

ATLANTIC ZONE PROGRAMME

Report No. 12
Field Report 74

**ESTUDIO DEL POSIBLE RIESGO DE DESLIZAMIENTOS
Y PROCESOS ALIADOS EN LA CUENCA DEL
RIO TORO AMARILLO, COSTA RICA**

Margriet W. Hartman,

**Turrialba
Febrero, 1992**

**CENTRO AGRONOMOICO TROPICAL DE
INVESTIGACION Y ENSEÑANZA - CATIE**

**AGRICULTURAL UNIVERSITY
WAGENINGEN - AUV**

**MINISTERIO DE AGRICULTURA Y
GANADERIA DE COSTA RICA - MAG**

El Programa Zona Atlántica (CATIE-UAW-MAG) es el resultado de un convenio de cooperación técnica entre el CATIE, la Universidad Agrícola Wageningen (UAW) Holanda y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de Costa Rica. El Programa, cuya ejecución se inició en abril de 1986, tiene, como objetivo a largo plazo la investigación multidisciplinaria dirigida a un uso racional de los recursos naturales, con énfasis en el productor pequeño de la Zona Atlántica de Costa Rica.



Location of the study area.

PREFACIO

El presente estudio se realizó dentro el marco del Programa Zona Atlántica, un programa de investigación multidisciplinaria, que se inició en la Zona Atlántica de Costa Rica en 1986, orientada a buscar un uso sostenible de los recursos naturales desde el punto de vista físico-biológico como socio-económico.

Dentro de este contexto se llevó a cabo un estudio a la ocurrencia de deslizamientos en las partes altas del flanco noreste de la Cordillera Central de Costa Rica, que con cierta frecuencia influyen a la vida de la población que vive en la zona donde los grandes ríos que nacen en esta Cordillera depositan sus sedimentos.

El estudio se efectuó en el periodo noviembre 1989 hasta junio 1990 y constituye para el autor un requisito parcial para optar al grado M.Sc. de la Universidad de Utrecht, Holanda.

Por tratarse de un informe preliminar, para citar la información contenida en el mismo se requiere la autorización del Programa Zona Atlántica.

Andrés Nieuwenhuyse
Edafólogo

CONTENIDO

PREFACIO

RESUMEN	1
SUMMARY	2
1. INTRODUCCION	3
2. DESCRIPCION DE LA CUENCA DEL RIO TORO AMARILLO	4
2.1 Geología y geomorfología	4
2.2 Clima y vegetación	8
3. PROCESOS EN LAS LADERAS EN LA ZONA MONTANOSA DE LA CUENCA	10
3.1 Principios básicos de los deslizamientos	10
3.2 Descripción de los procesos activos en la parte alta de la cuenca	12
3.3 Un deslizamiento representativo	15
3.3.1 Metodología	15
3.3.2 Resultados	19
3.4 Cartografía del riesgo de deslizamientos	24
3.4.1 Metodología	24
3.4.2 Resultados	27
3.5 Conclusiones	32
4. PROCESOS EN LA ZONA PLANA DE LA CUENCA	34
4.1 Metodología	34
4.2 Resultados	35
4.3 Conclusiones	36

5. INTERRELACION ENTRE LOS PROCESOS EN AMBAS ZONAS DE LA CUENCA	37
6. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES	37
7. REFERENCIAS	40

ANEXOS

Anexo 1. Glosario explicativo

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** **Ubicación del área de estudio**
- Figura 2** **Pendiente del río Toro Amarillo**
- Figura 3** **Reproducción esquemática de la geomorfología de la cuenca del río Toro Amarillo**
- Figura 4** **Precipitación promedio mensual de Irazú (A) y Guápiles (B)**
- Figura 5** **Tipos de deslizamientos**
- Figura 6** **Fuerzas que actúan sobre un cuerpo**
- Figura 7** **Descripción de los procesos activos en la parte alta de la cuenca**
- Figura 8** **Ubicación de los deslizamientos activos en el área de estudio (principio 1990)**
- Figura 9** **Método para determinar la velocidad de los bloques del deslizamiento**
- Figura 10** **Posibilidades de movimiento de los bloques**
- Figura 11** **Mapa del deslizamiento representativo**
- Figura 12** **Precipitación acumulada al lado norte y sur del volcán Irazú**
- Figura 13** **Mapa del riesgo de deslizamientos en el área de estudio**
- Figura 14** **Teoría del desarrollo de los deslizamientos en el área de estudio**

AGRADECIMIENTO

El seguimiento de este estudio estaba a cargo de Ir. A. Nieuwenhuyse y del supervisor final Prof. Dr. S.B. Kroonenberg. El Lic. J. Barquero del Observatorio Volcanológico de la Universidad Nacional, Heredia, me introdujo en la región del estudio. El Dr. Th.W.J. van Asch de la Universidad de Utrecht, Holanda, me ayudó formular una proposición del estudio y medió algunas indicaciones útiles durante mi estudio.

Además quería mencionar toda la gente de la 'Programa Zona Atlántica', Guápiles, la cual me ayudó en materias diferentes.

Al final menciono Don Carlos Orozco Marín. El me ayudó en el campo y continuará las mediciones. Con el y toda la gente de la Finca Liebres al Volcán Irazú tenía una estancia maravillosa y inoivable.

El Fondo de la Universidad de Utrecht y la Beca del STIR- Países en Desarrollo me dio un respaldo financiero.

Quiero agradecer todas las personas ante mencionadas la posibilidad dada a mi para hacer este estudio en Costa Rica y la ayuda durante la preparación, la estancia y el estudio en Costa Rica y la presentación del informe.

RESUMEN

Se investigó la ocurrencia y los mecanismos de deslizamientos y procesos aliados en la cuenca del Río Toro Amarillo al lado Atlántico de la Cordillera Central, Costa Rica.

En la parte más alta de la cuenca, ubicada entre los conos de los volcanes Irazú y Turrialba, la geología consiste de una alternancia de coladas de lava y depósitos piroclásticos. Actualmente hay una alta actividad de deslizamientos.

Se seleccionó un deslizamiento para observar los mecanismos de movimiento y los factores, que influyen en este proceso. Este deslizamiento se ubica en la fuente del río y se compone de algunos bloques de masa. Hay grava activa de la escarpa principal y en un cañón bajo en el deslizamiento.

Se midió la velocidad del traslado de los diferentes bloques del deslizamiento. La precipitación influye la velocidad y en algunos lugares esta relación es significativa. La influencia de los temblores no es clara.

Se hizo una cartografía de la predicción del riesgo de los deslizamientos de la parte alta de la cuenca. Se concluyó que la pendiente y la geología son los criterios más importantes.

Se presenta una teoría con respecto al desarrollo y a la ocurrencia de los deslizamientos. En la parte más alta de la zona se forman deslizamientos circulares. La división entre los depósitos de lava y ceniza meteorizada forma un plano de falla potencial. Aquí estanca el agua, el peso de la masa puede aumentar y se puede generar inestabilidad. Donde esta división aparece en la superficie se encuentran salidas del agua y por eso, río abajo la erosión hídrica aumenta. La erosión fuerte causa una socavación de las laderas aledañas y aquí también se genera inestabilidad.

En la llanura se estudió los procesos y sedimentos de la inundación del Río Chirripó en diciembre 1970. Se concluyó que el 4 diciembre 1970 el Río Chirripó cambió su curso y actualmente corre directamente al Río Sucio. Hubo un tiempo (por lo menos dos meses) en el cual ambos cauces (el nuevo y el antiguo) transportaban agua. De los perfiles, los cuales se han sido descritos del curso antiguo, también se concluyó que el río no cambió el curso de una sola vez.

Se probó aclarar cuál relación existe entre los procesos de la ladera en la parte montañosa y los procesos del río en la parte plana de la cuenca. En el sentido espacial, ambas zonas de la cuenca pertenecen a la misma unidad físico-geográfica. Para una relación temporal hay que observar cuál intervalo del tiempo existe entre un deslizamiento arriba en la cuenca y la sedimentación de este material disponible en la llanura y además cuáles procesos ocurren durante el transporte.

SUMMARY

For a research of the processes and the hazard of landslides and related processes, the catchment of the Toro Amarillo river at the north side of the Irazú and Turrialba volcanoes at the Atlantic side of the Cordillera Central, Costa Rica, has been studied.

Lithology of the upper part of the catchment consists of an alternation of lavas and pyroclastic deposits. Here, a high activity of landslides is found.

A representative landslide was selected in order to study the movement mechanisms and the factors influencing these processes. This landslide is situated at the origin of the Toro Amarillo river and consists of some blocks, separated by cracks. There is some active rockfall at the main scarp and in a canyon below the landslide.

The velocity of the movements of the blocks was measured and results to be influenced mainly by rainfall. In some cases this correlation has a statistical significance. The influence of seismic activity is not clear.

A 'landslide hazard map' was made for the upper part of the catchment by means of a model which uses the actual distribution of landslides in the area and some variables influencing the development of landslides. For each gridcell the stability was determined. It can be concluded that the angle of inclination and the geology are the most important criterions.

A theory concerning the development and occurrence of landslides was formulated. The boundary between lava deposits and weathered ash deposits is a potential slip plane. Here the water stagnates and instability may arise. Where this boundary appears at the surface springs are found and therefore downstreams erosion increases, causing undermining of the contiguous slopes.

Processes and sediments of the flood of the river Chirripó in december 1970 are described. The 4th of december 1970 the river Chirripó changed his course and actually discharges directly into the river Sucio. A certain period (at least two months) both courses carried water. Also sedimentary structures in the old course indicate that the river did not change its course in one single event.

The possible relation between the slope processes in the mountainous part and the river processes in the fluvial plane are discussed.

1. INTRODUCCIÓN

Las condiciones particulares de la geología y el clima en las zonas montañosas de Costa Rica, hacen que las laderas sean susceptibles a varios procesos de la inestabilidad. En Costa Rica los factores más importantes en el desarrollo de las laderas inestables son: la topografía (inclinación y irregularidades del relieve), el clima (precipitación), la hidrología (infiltración, escurrimiento superficial, socavación de las laderas), la vegetación y la geología (suelo, litología, estructura, meteorización). La topografía y la geología están íntimamente ligadas por los procesos geomorfológicos. La geomorfología es un medio importante para identificar las áreas inestables o susceptibles de desestabilización.

Pocas veces los mecanismos de disparo de un deslizamiento^{*} se producen independientemente. Por lo tanto los procesos tienen una gran complejidad y conseguir dominarlos es muy difícil. En Costa Rica los mecanismos de disparo más importantes son los sismos, el volcanismo, las lluvias intensivas (temporales) y la actividad humana (MORA, 1985).

La región afectada por un deslizamiento no siempre se limita a las laderas inestables, sino puede ser más grande. La gran cantidad de sedimento disponible para transporte por medio de un río después un deslizamiento, puede causar problemas serios en la zona de recepción de los sedimentos.

Para una investigación de los fenómenos antes mencionados se eligió la cuenca del Río Toro Amarillo al lado Atlántico de la Cordillera Central.

Las laderas altamente pobladas al sur del Volcán Irazú los procesos de las pendientes afectan más a la vida de la gente. Aquí se han hecho investigaciones detalladas (WALDRON, 1964, 1967, sin fecha ; ICE, 1964).

Al contrario a de lo que se piensa, al lado norte río abajo del Río Toro Amarillo también habían problemas para la población en el pasado. En diciembre del año 1970 se produjo una inundación con consecuencias desastrosas para la población local.

En este estudio se analiza cómo funcionan los procesos geomorfológicos en la cuenca del Río Toro Amarillo, así los procesos de la ladera en la parte montañosa de la cuenca, como los procesos fluviales en la llanura. Además se debe aclarar cual relación existe entre ambos procesos y cómo funcionan.

En la parte más alta de la cuenca hay muchos deslizamientos

¹ Las definiciones de los términos usados están descritos en el anexo 1. Estos términos han sido marcados con un (*).

activos, de los cuales se seleccionó un deslizamiento representativo para investigar más en detalle los procesos activos. Además se presenta una cartografía del riesgo de deslizamientos.

2. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO TORO AMARILLO

2.1 Geología y geomorfología

El Río Toro Amarillo nace entre los volcanes Irazú y Turrialba (Fig.1.1). Estos volcanes pertenecen a la Cordillera Central, que corre del noroeste al sudeste y separa el Valle Central de la Zona Atlántica. Esta Cordillera se compone de coladas de lava, lahares y cenizas volcánicas. La base es Pliocena, el resto es del origen Pleistoceno.

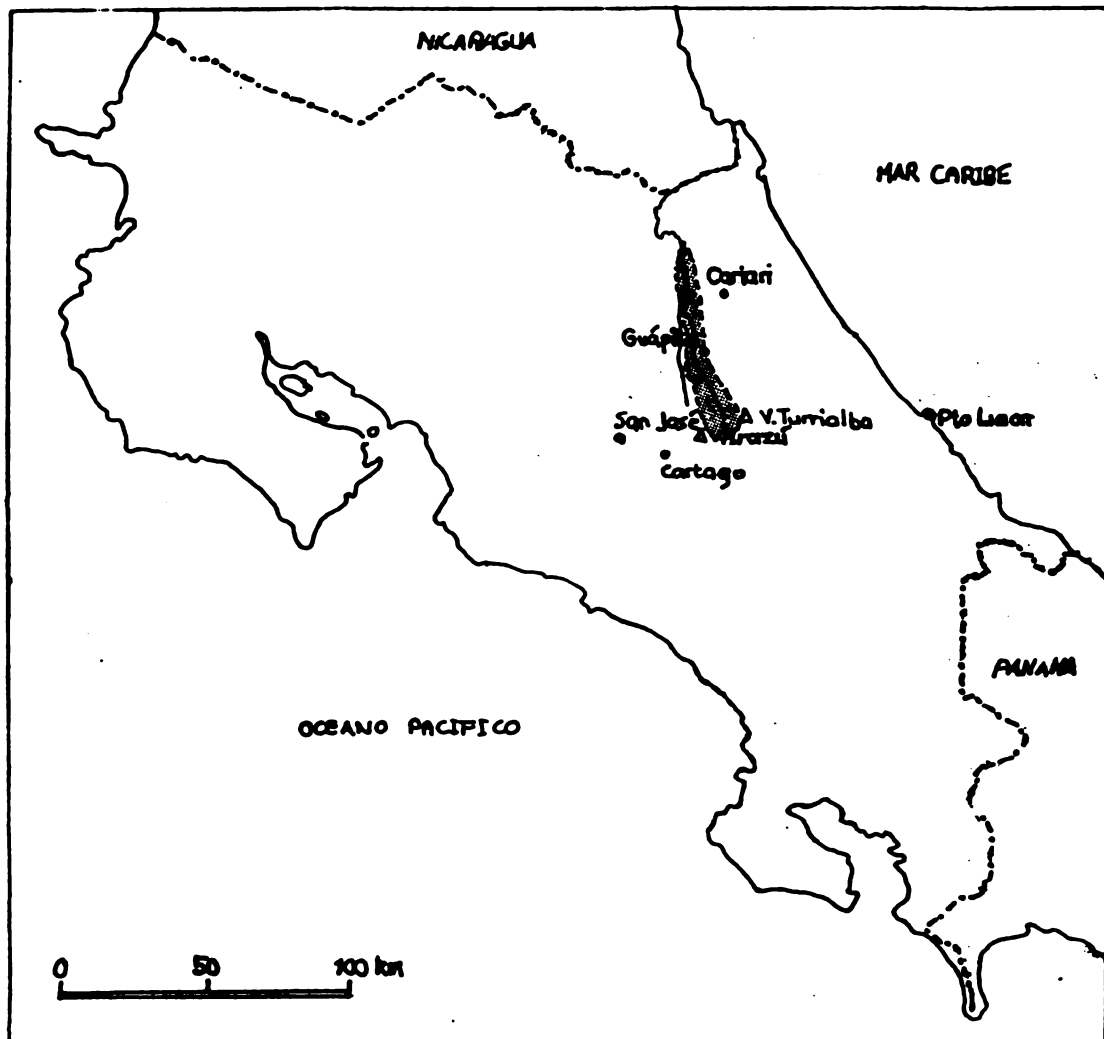


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

El Volcán Irazú estaba activo de marzo 1963 hasta marzo 1965 (KRUSHENSKY, 1967). La actividad volcánica se caracterizaba por emisiones de ceniza en forma intermitente, la cual se depositó sobre todo en la dirección oeste - noroeste (WALDRON, 1966). Cerca del cráter el espesor máximo de la capa de ceniza es de 2 metros. En la estación lluviosa la ceniza se arrastraba rápidamente. En los periodos secos la ceniza podía acumularse. Se estima que 50 por ciento o más de la ceniza fue arrastrada por la erosión durante el primero período lluvioso después de la erupción (WALDRON, 1966).

La última erupción del Volcán Turrialba se produjo en los años 1864 hasta 1866. Al lado norte-noroeste había mucha caída de la ceniza, y mucha de la vegetación fue destruida (REAGAN, 1987). En el siglo veinte el Volcán Turrialba ha tenido solamente una actividad fumarólica.

Toda la cuenca del Río Toro Amarillo tiene un subsuelo de origen volcánico, influenciado por los ríos. El río tiene una longitud de 52 km y la superficie de la cuenca abarca 230 km².

En la Figura 2.1 se encuentra la pendiente del Río Toro Amarillo, obtenido de las hojas topográficas, escala 1:50.000.

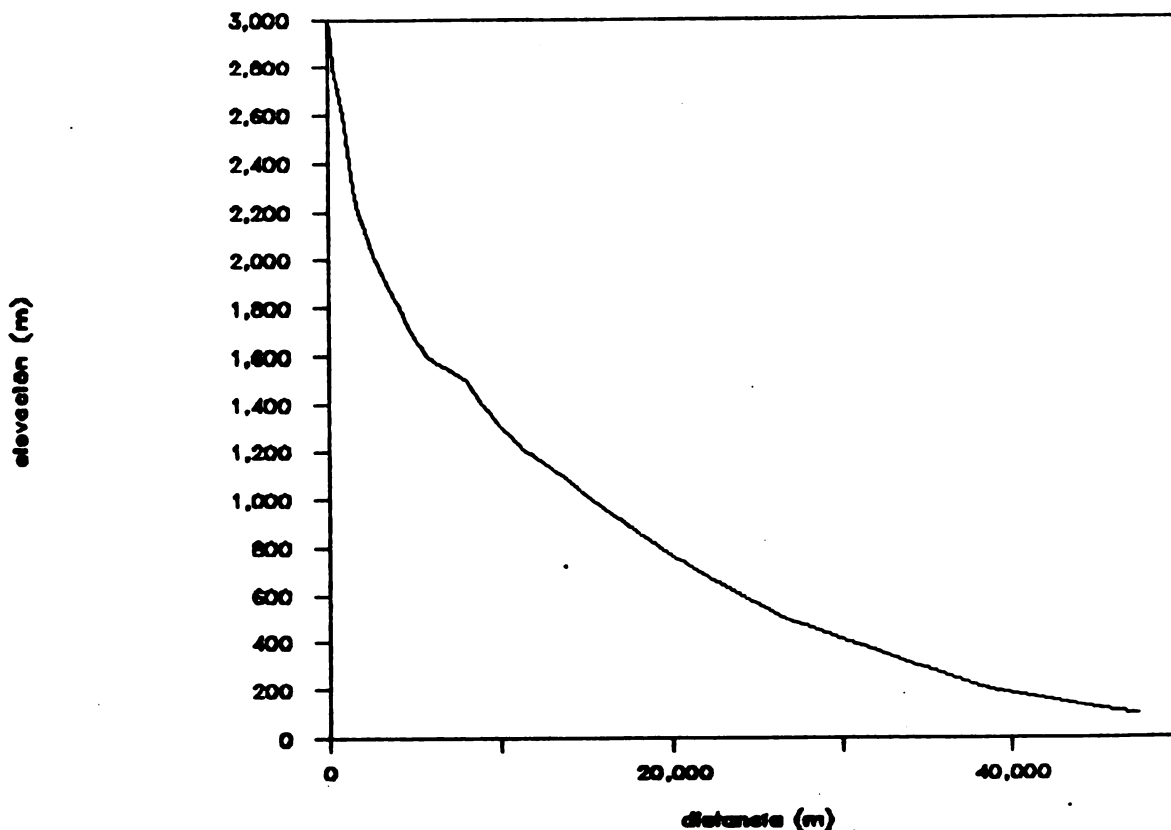


Figura 2: Pendiente del río Toro Amarillo.

La Figura 3 es una reproducción esquemática de la geomorfología de la cuenca. La parte más alta hasta unos 1600 metros entre los conos del Volcán Turrialba y del Volcán Irazú tiene paredes empinadas. El drenaje es radial y los valles tienen una forma de 'V'. Las laderas se componen sobre todo de coladas de lava y depósitos piroclásticos. En el relieve se puede reconocer deslizamientos antiguos y estabilizados. Actualmente hay una alta actividad de deslizamientos y otros procesos de la ladera en esta parte de la cuenca.

En muchos lugares la estratificación geológica corre paralela a la inclinación de las pendientes actuales.

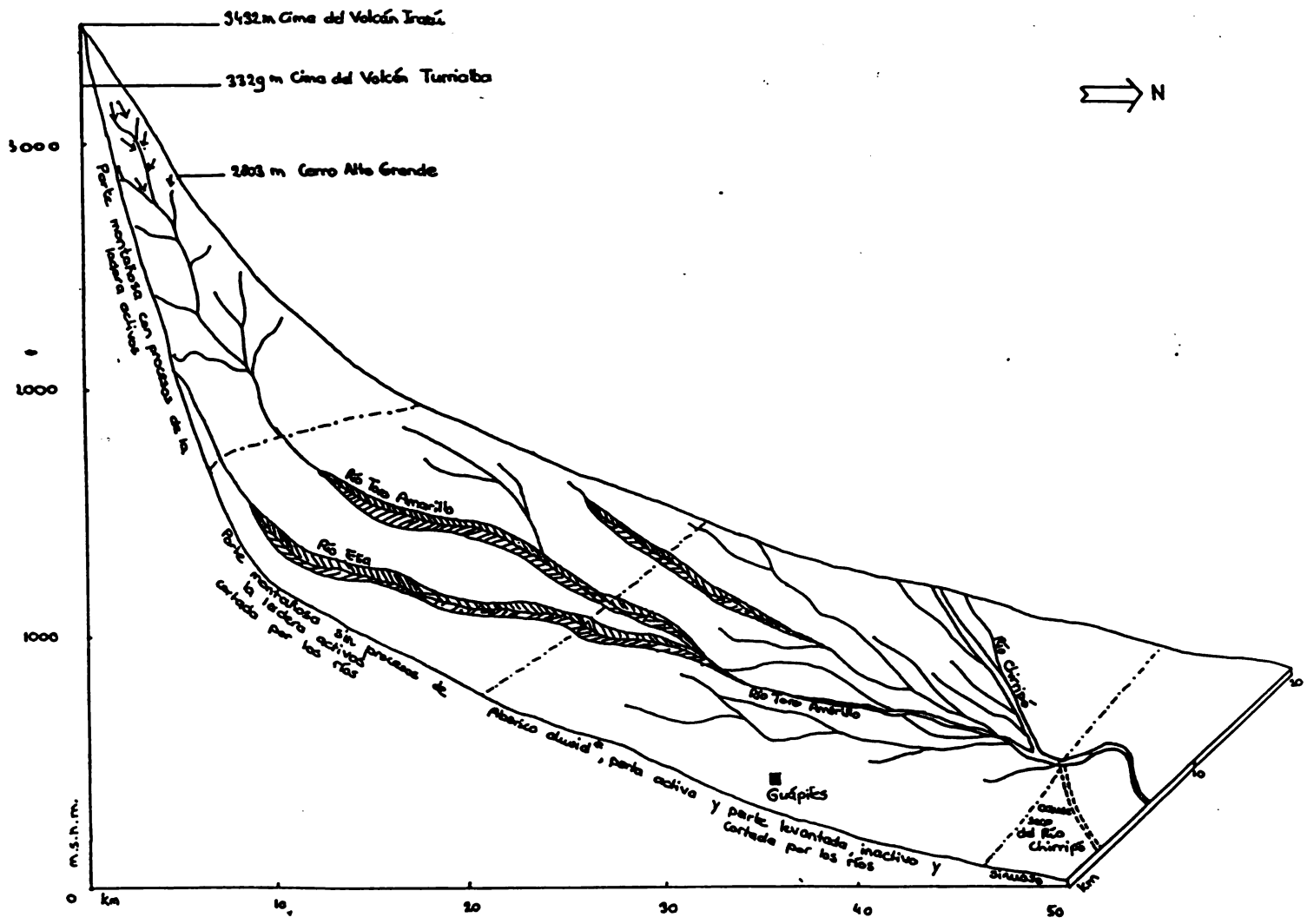


Figura 3: Reproducción esquemática de la geomorfología de la cuenca del río Toro Amarillo.

En la cuenca de Río Peñas a una cierta profundidad bajo la superficie, variando entre 2 y 50 metros, se encuentra un depósito de ceniza meteorizada. No se sabe exactamente el espesor máximo de esta capa, pero es más de 30 metros. El depósito es estratificado y tiene unas capas de material más resistente. El material es arcilloso, poco permeable y es altamente propenso a la erosión del agua.

En la parte media de la cuenca la pendiente disminuye y los procesos de la ladera ocurren menos que más alta en la cuenca.

El río ha formado un abanico aluvial* entre la zona montañosa y la llanura fluvial en una altura de 700 hasta 65 metros sobre nivel de mar. Actualmente una parte del abanico es levantada y por lo tanto, inactivo. Los ríos se incisaron en los espesos sedimentos fluviales.

El abanico aluvial* activo (de 250 hasta 65 metros sobre nivel de mar) se extiende hasta 20 km al norte de Guápiles. El patrón de drenaje es trezado.

A unos 65 metros de altura el Río Chirripó cambia a un río sinuoso hasta la desembocadura en el Río Súcio.

2.2 Clima y vegetación

La gran diferencia de la altura de unos 3200 metros en la cuenca del Río Toro Amarillo causa una gran variabilidad del clima y de la vegetación.

En la cima del Volcán Irazú (al lado sur) se encontraba una estación del Instituto Meteorológico Nacional, donde se registraba diariamente observaciones pluviométricas desde abril 1964 hasta febrero 1990. La precipitación anual promedio es de 1936 mm. (Figura 4a)

En Guápiles la precipitación promedio anual es de 4662 mm. (período 1970-1984). En Figura 4b se puede ver los promedios mensuales de lluvia.

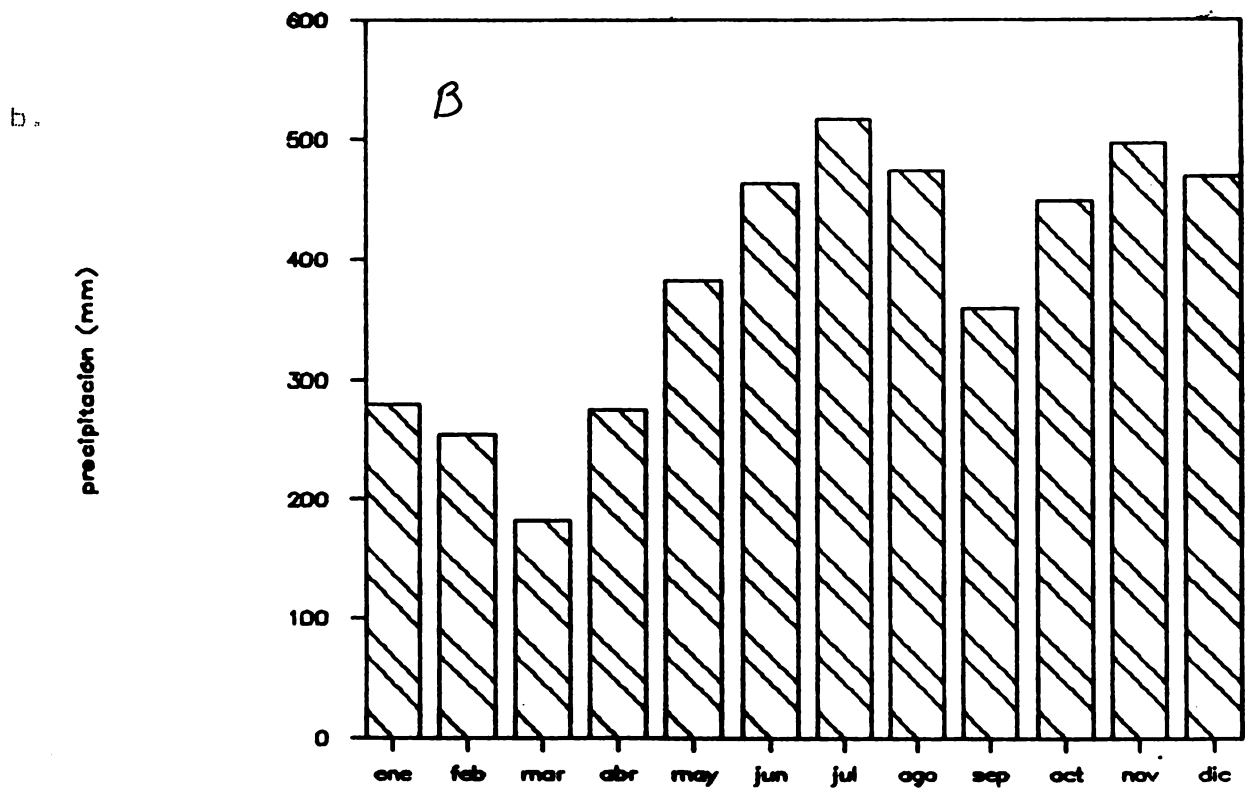
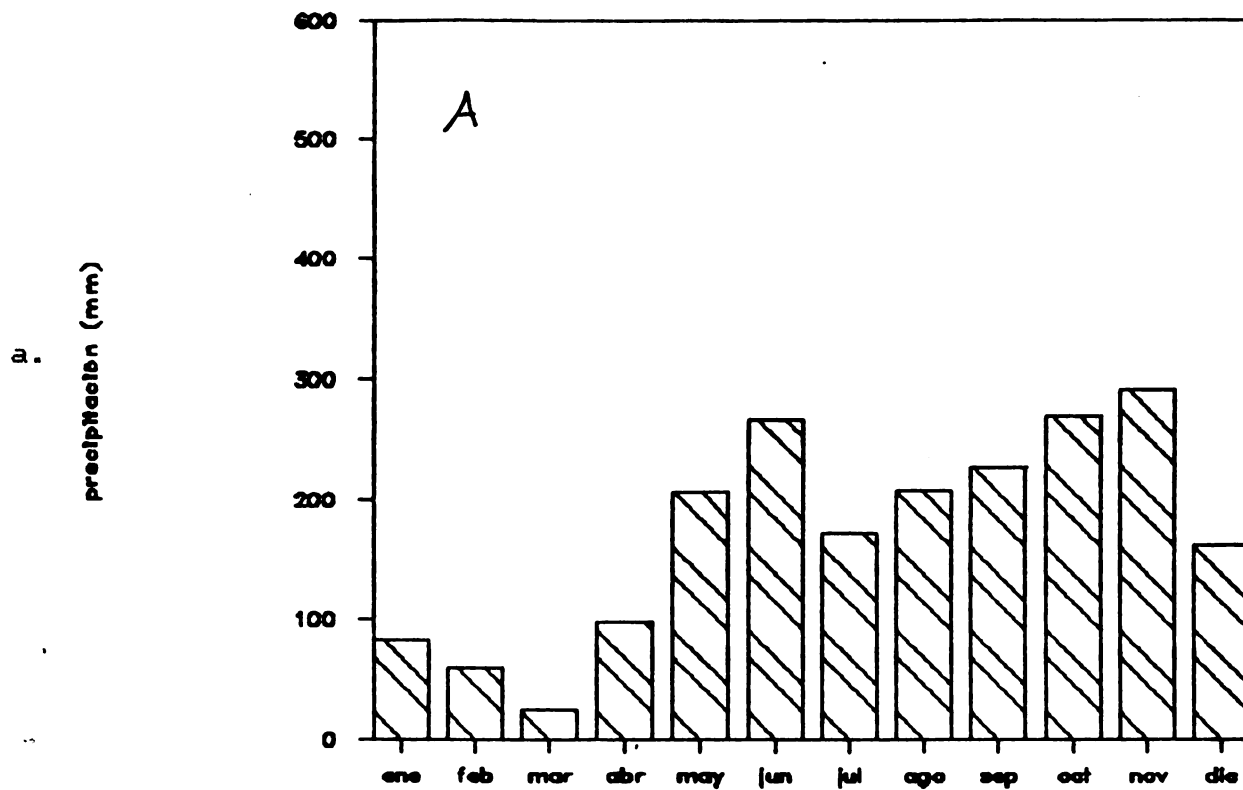


Figura 4: Precipitación promedio mensual de Irazú (A) y Guápiles (B).

En la parte baja de la cuenca la temperatura anual media es de 25 a 26 grados; en el cerro del Irazú es de unos 12 grados.

La vegetación natural refleja la variabilidad del clima. Cuando la temperatura baja con la altitud, la vegetación cambia de una selva tropical, a una selva de montaña. En la selva de montaña no se encuentran árboles tan altos como en la selva tropical. La altura media de los árboles es de 15 metros. Se encuentra en la parte más alta de la cuenca mucha vegetación de gastador. Esto puede ser porque la vegetación todavía tiene que reponerse del depósito de la ceniza de la actividad volcánica de los años 1963 hasta 1965. Sin embargo muchas pendientes probablemente son inestables o han sido estabilizadas recientemente. Se pueden reconocer varias fases de desarrollo de la vegetación. En los deslizamientos activos se encuentran solamente algunas hierbas y arbustos.

3. PROCESOS EN LAS LADERAS EN LA ZONA MONTANOSA DE LA CUENCA

3.1 Principios básicos de los deslizamientos

Es difícil formular una terminología significativa, en la cual se incluyen todas las variedades de los procesos de la ladera. COATES (1977) menciona algunas características importantes de una remoción en masa (un deslizamiento pertenece a las remociones).

- La gravedad es la fuerza principal.
- La velocidad del movimiento tiene que ser bastante rápida, reptación no pertenece a la remoción.
- El tipo de movimiento puede ser cayendo*, deslizando* o fluyendo.
- El plano de falla* o la zona de falla no coincide con una falla geológica.
- Hundimiento se excluye.
- El material desplazado tiene límites evidentes y muchas veces se compone de una parte de la ladera.
- El material desplazado puede consistir de material meteorizada y/o de material de partida.

La morfología del movimiento es el criterio para clasificar los tipos de deslizamientos (Figura 5).

- Circular: Debido al perfil concavo del plano de fallo, la masa hace un movimiento rotativo.
- Transversal: La masa se mueve prácticamente paralela a la inclinación de la pendiente. Se presenta mucho en laderas muy empinadas y cuando la estratificación corre paralela a la inclinación de la pendiente. A menudo esta forma es somero y por eso la influencia de las raíces de la vegetación pueden ser muy importante.



Figura 5: Tipos de deslizamientos.

Para el suelo se puede aplicar el concepto básico de fricción estática (FORSYTHE, 1975), ver Figura 6. La gravedad se descompone en una fuerza normal (N) perpendicular al plano de falla* y una fuerza tangencial (T) paralela al plano de falla. S significa la resistencia al corte del material y es igual a la fuerza tangencial al momento en el cual el cuerpo empieza a arrastrar.

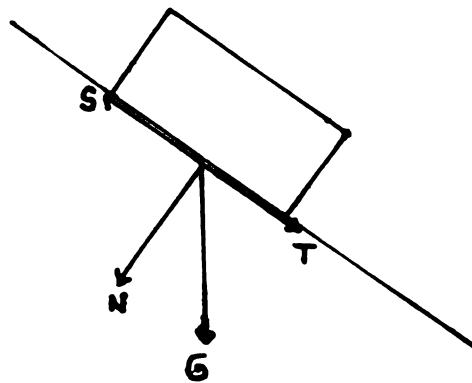


Figura 6: Fuerzas que actúan sobre un cuerpo.

La presencia de la vegetación en una ladera puede tener una influencia tanto negativa como positiva en la estabilidad de la ladera. Esta influencia tiene un componente hidrológico y mecánico (GREENWAY, 1987).

El componente hidrológico contiene lo siguiente. La inestabilidad de una ladera aumenta, a medida que más agua se puede infiltrar en el suelo. Cuando el nivel del agua subterránea sube, el peso de la

parte inestable aumenta y llega al punto de fallar más rápidamente. También la presión de los poros sube y por eso la coherencia entre las partes de suelo disminuye.

La copa de los árboles y la hojarasca en el suelo recoge la lluvia, de modo que menos agua llega al suelo, debido a la evapotranspiración. Por otro lado, la capacidad de infiltración aumenta por la actividad biológica.

Los factores mecánicos son los siguientes. Las raíces de la vegetación refuerzan el suelo, la resistencia del suelo al corte aumenta. La vegetación puede sujetar las partes del suelo a la superficie y por eso la erosividad disminuye. El peso de la vegetación presiona a la ladera y puede tener un efecto estabilizador o desestabilizador (Figura 7). Esto depende de la inclinación de la pendiente. Cuando la inclinación es más de 45 grados la fuerza tangencial aumenta por el peso extra. Cuando la inclinación es menor la fuerza normal aumenta y esto funciona como estabilizador.

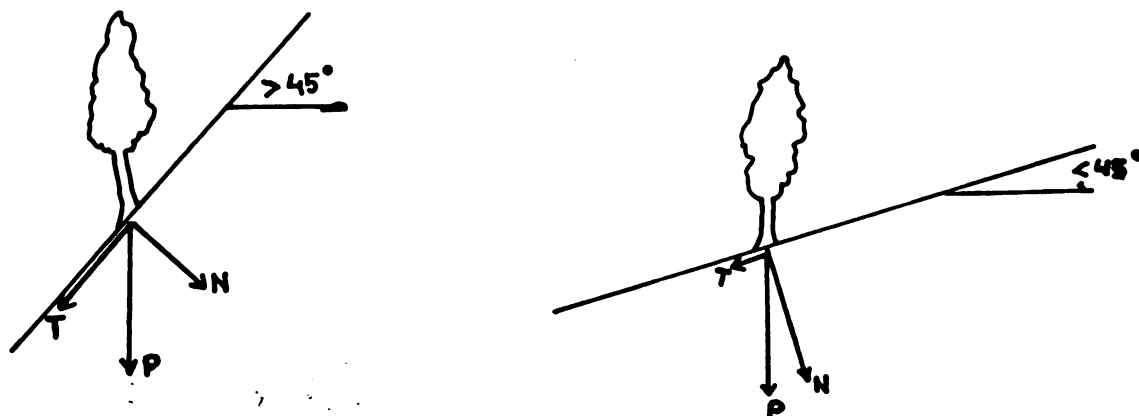


Figura 7: Influencia del peso de la vegetación en la estabilidad de una ladera.

3.2 Descripción de los procesos activos en la parte alta de la cuenca

Hay diferentes factores, que influyen en los procesos activos de las laderas de la parte más alta de la cuenca del Río Toro Amarillo. Estos factores tienen una interrelación muy fuerte y son escasos los casos en que solamente uno de estos factores forma la causa de un proceso de la ladera.

La Figura 8 es una reproducción de la distribución de los deslizamientos de esta región.

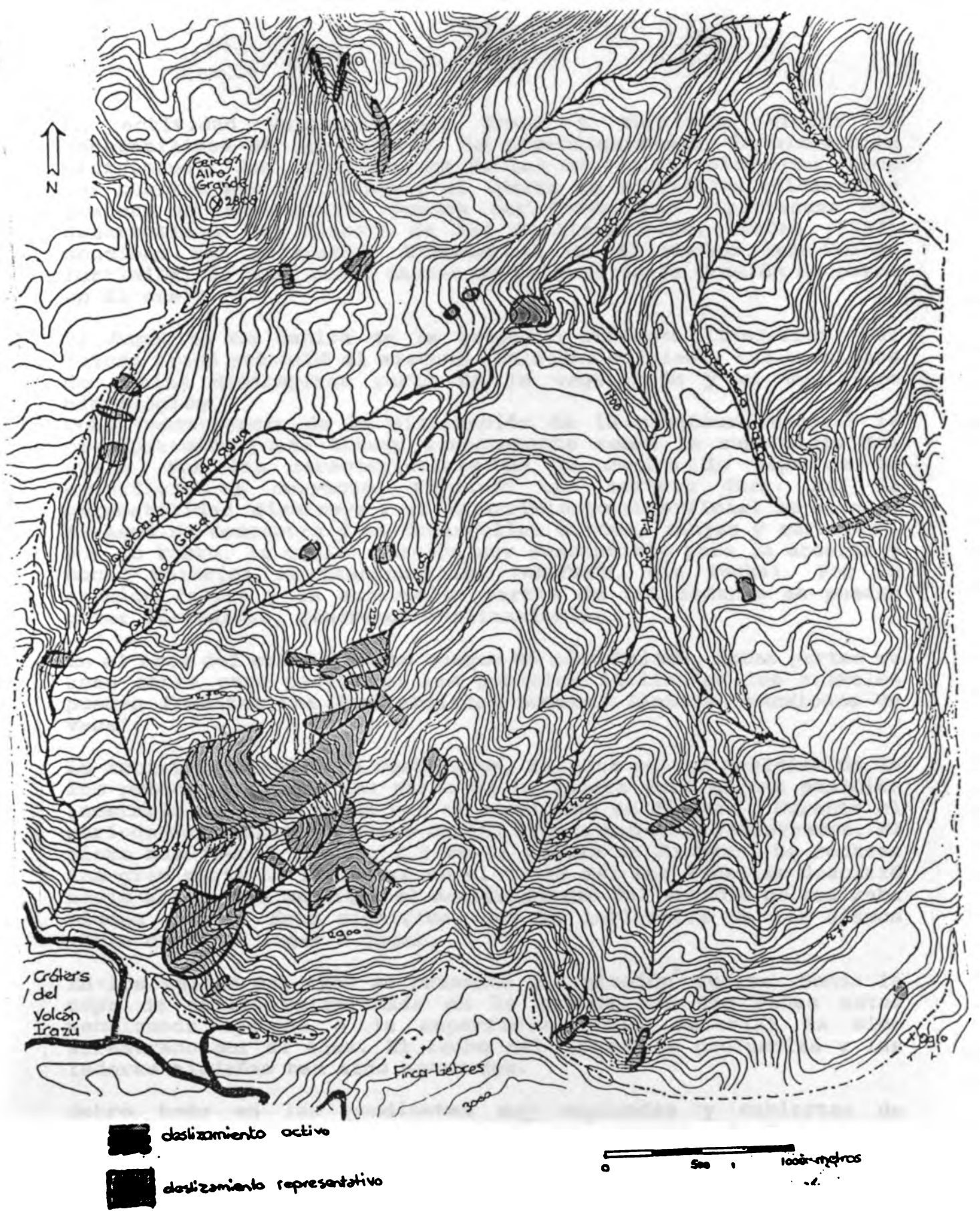


Figura 8: Ubicación de los deslizamientos activos en el área de estudio (principio 1990).

La actividad volcánica del Irazú y Turrialba afecta la inestabilidad de las laderas. La microsismicidad, la alteración hidrotermal, las deformaciones de los edificios volcánicos (hace las cuestas más empinadas) y el aporte de materiales adicionales (causan un peso extra) pueden ser parámetros importantes del desarrollo o del disparo de los deslizamientos. REAGAN (1987) menciona una alteración hidrotermal en el núcleo del Volcán Turrialba, la cual puede causar un recargo de la presión de poros en el suelo.

El depósito de ceniza de la erupción reciente (1963-1965) del Volcán Irazú perturbó el sistema ecológico original. Las emisiones de ceniza destruyeron parte de la vegetación y el equilibrio hidrológico.

Como consecuencia de la disminución de la cobertura vegetal la precipitación puede actuar directamente sobre la superficie del suelo. Por las características de la ceniza la capa de la superficie se compacta, formando una corteza dura. Así la permeabilidad disminuye y el escurrimiento superficial se agrava. El agua se concentra y se desarrollan surcos, zanjas y cárcavas. Por lo tanto, la ceniza resulta muy susceptible para la erosión y mucho material es transportado. (WALDRON, sin fecha). Por la erosión fuerte y la socavación partes de las laderas se pueden poner inestables, generando deslizamientos.

En el área del estudio mucho bosque ha sido talado. Estas partes se usan ahora para pasto. En las parcelas inclinadas los animales pueden fomentar una inestabilidad somera, llamada 'escalones de vaca'.

La actividad sísmica en Costa Rica, resulta en una aceleración de los procesos. Cuando una parte de la ladera está en una posición inestable un sismo puede ser el mecanismo de disparo. Durante el período del trabajo de campo varios sismos han sido registrados. El sismo más fuerte llegó a 6.5 en la escala de Richter. De rechazo una gran parte de la ladera en el valle del Río Peñas se desplazó hacia abajo. Sin embargo, el deslizamiento del estudio no mostraba ningún cambio. Esto significa, que la influencia de los sismos varía mucho de lugar a lugar.

En los valles del área se presenta una erosión fuerte. Donde la capa de ceniza meteorizada en la cuenca del Río Peñas antes mencionada aparece a la superficie, mucho material ha sido arrastrado por el agua. El lecho del arroyo se profundiza y las laderas aledañas han sido socavadas.

Sobre todo en las pendientes muy empinadas y cubiertas de vegetación de la región se encuentran muchos deslizamientos someros con un plano de falla recto. El material se desplaza por una gran distancia de una manera, la cual parece tanto caer como deslizarse. Aparentemente el refuerzo del suelo por las raíces de la vegetación no tiene un efecto estabilizado suficientemente. El peso de la vegetación puede desempeñar un papel en este proceso.

Las escarpas posteriores de los deslizamientos son paredes casi verticales y se componen de varios depósitos de lava y ceniza. Además no están cubiertas por vegetación. De estas paredes caen muchos fragmentos de roca (grava activa), los cuales forman conos de coluvión sobre la superficie del deslizamiento. Estos conos han sido cortados por cárcavas de erosión. El agua transporta mucho material hacia abajo, a veces en forma de avalancha de lodo (lahar). El material del cono en la superficie del deslizamiento implica un peso extra para el deslizamiento. En algunos lugares la grava es muy activa, regularmente se puede oír caer las piedras de la escarpa. También se puede ver que en la parte superior de la escarpa hay muchas fisuras paralelas a la escarpa. Cada vez el límite del deslizamiento corre más hacia atrás.

También la actividad biológica en el suelo tiene cierta influencia. Hay animales (como roedores), que cavan un hoyo entre las piedras en la superficie del suelo. Así la capacidad de infiltración puede aumentar.

3.3 Un deslizamiento representativo

3.3.1 Metodología

Por medio de las fotografías aéreas infrarrojas (escala 1:80.000) y mapas topográficos (escala 1:50.000) y observaciones de campo se seleccionó un deslizamiento representativo. También se utilizó el conocimiento de la población local (sobre todo Don Carlos Orozco Marín, Finca Liebres), ver Fig 8.

La región más alta de la cuenca se transita muy difícilmente. Las pendientes son muy fuertes y tienen una vegetación espesa. Lamentablemente no se puede llegar a todos los lugares de la región, y fue necesario considerar este factor en la selección del deslizamiento representativo.

Se elaboró un mapa del deslizamiento, en el cual se pueden encontrar curvas de nivel, fisuras entre los varios bloques del deslizamiento, escarpas, surcos de erosión, conos de coluvión, lugares con salida de agua, aparatos de medir, las direcciones del movimiento de los diferentes bloques etc.

Para determinar exactamente la ubicación de unos puntos importantes se utilizó un inclinómetro y una brújula. Desde varios lugares se tomaron los ángulos en la dirección horizontal y vertical de los puntos importantes. Algunos sitios en el campo, que están indicados en el mapa topográfico (1:50.000), se usaron como puntos de referencia, por ejemplo la torre de emisión arriba del deslizamiento. Para dibujar las direcciones horizontales de dos lugares de medida a un punto reconocible se tiene una determinación de la situación de este punto.

Con la distancia del punto fijo al lugar de la medida y el ángulo vertical se puede calcular la altura sobre el nivel del mar. Se puede controlar estos cálculos, tomando la distancia y el ángulo vertical de dos puntos de medida a un punto del deslizamiento, es posible calcular otra vez la altura sobre el nivel de mar del punto respectivo. Las dos resoluciones deben ser igual.

Con la ayuda de este mapa se estimó el volumen total de la masa deslizada y también, cual es la cantidad de material que ha sido arrastrada por la erosión. Se compararon los perfiles perpendicular a las curvas de nivel de la superficie original (al lado del deslizamiento) y de la superficie actual.

La precipitación es un parámetro muy importante en el proceso de deslizamiento. Se decidió medir la precipitación en el área del estudio, porque se supuso que la cantidad de lluvia varía mucho en los flancos del Volcán Irazú. Se instaló un pluviómetro en el deslizamiento representativo. Los resultados de las mediciones se compararon con los datos de la estación meteorológica de la cima del Volcán Irazú.

La velocidad con la cual el material se desliza hacia abajo se puede determinar de una manera sencilla (Figura 9). Se colocaron dos espigas de metal unos 50 centímetros en el suelo, ambas a un lado diferente de una fisura entre dos bloques de deslizamiento: una en la parte que supuestamente es estable y una en la parte que supuestamente es inestable. Después de un tiempo determinado, la espiga en la parte inestable puede haber recorrido una distancia (d) con respecto a la espiga en la parte estable. Midiendo regularmente esta distancia, se puede calcular la velocidad de un bloque respecto al otro bloque del deslizamiento. El problema de este método es encontrar una parte fija de la ladera, la cual seguramente no tiene ningún movimiento. A menudo se mide un movimiento relativo entre los varios bloques del deslizamiento.

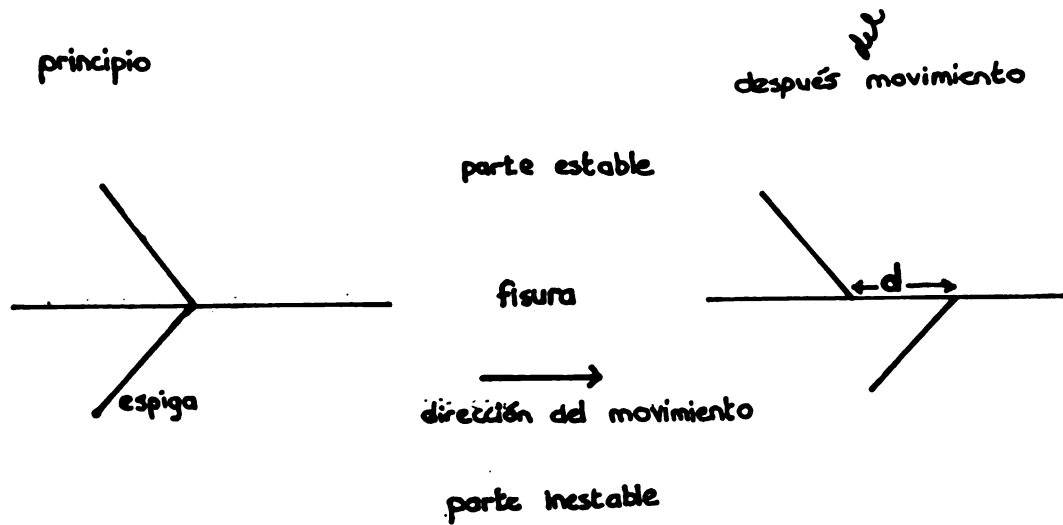


Figura 9: Método para determinar la velocidad de los bloques del deslizamiento.

En la Figura 10 se puede ver cuáles son las formas de movimiento que pueden ocurrir. Cuando la distancia entre las espigas no cambia ($x = 0$) hay dos posibilidades. Ambos bloques no tenían un traslado (caso 1) o ambos bloques tenían la misma velocidad (caso 2). Cuando la distancia aumenta ($x > 0$), puede ser que el bloque de atrás estaba inmóvil y el bloque de adelante se movía (caso 3) o el bloque de atrás tenía una velocidad menor que la velocidad del bloque delantero (caso 4). Cuando la distancia entre las espigas disminuye ($x < 0$), puede ser que el bloque delantero no tiene ni un movimiento (caso 5) o el bloque delantero tenía una velocidad del movimiento menor que el bloque de atrás (caso 6).

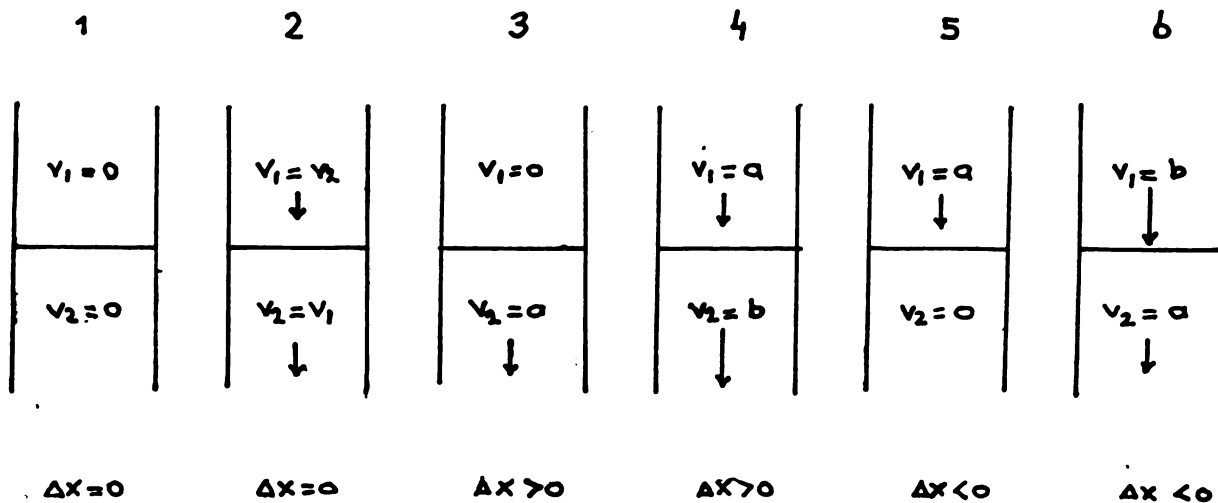


Figura 10: Posibilidades de movimiento de los bloques.

$a > 0$; $b > 0$; $a < b$;
 v = velocidad
 x = cambio en distancia

La capacidad de la infiltración del suelo es grande y el suelo puede absorber el agua rápidamente. Por eso se pudo calcular las correlaciones directamente. No se tomó en cuenta un tiempo de reacción entre el aguacero y el traslado de un bloque del deslizamiento.

Para conocer la construcción de los conos de coluvión^{*} y las cárcavas allí dentro se median algunos perfiles transversales a alturas diferentes de un cono al pie de la escarpa del deslizamiento de estudio. Con la ayuda de dos palos, una cuerda, una cinta métrica y un inclinómetro se puede sencillamente medir el perfil. Cuando se repite este procedimiento algunas veces después de algún tiempo, se puede ver el desarrollo de la forma del cono.

Cuadro 3.4 Variables usadas en la cartografía del riesgo de deslizamientos en la zona más alta de la cuenca del Río Toro Amarillo

Factor		variable	
Topografía	inclinación (grados)	≤ 15	X1
		16 - 30	X2
		31 - 44	X3
		≥ 45	X4
	altura de ladera (metros)	> 250	X5
	presencia de escarpas		X6
	ladera cóncava		X7
Geología	estratificación paralela a la ladera		X8
Hidrología	socavación de la ladera		X9
	infiltración concentrada		X10
Vegetación	bosque en una pendiente ≥ 45 grados		X11
	sin bosque en una pendiente < 45 grados		X12

En este modelo el peso de una variable se determina de una manera matemática, por aproximarse más a la objetividad de la predicción.

Para cada variable se calcula el valor de información I_i . Este valor es un valor pesado, que significa cuántas informaciones sobre la estabilidad de una ladera puede ser facilitada por la variable relativa.

$$I_i = \log \frac{S_i/n_i}{S/n}$$

En donde:

- I_i valor de información de variable X_i
- n número total de mallas
- n_i número de mallas con variable X_i
- S número de mallas con deslizamiento
- S_i número de mallas con variable X_i y con deslizamiento

El valor de información total en una malla I_{totj} es la suma de los valores de información de todas las variables, que están presente en la malla.

$$I_{totj} = \sum X_{ij} * I_i$$

En donde:

I_{totj} valor de información total para malla j
 X_{ij} valor de variable X_i para malla j, que es 1 si la variable X_i está presente en la malla j, si no es 0
 I_i valor de información de variable X_i

Los valores de información totales de las mallas se dividieron en dos grupos. Un grupo abarca las mallas, en las cuales hay actualmente un deslizamiento, y el otro grupo abarca las mallas, en las cuales no hay ningún deslizamiento. Con ambos grupos se ejecuta una prueba estadística, la prueba de 'Student's t', para probar que los dos grupos constituyen poblaciones diferentes.

Finalmente se hizo una clasificación de la estabilidad diferente de los valores de información totales y se hizo un mapa del riesgo natural de los deslizamientos de la zona.

3.4.2 Resultados

Se dividió el área en una totalidad de 61 mallas, de las cuales actualmente 28 tenían un deslizamiento. En el Cuadro 3.5 (la segunda columna) se puede ver los valores de información de las variables. Estos valores de información se aplican para todas las mallas.

Los valores de información de las variables de la inclinación (X_1 , X_2 , X_3 , X_4) de la pendiente muestran, que una inclinación de más de 45 grados (X_4) resulta en una gran susceptibilidad de deslizamientos. Pero las otras categorías de inclinación no reflejan una tendencia clara. Hay solamente 3 mallas con una inclinación menos de 15 grados, de las cuales 2 tienen un deslizamiento activo. Esto puede resultar en valores de información desfigurados.

El valor de información de la altura de la ladera (X_4) es bajo, pero la presencia de escarpas (X_5) y una forma cóncava de ladera (X_6) influye la estabilidad de la ladera negativamente.

También una estratificación paralela a la ladera (X_7) contribuye a la inestabilidad de la ladera.

La socavación de la ladera por la erosión fluvial (X_9) tiene menos influencia, de la que se esperaba, pero la infiltración concentrada

(X10) sí es importante.

La importancia de la vegetación (X11 y X12) no es muy clara. Para aquellas pendientes, que tienen una inclinación más de 45 grados, el peso del bosque tiene una influencia negativa sobre la estabilidad. Pero en pendientes menos de 45 grados la tala del bosque no influye la estabilidad clara.

De la prueba estadística de 'Students' t' de los dos grupos de las mallas (con y sin deslizamiento actualmente), se deduce que los dos grupos no forman parte de la misma población con un nivel de significación de 0.01.

El Cuadro 3.5 da las categorías de estabilidad. Los valores críticos entre las categorías han sido determinados para comparar los valores de información totales con la distribución actual de los deslizamientos y con la ayuda del promedio y la variación de los dos grupos.

Cuadro 3.5 Clasificación de estabilidad con los valores de información totales

valor de información total	categoría de estabilidad
≤ -0.189	estable
$-0.190 - 0.272$	menos estable
$0.273 - 0.893$	menos inestable
≥ 0.894	inestable

La Figura 13 es el producto final de la cartografía, el mapa del riesgo de los deslizamientos.

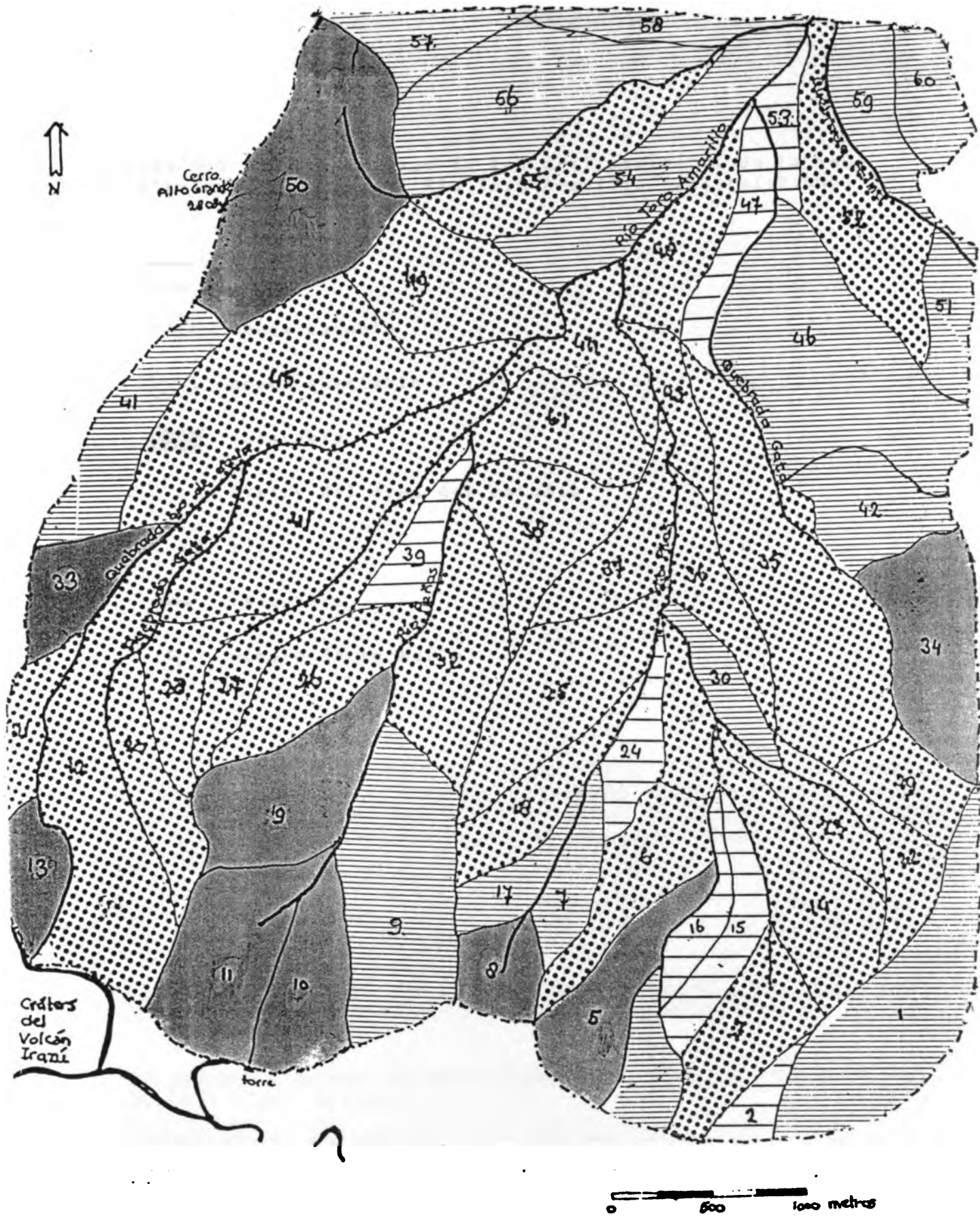










Figura 13: Mapa del riesgo de deslizamientos en el área de estudio.

Leyenda del mapa del riesgo de los deslizamientos en la zona más alta de la cuenca del Río Toro Amarillo (escalal:25000)

-  estable
-  menos estable
-  menos inestable
-  inestable
-  límite del área del estudio
-  río
-  carretera
-  número de la malla

Para aclarar como se determinó la categoría de estabilidad de una malla se describe el procedimiento para una de las mallas como ejemplo (Cuadro 3.6).

Cuadro 3.6 Cálculo del valor de información total de la malla número 4

variable	I_i	X_{ij}	$I_i * X_{ij}$
X1	0.162	0	0
X2	-0.139	0	0
X3	-0.245	0	0
X4	0.213	1	0.213
X5	0.095	0	0
X6	0.134	1	0.134
X7	0.144	1	0.144
X8	0.213	0	0
X9	0.056	1	0.056
X10	0.116	1	0.116
X11	0.192	1	0.192
X12	-0.077	0	0
valor de información total			0.855

La malla número 4 está ubicada en la parte alta del área. Esta malla tiene una inclinación media de más de 45 grados (X4), tiene una altura menos de 25 metros (X5), tiene escarpas (X6) y una forma cóncava (X7). Estas variables podían ser determinadas del mapa topográfico.

Resultó difícil observar de observar la geología (X8) de esta malla en el campo. Por lo tanto, la malla número 4 no tiene esta variable.

La hidrología (X9 y X10) se determinó en el campo. El Río Pilas socava la ladera y por la topografía se concentra el agua en el suelo.

Hay una cubierta espesa de vegetación en esta malla. Entonces la variable X11 tiene el valor 1.

La tercera columna del Cuadro 3.6 tiene los valores de la variable (1 o 0) y la cuarta columna tiene los valores de información por variable, los cuales sumados forman el valor de información total.

Del mapa del riesgo de los deslizamientos en la zona más alta de la cuenca del Río Toro Amarillo se puede concluir que la inclinación de la pendiente es un criterio muy importante para el desarrollo

del deslizamiento.

Actualmente, en la cuenca del Río Peñas hay más deslizamientos, que en la cuenca del Río Pilas. También el modelo de la información del mapa del riesgo clasifica una gran parte de la cuenca del Río Peñas como 'inestable' o 'menos inestable'. Una explicación para eso puede ser la presencia de la capa de materiales piroclásticos meteorizadas. En la cuenca del Río Peñas los deslizamientos exponen en muchos lugares esta capa, mientras en la cuenca del Río Pilas no se la encuentra.

Se debe de tomar en cuenta el hecho que esta predicción es momentánea y que cambios locales en el sistema ecológico pueden influir toda la cuenca.

3.5 Conclusiones

Se presenta una teoría con respecto al desarrollo y a la ocurrencia de los deslizamientos en la zona más alta de la cuenca del Río Toro Amarillo. Figura 14 refleja esquemáticamente esta teoría.

La capacidad de la infiltración del suelo es grande y el suelo puede absorber el agua rápidamente. Por eso se pudo calcular las correlaciones directamente. No se tomó en cuenta un tiempo de reacción entre el aguacero y el traslado de un bloque del deslizamiento.

Para conocer la construcción de los conos de coluvión* y las cárcavas allí dentro se medían algunos perfiles transversales a alturas diferentes de un cono al pie de la escarpa del deslizamiento de estudio. Con la ayuda de dos palos, una cuerda, una cinta métrica y un inclinómetro se puede sencillamente medir el perfil. Cuando se repite este procedimiento algunas veces después de algún de tiempo, se puede ver el desarrollo de la forma del cono.

3.3.2 Resultados

El deslizamiento representativo se encuentra en una altura entre el 3300 y 2800 metros arriba en el valle del Río Peñas.

La Figura 11 muestra el mapa del deslizamiento. Se distinguieron cinco bloques de material, los cuales se mueven con velocidades diferentes. Las fisuras entre los bloques son indicadas. Bloque I, II y III se deslizan en un patrón concéntrico en el cañón. El bloque V se desliza hacia abajo rectangular a las curvas de nivel. Una parte del bloque IV se mueve en fragmentos en el cañón y la otra parte se mueve paralela al bloque V.

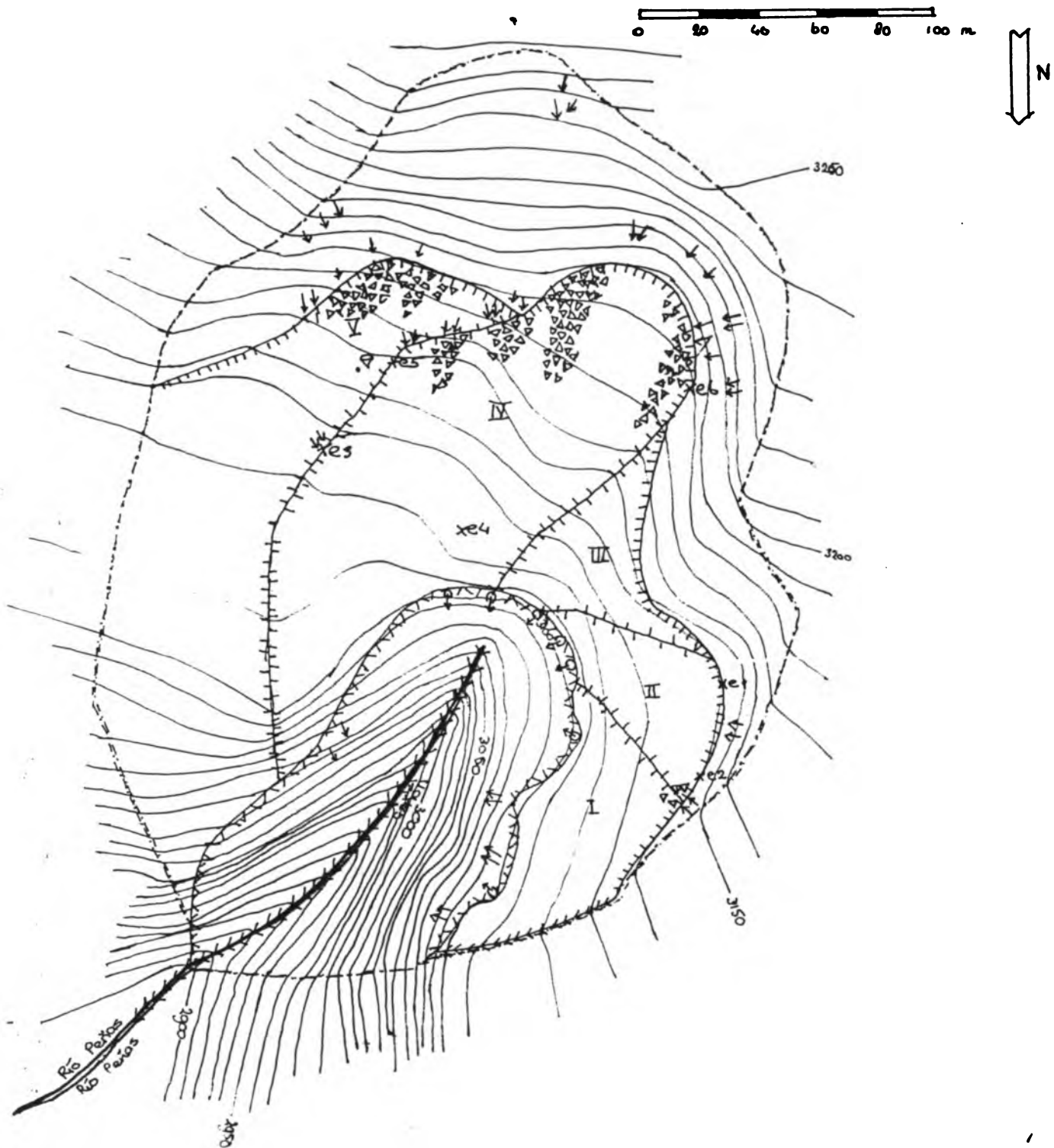

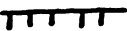













Figura 11: Mapa del deslizamiento representativo.

Leyenda del mapa de deslizamiento representativo (escala 1:2.000)

-  fisura entre dos bloques en movimiento
-  fisura de atrás entre un bloque en movimiento y la escarpa
-  Cono de la coluvión
-  salida del agua
-  grava activa
-  pluviometro
-  espiga con número
-  curva de nivel cada 10 metros
-  límite del área
-  número del bloque
-  río
-  borde del cañon
-  surco de la erosión



En el Cuadro 3.1 se pueden ver las estimaciones del volumen del deslizamiento.

Cuadro 3.1 Estimaciones del volumen del deslizamiento.

bloque total original	840.000 m ³
material erosionado del bloque original	480.000 m ³
material erosionado del cañón	250.000 m ³

La estación meteorológica del Volcán Irazú dejó de funcionar en febrero 1990. Por lo tanto, el lapso para comparar estos datos con las mediciones al lado norte del Volcán Irazú es muy corto. En la Figura 12 se puede ver la variación de la lluvia (diciembre 1989 - enero 1990), entre el lado norte y el lado sur del volcán. Sobre todo los temporales son más intensivos al lado norte.

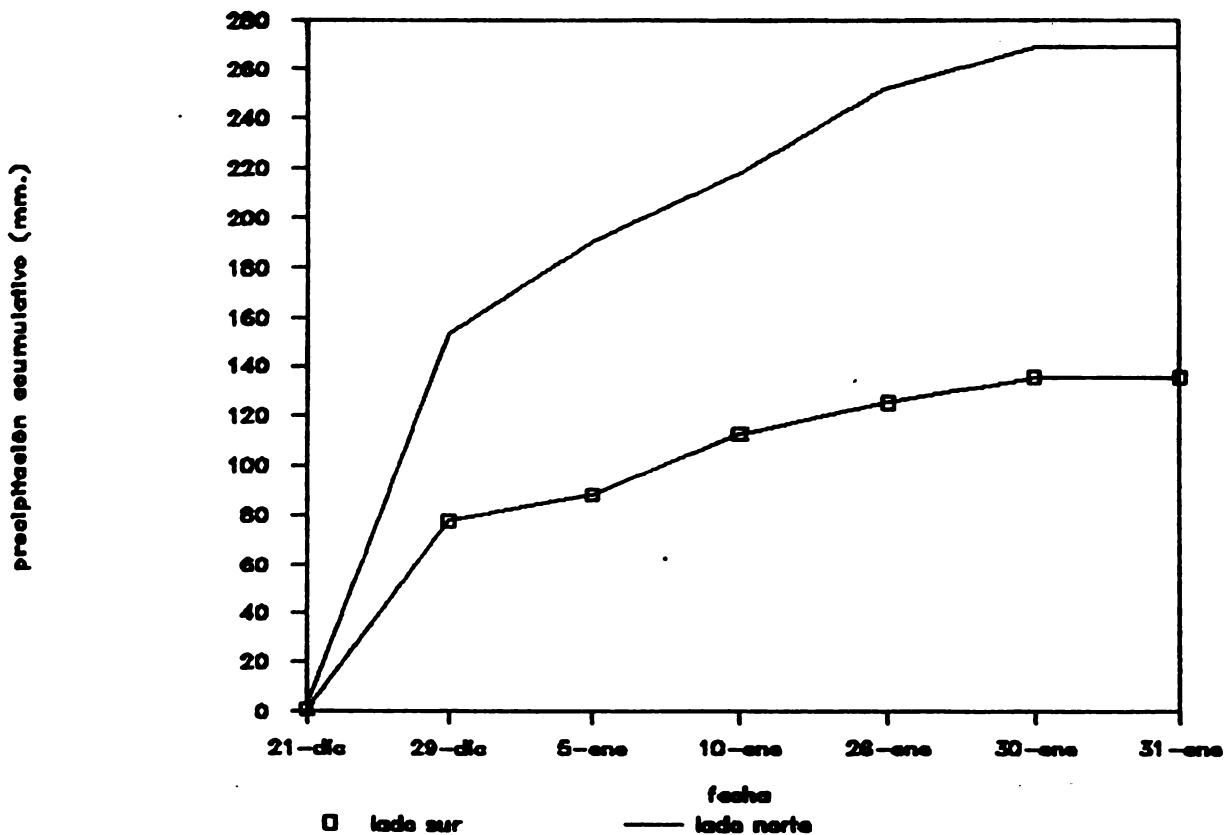


Figura 12: Precipitación acumulada al lado norte y sur del volcán Irazú.

Hay 6 pares de espigas para medir la velocidad del movimiento de los bloques del deslizamiento del estudio

En el cuadro 3.2 se pueden encontrar las velocidades de los traslados de los bloques diferentes.

Cuadro 3.2 Velocidades de las espigas diferentes

número de la espiga	1	2	3	4	5	6
velocidad máxima (mm/hora)	0.105	1.50	6.5	0.111	0.042	0.083

Los números 1 y 2 están en la fisura entre el bloque número II y la escarpa de atrás. Esta pared parece bastante estable, pero hundimiento de material puede ocurrir. Abajo en el bloque II se hallan fragmentos, que se deslizan en el cañón más o menos independientemente.

De la espiga número 1 resulta claramente, que el bloque se mueve hacia abajo, pero con velocidades pequeñas. Los traslados más grandes (1.5 cm por mes) han sido medidos durante el período lluvioso del fin de diciembre 1989 hasta el comienzo de enero 1990.

En la espiga número 2, los traslados son más considerables, pero ellas no tienen una dirección uniforme. La pared trasera es inestable también, de tal modo que la espiga en esta pared estaba torcida totalmente. A este punto de medir, el bloque II se trasladaba hacia abajo 13.7 cm en 7 meses. Sin embargo, este traslado absoluto es subestimado, porque la pared de atrás tiene un movimiento también. El período lluvioso de diciembre 1989 - enero 1990 resultó con los traslados más grandes (13.5 cm por una semana). Inmediatamente en la semana siguiente la pared de atrás tenía un traslado de 6 cm hacia abajo. El apoyo abajo a la pared disminuyó, porque el bloque se trasladó hacia abajo.

La espiga número 3 está entre los bloques IV y V. Más tarde se colocó la espiga número 5 aquí cerca, para controlar los traslados. La espiga 3 tenía las velocidades más grandes, contrario a la espiga 5, la cual casi no se movió. De las mediciones de la espiga 3 resultó que el bloque V tiene una velocidad más grande que el bloque IV. En total había 21.5 cm de traslado, del cual la velocidad más grande llegó a ser el 14 marzo 1990: 11.7 cm en 24 horas. Del hecho que la espiga 5 tenía un traslado mínimo, se puede concluir, que el bloque V tiene una deformación interna. El bloque se estira, abajo hay traslados más grandes que arriba.

La velocidad, con la cual los fragmentos* de los grandes bloques se deslizan en el cañón, ha sido determinada con la espiga número 4. Esta espiga demuestra que aquí casi no hay movimiento. Ambas partes parecen inestables. La distancia entre las espigas disminuía, lo que significa que la parte de atrás se mueve más rápidamente, que la parte delantera.

La espiga 6 está arriba del deslizamiento en la fisura al borde del bloque IV. Aquí casi no había movimiento. La escarpa parece estable, entonces se puede concluir que el bloque II es más o menos estable ahora.

El Cuadro 3.3 refleja las correlaciones entre las velocidades medidas y la intensidad de la lluvia.

Cuadro 3.3 Correlaciones entre las velocidades de los bloques del deslizamiento y la intensidad de la lluvia

espiga	1	2	3	4	5	6
correlación	.1393	.5724	.3694	-.2073	-.0613	-.2837
número de observaciones	28	27	29	29	19	19

Solamente las correlaciones de las espigas 2 y 3 son significativas. Ambos puntos de medida tienen los traslados más grandes, por lo cual la determinación de las mediciones de la distancia entre las espigas es más grande relativamente.

La forma de un cono de coluvión* no cambiaba significativamente, por lo tanto se puede concluir que el método de medir era demasiado inexacto para demostrar el desarrollo del cono.

3.4 Cartografía del riesgo de los deslizamientos

3.4.1 Metodología

Se define como 'riesgo natural' la posibilidad de una ocurrencia de un proceso natural potencialmente dañino, dentro de un período determinado y dentro de una zona determinada (VARNES, 1984). De esto se deduce que un riesgo natural tiene un componente temporal y espacial.

Para la parte más alta de la cuenca se hizo una cartografía (el componente espacial) de la predicción del riesgo de los deslizamientos en una escala de 1:25.000. Tal cartografía puede ser ejecutada en diferentes niveles, lo que resulta en una diferencia en la objetividad de la predicción final (HANSEN, 1984). Se llega a la objetividad más alta, cuando se hacen medidas y cálculos exactos de una ladera aparte ('white box'). Al contrario cuando se usa un modelo, basado en comparaciones y la experiencia del investigador, la objetividad del producto final decrece mucho ('black box').

En este estudio se ha optado por un modelo intermedio, un modelo estadístico. El modelo ha sido llamado 'grey box', en el cual alguna información es conocida y otra no. La ventaja de este modelo es que no es necesario hacer investigaciones detalladas, las cuales son costosas y necesitan mucho tiempo. Además se necesitó encontrar un modelo, que sirviera en el área de estudio de acceso difícil.

KINLONG y TONGZHEN (sin fecha) formularon un modelo, que se puede usar en la zona del estudio. Esto es un modelo de información, que usa varias variables para determinar la estabilidad de la ladera. Estas variables son pesadas con la actuación de un deslizamiento en un lugar determinado.

El Cuadro 3.4 da las variables, que se usaron en el área del estudio. Para la elección de las variables importantes en esta región se usó una lista muy servible de los factores, los cuales indican las circunstancias potenciales de la estabilidad de CROZIER (1984). En este modelo no se considera la actividad humana y biológica.

Se estableció el valor de la variable como 1, cuando esta variable es presente y como 0, cuando la variable es ausente en este lugar (variables binarias).

Las variables han sido determinadas con la ayuda de los mapas topográficos (escala 1:50.000), las fotografías aéreas infrarrojas (escala 1:80.000) y observaciones en el campo (a veces con la ayuda de unos binoculares).

Aparte de estos factores de influencia se usó el mapa con la distribución espacial de los deslizamientos actualmente en el área (Figura 8).

Se dividió el área en una red irregular, de modo que una toda ladera homogénea, de la cresta hasta el fondo del valle, esté en una malla de rejilla.

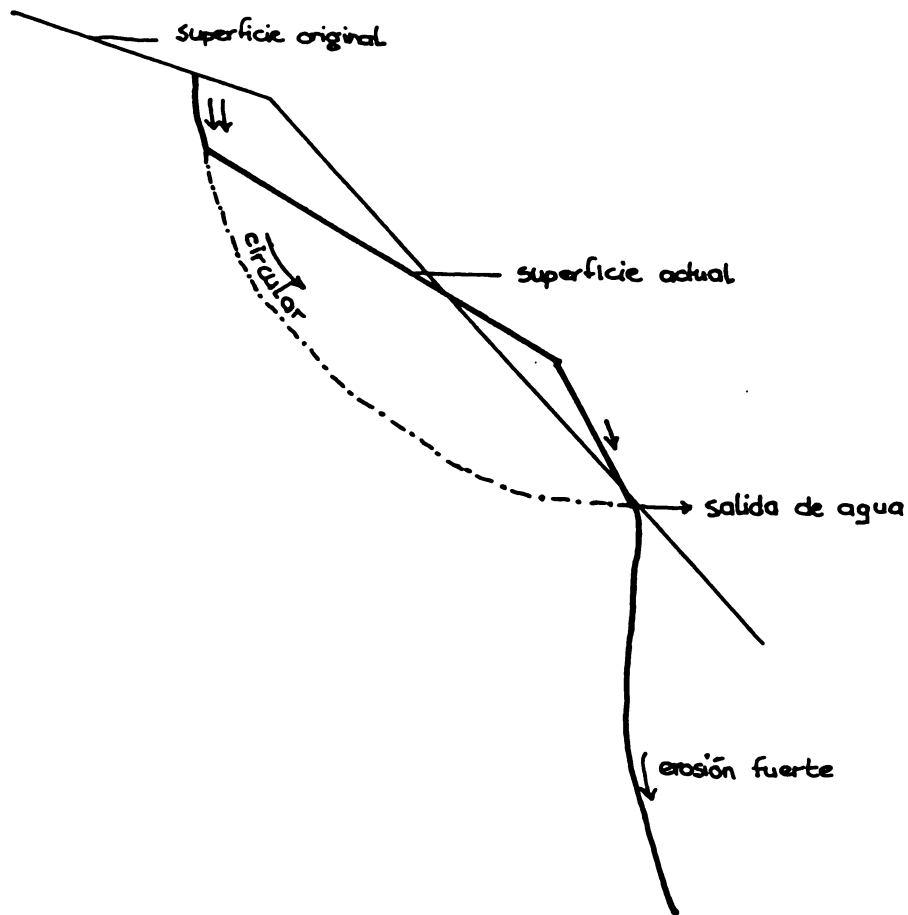


Figura 14: Teoría del desarrollo de los deslizamientos en el área de estudio.

Esta teoría ha sido basada principalmente en las observaciones del deslizamiento representativo y el valle del Río Peñas. Se puede extrapolar el principio de esta teoría en toda la zona alta de la cuenca del Río Toro Amarillo y tal vez en todas las laderas del Volcán Irazú.

La estructura geológica del volcán abarca una alternancia de coladas de lava y cenizas. Por lo general las capas de lava y ceniza son depositadas paralelamente a la pendiente. La forma cónica de un volcán se debe en gran parte al ángulo de reposo de materiales sueltos.

De esta teoría resulta que la estructura geológica es un factor importante en el desarrollo de los deslizamientos.

La división entre los depósitos de lava y ceniza no meteorizada y de la capa de ceniza meteorizada forma un plano de falla potencial. La localización del plano de falla depende de la estructura geológica y de las tensiones mecánicas, las cuales se producen en la ladera. El plano de falla coincide con la zona del mínimo esfuerzo, que a menudo es una división entre dos unidades

litológicas. El agua se estanca sobre la división entre la lava y la ceniza meteorizada. La infiltración en el material sobre la capa de la ceniza meteorizada puede ocurrir fácilmente y con eso el peso de la masa de lava aumenta. Además la presión de los poros en el plano de falla sube. El agua puede salir de la pared en lugares donde esta división aparece a la superficie.

El mecanismo de disparo^{*} es probablemente una gran disponibilidad de lluvia (por ejemplo durante un temporal), o un sismo.

Más arriba se forman grandes deslizamientos de corona con un plano de falla circular. Allí la capa de lava encima de la ceniza meteorizada tiene un espesor de unos 50 metros. Una vez ocurrido el primer movimiento, la masa de la ladera sigue descendiendo lentamente.

Se encuentra una salida del agua donde la división entre la lava y la ceniza meteorizada aparece en la superficie. Esto causa una perturbación del sistema hidrológico, y la erosión^{hídrica} aumenta.

Porque la ceniza meteorizada es muy susceptible a la erosión hídrica, se forma rápidamente un cañón profundo, lo que causa una socavación de las laderas adedafias. Los procesos de la ladera en la cuenca tienen relaciones espaciales y temporales.

El grado de meteorización del material de la ladera (tanto la ceniza como la lava) también es un factor importante en el componente temporal del proceso.

La frecuente ocurrencia de deslizamientos se debe probablemente a la última erupción del volcán, durante la cual el sistema ecológico fue perturbado por la caída de ceniza y por cambios internos de la estructura del volcán. Por lo tanto, las laderas podían ponerse inestables. Todavía el sistema se ha recuperado completamente, dando origen a la ocurrencia de deslizamientos.

4. PROCESOS EN LA ZONA PLANA DE LA CUENCA

4.1 Metodología

Existe poca información sobre las inundaciones del Río Chirripó y otros ríos en la Zona Atlántica el diciembre 1970. Por lo tanto, se empezó a consultar los periódicos de este período.

Con la ayuda de las fotografías aéreas y mapas topográficos de los años diferentes, un mapa de la situación antes y después de la inundación ha sido levantado.

El curso actual del Río Chirripó está cortando los depósitos en el curso antiguo, por eso estos depósitos son muy visibles. En algunos

lugares se hicieron descripciones de los perfiles y también se examinaron los sedimentos.

4.2 Resultados

En los periódicos se encontraron algunos hechos del temporal y sus consecuencias en la Zona Atlántica.

En el diciembre 1970 muchos ríos en la Zona Atlántica se desbordaron, como resultado de un temporal, que trajo fuertes lluvias durante algunos días. Los daños para la agricultura, la ganadería y la infraestructura eran considerables. En toda la Zona Atlántica unos 1500 vecinos fueron evacuados (La Nación, 8 de diciembre 1970, página 6).

El viernes 4 diciembre 1970, el Río Chirripó se desbordó cerca de San Gerardo y cambió su curso principal. A partir de este momento corre directamente al Río Sucio. Esto fue la causa de una inundación de un vasto área río abajo de San Gerardo.

El Servicio Meteorológico Nacional reportaba lo siguiente (La Nación, 6 de diciembre 1970, página 6): "El temporal que afecta al país, y en especial a la vertiente atlántica, responde a una situación meteorológica típica, que se origina por la penetración en la zona tropical de una perturbación fría de latitudes medias."

Fue difícil averiguar cuando dejó de funcionar el curso antiguo del río. No hay fotografías aéreas, ni mapas topográficos poco después de la inundación. Según el periódico el río no cambió el curso de una sola vez, pero había un tiempo, en el cual ambos brazos (el antiguo y el nuevo) transportaron agua (La Nación, 28 de enero 1971, página 31). No se sabe cuanto tiempo, pero en todo caso casi dos meses.

Cuando se observan los totales mensuales de lluvia de ambas estaciones meteorológicas (del Volcán Irazú y de Guápiles), se nota los valores altos de diciembre 1970. En Guápiles, la suma acumulada llega a 1436 mm en este mes, mientras la precipitación promedio para este mes es de 494 mm. En el Volcán Irazú no se registró un valor total completo de diciembre 1970, pero era por lo menos 727 mm, comparado con un promedio mensual de 192 mm.

De los perfiles, los cuales han sido descritos de los depósitos del curso antiguo, se puede deducir algunos hechos de la historia del río. En un corte de unos 350 cm, lo cual se ha formado debido a la erosión por el río, se pueden reconocer varios surcos y bancos. Todo el material es del origen volcánico.

En algunos lugares a las orillas del curso antiguo se encuentran depósitos de arcilla, a menudo con huellas de materia orgánica. Estos sedimentos han sido formados en un ambiente muy tranquilo

(agua detenida).

En el fondo del mismo surco se encuentra, en una profundidad mínima de 150 cm abajo del nivel de la superficie, un sedimento sin estructura, compuesto por piedras en una matriz de arena gruesa. Esta morfología indica que el ambiente era intranquilo con grandes velocidades de corriente y una gran carga del sedimento.

La capa espesa de la arena, la cual se encuentra en el centro del arroyo antiguo de la corriente tiene una estratificación fina y prácticamente horizontal. De esto se puede deducir que este depósito ha sido formado en un tiempo bastante largo con velocidades de corriente más bajas.

Un suelo descrito por HOOTSMANS y ROMKENS (1989) está situado en el cauce seco del Río Chirripó, a unos 2.5 km río abajo del lugar donde se produjo el cambio del curso. Hasta una profundidad de 120 cm existe de arena gruesa suelta, estratificada y fina.

4.3 Conclusiones

El abanico aluvial* es construido de sedimentos del río. Durante una llena los sedimentos pueden ser erosionados por el agua, y la forma del abanico se puede modificar.

Un río trezado, que construye un abanico, se caracteriza por un caudal muy variado y por sedimentos que pueden ser transportados fácilmente (PANNEKOEK & VAN STRAATEN, 1984).

También un material suelto de las orillas del río fomenta un carácter trezado. En el caso de un nivel alto del agua partes de las orillas pueden ser arrastradas, el lecho se hace más ancho y también menos profundo.

Cerca de San Gerardo se ubica la transición entre la parte trezada (el abanico aluvial) y la parte sinuosa (la llanura) del río (Figura 2.2). Aquí la pendiente del río disminuye de 0.5% a 0.1% y por eso aquí una gran parte del material, transportado por el río, se sedimentará.

Se formuló una teoría con respecto de los procesos, los cuales subyacieron en el desplazamiento de un brazo del Río Chirripó.

Durante la llena del diciembre 1970, la gran cantidad del agua arrastró y transportó mucho material. También partes de las orillas fueron arrastradas y transportadas. Se formó una corriente de agua saturada con sedimento (tal vez como una avalancha de lodo).

Donde la pendiente del río disminuye (cerca de San Gerardo), el material se depositó en el cauce. Este depósito se compone de piedras en una matriz de arena. El surco se puso poco profundo y

porque las orillas no son muy altas y el agua escogió un otro curso. El curso antiguo transportó menos agua con una velocidad menor. Allí mucha arena y también arcilla podía ser sedimentada, hasta que el surco se rellenó y el agua ya no podía pasar. Toda el agua fue a correr por el curso nuevo.

5. INTERRELACION ENTRE LOS PROCESOS DE AMBAS ZONAS DE LA CUENCA

Uno de los objetivos de este estudio es encontrar y describir una interrelación entre los procesos de la ladera en la zona montañosa, y los procesos y sedimentos del río en la llanura. Se podría formular algunas ideas sobre eso, pero no se puede comprobar una interrelación significativa.

En el sentido espacial, ambas zonas pertenecen a la misma unidad físico-geográfica: la cuenca del Río Toro Amarillo. El río tiene una acción erosiva arriba en la cuenca y luego transporta y sedimenta el material erosionado.

Los procesos de la cuenca podrían tener la siguiente interrelación espacial y temporal: Durante un período lluvioso se produce un deslizamiento, lo que resulta en una gran disponibilidad repentina de sedimentos. Los ríos transportan el material hacia abajo. Porque el agua está saturada de sedimentos, la erosividad del río es grande y más material del lecho y de las orillas puede ser recogido por el agua. El material se sedimenta en una zona más plana de la cuenca. Este depósito puede rellenar el cauce del río y originar una inundación. El depósito se forma en un espacio de tiempo muy corto. La morfología de este depósito es sin estratificación.

Los depósitos, los cuales han sido investigados en el cauce seco del Río Chirripó, en parte no tienen las características de una sedimentación en un espacio de tiempo corto. Las capas superiores del relleno del curso se componen de la arena gruesa estratificadas, las cuales tienen que ser depositadas en un tiempo más largo. También la información dada en los periódicos sugiere que el brazo antiguo del Río Chirripó transportó agua durante algunos meses después de la inundación del brazo del río. Podría ser entonces, que una gran parte del cauce fue rellenada durante el evento de diciembre 1970, y luego se produjeron algunos inundaciones pequeñas que finalmente cerraron por completo el cauce viejo.

6. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

Debido a las limitaciones que imponen el clima y la accesibilidad se necesitará más tiempo para un estudio más detallado de la distribución de los deslizamientos y de los factores, que influyen

la estabilidad de una ladera.

Muchos procesos, los cuales se encuentran en el área, solamente son descritos cualitativamente. Determinaciones cuantitativas de las características físicas de muchos procesos no se llevaron a cabo. El área tiene muchas formas diferentes de los procesos de la ladera, las cuales tal vez se podría describir cuantitativamente según un principio de la mecánica del suelo.

Se podía hacer bastante exacto un mapa de la parte más alta de deslizamiento representativo. Pero se llegó difícilmente a la parte más abajo y allá se podía medir menos puntos.

Los valores del volumen del material deslizado y erosionado del deslizamiento representativo son solamente estimaciones y no son muy exactos.

Las mediciones de los traslados de los bloques* del deslizamiento con la ayuda de las espigas son suficientemente exactas. Sin embargo, para medir movimientos más significativos, actualmente las mediciones están continuadas.

En el cálculo de las correlaciones entre la velocidad de un bloque y la precipitación, se supone que hay un tiempo de reacción casi nulo entre el momento de la lluvia y el traslado de un bloque. Sin embargo, posiblemente hay un tiempo de reacción considerable. Durante las lluvias mucho material erosiona del cañón y más tarde el bloque se pone en movimiento. Para probar este fenómeno hay que disminuir drásticamente el espacio del tiempo de las medidas. Con la ayuda de mediciones continuas de tanto la precipitación como la velocidad de los traslados se obtendría resultados más exactos (GENUCHTEN, VAN, 1989). También se puede decir algo sobre el componente temporal de los procesos. Además se necesita medir por lo menos durante un año.

Para una descripción cuantitativa de la construcción de los conos de coluvión y la formación de los surcos de la erosión se necesita un método más exacto que el usado en este estudio. También se debe medir en un período más largo.

Con la determinación de la estabilidad de una malla de la cartografía del riesgo de los deslizamientos, se supone que no hay una interrelación espacial entre las mallas mutuamente. Pero cuando ocurre un deslizamiento en una malla, se puede cambiar la estabilidad de las mallas aledañas o río abajo. Este fenómeno también está descrito en la teoría del desarrollo y de la ocurrencia de los deslizamientos en el área del estudio. Además, la división de las mallas del área puede ser muy importante para el resultado de la cartografía. Cuando hay mallas más pequeñas, la exactitud aumenta. Se tiene que tomar en cuenta estos factores, al interpretar la cartografía.

El estudio de la parte montañosa de la cuenca tiene un carácter de

inventario, el cual se podría extender en el futuro con una fase analítica y una fase de la extrapolación.

En la fase analítica se examina los parámetros de la estabilidad y su significación cuantitativa en el proceso. Con eso se puede levantar un mapa del riesgo de los deslizamientos con más información (cuantitativa), que la usada en la cartografía de este estudio. También es posible tomar el componente temporal de los procesos en la predicción.

Por fin hay una posibilidad de extrapolar el conocimiento adquirido en el área del estudio a otras áreas con problemas de la inestabilidad de las laderas.

Un estudio sobre la influencia de la vegetación en todo la cuenca, tanto sobre los procesos de la ladera, como los procesos del río, puede ser muy importante para entender los cambios en el sistema ecológico.

7. REFERENCIAS

BARQUERO, J. 1964. El Volcán Irazú y su actividad. Universidad Nacional, Escuela Cienc. Geogr. Tesis, Heredia, Costa Rica. 64p.

COATES, D.R., 1977. Landslide perspectives. En: COATES, D.R. ed., 1977. Landslides. Geological Society of America, p.3-28.

CRAIG, R.F., 1986. Soil mechanics, 4th edition. VAN NOSTRAND REINFOLD, U.K., co. ltd.

CROZIER, M.J., 1984. Field assessment of slope instability. En: BRUNSDEN, D. & D.B. PRIOR eds., 1984. Slope instability. JOHN WILEY & SONS, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore.

FORSYTHE, W., 1975. Física de suelos, manual de laboratorio. Instituto Interamericano de ciencias agrícolas, San José, Costa Rica.

GENUCHTEN, VAN, P, 1989. Movement mechanisms and side velocity variations of landslides in varved clays in the french Alps. Proefschrift, Geografisch Instituut, Rijksuniversiteit Utrecht.

GREENWAY, D.R., 1987. Vegetation and slope stability. En: ANDERSON, M.G. & K.S. eds., 1984. Slope stability, geotechnical engineering and geomorphology. JOHN WILEY & SONS, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore.

HANSEN, A., 1984. Landslide hazard analysis. En: ANDERSON, M.G. & K.S. RICHARDS eds., 1984. Slope stability, geotechnical engineering and geomorphology. JOHN WILEY & SONS, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore.

HOOTSMANS, R. & P. ROMKENS, 1989. A soil survey in the northwestern part of the Atlantic Zone, Costa Rica, Field report, Programa Zona Atlántica, CATIE, MAG y UAW, Department of soil science and geology, Universidad de Agricultura, Wageningen.

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD (ICE), División de desarrollo, Oficina de control de ríos, 1964. Solución al problema del Río Reventado, Informe preliminar. San José, Costa Rica

INSTITUTO GEOGRAFICO NACIONAL, Mapas topográficos, las hojas número 3445 IV, 3446 III, 3446 IV, 3447 III, 3447 IV, escala 1:50.000, San José, Costa Rica

INSTITUTO GEOGRAFICO NACIONAL, 1984. Fotografías aéreas, CRIRC/BID, escala 1:80.000, apt northwest, líneas del vuelo número 10 y 11

KESEL, R.H. & LOWE, D.R., 1987. Geomorphology and sedimentology of the Río Toro Amarillo alluvial fan in a humid tropical environment, Costa Rica. Geogr. Ann. 69 A (1): p.85-99

KINLONG, Y. & Y. TONGZHEN, ? . Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. En: HARTLEN, J. & L. VIBERG, 1988. General report: evaluation of landslide hazard. En: BONNARD, C. ed., 1988. Landslides proceedings of the fifth international symposium on landslides, Lausanne. BALKEMA, Rotterdam, Holanda. volume II, p. 1037-1057.

KRUSHENSKY, R.D. & G. ESCALANTE, 1967. Activity of Irazú and Poás volcanoes, Costa Rica, November 1964-July 1965. Bull. Volcanol. 31, p. 75 - 84.

MORA CASTRO, S., 1985. Las laderas inestables de Costa Rica. Revista geological America Central 3, San José, Costa Rica, p. 129-161.

MURATA, K.J., C. DONDOLI & R. SAENZ, 1966. The 1963-1965 eruption of Irazú volcano. (the period of march 1963 to october 1964). Bull. Volcanol. 29, p.765-796.

NUHN, J. & S. PEREZ y colaboradores, 1967. Estudio geográfico regional, Zona Atlántica Norte de Costa Rica. Instituto de tierras y colonización, San José, Costa Rica.

PANIAGUA, S., 1986. Notas técnicas: consideraciones sobre el riesgo volcanico de Costa Rica. Rev. Geol. Amer. Central 4, p. 89-92.

PANNEKOEK, A,J. & L.M.J.U. van STRAATEN, 1984. Algemene geologie. WOLTERS NOORDHOFF, b.v. Groningen, Holanda.

REAGAN, M.K., 1987. Turrialba Volcano, Costa Rica: magmatism at the southeast terminus of the Central American Arc. Dissertation.

SCHUSTER, R.L. & R.J. KRIZEK, eds., 1978. Landslides, analysis and control. Transportation research board special report 176, National Academy of Sciences, Washington D.C.

TONGZHEN, Y., sin fecha. Recent advances of quantitative prognoses of landslides in China. En: HARTLEN, J. & L. VIBERG, 1988. General report: evaluation of landslide hazard. En: BONNARD, C. ed., 1988. Landslides proceedings of the fifth international symposium on landslides, Lausanne. BALKEMA, Rotterdam, Holanda. volume II, p. 1037-1057.

VARNES, D.L., 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. UNESCO, Paris.

WALDRON, H.H., sin fecha. Preliminary report on some engineering geologic problems associated with the Irazú volcano eruption.

WALDRON, H.H., 1964. Engineering geological studies of Irazu Volcano, a progress report. U.S. Geological Survey.

WALDRON, H.H., 1967. Debris flow and erosion control problems caused by ash eruptions of Irazú volcano, Costa Rica. U.S. Geol.

Surv. Bull. 1241, p. 37.

Anexo 1. GLOSARIO EXPLICATIVO

Abanico aluvial	Depósito por agua de río, en forma de un abanico, donde el río sale de la montaña y entra en la llanura.
Avalancha de lodo (lahar)	Flujo rápido de una masa, que se compone de piedras, arcilla, agua y aire.
Bloque	Normalmente un deslizamiento no se mueve en su totalidad, pero es dividido en algunos bloques que mueven separadamente.
Caer	Movimiento rápido, cayendo o rodando, de los fragmentos de roca de una escarpa.
Cárcava	Excavación causada por el agua de arroyada.
Cono de coluvión	Depósito de detritos al pie de una escarpa en una forma cónica.
Deslizamiento	Movimiento rápido de una masa considerable de suelo o roca, la cual se desplaza en una sola unidad, bajo la acción de la gravedad en un plano de falla.
Deslizarse	Movimiento de material a lo largo de un plano de falla reconocible, en donde más o menos la masa conserva su coherencia.
Drenaje	Propiedad que posee el suelo de permitir el desagüe.
Erosión	Remoción del material mineral por un medio de transporte, como por ejemplo, el agua.
Fluir	Fenómeno transitorio entre erosión y remoción, el material en movimiento se comporta como una masa viscosa, en donde las fuerzas entre las partículas son más importantes que las fuerzas al plano de falla.
Fragmento	Parte de un bloque. Normalmente mueve más o menos independientemente.
Fuerza externa (E)	Una fuerza que proviene de fuera de la ladera, por ejemplo, el peso de la vegetación. Esta fuerza puede tener direcciones diferentes.

Fuerza normal (N)	La fuerza del peso de un cuerpo descompuesta perpendicular a su fondo.
Fuerza de resistencia (S)	La resistencia del cuerpo del suelo a un corte, que depende de la fuerza normal y la cohesión.
Fuerza tangencial (T)	La fuerza del peso de un cuerpo descompuesto paralela a su fondo, la fuerza conducienda.
Mecanismo de disparo	Proceso que inicia en movimiento de la tierra.
Permeabilidad	Aptitud del suelo para dejar pasar a través el aire o el agua.
Plano de falla	Plano del cuerpo del suelo en donde ocurre la falla. Un deslizamiento de una parte del suelo, que se encuentra en un lado de este plano, se mueve sobre una parte del suelo en el otro lado del mismo plano.
Presión de los poros	La presión del agua dentro el suelo.
Remoción	Suelo y roca que se desplazan bajo la acción de la gravedad y a veces con un medio de transporte con una velocidad bastante rápida.
Reptación	Material que se moviliza sobre una pendiente relativamente moderada (5 a 30 grados) y a velocidades del orden alrededor de un metro por año.