



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ARAGÓN**

**Neuroanálisis de variables hidro, antropo y  
geológicas que detonan deslizamientos**

**T E S I S**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Luis Javier De la Rosa Silva

**DIRECTOR DE TESIS**

Dra. Silvia Raquel García Benítez



**FES Aragón**

Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



## **Agradecimientos**

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma máter.*

*A la doctora Silvia García por invertir su valioso tiempo en guiarme con su sabio consejo.*

*Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por haberme brindado los recursos necesarios para el desarrollo de este trabajo.*

*Al Centro Nacional de Prevención de Desastres, a través del ingeniero Leobardo Domínguez, por haber compartido notas y experiencias sobre los lamentables hechos ocurridos en septiembre de 2013 en el estado de Guerrero.*

*A mis profesores de la Facultad de Estudios Superiores Aragón.*



## **Dedicatoria**

*A mis padres y hermanos.*

*A las víctimas del desastre.*



# ÍNDICE

---

<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Procesos de remoción en masa .....</b>	<b>3</b>
1.1. Definición.....	3
1.2. Clasificación.....	3
1.3. Tipos de movimientos .....	4
1.4. Causas generales de los movimientos del terreno .....	8
1.5. Rasgos geológicos y geomorfológicos que propician inestabilidades.....	10
1.6. Mecanismo de falla por aumento de la presión del agua.....	11
1.7. Atributos morfológicos .....	13
1.8. Dimensiones .....	16
1.9. Grados de actividad.....	17
1.10. Distribución espacial de la actividad.....	19
1.11. Tipos de actividad .....	19
1.12. Velocidad de los movimientos .....	19
<b>2. Redes Neuronales .....</b>	<b>23</b>
2.1. Generalidades .....	23
2.2. Descripción de una neurona artificial.....	24
2.3. Perceptrón multicapa.....	27
2.4. Regla de entrenamiento-aprendizaje .....	28
2.5. Redes neuronales artificiales y su aplicación en el análisis de procesos de remoción en masa .....	30
<b>3. Deslizamientos ocurridos en las comunidades Piedra Escalera y El Ahuehuate, municipio de Tlacoapa, Gro. ....</b>	<b>32</b>
3.1. Lluvias intensas en el municipio de Tlacoapa.....	32
3.2. Sujeto en estudio: zona de desastre .....	35
<b>4. Neuroanálisis causas-efectos.....</b>	<b>46</b>
4.1. Descripción de la base de datos .....	46



4.2. Topología del modelo .....	47
4.3. Resultados .....	53
4.4. Análisis espacial de entradas → salida .....	55
<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>58</b>
4.1. Sobre el modelo.....	58
4.2. Sobre las variables.....	58
4.3. Sobre su aplicabilidad .....	59
<b>Bibliografía .....</b>	<b>60</b>

# INTRODUCCIÓN

---

México ha sufrido el embate de fenómenos naturales que, según estadísticas publicadas por instancias gubernamentales, producen daños con un costo promedio anual de 186 vidas humanas y cerca de 2147 millones de dólares, de los cuales el noventa por ciento de estos daños se asocian con fenómenos de origen hidrometeorológico. La prevención de desastres es tema de análisis profundo en círculos científicos, políticos e incluso sociales que reconocen como imprescindible establecer estrategias y programas de largo alcance que trabajen en la advertencia oportuna y en la reducción de las consecuencias.

Las lluvias intensas derivadas de huracanes, tormentas tropicales y su interacción con frentes fríos, provocan procesos de remoción en masa (deslizamientos) que constituyen una amenaza importante en nuestro país ya que éstos, en combinación con la vulnerabilidad de poblaciones expuestas, han causado entre más de 3500 personas fallecidas y cuantiosas pérdidas materiales (datos levantados entre 1935 y 2006, (Alcántara-Ayala, 2008)).

En este trabajo de tesis se presenta una alternativa cognitiva para la cuantificación del impacto de las condiciones geológicas, antrópicas e hídricas en los procesos de remoción de masas generados por lluvias. En la propuesta se examinan las situaciones como pares *condiciones*→*efectos* y se modelan con redes neuronales artificiales. La idea es que a través de un profundo conocimiento sobre los fenómenos (saber dónde, cuándo y cómo nos afectan), la identificación de los agentes perturbadores y la caracterización de los sistemas afectables se pueden plantear de manera más *inteligente* las acciones para mitigar y reducir riesgos antes de la ocurrencia de los fenómenos, a través del reforzamiento y adecuación de la infraestructura y preparando a la población para que sepa qué hacer antes, durante y después de una contingencia.

En el Capítulo I de esta tesis se explican los diferentes tipos de movimientos de masas, teniendo en cuenta el volumen y materiales involucrados, la forma en que se desplaza, y la velocidad a la que lo hace, además se enuncian los rasgos característicos que indican la posibilidad de un deslizamiento, los atributos morfológicos de un movimiento idealizado, el grado y prototipos de actividad.

En el siguiente capítulo, el Capítulo II, son explicadas brevemente las características básicas de las redes neuronales artificiales, también llamadas RN, y sus fundamentos matemáticos, la arquitectura, las reglas de entrenamiento y la metodología general para concretar un modelo neuronal.

En el Capítulo III se hace una presentación del sitio en estudio que servirá como material para describir la metodología y probar su eficacia. Se describen los deslizamientos de suelos y rocas ocurridos en las comunidades de Piedra Escalera y El Ahuehuate, pertenecientes al municipio de Tlacoapa, región de La Montaña, estado de Guerrero, a causa de las lluvias intensas que a mediados del mes de septiembre del 2013 azotaron al país.

En el Capítulo IV se detalla la interpretación de la base de datos registrada en campo para su explotación con algoritmos neuronales, la forma en que se estructuró el modelo, los resultados obtenidos y su correspondencia con lo registrado, y algunos ejemplos del uso de la herramienta para prospección y simulación de escenarios.

Finalmente, en el Capítulo V se concluye sobre el tipo de resultados, las limitantes de este modelo y el potencial que tienen las redes neuronales en el desarrollo de sistemas de alerta económicos y asequibles.

## PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

---

### 1.1 DEFINICIÓN

Los procesos de ladera igualmente denominados procesos gravitacionales, procesos de remoción en masa, o en un sentido general, deslizamientos de tierra (Alcántara-Ayala, 2000), son movimientos talud abajo de materiales térreos, que resultan de un desplazamiento hacia abajo y hacia afuera de suelos, rocas y vegetación, bajo la influencia de la gravedad (CENAPRED, 2006)

### 1.2 CLASIFICACIÓN

En la literatura se tiene registro de diferentes criterios para clasificar a los procesos de remoción en masa. Dado que este trabajo no tiene como objetivo adentrarse al análisis de cada uno de estos, se ha considerado tomar como referencia en este apartado el trabajo expuesto por Alcántara-Ayala (2010), quien ha destacado la importancia del uso correcto de los términos empleados en la observación, descripción y análisis de los movimientos o procesos de remoción en masa.

Existe una gran variedad de clasificaciones de los procesos de remoción en masa, lo cual es resultado de su complejidad y de los enfoques a través de los cuales se han llevado a cabo investigaciones a este respecto en una amplia gama de disciplinas. Estas clasificaciones se han basado, de manera general, en aspectos como los atributos morfológicos de los movimientos, tanto de la superficie de ruptura como del área de depósito (Skempton, 1953; Blong, 1973, Brunsten, 1973; Crozier, 1973); en el tipo y velocidad del movimiento (Sharpe, 1938; Ward, 1945; Hutchinson, 1968, Zaruba y Mencl, 1969; Coates, 1977; Varnes, 1978); tamaño y tipo de los materiales involucrados (Zaruba y Mencl, 1969; Coates, 1977; Varnes, 1978); antigüedad del movimiento (Zaruba y Mencl, 1969); *grado* de actividad (Erskine, 1973); y tipo climático (Sharpe, 1938; Hutchinson, 1968).

La clasificación de los procesos de remoción en masa más aceptada y aplicada a nivel internacional se basa en el mecanismo del movimiento, por lo que derivado de éste y de manera general, estos movimientos se dividen en caídas o desprendimientos, vuelcos o desplomes, deslizamientos, expansiones laterales, flujos y movimientos complejos.

Una concreta clasificación que considera estos aspectos es la ofrecida por el programa EPOCH (1993), el cual a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988) elabora una diferenciación entre el tipo de movimiento y los materiales involucrados (Tabla 1.1). De acuerdo con esta clasificación, los diferentes movimientos se subdividen de acuerdo con los materiales formadores, los cuales pueden ser rocas, detritos o derrubios y suelos.

## 1.3 TIPOS DE MOVIMIENTOS

### 1.3.1 Desprendimientos o caídas

Los desprendimientos o caídas (Figura 1.1) son los movimientos en caída libre de distintos materiales tales como rocas, detritos o suelos. Este tipo de movimiento se origina por el desprendimiento del material de una superficie inclinada, el cual puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo posteriormente. El material considerado no incluye las pequeñas partículas, resultado del intemperismo. Estos movimientos son definidos con base en el material involucrado, por lo que se clasifican de manera general en caídas o desprendimiento de rocas, caídas o desprendimiento de derrubios y caídas o desprendimientos de suelos.

La velocidad de estos movimientos puede ser rápida o extremadamente rápida, a excepción de cuando la masa desplazada sufre socavamiento o incisión, y el desprendimiento o caída es precedido por deslizamientos o vuelcos que separan el material desplazado de la masa intacta (Cruden y Varnes, 1996). Estos movimientos ocurren en laderas fuertemente inclinadas, tanto de tipo natural como artificial.

**Tabla 1.1.** Clasificación de los procesos de remoción en masa

Mecanismo de movimiento	Tipo de material involucrado			
	Tipo	Roca	Derrubios	Suelo
Desprendimientos		Caída o desprendimiento de rocas	Caída o desprendimiento de derrubios	Caída o desprendimiento de suelos
Vuelco o desplome		Vuelco o desplome de rocas	Vuelco o desplome de derrubios	Vuelco o desplome de suelos
Deslizamiento rotacional simple		Individual Múltiple Sucesivo	Individual Múltiple Sucesivo	Individual Múltiple Sucesivo
Deslizamiento traslacional o de bloques no rotacional		Deslizamiento de roca en bloque	Deslizamiento de derrubios en bloque	Deslizamiento traslacional de suelos
Deslizamiento planar		Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de derrubios	Coladas de barro
Flujos		Flujo de rocas	Corrientes de derrubios	Flujos de tierra
Expansión lateral		Expansiones laterales en rocas	Expansiones laterales en derrubios	Expansiones laterales en suelos
Complejo		Ejemplo: Alud de rocas	Ejemplo: Flujo deslizante	Rotación con flujo de tierras

Fuente: EPOCH (1993) a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988)

### **1.3.2 Vuelcos o desplomes**

Un vuelco o desplome (Figura 1.2) consiste en la rotación de una masa de suelo, detritos o roca en torno a un eje o pivote determinado por su centro de gravedad. Su movimiento es hacia adelante o hacia la parte externa, por lo cual involucra inclinación o basculamiento, pero no implica colapso, frecuentemente ocurren en una o más superficies, en materiales que poseen un sistema de discontinuidades preferencial como diaclasas, grietas de tensión o superficies columnares. Se clasifican en vuelcos o desplome de rocas, de derrubios o detritos y de suelos.

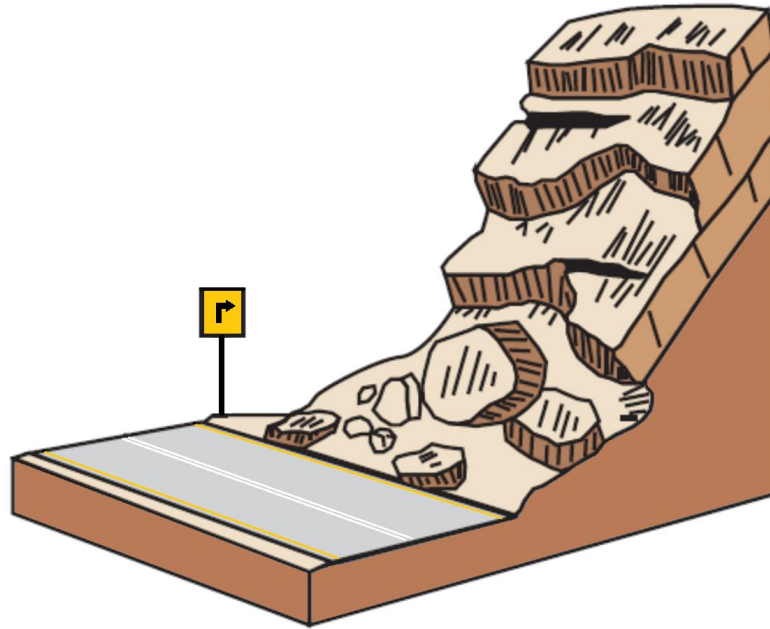
### **1.3.3 Deslizamientos**

Los deslizamientos (Figura 1.3) son movimientos ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, la cual ocurre sobre una superficie reconocible de ruptura. Con frecuencia, la formación de grietas transversales es la primera señal de la ocurrencia de este tipo de movimientos, las cuales se localizan en la zona que ocupará el escarpe principal. La superficie de ruptura define el tipo de deslizamiento, por lo que las superficies curvas, cóncavas o en forma de cuchara se asocian a deslizamientos rotacionales, las superficies de ruptura semi-planas u onduladas a los movimientos traslacionales y las superficies planas a los deslizamientos planos. En los deslizamientos rotacionales, los bloques ubicados en la parte superior se inclinan hacia atrás, el escarpe principal regularmente es vertical, la masa desplazada se acumula ladera abajo y su deformación interna es de muy bajo grado. Movimientos posteriores al inicial, pueden ocasionar el retroceso progresivo de la corona. La velocidad y extensión de este tipo de movimientos es muy variable. Los deslizamientos traslacionales son menos profundos que los rotacionales, y al igual que los planos, involucran un movimiento paralelo a la superficie, el cual está en gran medida controlado por superficies de debilidad de los materiales formadores.

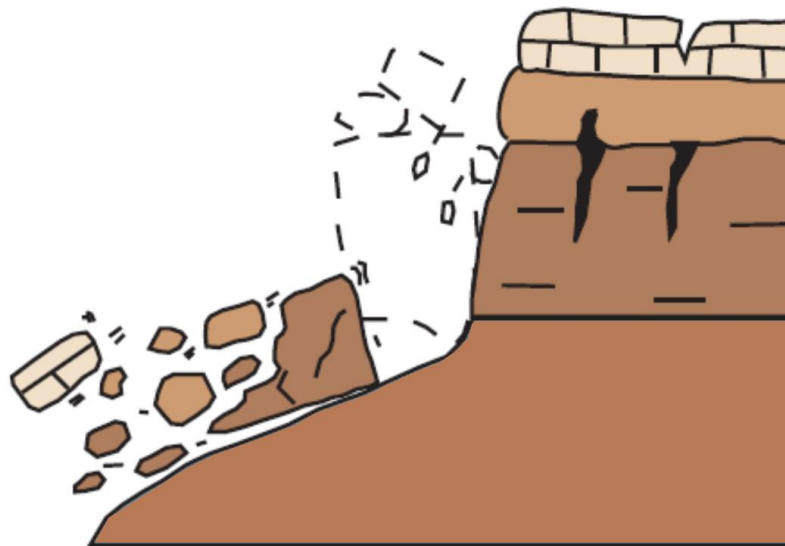
Con base en las etapas del movimiento, los deslizamientos rotacionales se clasifican en simples, múltiples y sucesivos, clasificación que también se aplica a las variantes resultantes del tipo de material (ejemplo: deslizamiento rotacional de roca, de derrubio, de suelo; y por ende, deslizamiento de roca individual, múltiple, sucesivo, etc.). Los deslizamientos traslacionales se subdividen en deslizamientos de roca en bloque, deslizamientos de derrubio en bloque y deslizamientos traslacionales de suelos. Los deslizamientos planos se clasifican en simples términos a partir también del material involucrado, por lo cual los principales tipos son los deslizamientos de rocas, deslizamientos de derrubios y las coladas de barro.

### **1.3.4 Flujos**

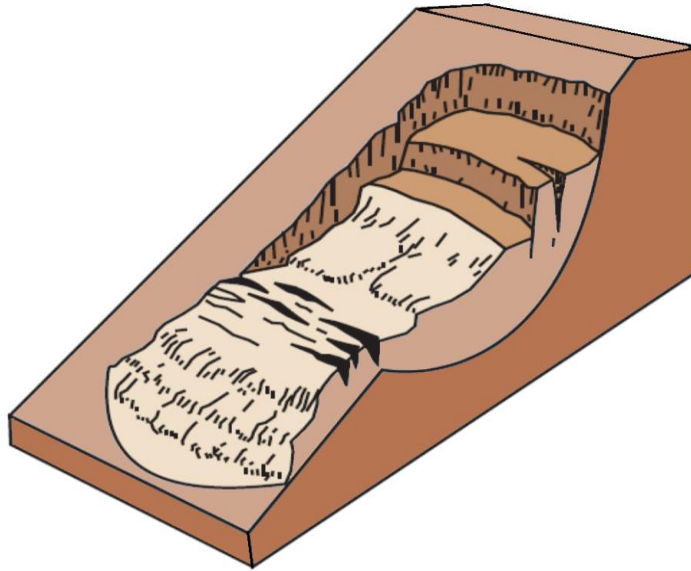
Los flujos (Figura 1.4) son movimientos espacialmente continuos, en los que las superficies de cizalla son muy próximas, de poca duración y, por consiguiente, difíciles de observar. El movimiento de los flujos es muy parecido al de un fluido viscoso, razón por la que la distribución de velocidades no es homogénea y origina la formación de lóbulos a partir del predominio del movimiento intergranular. Los flujos envuelven todos los tipos de materiales disponibles y se clasifican con base en su contenido, por tanto, se dividen en flujos de rocas, flujos o corrientes de derrubios y flujos de arena o suelo.



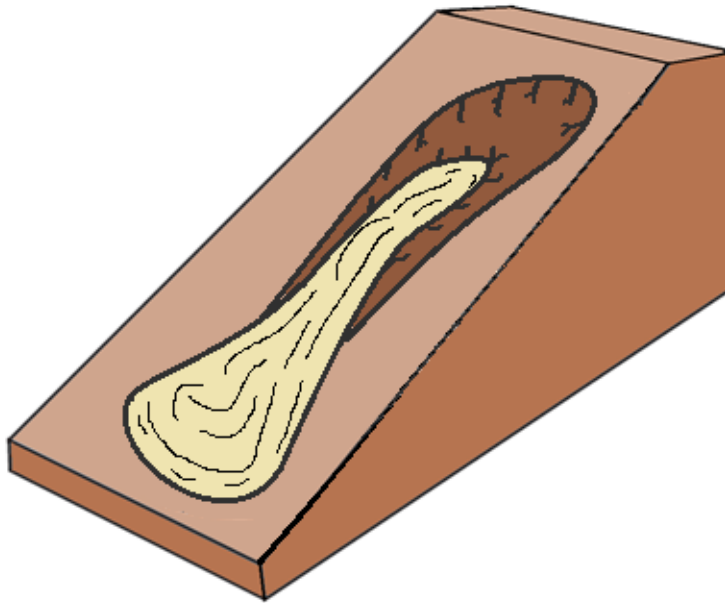
**Figura 1.1** Desprendimientos o caídas (WP/WLI, 1990)



**Figura 1.2** Vuelcos o desplomes (WP/WLI, 1990)



**Figura 1.3** Deslizamiento (WP/WLI, 1990)

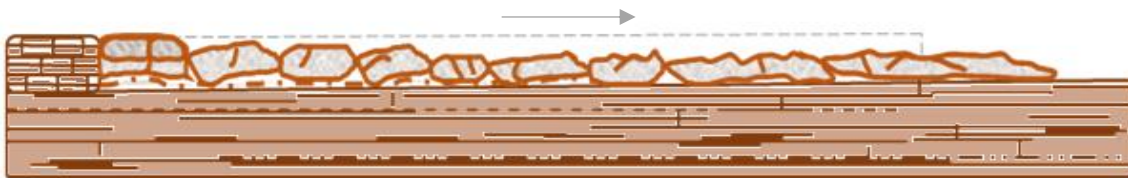


**Figura 1.4** Flujo (WP/WLI, 1990)



### 1.3.5 Expansiones laterales

Estos movimientos (Figura 1.5) son resultado de la fracturación y expansión de suelos o masas de roca compactos, debido a la licuefacción o fluidización del material subyacente, ocurren cuando materiales gruesos, como fragmentos de rocas, grava, etc., están inmersos en una matriz de material más fino o contienen arcillas. La superficie de corte no está bien definida, la masa involucrada se mueve rápida y retrogresivamente, y puede tener una duración hasta de algunos minutos. Este tipo de movimientos ocurre principalmente en ambientes lacustres y marinos de poca profundidad, los cuales se localizan en las márgenes de los antiguos casquetes de hielo en las costas de Noruega, Alaska y Canadá. Los flujos pueden ser desencadenados por movimientos rotacionales o por efectos sísmicos. Se clasifican en expansiones laterales en rocas, en derrubios y en suelos.



**Figura 1.5** Expansiones laterales (WP/WLI, 1990)

### 1.3.6 Movimientos complejos

Los movimientos complejos ocurren cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al ir desplazándose ladera abajo, entre los más importantes cabe destacar los aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes. Las avalanchas o aludes de rocas consisten en la movilización a gran distancia de grandes masas de rocas y detritos, las cuales viajan a gran velocidad. Los flujos deslizantes son el resultado del colapso repentino y de gran extensión de una masa de material granular o de detritos que viajan a velocidades rápidas o extremadamente rápidas, como resultado de un efecto perturbador. El material involucrado es metaestable, con una estructura suelta y alta porosidad. Durante el colapso, la carga del terreno es transferida a los fluidos de los poros (generalmente agua), lo que ocasiona un incremento en la presión de estos últimos y, por ende, la pérdida de resistencia, ocasionando el flujo deslizante (Hutchinson, 1988). Por lo general, la morfología resultante es alargada y estrecha, y el área de depósito tiene un espesor relativamente bajo.

## 1.4 CAUSAS GENERALES DE LOS MOVIMIENTOS DEL TERRENO

Los procesos de remoción en masa o movimientos del terreno ocurren debido a dos causas fundamentales, las cuales son de tipo externo y de tipo interno (Terzaghi, 1950; Selby, 1993). Las causas externas son todas aquellas que producen un incremento en la tensión o esfuerzos, pero no en la resistencia de los materiales, en tanto que las causas internas son las que disminuyen la resistencia de los materiales sin cambiar la tensión o esfuerzos. De esta manera, se puede decir que los procesos de remoción en masa son aquellos movimientos de

masas de suelo, detritos y rocas que ocurren en una ladera *como* resultado de la influencia directa de la gravedad, y que pueden ser desencadenados por factores internos o externos, o bien, en términos más sencillos, que estos procesos ocurren cuando una porción de la ladera se vuelve muy débil para soportar su propio peso.

Entre los cambios de tipo externo más importantes se encuentran los cambios geométricos o de peso que sufren las laderas (como resultado de erosión, socavamiento, incisión de un río, excavaciones artificiales, cargas y descargas), las tensiones transitorias naturales y artificiales a las que son expuestas (sismos, vibraciones por explosiones o uso de maquinaria pesada) y los cambios en el régimen hidrológico (intensidad y duración de las precipitaciones, etc.). Los principales cambios de tipo interno se relacionan con la transformación de los materiales a través de movimientos progresivos (por expansiones laterales, fisuras, etc.), procesos de intemperismo y erosión. Existe una gran variedad de causas internas y externas en torno a las cuales se originan los procesos de ladera, éstas han sido categorizadas por Cruden y Varnes (1996) con base en procesos de distinta índole (Tabla 1.2). Los procesos de ladera ocurren gracias a la combinación de este tipo de factores, ya que todos ellos contribuyen en diferente grado a su inestabilidad. Sin embargo, según ciertas circunstancias, algunos de estos elementos pueden ser considerados como factores desencadenantes decisivos como, por ejemplo, la presencia de lluvias extraordinarias en materiales permeables, razón por la cual no sólo es importante conocer los mecanismos y tipos de movimientos, sino también los factores que causan y controlan este tipo de procesos en espacios definidos.

**Tabla 1.2.** Causas de los movimientos del terreno.

<b>Causas de índole geológica</b>	<b>Causas por procesos físicos</b>
Materiales débiles.	Precipitación intensa.
Materiales sensibles.	Derretimiento rápido de nieve o hielo.
Materiales intemperizados.	Eventos de precipitación extraordinarios.
Materiales sujetos a cizallamiento	Actividad sísmica.
Materiales con fisuras y diaclasas.	Erupciones volcánicas.
Discontinuidades orientadas adversamente (esquistosidad, planos de inclinación).	Gelifracción.
Discontinuidades estructurales (fallas, discordancias, contactos).	Expansión e hidratación de arcillas.
Permeabilidad contrastante.	
Contraste de materiales con diferente plasticidad.	
<b>Causas morfológicas</b>	<b>Causas de origen antrópico</b>
Levantamientos tectónicos o volcánicos.	Excavación de laderas o del pie de las laderas.
Erosión glacial.	Incremento de peso en las laderas.
Erosión fluvial al pie de las laderas.	Disecación de cuerpos de agua (presas).
Erosión marina al pie de los acantilados.	Deforestación.
Erosión glacial al pie de las laderas.	Irrigación.
Erosión en márgenes laterales.	Actividad minera.
Erosión subterránea.	Vibraciones artificiales.
Remoción de la vegetación (por incendios y sequías).	

Fuente: Cruden y Varnes (1996).

## 1.5 RASGOS GEOLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS QUE PROPICIAN INESTABILIDADES

La inestabilidad de laderas en nuestro país ocurre con frecuencia en suelos residuales y durante periodos de lluvias intensas. Los suelos residuales son aquellos materiales que son producto de la descomposición química de las rocas, producto del intemperismo provocado por el clima; se trata de geomateriales no transportados, disgregables o de consistencia blanda que se mantienen en el mismo sitio en que fueron modificados a partir de la roca original. Con frecuencia exhiben incluso la misma apariencia que la roca original. Amplias zonas del territorio nacional están cubiertas con suelos residuales, destacando las localizadas en la vertiente del Golfo de México y en las porciones sureste y sur de la vertiente del Pacífico; en ellas pueden distinguirse estos suelos de colores rojizos.

El grado de alteración y la extensión a la que la estructura original de la masa de roca se destruye o meteoriza varia con la profundidad. Se da lugar así a perfiles de alteración que comprenden materiales con propiedades mecánicas muy diferentes (Figura 1.6) desde aquellas propias de la roca franca que se encuentra a profundidad, hasta las de suelo completamente intemperizado o alterado, o simplemente residual, que se observa en la superficie del terreno. No es de extrañarse entonces, que con frecuencia las superficies de deslizamiento en materiales residuales se ubiquen relativamente cerca y paralelas a la superficie del terreno, como ocurrió en el deslizamiento de Tezihutlán, Puebla.



**Figura 1.6** Perfil de alteración de un suelo residual y de la roca basal, modificada de CENAPRED (2006)

Las características principales de los materiales residuales son: a) usualmente muy heterogéneos, lo que los hace difíciles de muestrear, ensayar y caracterizar; b) se encuentran casi siempre en una condición no saturada, esto es que sus poros contienen no sólo agua sino también aire; y c) invariablemente tienen altas permeabilidades, lo que determina que sus propiedades sean particularmente sensibles y de una respuesta muy rápida a las influencias hidráulicas externas. Sin embargo, debe advertirse que los deslizamientos no sólo ocurren en suelos residuales, sino que incluso suceden en formaciones rocosas, como resultado de una variedad de causas, por lo que en el campo deberán distinguirse las características indicadas en la Tabla 1.3, que son síntomas de inestabilidad de laderas.

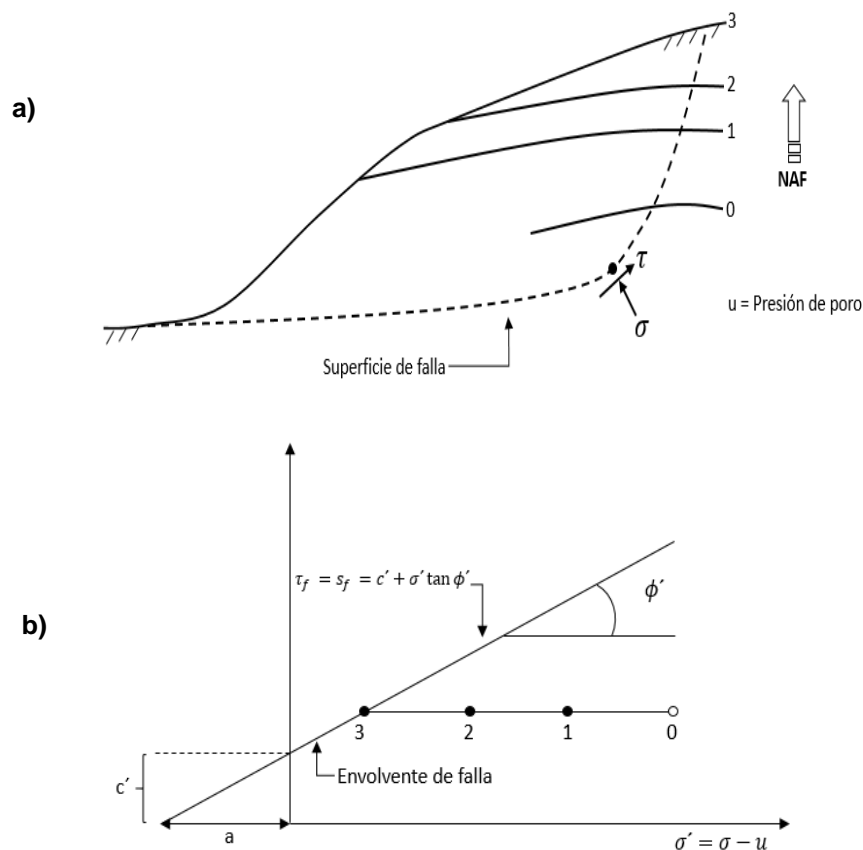
**Tabla 1.3** Identificación de rasgos característicos que indican la posibilidad de un deslizamiento.

<b>Rasgos característicos</b>	<b>Interpretación</b>
Salientes, hendiduras y agrietamientos en la parte alta (corona de una ladera.	Son causados por deslizamientos previos, o son signo de deslizamientos futuros.
Taludes con una superficie empinada o irregular.	Atestiguan los remanentes de depósitos de un deslizamiento ocurrido en el pasado; éstos tienen un potencial alto de convertirse en un flujo o avalancha.
Depresiones en cualquier zona de la ladera.	Generalmente están cubiertas por acumulaciones de suelos colectando agua superficial. En la corona de una ladera, las depresiones dibujan el contorno de un posible escarpe de falla.
Taludes con filtraciones de agua.	Éstas pueden estar influenciadas por agua proveniente del interior de la ladera, incluso resultado de fenómenos tales como tubificación y erosión interna.
Taludes con bloques rocosos o muchos cantos rodados.	Ante pendientes fuertes y con echados favorables, tienen un alto potencial para generar caídos de roca.
Presencia o ausencia de vegetación.	Los cambios bruscos de vegetación pueden estar asociados a la presencia o ausencia de agua en la ladera, la que influye en las propiedades mecánicas del terreno; o bien, una discontinuidad tal como una grieta o falla que favorezca una inestabilidad.
La inclinación de árboles, postes o cercas (en el sentido del movimiento) ubicadas en el cuerpo de una ladera.	Indican un movimiento pendiente abajo de un espesor de materiales propensos a la falla; usualmente estos movimientos son lentos.
Agrietamientos en banquetas, muros y pisos de zonas urbanas desarrolladas en cañadas, cerros o montañas	Indican el movimiento y la posibilidad de falla de una ladera, la cual puede ser acelerada por las fugas en los sistemas de drenaje y de abastecimiento de agua

## **1.6 MECANISMO DE FALLA POR AUMENTO DE LA PRESIÓN DE AGUA**

En cada ladera ocurren fluctuaciones en los niveles del agua del terreno, de acuerdo con las variaciones estacionales y cambios climáticos a los que año con año está expuesta. Así, en la

temporada de sequía el suelo se mantiene parcialmente saturado, generándose incluso tensión o presión negativa en el agua, lo que define temporalmente una resistencia cortante relativamente alta del material. Al ocurrir precipitaciones intensas y prolongadas esa succión se pierde e incluso se genera una presión positiva en el agua (también conocida como presión de poro); en la Figura 1.7a se esquematiza el aumento del tirante de agua dentro del suelo de la ladera (niveles 0, 1, 2 y 3), que es lo que sucedería internamente ante lluvias intensas. El aumento de presión de poro ( $u$ ) en la superficie potencial de falla va en detrimento de la resistencia del suelo, atendiendo al principio de los esfuerzos efectivos. La ecuación incluida en la Figura 1.7b establece que la resistencia al esfuerzo cortante ( $s_f$ ) es proporcional al esfuerzo normal efectivo ( $\sigma'$ , que es igual al esfuerzo total menos la presión de poro) dada su naturaleza friccionante; los parámetros de resistencia son la cohesión efectiva ( $c'$ ) y el ángulo de fricción interna ( $\phi'$ ); así pues, cuando la presión de poro aumenta (por la elevación del nivel de aguas freáticas, NAF) el nivel de esfuerzos efectivos disminuye, y consecuentemente también se reduce la resistencia efectiva del suelo. En la Figura 1.7 b aparece la trayectoria de esfuerzos efectivos al aumentar la presión de poro (secuencia 0, 1, 2 y 3), hasta tocar la envolvente de resistencia.

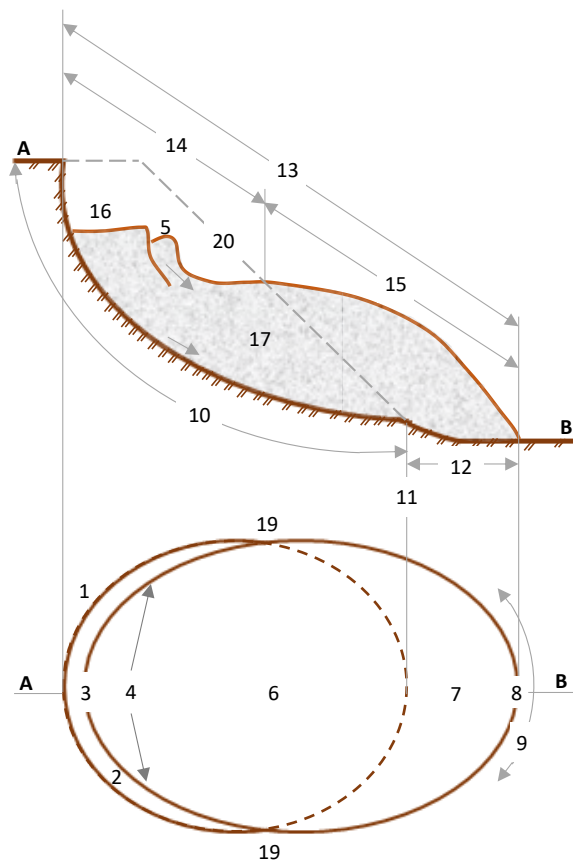


**Figura 1.7** Efectos de la presión del agua sobre la resistencia al esfuerzo cortante de los suelo, atendiendo al nivel que alcanza dentro de la ladera, (modificada de CENAPRED (2006))

Lo antes expuesto resulta el único mecanismo en zonas no pobladas. Sin embargo, en centros urbanos o rurales desarrollados en los alrededores de una ladera, a las lluvias debe agregarse la muy frecuente ocurrencia de fugas de agua en los servicios de alcantarillado y suministro de agua potable. Los volúmenes escapados de agua generan a fin de cuentas, presiones de poro en los intersticios de los suelos de la ladera, equivalentes a las que induce el agua de lluvia, con lo que disminuyen la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos en forma similar.

## 1.7 ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS

Las características morfológicas de los movimientos de ladera reflejan el tipo de mecanismo que les dio origen, razón por la cual es importante considerar sus diferentes atributos en el entendimiento del proceso. Con base en un diagrama elaborado por Varnes (1978), en el cual se muestran las principales características de un deslizamiento de tierras, la comisión de movimientos del terreno de la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (IAEG) diseñó un diagrama idealizado (Figura 1.8) para representar los atributos morfológicos de un movimiento de terreno.



**Figura 1.8** Diagrama idealizado de los atributos morfológicos de un movimiento de ladera (IAEG Commission on Landslides, 1990).

En el glosario multilingüe elaborado por el WP/WLI de la UNESCO, se presenta la traducción de los términos identificados como atributos morfológicos (Tabla 1.4). Dichos conceptos reflejan la idea de una uniformidad en el uso de la terminología relacionada con los movimientos del terreno; sin embargo, algunos de ellos son ajenos a nuestro lenguaje común, por lo que se incluye una propuesta para la traducción y uso de esos términos en español, la cual es retroalimentada al considerar de igual manera la proposición similar que hacen Corominas y García-Yagüe (1997).

**Tabla 1.4** Atributos morfológicos de un movimiento idealizado

<b>WP/WLI (Inglés)</b>	<b>WP/WLI (Español)</b>	<b>Corominas y García (1997)</b>	<b>Propuesta</b>
1. Crown	Corona	Coronación	Corona
2. Main scarp	Escarpe principal	Escarpe principal	Escarpe principal
3. Top	Cima	Extremo superior	Margen superior
4. Head	Cabeza	Cabecera	Cabecera
5. Minor scarp	Escarpe menor	Escarpe secundario	Escarpe secundario
6. Main body	Cuerpo principal	Cuerpo principal	Cuerpo principal
7. Foot	Pata	Pie	Pie o pedestal
8. Tip	Punta	Extremo inferior	Margen inferior
9. Toe	Puntera	Arco o lóbulo inferior	Lóbulo frontal
10. Surface of rupture	Superficie de falla	Superficie de rotura	Superficie de ruptura
11. Toe of surface of rupture	Punta de la superficie de falla	Extremo inferior de la superficie de rotura	Extremo inferior de la superficie de ruptura
12. Surface of separation	Superficie de separación	Superficie de separación	Superficie de separación
13. Displaced material	Material desplazado	Material desplazado	Material desplazado
14. Zone of depletion	Zona de reducción	Zona de hundimiento	Zona de hundimiento
15. Zone of accumulation	Zona de acumulación	Zona de acumulación	Zona de acumulación o depósito
16. Depletion	Reducción	Hundimiento	Hundimiento
17. Depleted mass	Masa reducida	Masa hundida o deprimida	Masa hundida o disminuida
18. Accumulation	Acumulación	Acumulación	Acumulación o depósito
19. Flank	Flanco	Flanco	Flanco
20. Original ground surface	Superficie original del terreno	Superficie original del terreno	Superficie original del terreno

1. La corona es la zona superior y adyacente al escarpe principal, en la que el material no ha sido desplazado.
2. El escarpe principal es la superficie abrupta localizada en la arista superior, resultado del movimiento.

3. El margen superior es el punto más alto de contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.
4. La cabecera es la porción superior del movimiento a lo largo del contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.
5. El escarpe secundario es la superficie abrupta localizada en el material desplazado producido por movimientos diferenciales.
6. El cuerpo principal es la parte del material desplazado que sobreyace la superficie de ruptura entre el escarpe principal y el extremo inferior de la superficie de ruptura.
7. El pie o pedestal es la porción del movimiento del terreno que se ha desplazado más allá del extremo inferior de la superficie de ruptura y que sobreyace la superficie original del terreno.
8. El margen inferior es el punto del lóbulo frontal que se encuentra más alejado del margen superior del movimiento del terreno.
9. El lóbulo frontal es la parte más baja y comúnmente el margen curvo del material desplazado por el movimiento; la parte más distal del escarpe principal.
10. La superficie de ruptura es la superficie que forma o que ha formado el límite más bajo del material desplazado abajo de la superficie original del terreno.
11. El pie de la superficie de ruptura es la intersección entre la parte más baja de la superficie de ruptura del movimiento y la superficie original del terreno (generalmente se encuentra sepultada).
12. La superficie de separación es la parte de la superficie original del terreno que sobreyace el pie o pedestal del movimiento.
13. El material desplazado es el material que ha sido desplazado de su posición original en la ladera por el movimiento. Forma tanto la masa hundida o disminuida, como el depósito o acumulación.
14. La zona de hundimiento es el área del movimiento dentro de la cual el material descansa abajo de la superficie original del terreno.
15. La zona de acumulación o depósito es el área del movimiento dentro de la cual el material desplazado descansa sobre la superficie original del terreno.
16. El hundimiento es el volumen rodeado por el escarpe principal, la masa hundida o disminuida y la superficie original del terreno.
17. La masa hundida o disminuida es el volumen de material desplazado, el cual sobreyace la superficie de ruptura, pero subyace la superficie original del terreno.

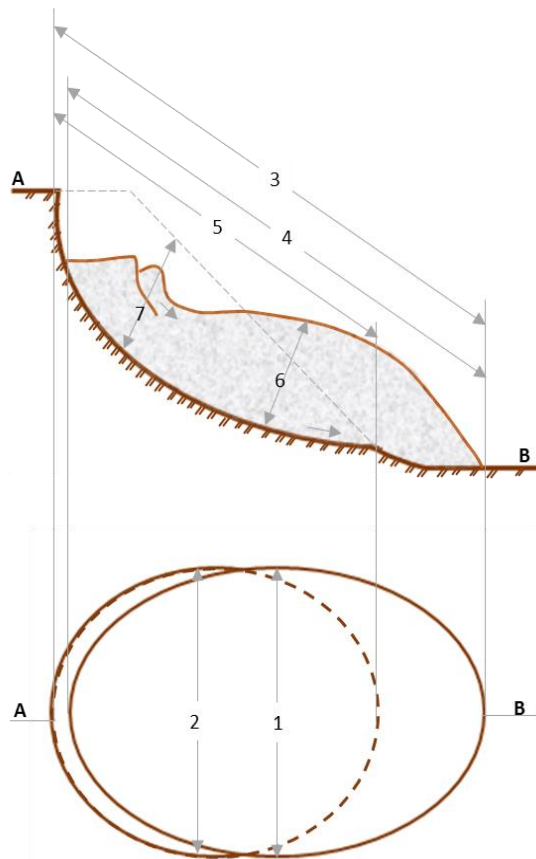


18. La acumulación o depósito es el volumen de material desplazado, el cual descansa sobre la superficie original del terreno.
19. El flanco es el material no desplazado adyacente a los lados de la superficie de ruptura.
20. La superficie original del terreno es la superficie de la ladera que existía antes de que el movimiento del terreno ocurriera.

## 1.8 DIMENSIONES

El grado de complejidad de un movimiento de terreno está en función de los mecanismos y materiales involucrados, los cuales se ven reflejados en las dimensiones que estos procesos puedan tener, de tal forma que el empleo de una nomenclatura adecuada es, en gran medida,

base fundamental para su estudio. Dicha nomenclatura (IAEG) es representada y explicada de manera general en la Figura 1.9.



1. Anchura de la masa desplazada: es la máxima extensión de la masa desplazada, la cual es perpendicular a su longitud.

2. Anchura de la superficie de ruptura: máxima extensión entre los flancos del movimiento, la cual es perpendicular a su longitud.

3. Longitud total: distancia mínima entre el margen superior y la corona

4. Longitud de la masa desplazada: distancia mínima del margen superior al margen inferior.

5. Longitud de la superficie de ruptura: distancia mínima desde el extremo inferior de la superficie de ruptura hasta la corona,

6. Profundidad de la masa desplazada: máxima profundidad de la masa desplazada medida perpendicularmente en relación con el plano formado por la anchura y la longitud de la masa desplazada.

7. Profundidad de la superficie de ruptura: máxima profundidad de la superficie de ruptura en relación con la superficie original, la cual se mide perpendicularmente al plano formado por la anchura y la longitud de la superficie de ruptura.

**Figura 1.9** Dimensiones de un movimiento de ladera en un diagrama idealizado (IAEG Commission in Landslides, 1990)

## 1.9 GRADOS DE ACTIVIDAD

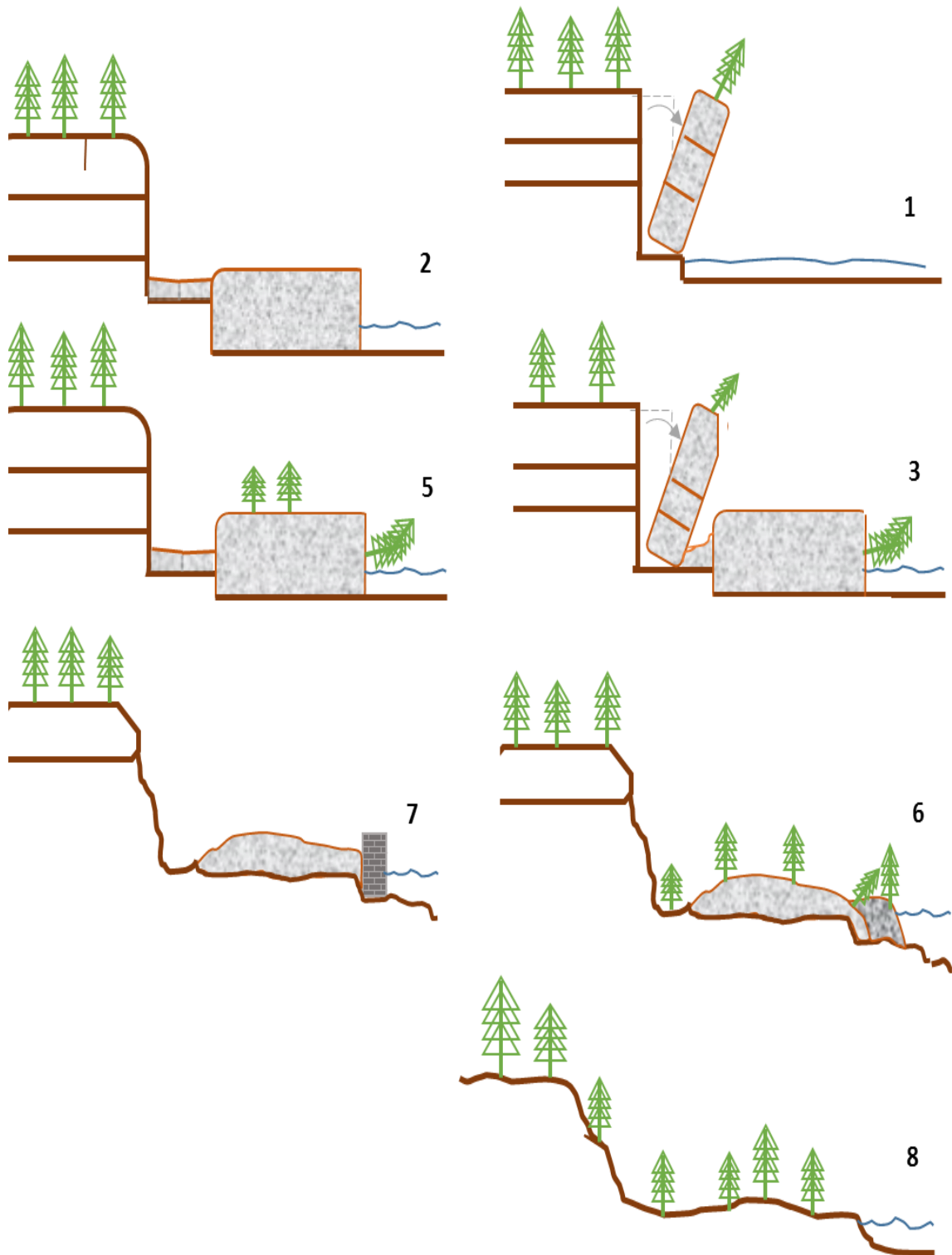
De manera similar a los volcanes, los movimientos de remoción en masa tienen diferentes estados de actividad (Tabla 1.5) y (Figura 1.9). Un movimiento del terreno que tiene movimiento actual es un movimiento activo. Si el movimiento ha tenido lugar en los últimos doce meses, pero no es un movimiento activo, es denominado movimiento en suspenso o suspendido. Un movimiento que ha estado inactivo, pero en la actualidad es activo se conoce como movimiento reactivado. Cuando un movimiento no ha tenido actividad en los últimos doce meses se puede clasificar como apagado, abandonado, estabilizado o reliquia.

**Tabla 1.5.** Estados de actividad de los movimientos de ladera.

- 
1. Un movimiento activo tiene un movimiento actual.
  2. Un movimiento en suspenso o suspendido ha tenido movimiento en los últimos 12 meses, sin embargo, no es un movimiento activo.
  3. Un movimiento reactivado es un movimiento activo, el cual ha estado inactivo.
  4. Un movimiento inactivo no ha tenido movimiento en los últimos 12 meses y se puede clasificar como 5, 6, 7 u 8.
  5. Un movimiento apagado es un movimiento inactivo, que puede ser reactivado como resultado de los factores desencadenantes que lo originaron o por otros factores.
  6. Un movimiento abandonado es un movimiento inactivo, el cual no es afectado por los factores que lo originaron.
  7. Un movimiento estabilizado es un movimiento inactivo, el cual ha sido protegido de los factores que lo originaron a través de medidas.
  8. Un movimiento reliquia es un movimiento inactivo, el cual se desarrolló bajo condiciones climáticas o geomorfológicas totalmente diferentes a sus condiciones actuales.
- 

Un movimiento apagado es un movimiento inactivo, que puede ser reactivado por los factores que lo originaron o por otros. Cuando un movimiento inactivo no es afectado por los factores que lo originaron, se conoce como movimiento abandonado, Un movimiento estabilizado es un movimiento inactivo, el cual ha sido protegido de los factores que le dieron origen a través de ciertas medidas. Un movimiento inactivo, el cual se desarrolló bajo condiciones climáticas o geomorfológicas, totalmente diferentes a sus condiciones actuales, es considerado como movimiento reliquia.

La evaluación de los estados de actividad de un movimiento está en función de la recolonización de la cubierta vegetal y de la dinámica de la topografía, aunque cabe señalar que estos cambios no ocurren a un ritmo uniforme en todas las regiones, razón por la cual es necesario considerar las condiciones climáticas y de vegetación locales. Sin embargo, se puede generalizar que cuando hay una recolonización de la vegetación en el escarpe principal y existe un patrón de drenaje sin discontinuidades en el cuerpo del movimiento, se trata de un movimiento inactivo (el cual puede ser apagado, abandonado, estabilizado o reliquia).



**Figura 1.9** Estados de actividad de los movimientos de ladera (WP-WLI, 1993)

## **1.10 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA ACTIVIDAD**

Los estados de actividad no sólo se miden en el tiempo, sino también en el espacio (Figura 1.10). Un movimiento es considerado progresivo si la superficie de ruptura se extiende en la dirección del movimiento (Figura 1.10a). Si esa superficie de ruptura se extiende en la dirección opuesta, se trata de un movimiento retrogresivo (Figura 1.10b). Un movimiento extensivo es aquel en el cual la superficie del movimiento se extiende en una o más direcciones (Figura 1.10c); mientras que en un movimiento diminutivo o abrasivo, el volumen del material desplazado disminuye con el tiempo (Figura 1.10d). En un movimiento confinado existe un escarpe, pero no una visible superficie de ruptura al pie de la masa desplazada (Figura 1.10e). Cuando una actividad es móvil, el material desplazado continúa su movimiento sin cambio visible alguno en la superficie de ruptura y en el volumen desplazado (Figura 1.10f). En un movimiento con crecimiento transversal, la superficie de ruptura se extiende hacia uno o ambos flancos del movimiento (Figura 1.10g).

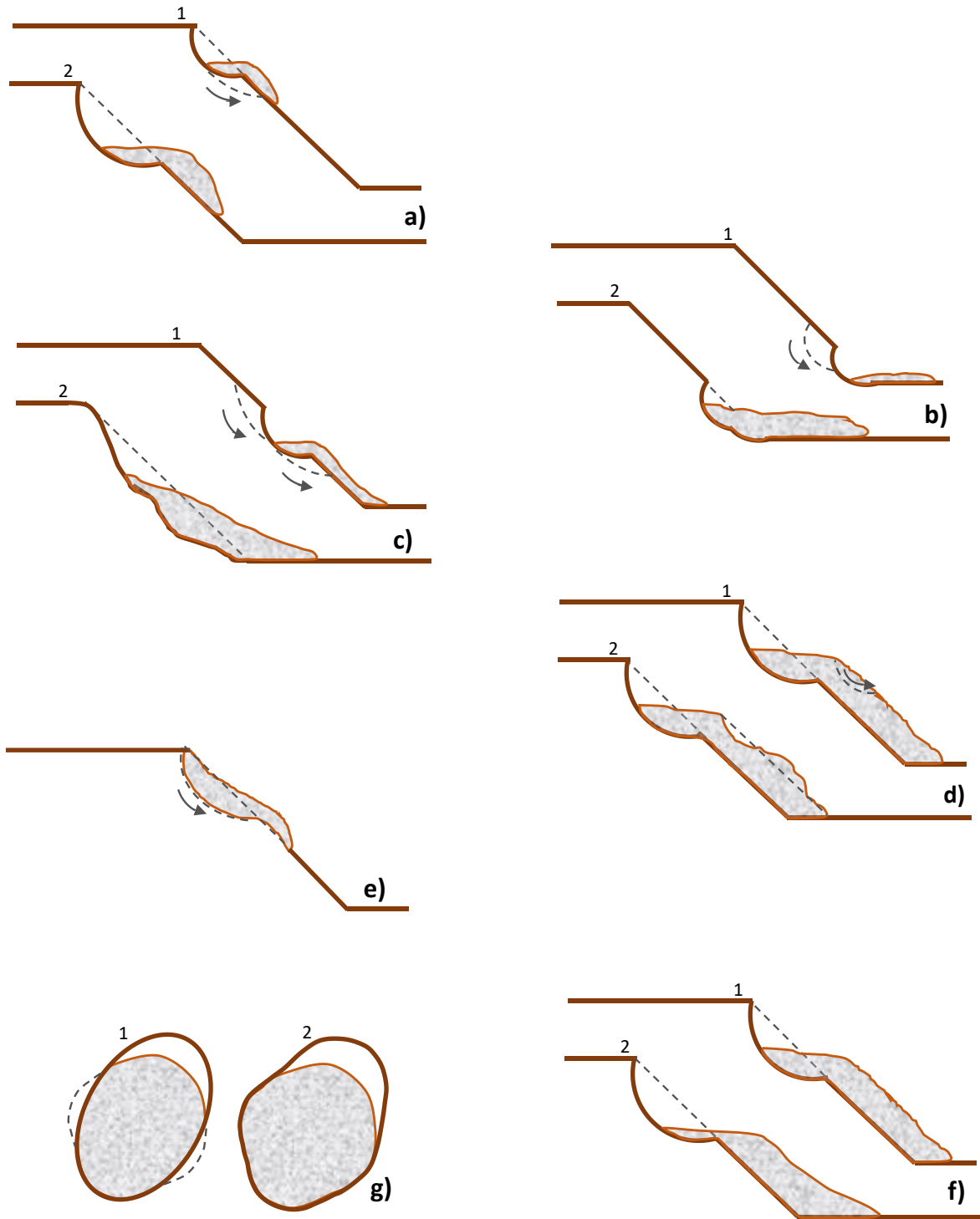
## **1.11 TIPOS DE ACTIVIDAD**

Un movimiento del terreno complejo presenta por lo menos dos tipos de movimiento a manera de secuencia (desprendimiento, vuelco, deslizamiento, flujo o expansión). La ilustración de este tipo de movimiento (Figura 1.11a) muestra la caída de gneis y migmatitas como resultado de la incisión del valle. Después de que los depósitos de caída se intemperizan y su resistencia disminuye, una parte de la masa desplazada se desliza.

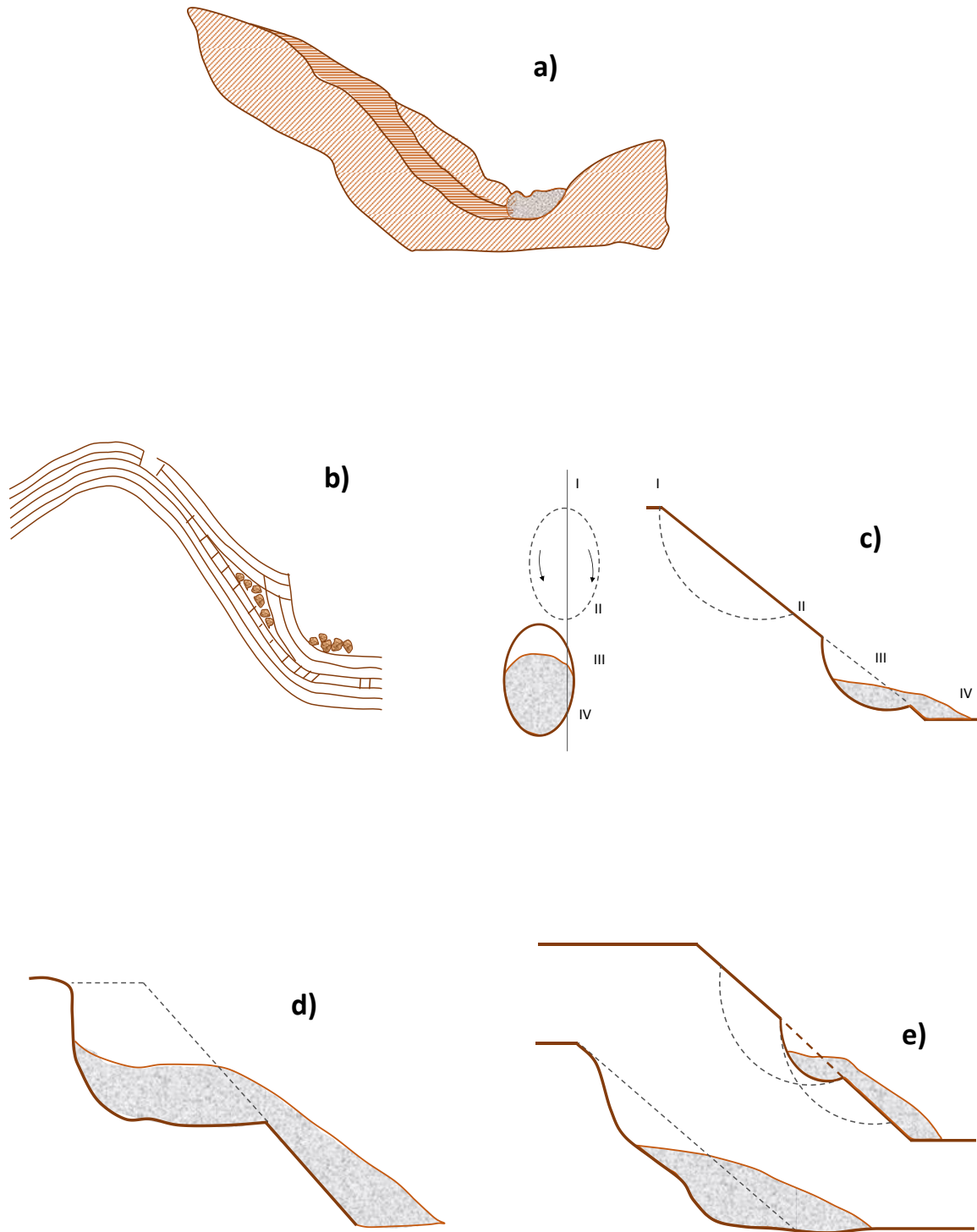
Un movimiento compuesto presenta por lo menos dos tipos de movimiento en diferentes partes de la masa desplazada de manera simultánea. El ejemplo (Figura 1.11b) muestra que las calizas se han deslizado sobre los esquistos subyacentes, causando vuelcos en la parte inferior de la superficie de ruptura. Un movimiento sucesivo (Figura 1.11c) es del mismo tipo que el primero o anterior, pero no involucra el mismo material desplazado o la superficie de ruptura. El ejemplo muestra que el segundo deslizamiento a-b, es del mismo tipo que el d-c, pero no comparten el material desplazado o la superficie de ruptura. Un movimiento individual (Figura 1.11d) involucra un solo desplazamiento o movimiento de material, en tanto que un deslizamiento múltiple presenta un desarrollo repetitivo del mismo tipo de movimiento (Figura 1.11e).

## **1.12 VELOCIDAD DE LOS MOVIMIENTOS**

Análogamente a la elaboración de la escala de Mercalli, la cual describe los efectos locales en términos de daños sufridos por un evento sísmico, Cruden y Varnes (1996) presentan una modificación a la escala de Varnes (1978), a partir de la cual describen la velocidad y la naturaleza del impacto causado por los diferentes procesos de ladera (Tabla 1.6).



**Figura 1.10** Distribución espacial de un movimiento de ladera (WP/WLI, 1993).



**Figura 1.11** Tipos de actividad de un movimiento de ladera (WP/WLI, 1993).

**Tabla 1.6** Escala de velocidades de los movimientos de ladera

<b>Velocidad</b>	<b>Clasificación de la velocidad</b>	<b>Límites de velocidad</b>	<b>Descripción de la velocidad</b>	<b>Naturaleza del impacto</b>
3 m/s	7	5 m/s	Extremadamente rápido	Catástrofe de gran violencia, edificios expuestos totalmente destrozados y deceso de la población por el impacto del material desplazado, o por la disgregación del material desplazado.
0.3 m/min	6	3 m/min	Muy rápido	Pérdida de algunas vidas debido a que la velocidad del movimiento es muy rápida para permitir que todas las personas escapen, gran destrucción.
1.5 m/día	5	1.8 m/hora	Rápido	Posible escape y evacuación, estructura, posesiones y equipo destruido por la masa desplazada.
1.5 m/mes	4	13 m/mes	Moderado	Estructuras poco sensibles pueden ser mantenidas si están localizadas a una distancia considerable en relación con el pie de la masa desplazada. Estructuras localizadas en la masa desplazada son dañadas en gran medida.
1.5 m/año	3	1.6 m/año	Lento	Carreteras y estructuras poco sensibles pueden ser mantenidas a través de frecuente trabajo de mantenimiento, si el movimiento no es de mucha duración y los movimientos diferenciales a lo largo de las márgenes del movimiento están distribuidos a lo largo de una zona ancha.
0.06 m/año	2	0.016 m/año	Muy lento	Algunas estructuras permanentes no son dañadas y si son agrietadas por el movimiento, pueden ser reparadas.
-	1	-	Extremadamente lento	No hay daño a las estructuras construidas con precaución.

Fuente: Cruden y Varnes (1996).

## REDES NEURONALES

---

### 2.1 GENERALIDADES

En este capítulo se exponen las características básicas de las Redes Neuronales Artificiales o también llamadas RNs, se presentan de manera somera, sus fundamentos matemáticos, su arquitectura, la definición de perceptrón multicapa, las reglas de entrenamiento y la metodología que se sigue para concretar un modelo neuronal.

Las RNs es una técnica de modelado flexible que se fundamenta en la eficiencia de los procesos nerviosos biológicos (Bishop, 1996; Haykin, 1999). Las RNs son capaces de descubrir relaciones lineales y no lineales entre datos numéricos con fines de análisis y predicción de comportamientos complejos (García, 2009).

Las principales ventajas de las RNs son i) adaptación, ya que contrariamente a los métodos estadísticos tradicionales, las RNs no requieren hipótesis sobre la forma o distribución de los datos por analizar. Adquieren el conocimiento a través del entrenamiento o “experiencia” que almacena” como valores numéricos de los pesos de las conexiones neuronales; ii) flexibilidad, las RNs tienen la capacidad para aprender y cambiar rápidamente en ambientes de alta dimensionalidad, no linealidad y definido con un gran número de datos y iii) la tolerancia a datos imperfectos (ausencia de datos o problemas en la calidad) ya que la información es distribuida en las conexiones neuronales lo que produce redundancia en el almacenamiento de la información y fortaleza ante imprecisiones o perturbaciones.

El cerebro es el elemento principal del sistema nervioso y está compuesto por un tipo especial de células llamadas neuronas. Las neuronas tienen características que les permiten comunicarse entre ellas, lo que las diferencia del resto de las células biológicas. Las partes esenciales de una neurona biológica son las dendritas, el soma, el axón y la sinapsis, las cuales están conectadas como se indica en la Figura 2.1. Las dendritas son extensiones extremadamente delgadas del soma que actúan como canales que transmiten la información que proviene de otras neuronas. El soma procesa esta información y la envía a las otras neuronas a través del axón y la sinapsis que son los espacios entre las dendritas de neuronas adyacentes.

Desde el punto de vista funcional las neuronas constituyen unidades básicas de procesamiento de información. Como todo sistema de este tipo poseen un canal de entrada de información (las dendritas), un órgano de cómputo (el soma) y un canal de salida (el axón). La unión entre dos neuronas se denomina sinapsis. Se habla de la neurona presináptica (la que envía las señales), y la postsináptica (la que las recibe), ambas son direccionales, es decir,



la información fluye siempre en un único sentido. La intensidad de una sinapsis no es fija y puede modificarse con base en la información proveniente del medio (Kandel y Hawkins, 1992)

La arquitectura de la red determina cómo los elementos de procesamiento están conectados. La elección de los elementos de procesamiento combina la función de transferencia y la función en los elementos de procesamiento. En un sistema neuronal artificial se establece una estructura organizada en capas, cuya unidad básica es la neurona. Las capas constituyen a la red (Figura 2.2) y las interconexiones entre las neuronas se llaman “pesos” (coeficientes numéricos en el funcional neuronal). La modificación iterativa de los pesos permite la adaptabilidad y representa la capacidad de predicción de las RNs.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DE UNA NEURONA ARTIFICIAL

Se denomina procesador elemental, neurona o perceptrón a un dispositivo simple de cálculo que, a partir de un vector de entrada procedente del exterior o de otras neuronas, proporciona una única respuesta o salida. Los elementos que constituyen la neurona de etiqueta  $i$  son los siguientes (Figura 2.3):

Considerando que la regla de propagación es la suma ponderada y que la función de salida es la identidad, la neurona estándar consiste de:

- Un **conjunto de entradas**  $x_j(t)$ , que pueden ser binarias (digitales) o continuas (analógicas), dependiendo de la aplicación.
- Unos pesos **sinápticos**  $w_{ij}$  asociados a las entradas y quienes definen en este caso la intensidad entre la neurona presináptica  $j$  y la postsináptica  $i$ . Mediante el ajuste de los pesos sinápticos la red es capaz de adaptarse a cualquier entorno y realizar una determinada tarea.
- Una **regla de propagación**  $n_i(t) = \sigma(w_{ij}, x_j(t))$ , que permite obtener a partir de las entradas y los pesos el valor del potencial postsináptico  $n_i$  de la neurona

$$n_i(t) = \sigma(w_{ij}, x_j(t))$$

- Una **función de activación**  $y_i(t) = f_i(n_i(t))$  que representa simultáneamente la salida de la neurona y su estado de activación. Se encarga de atribuir las características no lineales al procesamiento en los nodos. La función actúa sobre el valor arrojado por la función de entrada limitando su crecimiento numérico. Existen diferentes tipos de funciones de activación, y la Tabla 2.1 muestra para cada una de estas funciones sus características principales y su representación gráfica.
- Una **función de salida** que proporciona la salida actual  $y_k(t)$  de la neurona  $k$  en función de su estado de activación actual  $a_i(t)$ . Muy frecuentemente la función de salida es simplemente la identidad  $F(x) = x$ , de modo que el estado de activación de la neurona se considera como la propia salida, es decir

$$y_k(t) = F_i(a_i(t)) = a_i(t)$$

De manera general, la operación de la neurona *i* puede expresarse de la siguiente forma

$$y_i(t) = F_i(f_i(a_i(t - 1), \sigma_i(w_{ij}, x_j(t))))$$

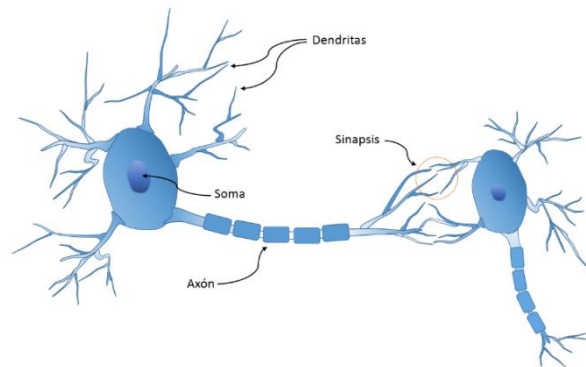
Al conjunto de pesos de la neurona se añade un parámetro adicional  $\theta_i$  que denominaremos umbral (mínima señal registrada por un sistema), y se resta del potencial postsináptico por lo que el argumento de la función de activación se expresa.

$$\sum_j w_{ij} x_j - \theta_i$$

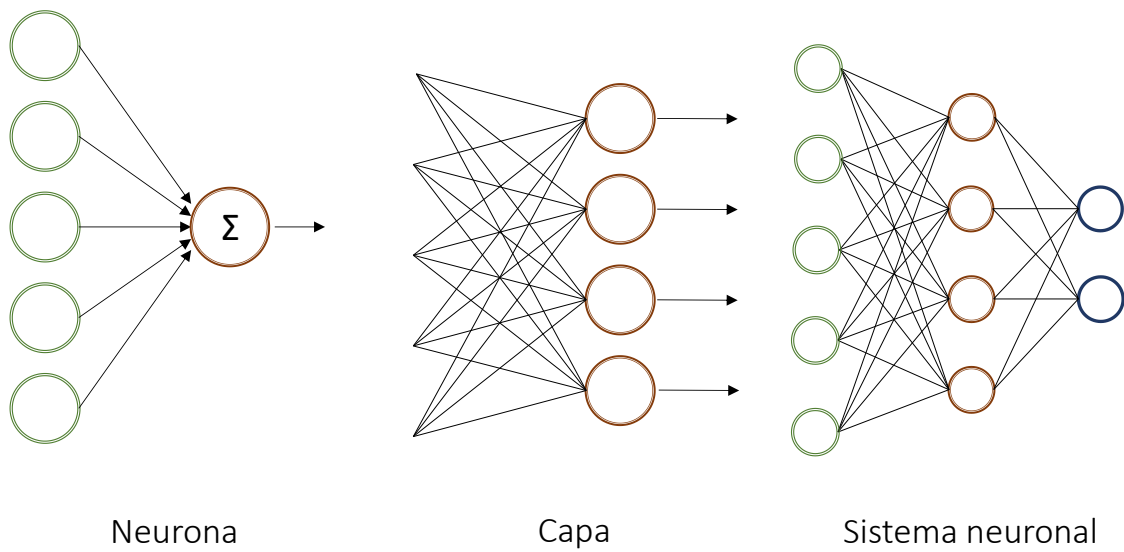
Ahora bien, si los índices  $i$  y  $j$  comienzan en 0, y definiendo  $w_{i0} = \theta_i$  y  $x_0 = -1$  (constante), se puede obtener el comportamiento de la neurona a través de:

$$y_i(t) = f_i\left(\sum_j w_{ij} x_j\right)$$

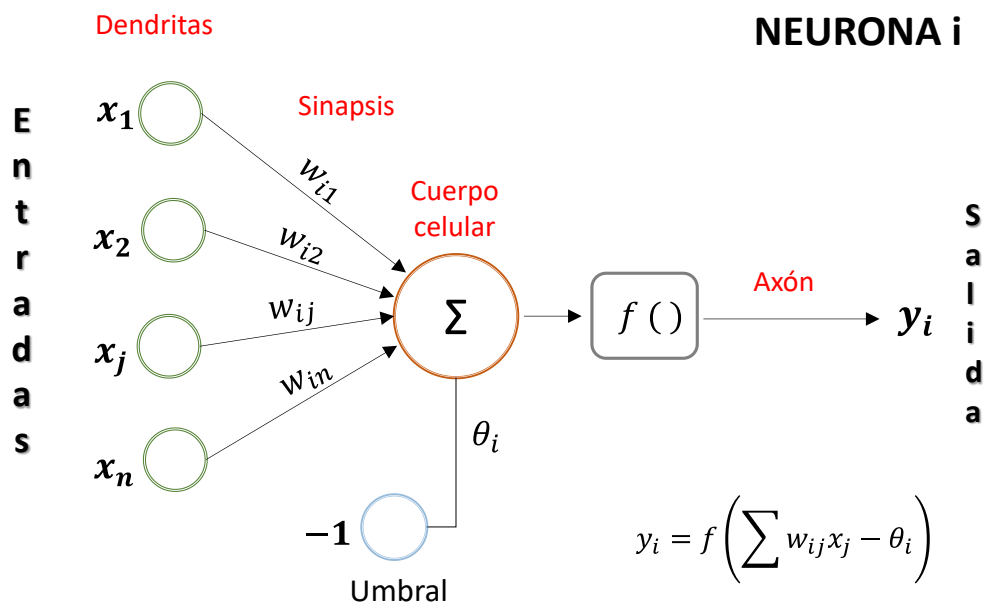
Definida la neurona estándar basta con establecer la forma de la función de activación para determinarla por completo. Una función de transferencia se escoge para satisfacer alguna característica del problema que la neurona está intentando resolver. Hay una gran variedad de funciones de transferencia, en la Tabla 2.1, se muestra para cada una de las funciones existentes su gráfico representativo.



**Figura 2.1** Estructura de una neurona biológica típica

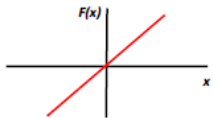
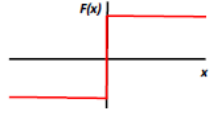
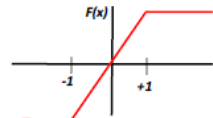
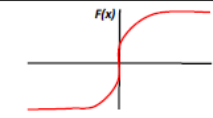
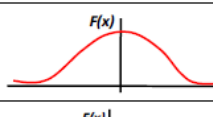
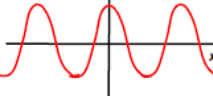


**Figura 2.2** Estructura jerárquica de un sistema basado en RNA



**Figura 2.3** Modelo estándar de neurona

**Tabla 2.1.** Funciones de activación más comunes.

	<b>Función</b>	<b>Intervalo</b>	<b>Grafica</b>
<b>Identidad</b>	$y = x$	$[-\infty, +\infty]$	
<b>Escalón</b>	$y = \text{sign}(x)$ $y = H(x)$	$[-1, +1]$ $[0, +1]$	
<b>Lineal por tramos</b>	$y = \begin{cases} -1, & \text{si } x < -l \\ x, & \text{si } -l \leq x \leq +l \\ +1, & \text{si } x > +l \end{cases}$	$[-1, +1]$	
<b>Sigmoide</b>	$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ $y = \text{tgh}(x)$	$[0, +1]$ $[-1, +1]$	
<b>Gaussiana</b>	$y = Ae^{-Bx^2}$	$[0, +1]$	
<b>Senoidal</b>	$y = A \text{sen}(wx + \varphi)$	$[-1, +1]$	

### 2.3 PERCEPTRÓN MULTICAPA

En general las neuronas se suelen agrupar en unidades estructurales denominadas capas. Dentro de una misma capa las neuronas suelen ser del mismo tipo y el conjunto de capas constituye una red neuronal. Se distinguen tres tipos de capas (Figura 2.4):

- **Capa de entrada:** compuesta por neuronas que reciben datos o señales procedentes del entorno.
- **Capa de salida:** aquella cuyas neuronas proporcionan la respuesta de la red neuronal.
- **Capa oculta:** aquella que no tiene una conexión directa con el entorno.

Entre las neuronas de la RN existen conexiones (sinapsis) asociadas a un peso sináptico y direccionales. Cuando la conexión se establece entre dos neuronas de una misma capa se habla de conexiones laterales o conexiones intra-capas. Por el contrario, si la conexión se establece entre neuronas de distintas capas se le denomina conexión inter-capas. Si la conexión se produce en el sentido inverso al de entrada-salida la conexión se llama recurrente o retroalimentada.

Las disposiciones de RNs en función del número de capas más representativas son las siguientes:

- a) **Red neuronal monocapa.** Es la RN más sencilla ya que las neuronas de esta red funcionan como nodos de entrada y salida simultáneamente y no existen capas ocultas (Figura 2.5a). Este tipo de redes es útil en tareas relacionadas con auto-asociación, es decir, regenera la información incompleta o distorsionada de patrones que se presenta a la red.
- b) **Red neuronal multicapa.** En la red neuronal multicapa existe un conjunto de capas intermedias (capas ocultas) entre la capa de entrada y la de salida. Estas redes se pueden a su vez clasificar atendiendo a la manera en que se conectan sus capas. Usualmente, las capas están ordenadas por el orden en que reciben la señal desde la entrada hasta la salida. Este tipo de conexiones se denominan conexiones de propagación hacia adelante o feedforward (Figura 2.5b). Por el contrario, existen redes en que algunas capas están también unidas desde la salida hasta la entrada en el orden inverso en que viajan las señales de información. Las conexiones de este tipo se llaman conexiones de retroalimentación o feedback donde una neurona puede estar conectada a las neuronas de otra capa y a ella misma (Figura 2.5c).

## 2.4 REGLA DE ENTRENAMIENTO-APRENDIZAJE

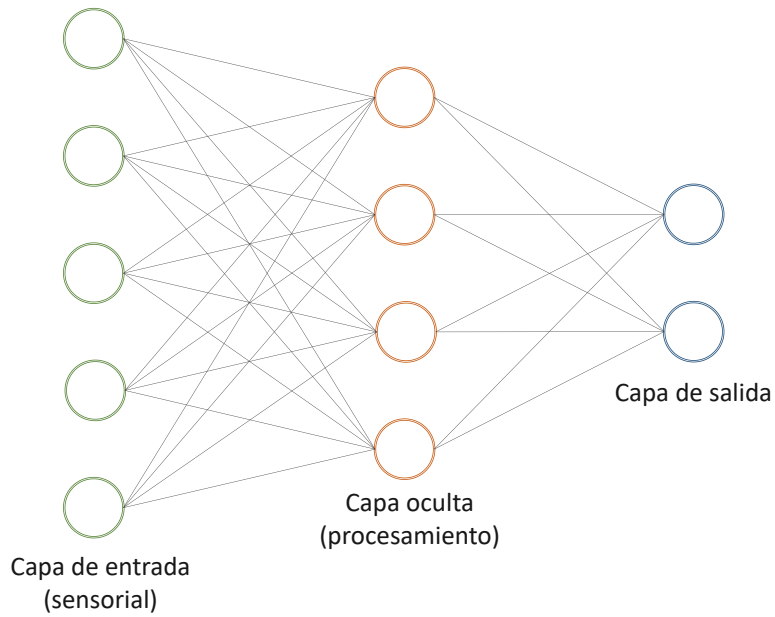
El aprendizaje de una RN consiste en determinar un conjunto de pesos sinápticos que permita a la red realizar una tarea. Para que la red resulte operativa es necesario entrenarla. Antes de iniciar el entrenamiento se debe definir la condición de ajuste a una tarea específica (cuando se dice que la RN ha aprendido). Entre los criterios más comunes se encuentran:

- Se ha alcanzado una cota de error que se considere suficientemente pequeña.
- Se ha llegado a un número máximo de iteraciones
- Se ha llegado a un punto de saturación en el que, por más que se entrene, ya no es posible reducir el error.

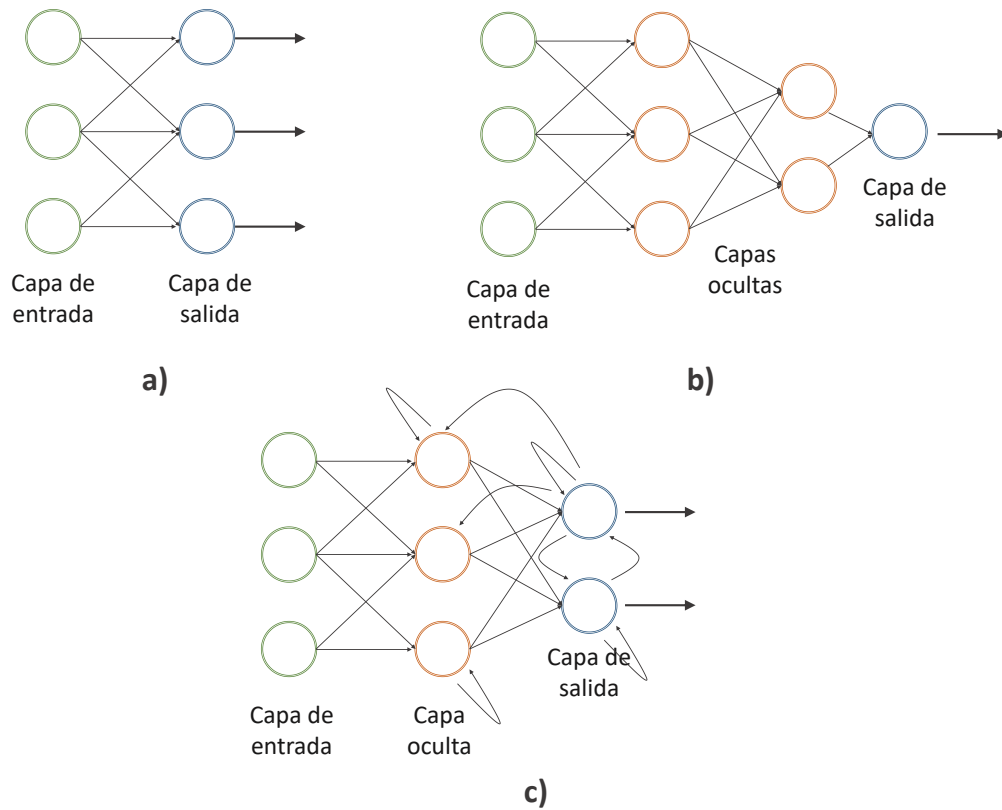
La fase de entrenamiento consiste en hacer que la red sea capaz de extraer, a partir de ejemplos, normas generales que le permitan en el futuro responder adecuadamente a patrones nunca antes vistos. Durante esta fase es imprescindible establecer una condición de paro óptima que minimice el error y evite un sobreajuste, es decir, que la red es incapaz de generalizar para casos nuevos. Existen dos métodos de aprendizaje: aprendizaje supervisado y aprendizaje no supervisado. La diferencia principal entre ambos estriba en la existencia o no de un operador o usuario (supervisor) que controle el aprendizaje de la red.

### 2.4.1 Aprendizaje supervisado

El aprendizaje supervisado se realiza mediante un entrenamiento controlado por un agente externo (supervisor) que determina la respuesta que debería generar la red a partir de una entrada determinada. El supervisor controla la salida de la red y en su caso de que ésta no coincida con la deseada se procede a modificar los pesos de las conexiones, con el fin de conseguir que la salida obtenida se aproxime a la deseada.



**Figura 2.4** Capas de una RNA



**Figura 2.5** Tipos de redes neuronales: a) Red neuronal monocapa b) Red neuronal multicapa de propagación hacia adelante (feedforward) o perceptrón c) Red neuronal multicapa recurrente (feedback).

### **2.4.2 Aprendizaje no supervisado**

Las redes con aprendizaje no supervisado (o auto-supervisado) no requieren influencia externa para ajustar los pesos de las conexiones entre las neuronas. A red no recibe ninguna información por parte del entorno que le indique si la salida generada en respuesta a una determinada entrada es o no correcta. A estas redes se les proporcionan únicamente los estímulos y ellas se ajustan sus interconexiones basándose en sus propias salidas.

Existen muchas técnicas de aprendizaje no supervisado, la que se empleó en esta investigación es el algoritmo Quick Propagation QP que opera rápidamente debido a su sencillez, ya que el cálculo en cada conexión no es más que una multiplicación y una suma. De igual manera para ajustar los pesos de la conexión también realiza las mismas operaciones. Esto significa que en total el tiempo en el que se ejecuta el algoritmo depende de la velocidad en que el procesador pueda realizar dos multiplicaciones y dos sumas, lo que implica muy poco trabajo para cada conexión. Para profundizar más en el tema y obtener una explicación más detallada el lector puede consultar Du y Swamy (2006).

### **2.4.3 Prueba**

Una vez obtenidos estos pesos la red está lista para ser probada con patrones ajenos al entrenamiento. El objetivo de esta comprobación es observar el comportamiento de la red cuando las entradas son distintas a las que usaron en el entrenamiento. Al entrenar una red neuronal e intentar minimizar el error se corre el riesgo de sobrespecialización (comportamiento óptimo con los ejemplos de entrenamiento, con casos distintos errores considerables). La minimización del error debe hacerse de manera equilibrada y muy cuidadosa de tal forma que no origine una pérdida de generalización. Una vez que ésta resulte operativa, la arquitectura, neuronas, conexiones y pesos quedan fijos y la red está lista para funcionar. El conjunto de prueba debe ser i) significativo (debe contener ejemplos pertenecientes a todas las clases establecidas) y ii) representativo (debe guardar la relación existente entre los ejemplos del conjunto de entrenamiento).

## **2.5 REDES NEURONALES ARTIFICIALES Y SU APLICACIÓN EN EL ANÁLISIS DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA**

Las redes neuronales artificiales (RNA) constituyen una herramienta útil que ha sido aplicada a diversos campos del conocimiento. Existen diferentes ejemplos que ilustran la aplicación de éstas en ingeniería y en las geociencias. Shahin *et al* (2009) describe la importancia que ha cobrado la implementación de las redes neuronales en el campo de la ingeniería geotécnica, toda vez que han mostrado un alto nivel de competencia en la solución de problemas ingenieriles complejos que están más allá de la capacidad computacional de las matemáticas clásicas y procedimientos tradicionales. Por ejemplo, la licuación de suelos durante terremotos es uno de los más peligrosos fenómenos de falla del terreno que pueden causar una gran cantidad de daños a la mayoría de estructuras civiles. No obstante, que el

mecanismo de licuación es bien conocido, la predicción del potencial de licuación es muy compleja.

Otras aplicaciones de las redes neuronales en la ingeniería geotécnica incluyen a las estructuras de retención de tierra, presas, minería, mecánica de rocas, caracterización de sitios, túneles y excavaciones subterráneas, excavaciones profundas, estabilidad de suelos y procesos de remoción en masa.

En relación a esta última, Gómez y Kavzoglu (2005) han documentado los excelentes resultados obtenidos al evaluar la susceptibilidad superficial de deslizamientos mediante redes neurales artificiales en la Cuenca del Río Jabonosa, Venezuela; un lugar como muchos en el continente donde los procesos de remoción en masa son frecuentes y generalizados. Más recientemente, Alimohammadlou *et al* (2014) desarrollaron y emplearon un modelo basado en redes neuronales y métodos de *fuzzy clustering* para determinar la cantidad de precipitación que se necesita para detonar deslizamientos, tomando como sujeto de estudio la provincia de Azerbaijan, Irán.

El uso cada vez más frecuente, y los buenos resultados obtenidos con la aplicación de este tipo de herramientas en diferentes regiones del mundo, hace que sea necesario su aplicación generar el conocimiento necesario que nos permita vislumbrar las causas que dan origen a este tipo de fenómenos en nuestro país, toda vez que los daños materiales y las pérdidas humanas ocasionados por los procesos de remoción en masa resultan ser verdaderamente significativos. El ejemplo más reciente de lo que se señala, fue lo sucedido en septiembre de 2013 en gran parte del territorio nacional donde a causa de los fenómenos hidrometeorológicos ocurridos, se dispararon procesos de remoción en masa; siendo afectado de forma importante el estado Guerrero. Motivado por lo anterior, el modelo neuronal elaborado en este trabajo de investigación toma en consideración casos de procesos de remoción en masa ocurridos en las comunidades de este estado, que se describen más adelante.



# CAPÍTULO 3

## DESLIZAMIENTOS OCURRIDOS EN LAS COMUNIDADES PIEDRA ESCALERA Y EL AHUEHUETE, MUNICIPIO DE TLACOAPA, GRO.

---

En este capítulo se describe el entorno de los deslizamientos de suelos y rocas ocurridos en las comunidades de Piedra Escalera y El Ahuehuete, pertenecientes al municipio de Tlacoapa, región de La Montaña, estado de Guerrero, dentro del marco de las lluvias intensas que, a mediados del mes de septiembre de 2013, azotaron a varios estados de la República Mexicana. Estas dos comunidades fueron elegidas como sujetos de estudio por i) presentar zonas con graves daños documentados convenientemente por el CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), ii) contar con áreas importantes donde, a pesar de las fuertes lluvias, no se registraron movimientos de suelo y rocas ni daños a obra civil, y iii) por ser una zona propiamente levantada por el INEGI y el SGM (Servicio Geológico Mexicano).

### 3.1 LLUVIAS INTENSAS EN EL MUNICIPIO DE TLACOAPA

Ese septiembre la tormenta tropical Manuel dejó en situación de emergencia a 56 de los 81 municipios del estado de Guerrero (Figura 3.1); produjo 101 muertes y 238 000 personas fueron damnificadas. Tal fue el nivel de afectación que se otorgaron al estado cerca de 1 500 mdp del Fondo de Desastres Naturales para llevar a cabo las tareas de reconstrucción (SEDATU, 2013).

La precipitación acumulada (30 días) que registró la estación más cercana al municipio (estación Chilapa, ver Figura 3.2) fue de 656.6 mm, siendo esta cantidad poco más del cincuenta por ciento del total de milímetros de lluvia que cae anualmente en el estado (1200 mm), (Conagua, 2014).

En la Figura 3.3 se muestran las láminas de precipitación diaria y acumulada registradas en la estación Chilapa. El día con mayor precipitación fue el 14 de septiembre de y se piensa que esos 172.2 mm de columna de agua registrados fue el punto de no retorno para los deslizamientos masivos ocurridos en la región. Comportamientos similares de movimientos abruptos de suelos y rocas se habían registrado en el país años antes, uno de los casos más dolorosos fue el de Teziutlán, Puebla, el 5 de octubre de 1999, en el que se presentó un deslizamiento de masas y flujo de lodos que colapsó a la colonia La Aurora, ocasionando importantes afectaciones a la población.

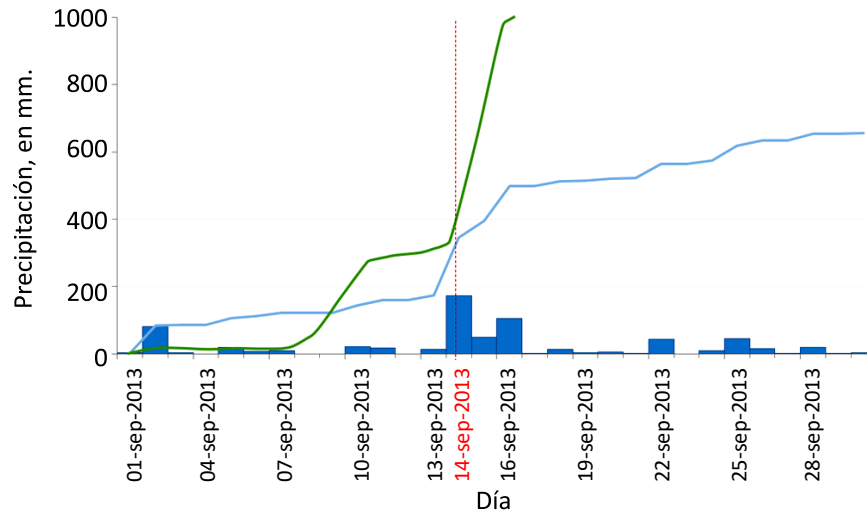
Un comparativo entre los registros de precipitación acumulada durante los eventos ocurridos en ambos estados tiene como finalidad que el lector pueda identificar la tendencia que sigue el comportamiento de las lluvias que detonaron los procesos de remoción en masa (Figura 3.3).



**Figura 3.1** Municipios del estado con Declaratoria de Desastre o Emergencia por lluvias severas publicada en el D.O.F. el 23 de septiembre de 2013

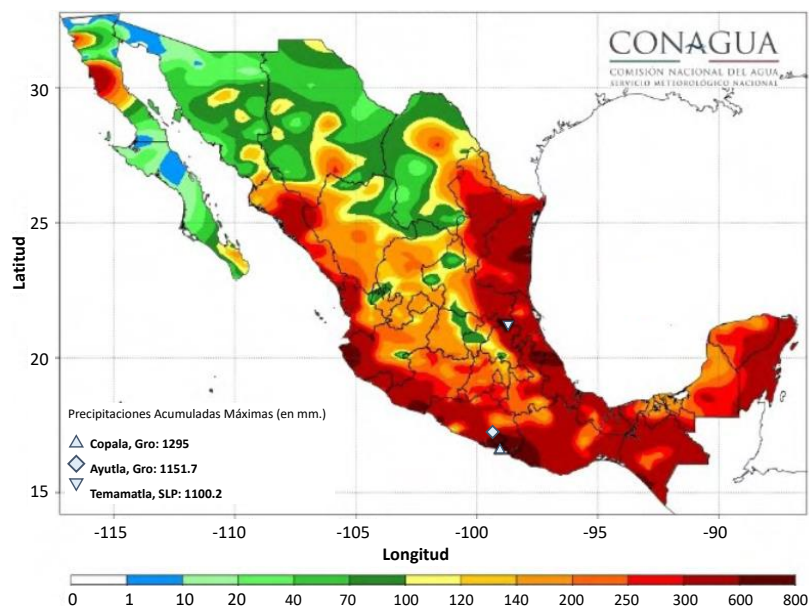


**Figura 3.2** Ubicación del Municipio de Tlacoapa y de la estación meteorológica Chilapa

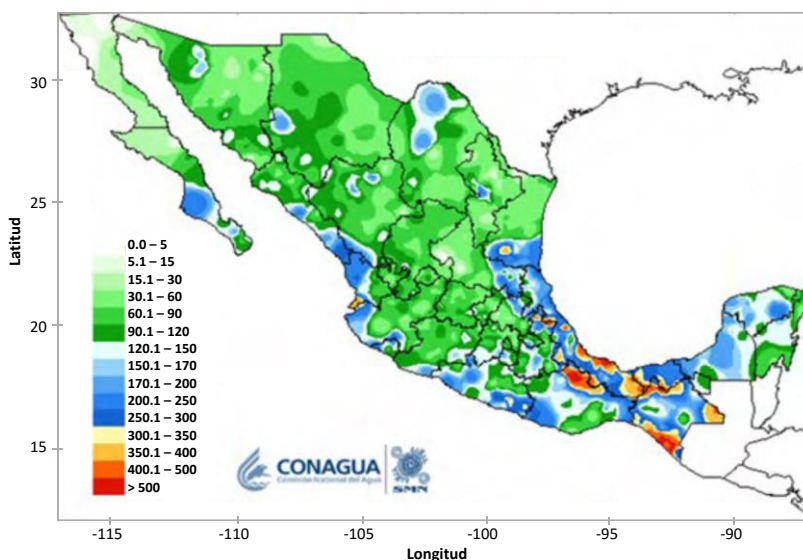


**Figura 3.3** Precipitación diaria registrada en la estación meteorológica Chilapa, Gro (barras), señalando el día de mayor precipitación, y un comparativo de los acumulados entre los eventos de Puebla en 1999 (verde) y Guerrero en 2013 (azul).

Si se observan los mapas de las Figuras 3.4 y 3.5 publicados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en su “Reporte del clima en México, 2013” y “Reporte del clima en México, 2012”, se puede concluir que el 2013 y particularmente ese septiembre fue un periodo extraordinario en el que dolorosa pero inevitablemente las comunidades y la obra civil de la zona se verían afectadas de alguna manera. Importante es resaltar que los tres sitios de toda la república en donde se registraron precipitaciones acumuladas máximas fueron Copala y Ayutla, Gro., así como, Temamatla, SLP., con 1295, 1151.7 y 1100.2 mm/mes, respectivamente.



**Figura 3.4** Precipitación acumulada mensual, máximos en rojo >800 mm, septiembre de 2013.



**Figura 3.5** Precipitación acumulada mensual, máximos en rojo >500 mm, septiembre 2012.

## 3.2 SUJETO EN ESTUDIO: ZONA DE DESASTRE

### 3.2.1 Ubicación de las comunidades El Ahuehuate y Piedra Escalera

El municipio de Tlacoapa se localiza en la región de la montaña al sureste de Chilpancingo (capital del estado de Gro., Figura 3.6), se ubica entre las coordenadas geográficas UTM 14Q 1966437.14m Latitud Norte y 534576.29m Longitud Este y tiene una superficie de 262 km<sup>2</sup>. Colinda con los municipios al norte con Zapotitlán Tablas y Copanatoyac, al sur con San Luis Acatlán, al oriente con Malinaltepec, y al poniente con Zapotitlán Tablas y Acatepec.

El Ahuehuate es una comunidad que pertenece al municipio de Tlacoapa y se ubica en la parte alta de una loma situada a unos 2 km al noroeste de la cabecera municipal de Tlacoapa a una elevación de 1910 m.s.n.m. La zona centro del poblado se asienta a lo largo del parteaguas que define una loma a aproximadamente 1900 msnm con casi 500 m de desnivel, por arriba de Tlacoapa. El relieve es en general abrupto con laderas de pendientes de entre 20° a 35° de inclinación, sin embargo, las pendientes llegan a ser mayores en dirección ladera abajo y arriba de algunas viviendas. La comunidad de Piedra Escalera se localiza en la misma región de La Montaña, la elevación con respecto al nivel del mar es de 2263 m.s.n.m. y está ubicada al S 35° W y 5.8 km en línea recta de la cabecera municipal. Se caracteriza por tener una topografía general abrupta, sin embargo, en la porción con mayor asentamiento humano la superficie es bastante más plana que en el resto de la zona. Las laderas alrededor del asentamiento tienen inclinaciones que oscilan entre los 35 y 40 grados.

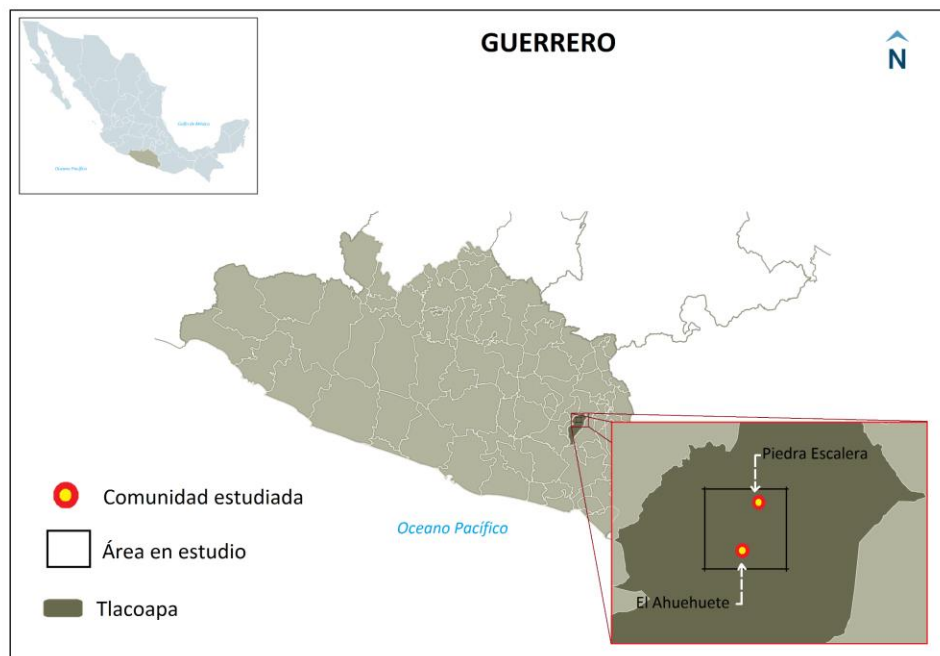
### 3.2.2 Delimitación del sujeto en estudio

Por tratarse de un estudio que intenta calificar al evento, a las situaciones y a las consecuencias es fundamental definir el espacio (sobre la superficie terrestre) en el que se

encuentra o desarrolla el fenómeno que se modela. Así, el área en estudio tiene una superficie de 17.22 km<sup>2</sup> y está delimitada por los paralelos UTM 14Q 1909600 y 1913700 m Latitud Norte y los meridianos 523000 y 527200m Longitud Este (Figura 3.7)



**Figura 3.6** Localización de las comunidades estudiadas (con información de INEGI (2015)).



**Figura 3.7** Localización de la zona estudiada (con información de INEGI (2015)).

En el área declarada se eligieron 19 situaciones XY (Lat., Long.) en las que se presentó, en alguna medida, deslizamiento o movimiento de masas naturales. En estos puntos se cuentan con informes desarrollados por especialistas del CENAPRED y del Servicio Geológico Mexicano, documentación de extrema valía que partieron de visitas de reconocimiento como parte de un programa de inspección y valoración de zonas de riesgo y/o falla por fenómenos de inestabilidad de laderas a nivel estatal. Este programa inició como respuesta de los entes gubernamentales a las lluvias atípicas mencionadas anteriormente (tormentas tropicales Ingrid y Manuel) y se enfocó en los sitios con claras señales de deslizamiento de suelos en los que se hubiera puesto en alto riesgo a las vidas, a las viviendas y/o a las obras civiles.

Los citados informes hacen una presentación del lugar, donde describen de forma general las condiciones geológicas de los puntos prospectados, la situación de la vivienda y de la obra civil que se vio afectada, así como una descripción de la vegetación en el lugar. En algunos casos también contienen una somera identificación de zonas inestables que podrían ser de alto riesgo en esos momentos (pues sigue fuertemente lloviendo), y algunas recomendaciones inmediatas para la salvaguarda de la población.

### **3.2.3 Geología y Geotecnia del sujeto en estudio**

El tipo de suelo en el área, desde el punto de vista geotécnico, está constituido principalmente por arcillas y arenas. En el caso de la localidad de Piedra Escalera la estratigrafía presenta, cerca de la superficie, material reciente constituido principalmente por materiales granulares, intercalaciones de conglomerados (de media a muy baja resistencia a la erosión) y esquistos (material sumamente frágil y fácilmente erosionable). En la localidad de El Ahuehuate, el material desplazado consiste principalmente de arcillas y arenas con clastos de roca muy intemperizada, por lo que en conjunto tiene un comportamiento geomecánico como el de un suelo.

La distribución de materiales que se detallan en el Conjunto de Datos Vectoriales Geológicos, Continuo Nacional. Escala 1:1000,000 carta E14-8 (INEGI) permiten declarar que ambas poblaciones están asentadas mayormente sobre esquisto y en menor número sobre arenisca-conglomerado (Figura 3.8). Por la sabida importancia que la geología tiene dentro de un fenómeno del tipo deslizamiento de masas, a continuación, se hace una breve descripción de estos materiales.

Los esquistos son rocas de tipo metamórficas foliadas, sus gramos son los bastante grandes para verlos a simple vista. Las hojas aisladas no son de espesor uniforme, pero son lentes aplanadas, frecuentemente curvadas, con sus superficies planas en planos paralelos. En ángulo recto con dichos planos, los esquistos se rompen con gran dificultad dejando filos irregulares. Se clasifican, generalmente, por su composición mineral. Si las micas predominan, la roca se llama esquisto micáceo. Si la foliación se debe a la hornablenda, la roca, generalmente verde oscura a negra con un brillo sedoso, se llama hornablenda esquisto. Rara vez tienen feldespatos abundante. La mayor parte de los esquistos se forman de pizarras, pero algunos se forman por metamorfismo de rocas ígneas de grano fino, como



felsitas y basaltos. Los esquistos son generalmente demasiado débiles a lo largo de la fractura, como para ser empleados en construcción.

Por otro lado, una arenisca es una capa de arena cementada hasta formar una masa coherente. El cemento puede ser de color claro debido al sílice o carbonato de calcio, o pardo, amarillo o rojo debido al óxido de hierro. Si la arena de cuarzo se ha cementado regularmente por sílice, la roca es cuarcita. Los granos de arena pueden ser angulares, subangulares o bien redondeados. Sus superficies pueden estar agujereadas, debido quizá a impactos en su tránsito, o mates, como la superficie de un cristal esmerilado. Así los granos dicen algo de su historia. Las areniscas se gradúan desde arena de grano grueso y hasta conglomerados, a través de arenas de grano fino, a margas.



**Figura 3.8** Geología de Tlacoapa y sus alrededores (Elaborado con información de INEGI)

Los conglomerados son gravas redondeadas (chinas, guijarros o cantos) que se mantienen unidas por algún cementante. En muchos conglomerados, los cantos son principalmente cuarzo, pues el cuarzo es el mineral común que tiene gran resistencia a la alteración y desintegración. Otros minerales silíceos, como pedernal y jaspe, son también corrientes, pero los cantos de un conglomerado pueden ser de cualquier clase de fragmentos de roca. Así, por ejemplo, hay conglomerados de caliza y basalto.

### 3.2.4 Vegetación en el sitio

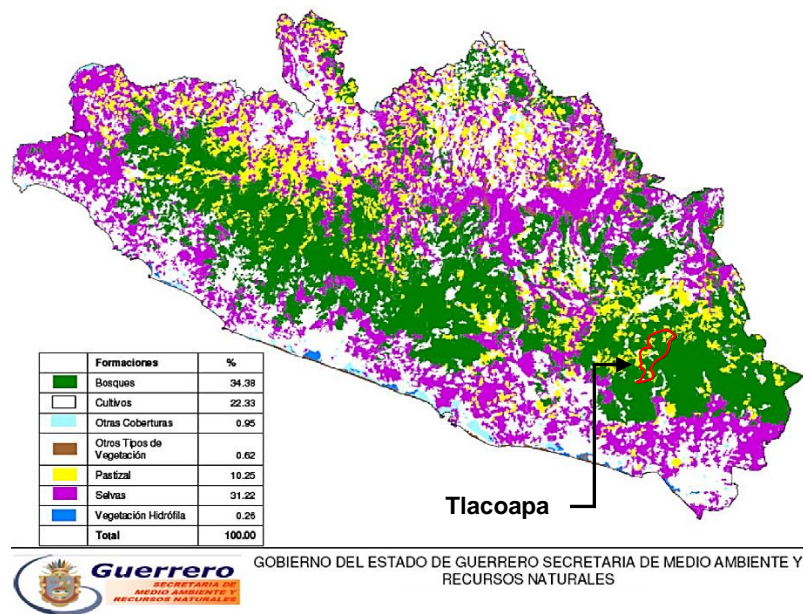
Dadas las características físicas del estado de Guerrero existe una gran variedad de tipos de vegetación. Para el caso de La Montaña, y en particular los municipios de Piedra Escalera y El Ahuehuate, los tipos de vegetación que se encuentran son bosque de encino, encino-pino, pino-encino en mayor porcentaje y una ligera presencia de pastizal inducido (de acuerdo con la información proporcionada por el INEGI en el “Conjunto de Datos Vectoriales de uso de Suelo y Vegetación, Serie V, Conjunto Nacional”). En la Figura 3.9 se muestra la distribución de formaciones en el estado.

**Pastizales.** Los pastizales son la comunidad vegetal en donde las gramíneas ocupan el lugar de la especie dominante; estas comunidades presentan una composición florística muy diversa y de igual forma se desarrollan en muy variadas condiciones físicas.

En México y particularmente en Guerrero, los pastizales para su estudio pueden agruparse considerando los factores que determinan su existencia:

- Pastizales naturales, se desarrollan principalmente por el clima y el suelo.
- Pastizales inducidos, se originan por la modificación de la vegetación de una región.
- Pastizales cultivados, son introducidos en forma intencional en una región.

Los pastizales encuentran condiciones favorables en sitios donde la temperatura media anual oscila entre 12 y 20°C con modificaciones diurnas y estacionales bruscas. Las precipitaciones que soportan varían entre 300 y 600 mm/año y las sequías aquellas con duración entre 6 a 9 meses.



**Figura 3.9** Mapa de vegetación y uso de suelo.

Los pastizales en las zonas áridas y semiáridas se desarrollan principalmente en los valles y lomeríos con laderas poco inclinadas, con suelos rojos o cafés y su textura varía de arenoso a arcilloso. La estructura de los pastizales en condiciones óptimas posee un estrato superior integrado por plantas herbáceas y un estrato restante (edáfico). Frecuentemente los pastizales se encuentran en zonas de transición hacia matorral o hacia el bosque, los pastos se mezclan con árboles como el encino o con arbustos como el huizache o el magüey.

**Bosque de pinos.** El bosque de pino ocupa grandes extensiones en México principalmente a lo largo de la Sierra Madre del Sur. El sustrato geológico en el que se desarrollan es principalmente de origen volcánico pero es común encontrarlo en rocas sedimentarias; en



cuanto al tipo de suelos, los más frecuentes son los rojos y negros, semiarcillosos y bien drenados.

Los pinos se desarrollan entre los 1500 y 3000 metros sobre el nivel del mar (msnm) por lo que la temperatura afectada por la altitud, varía entre 10 y 20°C y la precipitación media anual oscila entre los 600 y 1000 mm. La altitud es un factor muy importante pues determina la temperatura y la precipitación, ya que con mayor altitud la temperatura disminuye y las precipitaciones aumentan. En el bosque de pinos comúnmente se encuentra una estructura integrada por un estrato arbóreo, un estrato arbustivo y un estrato herbáceo.

El bosque de pino constituye uno de los recursos naturales que año con año se reducen en el territorio guerrerense.

**Bosque de encino.** El bosque de encino es una comunidad vegetal cuyas áreas de distribución las constituyen principalmente las zonas montañosas y junto con los pinos se desarrollan en climas templados y subhúmedos. Los encinos constituyen el elemento dominante de la vegetación de las sierras y numerosas montañas aisladas.

El sustrato rocoso varía entre volcánico, sedimentario o metamórfico, los suelos comúnmente son profundos y bien drenados, con abundante materia orgánica y texturas entre arcillosas y arenosas y de color rojo, amarillo, café, gris o negro. El bosque de encino se encuentra entre los 1200 y 2800 msnm y la precipitación entre 600 y 1200 mm anuales con una estación seca de 0 a 9 meses.

La madera de los bosques templados tiene gran demanda, máxime, para la elaboración de papel y celulosa. Además, el bosque de encinos se destruye para establecer áreas de cultivo.

#### *3.2.4.1 Deforestación*

Lo anteriormente expuesto es lo que está establecido en los mapas nacionales. Sin embargo, es evidente que la diferencia entre lo que un mapa “general” dicta contra lo que se observa y levanta en estudios en sitio, actualmente, es grave.

La problemática ambiental en la región de La Montaña es muy aguda dadas sus condiciones de fragilidad ecológica (otorgada por la estacionalidad y la geología, entre otros) y la marginación social (la totalidad de los municipios se ubican bajo la categoría de “muy alta” y “alta” marginalidad-extrema pobreza).

A finales de la década de los 90 los ambientes transformados representaban un 49% de la región; el área con daño irreversible (erosión severa) o cuya restauración implicaría un gran esfuerzo era del 13%, mientras que un 25% tenían el riesgo de tornarse en áreas altamente dañadas. Desde 1970 y hasta la fecha, la superficie forestada ha disminuido paulatinamente, las zonas alteradas se han incrementado a una tasa de 1.8% anual y el área con daño grave en sus ecosistemas ha crecido de manera alarmante a costa de zonas productivas, particularmente a partir de 1986. Las unidades de uso de suelo que se han expandido notablemente en los últimos años son el pastizal inducido, que ocupa casi un 25% de la región, el suelo descubierto y las áreas erosionadas, todas con crecimiento acelerado en la

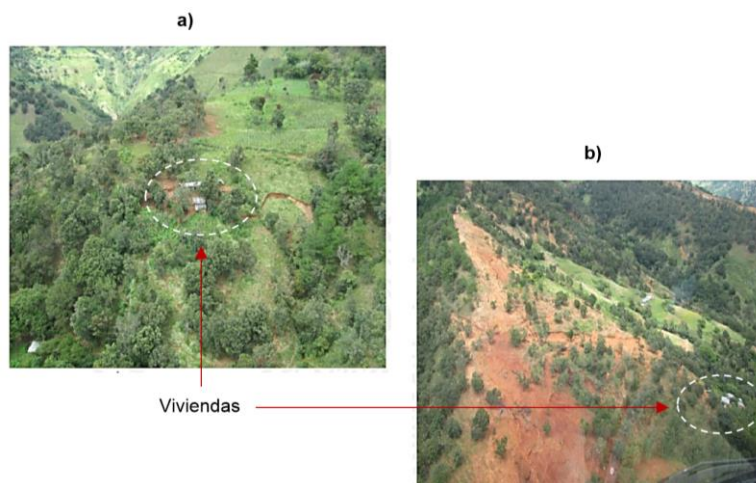
década de los ochenta. Las masas forestales que aún quedan en la región y que cubren una extensión aproximada de 300 mil hectáreas, incluyendo bosques templados, selva caducifolia y matorrales, no están en condiciones para ser explotadas, ya que en la mayoría de los casos se trata de comunidades fragmentadas y altamente perturbadas.

En diversos documentos históricos que hacen referencia a La Montaña, las descripciones de la zona cálida hablan de una tierra poco apta para los cultivos y con pérdida de suelo al llegar las lluvias, mientras que de la zona templada se mencionan bosques enfermos, pero también áreas boscosas importantes. Los problemas ambientales inherentes al medio físico de la zona, como la erosión por lluvias torrenciales y por el viento, debieron ocasionar problemas productivos en todas las épocas, especialmente en los terrenos con mayor riesgo de erosión, que fue la zona más explotada por los *encomenderos* del siglo XVI.

La parte sur de la región sufrió deforestación maderable para la construcción de navíos en poblados de la Costa Chica del actual Guerrero en la segunda mitad del siglo XVI. La deforestación se mantiene en la historia de la región hasta la actualidad y constituye un evento de perturbación masiva antropogénica y continua que promueve y caracteriza procesos de deterioro generalizado. La ganadería caprina y la agricultura de tlacolole son también elementos deteriorantes de importancia; sin embargo, por sí mismos no provocan deterioro, sino hasta que se vinculan con otros factores socioeconómicos y de riesgo natural, como lo ha señalado Landa y Carabias (2009).

Como muestra de lo anterior, en las Figuras 3.10a y 3.10b se muestra el grado de deforestación en una parte de la localidad de El Ahuehuate, en las fotografías se observan viviendas en puntos donde se produjeron deslizamientos.

La Figura 3.11 se usa para ejemplificar la condición forestal en que se encontraba la capital del estado de Guerrero en el año de 1954 y su comparación, en la Figura 3.12, con las condiciones en el año 2014, es evidente la reducción en la vegetación del lugar.



**Figura 3.10** Manifestación del fenómeno de deslizamiento de tierra, (tomadas de CENAPRED (2013))



**Figura 3.11** Carretera México-Acapulco a la altura de Chilpancingo en 1954 (Tomada de ICA).



**Figura 3.12** Carretera México-Acapulco a la altura de Chilpancingo en 2014 (las zonas oscuras - bosque— de la Figura 3.11 se han reducido en un gran porcentaje).

### **3.2.5 Población del sitio**

La Montaña se encuentra en una situación de extrema pobreza y acelerado deterioro de sus recursos naturales; en ella prevalecen condiciones de vida precarias para los pobladores en su mayoría pertenecientes a las etnias mixteca, nahua y tlapaneca. Pese a los esfuerzos de desarrollo social que se han enfocado a nivel regional durante los últimos años, la marginación aún se expresa como una disponibilidad mínima de servicios de salud y de comunicación, educación deficiente e insuficiente apoyo productivo (Landa y Carabias, 2009).

Lo anterior se refleja en el último Censo de Población y Vivienda, realizado por el INEGI en el año 2010 en todo el territorio nacional, que tiene como finalidad constituir la fuente de información básica más completa para conocer la realidad demográfica y social del país hasta ese momento, y que es tomado a continuación para describir la situación de las comunidades de Piedra Escalera y El Ahuehuete.

La población de Piedra Escalera hasta el año 2010 se constituía por 94 habitantes, donde las mujeres representaban el 51% de ésta y el resto la conformaban los hombres. En cuanto a la vivienda, el número de viviendas particulares habitadas era de 19, de las cuales el 84.21% de ellas con piso de tierra, 10.53 % sin drenaje, 47.37% sin servicio de electricidad, 100% sin agua entubada y el 21.05 % de ellas sin sanitario, lo que de acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Social del Gobierno Federal (SEDESOL), la coloca como una localidad con un “Muy alto” grado de marginación.

En cuanto al rezago social, esta localidad es calificada como “Alto”, debido a que el 45.31% de su población de 15 años o más es analfabeta, el 84.38% cuenta con educación básica incompleta, y el 95.74% sin derechohabiencia a servicios de salud.

Para el caso de El Ahuehuete, las condiciones no son muy distintas, el número de habitantes era de 300 con el mismo porcentaje de mujeres y hombres que en Piedra Escalera. Las viviendas particulares habitadas eran de 62, donde el 54.84% de ellas eran de piso de tierra, 64.52% no contaba con drenaje, 29.03% tampoco tenía servicio de electricidad, el 12.9% carecía de agua entubada y 62.9% de ellas no disponía de sanitario, lo que también la coloca como una localidad en “Muy alto” grado de marginación.

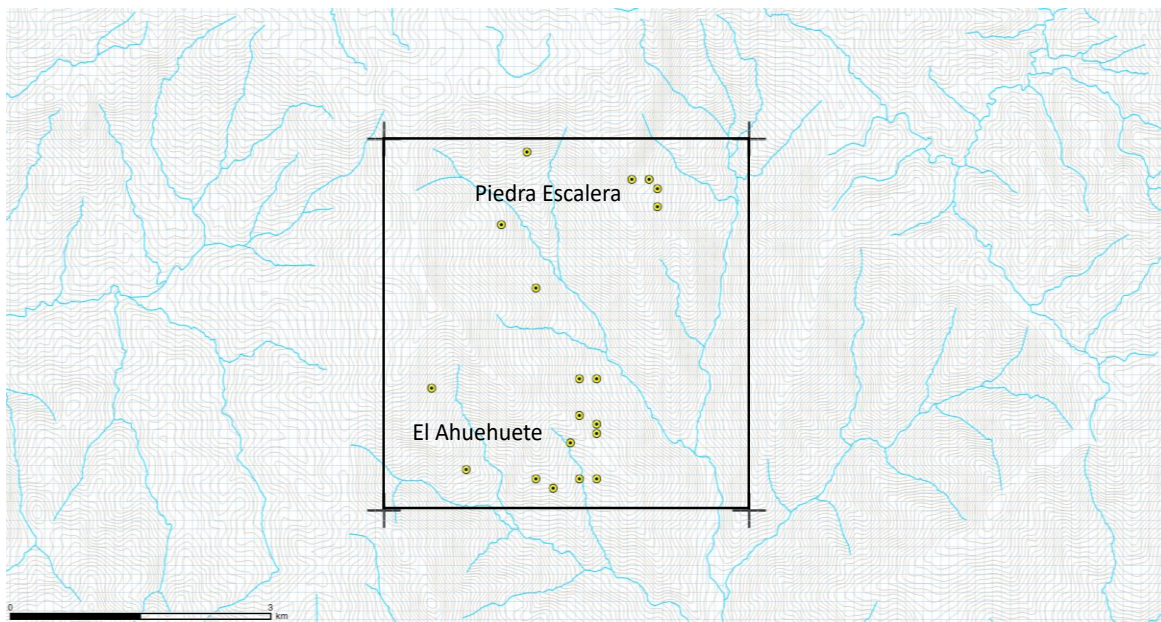
Por último, en lo concerniente al grado de rezago social, esta comunidad es catalogada con el nivel de “Alto” rezago, debido a que 32.26% de 15 años o más es analfabeta, 3.85% tiene una educación básica incompleta y el 97.00% no es derechohabiente a servicios de salud, de acuerdo con SEDESOL (2014).

### **3.2.6 Corrientes de agua**

Una corriente superficial de agua, es un flujo de agua que tiene movimientos que van de los altos topográficos hacia las partes bajas, a través de un cauce y de acuerdo con (Mijares, 1992), éstas se pueden clasificar por el tiempo en que transportan agua, ya sea perennes, intermitentes o efímeras. De acuerdo con INEGI (2013) en el municipio de Tlacoapa y en



sus alrededores, sólo existen dos tipos de corrientes de agua: perennes e intermitentes, como se puede apreciar en la Figura 3.13



**Figura 3.13** Red de corrientes de agua en el municipio de Tlacoapa y sus alrededores, (elaborada con información de INEGI (2013))

Las corrientes perennes son ríos o arroyos que llevan caudal durante todo el año, el punto más bajo del cauce se encuentra siempre abajo del nivel de aguas freáticas y siempre están alimentadas, totalmente o en parte por el agua subterránea, es decir, son efluentes. Una corriente intermitente transporta agua durante la época de lluvias de cada año, cuando el nivel freático asciende hasta quedar por encima del punto más bajo de cauce. En época de secas el nivel freático queda por debajo de dicho punto y la corriente no transporta agua, salvo cuando se presenta alguna tormenta. En el caso de las corrientes efímeras o influentes el nivel freático siempre está a la altura del punto más bajo del cauce y transportan agua inmediatamente después de una tormenta, y, en este caso, alimentan a los almacenamientos de agua subterránea.

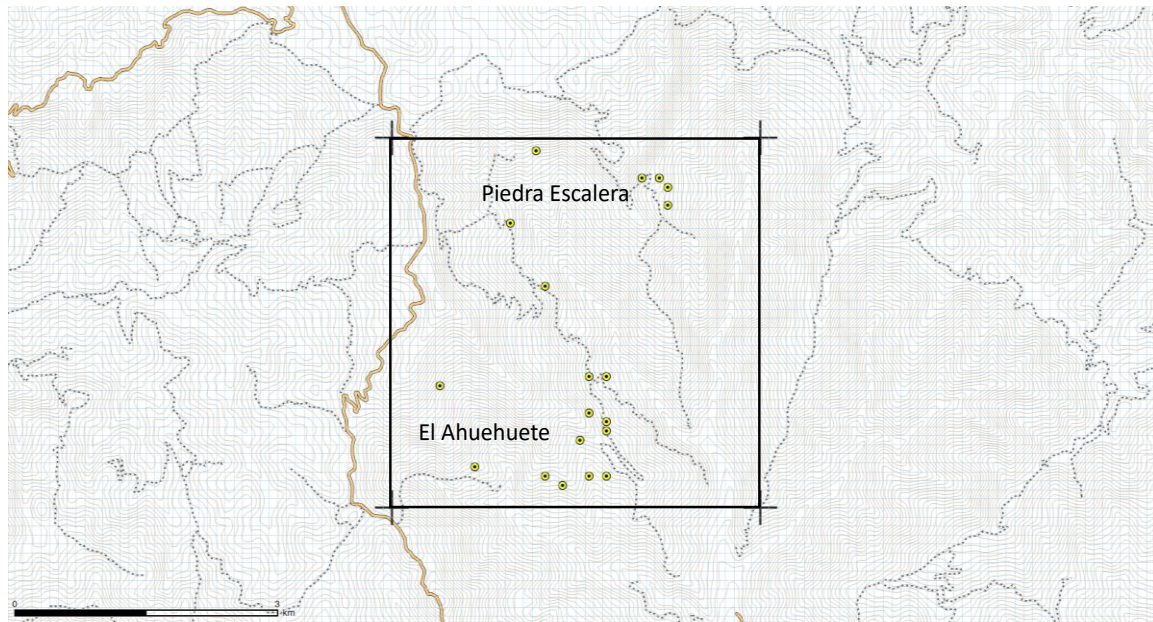
### 3.2.7 Carreteras y caminos

De acuerdo con INEGI (2013) la infraestructura carretera en el municipio de Tlacoapa (Figura 3.14), líneas discontinuas de color negro corresponde a carreteras de terracerías. Éstas son caminos con piso nivelado y sin revestimiento acondicionado para el rodamiento de vehículos, fabricados con materiales del terreno natural de la zona, como tierra, piedra bola o tezontle.

Las condiciones en que se encuentran los caminos en el municipio de Tlacoapa y en muchos otros lugares del país, de acuerdo con Martínez (2015) y Starkey *et al* (2002), son de caminos

rurales en mal estado, sólo se usan en determinadas rutas y suelen recibir poco mantenimiento. La movilidad en las zonas rurales se realiza con pocos vehículos motorizados, pequeñas motocicletas, carretas tiradas por animales, tracción humana (como la bicicleta) y a pie.

La mayor parte de las carreteras y caminos utilizados no son para vehículos de motor, en realidad muchas "carreteras" son simplemente senderos, caminos, veredas y puentes peatonales. Casi todas las actividades de movilidad son principalmente a pie, en menor grado por tracción animal y todavía menos por motorización.



**Figura 3.14** Caminos de terracería (líneas negras intermitentes) en el municipio de Tlacoapa y sus alrededores (elaborada con información de INEGI (2013))

## NEUROANÁLISIS CAUSAS-EFECTOS

---

### 4.1 DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS

La base de datos con que se realizó este trabajo de investigación se tomó, fundamentalmente, de dos notas informativas elaboradas por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y el Servicio Geológico Mexicano (SGM):

- *Inspección técnica al respecto de inestabilidad de laderas y otras afectaciones en la comunidad de El Ahuehuete, municipio de Tlacoapa, Guerrero (11/10/2013)*
- *Inestabilidad de laderas en la localidad Piedra Escalera, perteneciente al municipio de Tlacoapa, estado de Guerrero (16/10/2013),*

en atención a la solicitud de la Coordinación Nacional de Protección Civil y de la Subsecretaría de Protección Civil de Guerrero de documentar los efectos de las lluvias intensas acaecidas en el territorio mexicano del 12 al 15 de septiembre de 2013 (derivadas de las tormentas tropicales Manuel e Ingrid).

Los casos levantados en los citados informes fueron diecinueve y correspondían a lugares donde los especialistas del CENAPRED y el SGM observaron la manifestación de algún proceso de remoción de masa (deslizamiento) y donde la población hubiera sido afectada en sus bienes y entorno. La información recabada consistió básicamente en la georreferenciación del sitio, y en algunos casos, una breve descripción geométrica y geotécnica; datos extremadamente valiosos si se toma en cuenta el riesgo, el tiempo y los limitados recursos destinados a este tipo de campañas de reconocimiento.

Para completar una buena base de datos (aquella que describiera de la mejor manera posible el fenómeno) se buscaron recursos de numeraria del INEGI sobre carreteras y caminos, corrientes de agua, población y vegetación.

La información sobre precipitación pluvial histórica y la referida al mes de septiembre de 2013, fue obtenida del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), dependiente de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) a través de registros disponibles por internet de la estación meteorológica Chilapa. Esta estación fue elegida por ser la más cercana al área en estudio y que contaba con registros en las etapas y escalas de tiempo importantes para este trabajo.

Una vez que la base de datos registrados se ha conformado se acota el trabajo que el modelo puede realizar con base en esa información:

*Modelar como causas, SI: las características de sitios (sobre superficie) y un agente de alteración*

*como efectos, ENTONCES: situación remoción de masas (deslizamientos, flujos, fracturas, grietas).*

Para construir el sistema neuronal que realice esta tarea es necesario completar las situaciones que se modelan. Con los datos de los deslizamientos ocurridos en las poblaciones ese septiembre del 2013 se tienen definidas las situaciones que derivan en un movimiento (fisuras importantes, grietas) así sólo resta definir la contraparte, es decir: i) las condiciones en las que en otros sitios XY (caracterizados de la misma manera) sometidos a la misma intensa precipitación no se manifestaron movimientos, deslizamientos o fracturamiento evidente y ii) otros momentos, en la historia del lugar, en los que esos mismos sitios XY (caracterizados de la misma manera) sometidos a distintos niveles de precipitación (menores todos) no se manifestaron movimientos

Sobre la situación “se presentó movimiento” se tienen 19 casos ejemplo (día en el que se registró el desastre), otros 19 fueron elegidos en la zona en sitios XY que claramente (declaración de las cuadrillas de no presencia de daño) no presentaran movimientos de masas (inciso i) con lo que se completa el entorno el día de las precipitaciones anormales. Por otro lado, para las situaciones descritas en ii), sitios afectados por láminas de lluvia mucho menores, y en los que el fenómeno de deslizamiento no se había manifestado se compilaron cerca de 400 casos-ejemplo. El total de líneas en la base de datos es 494 lo que constituye una base más representativa y útil. Se usaron, para el entrenamiento de la RN 394 casos y el resto fueron separados para la prueba o validación del modelo neuronal.

## **4.2 TOPOLOGÍA DEL MODELO**

La forma en que se estructuró el modelo neuronal se presenta en la Figura 4.1 y se interpreta como una red que modela (encuentra y almacena) las relaciones entre las condiciones del sitio (ambiente natural y antrópicas) con las hídricas (milímetros de lluvia) para determinar los sitios (situaciones XY) que potencialmente pudieran fallar (moverse, deslizarse, fluir, agrietarse).

### **4.2.1 Capa de entrada**

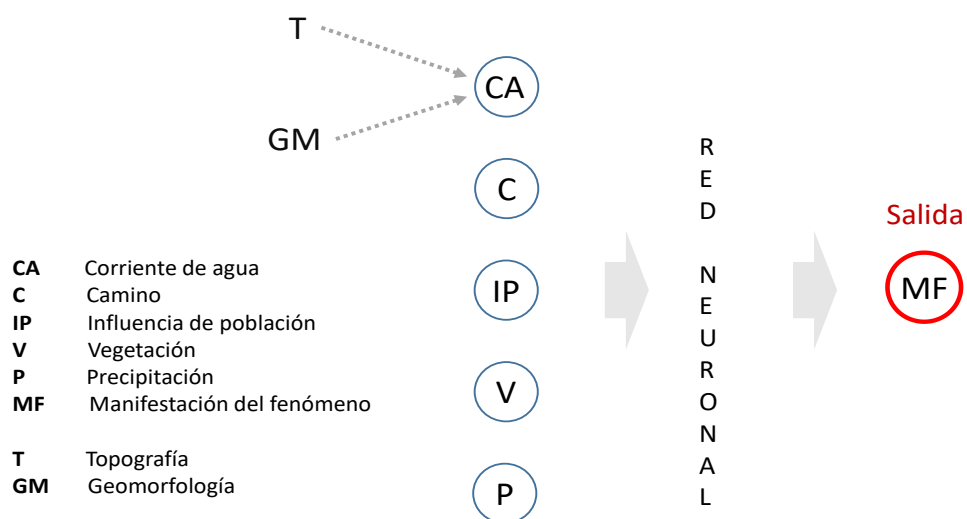
La capa de entrada es la capa que recibe directamente la información proveniente de las fuentes externas a la red y no tiene contacto directo con el exterior. La RN de este modelo cuenta con cinco nodos que corresponden a los parámetros que fueron mencionados en la sección anterior: 1. corriente de agua (CA), 2. camino (C), 3. población (IP), 4. vegetación (V) y 5. precipitación (P).

Para llevar a cabo un estudio de este tipo es necesario fijar la unidad-área sobre la superficie terrestre en la que se contabilizan las entradas, es decir, la sección geométrica plana que

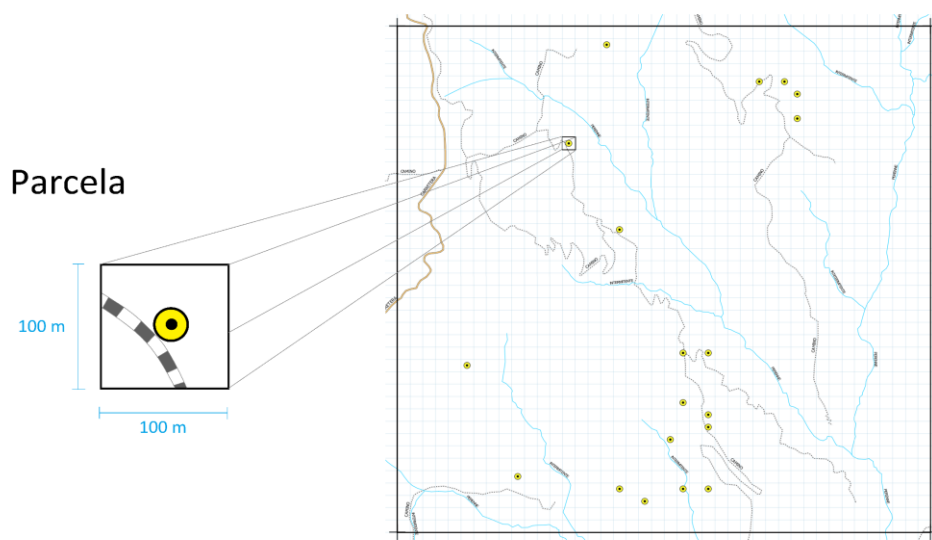


“contienen” la descripción numérica y que es válida únicamente en esa área. A partir de una revisión profunda de la distribución de la información, de las pláticas y experiencias del equipo de trabajo del CENAPRED y la revisión del tipo de efectos en estudio, se decidió que 100 x 100 m era la unidad (cuadrada) más simple y eficiente para cuantificar el número de corrientes, caminos, habitantes y especies vegetales que existían en ella.

Como se observa en la Figura 4.2, el área total en estudio está 42 veces subdividida sobre el eje X y 41 en el eje Y, generando 1722 unidades que representan casos, patrones o ejemplos de comportamiento.



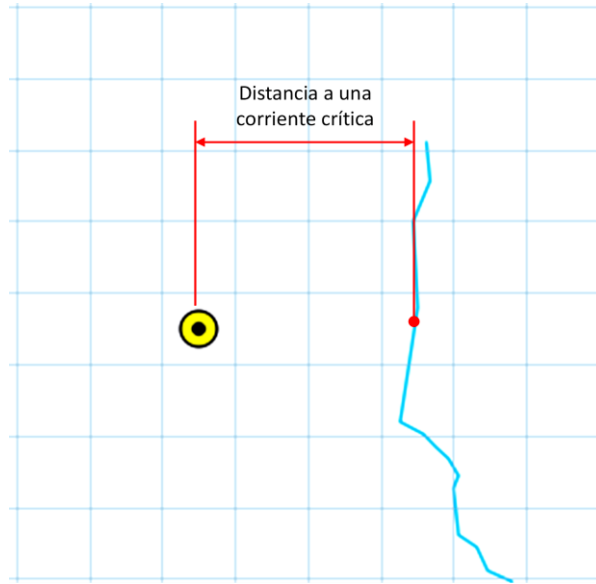
**Figura 4.1** Entradas y salidas del modelo neuronal



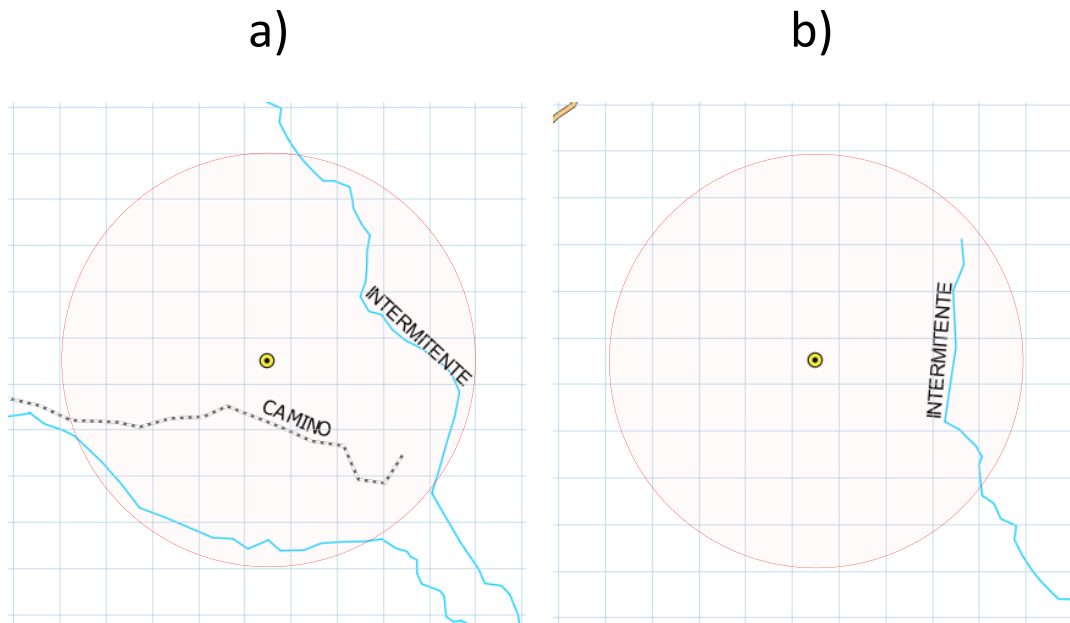
**Figura 4.2** División en parcelas del área en estudio

### *Descripción de entradas*

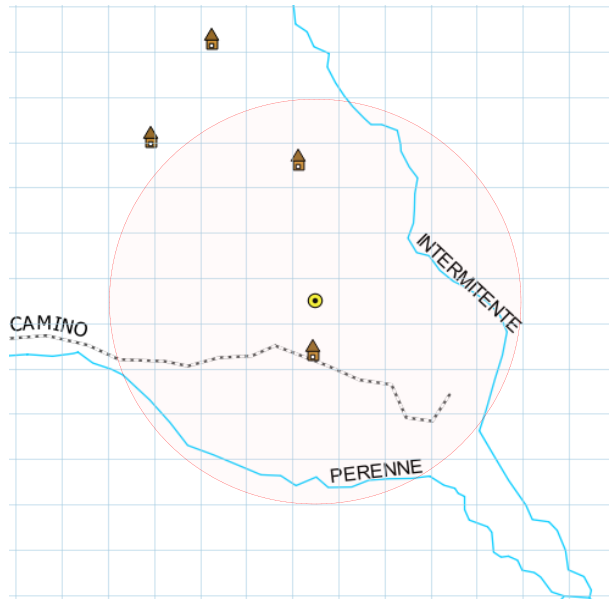
1. Corriente de agua (CA): Dentro del área de estudio y para los fines de este modelo, se denomina corriente de agua a todo cuerpo de agua, ya sea intermitente o perenne, que sea categorizada como “cercana” a la unidad cuadrada. La corriente crítica es la más próxima, es decir, la más cercana en cualquiera de las direcciones XY. La unidad de observación de esta variable es la distancia en número de unidades cuadradas (Figura 4.3).
2. Camino (C): Dentro del área en estudio y para los fines de este modelo, se denomina Camino a cualquier obra civil por donde transitan los habitantes para trasladarse de un lugar a otro, no importando el tipo de material con que está construido. Esta variable es categórica, por lo que puede tomar dos clases, declaradas como SI, la presencia de camino (Figura 4.4a) y tomando el valor de 1, y el caso en el que no hay presencia de caminos, NO, y asume el valor de 0 (Figura 4.4b). La “presencia” se determina colocando al sitio (unidad cuadrada en evaluación) en el centro de una circunferencia de radio 500 m, si dentro de esta figura geométrica se pueden localizar algún tipo de camino, esa entrada toma el valor de 1, caso contrario toma el valor 0.
3. Población (IP): Dentro del área en estudio y para los fines de este modelo, la Población es una variable que intenta cuantificar el impacto de los conjuntos poblacionales en cada unidad cuadrada. El número de habitantes reportados en el censo del INEGI en el área fue distribuido en el número aproximado de casas habitación registradas, así se cuantificó de manera aproximada el número de habitantes por casa, con este dato y sabiendo el número de casas habitación construidas en unidad cuadrada se puede determinar el número de pobladores en esa unidad. Al igual que en el caso de caminos fue necesario usar el radio de influencia para determinar si existe o no presencia de seres humanos cercanos a la unidad cuadrada en observación. Si no existen casas habitación la entrada toma el valor 0, NO presencia de asentamiento humano cercano. Caso contrario la entrada es el número total de habitantes cuantificados en el área de influencia (Figura 4.5).
4. Vegetación (V): La unidad de Vegetación, al igual que en el caso de caminos, es una variable que puede tomar dos clases. El tipo de especie vegetativa “Bosque” que se representa con 0 y “Pastizal” se representa con 1.
5. Precipitación (P): La unidad de medición Precipitación, es la cantidad de agua registrada en la estación Chilapa, medida en milímetros. Es importante recordar que no todos los patrones tienen que ver con el día del evento fatídico del mes de septiembre de 2013, en la base de datos hay otras fechas en las que no se manifestó el fenómeno “movimiento” y fueron incluidas para completar el entrenamiento de la red neuronal.



**Figura 4.3** Distancia a una corriente de agua crítica



**Figuras 4.4 a)** Caso presencia de camino, toma el valor 1 y **b)** caso no presencia de camino toma valor 0, radio de influencia 500m.



**Figura 4.5.** Influencia de población, en este caso la unidad en estudio (círculo amarillo) está influenciada por dos unidades habitación, para conocer el valor de la entrada sólo resta multiplicar el 2 por el número de habitantes promedio /casa.

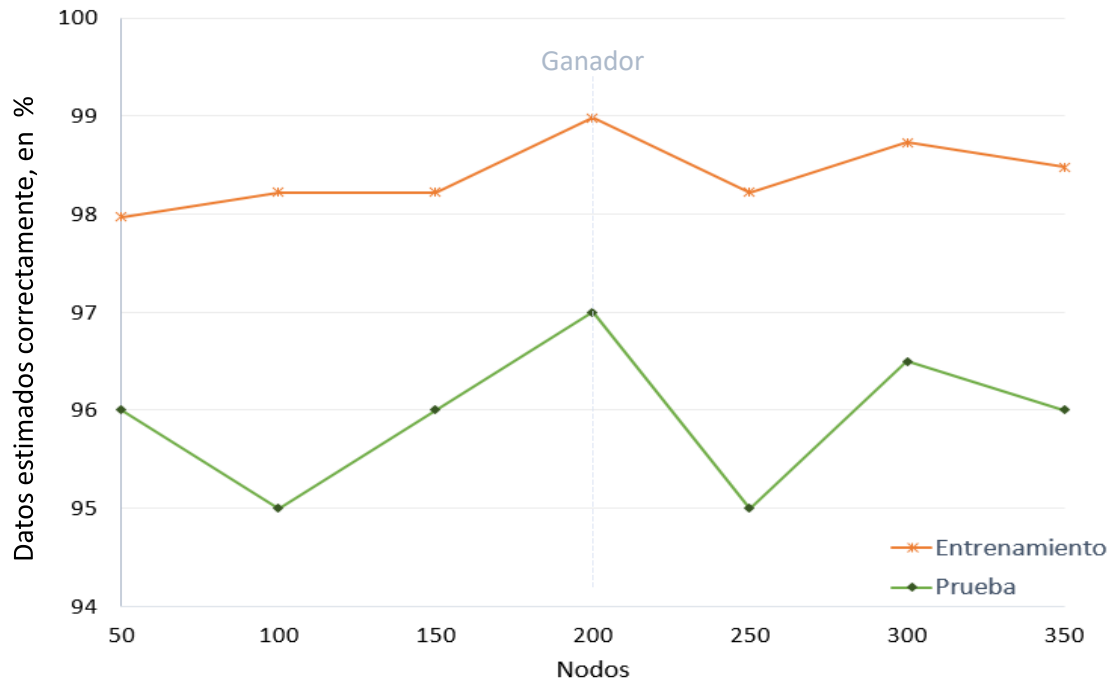
En la Tabla 4.1 se muestran los rangos dinámicos de las variables de entrada que intervienen en el modelo.

**Tabla 4.1.** Rangos dinámicos

	<b>Variables</b>	<b>Intervalo</b>
Entradas	Corriente de agua	1 – 14 Unidades cuadradas
	Camino	0 (No), 1 (Si)
	Influencia de población	0 - 124
	Vegetación	0 (Bosque), 1 (Pastizal)
	Precipitación	0.2 – 172.2 mm

#### 4.2.2 Capa oculta

El número de capas/nodos ocultos depende de la complejidad del problema que se presenta a la red. Con problemas simples, demasiados elementos de procesamiento podrían menguar su capacidad de generalización y pocas unidades de procesamiento ante problemas complejos no son capaces de encontrar relaciones funcionales. Para el caso de este modelo neuronal, y después de haber probado un gran número de combinaciones de número de nodos por capa y número de capas, se determinó que con una capa oculta de 200 nodos (tomando 15000 iteraciones) se obtenían los mejores resultados, alcanzando correlaciones de 98.98 y 97.00 por ciento en entrenamiento y prueba, respectivamente (Figura 4.6)



**Figuras 4.6.** Algunos modelos probados, contiene al ganador.

#### 4.2.2.1 Regla de aprendizaje

El método de aprendizaje adoptado es el algoritmo Quick Propagation (QP) (Fahlman, 1988) el cual minimiza el tiempo requerido para encontrar el conjunto de pesos que consiguen las menores diferencias entre los resultados calculados por la red y los objetivos de diseño. Además, esta técnica automáticamente regula la matriz de pesos, y detecta condiciones que aceleran el aprendizaje.

#### 4.2.2.2 Función de activación

La función de activación en la capa oculta es producto punto (DOT product), la suma ponderada de las entradas más un valor de sesgo. Intuitivamente, el producto punto escala cada entrada de acuerdo con su inferencia relativa en el incremento de la entrada de la red al nodo. En pocas palabras, el producto punto es una indicación de que tan alineados están los vectores el uno con el otro.

#### 4.2.2.3 Función de transferencia

Se empleó la función de transferencia sigmoide, que actúa como un compresor, conteniendo la función de entrada cuando se obtienen grandes valores tanto positivos como negativos. Los valores grandes asintóticamente se aproximan a 1, mientras que valores grandes negativos tienden a 0.

### 4.2.3 Capa de salida

La capa de salida es la encargada de transferir la información de la red neuronal hacia el exterior. Para los fines de este modelo la salida es una variable categórica, que expresa la manifestación o no del movimiento (deslizamiento, flujo, fractura, grieta) por lo que puede tomar dos clases: 1 donde el fenómeno se manifiesta, 0 para el caso contrario.

#### 4.2.3.1 Función de activación

Similar que el caso de la capa oculta, en la capa de salida la función de activación adoptada es producto punto.

#### 4.2.3.2 Función de transferencia

Para la capa de salida, se empleó la función de transferencia lineal. La salida de una función de transferencia lineal es proporcional a su entrada.

### 4.2.4 Criterio de terminación: error mínimo

La función de error mide la distancia entre el vector de salida deseado y el error de salida deseado y el error de salida actual, así como el algoritmo de aprendizaje ajusta los pesos en la red para disminuir el error en el conjunto de entrenamiento. El adoptado en esta investigación es el error cuadrado promedio el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$E = \sqrt{\frac{\sum (D_{ij} - Y_{ij})^2}{M}}$$

donde:

$E$ : es el error cuadrado promedio

$D_{ij}$ : es la  $i$  salida deseada para el ejemplo de entrenamiento  $j$

$Y_{ij}$ : es la  $i$  salida de la red actual para el ejemplo  $j$

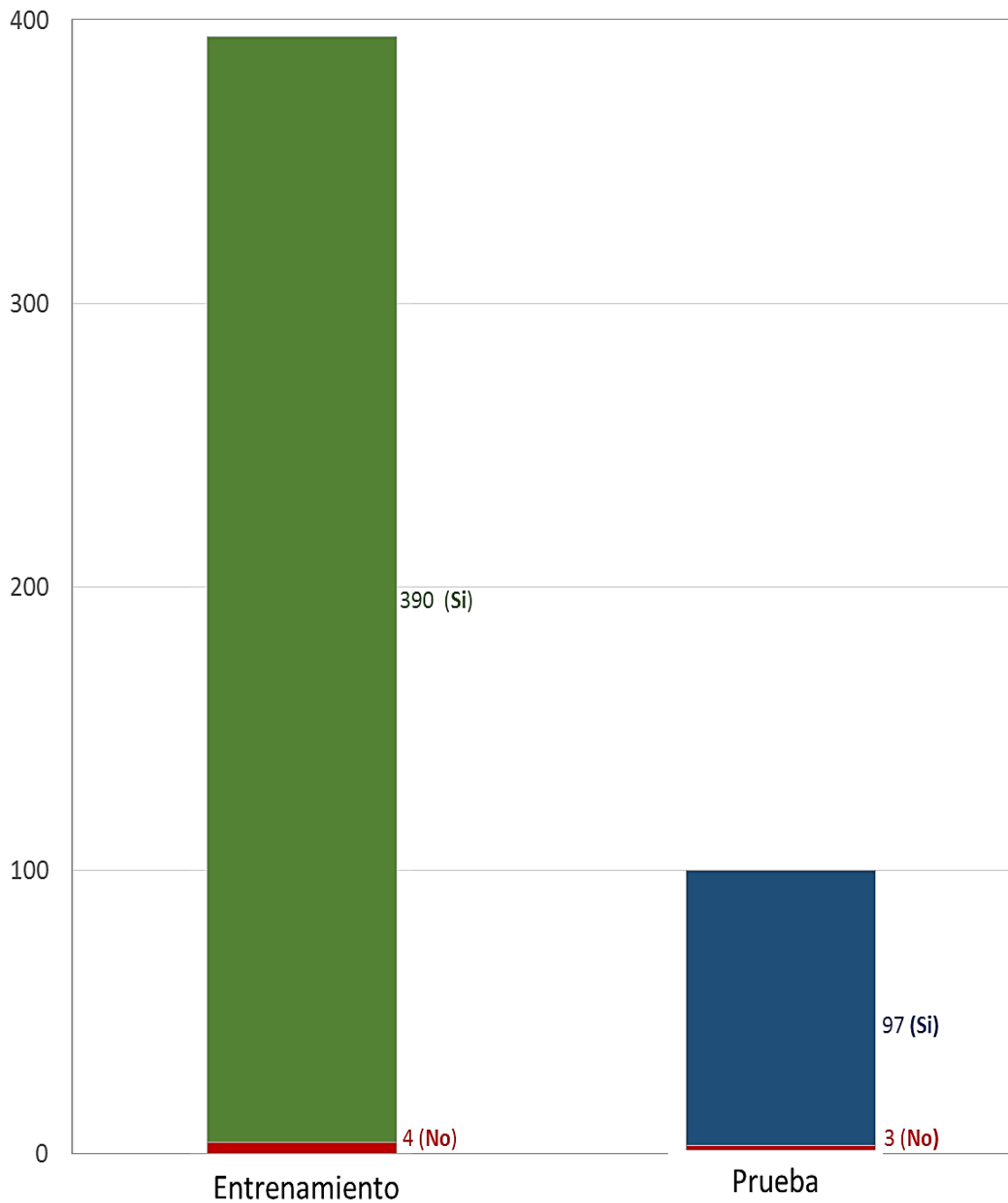
$M$ : es el número de veces de salida del número de ejemplos.

## 4.3 RESULTADOS

Como ya se dijo, el conjunto de casos para la construcción del modelo neuronal fue de 394 durante el entrenamiento y 100 fueron separados para la prueba o validación. Con la arquitectura ganadora se consiguieron durante el entrenamiento 390/394 casos predichos de manera correcta mientras que en la prueba fueron 97/100 (Figura 4.7).

En la Figura 4.7, se muestra en colores rojo los casos que diferían de lo registrado (objetivo) mientras que los azul y verde representan los casos con respuestas correctas. La red tiene un

buen comportamiento ante casos de prueba y entrenamiento indistintamente si predicen situaciones en la que se presentan movimientos o no.



**Figura 4.7** Medido contra evaluado del modelo neuronal

#### 4.4 ANÁLISIS ESPACIAL DE ENTRADAS→SALIDA

Una vez que se ha calificado al modelo neuronal como *válido*, se dice está en condiciones de usarse en modo de trabajo, es decir, de pronosticar futuros comportamientos, o respuestas a situaciones no contenidas en el archivo de prueba/entrenamiento.

En esta sección se presentan ejemplos del tipo de análisis que pueden generarse con una red de este tipo. Sin ser exhaustiva, esta presentación pretende fijar los criterios de búsqueda y la manera en la que se interpretan, sin embargo, los modelos pueden ser explotados tanto como lo decida o sea capaz el usuario.

*Conocer más sobre el día del desastre.* En este primer ejercicio se alimentó a la red con el total de datos/información de todas las unidades cuadradas que ocupan la zona en estudio y fueron sometidas a una precipitación de 172.2 mm de agua, la que se registró el día de los deslizamientos. El objetivo fue determinar las zonas que pudieron haber manifestado alguna afectación pero que el equipo de reconocimiento, por alguna razón, no pudo levantar (Figura 4.8b).

*Escenarios con niveles menores y mayores láminas de precipitación.* Una vez determinado el escenario de manifestaciones que pudiera haber ocurrido ese día, a pesar de no haber sido levantado, se propusieron como entradas dos condiciones adicionales: una con precipitación inferior y que pudiera referirse a horas o días antes de la situación extrema (150 mm/d) (Figura 4.8a) y otro superior a los 172.2 mm/d, para evaluar el nivel de daños si hubiera seguido lloviendo algunas horas más (200 mm) (Figura 4.8c).

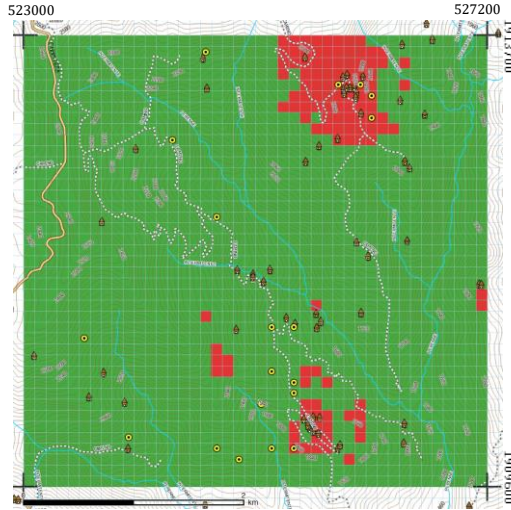
En las Figuras 4.8 (a, b y c), se muestran los resultados obtenidos con el modelo neuronal y en los que se señalan los lugares que pudieron haber presentado movimientos el día del evento (4.8b), es decir las zonas vulnerables frente a ese nivel de precipitación y sus características geomorfológicas y antrópicas. Las unidades coloreadas en rojo son aquellas en las que la manifestación es posible, mientras que las coloreadas en verde son aquellas unidades en las que la posibilidad de que se vieran afectados sería de baja a nula. Los mapas 4.8a y 4.8c muestran la evolución de las zonas de desastre conforme los niveles de precipitación van aumentando. Esto sin duda es interesante, pero sobre todo útil, pues las autoridades podrían conocer momento a momento (de registro de milímetros de agua por día) cuáles son los lugares que deben ser socorridos de inmediato, cuáles pueden ser sólo alertados y en cuáles no hace falta la presencia inmediata de las fuerzas especiales de ayuda.

Por último, es muy importante hacer mención que los mapas obtenidos con el modelo neuronal, sólo son aplicables a la zona en estudio, la función de aproximación neuronal deriva de los casos considerados; sin embargo, la metodología es general y puede extenderse hacia áreas mayores o en otros estados.

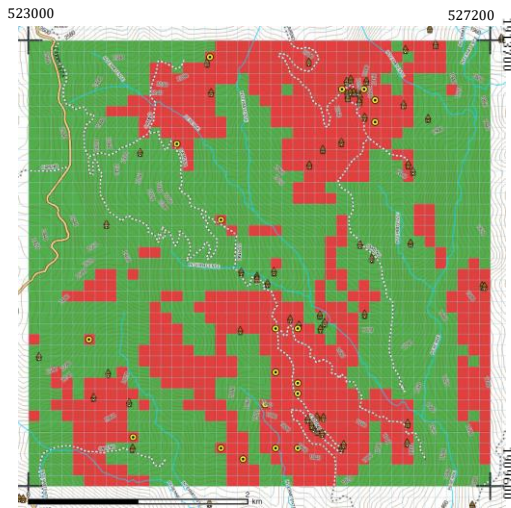
Para entender mejor cómo funciona un modelo que permite simular escenarios, como el presentado en esta investigación, se mostrará un ejercicio sobre la modificación de una variable, por ejemplo, Población.



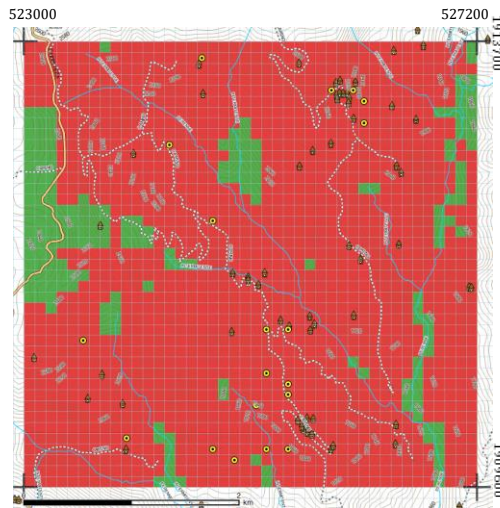
a) Escenario para 150 mm



b) Escenario para 172.2 mm



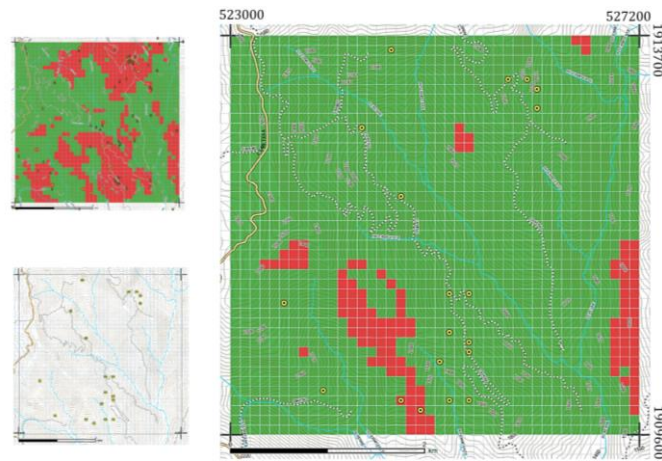
c) Escenario para 200 mm



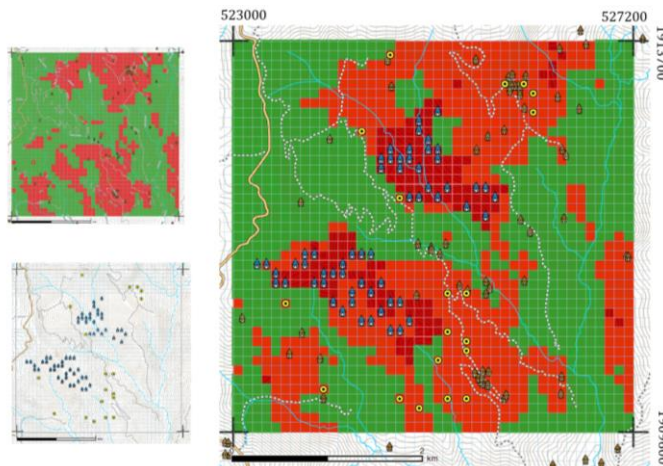
**Figuras 4.8** Escenario para diferentes niveles de precipitación.

#### 4.4.1 Efecto de la variación de la Población

La influencia de la población como una variable importante para determinar la susceptibilidad de deslizamiento de laderas puede ser estudiada en los mapas generados con el modelo neuronal. En este ejercicio de simulación de escenarios la entrada Población se modifica en dos condiciones diferentes a la real. En el mapa mostrado en la Figura 4.9 se puede apreciar el grado de afectación, para los 172.2 mm/d de agua, si se eliminan los centros poblacionales. La reducción de las unidades en rojo es dramática y las que existen señalan únicamente sitios dónde, por la topografía y las pendientes de los ríos, es lógico que debiera alertarse. Cuando la población se incrementa de 59 a 118 unidades de Población, el resultado es alarmante. Las zonas en rojo del día del evento del 2013 se “comunican” en lo que se convierte en una gran mancha roja que abarca casi en su totalidad el área en estudio (Figura 4.10). Es importante resaltar que las demás variables de entrada (corrientes de agua, caminos, vegetación y precipitación, la del día del desastre) no fueron modificadas.



**Figura 4.9** No hay habitantes y se registraron 172.2 mm de agua.



**Figura 4.10** Mayor población, casas en café situación original, casas en azul el incremento

## CONCLUSIONES

---

### 5.1 SOBRE EL MODELO

A pesar de la escasez de los casos levantados y la incertidumbre adherida a la interpretación y medición de las manifestaciones del fenómeno, el modelo neuronal mostró remarcables capacidades para cuantificar, espacialmente, el impacto de las variables geomorfológicas, antrópicas e hídricas sobre los procesos de remoción en masa. Se obtuvieron altas correlaciones entre lo medido y lo evaluado, así como sonora congruencia en escenarios simulados y efectos prospectados. Este tipo de resultados difícilmente podrían obtenerse con metodologías de análisis convencionales. La robustez y flexibilidad es el sello característico de esta propuesta cognitiva.

### 5.2 SOBRE LAS VARIABLES

De acuerdo con el universo de descriptores levantado, de entre las cinco variables consideradas en la elaboración de este modelo resalta el impacto que la “población” tiene sobre la posibilidad de una manifestación adversa. Es necesario puntualizar que esta influencia está interrelacionada con los valores dinámicos que toman los otros cuatro parámetros, debe siempre ser considerado que propuestas de este tipo trabajan con los fenómenos como un *todo*. Los planteamientos *holísticos* se ponderan como más útiles y eficientes.

En orden jerárquico, pero lógicamente ligado se encuentra la deforestación. Cuando grandes áreas de bosques son taladas, el impacto sobre la estabilidad del terreno es evidente. Si bien intuitivamente y teóricamente se reconoce la negatividad del cambio a pastizales, en esta propuesta se presenta una alternativa para cuantificar el tamaño de las parcelas que no ponen en mayor riesgo a la población y los límites en los que deberían de ser cuidados, tanto por los habitantes como por los órganos gubernamentales.

Los caminos y los trabajos para acondicionar la comunicación entre poblaciones también aparecen como factor determinante pero en dupla con las corrientes lo que coincide con lo expuesto en los testimonios de los especialistas que acudieron a auxiliar a la población, en los que se describe la imposibilidad de acudir por tierra a las diferentes comunidades que se encontraban en situación de emergencia, la liga entre los caminos colapsados y los grandes movimientos de masas resultó evidente.

Con la ayuda de esta propuesta es posible determinar valores de alerta (alarma) en los que el detonante estudiado (precipitación) acerca a los ambientes estudiados a condiciones de inestabilidad y riesgo.

### **5.3 SOBRE SU APLICABILIDAD**

Esta es una propuesta de metodología. No se pretende calificar como modelo absoluto. Pero sí presenta exitosamente el análisis de la zona en el día del desastre, califica a los principales responsables de los movimientos y permite simular escenarios alternativos.

Es natural pensar que para hacerlo mucho más confiable, efectivo y útil en zonas de mayor impacto debe describirse más profundamente el medio, así se recomienda el crecimiento del número de variables de entrada y ampliar su naturaleza, por ejemplo, tomando en cuenta parámetros de monitoreo en tiempo real que alimenten a cada instante al cerebro neuronal de tal forma que éste se transforme en un sistema de alarma/alerta inmediato.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Alcántara-Ayala, I. (2000). "Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología" Boletín del Instituto de Geografía UNAM, 41.
- Alcántara-Ayala, I. (2008). "On the historical account of disastrous landslides in Mexico: the challenge of risk management and disaster prevention," Journal of Advances in Geosciences, 14: 159-164.
- Alimohammadlou, Y., Najafi, A. y Gokceoglu, C. (2014). "Estimation of rainfall-induced landslides using ANN and fuzzy clustering methods: A case study in Saen Slope, Azerbaijan province, Iran", Catena, 120, pp. 149-162.
- Bishop, C. M. (1996). *Neural network for pattern recognition*, Clarendon Press, Oxford.
- Blong, R. J. (1973). "Relation "Relationships between morphometric attributes of landslides", Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement Band, 18, pp. 66-77.
- Brunsdon, D. (1973). "The application of systems theory to the study of mass movement", Geologia Applicata e Idrogeologia, University of Bari. 8, 1, pp. 185-207.
- CENAPRED (2006). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: Fenómenos Geológicos*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- CENAPRED (2013). *Inspecciones Técnicas al respecto de inestabilidad de laderas y otras afectaciones en las comunidades de Piedra Escalera y El Ahuehuete, Municipio de Tlacoapa Gro.*, Centro Nacional de Prevención de Desastres – Servicio Geológico Mexicano, México (Notas informativas)
- Coates, D.R. (1977). "Landslide perspectives", in Coates, D R. (ed.), Landslides, Geological Society of America.
- CONAGUA (2014). *Reporte del Clima en México: septiembre 2013*, Comisión Nacional de Agua, México.
- Corominas, J. y García Yague, A. (1997). "Terminología de los movimientos de ladera", in Alonso, E., J. Corominas. J. Chacón. C. Oteo y J. Pérez (eds.), IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, III, Granada, España, pp. 1051-1072.
- Crozier, M. J. (1973). "Techniques for the morphometric analysis of landslips", Zeitschrift für Geomorphologie, 17, pp. 78-101.
- Cruden, D. M. y Varnes, D. J. (1996). "Landslides types and processes", in Turner, A. K. y R. L. Schuster (eds.), Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board. Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C., pp. 36-75.

Gómez, H. y Kavzoglu, T. (2005). "Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela", *Engineering Geology*, 78, pp. 11-27.

Du, K. L. y Swamy, M. N. S. (2006). *Neural Networks in a Softcomputing Framework*, Springer, Germany.

EPOCH (European Community Programme; 1993). *Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community*, Flageollet, J. C. (ed.), 3 volumes, Contract no. 900025.

Erskine, C. F. (1973). "Landslides in the vicinity of the first Randall Reservoir. S. Dakota", U.S. Geological Survey Prof. Paper 675, 64.

García, S. R. (2009). *Cómputo aproximado en la solución de problemas geosísmicos*, Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería, DEPMI-UNAM, México

Haykin, S. (1999). *Neural networks: A comprehensive foundation*, 2a ed., Prentice Hall, USA.

Hutchinson, J. N. (1968). "Mass movement". en Fairbridge. R. W. (ed.), *Encyclopedia of Earth Sciences*, Reinhold, New York, pp. 688-695.

Hutchinson, J. N. (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, pp. 3-35.

IAEG Commission on Landslides (1990). "Suggested nomenclature for landslides", *Bulletin International Association for Engineering Geology*, 41, pp. 13-16.

INEGI (2013). *Conjunto de datos vectoriales de información topográfica E14D31 (Potoichán) escala 1:50 000 serie III.*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, (en formato SHP).

INEGI (2015). *Cartografía Geoestadística Urbana y Rural Amanzanada con corte al Cierre de la Encuesta Intercensal 2015*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, (en formato SHP).

Kandel, E. R. y Hawkins, R. D. (1992). "The biological basis of learning and individuality" *Scientific American*, 267, pp. 77-88

Landa, R. y Carabias, J. (2009). "Reflexiones sobre los procesos socioambientales del deterioro en La Montaña", *Estado del Desarrollo Económico y Social de los Pueblos Indígenas de Guerrero, México*, ed. SIPIG-UNAM, pp. 129-132.

Martínez, S. (2015). *Una solución vial, para comunicar comunidades aisladas de 2500 o menos habitantes*, Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, DEPMI-UNAM, México.

SEDATU (2013). *De las más de 20 mil viviendas afectadas por “Manuel” e “Ingrid” en el país, 13 mil 700 son de Guerrero*. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, México. (Boletín de prensa 198, consultado en diciembre 2014).

SEDESOL (2014). *Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social: Tlacoapa, Gro.*, Secretaría de Desarrollo Social, México

Selby, M. J. (1993). *Hillslope materials and processes*. 2a. ed., Oxford University Press, Oxford.

Sharpe, C. F.S. (1938). *Landslides and related phenomena*, Columbia University Press, New York.

Skempton, A. W. (1953). "Soil mechanics in relation to Geology", *Proceeding of the Yorkshire Geological Society*, 29, pp. 33-62.

Starkey, P., Ellis, S., Hine, J. y Ternell A. (2002). "Mejora de la movilidad rural: opciones para el desarrollo del transporte motorizado y no motorizado en las áreas rurales" Serie TWU, Banco Mundial, USA.

Terzaghi, K. (1950). "Mechanisms of landslides", *Geol. Soc. Am., Berkeley Volume*, pp. 83-123.

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

Ward. W. H. (1945). "The stability of natural slopes", *Geographical Journal*. 105:170-197.

WP/WLI (1990). "A suggested method for reporting a landslide", *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 41:5-12.

WP/WLI (1993), "A suggested method for describing the activity of a landslide". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 47: 53-57.

Zaruba, Q. y Mencl, V. (1969). *Landslides and their control*, Elsevier, Amsterdam. The Netherlands.