

IMPACTO DE FUERZAS DE FILTRACIÓN Y TUBIFICACIÓN RETRÓGRADA A LA INESTABILIDAD DE TALUD Y EROSIÓN HÍDRICA

Xiangyue Li y Víctor Arroyo

Impacto de fuerzas de filtración y tubificación retrógrada a la inestabilidad de talud y erosión hídrica

Resumen: En este trabajo se hace una valoración de fuerzas de filtración, haciendo referencia en la inestabilidad de taludes y erosión hídrica. Tradicionalmente estos temas se estudian, por separado, en las disciplinas de mecánica de suelos y conservación de suelos. Sin embargo, en la actualidad, por la presencia de varios efectos a la vez y el alto impacto económico y social que puede tener una falla de taludes de gran magnitud, este tópico se está atendiendo por muchas otras especialidades.

Palabras clave: Erosión hídrica, ladera natural, talud, fuerza de filtración, suelo saturado.

Abstrac: The mechanisms of seepage forces are highlighted as important influence factors in slope stability and soil erosion. In the past these last two processes have been studied in a separated manner in soil mechanics and soil science. However, due to the simultaneous presence of the various effects and high social and economic impact that a landslide could produce, multidisciplinary efforts between soil scientists, geotechnical engineers, hydraulic engineers and hydrologists are being carried out.

Key words: Soil erosion, landslide, slope, seepage force, saturated soil.

Introducción

Los taludes son componentes estructurales fundamentales de presas y bordos. La inestabilidad de los taludes influye directamente en la seguridad y el funcionamiento de estas estructuras hidráulicas. Como ejemplo, las inundaciones de Nueva Orleans en 2004 tienen en su origen la falla del sistema de diques. Las laderas naturales, al tiempo de crear paisajes espectaculares, pueden padecer deslizamientos masivos que obstruyen corrientes de río. Tal es el caso del deslizamiento que tuvo lugar en San Juan de Grijalva, Chiapas, en 2007. Si los taludes o laderas se localizan en la cercanía de poblaciones, o bien las descargas de los embalses, como consecuencia del desbordamiento de presas o bordos provocan inundaciones, se pueden presentar cuantiosas pérdidas de material y vida humana. Por otro lado, la erosión hídrica es el causante principal de pérdidas de suelo en cuencas hidrográficas. Ante una mayor frecuencia de la presencia de condiciones hidrometeorológicas adversas, la erosión hídrica viene agravándose considerablemente.

Varios factores inciden en la inestabilidad de taludes y la erosión hídrica, desde meteorológicos e hidrológicos hasta geológicos y geotécnicos. Sin duda, el agua juega un papel prominente. Los suelos y rocas son materiales porosos, saturados o parcialmente saturados por el agua. Ésta, al fluir a través de los poros del suelo, ocasiona fuerzas de arrastre a su esqueleto sólido, las que se conocen como fuerzas de filtración, mismas que hacen cambiar el estado de esfuerzos y deformaciones de los materiales. Los esfuerzos cortantes generados pueden rebasar las resistencias, propiciando grandes desplazamientos o hasta fallas totales en la masa de los materiales.

Aún cuando no sean tan grandes como para originar fallas masivas, las fuerzas de filtración pueden llegar a arrastrar partículas de suelo hacia la superficie de terreno. Esto ocurre con mayor frecuencia en suelos granulares como gravas o arenas. Si la pérdida de los materiales no se controla adecuadamente, el arrastre de los mismos deja ductos o cavidades en la masa de suelo. Si este proceso se evoluciona, es posible que se formen ductos continuos a lo largo de líneas de corriente del flujo de agua, causando erosiones de gran magnitud. Este fenómeno se conoce

como tubificación retrógrada. Su presencia en laderas es el responsable de erosión por filtración y su ocurrencia en presas o bordos pueden traer como consecuencia daños todavía mayores que pueden ser incluso catastróficos.

En este trabajo se hace una valoración de fuerzas de filtración, haciendo referencia en la inestabilidad de taludes y erosión hídrica. Tradicionalmente estos temas se estudian, por separado, en las disciplinas de mecánica de suelos y conservación de suelos. Sin embargo, en la actualidad, por la presencia de varios efectos a la vez y el alto impacto económico y social que puede tener una falla de taludes de gran magnitud, este tópico se está atendiendo por muchas otras especialidades, tales como hidrología, hidráulica, geomorfología y geología aplicada. Se están llevando a cabo investigaciones y estudios desde un enfoque interdisciplinario, con la finalidad de establecer modelos de predicción más eficaces y soluciones integrales.

Fuerzas de filtración y estabilidad de talud

Desde el punto de vista mecánico, el agua contenida en los medios porosos interactúa con el esqueleto sólido mediante la presión de poro. En suelos saturados, se distinguen dos fuentes responsables de los cambios en la presión de poro. La primera de ellas está asociada con la generación y la disipación de las presiones de poro, que se deben a la deformación del esqueleto sólido de los suelos. Bajo las cargas gravitacionales y externas, la deformación por cortante ocurre acompañada por un cambio en volumen. Si los suelos poseen baja permeabilidad, la deformación volumétrica no tiene lugar instantáneamente, por lo cual se genera un exceso en presión de poro. Este fenómeno tiene carácter transitorio, por lo que el exceso en presión de poro se disipa con el paso del tiempo, tendiendo a desaparecer para dar lugar a la condición del flujo estacionario, siempre y cuando las condiciones de frontera del flujo de agua se mantengan constantes.

El flujo subterráneo representa otra fuente del cambio en la presión de poro en los taludes. Puede ser transitorio o del estado estacionario, teniendo lugar igual en taludes artificiales que naturales. La hidrodinámica del agua subterránea, en combinación con la fluctuación de niveles del espejo de agua, puede observarse durante eventos, tales como lluvias, variación en el nivel de los vasos, o cuando existen manantiales. Durante lluvias intensas, la infiltración de aguas pluviales, a través de las zonas vadosas, satura el talud y eleva el nivel freático. Este proceso equivale a la aplicación del campo de fuerzas de filtración sobre el esqueleto sólido de los suelos, pudiendo llevar el talud a su condición de seguridad más crítica. Dependiendo de la intensidad y duración de lluvias, se generan diferentes condiciones de estabilidad, de las cuales una de las más estudiadas es aquella en la que todo el talud queda saturado y el flujo sea del tipo estacionario. Como la determinación de esta condición crítica, requiere de pocos parámetros de suelo y flujo de agua. Su análisis puede extenderse a grandes extensiones territoriales, produciendo mapas de riesgos geológicos y hidrometeorológicos, los cuales pueden plasmarse en sistemas de información geográfica que permiten proporcionar soluciones interdisciplinarias en la mitigación de desastres naturales.

El flujo de agua y fuerzas de filtración (fig. 1) se pueden determinar mediante algoritmos numéricos. Para ello se tienen que realizar pruebas de laboratorio y campo para puntualizar los parámetros de conductividad hidráulica de los materiales. Son de gran ayuda las observaciones en campo de niveles piezométricos. Con base en estos análisis, se puede definir la variación de fuerzas de filtración en un talud, la que sirve para subsecuentes estudios de estabilidad de talud y tubificación retrógrada.

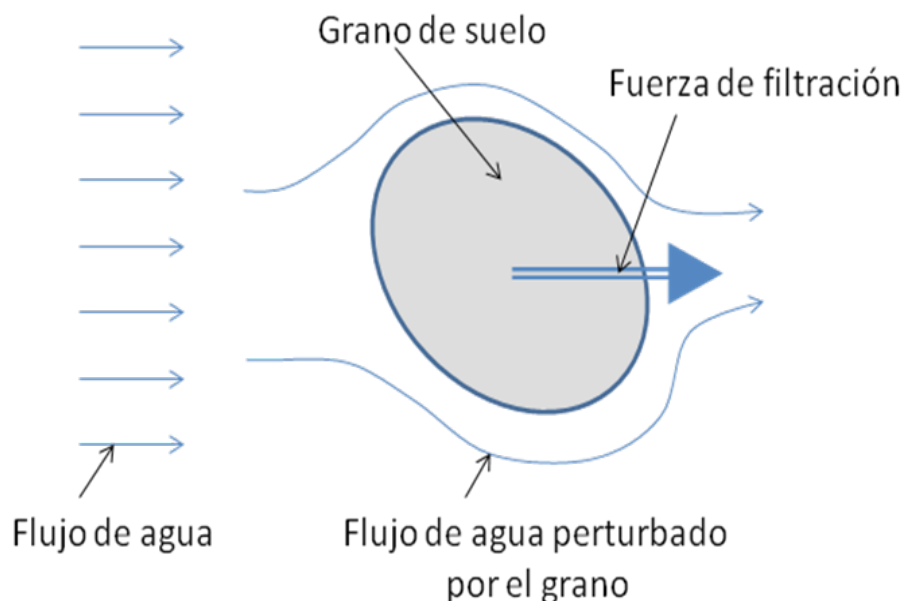


Figura 1. Esquema de un grano de suelo sujeto al flujo de agua y fuerzas de filtración

Los análisis de taludes se llevan a cabo comúnmente por medio de los métodos de equilibrio límite, de los cuales los mejor conocidos son de dovelas. Estos procedimientos de cálculo suponen a priori superficies de falla y analizan el equilibrio de presumibles cuerpos libres y rígidos ante las acciones de fuerzas externas e internas. Como resultado se determinan los factores de seguridad que corresponden a las superficies de falla más críticas. A pesar de su amplio uso en la práctica, estos métodos sufren varias limitaciones. Una de ellas es la hipótesis que se formula en cuanto a superficies de falla. En muchas ocasiones no es fácil encontrar las superficies más críticas y de allí los factores de seguridad determinados no siempre son los valores mínimos. Se han desarrollado varias técnicas, pretendiendo a superar estas dificultades, entre las que se encuentran algunos métodos de búsqueda de las fallas más críticas. Últimamente se han usado cada vez con mayor frecuencia los métodos de elementos finitos para determinar la estabilidad de los taludes.

Estos métodos son en particular atractivos en el análisis de taludes granulares. Para un material puramente friccionante con ángulo de fricción interna constante, las superficies de falla son someras y tienen poca similitud con círculos, espiral logarítmico o planos, superficies de falla usualmente estudiadas.

Taludes homogéneos

A fin de demostrar algunos resultados de estos análisis, se grafican en la figura 2(a) los vectores de desplazamientos correspondientes a las soluciones antes de la falla de un talud puramente friccionante. De acuerdo con el patrón de falla mostrado en 2(a), todos los desplazamientos se concentran en la cara del talud, indicando una falla superficial con deslizamientos planos. La dirección de los desplazamientos queda esencialmente horizontal con una magnitud uniformemente distribuida a lo largo de toda la cara del talud. El patrón de las fuerzas de filtración determinado en el análisis del flujo de agua, se muestra en la figura 2(b). El flujo subterráneo tiene su entrada en la corona del talud; sus salidas se sitúan en la mitad inferior de la cara de éste y en la superficie terrestre, más allá del pie del talud. Las fuerzas de filtración actúan, dentro del talud,

como fuerzas de cuerpo desestabilizadoras cuya dirección y magnitud varían espacialmente. Las fuerzas en la cercanía de la corona del talud tienen direcciones hacia abajo con el máximo gradiente hidráulico. A la media altura del talud los vectores de filtración giran y vuelven a ser paralelos a la cara de éste. Acercándose al pie del talud, las fuerzas de filtración se orientan hacia afuera, acomodándose casi en sentido horizontal.

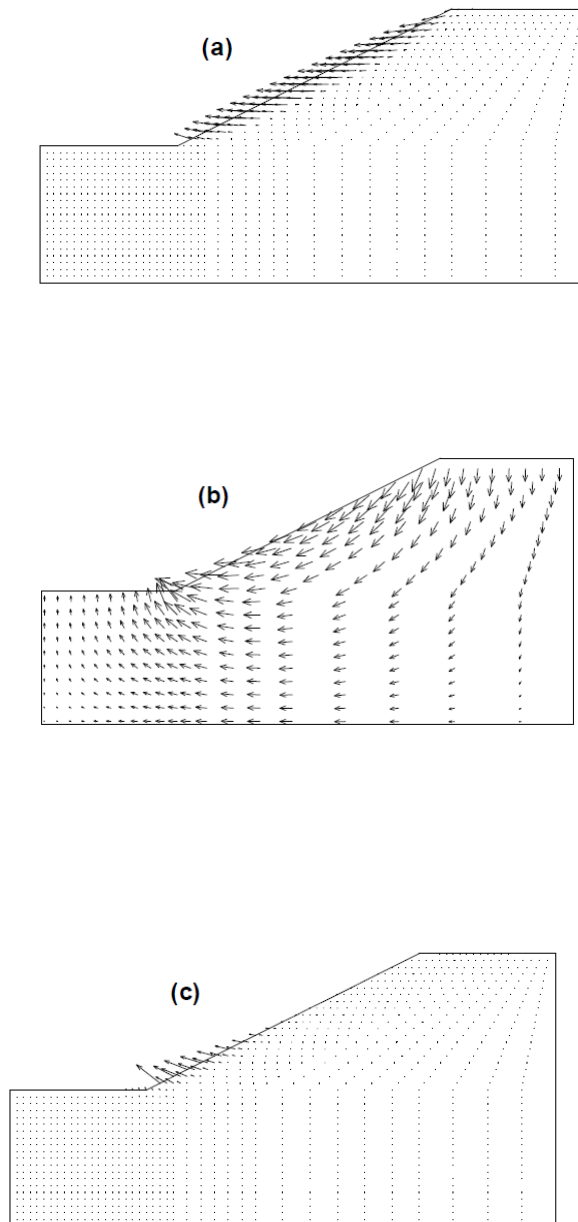


Figura 2. Patrones de flujos de filtración y mecanismos de falla del talud: a) Desplazamientos en un estado seco; b) Vectores de fuerzas de filtración, y c) Desplazamientos en un talud saturado.

Cuando las fuerzas de filtración se aplican al modelo elastoplástico, se obtiene el factor de 6 -xx

seguridad. El patrón de desplazamientos incrementales afectado por el efecto de la filtración se muestra en la figura 2(c). Se nota una considerable diferencia entre los patrones de falla antes y después de la aplicación del campo de fuerzas de filtración. Por el efecto de la filtración, los desplazamientos en la falla están concentrados solamente en la mitad inferior de la cara del talud. La magnitud de estos desplazamientos se aumenta linealmente desde el punto de la media altura hacia el pie del talud, donde se observa el máximo valor. La dirección de los desplazamientos también se modifica considerablemente, dando como resultado una orientación horizontal a la media altura del talud, punto desde donde los vectores de filtración giran hacia arriba. La zona de concentración de los desplazamientos coincide con la región en que las fuerzas de filtración se orientan hacia arriba. Estos resultados muestran que aún en un talud homogéneo, las fuerzas de filtración no son uniformes en todo el talud, y su falla ya no es global sino de carácter local.

Los resultados muestran que el factor de seguridad en un talud saturado es apenas la mitad del valor correspondiente a un talud seco. De allí la importancia de las fuerzas de filtración en este tipo de obras.

Taludes no homogéneos

Es bien conocido que los coeficientes de permeabilidad de las arenas, aún tienen texturas similares. Pueden diferirse en tres o cuatro órdenes de magnitud. En taludes homogéneos, el coeficiente de permeabilidad no afecta el campo de fuerzas de filtración. En cambio, cuando está presente la heterogeneidad hidráulica, el contraste en permeabilidad en diferentes zonas del talud modifica el campo de filtración.

Considérese que una interfaz divide el talud en dos partes, talud arriba y talud abajo. Dicha interfaz se cruza con la cara del talud a la media altura (figura 3). Se consideran dos tipos de interfaz: horizontal y vertical. Los coeficientes de permeabilidad en cada lado de la interfaz son constantes y denotados por k_u y k_d , que representan el valor del lado talud arriba y el del lado talud abajo, respectivamente. Se consideraron valores de 0.1, 1, 2, 5 y 10 para el contraste en permeabilidad k_u/k_d . A pesar de la heterogeneidad hidráulica, el ángulo de fricción se considera constante para todo el talud. Los factores de seguridad normalizados se grafican en la figura 3, como una función de los contrastes en permeabilidad para los dos tipos de interfaz.

De acuerdo con el análisis del elemento finito, efectuado para el talud homogéneo, el factor de seguridad normalizado $F/\tan\phi'$ resulta 0.95, donde F es el factor de seguridad y ϕ' es el ángulo de fricción interna del material. Con respecto al talud homogéneo, los factores de seguridad se incrementan si la permeabilidad talud arriba se vuelve menor que la del talud abajo. Sin embargo, los incrementos resultan tan pequeños que alcanzan apenas 4 y 10% para las interfaces horizontal y vertical, respectivamente, tomando en cuenta el contraste de $k_u/k_d = 0.1$.

Cuando los valores k_u/k_d decrecen aún más, casi no se observa cambio alguno en los factores de seguridad. Contrariamente, al ser mayor la permeabilidad del lado talud arriba, el decremento en factores de seguridad es mucho más notable, particularmente para los taludes con interfaz vertical entre capas. En este caso, los contrastes en permeabilidad $k_u/k_d = 2, 5$ y 10 dan como resultado reducciones en factor de seguridad de 14, 45 y 69%, respectivamente. En cambio, al ser horizontal la interfaz entre capas, las reducciones llegan apenas a 1, 2 y 3%, respectivamente.

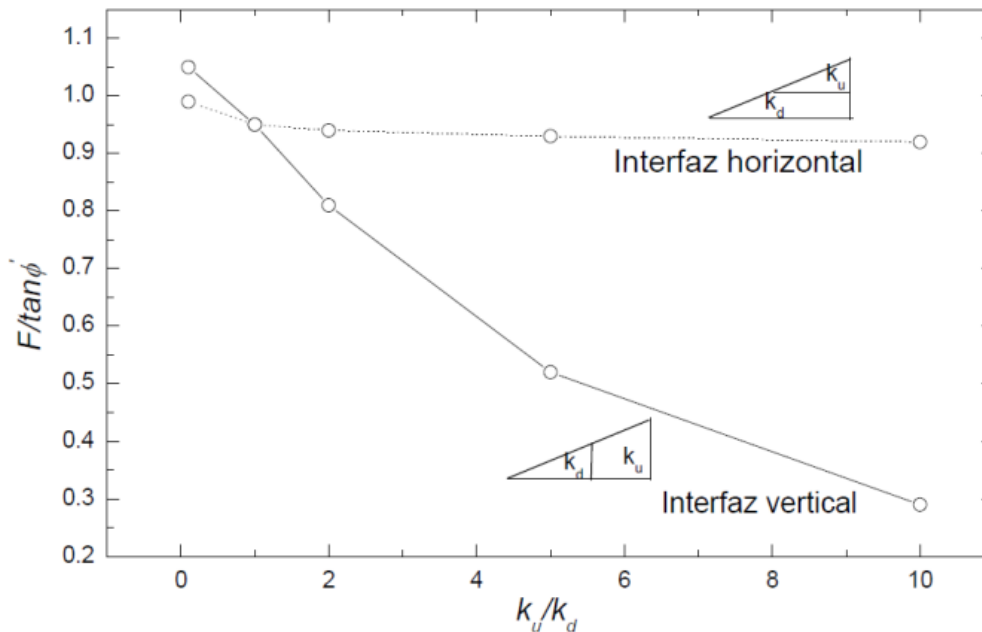


Figura 3. Factores de seguridad normalizados para diferentes taludes no homogéneos.

Los resultados del análisis de los taludes no homogéneos muestran claramente que el campo de fuerzas de filtración debe determinarse lo más preciso posible, porque afecta considerablemente el cálculo de los factores de seguridad. En la mayoría de los estudios de estabilidad, usando los métodos de equilibrio límite, análisis límite o, incluso, elemento finito, se hace comúnmente la estimación de la distribución de presiones de poro con base exclusivamente en el perfil del nivel freático, sin resolver la ecuación del flujo estacionario. Si bien tal hipótesis se considera aceptable en los taludes homogéneos, está lejos de ser adecuada para los taludes no homogéneos. Para ilustrar mejor el defecto de esta hipótesis, considérese el siguiente ejemplo: si se usara la hipótesis comúnmente adoptada sobre la distribución de presiones de poro para los taludes no homogéneos analizados en este trabajo, cuyos resultados se muestran en la figura 3, sólo un factor de seguridad normalizado (0.95) se obtendrá para todos los casos considerados, sin poder estimar las significativas variaciones en las condiciones de colapso que se observan.

Tubificación retrógrada

La tubificación (figura 4) es el término que más se emplea, aunque frecuentemente en forma ambigua, para describir los problemas asociados con fuerzas de filtración. La definimos como el proceso de remoción de partículas de suelo bajo un gradiente hidráulico saliente, con el resultado de la formación de un ducto desde la salida del agua. El fenómeno así definido se refiere en la literatura como tubificación retrógrada, ya que el proceso siempre sucede desde el lado aguas abajo hacia aguas arriba en contra de la dirección del flujo de agua. En ocasiones, este término se ha usado indebidamente como sinónimo de levantamiento, erosión interna o migración.

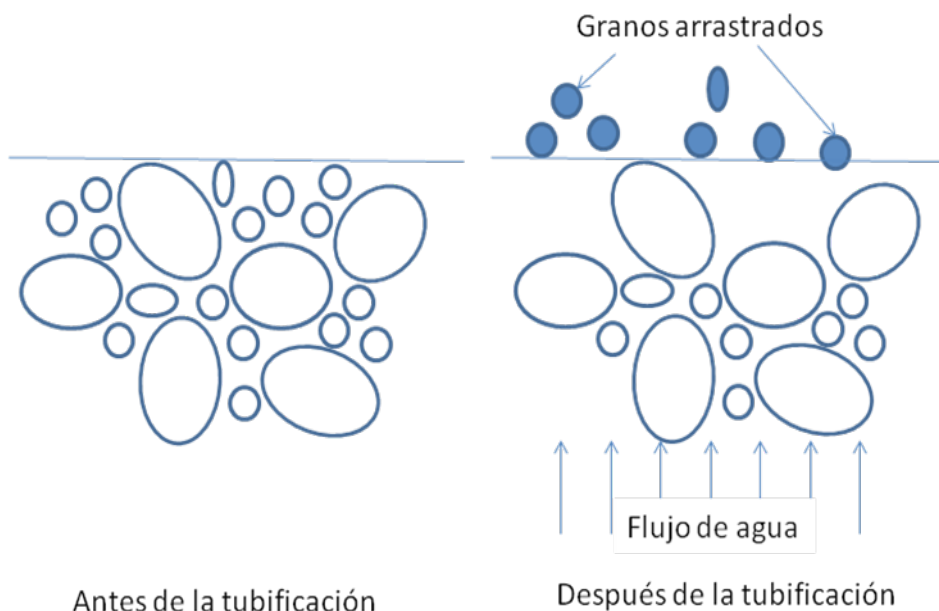


Figura 4. Arrastre de granos de suelo por efecto de tubificación retrógrada

Levantamiento es el movimiento de un bloque de suelo en la superficie de suelo bajo efectos de gradiente hidráulico. Puede ocurrir en suelos cohesivo y granular. Generalmente se acompaña por llozadero en taludes, ebullición de arena y volcán de arena, entre otras evidencias. El problema se presenta en taludes aguas abajo o pies de taludes aguas abajo donde sobresalen flujos de salida.

Este fenómeno se ha estudiado junto con otros hechos asociados con fuerzas de filtración, tales como tubificación y migración, generando la confusión de que todos ellos pertenecen a una sola clase de problemas. En realidad, el levantamiento se relaciona a la inestabilidad global, mientras la tubificación retrógrada y migración son del tipo de inestabilidad interna. El estudio del levantamiento emplea parámetros de suelo macroscópicos, como peso volumétrico, ángulo de fricción interna y cohesión, mientras la investigación de los fenómenos de inestabilidad interna debe encontrar respuestas en la mesoescala, usando granulometría como herramienta básica.

Los suelos granulares no uniformes son más susceptibles a la tubificación retrógrada, especialmente aquellos cuyo granos se dividen marcadamente por dos fracciones, una que es más gruesa que la otra. Estos suelos, como grava-arena, se conocen como de granulometría discontinua.

Se pueden identificar los suelos susceptibles a la tubificación retrógrada por medio de criterios geométricos que emplean, como datos básicos, curvas granulométricas. Para el diseño se usan criterios hidráulicos, los cuales establecen gradientes hidráulicos críticos permisibles. En un material no susceptible a la tubificación retrógrada, el gradiente hidráulico crítico es aproximadamente igual a uno. El fenómeno de levantamiento ocurre en este tipo de suelo. En cambio, un suelo susceptible a la tubificación retrógrada tiene gradiente hidráulico crítico mucho menor, que puede alcanzar hasta 0.20.

Erosión por filtración

La erosión hídrica de suelos se ha tratado tradicionalmente en el tópico de la conservación de cuenca. De la perspectiva de una cuenca hidrológica, el proceso de erosión se puede dividir

en tres tipos. El primero de ellos ocurre en áreas de gran extensión y relativamente planas. La erosión se denomina laminar, ya que el agua escurre dentro del régimen laminar. El segundo tipo se refiere a la erosión de laderas, en que juega un papel importante la fuerza de gravedad. Se movilizan grandes deslizamientos de ladera pero el área afectada es reducida. El tercero tiene que ver con la erosión de suelo en los cauces por los cuales las corrientes de agua conducen todas las aportaciones de sedimento en una cuenca hasta su salida.

La erosión en las laderas no se ha estudiado con mucho detalle en el pasado. Sin embargo, estudios recientes muestran su importancia. Se ha descubierto que las fallas masivas de los márgenes de río contribuyen a 85% del total de sedimentos. Otras investigaciones indican un porcentaje alto de sedimentos, entre 30 y 80%. Se debe a cárcavas que vienen siendo una forma de falla de talud.

Como se había mencionado, la erosión en taludes tiene su origen en la inestabilidad masiva y la tubificación retrógrada. Los análisis que toman en cuenta fuerzas de filtración han mostrado su utilidad en estos estudios.

Conclusiones

Fuerzas de filtración y tubificación retrógrada son agentes importantes de la ocurrencia de deslizamientos masivos y erosión hídrica. Tradicionalmente estos temas se estudian, por separado, en las disciplinas de mecánica de suelos y conservación de suelos. A fin de establecer modelos de predicción más eficaces y soluciones integrales, es necesario plantear trabajos multidisciplinarios.

Bibliografía

Fox, G. A. y Wilson, G. V. (2010) The Role of Subsurface Flow in Hillslope and Stream Bank Erosion: A Review. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, Vol. 74, Núm 3, 717-737

Freeze, R. A. y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Kovács, G. (1981) *Seepage Hydraulics (Developments in Water Science)*. Elsevier Science

Li, X, Rendón, L. E, y Espinoza, M. J. (2010) Consideraciones de fuerzas de filtración en el análisis de estabilidad de taludes granulares, *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México*, vol. 1, núm. 3, 89-107

Richards, K. S. y Reddy, K. R. (2007). Critical appraisal of piping phenomena in earth dams. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 66, 381-402

Schiereck, G. J. (2003) *Introduction to Bed, Bank and Shore Protection*, Spon Press; New Ed edition.

Sowers, G. B. y Sowers, G. F. (1994). *Introducción la mecánica de suelos y cimentaciones*. Limusa, México

Terzaghi, K, Peck, R. B. y Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3ª edición, John Wiley & Sons, New York.