



IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DE UN MODELO FÍSICO PARA LA SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL INFLUYENTES EN LA PRESENCIA DE UN DESLIZAMIENTO SUPERFICIAL

IMPLEMENTATION AND APPLICATION OF A PHYSICAL MODEL FOR THE SIMULATION OF
SUBSURFACE FLOW SCENARIOS INFLUENTIAL IN THE PRESENCE OF A SUPERFICIAL
SLIDE

Guillermo Pedro Morales Reyes¹; Luís Zaldivar²; María Vicenta
Esteller Alberich³

ORCID: 0000-0001-6022-6747

¹⁻³Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (UAEMex),

²Facultad de Ingeniería (UAEMex),

Av. Instituto Literario, No 100, C.P. 50000, Toluca Estado de México, México.

¹gpmoralesr@uaemex.mx, ²lluuiisszz94@gmail.com, ³mvestellera@uaemex.mx

RESUMEN

El trabajo tuvo como objetivo adecuar y aplicar un modelo físico (Unidad de Estudio de Permeabilidad) para simular en un medio poroso granular (Fase 1) un canal de flujo subsuperficial producto de diversos contenidos de humedad representados como gradientes hidráulicos longitudinales y conocer su influencia en la presencia de deslizamientos superficiales, mismos que son de interés para conocer su comportamiento, debido a las consecuencias catastróficas que provocan y desde el ámbito de la modelación física, obtener una herramienta de simulación para valorar de manera preliminar los posibles factores que influyen en el proceso de deslizamiento[1]. La metodología consistió en: realizar una adecuación funcional del equipo, cambios estructurales mínimos de operación, manejo de las condiciones iniciales aplicables en el modelo, considerando cinco gradientes hidráulicos,(contenido de humedad bajo, sobresaturación y tres condiciones intermedias), se generaron las simulaciones para cada gradiente hidráulico y se midieron en el perfil granular los caudales de entrada y salida, asimismo, la fluctuación de la presión en puntos intermedios del perfil granular; se identificaron los sitios donde se presentaron a escala de laboratorio los deslizamientos. Los



resultados indicaron que en los gradientes hidráulicos que representan saturación y sobresaturación, se producen deslizamientos en algunos puntos del perfil granular. Se concluyó que el modelo puede ser utilizado para simular deslizamiento a escala y con las condiciones de saturación manejadas. Por lo anterior, el aporte del trabajo es la implementación inicial de un modelo físico que puede aprovecharse para posteriores trabajos de simulación de deslizamientos a escala de laboratorio.

Palabras clave: Modelo ; Deslizamiento; Saturación

SUMMARY

The work aimed to adapt and apply a physical model (Permeability Study Unit) to simulate in a granular porous medium (Phase 1) a subsurface flow channel product of various moisture contents represented as longitudinal hydraulic gradients and know their influence on the presence of surface landslides, which are of interest to know their behavior, due to the catastrophic consequences they cause and from the field of physical modeling, obtain a simulation tool to assess in a preliminary way the possible factors that influence the sliding process [1]. The methodology consisted of: performing a functional adaptation of the equipment, minimum structural changes of operation, management of the initial conditions applicable in the model, considering five hydraulic gradients ,(low humidity content, supersaturation and three intermediate conditions), simulations were generated for each hydraulic gradient and the inlet and outlet flows were measured in the granular profile, as well as the fluctuation of the pressure at intermediate points of the granular profile; the sites where the landslides occurred on a laboratory scale were identified. The results indicated that in hydraulic gradients representing saturation and oversaturation, slippage occurs at some points of the granular profile. It was concluded that the model can be used to simulate slippage at scale and with the saturation conditions handled. Therefore, the contribution of the work is the initial implementation of a physical model that can be used for subsequent work of simulation of landslides at laboratory scale.

Keywords: Model: Slippage; Saturation

Fecha de recepción: 13 julio 2021



Fecha de aceptación: 27 septiembre 2021

Fecha de publicación: 1 de mayo de 2022

INTRODUCCIÓN

Los modelos físicos a pesar del surgimiento de tecnología que los llega a suplir en diversas aplicaciones como lo es la simulación de diversos procesos, siguen siendo una herramienta alternativa para identificar, evaluar, simular y hasta cierto punto predecir el comportamiento de algún proceso de interés, algunos trabajos[1] muestran la fortaleza que tienen los modelos físicos aplicables en campo y la utilidad que muestran para detallar el comportamiento de un proceso como es un deslizamiento superficial, realizar modelación física en laboratorio depende de muchos factores, desde económicos hasta humanos, por lo tanto, hoy en día se busca que los modelos físicos existentes en laboratorio tengan un aprovechamiento al máximo en las diversas tareas de investigación aplicada y de tipo didáctico. Por lo anterior, mediante el presente trabajo se busca adecuar y aplicar un modelo físico existente conocido como Unidad de Estudio de Permeabilidad, que por sus características pudiera ser aplicado en la simulación de un escenario básico que se considera el precursor de las condiciones favorables para reproducir un

deslizamiento superficial, por tal motivo y considerando que no se dispone de modelos físicos para laboratorio que puedan representar una herramienta de apoyo en la simulación de este tipo de procesos, se buscó en este trabajo como objetivo principal, adaptar la funcionalidad y parcialmente la estructura de la Unidad de Estudio de Permeabilidad (UEP) para reproducir un canal de flujo subsuperficial, acompañado de las condiciones iniciales que gobiernan en contenido de humedad, que en este caso, se consideró el perfil de humedad bajo, medio y alto (sobresaturación) que respecto del tiempo pueden detonar consecuencias adversas en el ambiente, desde inestabilidad de suelos y edificios, hasta deslizamientos de tipo superficial. Tener una idea preliminar de cómo influyen los factores que se asocian en el modelo y lograr definir los que determinan un deslizamiento a escala de laboratorio, resulta gratificante para el modelador, ya permite obtener información preliminar, sin hacer estudios de campo y aplicaciones de softwares costosos, lo que muestra la justificante del presente trabajo. Anteriormente se han realizado trabajos como los citados en [1], [2] y [3],



que indican la aplicación de modelos a escala aplicados en campo o en sitios específicos de interés, pero su naturaleza no permite el acceso a una dinámica que permita obtener resultados más rápidos y sin contratiempos de desplazamientos al sitio de interés. La unidad de estudio de Permeabilidad (UEP) es un equipo que se ha utilizado por años para propósitos didácticos, principalmente en prácticas de

laboratorio de Hidrología, su estructura general se muestra en la figura 1 y por los elementos estructurales y accesorios que lo integra, se consideró una opción para la realización del trabajo de laboratorio, se hace notar que se tienen nulos antecedentes en la aplicación que se persiguió en este trabajo, por lo que sus adecuaciones son inéditas.



Figura 1. Estructura general de la Unidad de Estudio de Permeabilidad.

METODOLOGÍA

Los pasos metodológicos que permitieron cumplir con el objetivo de este trabajo se enuncian a continuación: **1. Adecuación**

funcional y estructural de la UEP. En esta etapa se identificó el funcionamiento original del equipo, los componentes que lo integran así como las ventajas y limitaciones que presentó al momento de



su disposición, de lo cual se generaron algunos cambios en la estructura de alimentación de flujo, eliminando la proporcionada por una bomba eléctrica e incorporando un sistema de alimentación por gravedad, regulado por un sistema de válvulas de compuerta, mediante las cuales se calibró diferentes aberturas de válvula para obtener las cargas hidráulicas en la entrada del medio poroso (perfil granular), con el mínimo de flujo en demasías, el cual se regula con una tubería provista en el equipo, la cual conduce el agua por su interior hacia una salida provista en el mismo equipo, a la vez que fija la carga hidráulica, la cual permite posicionar un gradiente hidráulico específico. En la figura 1 se puede observar referidos tubos reguladores de la carga hidráulica.

También como parte de la modificación del sistema de alimentación de flujo, se incorporó un tanque de 200 L de capacidad a una altura de 2.10 m para que funcionara como fuente de alimentación constante, mediante una tubería de 0.5 pulgadas de diámetro bifurcada con una conexión tipo yee para unirse a dos válvulas reguladoras de caudal mencionadas en párrafos anteriores. Cuando se presentó el vaciado del tanque fuente, se consideró la precaución de llenarlo cuando tuviera una

cuarta parte de su capacidad, alimentándolo con el sistema de distribución de agua por gravedad del Laboratorio de Modelos Hidráulicos del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua.

Con las adecuaciones mencionadas se definió la forma de operar el equipo, consistente en a) colocar las mallas confinantes metálicas estabilizadoras del medio poroso o perfil granular, al inicio del perfil y en la salida del flujo, su posición se ilustra en la figura 1, b) Se fijó una escala de trabajo 1:100 para la colocación del perfil granular, considerando un ancho de canal de medio poroso de 21.0 m y la altura se definió según la topografía del escenario que se propuso reproducir, la cual corresponde a la existente en un sitio de presencia de un deslizamiento en la zona de Santa Ana Jilotzingo. Referido lugar fue objeto de estudio años antes y se dispuso de la topografía, c) se colocaron los tubos reguladores de carga piezométrica a las alturas que definirían el gradiente hidráulico con el cual se procedería a reproducir la circulación del flujo subsuperficial a través del canal de medio poroso, d) con una abertura de válvula previamente calibrada (con un mínimo de demasías en el tubo regulador de carga hidráulica) se alimentó al equipo para generar la carga hidráulica inicial, la



cual representa en un inicio el frente de humedecimiento en el medio poroso y con esta condición inicial esperar el tiempo necesario para que el frente de humedecimiento llegue hasta la salida del medio poroso y de esta forma obtener el perfil del gradiente hidráulico influyente en el medio granular, e) se procedió a realizar las mediciones de la presión en todo el perfil longitudinal utilizando los piezómetros mostrados en la figura 1, los cuales están posicionados de manera distribuida en dirección longitudinal y vertical respecto del perfil de medio poroso, f) se hizo una revisión cuidadosa del comportamiento del flujo, carga piezométrica y los cambios en la estructura del medio poroso, anotando y fotografiando los cambios sucedidos en todo el escenario.

2. Selección de la serie de perfiles y gradientes hidráulicos para las simulaciones. En esta etapa con la operatividad ya bien definida, se seleccionaron los perfiles de humedecimiento que se consideraron representativos y factibles de provocar una alteración a la estructura del perfil granular, considerando la existencia de estructuras como viviendas, sistemas de drenaje y el paso de una carretera, lo cual se consideró del escenario real de Santa Ana Jilotzingo, Estado de México. Los

perfiles fueron seis, el primero suave con la primera carga $H1 = 5$ cm y la segunda $H2 = 0$ cm. El segundo $H1 = 10$ cm y $H2 = 0$ cm. El tercero, $H1 = 15$ cm y $H2 = 0$ cm. El cuarto, $H1 = 20$ cm y $H2 = 0$ cm, El quinto $H1 = 25$ cm y $H2 = 0$ cm y finalmente el más desfavorable, el que representa una condición de sobresaturación es el que incluyó $H1 = 28$ cm y $H2 = 0$ cm. **3. Realización de las simulaciones.** Considerando la configuración de perfiles de medio poroso asociados a los diferentes gradientes hidráulicos preestablecidos en el párrafo anterior, se procedió a realizar cada simulación, operando en equipo como se mencionó en el paso metodológico 1 en los incisos a) hasta el f).

4. Evaluación del comportamiento del perfil de medio poroso para cada simulación. Al concluir cada simulación se realizó una evaluación que consistente de dos acciones, la primera fue una revisión visual de los cambios físicos de todo el perfil de medio poroso para lograr identificar si hubo presencia de deformaciones, socavaciones o deslizamientos superficiales. La segunda consistió en revisar los valores de carga piezométrica a lo largo del perfil de medio poroso para identificar anomalías en el equipo o presencia de alteraciones intersticiales por reacomodo del medio



poroso, lo cual lo detecta el piezómetro por un cambio de presión anómalo o diferente.

RESULTADOS

En cuanto a los resultados obtenidos para este trabajo, se pueden subdividir en dos grupos: resultados de los cambios funcionales y operacionales de la Unidad de Estudio de Permeabilidad y los propiamente correspondientes las realizaciones de las simulaciones de flujo subsuperficial de acuerdo con los

escenarios especificados. Inicialmente, las modificaciones estructurales consistentes en el sistema de alimentación, control y distribución del caudal, se muestran en la figura 2, considerando que la única limitante que presentaría esta modificación es el tiempo de operación que implicaría el reabastecimiento al tanque fuente en un tiempo no conocido, lo que implica proponer reabastecimientos parciales en horarios estratégicos.



Figura 2. Modificación en el sistema de alimentación de caudales.

Referente a la reproducción de los escenarios planteados considerando

los diversos gradientes hidráulicos, se realizaron las seis simulaciones y a



manera de ejemplo se ilustra una fotografía ubicada en la figura 3, donde se ilustra el manejo de la altura $H1 = 15$ cm y altura final $H2 = 0$ cm, se observa como es el avance del flujo en el perfil longitudinal y en la figura 4 se

presenta el detalle de la carga hidráulica reproducida y como es el perfil inicial de humedecimiento para este gradiente hidráulico.



Figura 3. Detalle de la reproducción de la simulación con gradiente: $H1 = 15$ cm y $H2 = 0.0$ cm.

El dimensionamiento final del canal de circulación de flujo en el medio poroso granular fue de 21 m de ancho y 160 m de largo en escala de 1: 100, es decir, 21 cm de ancho y 160 cm de largo. En la figura 4 se muestra una ampliación de la primera sección de avance del frente de humedecimiento, donde se ilustra la

simulación de forma adecuada de la circulación de un flujo subsuperficial bajo diferentes condiciones de humedecimiento, representadas por los gradientes hidráulicos comentados en párrafos anteriores.

Respecto a las simulaciones que



mostraron influencia del gradiente en la existencia de alguna socavación del perfil granular y en su caso, un deslizamiento de tipo superficial, es básicamente la más desfavorable, es decir, la que maneja un gradiente hidráulico con $H_1 = 28$ cm de carga hidráulica en la entrada del perfil granular y 0.0 cm en la salida (alcantarilla en la carretera). En las figuras 5 y 6 se muestran los impactos sobre el perfil granular, observándose en la figura 5 el inicio de la socavación del material ubicado en la base del muro de contención y junto al dren o alcantarilla de la carretera y en la figura 6, se aprecia un deslizamiento superficial en la parte superior del terraplén, generado posterior a la socavación en el pie de la base del muro de contención, lo cual indica que bajo condiciones de sobresaturación para lapsos de tiempo prolongados, si es posible que se produzcan socavaciones y deslizamientos de tipo superficial; es preciso comentar que la variable tiempo no se controló, ya que no se tiene certeza del tiempo en el que se presentan los deslizamientos y las socavaciones, lo cual implicó controlar de manera permanente las condiciones de circulación del flujo subsuperficial para diferentes gradientes hidráulicos. En cuanto al grado de compactación, se consideró la colocación del material granular compactado y

revisado en su compactación con un penetrómetro de aguja, manteniendo al 95 % el grado de compactación de los 5 m (5 cm) de profundidad hasta la línea base del modelo coincidente con el nivel de la salida en el dren de la carretera (alcantarilla), de 3 a 5 m superficiales se manejó el grado de compactación natural en un terreno donde se presentan labores de cultivo y tránsito rural, definido en tres zonas. Zona alta con un 75 %, media de 60 % y la baja con un 75% de grado de compactación.

Respecto a los valores de las cargas hidráulicas intermedias en dirección longitudinal del perfil granular, todas fueron coincidentes con el valor de la columna de agua presente en el punto de medición, algo que debe ser lógico de encontrar, ya que se trata de un medio donde la porosidad permite una circulación uniforme de agua y en condiciones de saturación cada lectura del piezómetro, normalmente coincide con el valor de la carga hidráulica o columna de agua presente en el punto de medición. El grado de compactación no tuvo influencia significativa en los valores de las cargas hidráulicas. Finalmente, estos resultados muestran que, si es factible trabajar con la Unidad de Estudio de Permeabilidad para simular una franja de flujo subsuperficial como un medio de



generación de un deslizamiento superficial, sujeto a condiciones de humedecimiento particulares.

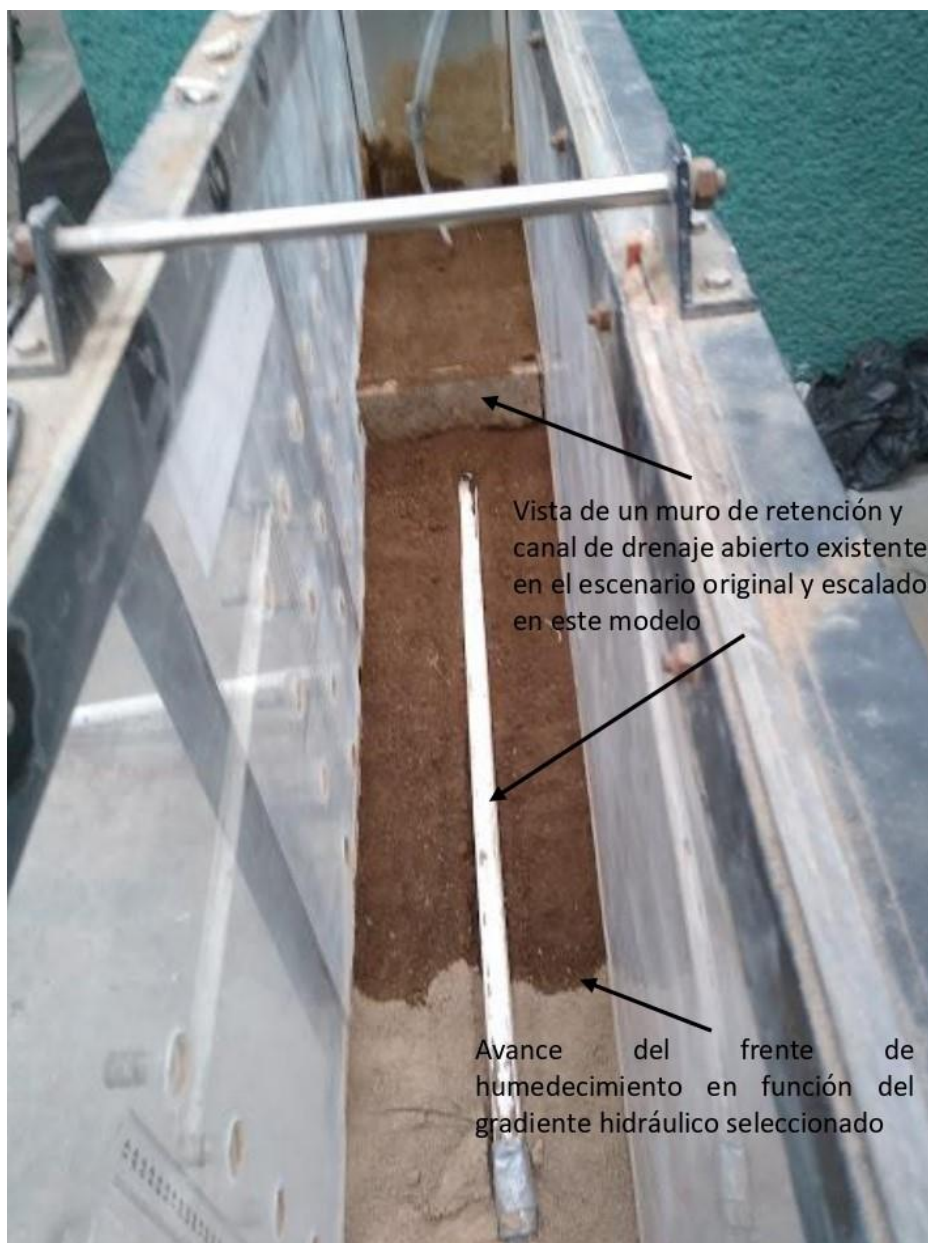


Figura 4. Vista en planta del avance del frente de humedecimiento en un 75 % de la saturación total del perfil granular.

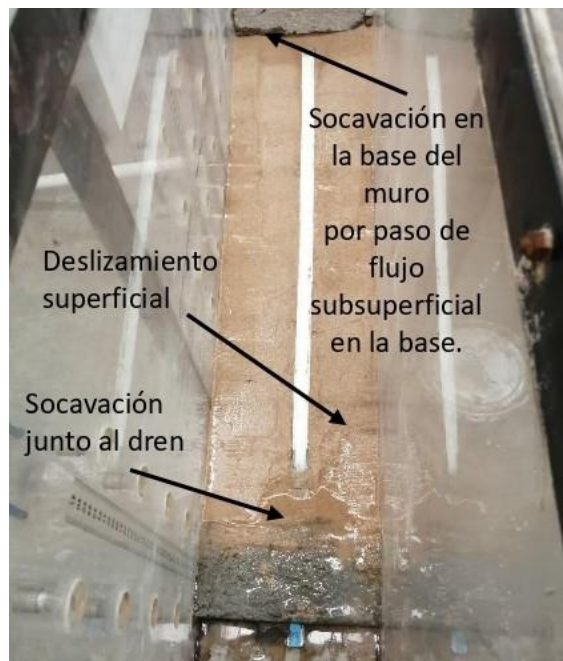


Figura 5. Ilustración de la presencia de la socavación en la base del muro, junto al dren y el deslizamiento superficial en la parte baja.



Figura 6. Presentación de la socavación del muro de contención y deslizamiento superficial en la parte alta del perfil granular, generados por el gradiente más desfavorable.



Finalmente, en la tabla 1 se muestra un resumen de los escenarios y el correspondiente resultado obtenido en cada simulación.

Tabla 1. Resultados de simulación en cada escenario.

Lista de elementos	
Gradiente H1/H2	Observaciones
05 cm / 0.0 cm	Humedecimiento sin cambios en el perfil
10 cm / 0.0 cm	Humedecimiento sin cambios en el perfil
15 cm / 0.0 cm	Humedecimiento sin cambios en el perfil
20 cm / 0.0 cm	Saturación sin cambios en el perfil
25 cm / 0.0 cm	Saturación con ligero arrastre de suelo
28 cm / 0.0 cm	Sobresaturación, deslizamiento y socavación

En la figura 7 se ilustra la posición donde se midió la carga hidráulica con el piezómetro (puntos en color rojo), que en conjunto permiten configurar el perfil del gradiente hidráulico que en dirección longitudinal coincide con las líneas equipotenciales, por lo tanto, se observa que, para el perfil granular,

todos los puntos de medición que están circunscritos indican para una condición saturada del medio poroso la carga piezométrica existente y respecto del tiempo dependió la aparición de socavaciones y deslizamientos superficiales como los indicados en las figuras anteriores.

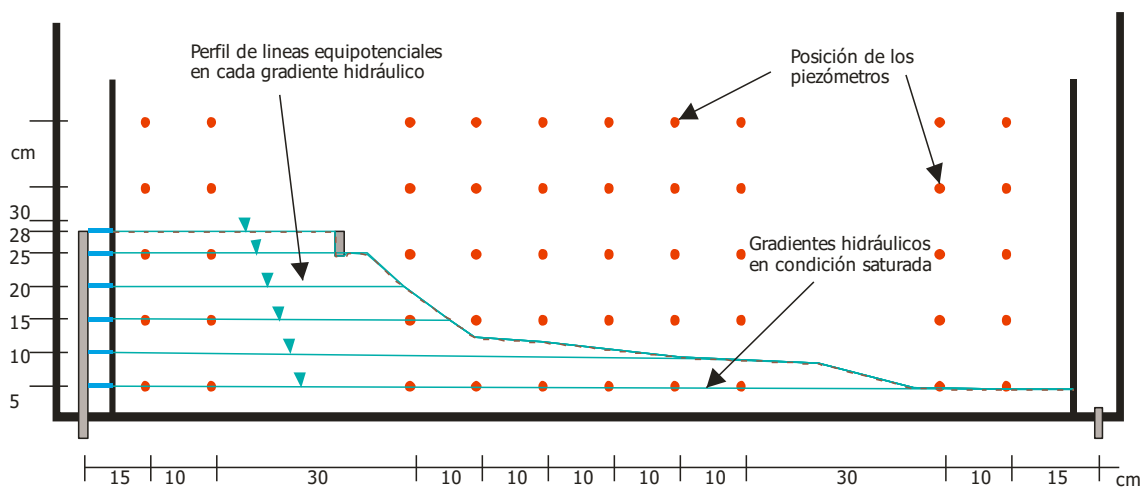


Figura 7. Representación global de la distribución de líneas equipotenciales generadas en cada simulación en condición de saturación del gradiente hidráulico en la unidad de estudio de permeabilidad.

DISCUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos,



se considera fundamental la estructura original de la Unidad de Estudio de Permeabilidad, ya que sus funciones originales e implementos permitieron realizar una modificación funcional adecuada, con la particularidad de que este tipo de equipos son muy específicos y solo se tienen reportes de trabajos didácticos como aplicación básica. Particularmente, en cuanto a los resultados de las simulaciones, por tratarse de un medio poroso granular el escenario básico a pesar de que los resultados son adecuados, se vislumbra la posibilidad real de generar una aplicación en un escenario con un tipo de material representativo de un sitio de estudio, por lo que se puede decir que al aporte del presente trabajo consistió en demostrar la posibilidad real de utilizar la Unidad de Estudio de Permeabilidad para simular el tránsito de un flujo subsuperficial acotado a un canal central de circulación, que normalmente se asemeja a la zona de confluencia de un flujo y que resulta ser la zona de mayor posibilidad de presentar desde una socavación de suelo hasta deslizamientos superficiales. También se puede comentar que los resultados son inéditos y se consideran la base para continuar trabajando, pero ahora con escenarios de perfil de suelo de la misma consistencia

que un sitio de interés real, donde se haya presentado algún evento de deslizamiento que se quisiera simular para evaluar factores influyentes. Se coincide con los trabajos presentados en [1] y [2], en cuanto a que, los modelos son factibles de perfeccionarse en cuanto más aplicaciones se tengan de los mismos y esto genere un equipo más completo y versátil para aplicaciones subsecuentes.

CONCLUSIONES

En función de las ventajas, características y limitaciones de los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente.

La unidad de estudio de permeabilidad si permite mediante su aplicación, reproducir exitosamente la circulación de un flujo subsuperficial en un perfil granular con topografía a escala 1:100.

Las simulaciones permitieron identificar cuales escenarios son los más factibles de generar un deslizamiento superficial, considerando solamente la consistencia del perfil granular y el gradiente hidráulico. Existen otros factores que pueden influir como es la frecuencia sísmica y el cambio radical del uso de suelo de bosque a semiurbano o urbano, los cuales en esta primera fase no se consideraron.

Es recomendable realizar simulaciones para este mismo perfil, pero considerando el tipo de suelo original del sitio que inspiró la realización del presente trabajo,



esto mostrará con mayor aproximación como se llevó a cabo el deslizamiento registrado en Septiembre del año 2017.

Finalmente se agradece al Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua por el apoyo reflejado en la disposición del equipo, espacio en el Laboratorio de Modelos Hidráulicos y el apoyo del personal técnico para realizar algunos ajustes mecánicos al equipo.

REFERENCIAS

- Ferrer, M. (2002). "Taludes", Ingeniería Geológica, pp. 430 - 486, Madrid, España.
- Moreno, H. (2006). "La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquía: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria", Revista EIA, núm. 5, pp. 59 - 69, ISSN 1794 - 1237.
- Salvador Eduardo Teófilo, (2019). "Modelo hidromeccánico para evaluar el deslizamiento del suelo por efecto del flujo subsuperficial de agua", (Tesis de Doctorado), Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca Estado de México.