

$$C = c / D(s), m = D_w / D \text{ y } r = (w_r / s)$$

Estas expresiones se han utilizado para desarrollar una forma adimensional de la ecuación que considera la aceleración sísmica:

$$FS = C + (\cos^2 - \forall \text{ sen}^2 \cos^2 - mrcos^2) \tan N / (\text{sen}^2 \cos^2 + \forall \cos^2)$$

Así mismo, para simplificar la ecuación y hacerla fácilmente implementable en un sistema de información geográfica como el ILWIS, se ha utilizado la siguiente expresión:

$$A = C / \cos^2$$

Al final, se obtiene la expresión adimensional utilizada en el cálculo del factor seguridad como:

$$FS = A + (\cos^2 - \forall \text{ sen}^2 - mr \cos^2) \tan N / (\text{sen}^2 + \forall \cos^2)$$

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En las figuras 6 y 7 se observan los resultados del cálculo del factor de seguridad, para las diferentes aceleraciones sísmicas consideradas. De estas figuras se desprende que es evidente la posibilidad de deslizamiento, en ambas márgenes de la quebrada Ipís, en caso de actividad sísmica.

Según Climent (2000) es práctica común el uso de cargas sísmicas efectivas para el diseño de obras de infraestructura, las cuales son una fracción del valor pico de la aceleración horizontal esperada. El factor 2/3 del espectro de repuesta elástico se considera como el mínimo para ser utilizado en todos los tipos de estructura (Climent, 2000). Tomando en cuenta que para el sitio de estudio la aceleración pico es de 0.27g para un periodo de recurrencia de 50 años (Climent, 2000), el mínimo a considerar es de 0.18g. Por lo anterior, en adelante, el análisis de resultados se ejecuta para un escenario de un factor de

seguridad correspondiente con una aceleración sísmica de 0.20g.

Cuadro 3: Consideraciones respecto al factor de seguridad y que se utilizan en la clasificación de los resultados del modelo.

Factor de seguridad	Condición	Característica	Necesidad de medidas correctivas
≤ 0.5	Muy inestable	Probabilidad de desestabilizarse superior al 50% en caso de una aceleración sísmica dada	Imperante
$0.5 < FS \leq 1.0$	Inestable	Probabilidad de desestabilizarse inferior al 50% en caso de una aceleración sísmica dada	Imperante
$1.0 < FS \leq 1.2$	Quasi-estable	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se mejora la condición del sitio	Imprescindible
$1.2 < FS \leq 1.4$	Moderadamente estable	Se puede construir infraestructura con mejoras menores del sitio	Necesario
$FS > 1.4$	Estable	Sector estable	No se requiere

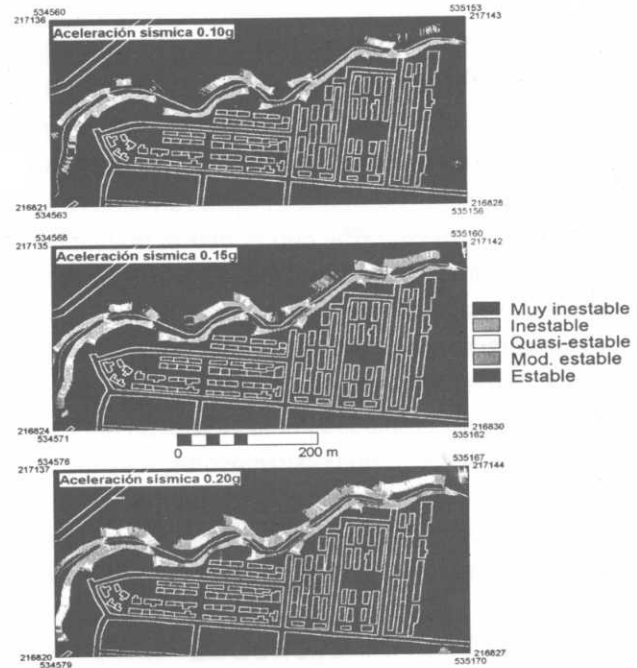


Fig. 6 Resultados del análisis de estabilidad de laderas para aceleraciones sísmicas de 0.10, 0.15 y 0.20 de g.

En la figura 8 se aprecia un detalle del resultado del análisis de estabilidad, para una aceleración sísmica de 0.20g. Siguiendo lo expuesto en el cuadro 3 y la figura 8, podemos decir que en toda el área señalada como Quasi-estable, Inestable o Muy Inestable (amarillo, naranja y rojo respectivamente), se debe prohibir la construcción de cualquier tipo de obra de infraestructura. En estos sectores se deben emprender medidas correctivas, para evitar el deslizamiento del talud en caso de actividad sísmica de importancia. Si alguno de estos sectores se desliza, el resultado sería el desarrollo de un escarpe subvertical en las cercanías de las viviendas, el cual podría continuar desestabilizándose sin necesidad de ocurrencia sismos y pondría en peligro a las viviendas mismas y sus habitantes.

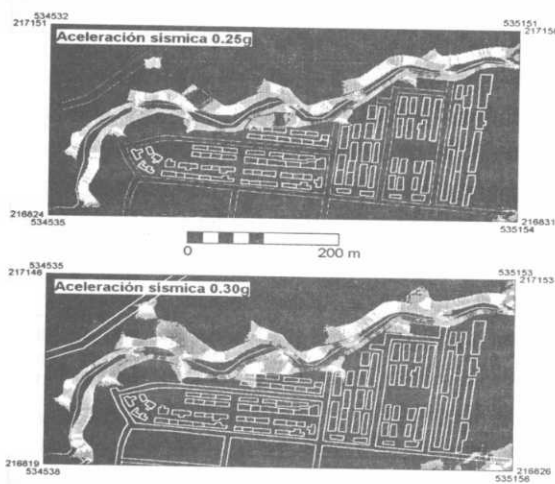


Fig. 7 Resultados del análisis de estabilidad de laderas para aceleraciones sísmicas de 0.25 y 0.30 de g .

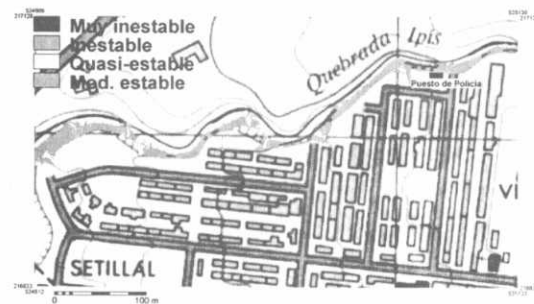


Fig. 8 Detalle del resultado del análisis de estabilidad, para una aceleración sísmica de 0.20g.

Los sectores considerados como Moderadamente Estables (verde) pueden comportarse adecuadamente durante un sismo, sin embargo, requieren de algunas medidas de estabilización menores, con el objetivo de alcanzar un factor de seguridad igual o mayor de 1.4.

En general, las medidas correctivas involucran el movimiento de terrenos para suavizar el talud y la construcción de obras de retención, así como de drenajes. La realización de estas obras está condicionada por las limitaciones de espacio, el acceso difícil al talud y el costo de las mismas.

El tránsito de vehículos livianos por las cercanías del talud, no afecta significativamente su estabilidad, pero la persona que desee circular por este sector, debe hacerlo bajo su propia responsabilidad.

Por otro lado, el puesto de la Policía debe ser reubicado lo antes posible, pues se encuentra al borde de una de las secciones más inestables del talud.

6. PROTECCIÓN DE LAS MÁRGENES DE LA QUEBRADA IPÍS ANTE EROSIÓN Y SOCAVAMIENTO

Otro problema de inestabilidad de laderas se presenta si se considera la acción erosiva y de socavamiento, que ejerce la quebrada Ipís en sus márgenes. Este efecto se manifiesta con severidad durante la temporada lluviosa de nuestro país (Acón & Villalobos, 2002). En el cuadro 4 se resumen las principales características hidroclimáticas de la microcuenca de la quebrada Ipís, las cuales se obtienen del estudio de Acón & Villalobos (2002).

Acón & Villalobos (2002) establecen que el ángulo de reposo del talud es de 40° , por lo cual, estos autores consideran que cualquier pendiente superior a este valor es vulnerable a la erosión y socavamiento. En la figura 9 se aprecian los sectores donde la protección de márgenes debe ser implementada.

Cuadro 4: Características hidrológicas de la micro-cuenca de la quebrada Ipís hasta la urbanización Setillal.

Área [km ²]	1.03
Coefficiente de escorrentía	0.25
Lluvia de 1 hora de duración, que puede esperarse una vez al año [mm]	34
Diferencia de elevación [m]	220
Longitud del cauce [km]	3.6
Tiempo de concentración [min]	30
Lluvia máxima horaria, período de retorno 50 años [mm]	86
Tormenta de diseño [mm/h]	127.5
Caudal máximo probable, período de retorno 50 años [m ³ /s]	9.11

Acón & Villalobos (2002) recomiendan el uso de gaviones o suelo reforzado, con el propósito de brindar estabilidad y protección a los taludes, y resaltan las siguientes características de estas estructuras:

- Admiten asentamientos
- Cuentan con componentes flexibles
- No se requieren fundaciones especiales
- No requieren drenaje
- Utilizan material localmente disponible
- Funcionan como estructura de contención y protegen contra la erosión
- No requieren de mano de obra especializada, ni equipos especiales
- Su entrada en funcionamiento es inmediata
- Pueden contar con paramentos verticales, en gradones o inclinados



Fig. 9 Sectores donde se requiere la implementación de medidas de protección de márgenes y puntos de observación de Acón y Villalobos (2002).

La gran cantidad de basura, acumulada a lo largo del cauce de la quebrada Ipís, impide el libre flujo y aumenta la vulnerabilidad ante la socavación (Acón & Villalobos, 2002). Los mismos autores enfatizan la necesidad de limpiar el cauce y mantenerlo exento de obstáculos.

La redes de aguas servidas y pluviales descargan directamente a la quebrada, lo cual contribuye a socavar y erosionar el talud, así como, a aumentar los niveles de contaminación del recurso hídrico (Acón & Villalobos, 2002). En la figura 9 se aprecian algunos puntos, donde Acón & Villalobos (2002) han realizado las observaciones que aparecen en el cuadro 5.

Cuadro 5: Recomendaciones brindadas por Acón & Villalobos (2002), para el manejo de aguas servidas y pluviales.

Punto #	Situación actual	Recomendación
1	Salida de aguas pluviales clausurada.	Mantenerla en su estado actual
2	Salida de aguas pluviales y aguas negras, más la descarga del punto 1. Cuenta con dissipador de energía.	Clausurar la salida de aguas servidas y conducirla a una planta de tratamiento. Mejorar la capacidad de reducción de velocidad del dissipador, con la construcción de canal y gradas de concreto
3	Salida de aguas pluviales.	Construcción de un dissipador de energía apropiado
4	Vivienda afectada por deslizamiento y tubería de aguas negras de la misma.	Reubicar de la vivienda y clausurar la tubería
5	Se ha construido una iglesia y la sede de Instituto Nacional de Aprendizaje (INA)	Monitorear el comportamiento del talud y en caso necesario, proceder a su refuerzo y protección

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el sitio de estudio se ha identificado una capa de ceniza de un espesor cercano a los 3.2 m, la cual sobreyace a un lahar de 2.6 m de espesor y este a su vez se encuentra sobre un aluvión de espesor desconocido.

El nivel freático no se detectó en ninguna de las perforaciones, debido a que las capas de ceniza y el lahar se comportan como acuitados, el agua que se infiltra, a través de estos materiales, recarga el acuífero constituido por el aluvión. Los depósitos que sobreyacen al aluvión pueden encontrarse muy cercanos a la saturación completa durante la temporada lluviosa, pero sin alcanzar a desarrollar un acuífero, debido a la permeabilidad sensiblemente más elevada del mismo aluvión.

La quebrada Ipís fluye sobre los materiales del aluvión y considerando que sus aguas presentan un contenido apreciablemente alto de detergentes y otras sustancias, así como depósitos de desechos sólidos, esta quebrada podría estar contribuyendo a deteriorar severamente la calidad del agua del acuífero.

El depósito de cenizas se ha caracterizado física y mecánicamente, pues se considera que el mismo es el que presenta el mayor potencial de desestabilizarse en caso de actividad sísmica.

Es evidente la posibilidad de deslizamiento, en ambas márgenes de la quebrada Ipís, en caso de actividad sísmica.

En el área señalada como Quasi-estable, Inestable o Muy Inestable (amarillo, naranja y rojo respectivamente), se debe prohibir la construcción de cualquier tipo de obra de infraestructura. En estos sectores se deben emprender medidas correctivas, para evitar el deslizamiento del talud en caso de actividad sísmica de importancia. Si alguno de estos sectores se desliza, el resultado sería el desarrollo de un escarpe subvertical en las cercanías de las viviendas, el cual podría continuar desestabilizándose, sin necesidad de ocu-

rrencia sismos y pondría en peligro a las viviendas mismas y sus habitantes.

Los sectores considerados como Moderadamente Estables (verde) pueden comportarse adecuadamente durante un sismo, sin embargo, requieren de algunas medidas de estabilización menores, con el objetivo de alcanzar un factor de seguridad igual o mayor de 1.4.

Las medidas correctivas involucran el movimiento de terrenos para suavizar el talud y la construcción de obras de retención, así como de drenajes. La realización de estas obras está condicionada por las limitaciones de espacio, el acceso difícil al talud y el costo de las mismas.

El tránsito de vehículos livianos por las cercanías del talud, no afecta significativamente su estabilidad, pero la persona que desee circular por este sector, debe hacerlo bajo su propia responsabilidad.

El puesto de la Policía debe ser reubicado lo antes posible, pues se encuentra al borde de una de las secciones más inestables del talud.

Se deben considerar las recomendaciones de Acón & Villalobos (2002), en lo que respecta a limpiar el cauce de la quebrada Ipís y acatar sus observaciones en cada uno de los puntos, donde sugieren mejoras.

8. BIBLIOGRAFÍA

Acón, E. & Villalobos, L.J., 2002: Informe de zonas de peligro de socavación en margen sur de la quebrada Ipís, Setillal, Goicoechea. Informe de Trabajo Comunal Universitario (TCU). Proyecto Estabilidad de Taludes en Obras de Interés Social, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica. (Informe inédito).

Climent, A. (Editor), 2000: Microzonificación Sísmica. NORAD-CEPRENAC. San José, Costa Rica. 120 p.p.



Denyer, P. & Arias, O., 1991: Estratigrafía de la región central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 12: 1-59.

Dunn, I.S., Anderson, L.R. & Kiefer, F.W., 1980: *Fundamentals of Geotechnical Analysis*. John Wiley & Sons, New York. 416 p.p.

GCO, 1984: *Geotechnical Manual for Slopes*. Geotechnical Control Office. Engineering Development Department, Hong Kong. 295 p.p.

Hammond, C., Hall, D., Miller, S. & Swetik, P., 1992. *Level I Stability Analysis (LISA)*,

Documentation for Versión 2.0. General Technical Report INT-285, USDA, Forest Service Intermountain Research Station.

ITC, 2001: *Ilwis 3.0 Academic, User's Guide*. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, The Netherlands. 530 p.p.

Pack, R.T., Tarboton, D.G. & Goodwin, C.N., 2001: *A stability index approach to terrain stability hazard mapping, SINMAP User's Manual*. Canadian Forest Products Ltd. Forest Renewal B.C. 68 p.p.