación de laderas en la Sierra Norte de Puebla.
- C. Análisis de escenarios potenciales de inestabilidad de laderas para el área de estudio.

Particulares

- A.1. Efectuar una revisión de las técnicas de instrumentación existentes y accesibles para el monitoreo de inestabilidad de laderas en México.
- A.2. Desarrollar una descripción de los instrumentos convencionales y accesibles empleados en el monitoreo de la inestabilidad de laderas.
- A. 3. Realizar una síntesis de las características generales de los procesos de automatización de instrumentación.

B.1. Seleccionar dos parcelas experimentales en laderas de la Sierra Norte de Puebla.

B.2. Instrumentación de laderas de acuerdo a la posibilidad de adquisición de equipos (costo).

B.3. Calibración precisa y automatización de instrumentos.

B.4. Obtención y análisis de la información generada a partir de la instrumentación.

C.1. Muestreo de materiales y análisis geotécnico en campo y laboratorio.

C.2. Análisis de escenarios potenciales de inestabilidad con base en la aplicación del software PCRaster, y utilizando la información producida por la instrumentación y el análisis geotécnico.

1.2 Resumen capitular

La investigación fue dividida en 6 capítulos. En el presente capítulo se hace mención de la localización geográfica del área en estudio, así como algunas de las características físicas más importantes y que tienen gran influencia en los procesos de remoción en masa.

En el capítulo 2 se hace una revisión de la clasificación de los procesos de remoción en masa y de los diversos factores involucrados en la dinámica de dichos procesos naturales. Asimismo, se presentan algunos datos relevantes de los hechos ocurridos durante las primeras semanas del mes de octubre de 1999.

El tercer capítulo es una revisión de los conceptos relacionados a la modelación, en particular de los modelos que se usan en el campo de la geomorfología y en especial en el estudio de los procesos de remoción en masa.

El capítulo 4 aborda la importancia de la instrumentación, así como del monitoreo de laderas para entender, a detalle, la dinámica de las laderas así como su condición de estabilidad. De igual forma, se hace una breve descripción de los diferentes equipos y metodologías que se emplean en el monitoreo de laderas con fines de prevención.

En el capítulo 5 se presenta la metodología empleada para realizar este estudio. Se describen cada uno de los pasos para llevar a cabo la instrumentación y el monitoreo de la ladera ubicada en la localidad de La Unión. Estas fases incluyen la selección del sitio, así como las diversas pruebas de campo y laboratorio que se realizaron para obtener los datos necesarios para el análisis de estabilidad.

El proceso de modelación de las condiciones de estabilidad de la ladera se explica detenidamente en el capítulo 6, así como los resultados obtenidos a través de un análisis de sensibilidad a partir de los diferentes parámetros extraídos del sitio en estudio. Por último, se retoma de nuevo la importancia de los resultados obtenidos y además se enfatiza la importancia de este tipo de metodología para el estudio de los procesos de remoción en masa. Asimismo, se presentan las conclusiones, y se hacen recomendaciones para trabajos posteriores dentro del campo de la instrumentación y monitoreo de laderas con fines de prevención.

1.3 Caracterización de la zona en estudio

La zona en estudio es la localidad de La Unión, municipio de Tlatlauquitepec, se encuentra dentro de la región denominada Sierra Norte de Puebla. Dicha región se localiza en los límites de dos regiones fisiográficas importantes, la Sierra Madre Oriental y el Sistema Volcánico Transversal (figuras 1.1 y 1.2). Esta ubicación determina que la composición geológica de la Sierra Norte sea diversa, sin embargo, hay una predominancia de rocas sedimentarias mesozoicas y rocas volcánicas del Plioceno y Cuaternario, estas últimas cubriendo formaciones sedimentarias (Lugo *et al.*, 2005).

De acuerdo con Lugo y colaboradores (2005), la sierra se caracteriza por una serie de montañas paralelas y de fuerte inclinación (figura 1.3) con una orientación al NNW y su extensión es de 50 km de ancho y 100 km de largo y presenta un clima cálido húmedo tropical. Asimismo comprende las sierras de Zacapoaxtla, Huauchinango, Teziutlán, Tetela de Ocampo, Chignahuapan y Zacatlán. En estas sierras las altitudes llegan a alcanzar hasta los 4000 msnm, siendo las zonas más altas Apulco, Chichatl, Chignahuapan, Soltepec y Tlatlauquitepec (Alcántara Ayala, 2004). Un alto grado de erosión y formación de cárcavas, principalmente en rocas sedimentarias, es una de las características más particulares de esta área. Estas capas sedimentarias presentan una anchura variable y están representadas por bloques plegados en los cuales la erosión es controlada por el sistema de fallas y fracturas que predominan en la zona (Alcántara Ayala, 2004).

Por su parte, las estructuras de origen volcánico están representadas por series de volcanes, domos, calderas así como de una gran área dominada por ignimbritas del Terciario Superior y del Cuaternario. Por último, la presencia de rocas de tipo metamórfico, particularmente esquistos, se localizan en pequeñas porciones del terreno (López Ramos, 1982). Dichas rocas se formaron en el Paleozoico y conforman el basamento sobre el cual se asientan las rocas sedimentarias (Quezadas, 1961). Esta diversidad geológica influye en la ocurrencia de procesos de remoción en masa, los cuales son comunes principalmente en donde se encuentran laderas de fuerte inclinación asociadas a materiales frágiles y en donde la actividad tectónica, asociada a fallas, es dominante.

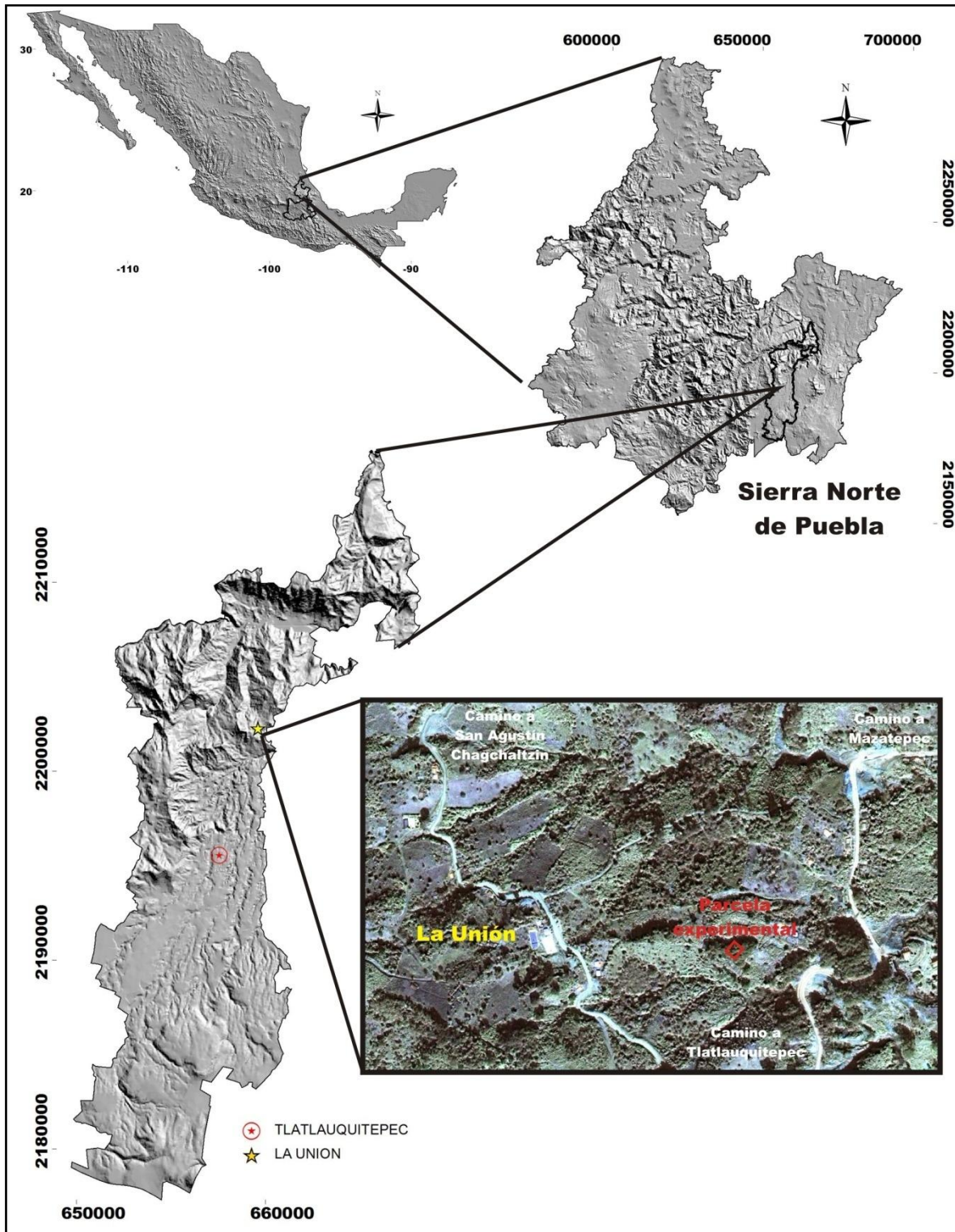


Figura 1.1. Localización de la zona en estudio

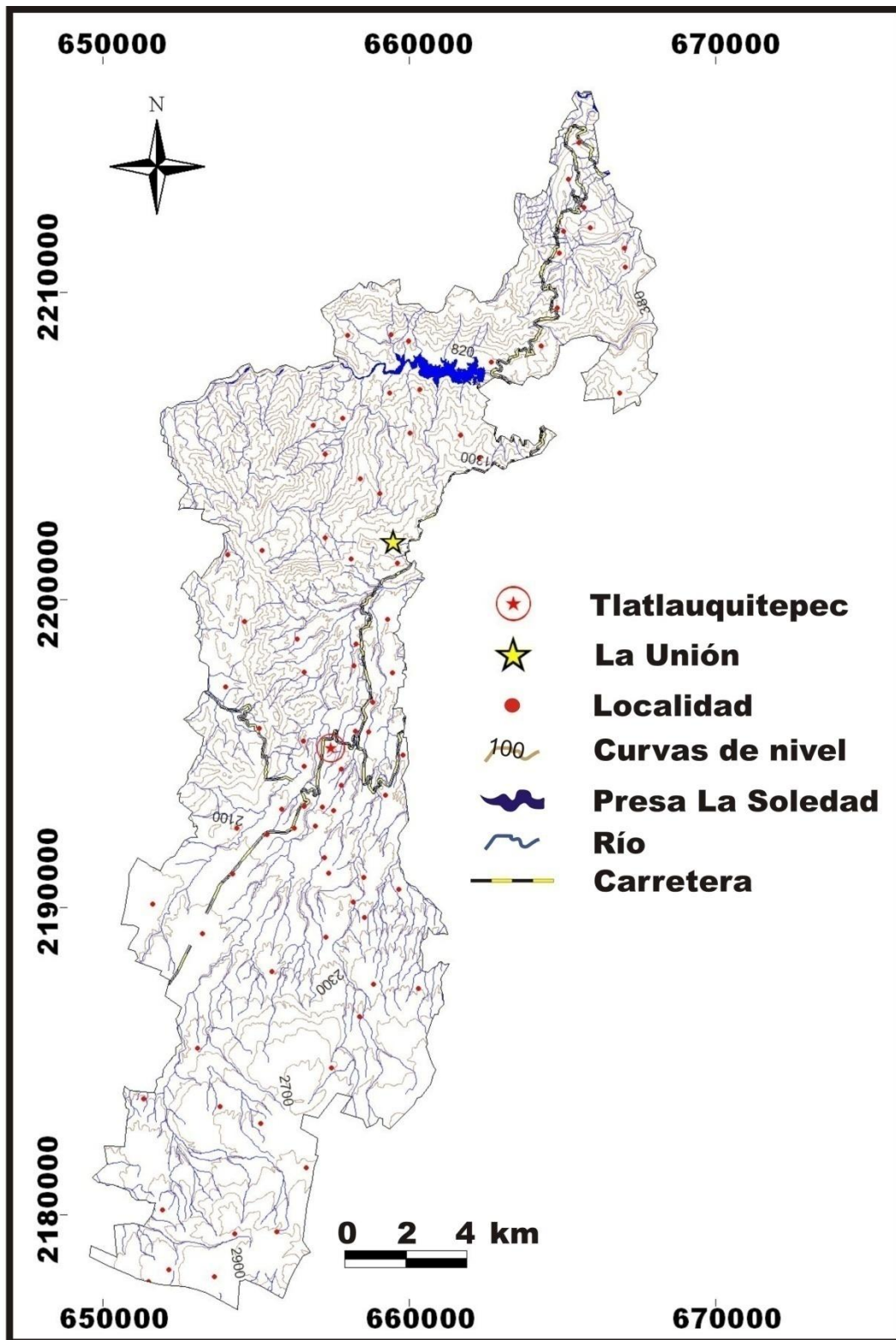


Figura 1.2. Mapa topográfico general del municipio de Tlatlauquitepec.

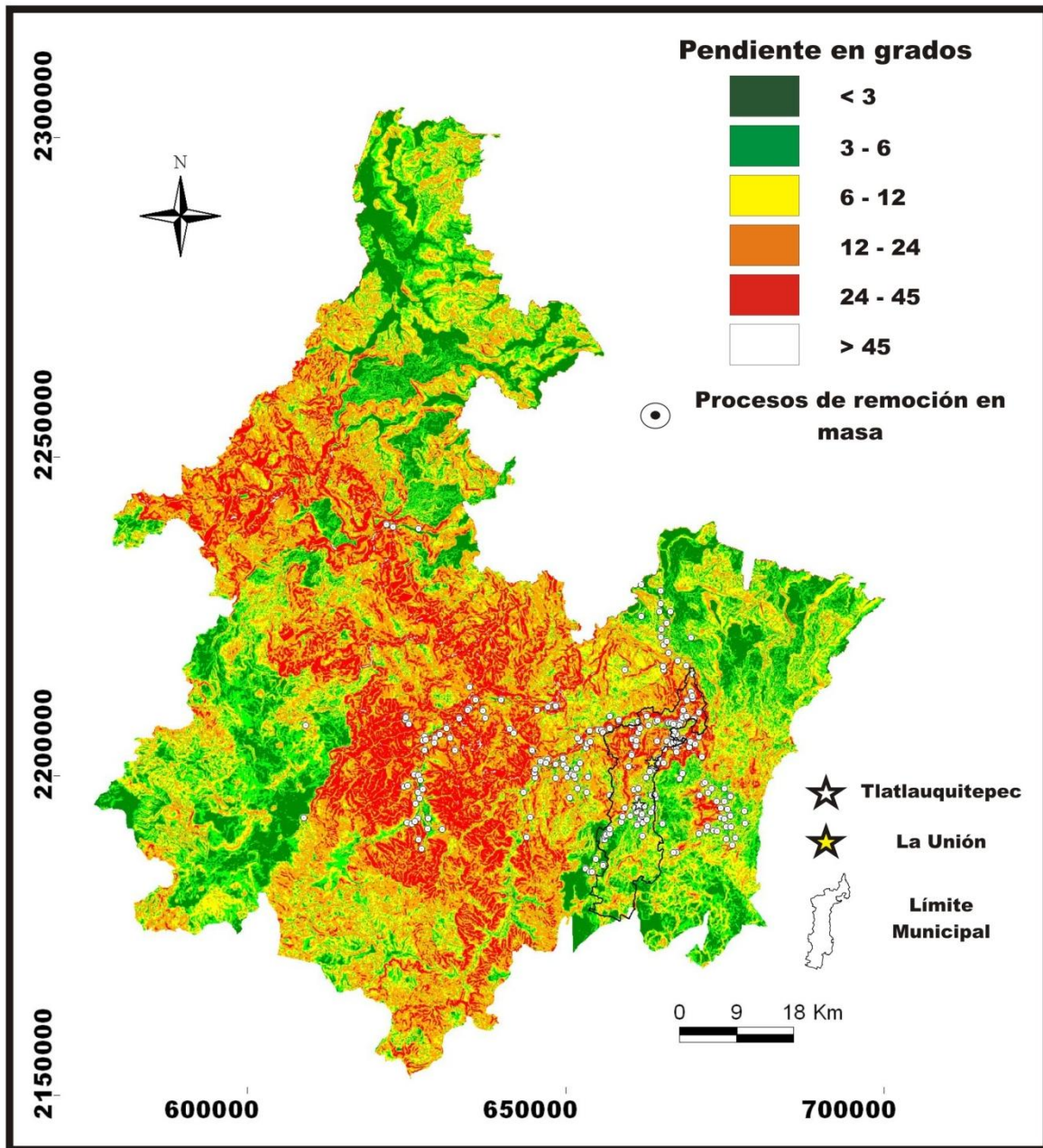


Figura 1.3. Mapa de pendientes de la Sierra Norte de Puebla y la localización de algunos procesos de remoción ocurridos.

En particular, el municipio de Tlatlauquitepec presenta, en la porción norte, rocas sedimentarias mesozoicas relacionadas a la Sierra Madre Oriental. La forma característica que presenta este tipo de rocas está representada por un relieve compuesto de montañas plegadas (Quezadas, 1961; López Ramos, 1982). Por otro lado, tanto en la zona central como en la sur existen rocas ígneas cuaternarias del Sistema Volcánico Transversal, las cuales sobreyacen a diversas rocas sedimentarias, asimismo su espesor aumenta conforme se avanza hacia el sur del municipio (figura 1.4). Gran parte de las

rocas ígneas del sur están asociadas a la actividad que presentó la caldera de los Humeros (Yáñez y García, 1982; Martínez Serrano, 1994). El relieve predominante en estas zonas está compuesto por mesas o rampas, derrames y domos de lava.

Esta diversidad geológica se traduce a su vez en una compleja gama de formas del relieve. Ambos factores, geología y geomorfología, ejercen una amplia influencia en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa en el municipio.

1.3.1 Evolución geológica de la Sierra Norte de Puebla

Las rocas más antiguas de la región se remontan al Paleozoico, representadas por depósitos sedimentarios clásticos que posteriormente sufrieron metamorfismo, dando lugar a la formación de esquistos y cuarzos. Posteriormente, durante el Mesozoico, la secuencia estratigráfica se conformó por rocas sedimentarias de origen marino. Estas se originaron en ambientes de cuenca y de plataforma, complementadas por unidades del Terciario de origen continental e ígneo. (López Ramos, 1979).

Durante el Jurásico Tardío y posteriormente el Cretácico, parte de la porción oriental del país permaneció bajo el mar, siendo límites continentales la Plataforma de Tamaulipas y la Península de Oaxaca. Más adelante los esfuerzos tectónicos originados en el suroeste, origen de la Orogenia Laramide, deformaron estructuralmente a la secuencia estratigráfica de la cuenca del Golfo de México (López Ramos, 1979).

Esta actividad tectónica se vio obstaculizada por paleoislas del Jurásico y por el Arco de Tamaulipas, evento que incrementó la extensión del territorio nacional, principalmente en la Sierra Madre Oriental. Así los bloques que se elevaron formaron una unidad arqueada y plegada, dando origen a la formación de anticlinales, con ejes sinuosos y asimétricos (López Ramos 1979, Yáñez y García, 1982, Ortega-Gutiérrez 1992, Aguayo-Camargo, 2005).

Posteriormente, en el Mioceno Tardío se inició la actividad ígnea efusiva caracterizada por derrames de material andesítico que dieron lugar a la formación del basamento sobre el cual se asentarían rocas como andesitas y basaltos. En este punto cabe destacar la gran extensión de las ignimbritas relacionadas a la caldera de Los Humeros. El origen de dichas rocas se remonta hace 250000 años, destacando las formaciones Xaltipan y Zaragoza. El último acontecimiento de tipo eruptivo fueron las emisiones de lava que dieron lugar a la formación Tenamastepec representada por rocas andesíticas y basálticas, así como la presencia de cenizas y conos de explosión y de escoria (López Ramos 1979, Yáñez y García, 1982).

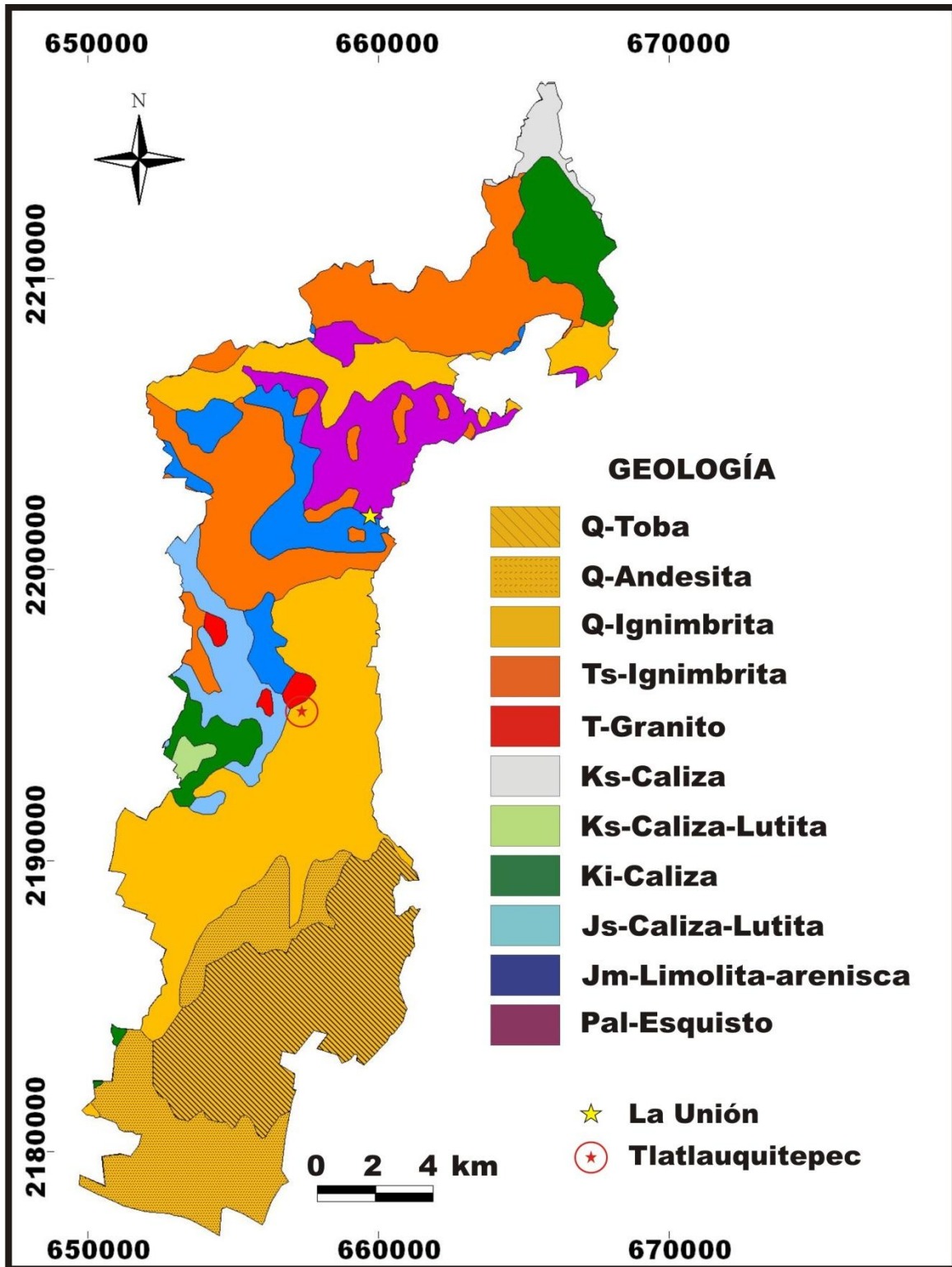


Figura 1.4. Mapa geológico del municipio de Tlatlauquitepec (INEGI, 1984)

1.3.2 Geomorfología

Como se había mencionado con anterioridad, la geología y las formas del relieve tienen gran importancia dentro de la ocurrencia de procesos de remoción en masa, y el municipio de Tlatlauquitepec cuenta con una marcada diferencia de formas del relieve dentro de su territorio. De acuerdo con los trabajos realizados por Flores Lorenzo (2002), Borja Baeza (2003) y Marcos López (2003), el relieve que predomina en la zona de estudio se divide en tres grandes grupos: endógeno, estructural denudativo y exógeno erosivo (figura 1.5).

El relieve endógeno está asociado a la actividad, tanto efusiva como explosiva, de la caldera de Los Humeros. Los materiales expulsados se asentaron sobre un relieve preexistente, representado por rocas sedimentarias, que condicionó la dirección y distribución de los flujos piroclásticos, derrames, caídas de ceniza y otros materiales extrusivos dando lugar a la formación de nuevas formas del relieve. Destaca la rampa de ignimbritas, ubicada al centro del municipio, y las laderas de material piroclástico.

Por otra parte, el relieve estructural denudativo está constituido por complejos montañosos de rocas calizas, lutitas y areniscas del Jurásico y Cretácico, dichos complejos presentan una disección variable debido a la influencia de las diversas corrientes fluviales que actúan sobre dicho relieve, principalmente el río Apulco. Estos sistemas montañosos se encuentran alineados de SE a NO en su porción occidental. Por último, se pueden ver algunas elevaciones aisladas de materiales sedimentarios y de rocas ígneas intrusivas.

Los valles intermontanos y erosivos dan lugar al relieve exógeno erosivo del municipio. Estos son característicos de los ríos Apulco y Atexcaco y se caracterizan por presentar laderas abruptas, estrechas y con fondos profundos indicativo de la intensa actividad erosiva.

En particular la localidad de La Unión está asentada en laderas montañosas, altamente disectadas, compuestas de areniscas y limonitas del Jurásico Medio. Este tipo de forma del relieve es discordante con las rocas volcánicas del Plioceno y en particular de las ignimbritas (López Ramos 1979).

1.3.3 Clima e hidrografía

El clima, en particular la precipitación, es parte trascendental dentro de la temática de los procesos de remoción en masa, como se verá más adelante. La razón radica en la importancia que tienen los fenómenos hidrometeorológicos en la ocurrencia de procesos gravitacionales, principalmente la lluvia y el escurrimiento. Ambos procesos juegan un papel significativo en la inestabilidad de las laderas de la sierra.

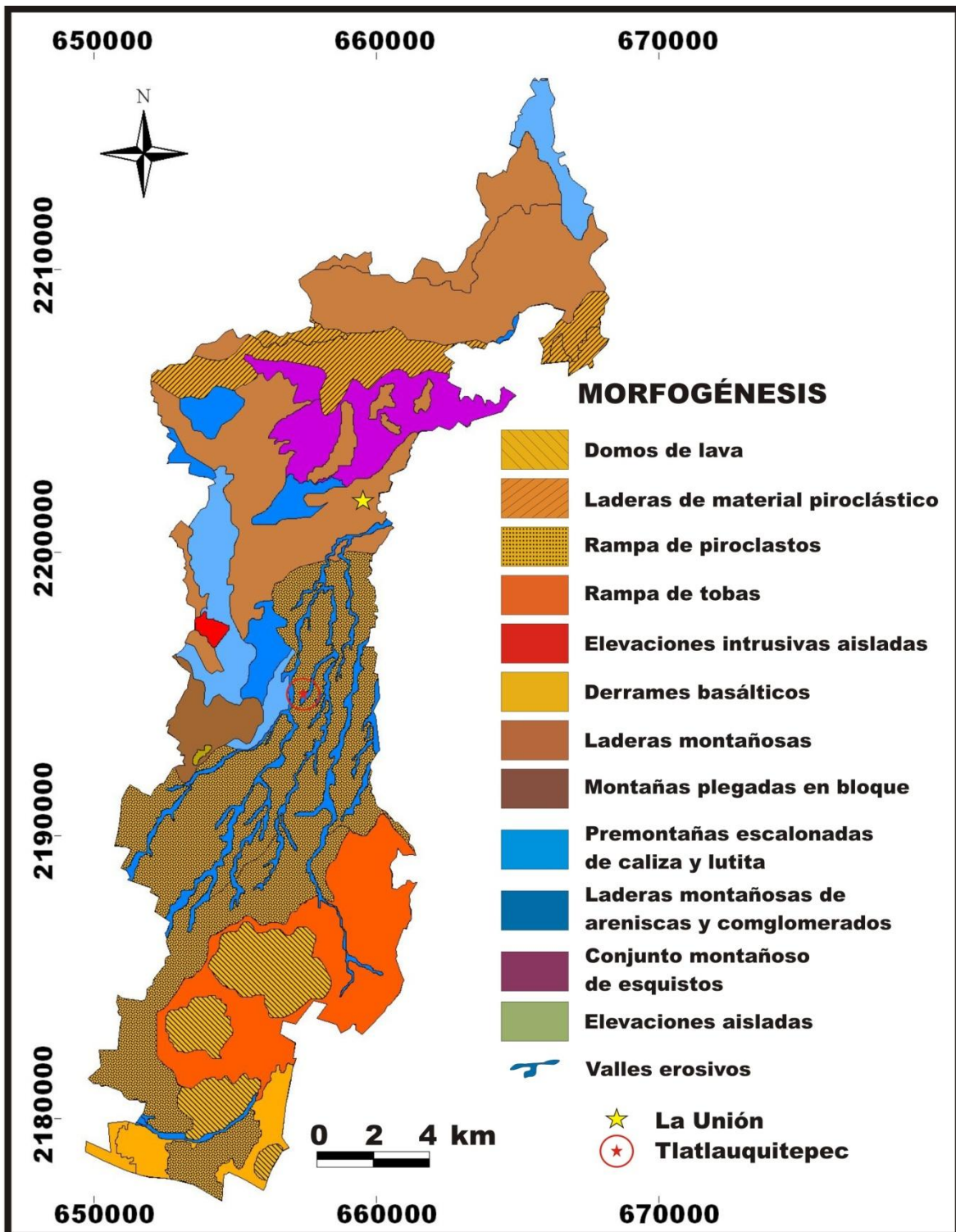


Figura 1.5. Mapa morfogénico del municipio de Tlatlauquitepec (Adaptado de Marcos López, 2003).

De acuerdo con Galván *et al.* (1999), la Sierra Norte se encuentra entre dos grandes zonas climáticas, una húmeda, perteneciente a la vertiente del Golfo de México, y otra semiseca en la vertiente interior. La primera es resultado de la actividad meteorológica que se lleva a cabo durante todo el año frente a las costas del Golfo, en donde los vientos transportan la humedad hacia las zonas montañosas del oriente del país. De esta manera las zonas montañosas de la sierra presentan lluvias de gran importancia durante gran parte del año. Cabe mencionar que debido a las características del relieve, la existencia de microclimas en la zona es notoria como así lo demuestra Vidal Zepeda (2005), quien además menciona que en la región la oscilación de las temperaturas medias mensuales va de los 7 a los 14°C.

Por otra parte, el clima dentro del municipio de Tlatlauquitepec se distribuye de acuerdo a las diferencias de altitud que existen en la zona; de esta manera el sur, caracterizado por un relieve de débil inclinación pero mayor altitud, presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano; el centro es dominado por un clima templado subhúmedo con lluvias en verano pero con mayor humedad que la que se presenta en el sur, esto asociado al descenso en el nivel altitudinal. La zona norte, porción en la cual se ubica la localidad en estudio, cuenta con tres climas diferentes debido a los fuertes cambios en altitud así como a la diversidad del relieve; climas templados húmedos con abundantes lluvias en verano, templados húmedos con lluvias en la mayor parte del año así como semicálidos húmedos con lluvias todo el año (INEGI, 1999).

Parte primordial de conocer el clima es también conocer la precipitación, la cual jugó un papel trascendental en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa en los años de 1999 y 2005. De acuerdo con la carta de precipitación media anual del Atlas Nacional del Instituto de Geografía de la UNAM, la lluvia en la región se encuentra entre los rangos que van de los 2000 a los 2500 mm anuales.

La Sierra Norte de Puebla se caracteriza por ser una zona en la cual las intensas precipitaciones son recurrentes año con año. Esto está demostrado históricamente, ya que los diferentes municipios que componen a la región han sido afectados por las lluvias extraordinarias de los años 1954, 1955, 1967, 1974, 1990, 1993, 1999 y 2005.

De acuerdo con Borja Baeza (2006), la localidad de La Unión se ubica entre las isoyetas de 2000 y 2200 mm de media anual, además de que en promedio el 22% de la lluvia escurre de forma superficial y el resto se infiltra o regresa a la atmósfera. Asimismo, la precipitación en la zona de estudio se concentra entre los meses de junio y octubre.

La Sierra Norte se ubica primordialmente dentro de tres cuencas, las de los ríos Tecolutla, Cazones y Tuxpan. La primera de gran importancia para la zona debido a la presencia de presas, La Soledad y Nuevo Necaxa por mencionar algunas, que de cierta manera controlan el régimen de escurrimiento y disminuyen el efecto de las crecidas. Asimismo la

región cuenta con importantes corrientes de agua como los ríos Apulco, Zempoala, San Lorenzo, etc., afluentes del Tecolutla y del Cazones.

Los ríos han labrado su cauce a través de los materiales volcánicos no consolidados, los cuales fueron depositados en los eventos volcánicos posteriores a la compresión que se produjo por movimientos tectónicos y que provocaron el levantamiento y exposición de las rocas sedimentarias. Esto trae como resultado el nacimiento y desarrollo de barrancos de fuerte pendiente en los cuales los procesos de remoción en masa son comunes (Lugo *et al.*, 2005) (figura 1.6).

1.3.4 Población

En general la población que está asentada en los municipios de la Sierra Norte, y en particular en el municipio de Tlatlauquitepec, se caracteriza por presentar condiciones altas de marginación y aislamiento con respecto a las cabeceras municipales.

La herencia náhuatl en algunas de las comunidades de la Sierra aún se conserva, ya que existen pueblos en los cuales los habitantes aún se comunican con su idioma natal, además del español, aunque este sólo lo emplean en determinadas ocasiones.

Este aislamiento, marginación y herencia cultural de la población ha traído como consecuencia que los pobladores tengan poco conocimiento de la temática asociada a los desastres y en especial a los ligados a procesos de remoción en masa. Sin embargo, gracias a diversos trabajos que se han realizado y que se llevan a cabo actualmente, la población se vuelve consciente de la problemática que está asociada con dichos eventos naturales, es decir, empiezan a comprender que es necesario estar preparados ante la posible ocurrencia de un proceso gravitacional que pueda afectar su patrimonio y a los integrantes de sus familias.

En el caso de Tlatlauquitepec, el apoyo por parte de las autoridades de Protección Civil, ha permitido el desarrollo de diversas investigaciones relacionadas con esta problemática y entre ellas cabe destacar la realización de talleres informativos para la población.

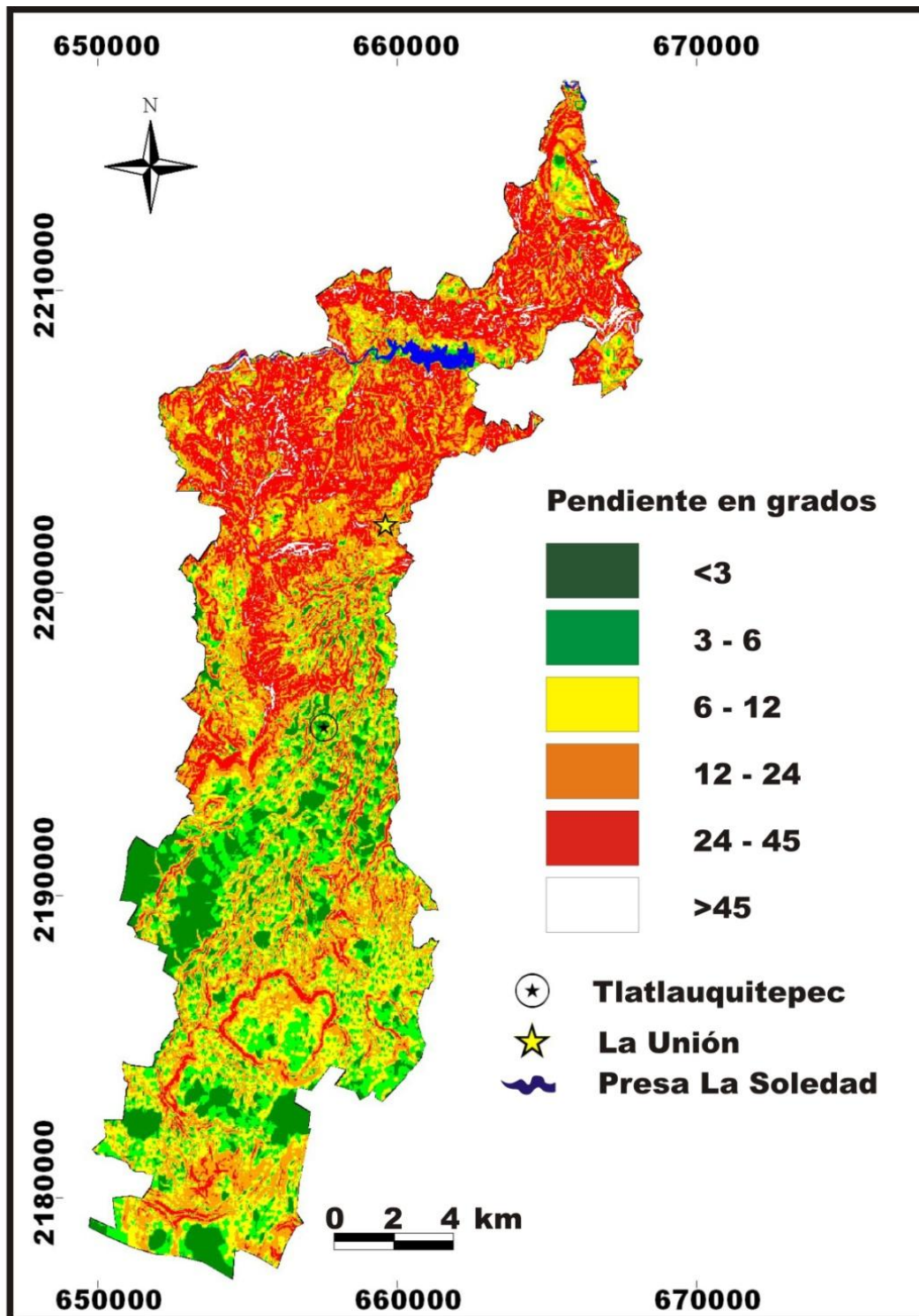


Figura 1.6. Mapa de pendientes del municipio de Tlatlauquitepec.

CAPITULO 2. PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA SIERRA NORTE DE PUEBLA: RELEVANCIA Y ESCENARIOS FUTUROS

2.1 Conceptualización de los procesos de remoción en masa

A partir de la importancia que ha generado el conocimiento de diferentes fenómenos naturales asociados a pérdidas materiales millonarias, una gran infinidad de especialistas han desarrollado diversos estudios dentro del campo de los peligros naturales. En el caso particular de los procesos de remoción en masa los avances en las investigaciones se han debido al incremento en los daños y costos que este tipo de fenómenos ocasiona. Principalmente este aumento en la ocurrencia es resultado del crecimiento de las zonas urbanas, así como de las diferentes actividades económicas, lo que ha traído como consecuencia cambios en el uso del suelo.

Los procesos de remoción en masa se definen como todo aquel movimiento en el cual el terreno, compuesto de rocas, suelos o detritos, se desplaza ladera abajo bajo la influencia de la fuerza de gravedad, es decir, sin la intervención de algún agente de transporte como el agua o el aire (Brunsden, 1979).

Los antecedentes a la clasificación actual de los procesos de remoción en masa se remontan al año de 1938 cuando Sharpe presentó lo que se considera el primer intento por definir y clasificar a este tipo de eventos. De esta manera los define como un movimiento ladera abajo de una masa relativamente seca de tierra, roca o una mezcla de ambas, esto a través de un mecanismo de deslizamiento o desprendimiento. Además la clasificación de Sharpe destaca su orden por la velocidad del movimiento. Posteriormente Terzaghi (1950) define a este tipo de procesos como un desplazamiento rápido de una masa de roca, suelo o sedimentos, en el cual el centro de gravedad de la masa se mueve hacia abajo y hacia el exterior. Para el año de 1958, Varnes presenta otro intento por definir y clasificar a estos procesos; él menciona que este movimiento puede incluir materiales artificiales y naturales. Dicha clasificación fue posteriormente revisada por el autor en el año de 1978. En dicha revisión el autor detalla aún más las características de los procesos y hace alusión a los materiales, las diversas formas, velocidades y causas que los ocasionan.

Para finales de la década de los 60, Hutchinson (1968) propone poner énfasis en la importancia de establecer una clasificación que permitiera tener un conocimiento más preciso de cada movimiento y de sus características particulares.

Para 1986, Crozier hacía notar que en la literatura de esa época abundaban una gran cantidad de clasificaciones lo que complicaba la utilización de un lenguaje común y los avances en el área de este tipo de procesos.

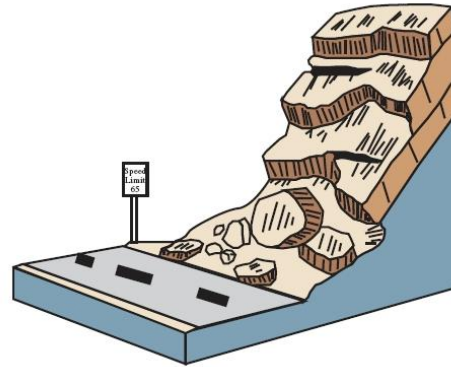
PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

Así para 1993, con base con las clasificaciones de Varnes (1978) y Hutchinson (1988), la EPOCH (European Community Programme por sus siglas en inglés) propone una clasificación de los procesos de remoción en masa. En dicha clasificación se detallan 6 tipos de procesos, tomando en cuenta el tipo de material involucrado en cada uno de ellos. Sin embargo, fue hasta el año 2000 cuando se realizó una traducción al castellano de esta clasificación por parte de Alcántara Ayala. De esta manera la tipología de estos procesos se puede resumir en: caída, vuelco, deslizamiento (rotacional, planar y translacional), flujo, expansión lateral y movimientos complejos. Asimismo los materiales involucrados en los procesos son rocas, suelos y detritos (tabla 2.1 y figuras 2.1 a 2.6).

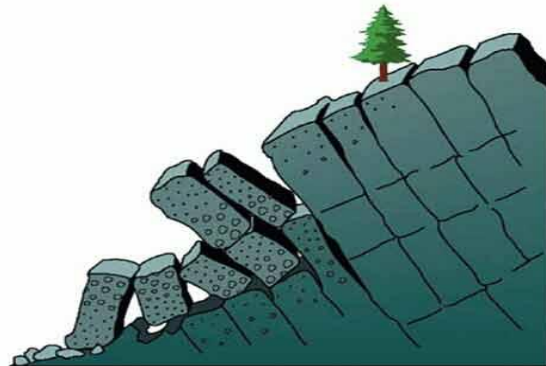
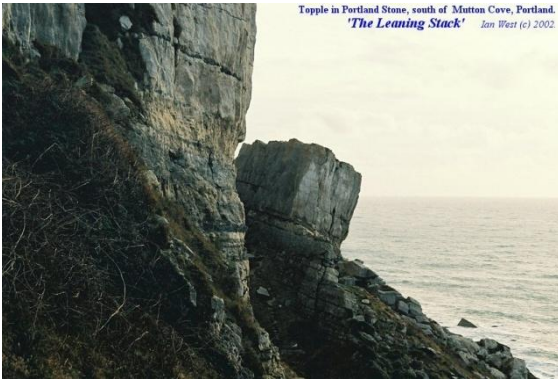
Mecanismos de movimiento	Tipo de material involucrado		
	Roca	Derrubios	Suelo
Tipo			
Caída	Caída de rocas	Caída de derrubios	Caída de suelos
Vuelco	Vuelco de rocas	Vuelco de derrubios	Vuelco de suelos
Deslizamiento rotacional	Individual, múltiple y sucesivo	Individual, múltiple y sucesivo	Individual, múltiple y sucesivo
Deslizamiento translacional	Deslizamiento de rocas en bloque	Deslizamiento de derrubios en bloque	Deslizamiento traslacional de suelos
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de derrubios	Coladas de barro
Flujo	Flujo de rocas	Corriente de derrubios	Flujo de tierra, arena o suelo
Expansión lateral	Expansión lateral en rocas	Expansión lateral en derrubios	Expansión lateral en suelos
Complejo	Alud de rocas	Flujo deslizante	Rotación con flujo de tierras

Tabla 2.1. Clasificación de los procesos de remoción en masa, EPOCH, 1993 (Alcántara Ayala, 2000).

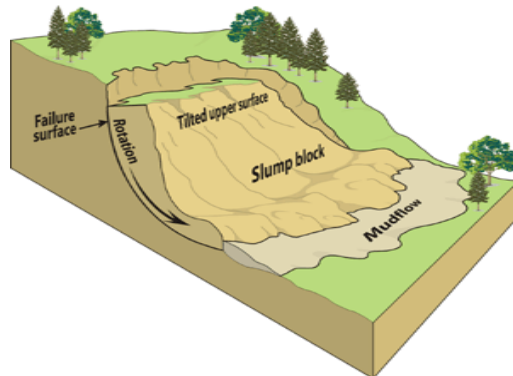
PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.



Figuras 2.1 a y b. Imágenes de un proceso de caída.
Fuentes: virtual.yosemite.cc.ca.us y geology.about.com

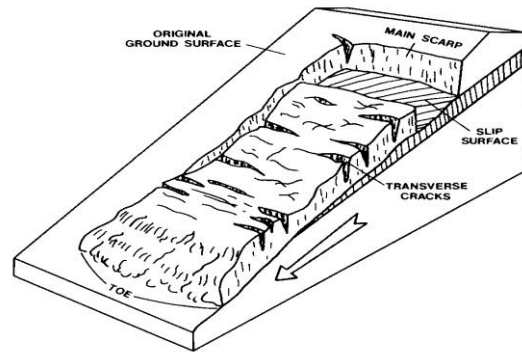


Figuras 2.2 a y b. Imágenes de un proceso de vuelco.
Fuente: www.ga.gov.au y www.soton.ac.uk



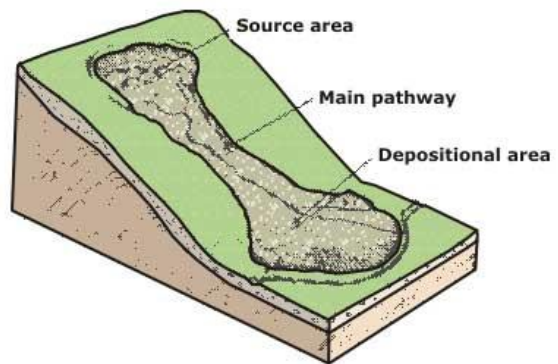
Figuras 2.3 a y b. Imágenes de un proceso de deslizamiento rotacional.
Fuente: www.maine.gov y geoscape.nrcan.gc.ca

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.



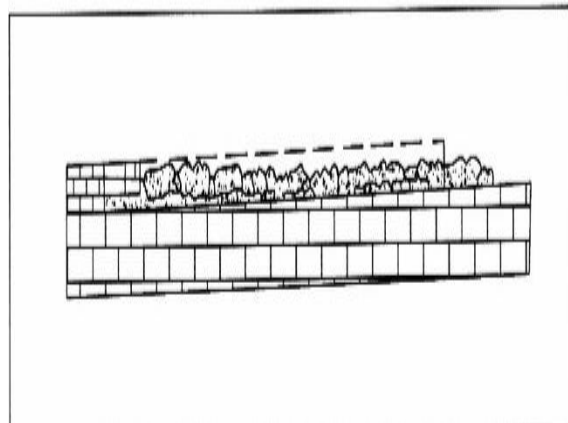
Figuras 2.4 a y b. Imágenes de un proceso de deslizamiento translacional.

Fuente: www.maine.gov y geoscape.nrcan.gc.ca



Figuras 2.5 a y b. Imágenes de un proceso de flujo.

Fuente: gees.usc.edu y www.maine.gov



Figuras 2.6 a y b. Imágenes de un proceso de expansión lateral.

Fuente: www.ce.washington.edu y Alcántara Ayala, 2000

2.2 Factores que influyen en los procesos de remoción en masa

Los procesos de remoción en masa ocurren debido a la interacción de diversos factores que de alguna manera tienden a volver inestable o estable a una ladera. Estos factores pueden ser de tipo natural o antrópico.

De acuerdo con Terzaghi (1950) las causas se agrupan en dos categorías, las internas y las externas. En las internas se ubican todos aquellos mecanismos que provocan una reducción en la fuerza de corte de los materiales, es decir, disminuyen la resistencia de los materiales sin cambiar la tensión o los esfuerzos. Las externas involucran aquellos mecanismos que son capaces de superar la fuerza interna y de esta forma ocasionar el debilitamiento, es decir, producen un aumento en la tensión, pero no en la resistencia de los materiales. En resumen una ladera permanecerá estable mientras las fuerzas resistentes (la cohesión del suelo por ejemplo) tiendan a ser mayores a diferencia de las fuerzas actuantes, por ejemplo la infiltración del agua de lluvia (Alcántara Ayala, 2000).

Los factores internos pueden ser cambios en las características de los materiales, ya sea en composición, textura, etc. Entre los factores externos destacan los cambios en la geometría de las laderas, vibraciones naturales o artificiales, los cambios en los regímenes hidrológicos, cambios en la precipitación y cambios en el uso del suelo, como por ejemplo la deforestación y la urbanización (tabla 2.2) (Alcántara Ayala, 2000).

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

Tabla 2.2. Algunas de las causas que influyen en la inestabilidad de laderas (Alcántara Ayala, 2000).

2.3 Efectos e importancia de los procesos de remoción en masa

Como ya se ha mencionado, los procesos de remoción en masa son fenómenos naturales que se presentan de forma constante en zonas montañosas de fuerte pendiente. El valor de su estudio y análisis radica en la búsqueda de conocer la dinámica de estos eventos para así poder crear planes de prevención que mitiguen los daños asociados a su ocurrencia.

Cabe mencionar que tanto el continente asiático como el americano concentran cerca del 80% de los procesos de remoción en masa que ocurren en todo el mundo (Alcántara Ayala, 2002). Las condiciones geológicas y geomorfológicas del terreno, las condiciones hidrometeorológicas y la expansión urbana son factores que influyen para que en estos países las condiciones de inestabilidad sean determinantes.

A pesar de lo anterior, no es posible comparar el efecto de los procesos de remoción en masa con otros fenómenos, por ejemplo, las erupciones volcánicas, sin embargo hay que hacer notar que los desastres asociados a este tipo de fenómenos se están incrementando debido al desconocimiento de la población o a ineficientes planes de desarrollo urbano que no toman en cuenta la amenaza que representa la inestabilidad de laderas.

En México son claros los efectos que producen los procesos de remoción en masa, en especial cuando están asociados a eventos de precipitación extraordinarios. Dos ejemplos que destacan por los daños materiales y humanos son los eventos ocurridos en los años de 1997 y 1998 en la porción sur de la República Mexicana.

En el año de 1997, Guerrero y Oaxaca, pero de forma muy particular el municipio de Acapulco de Juárez, fueron afectados debido a las lluvias torrenciales producto del huracán *Pauline*. Los daños, resultado de dicho fenómeno meteorológico, fueron de 228 víctimas y 200,000 damnificados de acuerdo a cifras oficiales (Alcántara Ayala, 2004).

Posteriormente, en septiembre de 1998, las lluvias torrenciales, asociadas a la presencia de la tormenta tropical *Earl*, afectaron al sureste de México, principalmente a los estados de Oaxaca y Chiapas. De 39 municipios afectados, Motozintla fue uno de los más devastados como resultado de la ocurrencia de procesos de remoción en masa e inundaciones. Entre las consecuencias más importantes cabe destacar 214 pérdidas de vida, la desaparición de 307 personas, así como severos daños a la carretera Panamericana (Caballero *et al.*, 2006).

2.4 Procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla

La alta incidencia de los procesos de remoción en masa en el estado de Puebla, y en particular la Sierra Norte, ha sido estudiada mediante diversos trabajos precedentes que revelan la susceptibilidad de la región ante el problema de la inestabilidad de laderas. Cabe destacar que esta región se caracteriza por presentar altos niveles de marginación, por lo que es evidente el grado de vulnerabilidad de la población asentada en la zona y por ende su alto nivel de riesgo. Entre los estudios realizados hasta el momento cabe destacar los trabajos, a escala regional, por parte de Lugo *et al.* (2001), Cuanalo y Melgarejo (2002), Esteban (2003), Alcántara Ayala (2004) y Lugo *et al.* (2005); en estos trabajos se aborda la problemática de la Sierra Norte de Puebla ante los procesos de remoción en masa, caracterizando las causas, factores condicionantes y consecuencias, además de desarrollar la cartografía de zonas con susceptibilidad a la inestabilidad de laderas.

Por otro lado, se han hecho investigaciones de forma puntual de algunos de los municipios que han sido afectados por los procesos de remoción en masa; se ha demostrado la alta susceptibilidad a inestabilidad de laderas en municipios tales como Zacapoaxtla (Borja Baeza, 2003; Borja Baeza y Alcántara Ayala, 2004; Hernández, 2005; Borja Baeza *et al.*, 2006), Teziutlán (Mendoza *et al.*, 2000; Flores y Alcántara Ayala, 2002; Capra *et al.*, 2003a; Noriega, 2005), Zapotitlán de Méndez (Capra *et al.*, 2003b; López-Mendoza, 2003), Zacatlán (Sánchez Titla, 2005) y Tlatlauquitepec (Marcos-López, 2003; Ochoa-Tejeda, 2004; Borja Baeza, 2006), este último objeto del presente estudio (figura 2.7). Dichos trabajos se han enfocado a la zonificación de las áreas susceptibles a procesos de remoción en masa, el análisis de indicadores de vulnerabilidad, así como del riesgo; esto ha permitido identificar aquellas zonas con niveles críticos donde son requeridos estudios precisos y a mayor detalle.



Figura 2.7. Deslizamiento en el municipio de Tlatlauquitepec.
Fotografía del autor.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

La mayor parte de estos estudios se realizaron a partir de los hechos ocurridos en la Sierra Norte de Puebla en el año 1999 (figuras 2.8 y 2.9) y como resultado de la necesidad de entender los mecanismos de inestabilidad para así determinar las zonas más susceptibles a procesos de remoción en masa.



Figuras 2.8 y 2.9. Procesos de remoción en masa ocurridos en 1999 en los municipios de Zapotitlán de Méndez y San Esteban Cuautempan.
Fotografías de Alcántara Ayala y del autor.

Históricamente la región ha sido afectada por precipitaciones extraordinarias asociadas a eventos meteorológicos extremos, tal es el caso de las lluvias de los años 1954, 1955, 1967, 1974, 1990, 1993, 1999 y 2005. De estos eventos destacan los daños materiales y humanos acontecidos en los años 1999 y 2005, el primero asociado a las lluvias originadas por la depresión tropical 11 y el segundo a las lluvias del huracán *Stan* (Alcántara Ayala, 2004).

En el año de 1999, a principios de octubre, el fenómeno meteorológico representado por la interacción entre la depresión tropical 11 y el frente frío 5, provocó la presencia de lluvias torrenciales frente a las costas del Golfo de México, en particular en las laderas orientales de la Sierra Madre Oriental. Esta situación trajo consigo la ocurrencia de una infinidad de procesos de remoción en masa, principalmente deslizamientos, flujos y movimientos complejos, los cuales afectaron diversos sectores de los municipios que conforman a la Sierra Norte de Puebla (figura 2.10). Entre los más afectados fueron las

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

vías de comunicación, principalmente carreteras, y el sector energético, presas hidroeléctricas. Asimismo, los costos por la destrucción de viviendas sobrepasó a los presupuestos de cada uno de los municipios e incluso del estado, ya que la mayor parte de la zona fue declarada zona de desastre por lo que contaron con el apoyo del fondo de desastres del gobierno federal (Bitrán, 2000).



Figura 2.10. Daños en vivienda ocasionados por la ocurrencia de un proceso de remoción en masa en el municipio de Zapotitlán de Méndez.
Fotografía de López Mendoza.

De acuerdo con datos de Bitrán (2000), los daños materiales en el estado fueron mayores a los 2300 millones de pesos y se concentraron en poblaciones que presentan los niveles de marginación más altos del país y en donde predominan actividades económicas como la agricultura de subsistencia. Además los fenómenos naturales ocurridos en aquella ocasión generaron la pérdida de 263 vidas humanas así como daños en 81 municipios de la entidad.

Para el 19 de octubre de ese año, los informes indicaban que cerca del 30% de la población del estado había sido afectada, esto representaba cerca de un millón y medio de personas. La mayor parte de la población que resultó afectada pertenece a municipios clasificados con alta y muy alta marginalidad debido a los altos niveles de analfabetismo así como a la carencia de los servicios básicos como agua y energía eléctrica. Los municipios más afectados fueron Apulco, Chignahuapan, Cuetzalán, Huauchinango, Necaxa, Pahuatlán, Tetela, Teziutlán, Zacapoaxtla, Zacatlán, Zapotitlán de Méndez, Zaragoza y Tlatlauquitepec (Bitrán, 2000) (figuras 2.11 a 2.19).

Diversos eventos meteorológicos han influenciado los cambios en la dinámica de los diferentes paisajes que se encuentran en la Sierra Norte, las lluvias torrenciales asociadas a dichos fenómenos han funcionado como detonadores de eventos tales como inundaciones y procesos de remoción en masa.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.



Figuras 2.11 y 2.12. Procesos de remoción en masa en los municipios de Zacatlán y Tlatlauquitepec. Fotografías del autor.



Figuras 2.13 y 2.14. Procesos de remoción en masa en el municipio de Zacatlán. Fotografías del autor.

En particular los datos de precipitación de los meses de septiembre y octubre de 1999 revelan que las intensas lluvias registradas durante esos meses rebasaron los datos promedio de precipitación de la región. Así lo demostraron los registros pluviométricos de las estaciones meteorológicas Huauchinango, Zacapoaxtla, Teziutlán y Tlatlauquitepec (Alcántara Ayala, 2004).

Posteriormente en el año de 2005, las lluvias asociadas al huracana *Stan* trajeron como consecuencia la ocurrencia y reactivación de diversos procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, al igual que en 1999 los daños se presentaron en las carreteras y en el sector vivienda, sin embargo las características de las lluvias de ese año no superaron a las de 1999, año en que el evento fue nombrado el desastre de la década debido al impacto que tuvo sobre la población (Bitrán, 2000).

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.



Figuras 2.15 y 2.16. Procesos de remoción en masa en la localidad de la Unión, Tlatlauquitepec.
Fotografías del autor.



Figuras 2.17 a 2.19. Procesos de remoción en masa en localidades de los municipios de Tlatlauquitepec y San Esteban Cuautempan.
Fotografías del autor.

2.5 Precipitación e inestabilidad

Como se mencionó con anterioridad, las lluvias forman parte de los factores que pueden propiciar la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Las precipitaciones intensas actúan como factores detonantes de dichos procesos como resultado de la saturación del suelo, lo cual influye directamente en las propiedades de los materiales y conlleva a un cambio en la estabilidad de las laderas.

Diversos estudios se han enfocado en el análisis de las series de precipitación para determinar zonas susceptibles a procesos de remoción en masa. Las técnicas empleadas en este tipo de estudios van desde el análisis estadístico de eventos de precipitación, así como la instrumentación y monitoreo de laderas bajo ciertos escenarios de lluvias intensas. Los resultados obtenidos han permitido la creación de sistemas de alerta basados en los umbrales críticos de precipitación de las diferentes zonas de estudio. En la mayoría de los casos, dichos análisis se realizan con registros diarios y horarios de precipitación de diversas estaciones meteorológicas.

Au (1998), en un estudio realizado en Hong Kong, asume que el agua de lluvia que se infiltra en el terreno reduce la succión de ésta por parte del suelo, esto es como resultado de la saturación y el incremento de la presión de poro. Además menciona que la escala de un proceso de remoción en masa dependerá de la intensidad, extensión, posición y duración de las lluvias. Asimismo recalca la importancia que tiene la lluvia antecedente. Por otra parte, asegura que los procesos más superficiales se presentan durante el tiempo de ocurrencia de las lluvias, mientras que los de mayor profundidad tienden a presentarse tiempo después de que las lluvias han cesado.

Es importante resaltar que las lluvias intensas son el detonante principal de procesos de remoción en masa; sin embargo hay que mencionar que las lluvias antecedentes y de menor intensidad juegan un papel importante ya que incrementan el contenido de humedad en el terreno y por lo tanto provocan cambios en las propiedades del suelo, incrementan la presión de poro y disminuyen la succión del agua como resultado de la saturación (Brand *et al.*, 1984). Sin embargo, hay que recordar que esto está condicionado por las características del suelo, permeabilidad, cohesión, textura, ángulo de fricción interna, etc.

Este tipo de estudios han traído como resultado sistemas de alerta temprana que están basados en umbrales críticos de precipitación, es decir, se asocia una cantidad de precipitación a la posible ocurrencia de procesos de remoción en masa y cuando dicha cantidad o umbral es excedido se activa una alarma a partir de la cual la población comienza a tomar las medidas necesarias para evacuar sus casas y refugiarse en sitios seguros (Malone, 1988; Premchitt *et al.*, 1994).

Para obtener los umbrales críticos de precipitación se han desarrollado modelos que trabajan con datos de precipitación así como con las propiedades físicas del terreno. En la mayoría de los casos los resultados obtenidos a través de la modelación son similares a los registros de precipitación que detonan los procesos de remoción en masa. Un ejemplo claro de este tipo de trabajos es el realizado por Gabet *et al* (2004), en el cual se realiza la comparación de los umbrales de precipitación modelados con los registros de lluvia. Asimismo, ellos sugieren que el espesor del suelo determina la cantidad de lluvia estacional necesaria para que se produzca un proceso de remoción en masa y por otro lado el factor pendiente determina o controla la cantidad de lluvia diaria que es requerida para la ocurrencia de un proceso de ladera.

Actualmente los servicios de protección civil de algunos países del mundo están adoptando medidas de prevención de procesos de remoción en masa a través de sistemas automatizados de monitoreo de lluvias. Dichos sistemas cuentan con una compleja red de monitoreo a través del uso de diversos instrumentos, por ejemplo estaciones meteorológicas.

En México existen trabajos en los cuales se aborda la estrecha relación entre la ocurrencia de procesos de remoción en masa y los eventos de precipitación. Por ejemplo Alcántara Ayala (2004) resalta la importancia de las lluvias en la ocurrencia de procesos de remoción en masa en México. En este estudio realiza un análisis de los datos históricos de precipitación de diversas estaciones meteorológicas así como la representación cartográfica de zonas susceptibles de una porción de la Sierra Norte de Puebla. Por otra parte, Mendoza y colaboradores (2002) presentan un trabajo en el cual se aborda la importancia de la precipitación como factor detonante de los procesos de remoción en masa y las técnicas e instrumentos que pueden ser empleados para llevar a cabo el monitoreo de laderas con fines de alertamiento.

CAPITULO 3. MODELACIÓN

3.1 Conceptualización

La reacción común del ser humano ante la complejidad del mundo que lo rodea ha sido la creación de imágenes simplificadas e inteligibles del mundo. La mente separa o descompone al mundo real en una serie de sistemas sintetizados o simplificados y así logra una perspectiva de las características esenciales de cualquiera de sus campos o divisiones (Apostel, 1961). Además la mente necesita ver al sistema en oposición y distinción a los otros sistemas; de esta manera la separación del sistema a partir de los otros es realizada de una forma más completa incluso que en la realidad. Así, el sistema es conocido o controlado dentro de ciertos límites de aproximación y por lo tanto es estudiado bajo un cierto propósito en mente; así todo aquello que no afecte o forme parte del propósito será eliminado. De acuerdo con este punto de vista, la realidad existe como conexión que ha sido explorada a través del uso de patrones simplificados de símbolos, leyes y procesos (Meadows, 1957). A las afirmaciones o declaraciones de esta interdependencia estructural se la ha definido como modelo. Un modelo se define como una simplificación o síntesis estructurada de la realidad que presenta, supuestamente, características significativas o relaciones de una forma generalizada. Los modelos son aproximaciones altamente subjetivas en las que no se incluyen todas las observaciones o mediciones asociadas, sino que son valiosos en esconder u ocultar el detalle incidental y en permitir aspectos fundamentales de la realidad para aparecer. Esta selectividad significa que los modelos varían los grados de probabilidad y un rango limitado de condiciones sobre el que se aplican. Los modelos más exitosos poseen una alta probabilidad de aplicación y un amplio rango de condiciones en las cuales parecen apropiados.

De acuerdo con Skilling (1964), un modelo puede ser una teoría, una ley, una hipótesis o una idea bien estructurada. Es decir puede ser un rol, una relación o una ecuación. Puede ser la síntesis de la información.

3.2 Características de los modelos

De acuerdo con Haggett y Chorley (1967), el término modelo es usado de diversas maneras. Es usado como un sustantivo que implica una representación; como un adjetivo que implica un grado de perfección o como un verbo que implica demostrar o mostrar que algo es parecido o *se parece a*. De hecho los modelos poseen todas estas características. La más fundamental de sus características es que su construcción involucra una actitud altamente selectiva de la información. Pueden ser vistos como aproximaciones selectivas las cuales por medio de la eliminación del detalle incidental, permite o admite algunos aspectos del mundo real para aparecer de una forma generalizada.

Los modelos son estructurados en el sentido de que los aspectos significativos o trascendentes seleccionados de la red de la realidad son explotados en términos de sus conexiones. Los modelos permiten la creación de predicciones, hipótesis y especulaciones, parte esencial de una investigación.

La selectividad, por su parte, implica que los modelos difieren de la realidad debido a que estos son sólo aproximaciones de ésta. Un modelo debe ser lo suficientemente simple para su manipulación y su entendimiento por parte de los usuarios. Debido a que son diferentes a la realidad se les considera como una serie de analogías. La modelación es empleada, en la mayoría de los casos, para reformular algunas características del mundo real en algo familiar, simplificado, accesible y observable, a partir del cual las conclusiones pueden ser deducidas y pueden ser reaplicadas a situaciones del mundo real.

3.3 Las funciones de los modelos

Siguiendo con la teoría de Haggett y Chorley (1967), los modelos son necesarios, por lo tanto, para constituir un puente entre los niveles de observación y teóricos; tienen que ver con la simplificación, reducción, concretización, experimentación, acción, extensión, formación y explicación de diversas teorías. Una de sus funciones principales es psicológica al permitir a algún grupo de fenómenos ser visualizados y comprendidos, lo cual podría no ser de otra forma debido a su magnitud o complejidad. Otra es su función adquisitiva, en que el modelo provee una estructura o un marco en donde la información puede ser definida, colectada y ordenada. No solo tienen una función de organizar la información sino también en permitir la máxima cantidad de información para ser analizada, aceptada, expresada. Los modelos también poseen una función lógica al ayudar a explicar como un fenómeno en particular sucede u ocurre. Además los modelos tienen una función normativa, es decir, comparan algún fenómeno con otro familiar o conocido. Por otra parte, su función sistemática es cuando la realidad es vista en términos de sistemas interconectados. La función estructural es cuando los modelos forman la piedra angular para crear teorías y leyes. Así las teorías y los modelos difieren sólo en el grado de probabilidad con el cual predicen la realidad.

3.4 Tipos de modelos

El término modelo ha sido empleado en una gran variedad de formas y por lo tanto es difícil definir los tipos de modelos que existen así como la forma en la cual se usan. Una primera clasificación es entre descriptivos y normativos, en donde el primero es una descripción estilista o elegante de la realidad y el segundo es lo que se podría esperar que ocurriera bajo ciertas condiciones establecidas anteriormente. Los modelos descriptivos pueden ser estáticos, enfocándose en el equilibrio de las características estructurales, o dinámicos concentrados en las funciones y procesos a través del tiempo. En cambio los normativos tienen una connotación de tipo predictiva (Haggett y Chorley, 1967). Asimismo los modelos también pueden ser clasificados, de acuerdo a la esencia u

objetivo con el cual fueron creados, en construcciones físicas o experimentales y en segundo lugar en modelos teóricos, simbólicos, conceptuales o mentales. Los primeros pueden ser icónico (Ackoff *et al.*, 1962) donde las propiedades relevantes del mundo real son representadas por las mismas propiedades con solo cambios en escala, y por otro lado también pueden ser análogos (de simulación), cuando presentan propiedades reales representadas por propiedades diferentes. Este último tipo de modelo está compuesto de afirmaciones simbólicas o formales de tipo matemático en términos lógicos. Los modelos matemáticos pueden ser clasificados de acuerdo al grado de probabilidad asociado con su predicción, en determinístico o estocástico.

Otra visión de los modelos los caracteriza como sistemas que pueden ser definidos con base en el interés relativo entre las variables de entrada y de salida por parte del creador del modelo. Con base al interés en la categoría de las variables, muchos modelos pueden ser vistos como sistemas sintéticos, sistemas parciales y *black boxes* o cajas negras.

3.5 Modelos en geomorfología

Los cambios que ha tenido la geomorfología después de la segunda guerra mundial han sido enormes. Así los nuevos métodos de generación de datos como sensores remotos (fotografías, radar, etc.) a su vez combinados con métodos computarizados de procesamiento de datos y extracción de información son el inicio para imponer la necesidad de una reflexión conceptual y metodológica en geomorfología (Chorley, 1967).

A partir de este desarrollo dentro de la geomorfología, se da un mayor interés al estudio de la superficie terrestre a través de la simulación o modelación de escenarios o procesos naturales con el fin de entender, con mayor detalle y aproximación, el origen, desarrollo y evolución que ocurren en los diferentes procesos que modifican al relieve terrestre (Chorley, 1967). De esta manera diversos investigadores comenzaron a poner mayor énfasis en tratar de recrear o simular el entendimiento de los diferentes sistemas físicos a través del uso de modelos. La modelación se ha adueñado de un rol muy importante dentro del análisis de los fenómenos naturales y humanos, así como el impacto que estos producen directamente o indirectamente sobre la sociedad (Borja Baeza, 2006).

De acuerdo con Chorley (1967), el enfoque dentro de los sistemas físicos es uno de los más asociados con el método científico y fue el primero en ser aplicado a datos cuantitativos en el campo de las ciencias de la tierra, particularmente a partir de las décadas de los 30 y 40. Este enfoque está basado en el punto de vista de que una investigación puede desarrollarse de mejor manera si se divide la estructura del problema geomorfológico en el número de partes que la componen, de tal manera que la dinámica de cada parte así como las diferentes interacciones entre sí, podrá ser analizada, dando como resultado la síntesis completa de todos los componentes involucrados dentro de la investigación.

Las investigaciones del sistema físico se dividen en tres: aquellos donde los elementos estructurales importantes son establecidos dentro de un modelo de tipo físico, un modelo matemático e incluso aquellos sujetos a observación en campo bajo algún diseño experimental conveniente (Chorley, 1967).

Un modelo matemático, de acuerdo con Krumbein y Graybill (1965), se define como una abstracción en la que se reemplazan los objetos, fuerzas, eventos, etc. por una expresión que contenga variables matemáticas, parámetros y constantes, involucrando así la adopción de un número de idealizaciones de los diversos fenómenos estudiados y además se le atribuyen a las entidades involucradas algunas propiedades definidas estrictamente. Las características esenciales de los fenómenos son análogas a la relación entre ciertos símbolos abstractos. El fenómeno observado se parece a algo extremadamente simple con muy pocos atributos. El parecido es tan cercano que las ecuaciones son un tipo de modelo de trabajo, del cual se pueden predecir características de un objeto o situación real que nunca ha sido observada (Daniel, 1955). El tipo más común de modelo matemático usado en geomorfología trata alguna declaración simplificada de ciertas características importantes del mundo real las cuales pueden ser transformadas de acuerdo a los supuestos referentes a la operación básica del sistema (cambios a través del tiempo), checando las predicciones del modelo versus las situaciones apropiadas del mundo real, alguna información acerca de los mecanismos básicos involucrados y la sucesión de cambios geométricos a los cuales la tierra está sujeta a través del tiempo (Chorley, 1967).

Por su parte, un modelo determinístico, de acuerdo con Chorley (1967), está basado en nociones básicas de matemáticas de relaciones exactamente predecibles entre variables independientes y dependientes, causa y efecto por ejemplo, y consiste de una serie de afirmaciones matemáticas exactamente especificadas (derivadas de la experiencia o la intuición) de las cuales las únicas consecuencias pueden ser derivadas de la argumentación matemática lógica. Tales modelos tratan de las relaciones y las fuerzas que manejan o causan entre los factores identificados en el modelo simplificado.

Los modelos estocásticos son expresiones que involucran variables, parámetros y constantes matemáticas junto con uno o más componentes aleatorios (Krumbein y Graybill, 1965).

Según Harvey (1967), un modelo, dentro del campo del estudio del relieve, es la representación de una o varias características del terreno de una forma sintética, abstracta y temporal con el objeto de tener una visión más próxima a las formas del relieve. De esta manera su uso debe adecuarse a los objetivos que se desean alcanzar, a partir de una escala temporal ya sea *a priori* o *a posteriori* (Hardisty *et al.*, 1993). El primero da una idea de la dinámica del relieve como resultado del desarrollo del medio físico. En cambio los modelos *a posteriori* surgen como una alternativa para el resultado final en el desarrollo de una teoría.

De acuerdo con Chorley (1967), los modelos se clasifican en normativos y descriptivos. Los primeros involucran el uso de analogías, aplicando un mayor o menor conocimiento de la situación, usualmente son utilizados para predecir eventos futuros o posibilidades, es decir, presentan una connotación de carácter predictivo. En cambio los descriptivos representan formas reales y se da un equilibrio estructural de las formas o sobre cambios en procesos a través del tiempo. Chorley (1967) además argumenta que los modelos dentro del campo de la geomorfología se clasifican en:

- a) Analogías naturales. Se recurre al análisis y modelación de las características históricas que se han presentado en el terreno y así poder inferir las condiciones futuras en el espacio.
- b) Modelos físicos. Estos se dividen en materiales y matemáticos. Los materiales tienen el objetivo de representar a escala las condiciones de la realidad, con los mismos materiales y características, para conocer y determinar su dinámica. Por otro lado, los matemáticos usan abstracciones del terreno en donde los objetos son reemplazados por expresiones matemáticas por medio de variables, parámetros y constantes, esto concentrado en un sistema idealizado donde los valores presentan una relación para describir la dinámica del terreno. Dentro de esta clasificación de modelos existen diferentes enfoques, determinísticos, estocástico y de optimización.
- c) Sistemas generales. Están basados en el estudio de las formas del relieve con base en la suposición de que más de un proceso ha afectado al relieve, esto derivado de la observación general de las condiciones del terreno o de la intuición que le da la experiencia del investigador. Dentro de este tipo de modelos existe una relación recíproca entre cada elemento que es posible de estudiar por separado (Von Bertalanffy, 1978).

En la actualidad diversos programas son empleados con la finalidad de tratar de entender la dinámica de los procesos naturales, esto a partir de la utilización de diversas variables o parámetros que permiten simular diferentes escenarios y así poder conocer y entender las diferentes circunstancias que influyen en la naturaleza.

Es importante subrayar que la certidumbre o precisión de los resultados que se obtengan a través de la modelación estará determinada por algunos aspectos que se deben tomar en cuenta cuando se hace uso de la modelación. Estos puntos o aspectos son el conocimiento antecedente acerca del proceso estudiado; el número de parámetros e incluso de procesos que interactúan entre sí; el grado de veracidad o certidumbre de la información o de los datos que se desean recopilar o estimar, así como su posterior manipulación, procesamiento y análisis; el diseño, operatividad y precisión del programa o programas empleados, y particularmente, que se cuente con una amplia base teórica-conceptual que permita elegir la técnica o metodología más adecuada y que cumpla con

las necesidades y objetivos del estudio a realizar, así como poder adaptar, modificar y aplicar el modelo elegido de forma correcta para reducir al máximo las posibilidades de error o incertidumbre (Borja Baeza, 2006).

Dentro de este último apartado hay que recalcar que los modelos son un conjunto de aproximaciones a la dinámica real de los procesos o fenómenos cuya diversidad, variabilidad y grado de complejidad es proporcional al número de parámetros que influyen o participan, es decir, a mayor número de elementos involucrados, mayor será la cantidad de escenarios posibles (Borja Baeza, 2006). Aunque es importante mencionar que a mayor número de variables mayor precisión o certidumbre se obtendrá en los resultados. Asimismo, los estudios previos así como una recopilación de información relacionada a los fenómenos son primordiales, primero durante el proceso de análisis y segundo en la discriminación de los resultados obtenidos y su posterior interpretación.

De forma paralela a la modelación que se desarrolle y se use en las investigaciones, hay que tomar en cuenta, de acuerdo con Borja Baeza (2006), otros puntos que son base de un estudio o análisis: la interpretación, el conocimiento previo del proceso así como de los factores que inciden sobre el mismo; una comprensión de los diferentes aspectos físicos y sociales que modifiquen las características del fenómeno; el adecuado manejo y realización de las pruebas o experimentos que sean necesarios para obtener los datos asociados a los parámetros requeridos para el modelo así como su posterior manejo, y por último tener un alto nivel de claridad en las conclusiones resultantes.

Cabe destacar la importancia del aspecto temporal que caracteriza a los modelos, ya que permiten recrear eventos o situaciones previas o bien simular escenarios futuros, los primeros son ampliamente usados para comprender procesos antiguos e incluso entender momentos o eventos presentes; en cambio, la simulación de escenarios futuros tiene como uno de sus principales objetivos la preparación, mitigación o prevención, y respuesta ante fenómenos potencialmente peligrosos, además de entender situaciones o procesos que permitan llevar a cabo una planeación más adecuada en el tiempo presente para modificar o hacer frente a procesos venideros.

Por último, es importante establecer dentro del estudio de procesos geomorfológicos ciertas condiciones para elegir o diseñar un modelo, ya que se tienen que considerar algunos puntos básicos con el fin de obtener un alto grado de veracidad en los resultados y que además cumplan con la expectativa de tener un mayor detalle. De esta forma es necesario establecer el grado de precisión que se desea de los resultados, ya que esto dependerá principalmente del número de parámetros empleados, los cuales en la mayoría de los casos es difícil de obtener debido a que no existe o su uso está restringido. De esta forma se establece que un mayor detalle, requiere de una mayor complejidad del modelo a emplear y por lo tanto se necesita un mayor tiempo de análisis (Anderson y Calver, 1977).

3.6 Modelos en los procesos de remoción en masa

La modelación es una herramienta importante dentro de las investigaciones asociadas a la problemática de los procesos de remoción en masa, ya que permite determinar, de forma aproximada, la dinámica y comportamiento de las laderas montañosas para poder elaborar una cartografía que represente el grado de susceptibilidad a procesos de remoción en masa. Estos mapas permiten diseñar las estrategias que se deben adoptar para enfrentar la posibilidad de la ocurrencia de un fenómeno de esta índole y sus posibles repercusiones en la sociedad.

En el campo de la geomorfología, la modelación ha sido ampliamente usada para comprender el comportamiento de los diferentes procesos que influyen en la evolución del relieve. En el caso concreto de los procesos de ladera, Harvey (1967) considera a un modelo como la representación de forma temporal y espacial de ciertas características del terreno, que deben ser estudiadas y así obtener una aproximación a la realidad.

En 1999, Brunnsden elaboró una recopilación de los tipos más comunes de modelos empleados en los estudios de inestabilidad. Dentro de su trabajo agrupa a los modelos dentro de tres grandes grupos: de estabilidad de laderas, reológicos y aquellos que realizan análisis hidrológicos.

De acuerdo con Brunnsden (1999) el primer grupo, los modelos de estabilidad de laderas, se divide en estáticos y dinámicos. Los estáticos consideran a los procesos de remoción en masa en un estado estable y buscan determinar cuáles son las posibles causas o estímulos que pueden ocasionar una desestabilización. Algunos ejemplos de este tipo de modelos son:

- Modelos para superficies planas de deslizamiento (Haefeli, 1948; Skempton y Delory, 1957).
- Modelos que emplean el método de cortes desarrollado principalmente en deslizamientos rotacionales simples (Gregory, 1844; Janbu, 1957).
- Modelos computarizados avanzados (Sarma, 1976; Bromhead, 1986).
- Modelos de resistencia residual (Skempton, 1985; Bishop, 1971).
- Modelos sin fallas de deslizamiento para procesos como vuelcos o caídas de rocas (De Freitas y Watters, 1973; Dunbaven, 1983).

Por otra parte los modelos dinámicos permiten el estudio de procesos activos. A este tipo de modelos, Brunnsden (1999) los divide en 4 grupos fundamentales:

- Modelos basados en ecuaciones de movimiento (Sarma, 1973; Hutchinson, 1987).
- Modelación de procesos de remoción en masa en movimiento (Prior y Suhayda, 1979; Iverson y La Husen, 1989).
- Modelos numéricos en laderas rocosas (Henscher *et al.*, 1996; Shi, 1990).
- Modelación de los cambios temporales sobre los factores que influyen en los procesos de remoción en masa (Dikau *et al.*, 1996; Moore y Brunnsden, 1996).

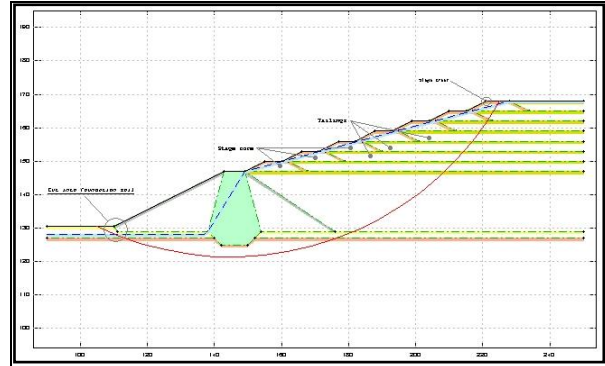
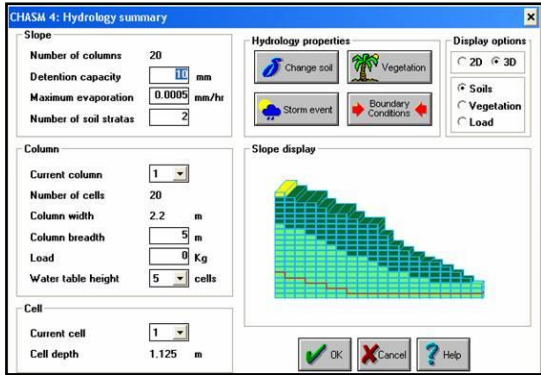
Los modelos reológicos han alcanzado un estado de desarrollo muy avanzado en países como Japón y China, en donde los investigadores realizan grandes esfuerzos para hacer frente a la problemática derivada del impacto de los flujos de detritos. La mayor parte de las aportaciones dentro de este tipo de modelos se han hecho gracias al trabajo de Bingham (1922), Bagnold (1954), Daido (1970), Takahashi (1983) y Chen (1986), por mencionar algunos ejemplos.

Por último, los modelos que analizan el componente hidrológico de los procesos de remoción en masa han estado ganando mayor aceptación dentro de los estudios asociados a esta problemática. En este tipo de modelos destaca el uso de las propiedades hidrológicas de los materiales como base fundamental en la estabilidad de una ladera, de esta manera factores tales como la conductividad hidráulica, la infiltración y la presión de poro, por mencionar algunos, adquieren vital importancia como parámetros a emplear en un modelo (Borja Baeza, 2006). Algunos modelos que son empleados en este tipo de estudios son GWFLUCT (Terlien, 1996), HILLFLOW (Bronstert, 1994), HYSWASOR (van Genuchten, 1980), MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988), SEEPW (GEOSLOPE, 1994) y CHASM (Ibraim y Anderson, 2002), por sólo mencionar algunos.

Asimismo Brunnsden (1999) menciona que dentro de una investigación sobre inestabilidad es necesario tomar en cuenta tres aspectos fundamentales: a) considerar el límite de equilibrio natural del terreno, determinado por las características físicas, las propiedades de los materiales y otros factores externos; b) el tiempo, pues la ocurrencia o reactivación de un proceso de remoción en masa presenta diferente temporalidad, ya que depende de las condiciones que lo detonaron y por lo tanto su duración puede ser de horas, días o hasta años; y c) los factores que influyen en su ocurrencia o reactivación.

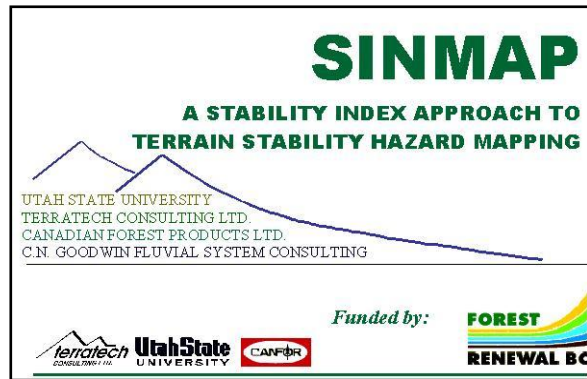
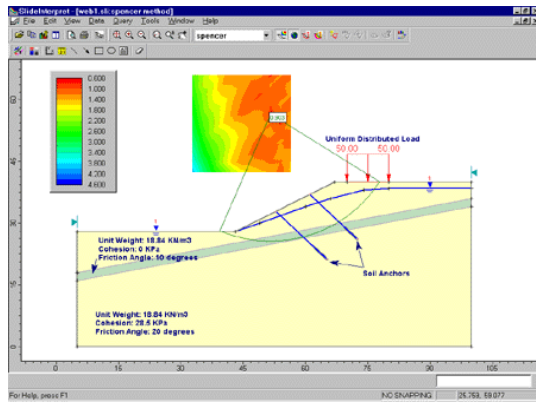
PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

Como se mencionó anteriormente existen diversos modelos que son empleados en el estudio de los procesos de remoción en masa y actualmente la gran mayoría pueden ser usados con la ayuda de una computadora lo que, de cierta manera, hace más práctico el análisis de la inestabilidad de laderas. Entre la gran variedad de modelos que se emplean actualmente se pueden mencionar los siguientes (figuras 3.1 a 3.4): PCRASTER, SINMAP, SLIDE, SLOPE/W, CHASM, SMORPH, GALENA, GFA2D, SLOPEBG, SWARS, LISA, DLISA y SHALSTAB (tabla 3.1).



Figuras 3.1 y 3.2. Ejemplos de los programas CHASM y SLIDE, en los cuales se realizan análisis de estabilidad en perfil.

Fuentes: <http://www.mine.metu.edu.tr> y CHASM manual del usuario



Figuras 3.3 a 3.4. Ejemplos de los programas GALENA y SINMAP empleados en los estudios de inestabilidad de laderas. En el caso de GALENA se realizan análisis en perfil, por otro lado, SINMAP permite el mapeo de zonas inestables a través del modelo infinito de laderas.

Fuentes: www.galenasoftware.com y www.engineering.usu.edu

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

Programa	Características básicas
SINMAP	Modelo que permite el cálculo y mapeo del índice de estabilidad con base en la información geográfica, principalmente la que se obtiene a partir del modelo digital de elevación y las características geológicas.
SLIDE	Realiza análisis de estabilidad así como de sensibilidad y probabilísticos. Este programa trabaja en un ambiente 2-D y permite el uso de información CAD.
SLOPE/W	Programa que permite el análisis de superficies de deslizamiento, presión de poro y propiedades del suelo. Pueden emplearse parámetros determinísticos o probabilísticos.
CHASM	Modelo bidimensional hidrológico finito de ladera que permite la predicción de presiones poro tomando en cuenta diversos tipos de vegetación. Involucra la combinación de modelos hidrológicos y de estabilidad de laderas.
SMORPH	Permite la creación de mapas de susceptibilidad a partir del cálculo de la pendiente y la curvatura de una ladera desde un modelo digital de elevación.
GALENA	Análisis de estabilidad en la cual se simulan complejas condiciones geológicas, así como de fuerzas externas e internas que influyen en la estabilidad de una ladera. Emplea las ecuaciones de Bishop y Sarma para crear modelos bidimensionales.
GFA2D	Realiza análisis de falla en dos dimensiones basados en la ecuación de Mohr.
SLOPEBG	Análisis bidimensionales de estabilidad de laderas por medio de métodos determinísticos o probabilísticos.
SWARS	Permite el análisis de estabilidad de laderas rocosas. Usado principalmente para procesos de caída y vuelco.
LISA-DLISA	Realiza simulaciones estocásticas basadas en el método Monte Carlo y tomando en cuenta la ecuación infinita de laderas.
SHALSTAB	Es un modelo que involucra el uso tanto de un modelo hidrológico como de uno de estabilidad con el objeto de determinar el estado crítico de la precipitación que puede detonar procesos de remoción en masa poco profundos.
SHETRAN	Modelo de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. Es un sistema de modelado de la distribución espacial, hidrología y transporte de sedimentos.
STABLE	Análisis de estabilidad con la fórmula propuesta por Morgenstern-Price en donde se toma en cuenta la granulometría, la geometría y la presión de poro.
PCRASTER	Análisis espacio-temporales y herramientas de cartográficas.

Tabla 3.1. Programas usados en la modelación de estabilidad de laderas (Borja Baeza, 2006).

3.7 Índice de estabilidad y modelo infinito de estabilidad de laderas

Se define al índice de estabilidad como la probabilidad de que un punto o área sea estable asumiendo una distribución uniforme de los diferentes parámetros que ejercen cierta influencia sobre su estabilidad. De esta forma el grado de resistencia a la falla de una ladera se expresa por lo general a través del Factor de Seguridad (FS), el cual es el resultante entre la resistencia al corte por parte del suelo y los esfuerzos de corte que pueden generar una superficie de falla. Los rangos del índice varían entre 0 (condición de inestabilidad), 1 (límite de estabilidad) y mayor a 1 (condición de estabilidad) como se puede ver en la tabla 3.2.

Para poder calcular el factor de seguridad de un área o ladera es necesario emplear el modelo infinito de laderas, el cual se expresa de la siguiente manera:

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta [\rho_s g (D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g) D_w] \tan \Phi}{D \rho_s g \sin \theta \cos \theta}$$

Dónde:

- **FS** = valor de estabilidad de la ladera
- **Cr** = cohesión original del material
- **Cs** = cohesión del suelo
- **θ** = pendiente
- **Φ** = ángulo de fricción interna del suelo
- **ρ_s** = densidad del suelo en estado húmedo
- **ρ_w** = densidad del agua
- **g** = constante de gravedad
- **D** = profundidad del suelo
- **D_w** = profundidad del manto freático en la capa de suelo

Los modelos que son empleados en la inestabilidad de laderas abarcan una amplia diversidad de bases teóricas, sin embargo, el modelo infinito de laderas es uno de los más recurrentes en este tipo de investigaciones, aunque claro desde diferentes métodos, enfoques y objetivos.

Desarrollado por Skempton (1957), este modelo se creó con la finalidad de analizar el comportamiento de laderas compuestas de arcillas y así conocer su grado de estabilidad. Está basado en una ecuación de tipo lineal que considera un movimiento paralelo a una superficie de contacto y una ladera que se extiende infinitamente. Este modelo ha sido empleado en diversas investigaciones debido a su simplicidad (figura 3.5).

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

Condición	Clases	Estado de predicción	Rangos del parámetro	Rango de estabilidad	Posible influencia de factores
$IE > 1.5$	1	Zona de ladera estable	Rango del modelo donde no hay inestabilidad	ESTABLE	Factores desestabilizadores mayores son requeridos para crear inestabilidad
$1.5 > IE > 1.25$	2	Zona moderadamente estable	Rango del modelo donde no hay inestabilidad		Factores desestabilizadores moderados son necesarios para la inestabilidad
$1.25 > IE > 1.0$	3	Zona de ladera casi estable	Rango del modelo donde no hay inestabilidad	INESTABLE	Factores desestabilizantes menores pueden provocar inestabilidad
$1.0 > IE > 0.5$	4	Límite inferior de inestabilidad	Rango desfavorable requerido para la inestabilidad		No se requiere de factores desestabilizantes
$0.5 > IE > 0.0$	5	Límite superior de inestabilidad	Rango en el cual se requiere estabilidad		
$0.0 > IE$	6	Zona de mayor inestabilidad	Rango del modelo donde no hay estabilidad		Se requiere de factores de estabilidad

Tabla 3.2. Clases en función del índice de estabilidad (Pack *et al.*, 2001).

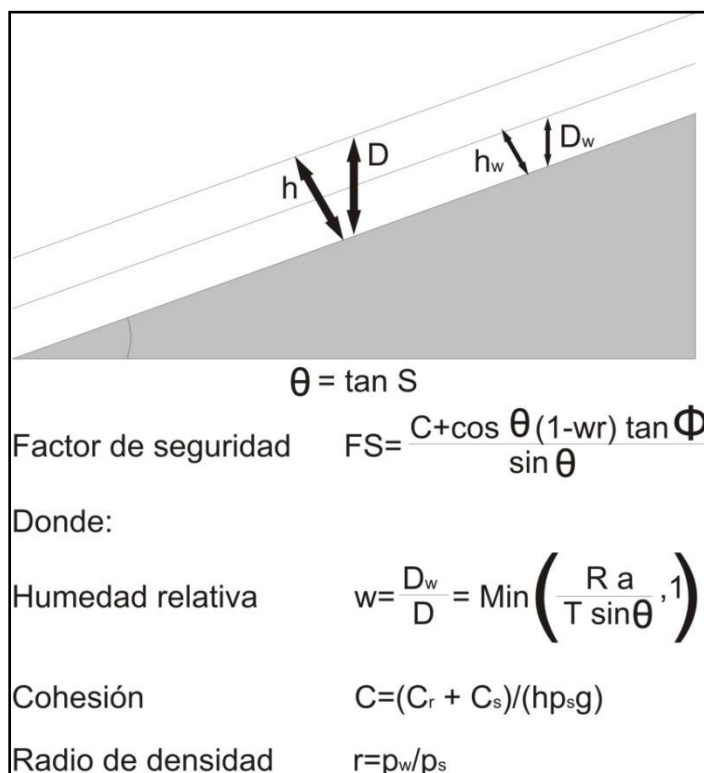


Figura 3.5. Modelo infinito de estabilidad de laderas (Pack *et al.*, 2001)

En este modelo se asumen las características de la ladera en dos dimensiones, en el entendido de que las condiciones de la ladera son homogéneas. El tipo de movimientos que son analizados involucra el desplazamiento de masas que en longitud son mayores que la profundidad del mismo, por lo que el movimiento es de tipo planar y de longitud infinita (Alcántara Ayala, 1999). Desde la perspectiva hidrológica su uso asume que el peso que presenta el suelo es perpendicular a la ladera y no vertical, asimismo es medido en metros.

3.8. Consideraciones finales

La simulación de escenarios, mediante el uso de modelos, ha permitido representar la dinámica de diversos procesos físicos y humanos. Esto ha facilitado un mejor análisis de dichos procesos, lo cual se traduce en un mejor entendimiento de la realidad. En el caso concreto de los fenómenos naturales, la modelación es una herramienta imprescindible, ya que a través de ella es posible simular su comportamiento, y por ende, comprender la influencia de cada uno de los factores que intervienen en su ocurrencia. Esto facilita el trabajo de los investigadores, ya que permite reducir el tiempo de estudio. Por otro lado, la simulación de eventos o escenarios futuros proporciona herramientas para predecir sucesos o situaciones, y así poder prevenir las probables consecuencias.

En el campo de los procesos de remoción en masa, la utilización de modelos ha contribuido a la generación de una gran cantidad de información útil para entender la dinámica de estos procesos. Asimismo, se ha incrementado su complejidad como consecuencia del número de parámetros requeridos para su aplicación. Esto último, ha traído como consecuencia un mayor interés en el uso de las técnicas de instrumentación y monitoreo para la adquisición de datos fundamentales. Esta asociación, modelación-instrumentación-monitoreo, ha estimulado especialmente el desarrollo de diversas metodologías enfocadas a la comprensión de la inestabilidad de laderas.

Uno de los objetivos de esta investigación se centró en la simulación de escenarios de la estabilidad de laderas, motivo por el cual se llevó a cabo la aplicación de una estrategia de instrumentación y monitoreo con el propósito de obtener los datos de las variables esenciales necesarias para dicha modelación. Esta última se desarrolló con el apoyo del programa PCRaster y el modelo infinito de estabilidad de laderas. El programa permite el análisis espacio-temporal del fenómeno, así como la creación y edición cartográfica de los resultados.

Mediante el PCRaster es posible desarrollar simulaciones de cualquier fenómeno natural, ya que permite al usuario crear su propio modelo, lo cual brinda una amplia gama de posibilidades. Para este estudio se aplicó el modelo infinito de estabilidad de laderas considerando los datos de precipitación registrados en la zona en estudio. Cabe destacar que para efectuar la simulación fue necesario contar con la información de diferentes

parámetros tales como cohesión, ángulo de fricción interna, y conductividad hidráulica, por lo que fue fundamental realizar pruebas de campo y laboratorio.

El programa PCRaster fue elegido debido a que ofrece la posibilidad de modificar el modelo de acuerdo a las necesidades y objetivos establecidos, además de ser un programa que cuenta con las funciones de un Sistema de Información Geográfica, y por consiguiente, facilita la visualización, manejo y edición de los mapas resultantes. Asimismo, el programa permite utilizar información detallada de precipitación y asociarla con el cálculo del índice de estabilidad permitiendo determinar el Factor de Seguridad para cada uno de los días de lluvia registrados; es decir, realiza un análisis temporal de la condición de estabilidad de la ladera y permite determinar el momento en de transición entre lo estable y lo inestable. Finalmente, a partir del análisis de los resultados también es posible evaluar cuáles son los factores que tienen mayor influencia como factores condicionantes de tales procesos.

Un trabajo de referencia en cuanto al uso del programa PCRaster en el estudio de la dinámica temporal de la inestabilidad de laderas es el realizado por Schmidt y Dikau (2004). En dicha investigación los autores realizaron un análisis en el cual simularon diferentes escenarios para las variaciones históricas del clima e inestabilidad de laderas en las cercanías de Bonn, Alemania. Es un modelo para patrones anuales históricos de temperatura y lluvia basado en aproximaciones estacionales. El objetivo primordial de su trabajo era estudiar los efectos de los cambios climáticos en la estabilidad de laderas. Cabe destacar que en el capítulo 6 se hará referencia con mayor detalle al uso del programa PCRaster.

CAPITULO 4. INSTRUMENTACIÓN

4.1 Introducción

4.1.1 Experimentos y pruebas en campo en el ámbito de la geomorfología

La geomorfología, como muchas otras ciencias, necesita recabar información para poder entender la dinámica de los procesos o fenómenos que se presentan en el relieve terrestre. La mayoría de las veces la información necesaria es registrada a través del uso de instrumentos o equipos, por medio del análisis en laboratorio de muestras e incluso a través de pruebas o experimentos realizados en campo.

La experimentación de campo es definida como una serie de mediciones encaminadas, bajo ciertas condiciones, a desarrollar un principio general acerca de la evolución del relieve (Slaymaker, 1982). El principal objetivo es entender la dinámica del terreno y los factores que intervienen en los cambios continuos que éste experimenta, así como simular escenarios futuros que permitan entender la compleja evolución del relieve y su estrecha relación con los cambios en los procesos humanos (Slaymaker, 1991).

Los experimentos geomorfológicos de campo, según Slaymaker (1991), pueden ser divididos dentro de los siguientes campos:

1. Observación de efectos.
2. Formulación de hipótesis acerca de los efectos observados.
3. Cambio controlado de los factores independientes pensados para producir los efectos observados.
4. Respuesta del paso 3 para permitir la comprobación de las hipótesis hechas.
5. Medición de variables independientes y dependientes.
6. Derivación de las leyes que rigen las relaciones de estas variables.
7. Establecer el rango de aplicación de dichas leyes.

4.1.2 Experimentos en geomorfología

Las incertidumbres que conlleva el método experimental no sólo es un problema que corresponde a la geomorfología, también lo enfrentan ecólogos, sociólogos y otros especialistas. Una discusión hecha por Hammond (1978) sobre las características y contrastes de varios modos de investigación establece el problema en un contexto más

amplio. Él reconoce una amplia serie de formas de investigar desde el experimento auténtico hasta el juicio intuitivo; a lo largo de esta serie la manipulación activa de las variables disminuye y el enfoque analítico es desplazado por el intuitivo. Los experimentos se clasifican en exactos, híbridos y semiexperimentos de acuerdo al control de variables. En el experimento exacto, las condiciones o variables son controladas meticulosamente, como en un laboratorio; en el híbrido, el diseño estadístico es explotado para asegurar un alto nivel de control; por último, en el semiexperimento, el nivel de control es sustancialmente reducido y el juicio o conocimiento de un científico experimentado lo sustituye por un formal diseño experimental (Slaymaker, 1991).

Dentro de los estudios enfocados al entendimiento de los procesos de remoción en masa se encuentran las investigaciones realizadas a partir de la instrumentación y monitoreo de laderas. Dicha metodología comprende el uso de diversos instrumentos que permiten obtener información relevante acerca de las características de las laderas, así como su dinámica; ambos aspectos importantes para los estudios de inestabilidad. El monitoreo continuo de las condiciones de una ladera arroja información referente a aspectos tales como infiltración, presión de poro, comportamiento hidrológico de los materiales, desplazamientos de las laderas, etc. La mayoría de las veces esta información es empleada en modelos que permiten la simulación de posibles eventos, para poder así predecir el momento en el cual una ladera tiende a ser inestable y por tanto presentar la ocurrencia de un proceso de remoción en masa.

4.2 Instrumentación y monitoreo de laderas

La instrumentación es una técnica que ha sido empleada en campo y particularmente en la ingeniería, aunque cabe destacar que en las últimas décadas ha sido empleada en estudios de tipo geomorfológico, en especial en el monitoreo de laderas potencialmente inestables. Aunado a ello, recientemente se han desarrollado un sin fin de instrumentos y sistemas de medición para determinar presión de poro, succión del agua, movimiento y deformación del terreno, por ejemplo.

Diversas técnicas han sido empleadas para el monitoreo de laderas. Dichas técnicas han evolucionado desde simples estacas de madera o metal, para medir el movimiento de la ladera, hasta el uso actual de equipos más sofisticados e incluso de Sistemas de Geoposicionamiento Global (GPS). Asimismo debido a su enorme capacidad para registrar datos de gran calidad de áreas pequeñas, instrumentos como los inclinómetros y los extensómetros se han convertido en los equipos de monitoreo de mayor uso por parte de diversos investigadores. Por otro lado, técnicas como fotogrametría digital y la interferometría de radar (*InSAR-Synthetic Aperture Radar Interferometry*) permiten análisis cuantitativos de los cambios en la morfología de las laderas, así como el registro de datos de movimiento. Debido al avance en la tecnología en los últimos años, muchas de estas técnicas de monitoreo han experimentado cambios importantes en términos de registro de los datos, así como de los aspectos de procesamiento (Mendoza *et al.*, 2002).

Gran parte de las investigaciones que se realizan actualmente sobre la inestabilidad de laderas se llevan a cabo a partir del estudio de procesos que ocurrieron con anterioridad, debido a que estos proporcionan gran información acerca del origen. Sin embargo, en las condiciones en las que ocurren eventos de magnitud muy baja o inclusive procesos incipientes o en desarrollo, las causas o características son poco evidentes, así que el valor de la información que puede ser obtenida de la superficie del terreno es limitada. En consecuencia, la instrumentación puede proporcionar valiosa información sobre aquellos movimientos incipientes al igual que los procesos que ya ocurrieron o se desarrollaron (Wilson y Mikkelsen, 1978).

La instrumentación no busca remplazar a las observaciones hechas en campo o a los procedimientos de investigación ya establecidos, sino recabar información que pueda ser empleada para un mayor conocimiento de las características de los procesos de remoción en masa, ya sea a través de la creación de mapas o por medio de la modelación, y así complementar la investigación en las laderas.

De acuerdo con Wilson y Mikkelsen (1978), la instrumentación ha sido empleada bajo la premisa de alcanzar alguno o todos los objetivos descritos a continuación:

- Determinar la forma y profundidad de las superficies de deslizamiento en procesos en desarrollo. De esta manera los cálculos pueden ser hechos para conocer los parámetros de resistencia del suelo disponibles en el proceso y así determinar qué medidas se deben tomar.
- Detectar los movimientos laterales y verticales dentro de un proceso de deslizamiento.
- Determinar la velocidad de los desplazamientos y así advertir posibles daños.
- Monitorear la actividad de laderas naturales marginalmente estables y los efectos de la construcción o precipitación sobre estas.
- Monitorear los niveles del agua subterránea o la presión de poro normalmente asociados con procesos de remoción en masa para permitir estudios o análisis eficaces de la tensión efectiva.
- Proveer información digital a distancia o un sistema remoto que alerte de posibles daños.
- Monitorear y evaluar la eficiencia o eficacia de diversas medidas de control.
- Crear sistemas de alerta temprana.

Como resultado de la problemática asociada a los procesos de remoción en masa, es necesario poder reconocer, con bastante anticipación, las zonas altamente susceptibles en donde pudieran ocurrir procesos futuros. Esto es posible a través de investigaciones que incluyan la observación constante de las condiciones de estabilidad de una ladera y así poder prevenir desastres. Una amplia gama de equipos de medición se han desarrollado para detectar todos aquellos cambios en las condiciones naturales de las laderas. Este proceso de instrumentación ha tenido notables avances durante las últimas décadas, y la aplicación de la tecnología computacional ha permitido el desarrollo de sistemas automáticos de monitoreo así como facilitar el proceso de registro de datos (Mendoza *et al.*, 2002). En diversas partes del mundo se han puesto en marcha avanzados sistemas automatizados de instrumentación y monitoreo y los datos obtenidos son procesados y analizados para predecir la ocurrencia de fallas además de que se encuentran enlazados a eficientes sistemas de alarma (Angeli *et al.*, 2000).

El estudio de la estabilidad de laderas a través de este tipo de metodologías es parte fundamental para tener un amplio conocimiento del comportamiento del terreno, sobre todo en áreas que cuentan con antecedentes de inestabilidad, como es el caso de México, y en particular de regiones como la Sierra Norte de Puebla, en donde es primordial contar con sistemas de alerta temprana que mantengan informada a la población, principalmente en la época de lluvias, para así evitar posibles desastres.

El monitoreo constante de la deformación de una ladera debe ser la principal preocupación, particularmente durante y después de los periodos de lluvia, momentos en los cuales las condiciones de estabilidad de las laderas se ven seriamente afectadas, y se incrementa la posibilidad de la ocurrencia de un proceso de remoción en masa.

Dentro de los diferentes enfoques que se emplean en la instrumentación y monitoreo de laderas, el análisis de la precipitación se ha convertido en un factor primordial en la mayoría de las investigaciones. Como se mencionó anteriormente, la precipitación es uno de los factores, junto con los sismos, que actúa como desencadenante de procesos de remoción en masa, lo cual ha sido demostrado a través de diversos estudios que se han realizado alrededor del mundo (Brand, 1985; Deutscher *et al.*, 2000; Faisal, 2000; Bhasin *et al.*, 2002; Crosta y Frattini, 2003; Hengxing *et al.*, 2003; Alcántara Ayala, 2004; Chen y Lee, 2004; Warburton *et al.*, 2004; Zezere *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2006).

En el caso de la presente investigación se retoma este enfoque para realizar el análisis del patrón de precipitación que afecta las condiciones hidrológicas de una ladera experimental. El propósito concreto de este trabajo es conocer el grado de influencia de la precipitación en el comportamiento de los materiales de una ladera, así como la simulación de posibles escenarios en los cuales el factor lluvia es el mecanismo disparador. Los antecedentes de precipitación y posterior ocurrencia de procesos de remoción en masa en la zona de estudio fueron factores relevantes en la selección del área en la cual se llevó a cabo la investigación.

En el mundo, Hong Kong es uno de los ejemplos claros acerca de la influencia de la precipitación en la ocurrencia de procesos de remoción en masa, por lo que se han desarrollado una amplia variedad de estudios basados en la observación, monitoreo y registro de este tipo de eventos. Estos trabajos han generado diversas conclusiones acerca de la relación entre la lluvia y la inestabilidad de laderas en dicho territorio (Mendoza *et al.*, 2002):

- La mayoría de los procesos de remoción en masa son inducidos por lluvias cortas, y localizadas, de intensidad alta, y que además ocurren prácticamente al mismo tiempo que el pico de la lluvia horaria.
- La precipitación antecedente no es un factor determinante en la ocurrencia de procesos de ladera, excepto en los casos de procesos menores que tienen lugar bajo lluvias de relativa baja intensidad. En estos casos, solo la lluvia antecedente de unos cuantos días parece ser significativa.
- Una intensidad de lluvia de aproximadamente 70 mm/hora parece ser el valor de un umbral arriba del cual ocurren los procesos. El número de eventos y la severidad de sus consecuencias aumenta dramáticamente conforme crece la intensidad horaria respecto a este umbral.
- La lluvia de 24 horas generalmente refleja lluvias cortas de intensidad alta, y esta puede por tanto usarse como un indicador de la probabilidad de procesos de ladera. Una lluvia de 24 horas de menos de 100 mm es muy improbable que provoque un proceso mayor.

En la figura 4.1 se muestra la frecuencia aproximada de procesos de ladera en relación con la duración de los eventos de precipitación. Esta simple información forma la base, en gran medida, del sistema de alerta que es empleado en Hong Kong. Sin embargo, es importante mencionar que estos umbrales son distintos para otros sitios como México por lo que es necesario realizar estudios de monitoreo de lluvias y de estabilidad de laderas puntuales para así poder identificar los umbrales de precipitación correspondientes, que permitan la creación de sistemas de alerta, y así poder pronosticar con una alta certidumbre la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

	EFECTO DEL DESLIZAMIENTO	FRECUENCIA	
100	Desastroso	1 en 5 años	100
70	Severo	1 en 2 años	70
40	Menor	3 en 1 año	40
0	Ninguno		0

Figura 4.1. Relación aproximada entre intensidad de lluvia y deslizamientos de laderas en Hong Kong (Brand, 1985)

4.2.1 Requerimientos básicos de una instrumentación

El proceso de instrumentación debe contemplar una planeación cuidadosa enfocada a dar respuestas específicas a preguntas concretas acerca de los parámetros o variables que interactúan para causar un proceso de ladera, así como de sus efectos. La identificación de tales cuestionamientos es el punto de partida para establecer las bases y características de una instrumentación, así como del monitoreo. Esto consiste en saber cuáles son los aspectos a medir y en qué sitios y condiciones se debe hacer, para así evitar realizar acciones incorrectas y que no servirán para alcanzar los objetivos deseados. Adicionalmente, la instrumentación debe adecuarse a las condiciones del sitio bajo estudio, al periodo de medición previsto, al tipo y rango de valores esperados, y a la precisión requerida. Otro de los lineamientos a tomar en cuenta es que los instrumentos más convenientes para la investigación sean los más simples tanto en funcionamiento como a la hora de realizar la instalación y el posterior análisis de los datos (Mendoza *et al.*, 2002).

La planeación de un proceso de instrumentación requiere de un buen conocimiento de la problemática que se está abordando, buen juicio, comprensión de los problemas que implica el uso de instrumentos, paciencia e imaginación. Es importante realizar un diagnóstico previo de cómo funciona una ladera y de cómo, eventualmente pudiera fallar. Solo así será posible seleccionar, de forma acertada, las características y el tipo de equipo, y definir el sitio en el cual será instalado. En este punto cabe destacar que a partir de una buena planeación y de un conocimiento detallado del problema será más fácil la selección apropiada de los equipos, los cuales serán adquiridos con base en los parámetros que se deseen registrar. Asimismo, es importante mencionar que los instrumentos seleccionados deberán ser calibrados previo a su instalación para así

aprovecharlos al máximo y evitar información errónea o de poca certidumbre (Hanna, 1985).

Es importante destacar que sin una planeación adecuada es posible que los resultados esperados no sean los más adecuados, e incluso es posible que los recursos con los que se cuenten terminen desperdiciándose debido a la adquisición de los equipos inadecuados. En cambio, si se lleva a cabo una buena planeación es posible obtener excelentes resultados incluso si no se cuenta con una gran cantidad de recursos materiales y humanos.

4.2.2 Métodos de monitoreo de laderas

Los métodos implican observaciones, mediciones y registro cuantitativo en campo. Los métodos de observación deben ser seleccionados de acuerdo a los propósitos de los experimentos que están enfocados a un tipo específico de proceso, y cada investigador debería establecer su propio método de observación de acuerdo a su objetivo e investigación.

4.2.2.1 Morfometría de laderas

Los cambios topográficos en las laderas, valles y abanicos son aspectos importantes del estudio de los procesos de ladera, debido a que estos son el resultado directo de la ocurrencia, pasada y presente de los mismos y las mejores pistas para determinar el efecto de varios procesos geomorfológicos a futuro. En cada experimento en el terreno, la observación cualitativa o cuantitativa del cambio topográfico es siempre necesaria, aunque la escala de observación en el espacio y tiempo es diferente dependiendo del propósito de cada experimento.

Las técnicas generales para medir la topografía y hacer un mapa son presentadas en libros de topografía y cartografía. Sin embargo, es necesario detectar pequeños y rápidos cambios en la topografía en periodos cortos de tiempo. Para ello es importante considerar:

a) Forma de la ladera

Las mediciones exactas y repetitivas de la forma de la ladera son parte importante para el estudio de procesos de remoción en masa; siendo la medición de la topografía a partir de fotografías aéreas o imágenes de satélite procedimiento común. Sin embargo, un método simple que puede ser utilizado para determinar la forma de una ladera es el levantamiento de perfiles, el cual fue realizado por Churchill (1979). En este método las posiciones de los puntos objetivo están determinadas con un ángulo vertical, y a una distancia en línea recta de una estación de medición al pie de la ladera junto a un teodolito para medir el ángulo vertical y con un objetivo de campo óptico para medir la distancia en línea recta. El

perfil de los puntos que forman parte de la ladera puede ser determinado a partir de simple trigonometría. Este método es muy útil cuando no se puede tener acceso a puntos o sitios difíciles. El error de medición dependerá claro de la precisión del instrumento (Okuda, 1991). Para reducir el error en la medición se elaboró una nueva técnica utilizando un instrumento que usa una onda electromagnética en combinación con un teodolito y espejos reflejantes especiales para así obtener buenos resultados de laderas en fuerte pendiente. El principio es similar al empleado por Churchill, sin embargo, al igual que un objetivo, el reflector especial puede ser establecido en cualquier punto a lo largo de la pendiente a través de una persona que controle la posición del objetivo con un alambre y un sistema de polea desde el pie de la ladera (Yokoyama, 1983).

b) Microtopografía

Algunas técnicas especiales son necesarias para detectar cambios exactos de tipo microtopográfico por medio de un instrumento que puede ser operado por una persona. Una de estas técnicas fue propuesta por Ishii (1981) para monitorear los cambios a nivel micro usando un instrumento de su invención. Dicho instrumento, representado en la figura 4.2, consiste de dos soportes AC, AD de igual longitud, una barra BE y una cuerda AG sosteniendo un peso G que se encuentra suspendido. El instrumento permite determinar coordenadas x-y dentro de la superficie de la ladera. Esta técnica fue usada durante un estudio de los cambios a nivel micro de depósitos de flujos de escombros que fueron observados durante estudios previos en campo. Los estudios se realizaron durante diferentes periodos de tiempo para conocer el patrón de acumulación de los depósitos.

c) Cambios superficiales del terreno

Cuando el movimiento de una ladera está limitado dentro de una capa delgada de terreno, una simple observación del cambio en la superficie puede dar información útil acerca de un proceso de remoción en masa. Una barra o palo insertados dentro de una capa inmóvil es usualmente usada para medir el cambio del nivel en la superficie del terreno y para detectar la velocidad de erosión o depósito de un proceso de ladera (Okuda *et al.*, 1979). No obstante, este tipo de técnica solo muestra el cambio total en la superficie y no durante el movimiento y depósito; a pesar de ello actualmente ya existen diversos instrumentos que permiten el monitoreo de los movimientos superficiales de una ladera.

d) Levantamientos topográficos

Los métodos que se basan en la medición de referencias topográficas permiten conocer con exactitud la velocidad y la magnitud de los cambios superficiales de una masa de suelo o roca. Este tipo de métodos permite el monitoreo de un área que presente indicios de inestabilidad, con lo cual es posible dar seguimiento a sus movimientos teniendo como puntos de referencia bancos fijos ubicados fuera del área inestable; es el procedimiento más directo para conocer la evolución temporal de un potencial proceso de remoción en

El método consiste en colocar puntos de referencia, de preferencia barras de metal ancladas en el terreno, las cuales permitirán la medición de la separación a través del uso de regletas o flexómetros. Para realizar mediciones verticales es necesario el uso de un nivel; así las mediciones periódicas de los desplazamientos verticales y horizontales de los puntos de velocidad de los cambios en el terreno.

El uso de regletas deslizantes es otro de los métodos que se utilizan para el monitoreo superficial de una ladera. Este equipo consiste de un par de regletas de plástico, paralelas entre si y fijadas a dos postes anclados a cada lado de una grieta. De esta manera se puede definir la evolución de la abertura superficial. El costo de instalación de este equipo es relativamente bajo, y su operación es bastante sencilla por lo que se estima que no requiere personal especializado para la toma de lecturas.

Una técnica alternativa para el monitoreo de grietas consiste en la instalación de dispositivos basados en alambres y poleas, los cuales se pueden integrar a un sistema de alarma, mismo que es activado cuando se alcanza un desplazamiento previamente establecido. Esta técnica se usa cuando la zona a monitorear es de difícil acceso y donde se requiere un monitoreo permanente de las grietas (Mendoza *et al.*, 2002).

Algunas de las consideraciones que se deben tomar en cuenta es que el material con el cual está construido el dispositivo sea resistente a las condiciones ambientales de la zona en estudio; asimismo, su mantenimiento debe enfocarse a mantener en óptimas condiciones tanto el sistema de disparo, como el sistema de alarma.

Por último, para el monitoreo de los desplazamientos superficiales se cuenta con dispositivos eléctricos y mecánicos, los cuales forman parte de una técnica más refinada para el estudio de grietas. Esta técnica consiste en la instalación de dispositivos electromecánicos que permiten medir los desplazamientos relativos entre las masas en movimiento. Resulta muy conveniente el uso de este tipo de dispositivos cuando la zona a monitorear es de difícil acceso, y cuando se requiere un monitoreo continuo y automático del terreno con el objeto de determinar la posibilidad de un proceso de remoción en masa. Un ejemplo de este tipo de dispositivos es el extensómetro eléctrico (figura 4.3), el cual se fija en uno de los extremos de la masa estable, y en el otro extremo se coloca una extensión que se une a una barra anclada dentro de la masa en movimiento. La principal ventaja de estos equipos es que pueden incorporarse a un sistema de comunicación a distancia, lo que permite establecer comunicación continua con un sistema de registro remoto, ya sea en una castea de control o en una oficina.

4.2.2.2 Mediciones *in situ* del estudio de la falla de la ladera

Los procesos de remoción en masa inician a partir de la aparición de una fractura en la ladera que es controlada considerablemente por la resistencia y el patrón de movimiento de los materiales; posteriormente el proceso dependerá del comportamiento reológico de

los materiales. De esta forma las propiedades físicas de los materiales deben ser estudiadas. Una selección razonable de puntos de prueba es muy importante para investigar el carácter físico de la ladera en su totalidad o de sitios muy específicos, ya que las propiedades físicas de la ladera no son uniformes a lo largo de la pendiente o la superficie de la ladera (Okuda, 1991).

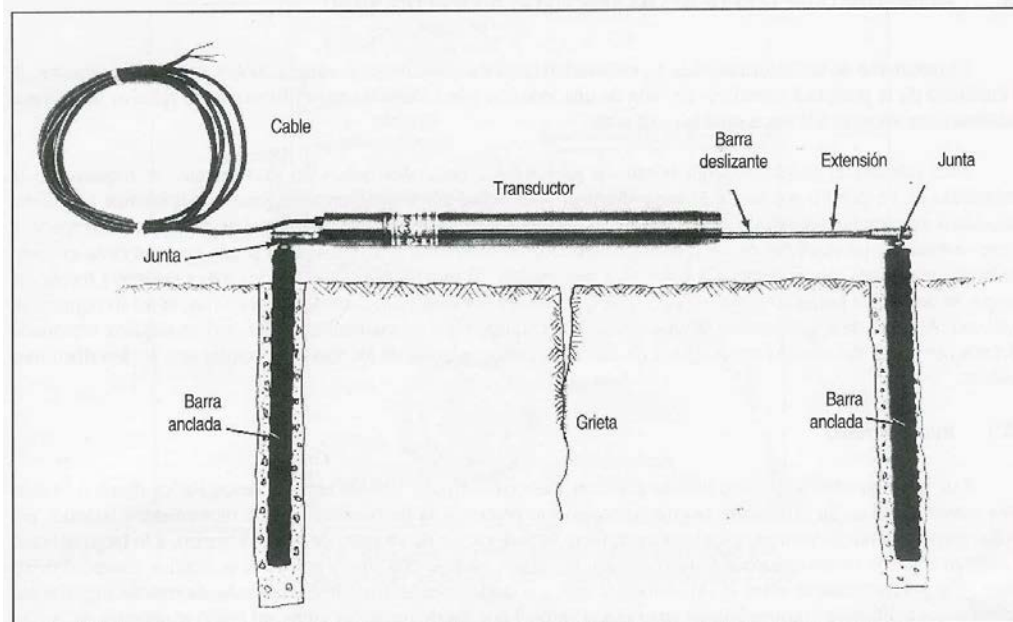


Figura 4.3. Extensómetro eléctrico para el monitoreo de grietas (Dunnicliff, 1993).

Es necesario realizar, en campo, varias mediciones de las propiedades físicas de los materiales para así conocer el estado de una ladera antes y después de la ocurrencia de un proceso de remoción en masa. Algunos ejemplos de técnicas de mediciones *in situ* son:

a) **Sondeo subsuperficial**

Este método consiste en la investigación de las propiedades mecánicas de los materiales subsuperficiales al insertar una barra con alguna punta resistente, para medir resistencia a través de la penetración. Los cambios de resistencia a lo largo de la línea vertical de la superficie del terreno y la diferencia relativa de las propiedades mecánicas a varias profundidades son factores importantes en relación a un potencial proceso de remoción en masa (Hanna, 1985).

Dichos sondeos se clasifican en estáticos o dinámicos de acuerdo con el método usado para insertar la punta de resistencia dentro del terreno. En el tipo estático, la punta es empujada dentro del terreno por medio de un peso estático con pesos de acero o el mismo peso de una persona. Este tipo es usado frecuentemente en terrenos débiles o

blandos. En cambio en un tipo dinámico, la punta es introducida (guiada) dentro del terreno por medio de la fuerza de impacto dejando caer un peso específico a partir de una determinada altura sobre la porción superior de la punta. Este tipo de método es muy útil en terrenos duros y el instrumento más común es el penetrómetro dinámico.

En el caso de los estudios de campo, el método dinámico es el más conveniente en la mayoría de las laderas excepto en aquellas compuestas de materiales muy blandos con alto contenido de agua. En el primer caso, en el estático, la resistencia de los materiales está expresada por una fuerza estática para empujar la punta dentro del terreno bajo una condición constante, mientras que en el dinámico, la resistencia se expresa por la cantidad o número de veces que se deja caer o se golpea a la punta además de una energía constante para penetrar a través de cada profundidad específica y la cantidad de golpes es expresada como un valor N. A partir de estos valores es posible estimar el ángulo de fricción de los materiales del terreno a través de relaciones empíricas derivadas de pruebas de laboratorio. También gracias a este tipo de pruebas de sondeo es posible reconocer la distribución vertical de la resistencia relativa y la superposición de los diferentes materiales (Okuda, 1991).

Un sondeo es un método muy efectivo para estudiar la estructura subsuperficial de las laderas y para estimar la profundidad de la superficie de deslizamiento a partir de la resistencia relativa de los materiales. Sin embargo, es importante destacar que es necesario realizar paralelamente otro tipo de pruebas ya que el sondeo puede llegar a ser limitado debido a que muchas veces no es posible realizar estudios del suelo a gran profundidad por lo cual es necesario aplicar otros métodos.

b) Determinación de la superficie de deslizamiento

Para el estudio a gran escala de un proceso de remoción en masa, ubicar o determinar la superficie de deslizamiento así como su forma es importante ya que esto permite conocer el mecanismo del movimiento, y así predecir la zona de inicio de un nuevo proceso. Cabe destacar que la mayoría de los procesos que presentan superficies de deslizamiento muy profundas pertenecen a procesos muy lentos (Okuda, 1991).

Hutchinson (1982) llevó a cabo una revisión de los principales métodos empleados para determinar la forma y ubicación de la profundidad de la superficie de deslizamiento después de su ocurrencia. Complementariamente, desde el punto de vista de la ingeniería, en el ámbito de la prevención de los procesos de remoción en masa, varios son los tipos de métodos que han sido desarrollados para determinar de forma cuantitativa la estabilidad de las laderas. Una pequeña descripción de algunos de los métodos utilizados internacionalmente para estudios experimentales de procesos de remoción en masa se encuentra en el libro de Zaruba y Mencl (1982).

La determinación de la superficie de deslizamiento debe considerar que cuando una masa de material comienza a moverse de forma muy activa, la forma de un perfil en un pozo de una superficie activa de deslizamiento será transformada por una acción de corte en un corto periodo. La profundidad de la superficie puede ser detectada por la ubicación en los cambios del perfil. Algunas veces la posición cambiante del perfil puede ser observada directamente a través de un haz de luz dentro del hoyo y así medir la profundidad con ayuda de una cinta. Después del ligero corte, se usa un gancho atado en lo más bajo de la cinta de medición para medir la profundidad. Después del corte y completo bloqueo del perfil, la profundidad de la superficie de deslizamiento puede ser medida con tan solo usar una cinta.

Cuando el movimiento de un proceso de remoción en masa es casi imperceptible, la velocidad de corte del perfil es muy pequeña incluso en la superficie del deslizamiento; en este caso el método mencionado anteriormente no puede ser empleado y es necesario usar otro tipo de métodos. Bajo estas circunstancias es posible utilizar una serie de medidores de tensión o esfuerzo ligados a un tubo flexible; esto permite detectar la profundidad de la superficie del deslizamiento y registrar el proceso de corte de forma continua por periodos largos de tiempo (Okuda, 1991).

En un proceso casi sin movimiento, el cambio en un pozo no puede ser detectado con este tipo de métodos. La profundidad de un deslizamiento potencial en un sitio donde ya ocurrió otro proceso puede ser determinada con otro método de exploración geofísica; estos son utilizados de forma exitosa para investigar la distribución vertical de las propiedades físicas y/o químicas de los materiales subterráneos y para ubicar una zona de transición de las propiedades que correspondan a una potencial superficie de deslizamiento (Milton, 1976).

Para las mediciones de las inclinaciones del terreno es común el uso de inclinómetros, los cuales se pueden utilizar prácticamente en cualquier tipo de terreno, ya que su uso permite detectar con precisión la profundidad de los movimientos laterales respecto a un eje vertical. Esta técnica requiere de realizar una perforación en la que se instalan los tubos del inclinómetro, el cual cuenta con guías. Así, al introducir una sonda electrónicamente instrumentada, es posible registrar las inclinaciones a diferentes profundidades en el plano vertical por donde pasan las guías (Wilson y Mikkelsen, 1978).

Por otro lado, el sistema TDR (Time Domain Reflectometry) se caracteriza por ser un dispositivo relativamente nuevo que se usa para monitorear los movimientos laterales a profundidad en las laderas. Su instalación es un poco compleja ya que requiere, al igual que los inclinómetros, de una perforación en el terreno, en la cual se inserta un cable coaxial que se fija a la base de la perforación por medio de un contrapeso, y posteriormente se rellena el pozo con suelo y cemento. Este equipo se utiliza tanto en suelos firmes, como en suelos blandos y permite detectar con precisión la profundidad de los desplazamientos laterales del terreno respecto a un eje vertical.

El principio básico del funcionamiento del sistema TDR es similar al que se puede observar en la figura 4.4. El dispositivo envía un pulso eléctrico a través del cable coaxial. Cuando el pulso encuentra un doblez o una discontinuidad en el cable, la señal es reflejada y graficada en la pantalla del dispositivo. Así en la gráfica se muestra un pico que indica la profundidad de la discontinuidad del cable (Mendoza *et al.*, 2002).

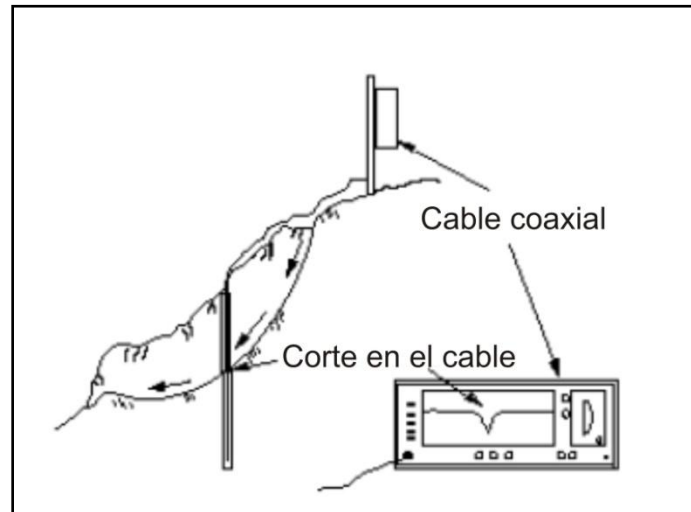


Figura 4.4. Principio de funcionamiento del dispositivo TDR (Kane y Beck, 1999).

La magnitud relativa del movimiento y su velocidad, así como la profundidad de la zona de la discontinuidad, pueden ser determinados de manera precisa con la ayuda de este dispositivo, independientemente de la longitud que presente el cable. Entre sus virtudes destaca la posibilidad que tiene para detectar los movimientos laterales de la potencial superficie de falla en el instante mismo en que se realizan las mediciones en la superficie (Corsini *et al.*, 2005). Además puede implementarse junto con un sistema de comunicación a distancia por lo que es posible realizar mediciones desde sitios remotos o alejados del lugar bajo estudio. Es un dispositivo sencillo que permite la instalación de varios instrumentos en un mismo sitio, y así monitorear todos los equipos desde una caseta en donde concurren los cables.

4.2.2.3 Factores hidrológicos

Los factores hidrológicos son parte muy importante en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, es decir, existe una relación directa, por ejemplo de las lluvias torrenciales o la rápida fusión de la nieve con la inestabilidad de laderas. La distribución y movimiento del flujo subterráneo cerca de la superficie de la ladera también controla fuertemente el comportamiento de un proceso de remoción en masa. Esta situación conlleva a la importancia del estudio y monitoreo continuo de las condiciones hidrológicas en laderas específicas con el objetivo de predecir el inicio de un proceso de ladera y con la finalidad de investigar el movimiento de los materiales. Dichas observaciones son

necesarias para investigar la relación entre factores hidrológicos específicos y el fallamiento de los materiales de una ladera, y así predecir cuantitativamente la ocurrencia de un proceso de remoción en masa.

Uno de los factores hidrológicos más importantes es la precipitación, debido a que aporta de forma directa el agua que posteriormente puede desencadenar un deslizamiento. Por otra parte, el nivel freático del terreno al ser una medida de la respuesta hidrológica de la ladera a la infiltración es un factor también de gran relevancia ya que controla las condiciones hidráulicas que mantiene estable la ladera. En consecuencia, la precipitación, infiltración y nivel freático son elementos directos de observación en estudios experimentales sobre procesos de remoción en masa.

a) Monitoreo de la precipitación

En general, el flujo del agua de lluvia no llega a la superficie de la ladera en forma perpendicular a ésta y la intensidad de la lluvia es dependiente de la dirección que tenga la caída de las gotas, de la dirección de la superficie de la ladera y el flujo absoluto del agua de lluvia (Okuda, 1991).

La precipitación se mide en términos de la altura de la lámina de agua, y se expresa comúnmente en milímetros. Los aparatos de medición se basan en la exposición a la intemperie de un recipiente cilíndrico abierto, en el cual se colecta el agua producto de la lluvia. Estos aparatos se clasifican de acuerdo con la forma en la que registran la precipitación. También es común que se encuentren asociados a estaciones meteorológicas en las cuales se registran otros elementos como temperatura, presión, humedad, etc. (figura 4.5)



Figura4.5. Estación meteorológica tipo Davis
Fuente: www.mountwashington.org

Para obtener datos confiables es necesario ubicar los equipos en lugares abiertos y seguros, de tal forma que no sufran alteraciones o daños. En cuanto al registro, este se puede hacer de dos maneras; la primera involucra el que una persona se encargue de llevar el control de la cantidad de agua que se capta, revisando de forma periódica el nivel del agua en el recipiente; y por el otro lado el registro puede llevarse a cabo con la ayuda de una estación meteorológica automatizada; esta última es la mejor opción si se quieren obtener registros más certeros de la lluvia.

El análisis de los datos de lluvia se hace a través del hietograma el cual es una gráfica que se genera a partir de los datos recabados. Este gráfico muestra cómo varía la lámina de agua de lluvia para cierto intervalo de tiempo; el área bajo el hietograma representa la intensidad de la lluvia. Para crear el hietograma primero es necesario definir el lapso de tiempo para el cual se quiere realizar; posteriormente se calcula para cada intervalo la altura de lluvia registrada en ese lapso como se puede observar en la figura 4.6 (Mendoza *et al.*, 2002).

Para conocer la altura de la precipitación media de una zona en un periodo determinado de tiempo se emplean tres tipos de criterios: el promedio aritmético, el método de Thiessen y el método de las isoyetas.

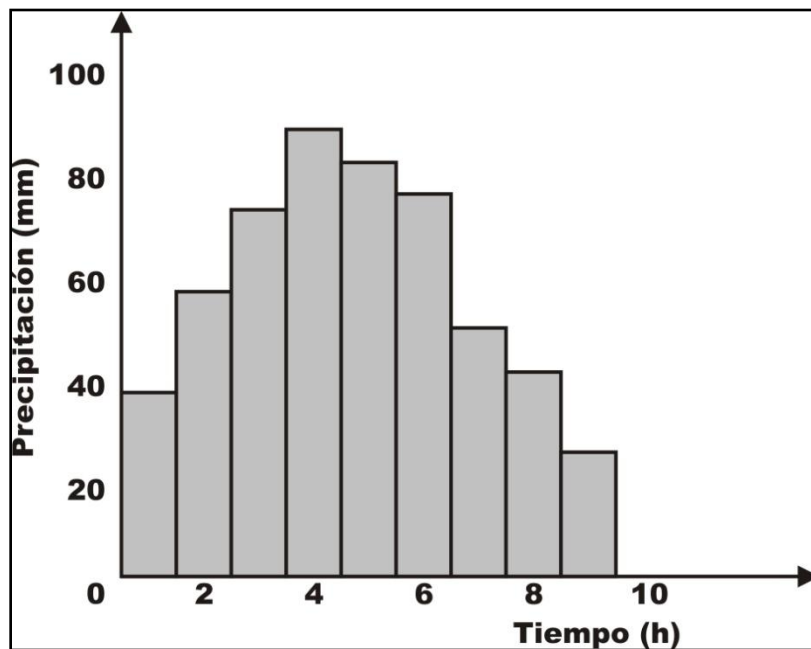


Figura 4.6. Hietograma para lapsos de dos horas

b) Monitoreo de la infiltración

En la mayoría de los procesos de remoción en masa, la infiltración del agua en el terreno, a partir de la lluvia tiene una relación íntima en el inicio del movimiento de un proceso, así que el monitoreo de las mediciones de la velocidad o capacidad de infiltración es uno de los parámetros más importantes dentro de las propiedades físicas de los materiales. La velocidad de infiltración es una medición de la cantidad de agua que se infiltra por unidad de tiempo (usualmente se mide en mm/hora), y la capacidad de infiltración es la cantidad más amplia posible en la que los materiales pueden almacenar el agua de lluvia tan pronto cae sobre el terreno (Okuda, 1991).

La infiltración es un proceso físico complejo que es controlado por la mutua interacción entre las partículas sólidas, el agua y aire dentro de los pequeños poros del suelo. Para la medición *in situ* de la capacidad de infiltración comúnmente se usa un infiltrómetro, el cual suministra agua sobre el terreno bajo ciertas condiciones controladas e infiltra el agua dentro del terreno. El infiltrómetro se puede dividir en tres tipos, de torrente, de flujo y de simulación de lluvia (Okuda, 1991).

El infiltrómetro tipo torrente es el más común, su objetivo es suministrar el agua al terreno a partir de un tanque manteniendo una presión constante sobre una pequeña área dentro de un cilindro circular. Dentro de este tipo de equipos se encuentran también los infiltrómetros de doble anillo (figura 4.7) (Okuda, 1991).

El infiltrómetro de tipo flujo suministra el agua desde el lado superior de un área de prueba y recibe el agua en la parte más baja del área, así la velocidad de descarga del agua del flujo entrante y del flujo saliente es medida. La velocidad de infiltración es calculada a partir de la diferencia de la velocidad de las dos descargas dividida por el área de la ladera que está cubierta con el agua. Este tipo de infiltrómetro es adecuado para medir la velocidad de infiltración en una pendiente o ladera donde la profundidad constante del agua sobre una área de prueba no puede ser sostenida por una superficie horizontal de agua en una estructura cilíndrica de un infiltrómetro de tipo torrente (Okuda, 1991).

El infiltrómetro de simulación de lluvia difiere del de flujo en que este suministra el agua a través de un rociador que simula el proceso de lluvia, y no por medio de un flujo laminar superficial. Por lo tanto, el infiltrómetro puede medir la velocidad de infiltración bajo condiciones más naturales, es decir las gotas de lluvia golpean la superficie del terreno y el flujo superficial es muy delgado. La dificultad que presenta este método es producir gotas de lluvia que se asemejen a la realidad, tanto en tamaño como en velocidad de caída. Este tipo de infiltrómetros es de gran costo y su operación es compleja y no son muy adecuados para realizar trabajo de campo (Okuda, 1991).

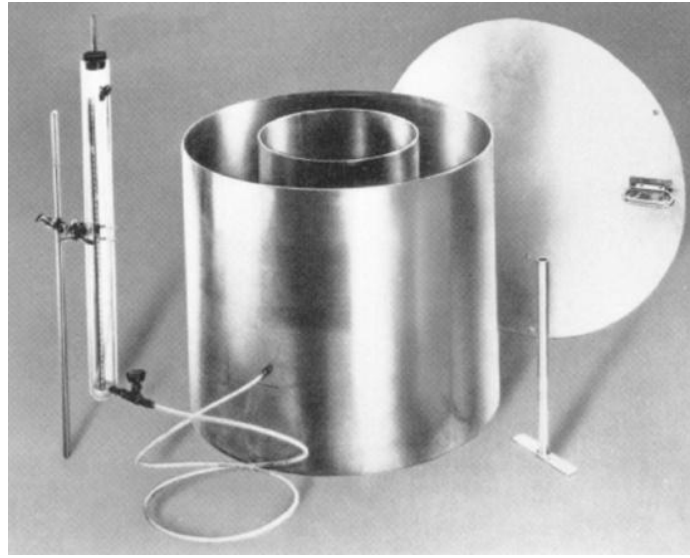


Figura 4.7. Infiltrómetro de doble anillo.
Fuente: www.rickly.com

Por otro lado, hay que recordar que la capacidad de infiltración cambia usualmente de un lugar a otro debido a la variación de las propiedades de los materiales del terreno y es necesario, en el caso de una extensa área, medir la capacidad de infiltración a través de un gran número de pruebas para obtener valores representativos de este parámetro.

c) Monitoreo del nivel freático y la presión del agua en el subsuelo

La observación de los niveles freáticos, así como de la presión del agua en el subsuelo como parte de los estudios experimentales sobre los procesos de remoción en masa requiere de especial atención debido a los súbitos cambios en el nivel de agua bajo condiciones hidrológicas extraordinarias. Estos cambios también se reflejan en las condiciones de los poros de las partículas del suelo, las cuales se ven modificadas sustancialmente durante periodos extraordinarios de lluvia; asimismo, estos cambios modifican una de las propiedades físicas más importantes de los suelos, la cohesión.

La presión del agua sobre las partículas del suelo y la succión son parámetros necesarios en el estudio de la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, por lo que su monitoreo es fundamental para el entendimiento de la inestabilidad.

Para llevar a cabo estas mediciones se emplean diversos instrumentos que permiten el registro continuo del comportamiento del suelo bajo condiciones de humedad, es decir, cuando el agua interactúa con las partículas del suelo. A continuación se detallan las características de dos instrumentos básicos y más usados para la medición de la presión del agua y la succión por parte del suelo: los tensiómetros y los piezómetros.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

Los tensiómetros son instrumentos que permiten la medición del estado de la energía del agua en el suelo. El objetivo principal de los tensiómetros es monitorear el contenido de humedad en el suelo así como el comportamiento de éste en diferentes periodos de saturación. Esta información es necesaria para conocer el momento en el cual el material de una ladera tiende a perder cohesión como resultado de una sobresaturación a consecuencia de las lluvias (Hanna, 1985).

Un tensiómetro consiste de una punta porosa conectada a través de un tubo a un medidor de vacío; todos los componentes se encuentran llenos de agua. La punta porosa comúnmente está hecha de cerámica debido a su resistencia estructural, así como por su permeabilidad. Normalmente el tubo es transparente con el fin de que el agua contenida en éste pueda ser vista con facilidad (figura 4.8).



Figura 4.8. Tensiómetro electrónico
Fuente: www.ictinternational.com.au

Los tensiómetros se deben colocar de forma que la punta porosa este firmemente en contacto con el suelo. Al ser porosa, la punta de cerámica permite que el agua se pueda mover a través de esta, para así dar cierto equilibrio junto con el agua contenida en el suelo. Se crea un vacío parcial en cuanto el agua se desplaza dentro del tubo sellado del tensiómetro. El vacío ocasiona el registro de los cambios por parte del manómetro; este vacío es la indicación directa de la fuerza de atracción entre el agua y las partículas del suelo. Comúnmente, este valor es expresado en unidades de presión, por ejemplo existen equipos que registran los cambios en centibares (Cb).

En el caso de suelos secos o con bajo contenido de humedad, el potencial del agua disminuye y se incrementa el nivel de tensión, este dato es el que registra el manómetro. Al contrario, un incremento en el contenido de agua en el suelo (debido a la lluvia, por

ejemplo) produce una disminución en la tensión y por lo tanto los valores registrados por el manómetro son bajos. De esta manera un tensiómetro permite el monitoreo constante de las fluctuaciones del agua en el suelo (Hanna, 1985).

La calidad de respuesta del tensiómetro, así como el grado de certidumbre de los registros dependerán en gran medida de que no exista la entrada de aire dentro de la columna de agua en el tubo. Las expansiones y contracciones del aire, debido a los cambios en la presión y la temperatura, causan mediciones incorrectas por parte del instrumento, por lo que es importante mantener sellado el tensiómetro. Aunque es importante destacar que el aire también entra al tubo a través de la punta porosa de cerámica, sin embargo el aire puede ser expulsado del tubo por medio de llenar de nuevo el tubo con agua. Otro factor a considerar es que el agua con la cual se debe llenar el tensiómetro debe ser destilada con el fin de evitar en lo posible el mal funcionamiento de los equipos.

El rango espacial de medición de los tensiómetros es pequeño debido a que solo se registra la información cercana a la punta de cerámica, por lo que es importante realizar mediciones tanto de forma horizontal, a lo largo y ancho de la zona de estudio, como de forma vertical, a diferentes profundidades; esto permitirá detectar los cambios de humedad en el suelo (Smajstrla y Harrison, 1998).

Los sitios seleccionados para la instalación de tensiómetros deben ser representativos de las condiciones naturales de la ladera bajo estudio. Es importante descartar zonas que presenten condiciones altas de saturación así como aquellas de sequía extrema.

Una de las ventajas de los tensiómetros es que pueden ser modificados de forma que se mejore de forma sustancial su funcionamiento; esto es posible a través de su automatización, lo que facilita y mejora el registro de los datos, además de que reduce, en mucho, la necesidad de tener que hacer visitas continuas al sitio en estudio.

En la actualidad existe una amplia variedad de tensiómetros electrónicos de gran precisión, cuyo principio de funcionamiento es exactamente igual al descrito con anterioridad. Algunos tienen la virtud de contar con sensores electrónicos que permiten compensar las variaciones de presión por temperatura, obtener lecturas en formato digital, y se pueden interconectar a un sistema de monitoreo a distancia.

Por otro lado, al igual que los tensiómetros, los piezómetros permiten la medición de los cambios de la humedad en el suelo. Generalmente los piezómetros se colocan dentro de un bulbo poroso confinado en la base y en la porción lateral del suelo, y en su parte superior, mediante un sello formado artificialmente. Este método de instalación permite que los piezómetros solo respondan a la presión del agua que se transmite al bulbo poroso en el que se aloja el dispositivo de medición, y no a presiones de agua correspondientes a otras elevaciones (Wilson y Mikkelsen, 1978). La función del sello es

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

impedir la comunicación del dispositivo con el agua que se puede acumular en la perforación realizada para su instalación.

El principio básico de operación de los piezómetros es que un elemento poroso es colocado en el terreno para que la relación suelo-agua sea continuamente monitoreada a través de la cerámica. El agua es colectada dentro del piezómetro y la medición del nivel de la misma dentro de la unidad contenedora determinará la presión de poro por parte del agua en el sitio de ubicación del instrumento (figuras 4.9 y 4.10). Este tipo de equipos es capaz de registrar la presión de poro en suelos completamente o parcialmente saturados (Hanna, 1985).

Existen varios tipos de piezómetros, de entre los que pueden distinguirse tres grupos principales: de tubo abierto, neumáticos y electrónicos.

Los piezómetros de tubo abierto, conocidos también como tipo Casagrande, consisten de un tubo de 1 a 2 pulgadas de diámetro, generalmente de PVC, que pueden presentar una serie de perforaciones o un cilindro poroso de cerámica de 10 cm de longitud (Mendoza *et al.*, 2002).



Figuras 4.9 y 4.10. Representación de la instalación y uso de un piezómetro.
Fuente: biogeo.botanik.uni-greifswald.de y Mendoza *et al.*, 2002.

La altura del nivel de agua dentro del tubo se determina introduciendo en el interior del tubo una sonda eléctrica, cuyas terminales al entrar en contacto con el agua cierran el circuito, de esta forma se genera un salto brusco de la aguja del medidor. Este dispositivo se acompaña de una cinta métrica para medir la profundidad del nivel de agua en el tubo. La altura del nivel de agua, equivalente a la presión que tiene el agua del suelo *in situ* (presión de poro) a la profundidad del bulbo, se determina conociendo la profundidad a la

que se colocó el bulbo durante la instalación. De esta forma, la altura del agua será igual a la diferencia entre la profundidad del bulbo y la profundidad del nivel de agua dentro del tubo (Mendoza *et al.*, 2002).

La principal desventaja de este tipo de equipos es su lenta respuesta a cambios súbitos de presión del agua, debido a la necesidad de que un volumen relativamente alto de agua entre o salga del elemento poroso, a fin de establecer el equilibrio mediante el correspondiente cambio en la altura de la columna de agua dentro del tubo.

Por otro lado, los piezómetros neumáticos permiten obtener una respuesta más rápida a los cambios de presión en el agua. Este tipo de instrumentos requiere de flujos y cambios volumétricos mucho menores. Los piezómetros de este tipo se caracterizan por contar con una delgada lámina o diafragma flexible que recibe la presión del agua provocando su deflexión, y con ello la obturación de los orificios en el lado seco del diafragma. Al aplicar una presión neumática controlada a través de uno de esos orificios, la presión que se requiere para separar el diafragma es justamente la presión en el agua, lo que se observa al detectar cierto flujo de aire de retorno por el otro orificio (Dunnicliff, 1993).

Por su parte, el sensor neumático va acompañado de un elemento poroso que está alojado a una profundidad deseada, de manera similar a lo mencionado anteriormente para los piezómetros de tubo abierto. El sensor es conectado al sistema neumático de medición que se mantiene en la superficie del terreno mediante mangueras de plástico a través de las que se conduce aire a presión.

Por último, los piezómetros eléctricos presentan cierta similitud con los neumáticos, solo que su diafragma es menos flexible, lo que se traduce en una mayor respuesta a los cambios de presión en el agua. En el caso de estos equipos las deformaciones del diafragma actúan como el elemento de medición. Para ello se colocan medidores de tensión al diafragma, así las deformaciones del diafragma están proporcionalmente relacionadas con los cambios de la presión que ejerce el agua sobre el diafragma, lo que se conoce a través de una calibración (Mendoza *et al.*, 2002).

La señal de los medidores de tensión se transmite a un equipo portátil de medición de microdeformaciones; esta señal se puede observar de forma digital a través de una pantalla. Cabe mencionar que la señal de estos sensores puede ser monitoreada por medio de un sistema automático de adquisición de datos, enviando incluso a distancia a la señal. Al igual que todos los piezómetros, los sensores electrónicos se colocan en el fondo de una perforación previamente realizada en el terreno. Un cable eléctrico con los conductores necesarios de excitación y respuesta es conducido hasta la superficie, donde se conecta a la unidad portátil de registro (Mendoza *et al.*, 2002).

4.2.2.4 Estudios de gabinete, laboratorio, modelación y simulación

El trabajo de gabinete que se realiza en muchos estudios de procesos de remoción en masa se clasifica en cuatro tipos: cartografía, pruebas geotécnicas, modelación y simulación. Actualmente equipos de gran utilidad, incluyendo computadoras, están siendo empleados para estudios en laboratorio de problemas geocientíficos y geotécnicos y el mejor método debe ser seleccionado cuidadosamente tomando el carácter especial de cada método dentro de la consideración o elección. La mayoría de los trabajos tienen resultados exitosos en el estudio de laboratorio. En este apartado se mencionará sólo a las pruebas geotécnicas, la modelación y la simulación.

a) Pruebas geotécnicas

Diversos geomorfólogos han realizado pruebas geotécnicas de laboratorio para llevar a cabo sus estudios de procesos de remoción en masa. El objetivo común de estas pruebas es determinar las propiedades físicas del suelo a partir de examinar muestras previamente recolectadas en campo. Los resultados obtenidos, por lo general, son empleados dentro de modelos para determinar condiciones de estabilidad de las laderas, así como llevar a cabo modelaciones que permitan comprender el comportamiento temporal de una ladera y determinar qué factor es el de mayor influencia en la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Una de las propiedades más importantes en relación a la causa de los procesos de remoción en masa es la resistencia al corte que impide el movimiento ladera abajo de los materiales. A través de pruebas de laboratorio, aplicadas a materiales muestreados, es posible determinar directamente la resistencia, expresada esta por el ángulo de fricción interna (Φ) y la cohesión (θ), sin embargo es necesario mantener especial cuidado para mantener las muestras bajo condiciones lo más cercanas posible a la realidad a pesar de que las muestras serán modificadas debido a la extracción así como debido al remoldeo necesario para las pruebas.

Existen dos métodos comúnmente usados para realizar pruebas de laboratorio (el método directo y la prueba triaxial) y tres tipos de procedimientos son adoptados de acuerdo a las condiciones de drenaje y consolidación (las pruebas sin drenar no consolidado, sin drenar consolidado y drenado consolidado). Se debe seleccionar el método más adecuado para simular el fenómeno de falla bajo las condiciones más aproximadas a la realidad (Okuda, 1991).

Además de las pruebas de resistencia de los materiales, también se realizan pruebas de permeabilidad de los materiales para investigar la infiltración vertical del agua dentro del terreno o del flujo de agua en el subsuelo paralelo a la pendiente a través de una capa permeable. Esto es debido a que la distribución del agua en el terreno y especialmente de su presión de poro es determinado por el movimiento del agua que tiene una relación directa con el inicio de un proceso de remoción en masa.

b) Modelación y simulación

Un modelo teórico basado en los resultados de campo y en las pruebas de laboratorio, y la simulación numérica de varios procesos geomorfológicos, usando valores como parámetros en el modelo aplicado, constituyen el procedimiento estándar en las modernas geociencias. Algunas veces un modelo teórico ha sido construido por medio de la deducción, y la aplicación del modelo al fenómeno real es verificada a través de pruebas en campo y en laboratorio. Un objetivo de los modelos teóricos puede ser un simple proceso o una síntesis de múltiples procesos que producen cambios topográficos (Okuda, 1991).

El creciente avance de la computación y la informática ha permitido el desarrollo del análisis de la estabilidad de laderas bajo condiciones aun más complejas. Por ejemplo, las grietas en las laderas pueden ser simuladas numéricamente, esto con base en la estimación o realización de pruebas de campo y laboratorio.

4.3 Sistemas de monitoreo y alertamiento automatizados

Para conocer el estado de estabilidad que guarda una ladera es necesario una técnica básica como la inspección directa; el objetivo es detectar en una etapa temprana cualquier síntoma que refleje algún problema de inestabilidad. A partir de la inspección pueden distinguirse laderas que por su alta probabilidad de inestabilidad y por las implicaciones que pudiera causar sobre la población es necesario adaptar un sistema semiautomático o automático para su monitoreo.

El actual desarrollo en el campo de la tecnología permite no sólo la medición de las variables con las que se caracteriza a la inestabilidad, sino de hacerlo de forma automática e incluso transmitir esos datos a sitios remotos. Los sistemas avanzados de monitoreo están bajo desarrollo o en uso en algunos países, en los que los datos son procesados para predecir la ocurrencia de una falla, y están ligados a un sistema de alarma o sistema precautorio (Angeli *et al.*, 2000; Chen y Lee, 2004). Dichos sistemas automatizados tienen la capacidad de registrar y procesar de manera selectiva los datos. La certidumbre y confianza de estos sistemas reside, sin embargo, en la precisión de la predicción de falla o no, lo que exige estudios adicionales y el mejoramiento en las técnicas de toma de decisiones bajo diversas condiciones.

El monitoreo primario se hace por lo general a través de la medición de los movimientos de la superficie por medio de extensómetros, mientras que los cambios de la profundidad de la superficie de deslizamiento mediante inclinómetros. Asimismo, antes de elegir la instrumentación necesaria, es importante tomar en cuenta la posibilidad de recurrir a mediciones topográficas, que permiten determinar el tamaño y etapa del movimiento de los materiales.

Los resultados del monitoreo se utilizan para la evaluación del grado de avance del movimiento masivo. En general, los procesos de remoción en masa presentan varias fases. Durante la etapa temprana se distingue una acumulación de movimiento; en la etapa secundaria es posible observar la aparición de grietas y movimiento constante, y en la etapa final la expansión de grietas conduce a la falla. Las medidas que se deben tomar en cada una de estos momentos son también diferentes; de realizar un monitoreo constante durante la etapa temprana, a cerrar el acceso a la zona, y a ordenar la evacuación de la población en la etapa final (Mendoza *et al.*, 2002).

4.3.1 Sistemas automáticos de monitoreo

Los sistemas con cierto grado de automatización pueden clasificarse como semiautomáticos, en donde los datos de los sensores o transductores se colectan y almacenan en sistemas de adquisición de datos automáticamente, ya sea en el sitio o cerca de este, y se obtiene su información mediante el uso de computadoras portátiles; el análisis de los datos es realizado posteriormente por otro sistema; y totalmente automáticos, los cuales integran un sistema en línea, conectando los sensores con computadoras en una oficina o centro de control; esta transmisión a distancia se lleva a cabo a través de cable, teléfono, radio, internet, etc. (figura 4.11) (Mendoza *et al.*, 2002).

a) Sistemas semiautomáticos

Este tipo de sistemas se adopta en los casos en los cuales el análisis constante de los datos no siempre es necesario o posible, y dependerá en gran parte de la frecuencia de las mediciones o la estabilidad de la ladera. La mayoría de los transductores o sensores de registro tienen la capacidad de integrarse a un sistema automático de monitoreo, aunque es necesario que estos sean eléctricos para poder ser automatizados.

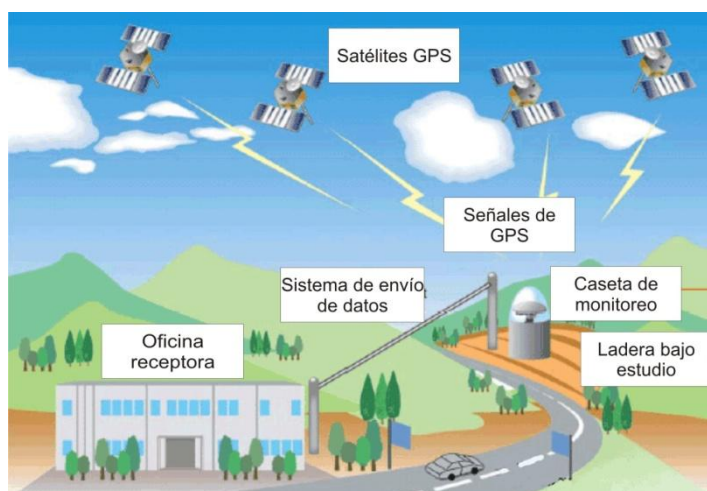


Figura 4.11. Representación de un sistema automático de monitoreo.

Fuente: www.its.go.jp

b) Sistemas automáticos

Con los sistemas automáticos es posible reconocer el estado del movimiento masivo durante una emergencia, a través del monitoreo de manera segura y a distancia, lo que permite el ahorro de tiempo y recursos; el primer punto a tomar en cuenta, antes de llevar la creación de un sistema automatizado, es que su costo inicial es alto debido a que se tiene que agregar un sistema de transmisión que incluya módems y líneas telefónicas; o bien, radio transmisores y receptores, antena, etc. Este sistema está compuesto básicamente de sensores eléctricos, un sistema de comunicación entre los diferentes equipos y una caseta de control, así como otro enlace entre la caseta, encargada del monitoreo, y una oficina o centro de observación en donde se llevará a cabo el posterior análisis de los datos obtenidos. En la figura 4.12 se muestra el esquema de un sistema automático de monitoreo adoptado en Japón (Mendoza *et al.*, 2002).

Una guía técnica para llevar a cabo el monitoreo de laderas inestables se realizó en Francia (Durville, 1993), en la que se describe el procedimiento general a seguir para establecer un sistema de monitoreo de fenómenos que van desde flujos hasta deslizamientos (figura 4.13). Esta guía técnica establece como el objetivo principal el predecir la ocurrencia del fenómeno con la mayor anticipación posible, con la firme intención de que se adopten las medidas necesarias para reducir los riesgos; para ello también reconoce que el nivel de seguridad alcanzado depende de la confiabilidad y certeza del sistema de monitoreo.

En Estados Unidos, por ejemplo, se realiza el monitoreo en tiempo real de un gran número de procesos de remoción en masa. De esta manera, para disminuir la probabilidad de que las laderas se colapsen, el USGS (United States Geological Survey, por sus siglas en inglés), en cooperación con otras agencias, ha actuado para proveer el monitoreo continuo en tiempo real, para lo cual recurre a sistemas desarrollados para el monitoreo de volcanes en áreas remotas o distantes (figura 4.14) (Mendoza *et al.*, 2002). En el caso de México, el constante monitoreo del volcán Popocatepetl, ha permitido el aprendizaje y conocimiento de técnicas que sin duda podrían ser aplicadas para llevar a cabo el monitoreo de laderas.

Los datos que son registrados por los sensores de la USGS son transmitidos por radio a diversas computadoras. La detección inmediata de la inestabilidad, proporcionada por los sistemas en tiempo real, puede ser crucial para prevenir a la población y así salvar vidas y proteger la propiedad. Este tipo de trabajos tiene una ventaja sobre el trabajo de campo, ya que las observaciones en campo difícilmente pueden detectar los cambios del terreno al momento en que suceden, aun cuando su monitoreo sea constante. Esta información puede ser consultada por la población a través de la página <http://landslides.usgs.gov/hwy50>.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

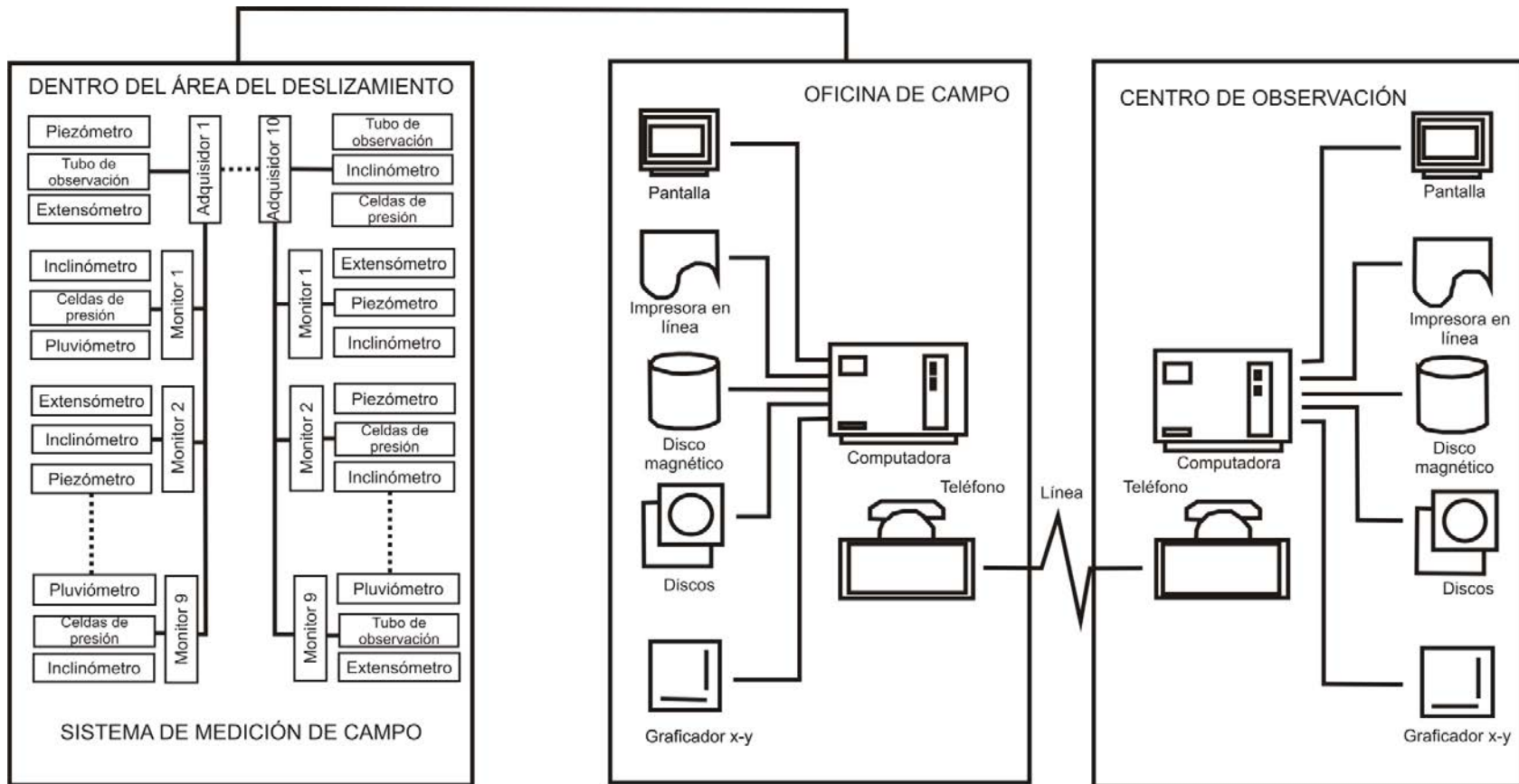


Figura 4.12. Sistema de monitoreo de laderas de Japón (Mendoza *et al.*, 2002)

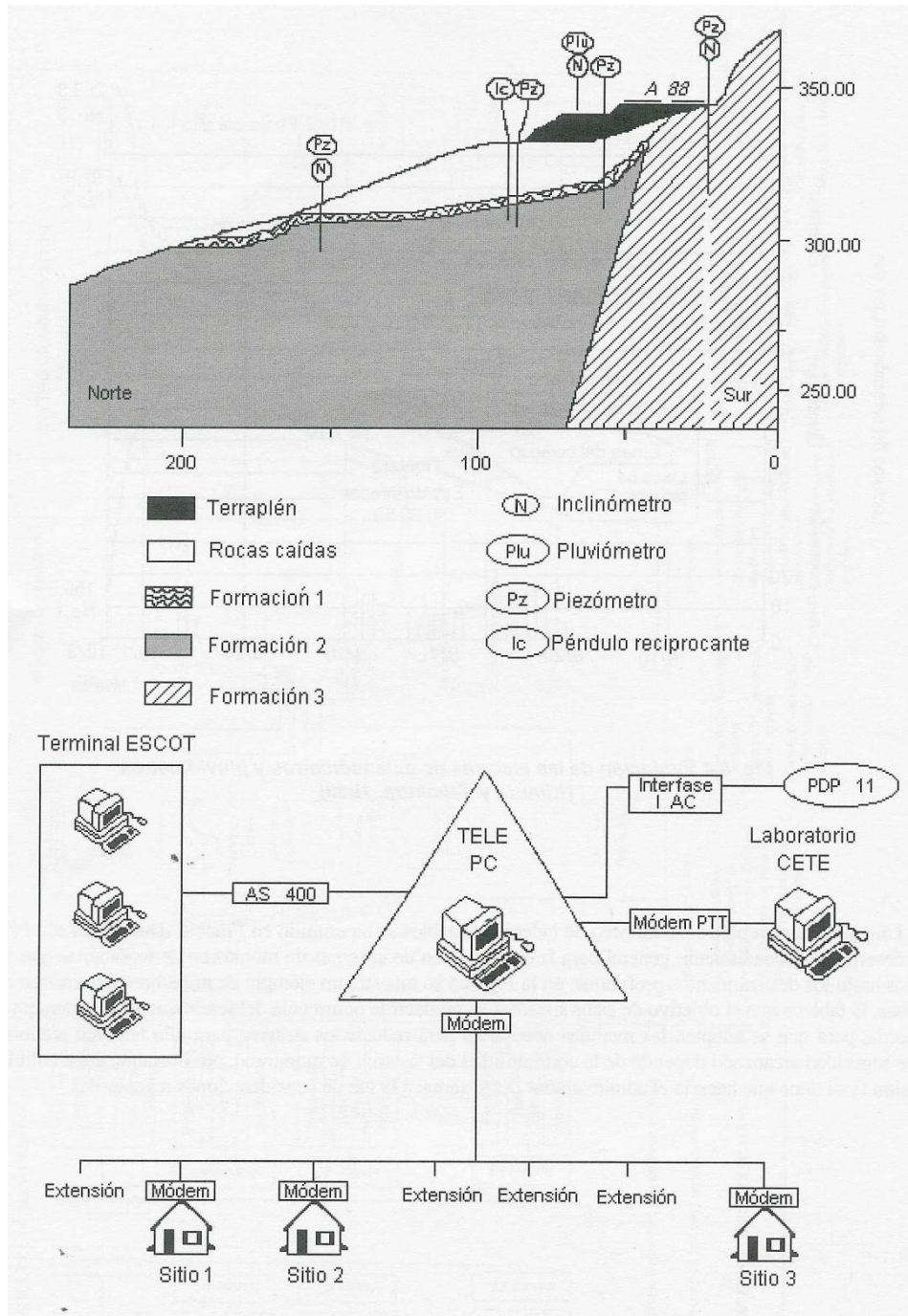


Figura 4.13. Sistema de monitoreo de laderas en Francia (Durville, 1993).

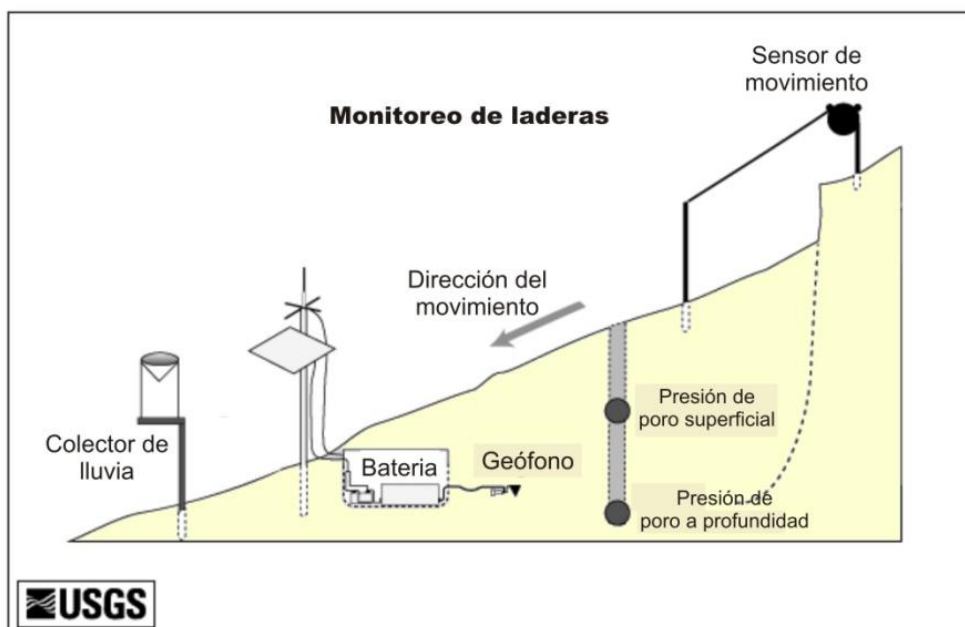


Figura 4.14. Representación del monitoreo realizado por la USGS.

Fuente: www.calstatela.edu

4.4. Consideraciones finales

Las técnicas y equipos de instrumentación y monitoreo son diversas, y su aplicación dependerá en gran medida de los objetivos establecidos y de los datos requeridos para el estudio de la inestabilidad de laderas. Paralelamente, el grado de complejidad del estudio a realizar determinará el tipo y costo de los equipos de medición. Hay que destacar que antes de proceder a realizar la instrumentación y monitoreo de una ladera, es necesario determinar los objetivos que se desean alcanzar, ya que estos son base primordial para la elaboración de una estrategia adecuada y exitosa. En este sentido, la selección de los instrumentos es fundamental, así como su posterior calibración; éste último, proceso imprescindible para el funcionamiento apropiado de los equipos instalados.

Por otro lado, es de gran relevancia tomar en cuenta las medidas de seguridad necesarias para evitar la pérdida del equipo, ya sea por daños o robo. Es primordial proteger el área de estudio, y solicitar el apoyo de las autoridades locales y de la población, y así poder evitar en lo posible pérdidas materiales, económicas y de tiempo.

Cabe señalar que de ser posible en términos económicos, la automatización de los sistemas de monitoreo de laderas ofrecen grandes ventajas en la adquisición y continuidad de la información deseada. Dichos sistemas han sido aplicados en diversas partes del mundo con la finalidad de proporcionar información a la población en tiempo real. Esto último es clara expresión del aporte al campo de la prevención de desastres.

CAPITULO 5 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DE LA LADERA EXPERIMENTAL (METODOLOGÍA)

5.1 Introducción

El objetivo principal de la investigación, descrito en la introducción, es establecer una estrategia básica de instrumentación y llevar a cabo una modelación de la dinámica hidrológica del suelo para determinar el grado de inestabilidad de una ladera experimental. Asimismo la importancia de la investigación recae en el análisis de la precipitación como factor desencadenante de los procesos de remoción en masa.

La metodología empleada para entender la influencia de la precipitación en la ocurrencia de los procesos, a partir del uso de un modelo hidrológico, se resume de la siguiente manera:

1. Selección y delimitación de la ladera a estudiar.
2. Establecimiento de una estación meteorológica con el objetivo principal de realizar el registro de la precipitación diaria de la zona.
3. Levantamiento topográfico a detalle.
4. Pruebas *in situ* de las propiedades de los materiales.
5. Extracción de muestras para un posterior análisis en laboratorio.
6. Instalación de tensiómetros semiautomáticos.
7. Automatización posterior de los tensiómetros.
8. Modelación de la dinámica hidrológica a partir de los parámetros anteriormente registrados (capítulo 6).

5.2 Características de la ladera experimental

NOTA:

Es preciso mencionar que el objetivo inicial de esta investigación era realizar el proceso de instrumentación y monitoreo en dos laderas ubicadas en la localidad de La Unión; una de ellas caracterizada por no contar con vegetación natural y la otra, de manera contrastante, cubierta de vegetación. Esta idea evidentemente con la finalidad de establecer un análisis comparativo. Sin embargo, lo anterior no pudo llevarse a cabo debido a que a pesar de haber instalado el equipo de igual forma en ambas laderas, como resultado –muy probablemente– de una falla técnica en la batería que suministraba la energía a los instrumentos en la ladera sin vegetación (ladera inestable), el equipo instalado se dañó y no fue posible recuperar registro alguno. Consecuentemente, los análisis presentados en este trabajo se refieren única y exclusivamente a la ladera con vegetación, es decir, aquella en la que la funcionalidad del equipo sigue vigente.

La selección del sitio de estudio fue la parte inicial para realizar la modelación de la inestabilidad de una ladera. Esta ladera debía contar con ciertas características que permitieran llevar a cabo el análisis y que se ubicara en una zona sujeta a condiciones de inestabilidad. Como se mencionó con anterioridad la localidad de La Unión, es uno de los poblados dentro del municipio de Tlatlauquitepec, que cada año es afectado por la ocurrencia de procesos de remoción en masa, principalmente en áreas deforestadas y cercanas a la carretera y caminos de terracería. Asimismo, la zona está sujeta a constantes aportes de humedad por parte de la niebla que asciende de las zonas de baja altitud.

La frecuente ocurrencia de diversos procesos de remoción en masa, en particular durante la época de lluvias, en el municipio de Tlatlauquitepec y en especial en la localidad de La Unión fue el aspecto fundamental que se tomó en cuenta para establecer la ladera experimental (figura 5.1). Otro punto importante a destacar es el creciente aumento en el cambio del uso del suelo, asociado a la intensa deforestación. Finalmente también se debe destacar que ha sido relevante contar con el resultado de otras investigaciones previas y paralelas realizadas en el área en estudio.

Es importante mencionar que el apoyo de las autoridades municipales también fue un punto importante en el desarrollo de esta investigación, ya que gracias a ellas fue posible obtener la ayuda de la población para la selección y delimitación de la ladera adecuada para la instrumentación y monitoreo.

La ladera se localiza en un sitio en el cual las actividades antrópicas, tales como la agricultura, son prácticamente nulas, punto importante en este estudio, ya que era necesario obtener información precisa de las propiedades y el comportamiento de una ladera que no estuviera bajo la influencia de la dinámica de la población local. Además la ladera se ubica en una porción del terreno que cuenta con la presencia de una capa de vegetación que mantiene el equilibrio natural del sitio para así poder obtener información certera de la zona de estudio. La idea primordial fue que las características del sitio no estuvieran perturbadas por algún agente externo, en este caso la población y sus actividades.

Una vez elegido el sitio de estudio, el siguiente paso fue delimitar una parcela y así poder extraer la información necesaria para el posterior análisis y modelación. Esto se llevo a cabo a partir de la delimitación con una malla protectora buscando eliminar o minimizar cualquier posibilidad de que la ladera fuera alterada en sus condiciones naturales, así como también para resguardar los instrumentos o equipos instalados posteriormente. El área aproximada de la parcela es de 400 m², 20 m por lado, y la pendiente del terreno es de 30°. Asimismo se ubica sobre materiales sedimentarios (limonita-arenisca del Jurásico Medio), su orientación es NO-SE y se localiza a más de 130 m de la carretera que conecta a la cabecera municipal con la localidad de Mazatepec. Cabe recordar que el sitio en estudio se ubica en una zona con características climáticas necesarias para el análisis,

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

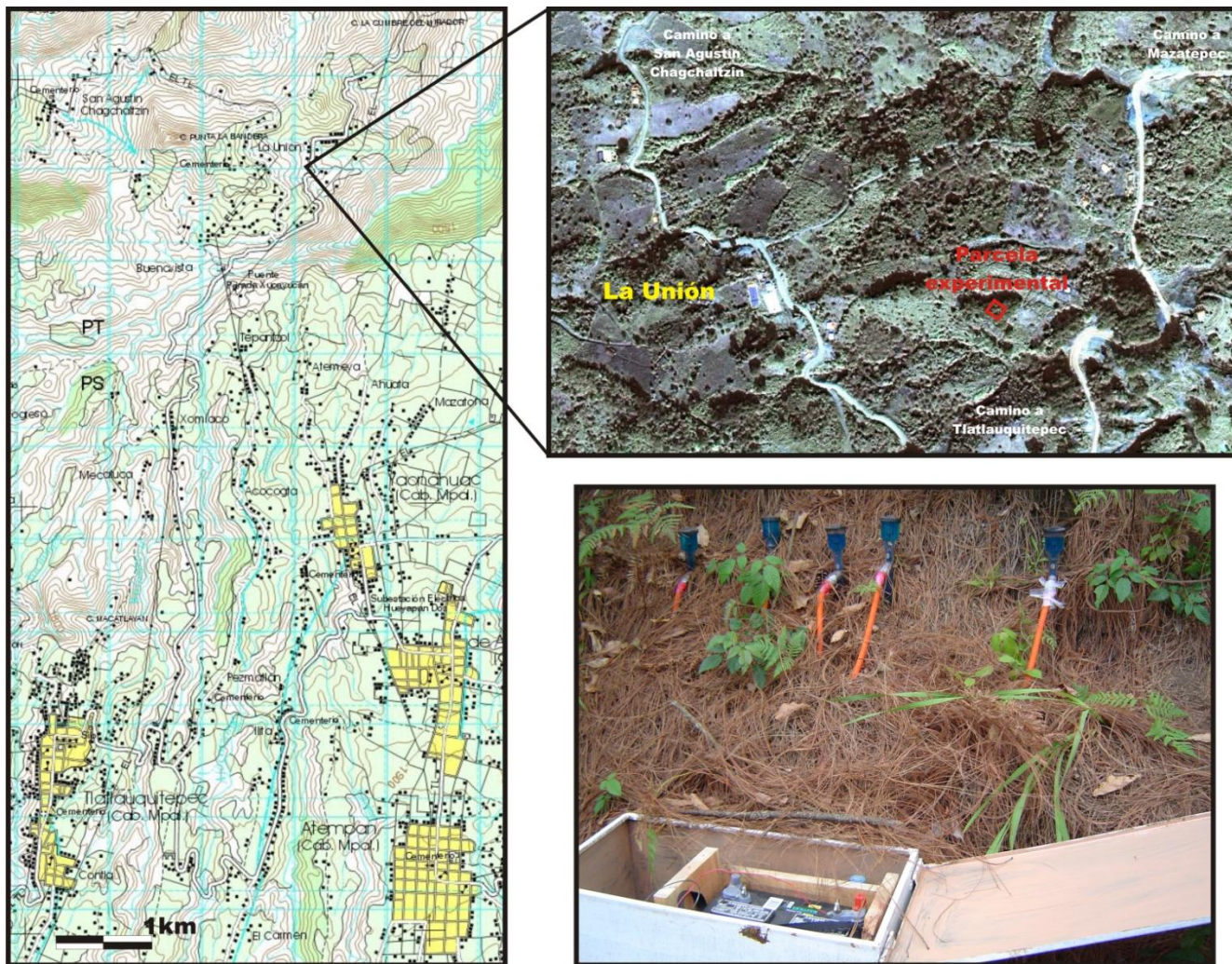


Figura 5.1. Localización de la ladera en estudio (INEGI, 2001 e imagen IKONOS del año 2000).

Fotografía del autor.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

es decir, se localiza en un área donde la intensa precipitación estacional juega un papel importante en la ocurrencia de procesos de remoción en masa, punto importante en el desarrollo de esta investigación. Por último, la vegetación de la parcela experimental está representada por la presencia de pinos, pequeños arbustos y helechos; el sitio en estudio se ubica en la transición del bosque mesófilo con el bosque de pinos (figuras 5.2 y 5.3).



Figuras 5.2 y 5.3. Fotografías de la parcela experimental (fotografías del autor).

5.3 Instalación de la estación meteorológica

En cuanto se determinó el sitio de estudio se procedió a la instalación de una estación meteorológica en una escuela primaria ubicada a una distancia de 400m, aproximadamente, de la ladera experimental. El objetivo primordial de la estación fue llevar a cabo el registro diario de la información de precipitación de la zona, datos necesarios para la posterior modelación (figuras 5.4 y 5.5).

La estación meteorológica instalada en la localidad de La Unión en el mes de noviembre del año 2004, es una estación meteorológica Vantage Pro Davis. La adquisición de la estación forma parte del proyecto PAPIIT IN310002 “Efectos espacio-temporales de la deforestación en la inestabilidad de laderas: un enfoque de prevención de desastres”.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.



Figura 5.4. Pantalla de registro de la estación meteorológica (fotografía del autor).



Figura 5.5. Localización de la estación meteorológica (fotografía del autor).

El periodo de registro de los datos de lluvia comprende a partir del mes de noviembre del año 2004 hasta el mes de marzo del año 2007. La precipitación durante este periodo se presenta en la figura 5.6. Cabe destacar que no se pretende establecer estos datos como la media anual de la localidad, puesto que los datos registrados sólo corresponden a un periodo corto de tiempo. Sin embargo es importante acotar que la información obtenida es actual y de gran precisión, así como necesaria para corroborar las estimaciones del régimen pluvial local a través de los datos históricos registrados en las estaciones más próximas a la zona.

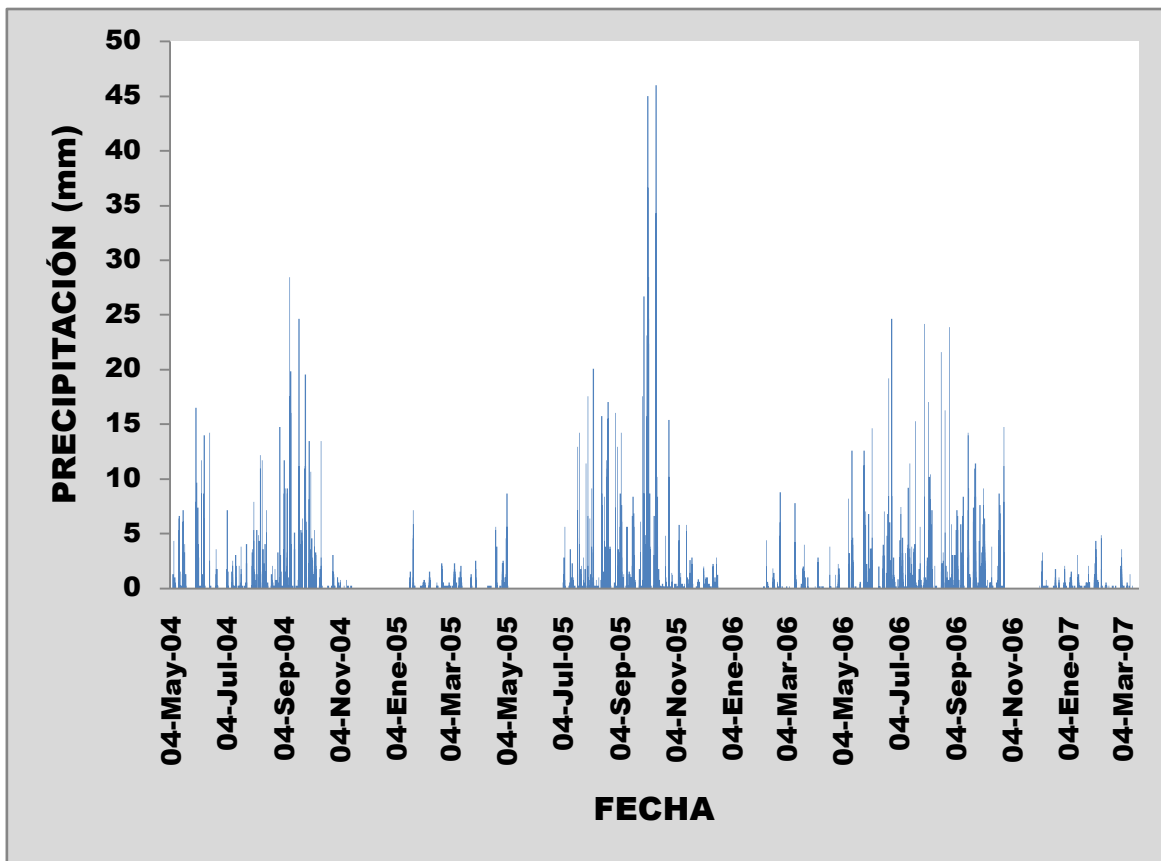


Figura 5.6. Registro diario de la precipitación en la localidad de La Unión.

En la figura de precipitación de la localidad es posible observar la existencia de un par de periodos de precipitación durante un año, el primer periodo se caracteriza por ser una temporada seca que se extiende de los meses de noviembre a abril y por otro lado la época húmeda, que cubre el periodo de mayo a octubre, particularmente a partir de la segunda mitad del mes de septiembre hasta la primera quincena de octubre, periodo en el que las lluvias presentan su mayor aporte de agua a la zona. Ejemplos muy claros de esta situación fueron los periodos de lluvias intensas ocurridas en los años de 1999 y 2005, las cuales estuvieron asociadas a la ocurrencia de procesos de remoción en masa en el municipio de Tlatlauquitepec.

5.4 Levantamiento topográfico a detalle

Como se ha mencionado con anterioridad el levantamiento topográfico es una parte importante dentro de los estudios de estabilidad de laderas, ya que permite determinar los cambios superficiales del terreno a causa de los movimientos de los materiales que conforman a las laderas. Este tipo de herramienta, además, es esencial en los estudios realizados con base en la modelación, debido a que a partir de ellos es posible simular las

condiciones hidrológicas con una mayor precisión con base en la geometría de la ladera, así como la profundidad de las capas de suelo.

El objetivo primordial del levantamiento topográfico fue contar con los datos necesarios para la creación de un modelo digital de elevación de la parcela experimental. Dicho modelo se elaboró con una resolución espacial de 10 cm. Con esta información se obtuvieron perfiles de la parcela, así como curvas de nivel, modelos tridimensionales y pendientes con un alto grado de certidumbre.

Debido a las características de la ladera, como alta presencia de vegetación y una pendiente alta, fue necesario realizar el levantamiento topográfico con la ayuda de un GPS Trimble. Dicho levantamiento consistió en el registro de las coordenadas X, Y y Z de la mayor cantidad de puntos posibles, con el objeto de poder tener una mayor precisión de la topografía de la ladera (figura 5.7).

Una vez recabados los puntos necesarios, se procedió a la creación del modelo digital de elevación (MDE). El proceso consistió en el uso de Sistemas de Información Geográfica, básicamente ILWIS y Surfer, para procesar los datos generados. El proceso consistió de la interpolación (kriging) de los valores de altitud de los puntos registrados para la creación de una imagen raster preliminar. La interpolación de los puntos se llevó a cabo a través del programa ILWIS, por medio del método de kriging (figura 5.8). El siguiente paso fue crear un mapa de puntos, el cual fue exportado al programa Surfer para crear un nuevo grid, y así poder observar la ladera en perspectiva y no en plano, como en ILWIS (figura 5.9). Debido a la resolución del modelo digital fue posible detectar los diferentes cambios de pendiente de la ladera. Asimismo el modelo digital de elevación fue empleado posteriormente para llevar a cabo la modelación con la ayuda del programa PCRaster.

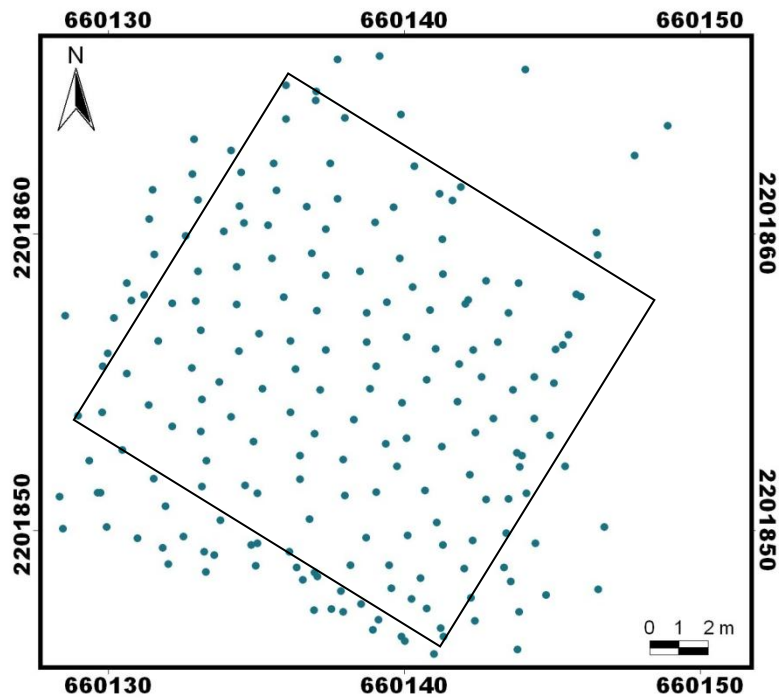


Figura 5.7. Puntos registrados durante el levantamiento topográfico de la ladera en estudio.

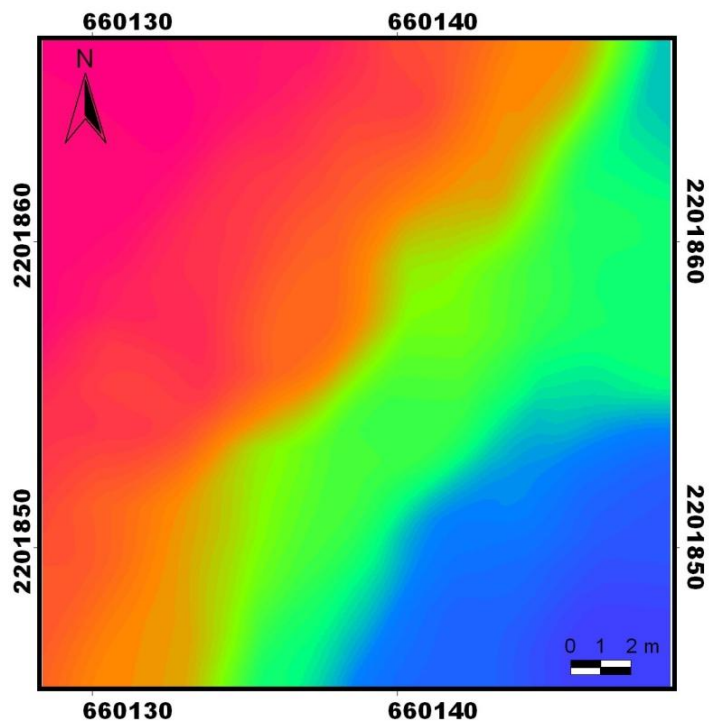


Figura 5.8. Modelo digital de elevación de la ladera creado en el programa ILWIS.

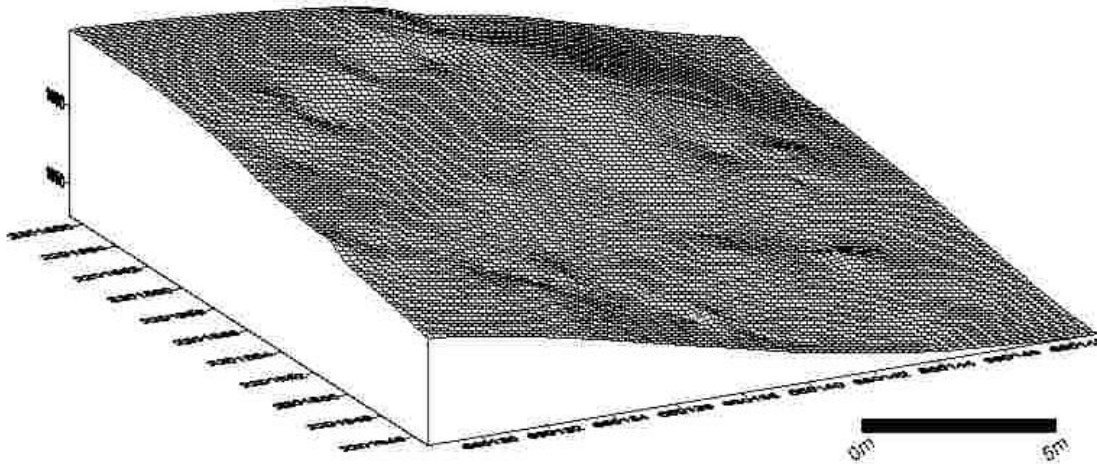


Figura 5.9. El modelo tridimensional de la ladera en estudio elaborado en el programa Surfer.

5.5 Pruebas *in situ* de las propiedades de los materiales

Las pruebas *in situ*, como se mencionó anteriormente, permiten determinar las características de las propiedades de los materiales que componen al terreno, y sirven también como punto de comparación para corroborar los datos obtenidos en laboratorio. La realización de las pruebas *in situ* depende de los objetivos de la investigación. En este caso el objetivo primordial fue determinar dos aspectos muy importantes dentro de las propiedades físicas de los materiales para así poder establecer un estudio de estabilidad más preciso. Las pruebas que se realizaron permitieron conocer la conductividad hidráulica y la resistencia de los materiales. Los datos obtenidos de ambas pruebas fueron empleados posteriormente en la modelación de la estabilidad de la ladera.

a) Conductividad hidráulica

Tres de los factores que controlan la transmisión del agua en los suelos son la conductividad hidráulica, la matriz de flujo potencial y la absorción representada ésta por la infiltración, sin embargo la conductividad hidráulica es el factor que presenta mayor relevancia dentro de los estudios de estabilidad de laderas. De igual forma, es un parámetro necesario para modelar la dinámica de los suelos y su influencia directa en la estabilidad.

La conductividad hidráulica se define como la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico, es decir, es el índice de infiltración del agua a través del suelo por medio de sus poros. Dicha relación se expresa comúnmente en cm/seg o mm/seg. De esta manera se deduce que la velocidad del flujo es directamente proporcional a la conductividad hidráulica y al gradiente hidráulico; en resumen a mayor valor de conductividad, mayor será la velocidad de infiltración. (Reynolds y Elrick, 1991).

De manera general la velocidad con que circula el agua a través del suelo es proporcional a una potencia del gradiente hidráulico, multiplicada por una constante de proporcionalidad denominada conductividad hidráulica. Dicho proceso representa la mayor o menor facilidad con la cual el suelo deja pasar el agua por unidad de área transversal a la dirección del flujo. Asimismo, la constante es la característica determinante de la impermeabilidad del material, ya que permite definir el flujo de líquidos a través de las arcillas (Schoeneberger y Amoozegar, 1990).

La conductividad hidráulica (k_{sat}) depende en gran parte de tres factores principales: la granulometría, la estructura de la matriz y la porosidad (tabla 5.1 y figura 5.10).

Material	Rango de conductividad hidráulica (k_{sat})
Arcillas	$10^{-9} - 10^{-6}$
Sedimentos arenosos, arcillas arenosas, cultivos	$10^{-6} - 10^{-4}$
Arenas finas	$10^{-5} - 10^{-3}$
Arenas bien clasificadas	$10^{-3} - 10^{-1}$
Gravas bien clasificadas	$10^{-2} - 1$

Tabla 5.1. Rangos promedio de conductividad hidráulica (Shin-Yu y Yen-Jing, 2002).

La determinación de los parámetros hidráulicos del suelo puede presentar dificultades, sin embargo, son de gran utilidad para entender el comportamiento del agua en el suelo, en este caso la conductividad, la cual se puede obtener directamente a través de pruebas de campo. Para estas pruebas existen diversos aparatos que varían en costo, precisión y grado de complejidad (Reynolds y Elrick, 1985).

De manera similar, es posible realizar pruebas en laboratorio para determinar el valor de **K_{sat}** . La realización de estas pruebas requiere de un manejo cuidadoso del material con el fin de evitar la alteración de las propiedades de suelo. Cabe mencionar que este método permite la obtención de valores aproximados, por lo que lo más recomendable es efectuar también pruebas *in situ* que permitan comparar los resultados. La realización de pruebas en campo permite obtener valores con mayor precisión, aunque evidentemente se deben tomar en cuenta las características del equipo empleado.

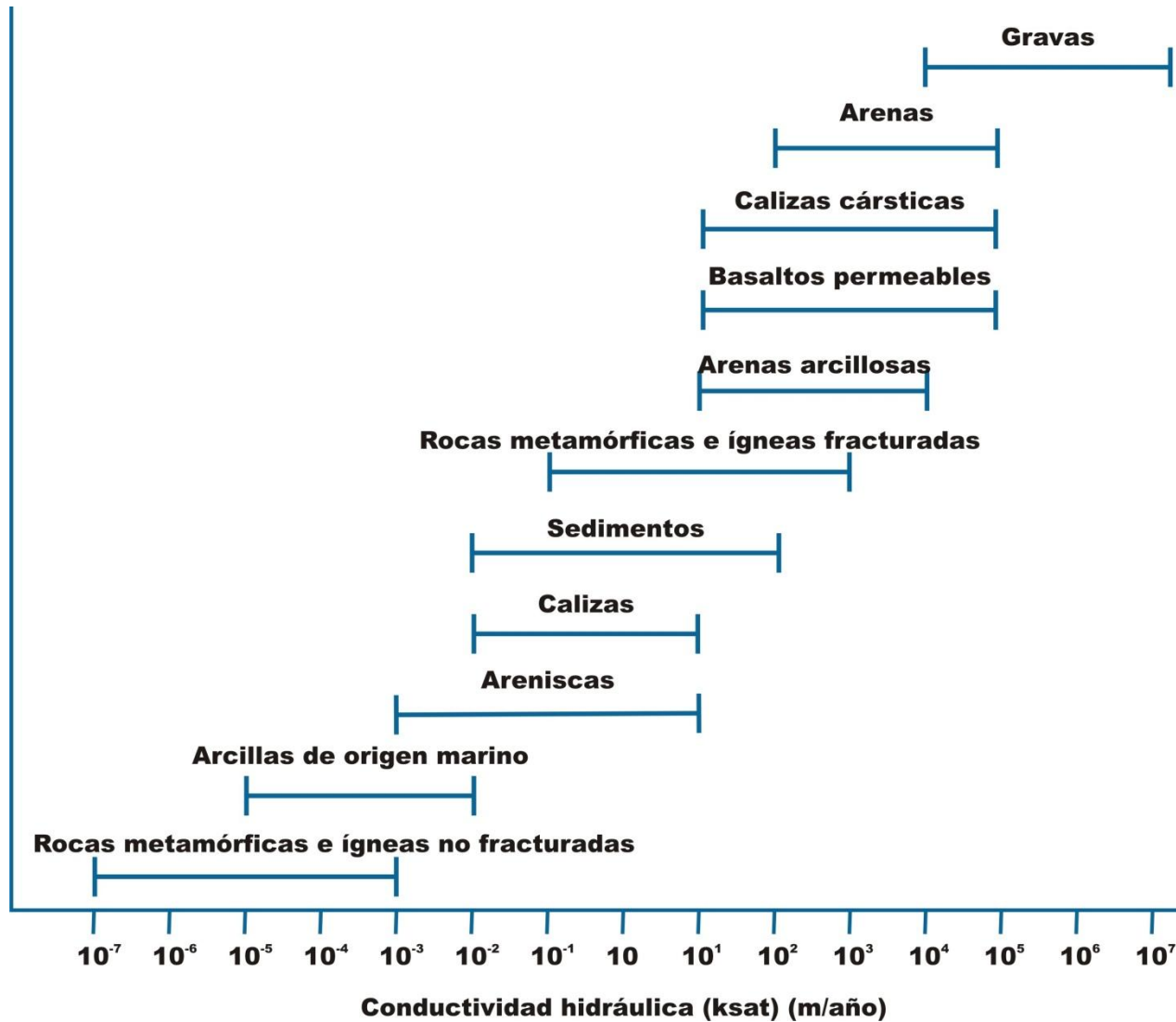


Figura 5.10. Rangos de conductividad hidráulica en varios tipos de suelos y rocas (Freeze y Cherry, 1979).

Algunos de los instrumentos empleados para determinar la conductividad *in situ*, así como otros parámetros hidráulicos, son:

- Pruebas de perforación en dos etapas
- Sonda porosa
- Permeámetro
- Permeámetro de cabeza constante
- Infiltrómetro de anillo
- Infiltrómetro individual de anillo
- Infiltrómetro de doble anillo
- Infiltrómetro de anillo sellado
- Infiltrómetro de doble anillo sellado

Para el caso de esta investigación se determinaron los valores de conductividad hidráulica a partir del uso del permeámetro Guelph 2800KI, el cual posee algunas características que favorecen al estudio deseado (figura 5.11). Este tipo de permeámetro se caracteriza por ser un equipo fácil de manejar, así como de instalar; el periodo de tiempo de trabajo es corto en comparación de otros equipos, por supuesto variando de acuerdo a las características del suelo; precisión en los registros de datos verticales (información de perfil). Está diseñado para realizar pruebas en suelos poco profundos, los cuales son comunes en la zona en estudio.

En cuanto a sus limitaciones, el equipo no está diseñado para realizar pruebas de forma horizontal; no permite el registro de valores de conductividad mayores a 10^{-7} cm/seg; y el volumen de suelo que se puede medir es pequeño. Sin embargo, estas limitaciones no influyeron en la realización de las pruebas de este estudio ya que no se requerían mediciones horizontales debido a que no hay presencia de estratos plegados y la conductividad a medir estaba en el rango adecuado.

Existen variaciones en el suelo debido a las interacciones entre el medio poroso y el agua, cierre de poros, anisotropía (el cambio de las propiedades de acuerdo a la dirección) y la actividad antrópica (Díaz *et al.*, 2003). Con la finalidad de obtener mayor precisión y certidumbre en los datos de campo, se efectuaron diversas pruebas con el permeámetro Guelph.

La utilización del permeámetro consistió en la instalación en sitios representativos y aptos de la ladera. El tubo contenedor principal se llenó de agua y posteriormente se fue liberando de acuerdo al diseño del aparato con la finalidad de medir la cantidad de agua que permea el suelo por unidad de tiempo. Se realizan diversas lecturas hasta que llegue un momento en el cual los registros o lecturas no presenten cambios, en ese momento se debe detener la prueba. El siguiente paso es realizar diversos cálculos que permitan determinar la velocidad de la filtración del agua, así como la conductividad hidráulica. Se realizaron diversas pruebas a diferentes profundidades. Por último, se realizaron pruebas

en el sitio en el cual se extrajeron las muestras de suelo para poder comparar los datos posteriormente. Los resultados obtenidos de las pruebas que se realizaron se muestran en la tabla 5.2.



Figura 5.11. Permeámetro Guelph (fotografía del autor).

Localización dentro de la ladera	Profundidad (cm)	Ksat (conductividad hidráulica en cm/seg)
Sector Superior	20	1.22×10^{-4}
Sector Superior	50	3.18×10^{-4}
Sector Central	20	2.02×10^{-4}
Sector Central	50	1.06×10^{-4}
Sector Inferior	20	7.16×10^{-4}
Sector Inferior	50	1.22×10^{-4}

Tabla 5.2. Valores de conductividad hidráulica obtenidos en la ladera en estudio.

5.6 Pruebas de laboratorio

Conocer el comportamiento de los materiales es parte primordial para el estudio de inestabilidad de laderas, ya que, como se mencionó en el capítulo 2, estos forman parte de los factores internos que influyen posteriormente en los procesos de remoción en

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

masa. Como parte importante del estudio fue necesario realizar diferentes pruebas de mecánica de suelos; los datos obtenidos fueron empleados en el modelo y en la simulación de escenarios.

Es posible realizar pruebas de mecánica de suelos *in situ* y en laboratorio, sin embargo, el primer caso requiere contar con el equipo necesario y condiciones particulares en el lugar de estudio. Por tal razón, se optó por efectuar las pruebas en laboratorio, situación que permitió obtener datos precisos. Las pruebas se realizaron gracias a las facilidades otorgadas por el CENAPRED, en particular del Ing. Leobardo Domínguez, quien participó como asesor para la realización de las pruebas.

Asimismo fue necesario contar con dos tipos básicos de muestras de suelo: 1) muestras cúbicas, y 2) muestras de suelos en perfil cada 15 cm. Para este proceso fue necesario seleccionar un sitio con los materiales más representativos de la ladera y no alterar las características de las muestras obtenidas (figuras 5.12 a la 5.17).



Figuras 5.12 y 5.13. Perfil de la ladera en la cual se extrajeron las muestras de suelo (fotografías del autor).

Los parámetros a obtener fueron cohesión del suelo, ángulo de fricción interna, límites plástico y líquido, índice de plasticidad, granulometría, densidad (aparente y real) y contenido de agua.



Figuras 5.14 y 5.15. Muestras cúbicas extraídas del perfil (fotografías del autor).



Figuras 5.16 y 5.17. Muestras cilíndricas extraídas del perfil (fotografías del autor).

5.6.1 Cohesión y ángulo de fricción interna

La cohesión es definida como la atracción molecular entre las partículas del suelo, es la propiedad que permite dar forma a una muestra que permanece unida. Esta atracción de las moléculas o capacidad de permanecer unidas está en función de las características de la arcilla, el contenido de humedad, la estructura del suelo (representada por la orientación de las partículas) y la densidad (Godwin *et al.*, 1987).

Por otro lado el ángulo de fricción interna se caracteriza como la relación de la fricción deslizando entre granos individuales de suelo y está en función de la densidad, forma y

tamaño de las partículas. Es una constante derivada de la proporción entre el valor resultante de un esfuerzo cortante, condicionado por la fuerza necesaria para deslizar un cuerpo sobre una superficie rugosa, y el esfuerzo cortante del material por unidad de área en el plano en que se presente (Godwin *et al.*, 1987).

La cohesión tiene una estrecha relación con la succión de agua por parte del suelo. Además es muy conocido el hecho de que los suelos en estado seco son más resistentes que los suelos con alto contenido de humedad, los cuales son más vulnerables a procesos de compactación, debido a que a mayor contenido de humedad disminuye la cohesión y viceversa. Este aumento en la humedad en los suelos reduce la estabilidad en proporción directa al contenido de arcillas, lo que puede facilitar la inestabilidad del suelo, dicho proceso es muy común cuando ocurren precipitaciones intensas.

Coulomb en el siglo XVIII determinó, a partir de una ecuación, los valores de esfuerzo máximo de corte de un suelo en función del esfuerzo normal al mismo. De acuerdo con esta ecuación, el esfuerzo máximo que puede soportar un suelo sin cortarse estará dado por la suma de sus fuerzas de cohesión y de fricción.

Tanto la cohesión como el ángulo de fricción interna definen la línea de corte en el modelo de distribución de Mohr-Coulomb (figura 5.18); esta curva describe la relación existente entre el estrés normal y el estrés de corte, y según la cual el estrés de corte representa la resistencia del suelo a la compresión o a la deformación. En la tabla 5.3 se muestran algunos valores promedio de cohesión y ángulo de fricción interna para distintos tipos de suelo.

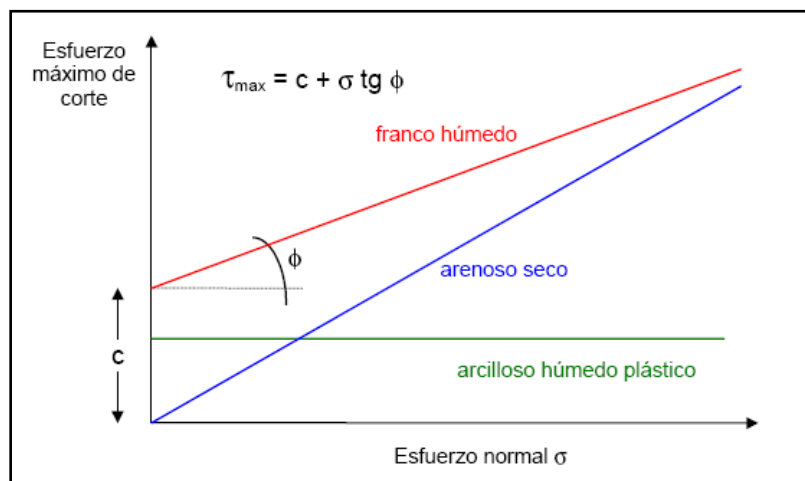


Figura 5.18. Gráfica de la ecuación de Coulomb, en donde Φ es el ángulo de fricción interna (Borja Baeza, 2006).

Tipo de suelo	Estado	Ángulo de fricción interna (°)	Cohesión (kg/cm²)
Arenoso	Compactado	38-40	0
Arenoso	Suelto	32-35	0
Arenoso	Compactado	25-30	0
Arenoso	Suelto	18-22	0
Franco arenoso	Friable	24-28	0.20-0.25
Franco arenoso	Plástico	24-28	0.10-0.15
Franco	Friable	22-26	0.25-0.30
Franco	Plástico	15-19	0.15-0.20
Arcilloso	Friable	17-19	0.40-0.60
Arcilloso	Plástico	10-14	0.25-0.30

Tabla 5.3. Valores promedio de cohesión y ángulo de fricción interna (Juárez y Rico, 1996).

5.6.2 Determinación de la cohesión y el ángulo de fricción interna de las muestras colectadas

a) Cohesión y ángulo de fricción interna

El proceso de preparación de las muestras de suelo colectadas para determinar en laboratorio los valores de cohesión y del ángulo de fricción interna se describe de la siguiente forma:

1. Con ayuda de una pala se procede a la creación de un perfil de donde se extraerán las muestras.
2. Una vez terminado el perfil se selecciona un sitio en el cual no haya presencia de vegetación que pueda alterar los resultados de la pruebas de laboratorio.
3. El siguiente paso es labrar una muestra cúbica de suelo que cuente con una extensión de 25 cm por cada lado. Es importante hacer notar que la muestra debe labrarse con sumo cuidado para evitar que se rompa, lo importante es tratar de mantener las condiciones naturales del suelo. En el caso de este trabajo las muestras fueron tomadas a profundidades de 1 y 1.5 m.
4. En cuanto se tiene la muestra con las características deseadas se procede a cubrirla con manta de cielo, así como con una mezcla de parafina y cera, esto con el objetivo de evitar que se dañe durante el transporte y además para evitar que pierda humedad.

5. Una vez en el laboratorio, el siguiente paso es retirar la capa protectora y extraer muestras de forma cilíndrica para llevar a cabo las pruebas en la cámara triaxial.
6. Cabe recordar que es importante evitar en todo momento que la muestra sea alterada y que sufra un golpe que la quiebre.

El proceso de las pruebas consiste en aplicar presión de un líquido, por lo general agua destilada, a las muestras cilíndricas. Posteriormente las muestras son introducidas en una cámara hermética de forma cilíndrica; la presión hidrostática ejercida sobre el material es igual en todas direcciones (axial y lateralmente). El objetivo de la prueba es someter al material a estados de esfuerzo y deformación similares a las que se encuentran en el sitio de estudio.

Una vez terminado el proceso de compresión la información que se obtiene está relacionada a la cohesión y el ángulo de fricción interna de las muestras de la ladera; dichos parámetros determinan la resistencia al corte por parte del suelo, información esencial en los estudios de inestabilidad del terreno. De forma paralela a esta prueba se pueden obtener datos acerca de otros parámetros tales como el peso del suelo en condiciones normales, necesario para el análisis del factor de seguridad. Las pruebas triaxiales efectuadas mostraron que la cohesión del material que compone a la ladera fue de 20.42 KPa (208.82 gr/cm²) y el ángulo de fricción interna fue de 8.12°; esto demuestra que el suelo del sitio en estudio está compuesto principalmente de material limoso y arcilloso, lo que fue corroborado posteriormente a través de las pruebas de límite plástico, líquido e índice de plasticidad.

b) Límites plástico y líquido, e índice de plasticidad

Igualmente valiosa que la información de cohesión y ángulo de fricción interna del suelo, es la determinación de los límites plástico y líquido, así como el índice de plasticidad son muy relevantes para entender la estabilidad de una ladera.

La consistencia de los suelos, con una alta proporción de arcillas, puede variar desde una condición seca-sólida hasta una forma líquida con la sucesiva adición de agua y mezcla necesaria para expandir el espacio de poro por aceptar el agua. La consistencia pasa de sólido a semisólido y de sólido plástico a líquido viscoso. A. Atterberg, un científico sueco, definió a los contenidos de humedad a través de límites que definen los estados de consistencia. Así los límites plástico y líquido así como el índice de plasticidad se definen como los límites de Atterberg (Juárez y Rico, 1996).

El límite plástico se define como el contenido de humedad en el suelo expresado como porcentaje de la masa de suelo secado en un horno, en el límite entre el estado plástico y semisólido (Juárez y Rico, 1996). El total de agua dentro de este límite es el contenido de agua en el cual un suelo puede ser deformado en una tira cuya longitud es más o menos

de la mitad de la palma de la mano, con un ancho aproximado de 3 mm sin desmenuzarse.

Por otra parte el límite líquido es el contenido de humedad en el suelo expresado como el porcentaje de la masa de suelo secado en horno, en los límites entre los estados líquido y plástico. El contenido de humedad en este límite es definido arbitrariamente como el límite líquido y es el contenido de humedad en una consistencia determinada por medio del aparato estándar de límite líquido.

Por último, el índice de plasticidad es la diferencia numérica entre el límite líquido y el plástico; indica la magnitud del rango de los contenidos de humedad sobre los cuales el suelo está en una condición plástica.

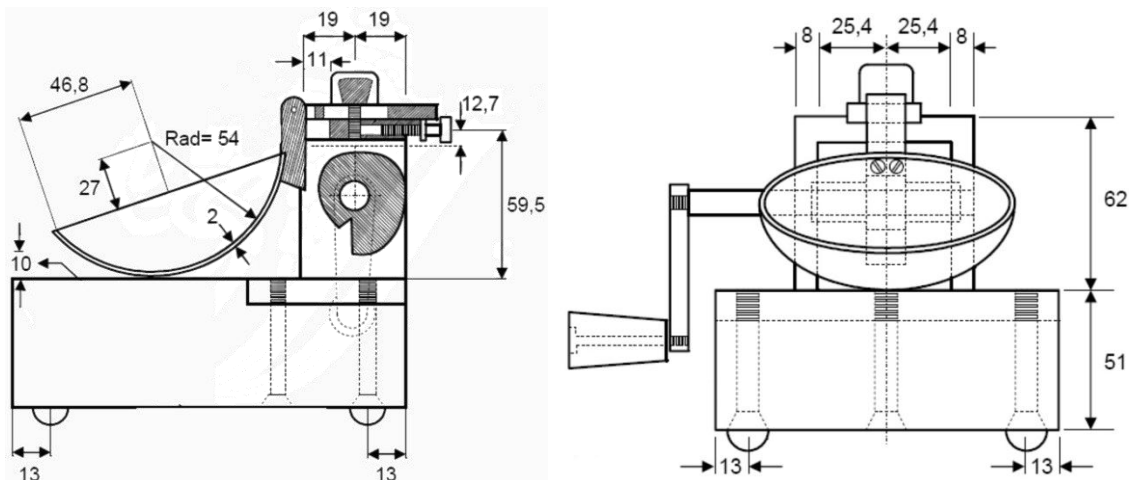
El proceso para determinar estos parámetros consistió en la extracción, cada 15 cm, de muestras a partir de un perfil representativo de los materiales de la ladera. Cada una de las muestras fue clasificada de acuerdo a la profundidad a la cual fue extraída así como de acuerdo al contenido de otros elementos como raíces, color, textura, etc.

Una vez en el laboratorio el límite líquido del material se determinó de la siguiente manera:

1. Se procesó cada una de las muestras para determinar si era posible calcular su límite plástico y el límite líquido. Cabe destacar que fue necesario retirar el contenido de gravas y de raíces de las muestras para poder remoldearlas.
2. El siguiente paso fue remoldear una cantidad considerable de las muestras para intentar convertirlo en una masa homogénea. Una vez terminado este paso las muestras fueron puestas en la copa de Casagrande, la cual consiste en una copa calibrada para una altura de caída de 1 cm, provista de un ranurador plano y con las características que se muestran en las figuras 5.19 y 5.20.
3. Antes de colocar la muestra de suelo en la copa es necesario asegurarse de que el equipo cumpliera con las siguientes condiciones:
 - a) la taza de la copa debe alcanzar una altura aproximada de 10mm.
 - b) la no existencia de roce lateral de la taza debido al desgaste del pasador que la sostiene.
 - c) que la taza, soporte y base no estén desgastados.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

4. Se colocó el material en la taza de forma que éste no rebasara el límite de la taza; se separó el material con un acanalador a lo largo del diámetro vertical de la taza, esto con el objetivo de formar una separación clara y bien delineada.
5. Se giró la manivela del aparato, misma que elevó a la campana que contiene el material a 1 cm de la base, posteriormente se dejó caer la campana de modo que ésta dio un golpe en la base, la intención fue conseguir dos golpes con la campana cada minuto. Este movimiento transmitió la vibración al material, el cual tiende a unirse tras un número de golpes. En este caso la prueba se detuvo en cuanto el material se encontró unido a lo largo de 10 o 12 mm.
6. Se retiró parte del material y se colocó en un recipiente, previamente pesado, para realizar un pesaje del mismo. Posteriormente se introdujo a un horno el recipiente con el material, y se secó durante un periodo de 24 horas.
7. Pasado el tiempo de secado se retiró el recipiente para ser pesado nuevamente, y el resultado constituyó el peso del material en seco. A través de cálculos matemáticos se determinó el peso del suelo en estado seco y el peso del agua, expresado en porcentaje en relación al peso de la muestra húmeda.
8. Se creó un gráfico que relaciona el número de golpes y el porcentaje de agua. A través de una línea se unieron los puntos y se determinó el valor que cruza a la línea que indica los 25 golpes y dicho valor corresponde al límite líquido.



Figuras 5.19 y 5.20. Vista lateral y frontal de una copa de Casagrande (Secretaria de Comunicaciones y Transportes, 2003).

Los valores que se obtuvieron de las pruebas para determinar límite líquido, plástico e índice de plasticidad, así como la clasificación del suelo de acuerdo a la USCS (Unified Soil Classification System) se muestran en la tabla 5.4 y en la figura 5.21.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

De forma paralela se obtuvo el valor de contenido de agua del suelo. Este se define como la relación entre el peso del agua comprendida entre las partículas solidas de una muestra de suelo y el peso de los materiales en estado seco. Para determinar este porcentaje fue necesario comparar los pesos de una muestra de suelo en las condiciones en las cuales se extrajo (suelo húmedo) y la misma muestra secada en el horno (suelo seco); la diferencia entre ambas, en relación con el peso total, fue considerada como el contenido de agua. De esta forma se obtuvieron los siguientes resultados (tabla 5.5 y figura 5.21).

Profundidad	Límite Líquido %	Límite Plástico %	Índice de Plasticidad %	Clasificación
0-15 cm	81.10	38.69	42.41	(MH) Suelos finos caracterizados por presentar limos de alta plasticidad. Suelen ser limos arenosos y arcillosos. También pueden caracterizarse por la presencia de caolinita. Presenta un drenaje pobre y alta compresión y expansión.
30-45 cm	87.30	45.00	42.30	
60-75 cm	58.65	32.05	26.60	
90-105 cm	63.90	33.56	30.34	
120-135 cm	65.60	27.89	37.71	(CH) Suelos finos caracterizados por presentar arcillas de alta plasticidad. Suele presentar bentonita o arcillas volcánicas. Son suelos que presentan un drenaje pobre o pueden llegar a ser impermeables además son de alta compresión y expansión.
150-165 cm	56.90	26.67	30.23	
180-195 cm	50.40	23.61	26.79	

Tabla 5.4. Resultados obtenidos de las pruebas realizadas a las muestras de suelo colectadas.

Profundidad (cm)	Contenido de agua %	Profundidad (cm)	Contenido de agua %
0-15	66.58	105-120	31.37
15-30	61.19	120-135	32.05
30-45	69.86	135-150	34.32
45-60	38.83	150-165	33.48
60-75	34.43	165-180	31.03
75-90	34.63	180-195	29.29
90-105	34.56	195-210	30.36

Tabla 5.5. Contenido de agua en las muestras de suelo colectadas.

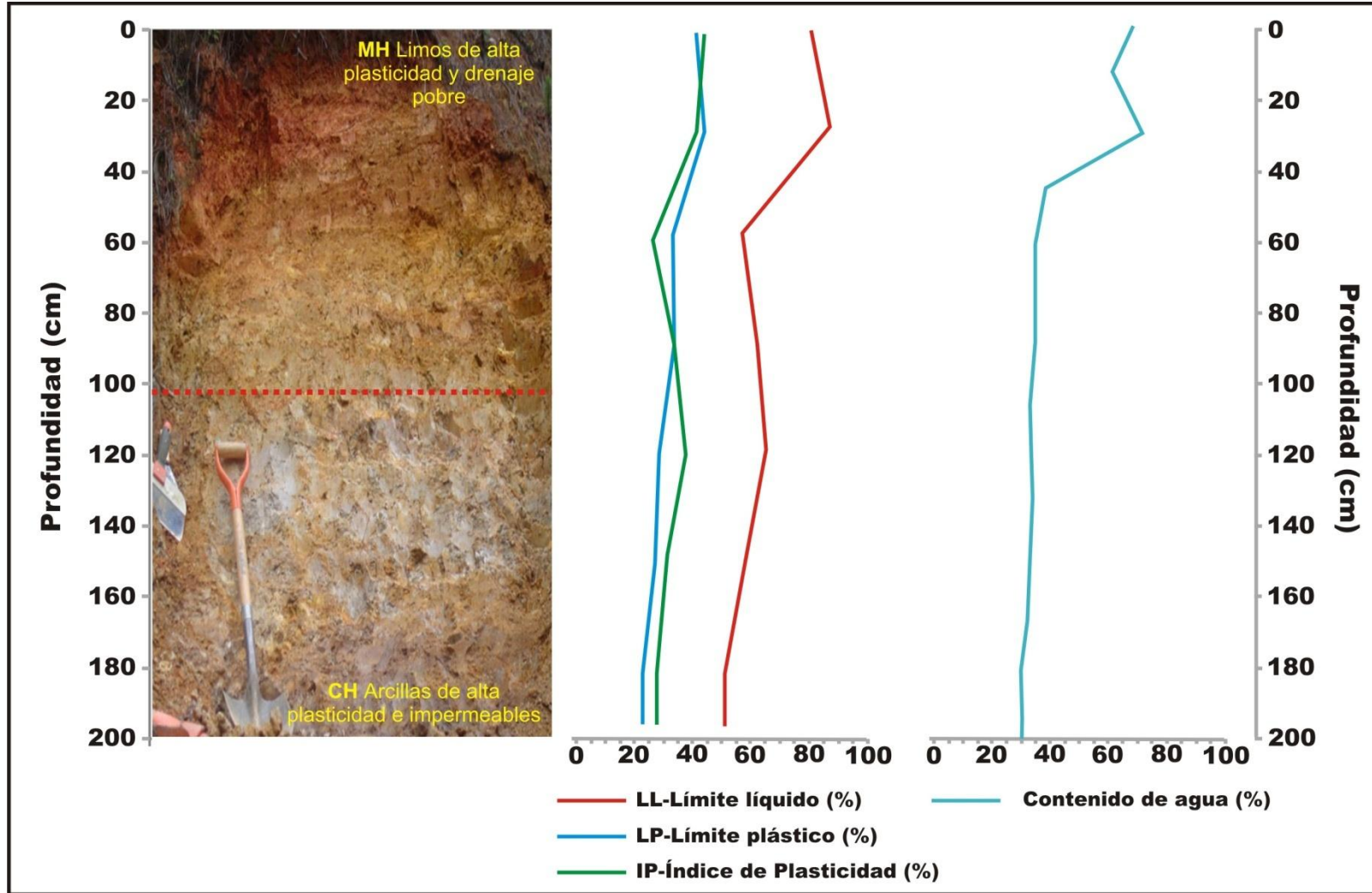


Figura 5.21. Perfil de la zona en estudio y los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio.

c) Granulometría

Una prueba básica en el análisis de los suelos consiste en la granulometría, este proceso permite diferenciar, en porcentajes, los diámetros de las partículas que conforman al suelo. El rango de tamaño de las partículas varía desde 100mm hasta un valor inferior a 0.001mm. Las normas internacionales clasifican la composición de los suelos, de acuerdo al rango que predomine, en arcillas, limos, arenas, gravas, cantos y guijarros, a su vez los limos, las arenas y las gravas se subdividen en finos, medianos y gruesos.

El proceso que se siguió para la determinación de la granulometría de cada una de las muestras obtenidas se resume de la siguiente manera:

Se selecciona una porción de cada una de las muestras y se procede a eliminar su contenido de humedad a través del secado en horno. En cuanto se ha secado el suelo, se eliminan los grumos o terrones y se lleva a cabo el proceso de tamizado, consistente en la separación de las partículas del suelo a través de mallas de diferentes tamaños, contabilizando el peso retenido en cada una de las mallas. Cabe destacar que se inicia con la malla de mayor tamaño y se continúa así hasta llegar a la malla más fina. Los resultados obtenidos de la prueba de granulometría se pueden observar en la figura 5.22.

En la figura es posible observar que en general las muestras de suelo están compuestas de arenas y materiales finos (limos y arcillas). Además se advierte un material arenoso de características similares dentro de los primeros 105 cm. Por otro lado se distingue que un incremento de material fino entre los 105 y 165 cm, estrato que se caracteriza por estar constituido por arcillas prácticamente impermeables, alta plasticidad, y con alta compresión y expansión. En cambio los materiales de los estratos superiores están compuestos de limos de alta plasticidad y drenaje deficiente. Las características de ambos materiales también se ven reflejados en la conductividad hidráulica la cual se encuentra dentro del rango de las arcillas de origen marino particularmente del Mesozoico.

5.7 Instalación de tensiómetros semiautomáticos

Como se ha venido mencionando, las fluctuaciones o cambios en los niveles del agua en el subsuelo, provocadas por las variaciones estacionales y los cambios climáticos, generan diferentes estados de esfuerzo en la masa del suelo.

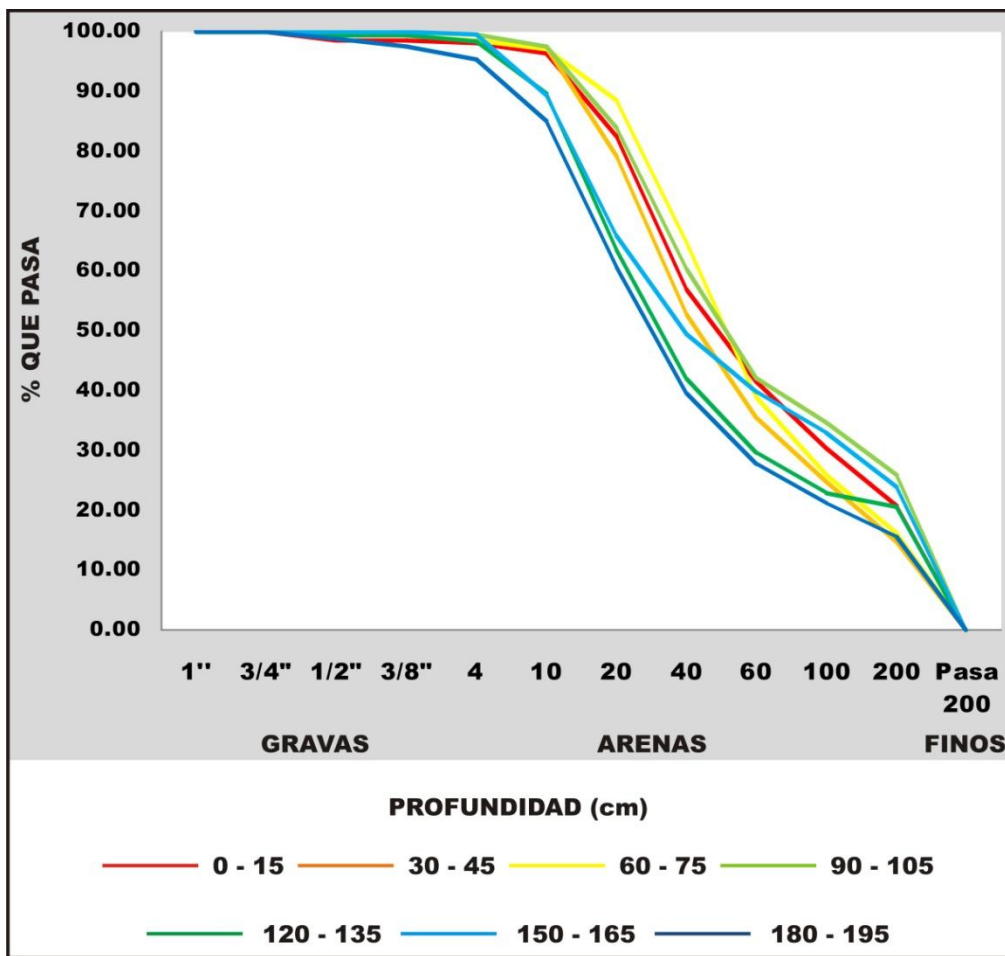


Figura 5.22. Curva granulométrica de los materiales a diferente profundidad.

Como complemento a las pruebas *in situ* y a las realizadas en laboratorio, se llevó a cabo un monitoreo de la presión del agua en el subsuelo a partir del uso de tensiómetros.

Los tensiómetros o sensores de succión son instrumentos que se utilizan para medir las tensiones que se generan en el agua atrapada en los espacios capilares de una masa de suelo (Mendoza *et al.*, 2002).

Un tensiómetro, como se dijo anteriormente, consiste de un tubo hermético con una punta de cerámica porosa en la base, un manómetro cerca de una tapa hermética. Cuando el tensiómetro se llena con agua y se inserta en el suelo, el agua se puede mover dentro y fuera del tubo a través de los poros de la punta. Conforme se va secando el suelo y el agua se mueve hacia fuera del tensiómetro, se crea un vacío dentro del tubo que se mide en el manómetro. Cuando el vacío generado por el movimiento del agua hacia fuera del tensiómetro es igual a la succión del suelo, el agua deja de fluir, y en ese momento el manómetro mide la tensión o succión del suelo.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

Si el suelo continúa secándose, el agua seguirá moviéndose hacia fuera del tensiómetro hasta que alcance el nivel de vacío más alto. Cuando se agrega agua al suelo, por ejemplo a través de una lluvia, se lleva a cabo el proceso contrario; el suelo ve reducida su capacidad de succión y el agua es devuelta al tensiómetro a través de los poros, hasta que el nivel de vacío se reduce a un valor similar al de la succión más baja, por lo que en este punto el movimiento del agua se detiene debido a la saturación del suelo. Con la idea de comparar los valores de succión del suelo con el régimen o los registros de precipitación de la zona y así conocer el comportamiento estacional del suelo, la instalación de tensiómetros requirió del establecimiento de una estación meteorológica.

El proceso de instalación de los tensiómetros se dividió en dos partes, la primera en la cual los aparatos funcionaron de forma semiautomática, es decir, registrando los datos directamente del manómetro, y la segunda, en la cual los datos de los equipos se registraron posteriormente por medio de un sistema automático de registro de datos o también llamado “data logger”.

Para llevar a cabo la instalación del equipo fue necesario seleccionar un sitio que permitiera el registro de una zona característica de la ladera. Una vez elegido el sitio se procedió a realizar perforaciones de acuerdo a la longitud de los tensiómetros. En el caso de esta investigación las profundidades de las perforaciones fueron de 15, 30, 45, 60 y 90 cm. Una desventaja de este tipo de instrumento es que era necesario realizar un registro periódico de las condiciones del suelo lo que involucraba visitas continuas y en periodos cortos de tiempo a la zona de estudio, lo que se traduce en un aumento en los costos. Asimismo, se buscó el apoyo de las autoridades e incluso de los mismos pobladores para que llevaran a cabo las mediciones, sin embargo, esto no fue posible de manera permanente. Los tensiómetros estándar, con manómetro, y los automatizados se observan en las figuras 5.23 y 5.24.



Figuras 5.23 y 5.24. En la figura 5.23 se observan los tensiómetros estándar y en la figura 5.24 los tensiómetros una vez que fueron automatizados (fotografías del autor).

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

Dado lo anterior, fue necesario realizar la automatización de los tensiómetros para así evitar la pérdida de datos, además de que esto permitiría tener datos más continuos y en forma digital lo que facilita su manejo y análisis.

El proceso de automatización de los tensiómetros se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. Adquisición de sensores eléctricos para permitir el registro de los datos sin necesidad de recurrir al manómetro de los tensiómetros. Esto trae como consecuencia una mayor precisión de los datos debido a que los manómetros no permiten la medición de valores decimales. Además con los sensores es posible hacer un registro continuo de la información de acuerdo al intervalo de tiempo que se desea.
2. Paralelamente fue necesario adquirir un sistema registrador de datos, el cual tiene el objetivo de registrar los impulsos eléctricos de los sensores y transformarlos en la unidad de medición deseada, en este caso la unidad de los manómetros es el centíbar (Cb). Una ventaja que ofrece el sistema registrador o data logger, es que permite el registro de datos de 7 instrumentos al mismo tiempo, por lo que sólo fue necesario utilizar uno para los 5 tensiómetros instalados en la ladera (figura 5.25).

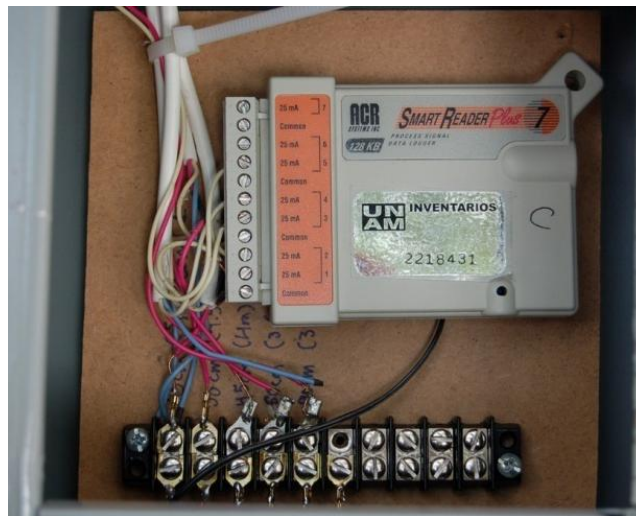


Figura 5.25. Tarjeta de registro de datos "data logger" (fotografía del autor).

3. Por último, hay que mencionar que tanto los sensores como el sistema registrador de datos requieren de una fuente de energía para poder funcionar por lo que fue preciso la adquisición de una batería, con la cual se podría crear las conexiones necesarias para proporcionar la energía a los instrumentos.

4. Una vez que se tuvieron los equipos adecuados para la automatización de los tensiómetros, el siguiente paso fue calibrar los sensores, de forma que los impulsos eléctricos indicaran los niveles de succión del suelo. Para esta calibración se contó con el apoyo del laboratorio de suelos del CENAPRED y de la colaboración de su personal. El proceso de calibración de los sensores se realizó con ayuda de un aparato que simula una succión o la creación de un vacío. En este caso, tanto el sensor como el manómetro fueron conectados a uno de los tubos de los tensiómetros con el objetivo de registrar en ambos el grado de succión o de vacío creado por el aparato. Así en cuanto se iniciaba la creación del vacío en el tubo, se realizaba el registro de los datos que presentaban tanto el manómetro y el sensor eléctrico, el cual por cierto registra los valores en miliamperes (mA). Para este proceso de calibración fue necesario realizar varias pruebas hasta corroborar que los datos de ambos sensores, manómetro y eléctrico, fueran correspondientes, es decir, a un valor de succión en centibares correspondía un valor de impulso eléctrico en miliamperes. Este procedimiento se realizó con cada uno de los sensores, además con la ayuda del software de la tarjeta registradora de datos fue posible transformar los registros de miliamperes a centibares ya que el programa permite, a través de una ecuación lineal, convertir los valores del sensor en la unidad que se desea (figura 5.26).

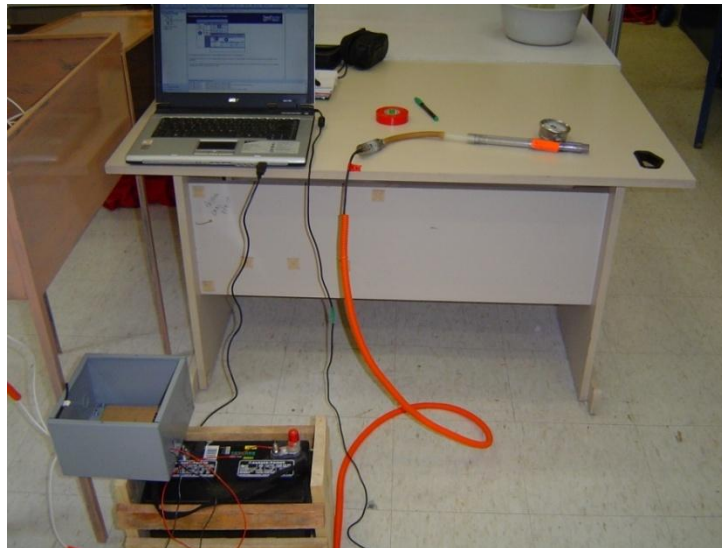


Figura 5.26. Proceso de calibración de los transductores usados para automatizar los tensiómetros (fotografía del autor).

5. En cuanto se tuvieron calibrados los sensores eléctricos se procedió a realizar las conexiones necesarias para la creación del sistema de registro de datos, en el cual se incluyen los tensiómetros con su respectivo sensor así como una tarjeta registradora de datos y una batería. Este sistema se resume en la figura 5.27.

6. El último paso fue proteger a la tarjeta de registro y a la batería para lo cual se empleo una caja de acero o lámina de acero sellada. Esta permitiría proteger al equipo de las condiciones climáticas, así como para evitar que alguna persona pudiera alterar o destruir el equipo. Por último, se procedió a la instalación de los tensiómetros de acuerdo a la profundidad que le correspondía. En el campo se determinó el intervalo de tiempo en el cual la tarjeta debía registrar los datos generados por los sensores eléctricos instalados en los tensiómetros (figura 5.28). El intervalo que se estableció fue de una hora, tiempo similar en el cual la estación meteorológica registra la información de precipitación que sirvió para realizar una comparación posterior.

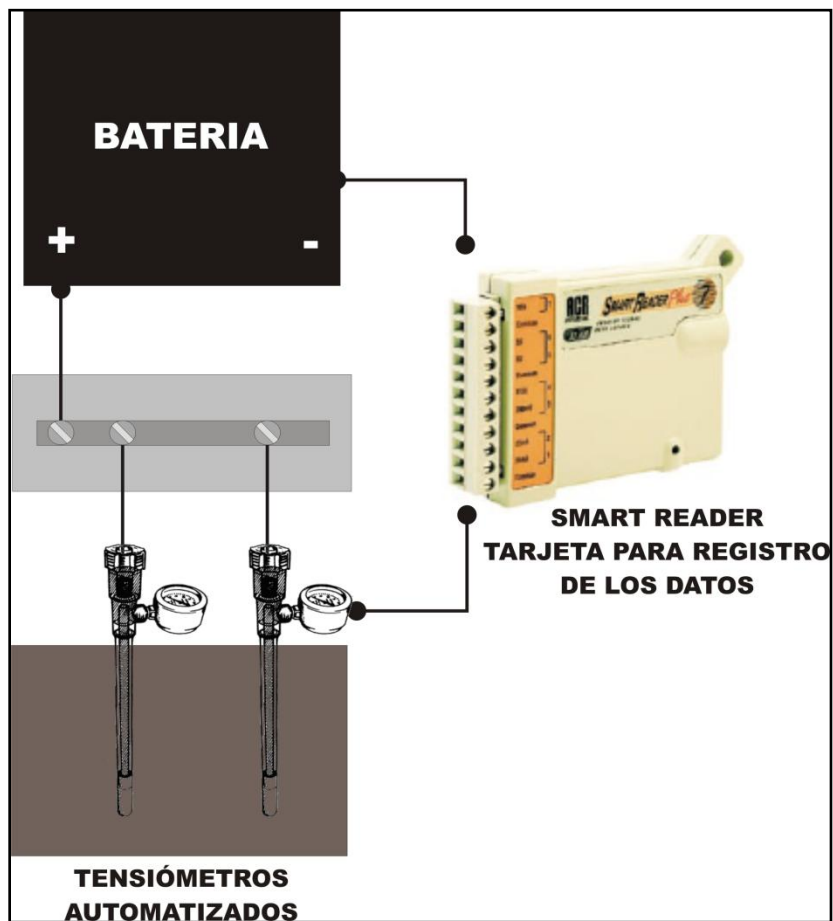


Figura 5.27. Representación general del sistema de monitoreo a través de tensiómetros automatizados.



Figura 5.28. Instalación y configuración de la tarjeta de registro de datos (fotografía del autor).

El periodo de registro de los tensiómetros automatizados fue del 19 de agosto del 2006 al 13 de abril del 2007. En los datos registrados se identificó que, de manera general, la succión de agua disminuye en cuanto se presenta un periodo corto de lluvia; sin embargo, cabe destacar que ocurre lo contrario en los tensiómetros de 15 y 60 cm. Tales circunstancias pueden deberse a diferencias en las propiedades de los materiales en el perfil. En las figuras 5.29 y 5.30 se puede observar el incremento y la disminución en la succión del agua por parte del suelo a distinta profundidad y su relación con los periodos de lluvia registrados por la estación meteorológica. En ambos casos se puede observar que la succión no presenta valores negativos, es decir, por debajo del 0; esto refleja que el suelo de la ladera, durante las lluvias del periodo registrado, en ningún momento alcanza un momento total de saturación, lo que refleja un estado de estabilidad constante, esto a pesar de que el agua que se infiltra en el suelo tiende a cambiar el grado de cohesión del suelo.

Por otro lado, en la figura 5.31, se puede observar un incremento en los valores de succión del suelo. Estos valores registrados corresponden a los meses de marzo y abril, en los cuales las lluvias son prácticamente escasas en la zona, por lo que se incrementa la succión debido a un bajo contenido de humedad.

Los resultados obtenidos demostraron que el suelo presenta una disminución de la succión del agua durante el periodo más crítico de lluvias (septiembre-octubre), sin embargo, se conserva estable debido a que no presenta valores negativos de succión, lo que indicaría un suelo sobresaturado de agua, factor importante en la inestabilidad de laderas. Asimismo, durante la temporada seca, el comportamiento del suelo se refleja en un incremento en la succión, esto como resultado de un déficit de humedad en el mismo.

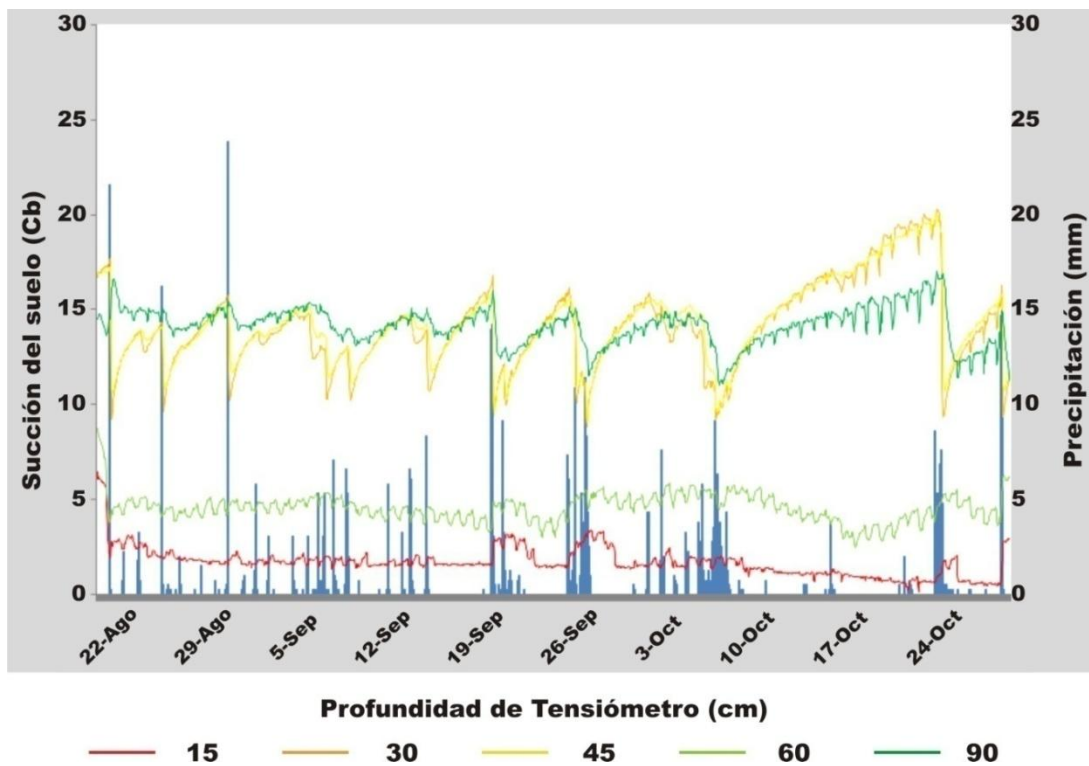


Figura 5.29. Relación de los registros de lluvia y succión del agua en la ladera experimental.

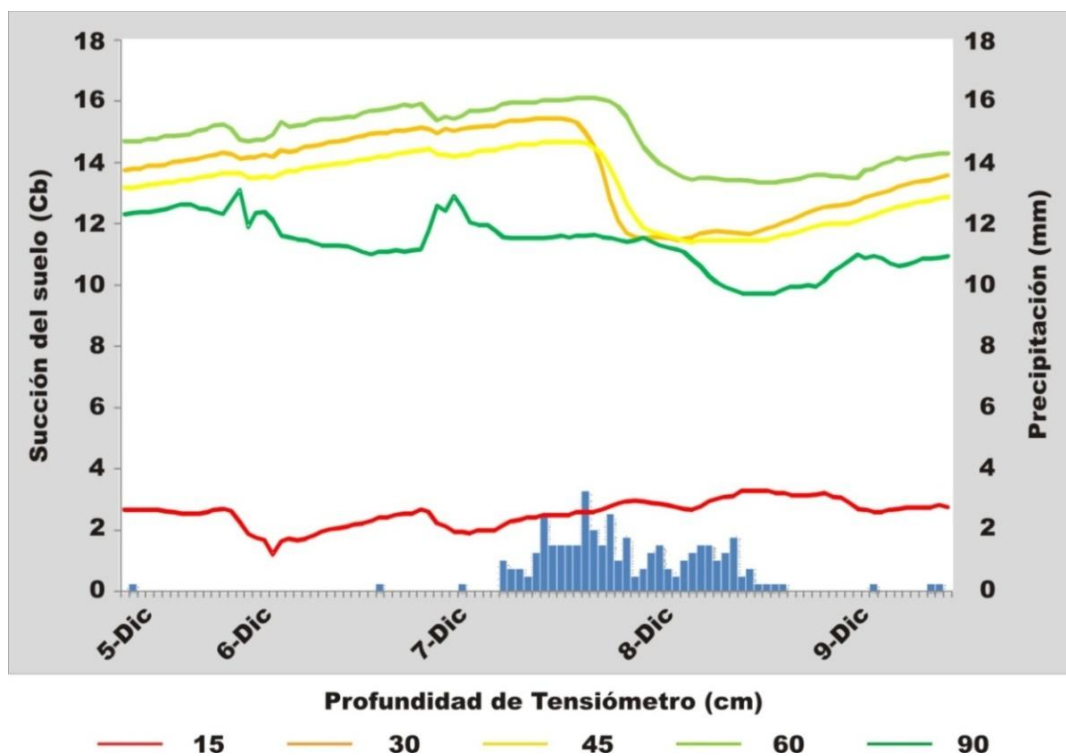


Figura 5.30. Relación de los registros de lluvia y succión del agua en la ladera experimental.

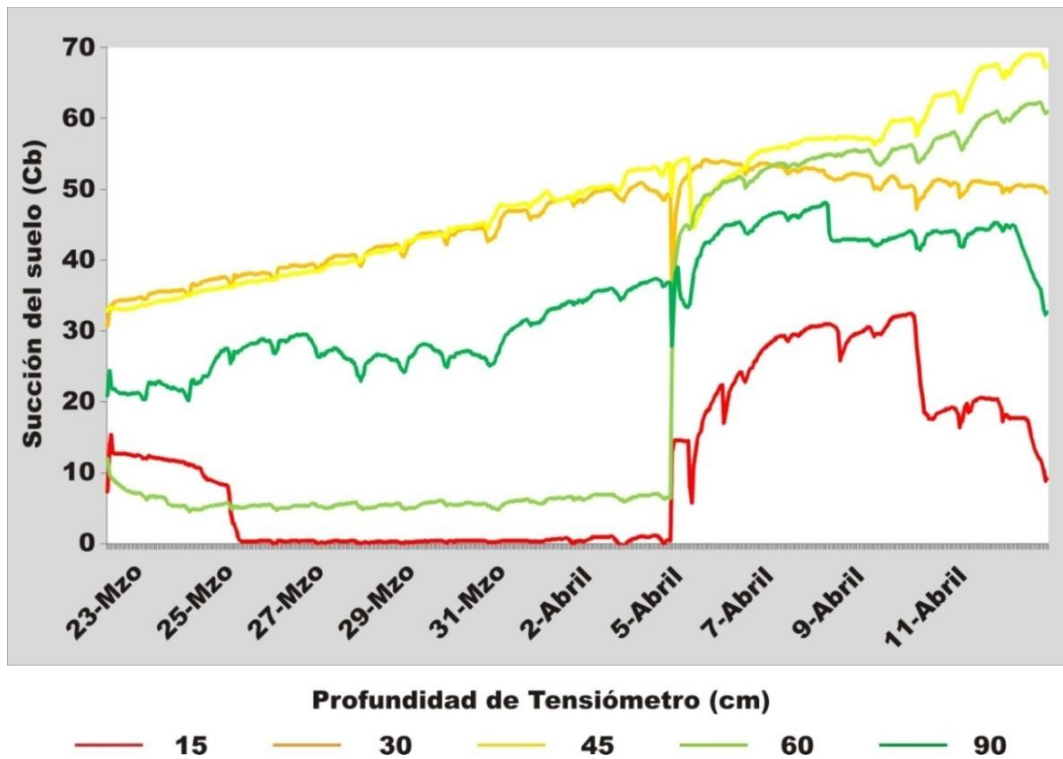


Figura 5.31. Incrementos en la succión debido al bajo contenido de humedad en el suelo.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede decir que la ladera se encuentra en constante equilibrio, es decir, su condición de estabilidad es notoria. Esta condición se comprobó, además, a través de la modelación, proceso que se describirá con mayor detalle en el siguiente capítulo.

CAPITULO 6 MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA LADERA

6.1 Introducción

Como ya se había comentado con anterioridad, el objetivo de la modelación es buscar recrear o simular procesos o situaciones lo más cercano posible a las condiciones reales, esto con el fin de entender fenómenos que ya ocurrieron o que pueden presentarse a futuro, como es el caso de los procesos de remoción en masa.

El propósito de esta investigación fue determinar la condición de estabilidad de una ladera a partir de la modelación y tomando en cuenta valores o condiciones reales de la ladera. De esta manera el primer objetivo fue realizar pruebas *in situ* acerca de las propiedades del suelo. Posteriormente, se realizaron pruebas de laboratorio que permitieron determinar propiedades tales como cohesión y ángulo de fricción de los materiales. De forma paralela se monitoreó la precipitación y la condición de saturación del terreno. Toda esta información se utilizó en el proceso de simulación para determinar las condiciones reales de estabilidad de la ladera durante el periodo de lluvias registrado, así como simulando precipitaciones más intensas como las de 1999.

La modelación se llevó a cabo con la ayuda de la aplicación PCRaster y además se utilizó el modelo infinito de estabilidad de laderas, desarrollado por Skempton y Delory (1957), para determinar el índice de estabilidad.

6.2 Programa PCRaster

El programa PCRaster es un Sistema de Información Geográfica que consiste de una serie de herramientas necesarias para almacenar, manipular, analizar y recuperar información de tipo geográfico. Es un sistema basado en el formato raster que usa un estricto mecanismo de análisis de datos. Esto significa que los datos son asociados a información de tipo espacial, y permite al usuario organizar su información y evitar la ejecución de operaciones innecesarias. Los tipos de información espacial aplicados discriminan entre varios tipos de campos continuos y objetos clasificados (PCRaster Manual).

La estructura del programa permite la integración de funciones para realizar modelaciones junto con las funciones clásicas de los Sistemas de Información Geográfica.

El concepto central del programa PCRaster es la separación o partición del terreno en el espacio dando como resultado una serie de celdas con información. Cada celda puede ser considerada como una serie de atributos que definen propiedades, y que además puede transmitir información a las celdas adyacentes.

6.2.1 Modelación dinámica

El objetivo principal de la modelación es la derivación de nuevos atributos para cada una de las celdas. En la modelación el principio de análisis espacial es desarrollado bajo el concepto de la adición del aspecto temporal: los nuevos atributos son analizados en función de los cambios temporales en los diferentes atributos.

Al estar integrado a las funciones de un SIG, la modelación dinámica provee la posibilidad de poder crear modelos de tipo dinámico (figura 6.1). Este lenguaje empleado en la modelación puede ser usado para crear o desarrollar una amplia variedad de modelos, por ejemplo de estabilidad de laderas. Asimismo, los resultados de la modelación pueden ser visualizados gracias a las función SIG que permite desplegarlos (figura 6.2) (PCRaster Manual).

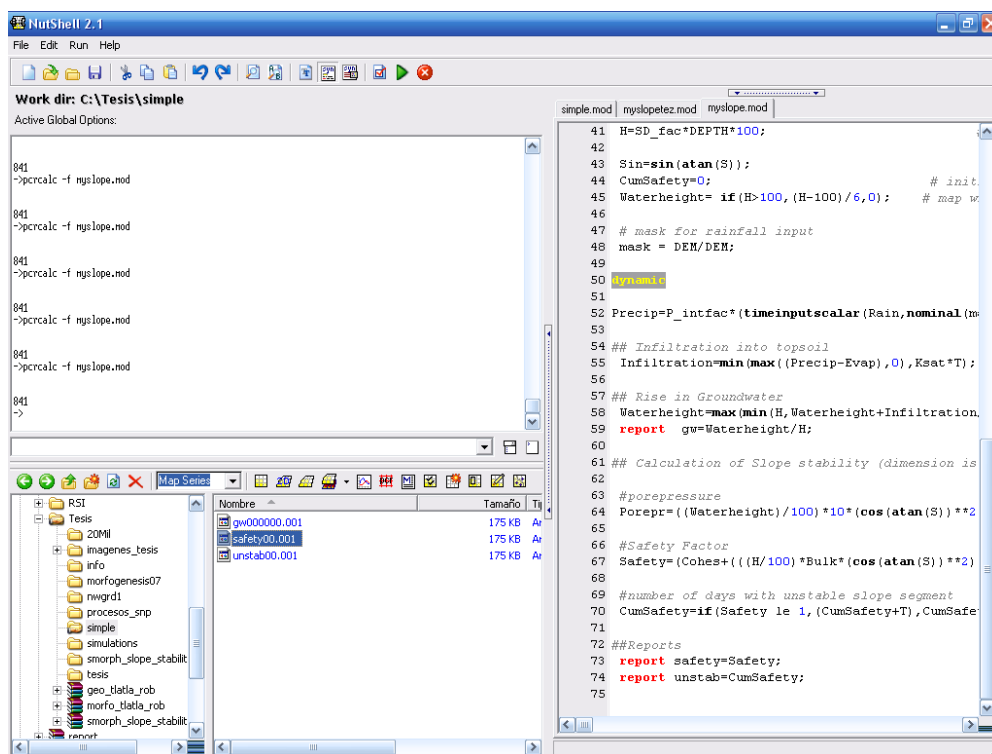


Figura 6.1. Esquema de trabajo en el programa PCRaster. En la sección derecha se anotan los pasos que debe ejecutar el modelo.

En estos modelos dinámicos, para cada lapso de tiempo una serie de operaciones es desarrollada a través de los mapas creados con antelación o por medio de información externa que define el valor de un atributo para cada lapso de tiempo. Esto se realiza para todos los lapsos de tiempo usados en el modelo. Así, un modelo dinámico puede ser visto como una secuencia temporal de cambios estáticos en las celdas de un mapa; cada una representa los cambios en el proceso modelado a través del tiempo.

El programa PCRaster se basa en la creación de guiones o scripts, en los cuales se determinan los pasos a seguir durante la modelación y los componentes del modelo. De esta forma el guión cuenta con diferentes secciones que forman parte de las distintas funciones del script. Estas secciones le indican a la computadora cuales son los pasos que debe seguir lo que ayuda al usuario a estructurar bien los componentes de su modelo.

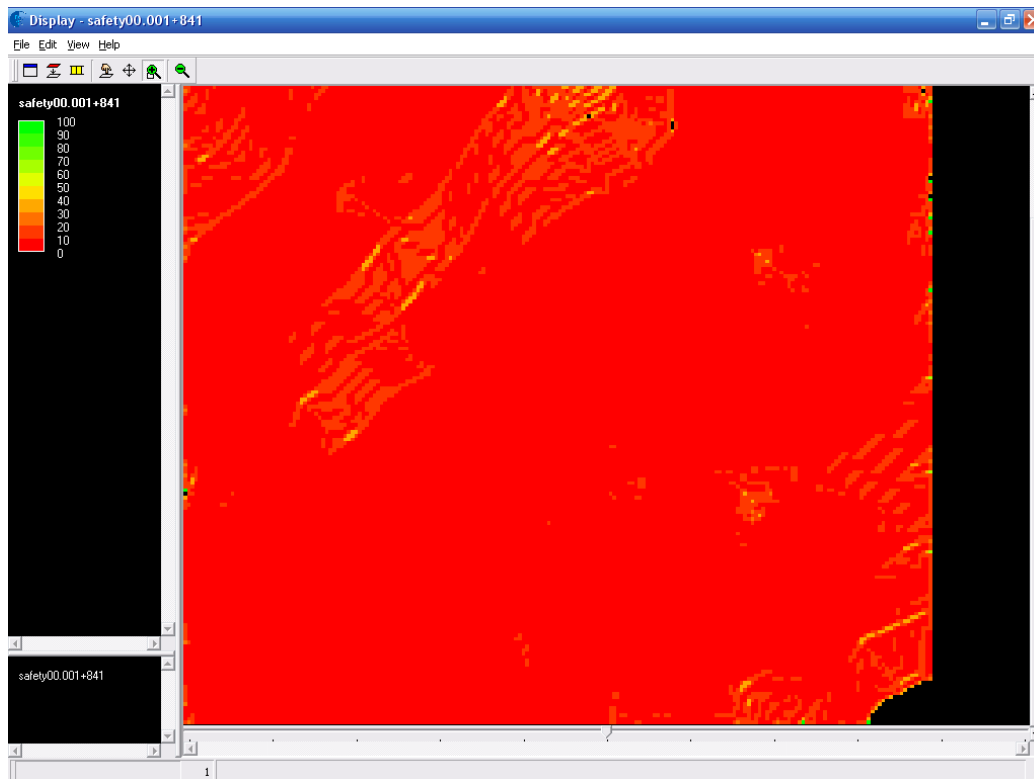


Figura 6.2. Función SIG incluida en PCRaster que permite visualizar y editar mapas.

Las secciones en las cuales se divide el guión son:

- **Sección de asociación (*binding section*):** en la cual se indican todos aquellos mapas, tablas, parámetros, variables y series de tiempo que van a ser empleadas en el desarrollo del modelo.
- **Sección de área (*area section*):** es el mapa del área que se va a modelar, por lo general es el modelo digital de elevación de la zona en estudio.
- **Sección de tiempo (*time section*):** indica el intervalo de tiempo empleado para modelar los cambios en las propiedades de los mapas.

- **Sección de inicio (*initial section*):** consiste en la preparación de las variables de entrada que son necesarias para poder ejecutar el modelo.
- **Sección dinámica (*dynamic section*):** contiene las operaciones matemáticas que son ejecutadas en cada serie de tiempo y además es la sección que se encarga de la creación de los mapas para cada una de las series de tiempo.

6.3 Proceso de modelación y resultados

La modelación espacial y temporal del sitio en estudio se llevó a cabo usando el modelo infinito de estabilidad de laderas, mencionado en el capítulo 3. Este modelo requiere de los valores para cada uno de los parámetros, en este caso, pendiente del terreno, cohesión, ángulo de fricción interna, conductividad hidráulica, profundidad del suelo, peso específico del suelo, condición de saturación y precipitación.

Asimismo, el área de modelación está representada por el modelo digital de elevación de la ladera en estudio.

El proceso con el cual se ejecutó el modelo se resume de la siguiente forma:

Sección de asociación: En esta sección se anotaron los mapas y las variables con las cuales se contaba. Los mapas incluyeron el modelo digital de elevación y de profundidad del suelo; este último tomando como dato el espesor del perfil del cual se extrajeron las muestras de suelo analizadas en laboratorio.

Asimismo, se asocia el mapa de pendientes de la ladera junto con los valores de la intensidad de la precipitación, conductividad hidráulica, contenido de humedad, ángulo de fricción interna, cohesión, peso del suelo en condiciones naturales y el intervalo de tiempo de los datos de precipitación.

Sección de área: en esta sección se integra el mapa del área en estudio, en este caso el modelo digital de elevación de la ladera.

Sección de tiempo: se incluye el lapso de tiempo en el cual se ejecutarán los cálculos, en el caso de este estudio es el número de días de los cuales se tiene registro de precipitación.

Sección de inicio: en este apartado se crea el mapa de pendientes; se anota el valor del pixel de todos los mapas empleados y se crea un mapa de altura del agua en el suelo.

Sección dinámica: dentro de esta sección se anotan los cálculos que debe realizar la computadora para determinar la infiltración, cambios en la altura del agua, en la presión de poro así como en el factor de estabilidad. Por último, se ordena al programa crear un

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

mapa con el número de días en los cuales cada una de las celdas es inestable, esto es importante para poder determinar el periodo de tiempo en el cual la ladera tiende a ser inestable (figura 6.3).

Los datos de cada una de las variables que se emplearon en el modelo se muestran en la tabla 6.1.

PARÁMETRO	VALOR
Profundidad del suelo	3 m
Cohesión	20.42 KN/m ²
Ángulo de fricción interna	8.12°
Peso del suelo en condiciones normales	16.72 KN/m ³
Contenido mínimo y máximo de humedad	29.29%-69.86%
Conductividad hidráulica	2.64x10 ⁻⁴ cm/seg
Tamaño del pixel	10 cm

Tabla 6.1. Valores de los parámetros empleados en el modelo.

```

simple.mod | myslopez.mod | myslope.mod
40 Ksat=228.096; # ksat in cm/day
41 H=SD_fac*DEPTH*100; #soil depth cm
42
43 Sin=sin(atan(S));
44 CumSafety=0; # initial value of unstable days
45 Waterheight= if (H>100, (H-100)/6, 0); # map with initial waterheight (cm)
46
47 # mask for rainfall input
48 mask = DEM/DEM;
49
50 Dynamic
51
52 Precip=P_intfac*(timeinputscalar(Rain,nominal(mask)));
53
54 ## Infiltration into topsoil
55 Infiltration=min(max((Precip-Evap), 0), Ksat*T);
56
57 ## Rise in Groundwater
58 Waterheight=max(min(H, Waterheight+Infiltration/(Tetamax-Tetar)-k*Ksat*T), 0);
59 report gw=Waterheight/H;
60
61 ## Calculation of Slope stability (dimension is mtrs now)
62
63 #porepressure
64 Porepr=((Waterheight)/100)*10*(cos(atan(S))**2);
65
66 #Safety Factor
67 Safety=(Cohes+((H/100)*Bulk*(cos(atan(S))**2))-Porepr)*TanPhi/((H/100)*Bulk*sin(atan(S))*cos(atan(S)));
68
69 #number of days with unstable slope segment
70 CumSafety=if(Safety le 1, (CumSafety+T), CumSafety);
71
72 ##Reports
73 report safety=Safety;
74 report unstab=CumSafety;
75

```

Figura 6.3. Sección dinámica en la cual se anotan los cálculos a realizar para determinar el factor de seguridad.

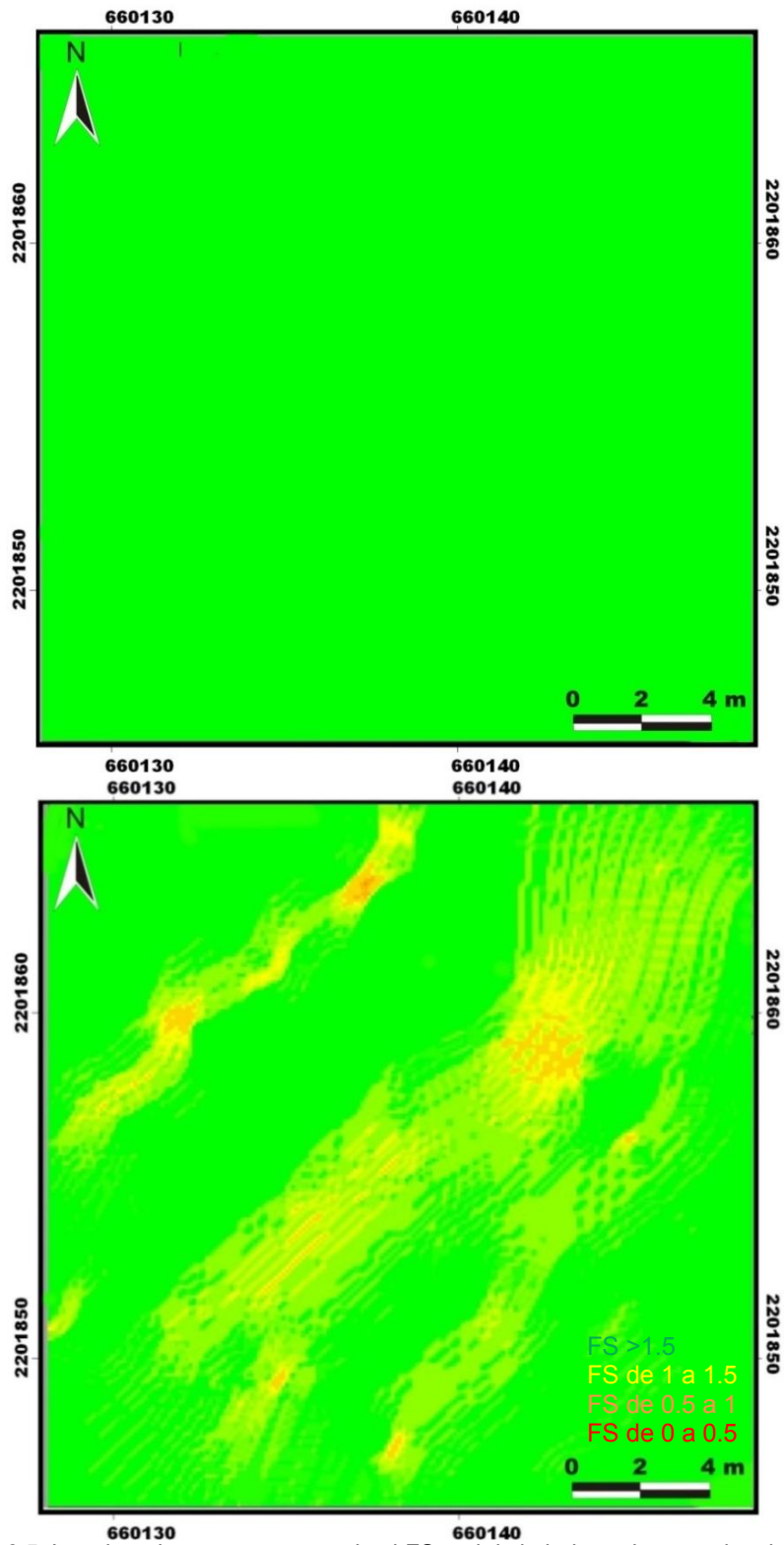
6.3.1 Resultados

Una vez que se ejecutó la simulación en el programa PCRaster, los resultados arrojaron que la ladera presenta una condición constante de estabilidad. Esto incluso tomando en cuenta los registros de precipitación de octubre de 2005, justo cuando se presentó el huracán *Stan*, el cual provocó graves daños en diversos municipios del estado de Puebla. El factor de seguridad de la ladera comprende un rango de valores que va de 1.7 a 10. Esto es consecuencia principalmente de la influencia de la cohesión, el ángulo de fricción y la profundidad del suelo (figuras 6.4 y 6.5).

Por otro lado, se llevó a cabo la simulación de diversos escenarios, en los cuales se modificaron cada uno de los diferentes parámetros que se manejaron en el modelo. Esto permitió comparar de qué manera cada uno de los diferentes factores modifica el valor del factor de seguridad. Esto se realizó en porcentajes debido a que cada una de las variables está representada por unidades distintas.

Los factores que mayor influencia tienen sobre la condición de estabilidad de la ladera son la cohesión, la pendiente, la profundidad del suelo, el ángulo de fricción y el peso del suelo; los cambios en los valores de estos parámetros afectan en gran parte al valor del factor de seguridad (tabla 6.2).

En la figura 6.6 se puede ver que la relación entre la cohesión y el factor de seguridad es lineal y directamente proporcional. La cohesión se considera el factor interno más importante, ya que cuando su valor tiende a disminuir, la condición de inestabilidad tiende a incrementarse, es decir, a menor cohesión entre las partículas del suelo, mayor es la probabilidad de que la ladera tienda a ser inestable. Por el contrario, si la cohesión es mayor, la probabilidad de que exista inestabilidad tiende a ser menor, es decir, la ladera presenta mayor grado de estabilidad. Asimismo, cabe recordar que la ladera cuenta con una cubierta vegetal, la cual, a través de las raíces, también aporta cierta cohesión lo que incrementa la estabilidad de la ladera; las raíces mantienen unidas las partículas y además contribuyen en la succión del agua al momento de que esta se infiltra en el suelo evitando su saturación.



Figuras 6.4 y 6.5. La primer imagen corresponde al FS real de la ladera, de acuerdo a los parámetros recabados. La segunda imagen corresponde a los cambios en el FS como resultado de una modificación del 100 % en los valores de las variables y la precipitación.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y MODELACIÓN.

Cohesión		Pendiente		Profundidad del suelo	
% de cambio en el parámetro	% de cambio en el Factor de Seguridad	% de cambio en el parámetro	% de cambio en el Factor de Seguridad	% de cambio en el parámetro	% de cambio en el Factor de Seguridad
-20	-15	+20	-16	+20	-13
-40	-30	+40	-28	+40	-22
-60	-45	+60	-36	+60	-29
-80	-60	+80	-43	+80	-34
-100	-75	+100	-48	+100	-38

Ángulo de fricción		Peso del suelo en condiciones normales	
% de cambio en el parámetro	% de cambio en el Factor de Seguridad	% de cambio en el parámetro	% de cambio en el Factor de Seguridad
-20	-6	+20	-12
-40	-11	+40	-21
-60	-16	+60	-28
-80	-20	+80	-33
-100	-25	+100	-37

Tabla 6.2. Variaciones en los valores de los parámetros más importantes y su relación con los cambios en el factor de seguridad.

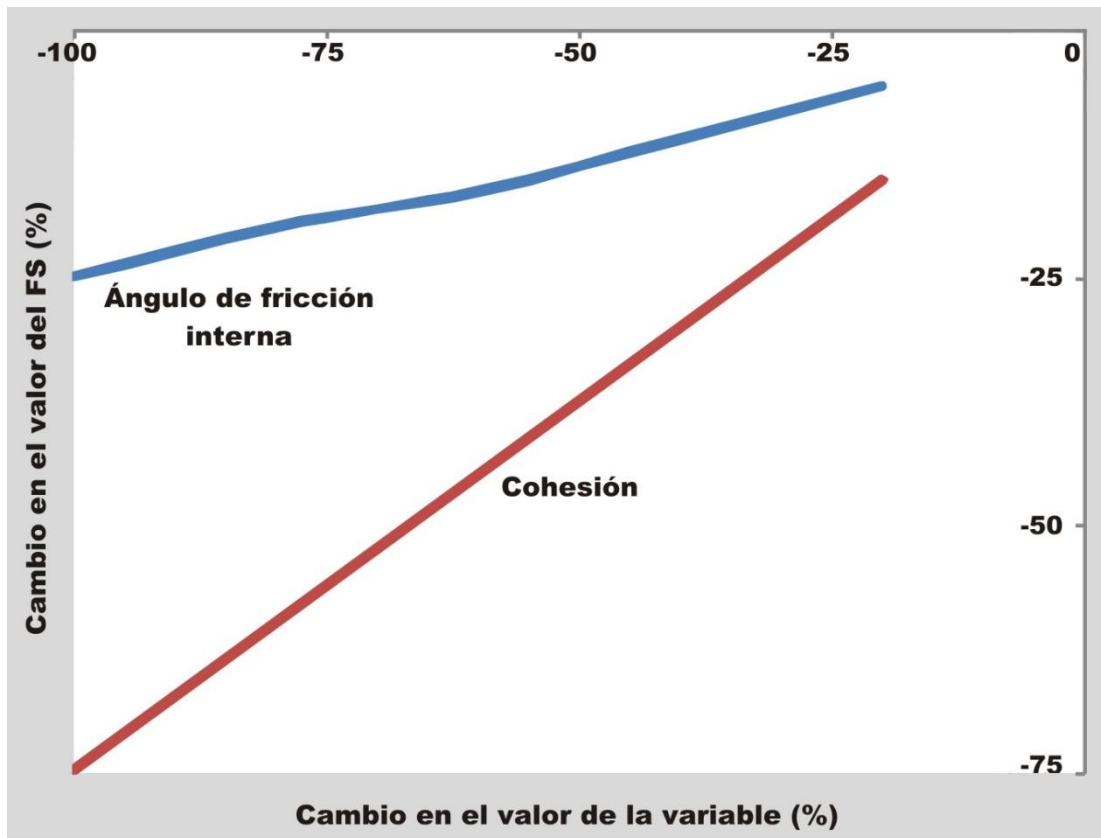


Figura 6.6. Relación entre la cohesión y el ángulo de fricción interna con el cambio en el factor de seguridad (FS).

De forma similar ocurre con el ángulo de fricción interna, el cual al descender su valor modifica de forma negativa al estado de estabilidad de la ladera. Sin embargo, no tiene la misma influencia que la cohesión, pero la combinación de ambos parámetros puede permitir que un factor externo como la lluvia o un sismo detonaran un posible proceso de remoción en masa. Además, un valor bajo en el ángulo indica que la fricción entre los materiales casi se nulifica, disminuyendo su resistencia al corte y a ser removido (Borja Baeza, 2006).

En la figura 6.7, se puede observar los cambios en el factor de seguridad que resultan del incremento en los valores de pendiente, profundidad del suelo y el peso del suelo. Se puede ver que el incremento en la pendiente modifica en mayor manera el factor de seguridad a diferencia de la profundidad y peso del suelo. Por otra parte es importante conocer los cambios en la profundidad del suelo ya que con frecuencia permite determinar la profundidad a la cual se encuentra la superficie del deslizamiento. Como se puede observar su comportamiento es similar al factor peso del suelo; el incremento en su valor actúa de forma negativa en la estabilidad de la ladera.

De forma paralela se realizaron simulaciones en las cuales se modificaron los valores de precipitación, sin embargo, la condición de estabilidad de la ladera no cambió. Esto no quiere decir que la ladera sea totalmente estable, ya que la precipitación por sí sola no puede causar cambios significativos en el factor de seguridad, es importante recordar que los procesos de remoción en masa son fenómenos complejos que involucran la interacción de diversos factores, así que los diferentes cambios combinados que ocurran en cada uno de los parámetros antes mencionados pueden modificar la condición de estabilidad de la ladera. Por ejemplo, si se presentarán cambios, de forma que disminuya el factor de seguridad, de hasta el 40% en cada uno de las variables, el factor de seguridad presentaría un cambio de 4.462 hasta cerca de 1, lo que representaría la posibilidad de movimiento. Asimismo, es importante hacer notar que en el modelo no se incluyó la información de vegetación, ni el registro histórico de los datos de precipitación, lo cual hubiese permitido un análisis mucho más detallado. Además, es importante señalar que la influencia antrópica como factor externo puede llegar a modificar la condición de estabilidad de la ladera, por ejemplo, a través del cambio de uso de suelo o por medio de la construcción de un camino en la base de la ladera.

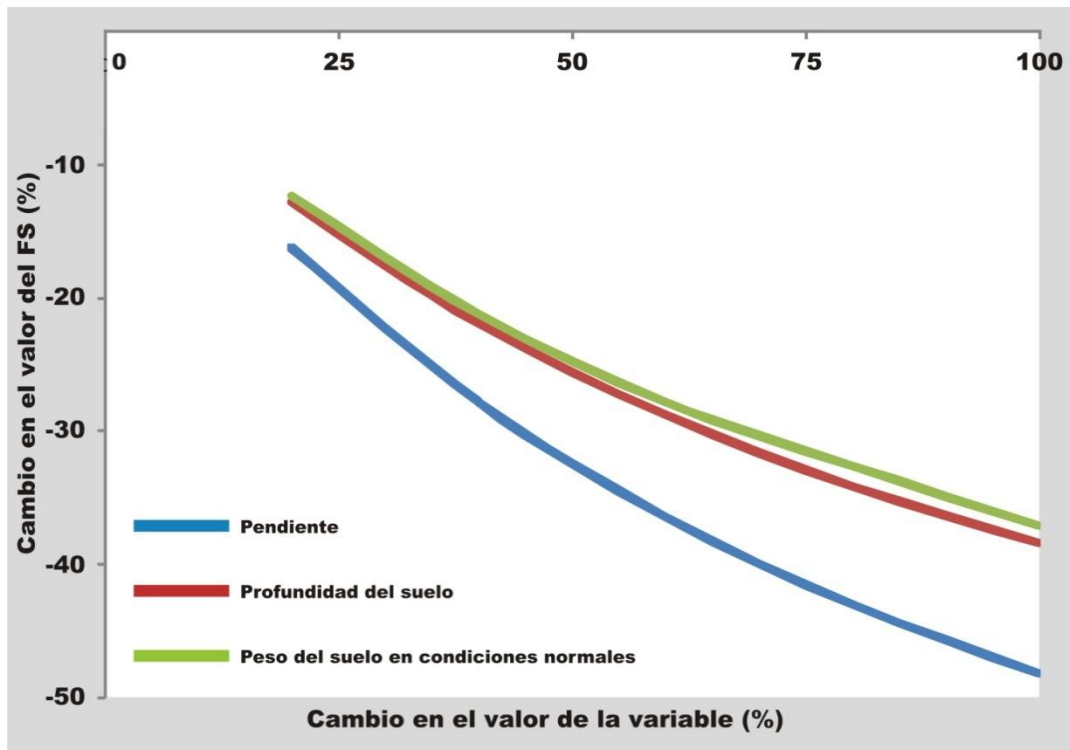


Figura 6.7. Relación entre los cambios en la pendiente, profundidad y peso del suelo con el factor de seguridad (FS).

CONCLUSIONES

Las actividades efectuadas durante esta investigación tanto en gabinete como en campo permitieron:

1. Comprender las técnicas de instrumentación utilizadas en el monitoreo de inestabilidad de laderas, y elaborar una revisión detallada de las mismas.
2. Establecer un programa básico de instrumentación de laderas en una parcela del municipio de Tlatlauquitepec en la Sierra Norte de Puebla.
3. Analizar algunos escenarios posibles de inestabilidad de laderas del área en estudio en función de los muestreos realizados en campo y laboratorio, a partir de la aplicación del software PCRaster.

De manera particular es importante señalar que el trabajo efectuado para la instrumentación del sitio fue de gran relevancia dado que fue posible identificar las ventajas y desventajas de dicha actividad. Entre las más importantes cabe destacar:

1. Después de haber identificado los sitios propicios para la instrumentación, se detectó que la toma de datos manual implicaba gran incertidumbre, ya que las personas responsables de tomar los datos de forma inicial no cumplían con esa labor y la información reportada no era real.
2. En una etapa posterior, fue posible automatizar los instrumentos, lo cual generó beneficios evidentes en cuanto al registro de datos (calidad y cantidad). No obstante, debido muy probablemente a una falla en la batería del equipo instalado en la ladera inestable, la instrumentación automatizada explotó y todos los datos se perdieron. Esta experiencia nos confirmó la necesidad de contar con una parcela experimental controlada de forma más rigurosa, así como también una supervisión más constante de la misma.
3. En relación también con el grado de control de las zonas de experimentación, a pesar de contar con el apoyo de la presidencia municipal, el enrejado que servía como protección de uno de los sitios fue removido presumiblemente por una persona de la comunidad para hacer un gallinero.
4. La integración de la población en la vigilancia y el conocimiento de las actividades realizadas fue una experiencia positiva, ya que eso permitió compartir con la comunidad el trabajo efectuado y hacerla participe de las posibles contribuciones al entendimiento de la problemática de inestabilidad de laderas.

El estudio detallado de los procesos de remoción en masa requiere cada vez más de la realización de pruebas de laboratorio y campo para entender con mayor precisión el comportamiento de los materiales que constituyen las laderas. Por esta razón, en este tipo de estudios es primordial la recolección de muestras con diversas características, para determinar sus propiedades físicas, y su relación con la estabilidad.

El proceso de instrumentación y monitoreo requiere de un amplio lapso de tiempo debido a dos aspectos. Primero, a la necesidad de calibrar los instrumentos antes de ser colocados en el campo, para así, evitar en lo posible datos erróneos o inciertos; y segundo, ya que el monitoreo requiere, además de alta tecnología, no sólo de la participación del investigador, sino también de la población de la zona de estudio. Esto último evitaría la pérdida de información valiosa, principalmente durante la época de lluvias, periodo en el cual el registro debe de hacerse prácticamente de manera continua; de esta forma los valores obtenidos arrojarían resultados más precisos y próximos a la dinámica real de los procesos.

Es necesario también –si es económicamente posible- implementar sistemas automatizados de monitoreo en laderas altamente susceptibles a procesos de remoción en masa, los cuales, además de contribuir al entendimiento del comportamiento de la dinámica de dichos procesos, permitirán el desarrollo de sistemas de alerta temprana, vitales para evitar la pérdida de vidas durante la ocurrencia de tales fenómenos.

Los registros horarios de precipitación también son parte esencial durante el estudio de procesos de ladera, ya que al ser la lluvia detonante fundamental de la inestabilidad, es posible correlacionar los movimientos con la intensidad de la precipitación, la duración y la precipitación antecedente. Es así que los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación confirman que la precipitación es un factor de gran relevancia como mecanismo desencadenante de los procesos de remoción en masa, aunque cabe recordar que la inestabilidad de una ladera está determinada en gran medida por la relación existente entre los factores internos y externos que rigen su dinámica.

En la localidad de La Unión, la precipitación ha funcionado como detonante de procesos de remoción en masa, específicamente bajo condiciones de eventos de baja frecuencia y gran magnitud (lluvias extraordinarias de 1999, huracán *Stan*). De manera particular, en este estudio fue posible identificar áreas que bajo las condiciones presentes son estables, y su equilibrio solo podría ser afectado a partir de la combinación de diversos cambios en factores tan importantes como la cohesión (disminución como resultado de la infiltración del agua de lluvia) y la pendiente (alteración de la pendiente para construir un camino o una vivienda); aspectos que presentan una amplia variabilidad espacial.

En el mismo tenor es importante resaltar que los resultados obtenidos en la presente investigación a partir de la instrumentación y el monitoreo efectuado, no pretenden de manera alguna ser la expresión cabal de la dinámica que rige las laderas del área en

estudio. Los resultados presentados son en realidad un ejemplo del tipo de información que se puede generar a partir de dichas técnicas, con la idea de representar el abanico de posibilidades y virtudes que ofrece la metodología en cuestión.

Es importante precisar que con base en la modelación efectuada es clara la necesidad de seguir aplicando técnicas de monitoreo básicas y complejas que permitan estudiar el comportamiento de las laderas en función de la influencia de distintos elementos del paisaje. Ciertamente la dinámica hidrológica del suelo es de gran relevancia, no solo considerando las propiedades de los materiales, o la vegetación natural, sino tomando en cuenta la influencia de las actividades antrópicas. Estas últimas pueden estar representadas por la construcción y cercanía de carreteras, u otro tipo de infraestructura; el cambio del uso del suelo; la creación de terrazas artificiales; los asentamientos humanos; la presencia de minas a cielo abierto; las vibraciones artificiales producidas por maquinaria o el transporte cotidiano; los canales de irrigación; el establecimiento de zonas de drenaje bajo condiciones y en zonas no aptas; entre otras.

La simulación y generación de escenarios son herramientas de gran utilidad para el entendimiento de la dinámica de una gran variedad de procesos geomorfológicos, en particular de los procesos de remoción en masa. Por ello, es necesario desarrollar y aplicar modelos más completos que incluyan la mayor cantidad de parámetros determinantes de la inestabilidad en las laderas de interés. Cabe destacar que la adquisición de dichos parámetros implicaría llevar a cabo muestreos detallados, para conocer las características físico-químicas de los materiales involucrados, así como una instrumentación y monitoreo de laderas adecuados.

El objetivo primordial de este tipo de estudios, independientemente de las metas o métodos empleados, debe estar enmarcado en el ámbito de la prevención de desastres. De esta manera, cada investigación que se desarrolla en esta área aportará técnicas o métodos que se puedan aplicar en estudios específicos o complementarios con la idea de diseñar y ejecutar estrategias y programas para evitar daños a la población.

Por último, es de gran importancia señalar que dadas las condiciones de inestabilidad de una amplia extensión del territorio nacional, es urgente la necesidad de difundir y aplicar diversas técnicas y metodologías que permitan entender la dinámica de los procesos de remoción en masa. Todo ello teniendo en mente de manera clara que dichos procesos son resultado de la compleja interacción de una gran variedad de factores, tanto de índole natural como antropogénica.

REFERENCIAS

Ackoff , R. L., Gupta, S. K. y Minas, J. S. 1962. Scientific method: Optimizing research decisions, New York, 464 pp.

Aguayo Camargo, J. E. 2005. Neotectónica y facies sedimentarias cuaternarias en el suroeste del Golfo de México, dentro del marco tectono-estratigráfico regional evolutivo del sur de México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 6, 1, UNAM, México, 19-46.

Alcántara Ayala, I. 1999. The Torviscon, Spain, landslide of February 1996: the role of lithology in a semi-arid climate. *Geofísica internacional*, Vol. 38, No. 3, 175-184.

Alcántara Ayala, I. 2000. Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. No. 41 UNAM México, 9-25.

Alcántara Ayala, I. 2002. Geomorphology, Natural Hazards, Vulnerability and Prevention of Natural Disasters in Developing Countries, *Geomorphology*, 47, 107-124.

Alcántara Ayala, I. 2004. Hazard assessment of rainfall induced landsliding in Mexico, *Geomorphology* 61, 19-40.

Anderson, M. G. y Calver, A. 1977. On the persistence of landscape features formed by a large flood. *Trans. Inst. Brit. Geogr.*, 2, 2, 243-254.

Angeli, M., Pasuto, A. y Silvano, S. 2000. A critical review of landslide monitoring experiences. *Engineering Geology* 55, 133-147.

Apostel, L. 1961. Towards the formal study of models in the non-formal sciences. In Freudenthal, H. (Ed.), The concept and the role of the model in mathematics and natural social sciences, Holland, 1-37.

Au, S. W. C. 1998. Rain-induced slope instability in Hong Kong. *Engineering Geology* 51, 1-36.

Bagnold, R.A., 1954. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid near shear. Proc. R. Soc. London, Ser. A 225, 49-63.

Bhasin, R., Grimstad, E., Otto Larsen, J., Dhawan, A., Singh, R., Verma, S. K. y Venkatachalam, K. 2002. Landslides hazards and mitigation measures at Gangtok, Sikkim Himalaya. *Engineering Geology* 64, 351-368.

Bingham, E.C., 1922. Fluidity and Plasticity. McGraw-Hill, New York, 440 pp.

Bishop, A. W. 1971. The influence of progressive failure on the choice of the method of stability analysis. Tech Note. *Geotechnique* 21, 168-172.

Bitrán, D. 2000. Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la República Mexicana durante 1999. *Cuadernos de investigación* 50, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México.

Blaikie, P.; Cannon, T.; Davis, I.; y Wisner, B. 1994. At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters. Routledge, London. pp. 284.

Borja Baeza, R. C. 2003. Análisis de susceptibilidad y riesgos asociados a procesos de remoción en masa en Zacapoaxtla, Puebla. Tesis-UNAM, México, 145pp.

Borja Baeza, R.C. 2006. Inestabilidad de laderas en Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla: análisis y modelación en materiales sedimentarios. Tesis de Maestría, Posgrado en Geografía, UNAM, México. pp. 133.

Borja Baeza, R.C. y Alcántara Ayala, I. 2004. Procesos de Remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 53, 7-26.

Borja Baeza, R.C., Esteban-Chávez, O., Marcos-López, J., Garnica-Peña, R.J., and Alcántara Ayala, I. 2006. Slope Instability on Pyroclastic Deposits: Landslide Distribution and Risk Mapping in Zacapoaxtla, Sierra Norte De Puebla, México. *Journal of Mountain Science* Vol 3 No 1. pp. 1-19.

Brand, E. 1985. Predicting the performance of residual soil slopes, Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, Vol. 5, 2541-2578.

Brand, E.W., Premchitt, J., Phillipson, H.B., 1984. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Landslides, Toronto*, vol. 1, pp 373-384.

Bromhead, E. N. 1986. The stability of slopes. Surrey University. Chapman and Hall. New York, 372 pp.

Bronstert, A., 1994. Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. Inst. für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, 46 pp.

Brunsdon, D. 1979. Weathering. In *Process in Geomorphology* (eds Embleton C, Thornes J). Edward Arnold Press, London, 73-129 pp.

Brunsdon, D. 1999. Some geomorphological consideration for the future development of landslides models. *Geomorphology* 30, 13-24.

Caballero, L., Macías, J.L., García-Palomo, A. Saucedo, G.R., Borselli, L., Sarocchi, D. and Sánchez, J.M. 2006. The September 8-9, 1998 rain-triggered flood events at Motozintla, Chiapas, México, *Natural Hazards* 39, 103-126.

Capra, L., Lugo, J. and Borselli, L. 2003a. Mass movements in tropical volcanic terrains: the case of Teziutlán, México. *Engineering Geology*, Vol. 69, 3-4. pp. 359-379.

Capra, L., Lugo, J. y Dávila, N. 2003b. Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 20-2, pp. 95-106.

Corsini, A., Pasuto, A., Soldati, M. y Zannoni, A. 2005. Field monitoring of the Corvara landslide (Dolomites, Italy) and its relevance for hazard assessment. *Geomorphology* 66, 149-165.

Crosta, G. B. y Frattini, P. 2003. Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 81-93.

Crozier, M. J. 1986. Landslides: causes, consequences and environment. Croom Helm, Londres.

Cuanalo, O. y Melgarejo, G. 2002. Inestabilidad de laderas. Sierras Norte y Nororiental del estado de Puebla. *Elementos* 47, 51-55 pp.

Chen, C.L., 1986. Chinese concepts of modelling hyperconcentrated streamflow and debris flow. Proc. 3rd Int. Symp. On River Sedimentation, Jackson, MS, 1647-1657.

Chen, H., Dadson, S. y Guan Chi, Y. 2006. Recent rainfall-induced landslides and debris flow in northern Taiwan. *Geomorphology* 77, 112-125.

Chen, H. y Lee, C. F. 2004. Geohazards of slope mass movements and its prevention in Hong Kong. *Engineering Geology*. **In Press**.

Chorley, R. J. 1967. Models in Geomorphology. In: Chorley, R. J. y Haggett, P. (Ed.) Models in Geography, Methuen, London, 59-96.

Churchill, R. R. 1979. A field technique for profiling precipitous slopes. *British Geomorphological Research Group Technical Bull.* 24, 29-34.

Daido, A., 1970. Fundamental Study of Debris Flow. Unpublished Ph.D. Kyoto, Japan, Kyoto University, 178 pp.

Daniel, V. 1955. The uses and abuses of analogy. *Operations Research Quarterly*, 6, 32-46.

De Freitas, M. y Watters, R. 1973. Some field examples of toppling failure. *Geotechnique* 23, 495-513.

Deutscher, M. S., Gasmol, J. M., Rahardjo, H., Leong, E. C. y Tang, S. K. 2000. Field measurements of pore-water pressure profiles in residual soils slopes of the Bukit Timah Granite Formation, Singapore, *Unsaturated Soils for Asia*, Rahardo, Toll & Leong (Ed.), Balkema, 777-782.

Díaz, E., Duarte, O., Cerana, J. y Fontanini, P. 2003. Ajuste metodológico en la medición de la conductividad hidráulica saturada *in situ* en suelos vertisoles y entisoles de la República Argentina mediante el permeámetro de Guelph. En Álvarez, B. y Marinero P. Estudios de la zona no saturada del suelo, Vol. VI, Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina.

Dikau, R., Schrott, L., Dehn, M., Hennrich, K., Ibsen, M-L. y Rasemann, S. 1996. The Temporal Stability and Activity of Landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC), Final Report Part 1, Summary Report, European Community, CEC Environment programme, Contract No EV5V-CT94-0454, 208 pp.

Dunbaven, M. 1983. Discussion on R. S. Evans (1981) *Q. J. Eng. Geol.* 16, 243-245.

Dunncliff, J. 1993. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. John Wiley & sons, Inc. New York.

Durville, J. L. 1993. Guide technique pour la surveillance des pentes instables. Ministère de l'équipement, du Logement et des Transports: (Fr-4).

EPOCH (European Community Programme; 1993), temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community, Flageollet, J. (ed.), 3 volumes, Contract no. 90 0025.

Esteban, O. 2003. La deforestación como mecanismo detonador de la inestabilidad de laderas, estudio caso Sierra Norte de Puebla. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, pp. 156.

Faisal, H. A. 2000. Unsaturated tropical residual soils and rainfall induced slope failures in Malaysia, *Unsaturated Soils for Asia*, Rahardo, Toll & Leong (Ed.), Balkema, 41-52.

Flores Lorenzo, P. 2002. Inestabilidad de las laderas y riesgos asociados en Teziutlán, Puebla. Tesis-UNAM, México 120 p.

Flores Lorenzo, P. y Alcántara Ayala, I. 2002. Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 49, 7-26.

Freeze, A. y Cherry, J. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Londres.

Gabet, E., Burbank, D., Putkonen, J., Pratt-Sitaula, B. y Ojha, T. 2004. Rainfall thresholds for landsliding in the Himalayas of Nepal. *Geomorphology* 63, 131-143.

Galván, A., Hernández, G., Vélez, H., Gómez, E., Becerril, A. y Luna, A. 1999. Evaluación de impacto ambiental. Informe final de actividades Sierra Norte de Puebla. Secretaría de Agricultura y Ganadería, Banco Mundial, UAM, México.

GEOSLOPE (1994) Manual del usuario.

Godwin, R. J., Seig, D. y Allot, M. 1987. Soil failure and force prediction for soil engaging discs. *Soils use and management* 3, 106-114.

Gregory, C. H. 1844. On railways cutting and embankments with an account of some slips in the London Clay, on the line of the London and Croydon Railway. *Minutes Proc. Inst. Civ. Engrs*, 3, 135-145.

Haefeli, R. 1948. The stability of slopes acted upon by parallel seepage. *Proc. 2nd. Int. Conf. on soil Mechanics, Rotterdam* 1, 57-62.

Haggett, P. y Chorley, R. J. 1967. Models, paradigms and the new Geography. En Chorley, R. J. y Haggett, P. (Ed.) *Models in Geography*, Methuen, London, 19-41.

Hammond, K. R. 1978. Toward increasing competence of thought in public policy formation. In Hammond K. R. (Ed.), *Judgment and decision in public policy formation*, Westview, 11-32.

Hanna, T. 1985. Field instrumentation in geotechnical engineering.

Hardisty, J., Taylor, D., y Metcalfe, S. 1993. Computerised environmental modeling: A practical introduction using Excel. Chichester. Jhon Wiley and Sons.

Harvey, D. 1967. *Explanation in Geography*. Edward Arnold, London.

Hengxing, L., Chenghu, Z., Lee, C. F., Sijing, W. y Faquan, W. 2003. Rainfall-induced landslide stability analysis in response to transient pore pressure: A case study of natural terrain landslide in Hong Kong. *Science in China Ser. E Technological Sciences* Vol.46, Supp., 52- 68.

Henscher, S.R., Liao, Q.-H., Monaghan, B.G., 1996. Modelling slope behaviour for open pits. *Trans. Inst. Min. Metall.* 105,37–47, A1-80.

Hernández, V. M. 2005. Caracterización de los procesos de remoción en masa en la región de Zacapoaxtla, Sierra Norte de Puebla, México. Tesis de Doctorado, Posgrado de Geografía, UNAM, México. 142 pp.

Hutchinson, J. 1968. Mass movement, en Fairbridge, R. (ed.), *Encyclopedia of earth Sciences*, Reinhold, New York, 688-695.

Hutchinson, J. N. 1982. Methods of locating slip surfaces in landslides. *British Geomorphological Research Group Technical Bull.* 30, 1-30.

Hutchinson, J.N., 1987. Mechanisms producing large displacements in landslides on pre-existing shears. *Mem. Geol. Soc. China* 9, 175–200.

Hutchinson, J. 1988. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrogeology, in Bonnard, C. (ed.), *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, vol. I, 3-35.

Ibraim, I. y Anderson, M. 2002. A new approach to soil characterization for hydrology-stability analysis models. *Geomorphology* 49, 269-279.

INEGI. 1999. Cuadernillo Estadístico Municipal, Tlatlauquitepec. Estado de Puebla, México.

Ishii, T. 1981. Microforms and slope processes of the Ashio mountains in Central Japan. *Trans. Japanese Geomorphological Union* 2, 279-290.

Iverson, R., y La Husen, R., 1989. Dynamic pore pressure fluctuations in rapidly shearing granular materials. *Science* 246,796–799.

Janbu, N. 1957. Stability analysis of slopes with dimensionless parameters. Harvard University Soil Mechanics Series N° 46.

Juárez, E. y Rico, A. 1996. Mecánica de suelos. Tomo I, Edit. Limusa, México.

Kane, W. F. y Beck, T. J. 1999. Advances in Slope Instrumentation: TDR and Remote Data Acquisition Systems. *Field Measurements in Geomechanics*, 5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Singapore, 101-105.

Krumbein, W. C. y Graybill, F. A. 1965. An introduction to statistical models in Geology, New York.

López-Mendoza, M. 2003. Diseño de un programa de prevención y mitigación de desastres asociados a inundaciones y procesos de remoción en masa en Zapotitlán de Méndez, Puebla. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México. 208 pp.

López Ramos, E 1979. Geología General de México. Tomo III. 5^a Edición. México.

López Ramos, E. 1982. Geología de México. Tomo II. 3^a Edición. Instituto de Geología.

Lugo, J., Vázquez, M., Melgarejo, G., García, F., Matías, G. 2001. Procesos gravitacionales en las montañas de Puebla. *Ciencia y desarrollo* 27, CONACYT, México, 24-33 pp.

Lugo, J., Zamorano, J.J., Capra, L., Inbar, M., Alcántara Ayala, I. 2005. Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999, causas y efectos, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Instituto de Geología*, 22, 2, 212-228.

Malone, A.W., 1988. The role of government in landslide disaster prevention in Hong Kong and Indonesia. *Geotechnical Engineering* 19, 227–252.

Marcos López, J. 2003. Distribución espacial de los procesos de remoción en masa y riesgos asociados en el municipio de Tlatlauquitepec, Puebla. Tesis-UNAM, México 151 p.

Martínez Serrano, R. 1994. Características geoquímicas de las rocas volcánicas del sistema geotérmico Los Humeros, Puebla y su relación con la mineralogía de alteración. *Geofísica Internacional*, Vol. 33, 4, 585-605.

McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. A modular three dimensional finite-difference groundwater model. *Techniques of Water Res. Invest. Book 6, A1.*

Meadows, P. 1957. Models, system and science. *American Sociological Review*, 22, 3-9.

Mendoza, M. J., Domínguez, L., Noriega, I. y Guevara, E. 2002. Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento. Informe Técnico del CENAPRED, México, 78 pp.

Mendoza, M. J., Noriega, I., Domínguez, L. 2000. Deslizamientos de laderas en Teziutlán, Puebla, provocados por las lluvias intensas de octubre de 1999. SEGOB, CENAPRED, México.

Milton, B. D. 1976. Introduction to geophysical prospecting. 3rd ed. McGraw-Hill.

Moore, R. y Brunson, D. 1996. Physico-chemical effects on the behaviour of a coastal mudslide. *Geotechnique* 46 (2), 259–278.

Noriega, I. 2005. Deslizamientos de ladera ocasionados por lluvias intensas. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, México. 104 pp.

Ochoa-Tejeda, V. 2004. Propuesta metodológica para el estudio de inestabilidad de laderas a partir de los MDT y la percepción remota. Tesis de Maestría, Posgrado en Geografía, UNAM, México. pp. 213.

Okuda, S. 1991. Rapid mass movement. In Slaymaker, O. (Ed.) Field experiments and measurement programs in Geomorphology. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 61-105.

Okuda, S. *et al.* 1979. Synthetic observation on debris flow (part 5) observation in 1978. *Disaster Prevention Research Institute Annals* 22, 1, 157-204.

Ortega Gutiérrez, F. 1992. Texto explicativo de la 5^a edición de la carta geológica de la República Mexicana, Instituto de Geología, UNAM.

Pack, R.; Tarboton, D.; y Goodwin, N. 2001. Assessing terrain stability in a GIS using SINMAP. Presented at the 15th annual GIS conference, February 19-22, Vancouver, British Columbia.

Premchitt, J., Brand, E.W., Chen, P.Y.M., 1994. Rain-induced landslides in Hong Kong, 1972–1992. *Asia Engineer* 22 (6), 43–51.

PCRaster. Manual del usuario.

Prior, D.B., Suhayda, J.N., 1979. Submarine mudslide morphology and development mechanisms, Mississippi delta. Proc. Offshore Tech. Conf., O.T.C. 3482, Houston, TX, 1055–1061.

Reynolds, E. D. y Elrick, D. E. 1985. Measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship using the Guelph permeameter. Proceeding, National Water Well Association Conference on: Characterization and Monitoring of the Vadose (Unsaturated) Zone, Denver, Colorado.

Reynolds, E. D. y Elrick, D. E. 1991. Determination of hydraulic conductivity using a tensión infiltrometer. *Journal of Soil Science* 55, 633-639.

Quezadas, A. 1961. Las rocas del basamento de la Cuenca de Tampico-Misantla. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros* 13, no. 9-10, 289-323.

Sánchez Tittla, E. 2005. Vulnerabilidad, deforestación e inestabilidad de laderas: una zonificación del riesgo en Zacatlán, Puebla. Tesis de Maestría, Posgrado en Geografía, UNAM, México. pp. 182 .

Sarma, S.K., 1973. Stability analysis of embankments and slopes. *Geotechnique* 23, 423–433.

Sarma, S. K. 1976. Stability analysis of embankments and slopes. *Proc. ASCE, J. Geotec. Eng. Div.* 105, 1511-1524.

Shin-Yu, S. y Yen-Jing, L. 2002. Effect of hydrating liquid in the hydraulic properties of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and geomembranes*, Vol. 20, 1, 19-38.

Schmidt, J. y Dikau, R. 2004. Modeling historical climate variability and slope stability. *Geomorphology* 60, 433-447.

Schoeneberger, P. y Amoozegar, A. 1990 Directional saturated hydraulic conductivity and macropore morphology of a soil-saprolite sequence. *Geoderma*, Vol. 46, 1, 31-49.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2003. Métodos de muestreo y pruebas de materiales. Límites de consistencia. Gobierno de la República, México.

Sharpe, C. 1938. Landslides and related phenomena, Columbia University Press, New York.

Shi, G.H., 1990. Forward and backward discontinuous deformation analysis of rock block systems. In: Barton, N., Stephans-son, O._Eds., Proc. Int. Symp. On Rock Joints, Loen, Norway. Balkema, Rotterdam, pp. 721–728.

Skempton, A. 1957. Stability of natural slopes in London clay. *Proc. 4th Int. Conf. On soil Mechanics. Foundation Engineering*, London, 2, 378-381.

Skempton, , A. W. 1985. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Geotechnique* 35, 3-18.

Skempton, A. W. y Delory, F. A. 1957. Stability of natural slopes in London Clay. *Proc. 4th Int. Conf. on soil mechanics and found. Engineering* 2, 378-381.

Skilling, H. 1964. An operational view. *American Scientist*, 52, 388a-396a.

Slaymaker, O. 1982. The nature of field experiments in geomorphology. *Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica*, 15, 11-17.

Slaymaker, O. 1991 The nature of geomorphic field experiments. In Slaymaker, O. (Ed.) Field experiments and measurements programs in Geomorphology. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 7-16.

Smajstrla, A. y Harrison, D. 1998. Tensiometers for Soil Moisture Measurement and Irrigation Scheduling. Agricultural and Biological Engineering Department. Florida Cooperative Extension Service. Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida.

Takahashi, T., 1983. Debris flow and debris flow deposition. In: Shahinpoor, M. (Ed.), *Advances in the Mechanics and the Flow of Granular Materials*. 2 Trans Tech Publ, Clausthal, Germany, 699-718.

Terlien, M.T.J., 1996. Modelling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides. ITC Publ. 32, Enschede, Netherlands, 50 pp.

Terzaghi, K. 1950. Mechanisms of landslides, *Geol. Soc. Amer.*, Berkeley Volume, 83-123.

van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 48, 703-708.

Varnes, D. J. 1958. Landslides types and processes, in Eckel, E. B. (ed.), *Landslides and Engineering Practice*. Highway Res. Board Special Report 29, pp. 20-47.

Varnes, D. 1978. Slope movements, types and processes, *Landslides: Analysis and control*, transportation research board, Spec. Rep. 176, 11-33, National Academy of Science, Washington.

Von Bertalanffy, L. 1978. *Tendencias en la teoría general de sistemas*. Ed. Alianza Madrid, España.

Vidal Zepeda, R. 2005. *Regiones climáticas de México*. Instituto de geografía, UNAM, Colecc. Temas selectos de Geografía de México. México, 207 pp.

Warburton, J., Holden, J. y Mills, A. 2004. Hydrological controls of surficial mass movements in peat. *Earth-Science Reviews* 67, 139-156.

Wilson, S. y Mikkelsen, E. 1978. Field instrumentation. In Schuster, R. y Krizek R. (Ed.) Landslides analysis and control. Trans. Res. Board, Special Report 176, Washington, 112-137.

Yañez García, C. y García Durán, S. 1982. Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz. Comisión Federal de Electricidad. 98 pp.

Yokoyama, K. 1983. Private communication to the author.

Zaruba, Q. y Mencl, V. 1982. Landslides and their control. Czechoslovak Academy of Sciences, 2nd ed.

Zezeze, J. L., Trigo, R. M. y Trigo, I. F. 2005. Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with North Atlantic Oscillation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 331–344.

CARTOGRAFÍA

INEGI (1984) Carta Geológica Veracruz, E-14-2, Escala 1:250000. México.

INEGI (2001) Carta Topográfica Teziutlán, E14-B15, Escala 1:50000. México

PÁGINAS DE INTERNET

www.calstatela.edu

www.its.go.jp

virtual.yosemite.cc.ca.us

geology.about.com

www.ga.gov.au

www.soton.ac.uk

www.maine.gov

geoscape.nrcan.gc.ca

gees.usc.edu

www.ce.washington.edu

www.ceanet.com.au

www.galenasoftware.com

www.engineering.usu.edu

www.mountwashington.org

www.ictinternational.com.au

www.cenapred.gob.mx

www.ipcc.ch