



**APLICACIÓN DE UN MODELO FÍSICO PARA ESTIMAR LA
INFLUENCIA DEL FLUJO SUBSUPERFICIAL EN LA PRESENCIA DE
UN DESLIZAMIENTO SUPERFICIAL. CASO SANTA ANA JILOTZINGO.
ESTADO DE MÉXICO**

APPLICATION OF A PHYSICAL MODEL TO ESTIMATE THE INFLUENCE OF THE
SUBSURFACE FLOW IN THE PRESENCE OF A SUPERFICIAL SLIDE. CASE OF SANTA ANA
JILOTZINGO. MEXICO STATE

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 aplicar un modelo físico (Unidad de Estudio de Permeabilidad) para estimar la influencia de la circulación de un flujo subsuperficial con gradiente de humedecimiento alto y perfil de suelo franco-arenoso (Fase 2), asimismo identificar si la condición de sobresaturación en el lugar influyó o intervino otro factor como es la presencia de un sismo. El presente trabajo se realizó considerando un trabajo antecedente utilizando escenarios de perfil granular, lo cual generó la iniciativa de extender el trabajo a una aplicación en un escenario de medio poroso idéntico al de un sitio conocido por la presencia de eventualidades de deslizamientos superficiales, mismos que son de interés por los efectos indeseables en suelo e infraestructura. La metodología que se aplicó consistió en: revisar el funcionamiento del equipo, seleccionar la escala espacial y reproducir el perfil del terreno, obtener la información de estudios, proyectos del sitio de estudio para fortalecer la decisión del escalamiento del perfil de medio poroso y generar las simulaciones con los gradientes hidráulicos que proporcionan las condiciones de humedecimiento factibles de influir en la formación de un deslizamiento superficial. Los resultados indicaron que los perfiles de humedecimiento fueron prolongados en su aparición en el perfil franco arenoso y para gradiente máximo, se obtuvo la presencia de ligeros deslizamientos, los cuales no representan lo sucedido en la zona de estudio concluyendo que, sí se asocia la influencia



del sismo ocurrido en la presencia del deslizamiento registrado, considerando estos resultados, el aporte de este trabajo.

Palabras clave: Simulación; Sobresaturación; Deslizamiento.

SUMMARY

The work aimed to apply a physical model (Permeability Study Unit) to estimate the influence of the circulation of a subsurface flow with high wetting gradient and loamy-sandy soil profile (Phase 2), also identify if the condition of oversaturation in the place influenced or intervened another factor such as the presence of an earthquake. The present work was carried out considering a previous work using granular profile scenarios, which generated the initiative to extend the work to an application in a porous environment scenario identical to that of a site known for the presence of eventualities of surface landslides, which are of interest for the undesirable effects on soil and infrastructure. The methodology that was applied consisted of: reviewing the operation of the equipment, selecting the spatial scale and reproducing the terrain profile, obtaining the information from studies, projects from the study site to strengthen the decision of scaling the porous medium profile and generating simulations with hydraulic gradients that provide the wetting conditions feasible to influence the formation of a surface slide. The results indicated that the wetting profiles were prolonged in their appearance in the sandy loam profile and for maximum gradient, the presence of slight slippage was obtained, which do not represent what happened in the study area concluding that, the influence of the earthquake occurred in the presence of the recorded slippage is associated, considering these results, the contribution of this work.

Keywords: Simulation; Oversaturation; Slippage.

Fecha de recepción: 13 julio 2021

Fecha de aceptación: 09 septiembre 2021

Fecha de publicación: 1 de mayo de 2022

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la modelación física, siempre se ha tenido la necesidad de



aplicar los modelos físicos tanto de laboratorio como de campo, ya sea para fines didácticos o para llevar a cabo una investigación de tipo experimental, donde se pretende entre muchos otros objetivos, reproducir a escala el fenómeno o proceso bajo estudio, calibrar algunos parámetros experimentales de control, etc. Si bien la tecnología y con esta el surgimiento de los métodos numéricos, los cuales han generado la aparición de modelos numéricos especializados en diferentes áreas del conocimiento, muchas veces su aplicación de encuentra limitada por las implicaciones económicas y de recursos humanos especializados que fructifique en la utilización de referidos modelos.

Los modelos físicos también requieren inversión económica y de recursos humanos especializados y cuanto más precisos se requieran, mayor detalle en su estructura y operatividad es necesario, sin embargo, cuando se tienen las posibilidades de disposición de un modelo y se cuenta con trabajos antecedentes de su operatividad, resulta atractiva la posibilidad de utilizarlo para realizar trabajos de simulación de algún proceso o fenómeno de interés. Específicamente, en el grupo de los modelos físicos de laboratorio se dispone en el Laboratorio de Modelos Hidráulicos del Instituto

Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua de la UAEMex, de uno conocido como Unidad de Estudio de Permeabilidad el cual tiene una aplicación inicial para perfiles granulares y diversos gradientes hidráulicos, por las actividades de adaptación y modificación funcional y considerando la experiencia antecedente con este modelo, se propuso utilizarlo y a pesar de que su aplicación aún es limitada, se tuvo la certeza que puede ser de utilidad en la reproducción de un perfil de suelo franco – arenoso con circulación de un flujo subsuperficial acotado a un canal de circulación, lo cual pueda ofrecer un escenario adecuado para simular perfiles de humedecimiento hasta la sobresaturación, con la finalidad de obtener la presencia de deslizamientos superficiales o no, precisamente esta condición ayudaría a definir la existencia de influencia de los factores actuantes en la simulación.

La aplicación de la Unidad de Estudio de Permeabilidad para simular a escala controlada la aparición de un deslizamiento superficial en un perfil de suelo franco – arenoso se consideró una actividad inédita y por lo tanto, solo se puede referir a trabajos que se han realizado con modelos físicos de campo [2] y [3], en los cuales se ilustra que en la actualidad los modelos físicos son gran



ayuda en la revisión específica del comportamiento local de algún proceso o fenómeno de interés. En este caso particular, el interés de identificar si una condición de humedecimiento hasta la sobresaturación, configurada mediante un gradiente hidráulico, el cual define el perfil de humedecimiento generado en una zona de estudio a escala, está dentro de las acciones que se pueden realizar con éxito mediante la aplicación de un modelo

METODOLOGÍA

Respecto a la metodología que permitió cumplir con el objetivo de este trabajo se enuncia a continuación: **1. Revisión funcional de la UEP.** En este paso se procedió a realizar un trabajo operativo del modelo solamente para conocer si todas las partes estructurales del equipo funcionaban adecuadamente. **2. Traslado y colocación del material para construir el perfil de medio poroso.** Se obtuvo una cantidad suficiente de suelo prevaleciente en el Municipio de Santa Ana Jilotzingo, específicamente de la zona de estudio, se revisó y se separaron

físico como el descrito en líneas anteriores y el cual, se presenta en la Figura 1, ilustrándose la estructura, sistema de alimentación de caudales, el cuerpo de medición de cargas hidráulicas mediante piezómetros, las mallas contenedoras del medio poroso y el sistema de tuberías de control de carga hidráulica inicial y final, así como los caudales de excedencias iniciales.

los tamaños de grano mayores a 2 mm, ya que para la escala de trabajo (1:100) referido tamaño de material no se presenta en el escenario real, posteriormente se colocó en capas de 5 cm y se compactó con un pisón metálico hasta obtener un grado de compactación similar al 95 %, verificado con un penetrómetro de aguja. Las capas superiores se colocaron siguiendo y la altitud subiendo de 0 m en la salida del dren colector ubicado en la parte más baja, hasta 28 m en el terraplén donde se ubican algunas viviendas y una escuela.



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

3. Realización de un trabajo de granulometría para determinar la clasificación textural del suelo. Para esto se dispuso de una tamizadora mecánica y un juego de tamices que van de la malla número 200 hasta la 4. **4. Llenado del tanque fuente y**

preparación de caudales. Se llenó con agua limpia el tanque fuente para el suministro hacia la zona de válvulas reguladoras de caudal y se posicionó la tubería de demasías y control de carga hidráulica al inicio del perfil de suelo, con $H_1 = 5$ cm a la entrada y $H_2 = 0$ cm a la



salida del mismo. **5. Realización de las simulaciones del perfil de humedecimiento.** Se procedió a generar el gradiente hidráulico para las cargas hidráulicas especificadas y una vez obtenido el perfil de humedecimiento completo, es decir en la totalidad del medio poroso, se continuó con las mediciones de las cargas hidráulicas intermedias, utilizando el piezómetro en sus diferentes posiciones, además se realizó una toma de fotografías para

identificar de manera visual si aparecía alguna socavación o deslizamiento en cualquier punto del perfil de medio poroso. La anterior actividad se repitió para los gradientes: $H_1 = 10 \text{ cm}$ y $H_2 = 0 \text{ cm}$; $H_1 = 15 \text{ cm}$ y $H_2 = 0 \text{ cm}$; $H_1 = 20 \text{ cm}$ y $H_2 = 0 \text{ cm}$; $H_1 = 25 \text{ cm}$ $H_2 = 0 \text{ cm}$ y finalmente $H_1 = 28 \text{ cm}$ y $H_2 = 0 \text{ cm}$.

En la figura 2 se muestra el momento en que se realizaban los trabajos de montaje del suelo y preparación del equipo para realizar las simulaciones.



Figura 2. Preparación del perfil de medio poroso y accesorios del equipo.

Es preciso mencionar que en este tipo se

simulaciones, la permeabilidad del suelo



es mucho más baja que la de un perfil granular arenoso, por lo que se presentaron tiempos más prolongados de realización de las simulaciones y se tuvo que recurrir a llenados parciales del tanque fuente, para que no sucediera que en horarios nocturnos, sin la presencia del personal operativo del modelo, se presentará un vaciado total y se

interrumpiera el proceso de humedecimiento con el gradiente hidráulico especificado. La figura 3 muestra una etapa inicial de simulación para el gradiente máximo de 28 cm al inicio y 0 cm a la salida del perfil de medio poroso.

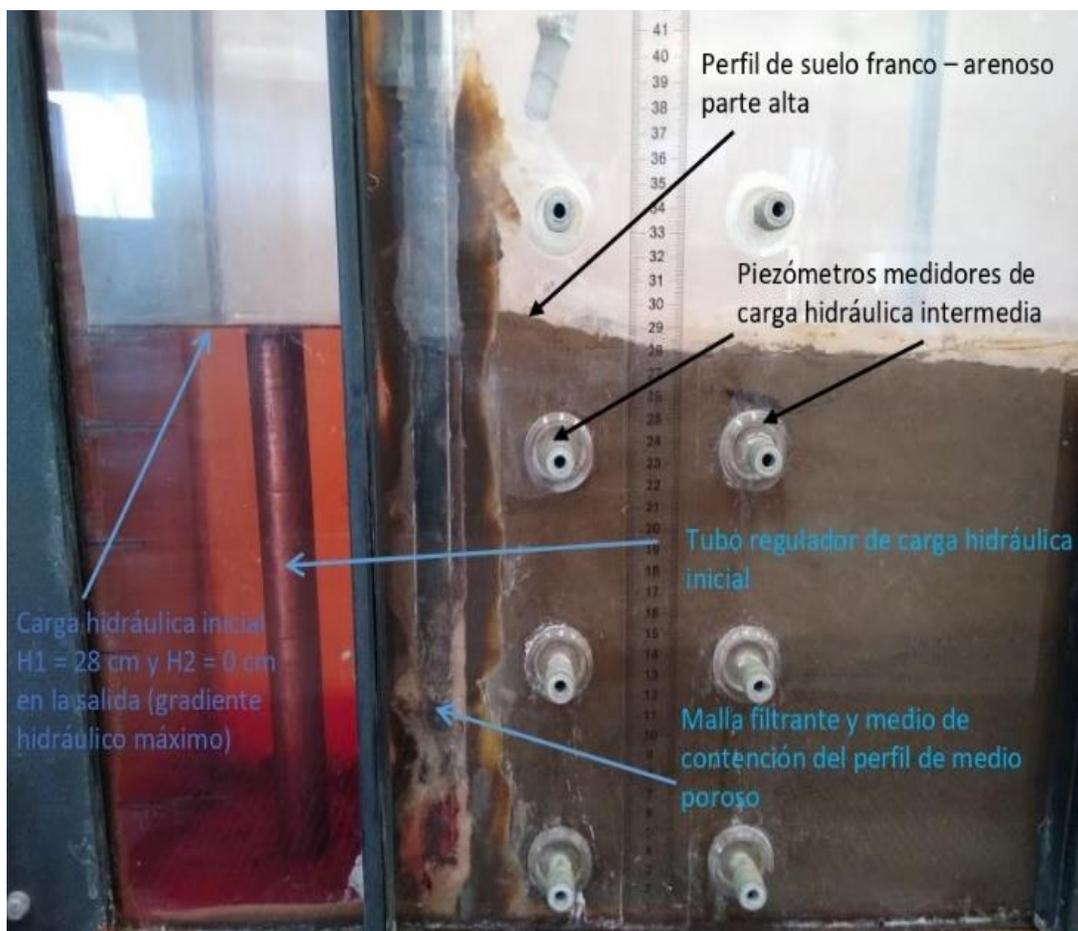


Figura 3. Esquema de simulación para el gradiente máximo, utilizando colorante natural como trazador de flujo.

Es preciso comentar que en las simulaciones de flujo subsuperficial se agregó un colorante natural “anilina B” no

tóxico con la finalidad de incorporar un trazador que permitiera observar las trayectorias de flujo, principalmente para



observar lo sucedido en las proximidades del muro de contención, el dren colector y

la barrera formada por el cuerpo de la carretera.

RESULTADOS

Una vez realizada la verificación funcional de la Unidad de Estudio de Permeabilidad, se tamizó el material a utilizar en el perfil de medio poroso y se colocó el material compactado en capas, hasta obtener el perfil que se muestra en

la figura 4, donde se aprecia los trabajos iniciales con el gradiente $H1 = 10$ cm y $H2 = 0$ cm.

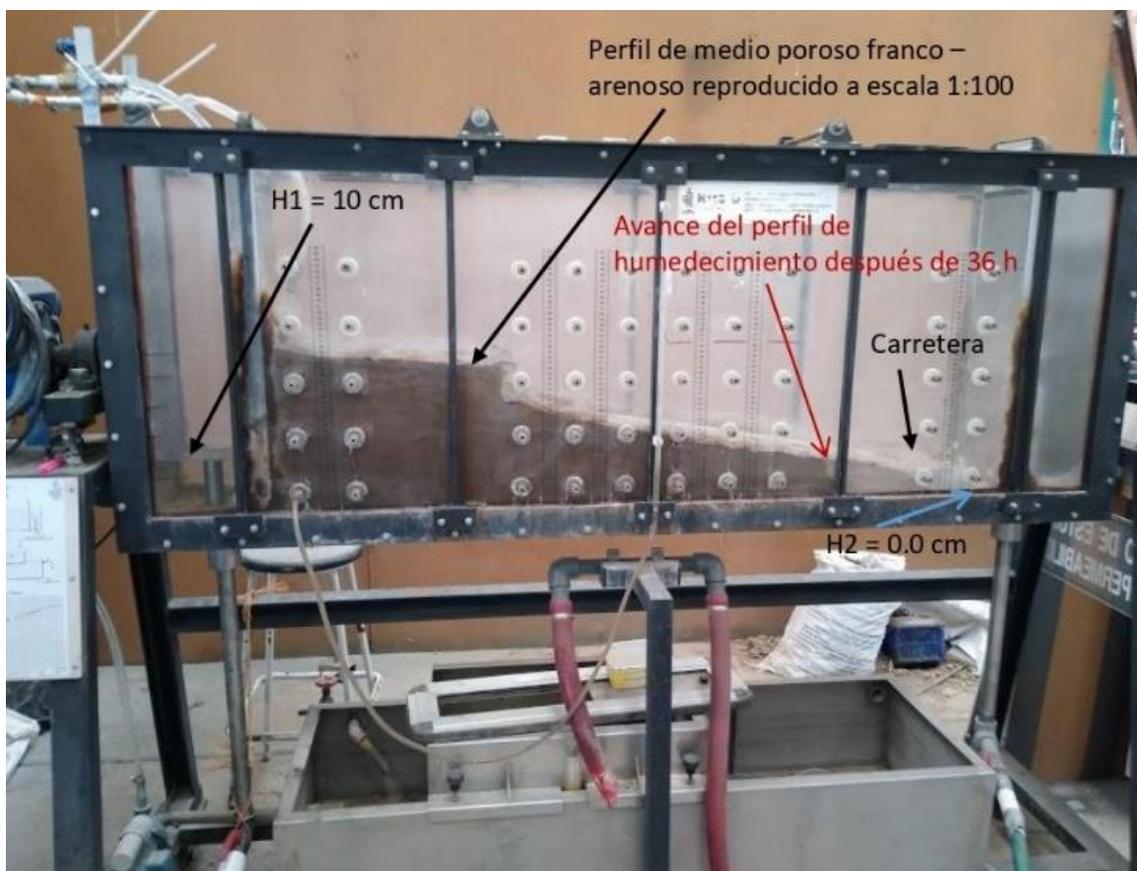


Figura 4. Escenario definitivo de medio poroso franco – arenoso, se ilustra la simulación para el primer gradiente hidráulico $H1 = 10$ cm y $H2 = 0$ cm. El tiempo de saturación en todo el perfil fue de 48 h.

De acuerdo con las observaciones de las simulaciones del flujo subsuperficial para todos los gradientes hidráulicos utilizados,

el tiempo necesario para alcanzar la condición de saturación fue mayor a 48 h, por lo que a partir de este tiempo se



consideró el tiempo a partir del cual se pudiera presentar algún proceso, ya sea de socavación o deslizamiento superficial, para lo cual se observó que para los gradientes $H1 = 5 \text{ cm}$, 10 cm , 15 cm , 20 cm , y $H2 = 0 \text{ cm}$ para todos los valores de $H1$ no se presentó alteración alguna en el medio poroso, según se observa en la figura 5. Por otro lado, para el gradiente de $H1 = 25 \text{ cm}$ y $H2 = 0 \text{ cm}$ sí se identificó pequeñas socavaciones en el muro de contención, dren colector y en la frontera con el cuerpo de la carretera, sin presencia de deslizamientos superficiales, a pesar de que ya el perfil de medio poroso ya presenta una condición de humedecimiento sobresaturada, tal como se muestra en la figura 6.

En lo que corresponde a la simulación realizada con el gradiente $H1 = 28 \text{ cm}$ y $H2 = 0 \text{ cm}$, correspondiendo a las cargas hidráulicas al inicio y al final del perfil de medio poroso, se considera esta condición la más crítica, pues se presenta sobresaturación total del medio poroso y escurrimiento visible y constante en la superficie del terreno, lo que propició finalmente la aparición de socavaciones más grandes en la base del muro de contención, también en la parte alta del

perfil del medio poroso se identificó un deslizamiento superficial, de igual manera en la parte baja del perfil cercano al dren y la frontera con el cuerpo de la carretera, pero sin afectar a esta estructura, lo que confirma que, para presentarse un deslizamiento superficial en el cuerpo de la carretera, necesariamente se requiere de mayor energía y en este caso, si se puede atribuir a la combinación de la sobresaturación del suelo provocada por las lluvias intensas que incrementaron los gradientes hidráulicos de manera local y a la presencia de un sismo que coadyuva a la generación de un deslizamiento. En la figura 7 se muestra el resultado de la simulación con el gradiente más desfavorable ($H1 = 28 \text{ cm}$ y $H2 = 0 \text{ cm}$) mostrando los sitios de socavación y deslizamiento superficial ligero.

Referente al deslizamiento ligero, su aparición se atribuye a la condición de sobresaturación en el medio poroso combinado con el movimiento del flujo para el gradiente hidráulico más desfavorable y se puede considerar como un escenario de baja frecuencia en su aparición, pero con posibilidades reales de que se pueda presentar en el escenario real.



Figura 5. Detalle de la reproducción de la simulación con gradiente: $H1 = 20$ cm y $H2 = 0.0$ cm.

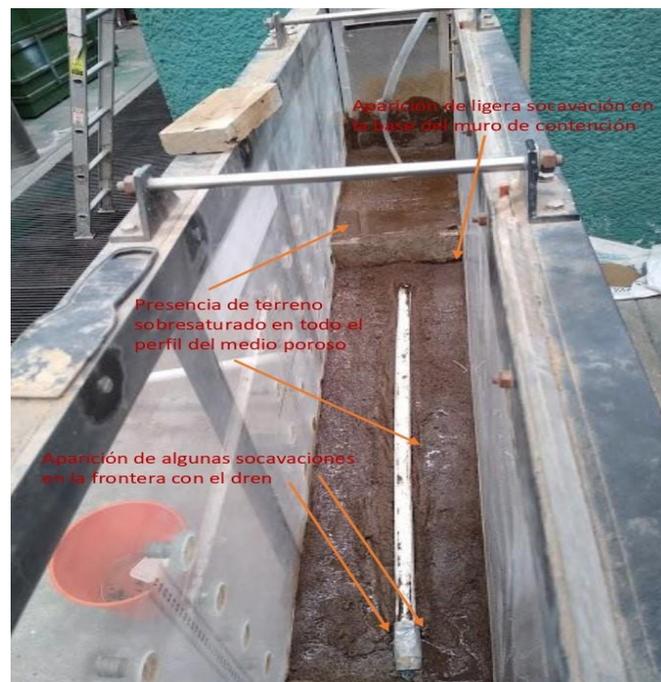




Figura 6. Vista en planta de la reproducción de la simulación con gradiente: $H1 = 25$ cm y $H2 = 0.0$ cm. Se observa que en esta simulación ya aparecen socavaciones en sitios factibles de presencia de deslizamientos superficiales.



Figura 7. a) perfil de medio poroso sobresaturado. b) vista en planta de la aparición de una socavación. c) vista en planta de la presencia de un deslizamiento superficial ligero.

Finalmente de los resultados obtenidos se identifica que, de los escenarios simulados con los gradientes hidráulicos propuestos, solamente los gradientes más pronunciados y en condición de sobresaturación influyen en la aparición de socavaciones en las fronteras de estructuras como el muro de contención,

y junto a la pared de un dren, asimismo, en la presencia de deslizamientos suaves de tipo superficial, por lo que, para generar un deslizamiento como el registrado en septiembre del 2017, si influyó la presencia del sismo ocurrido combinado con las condiciones de saturación y perfil de humedecimiento del



medio poroso. En la tabla 1 se muestra un resumen de los escenarios y el correspondiente resultado general obtenido en cada simulación. Asimismo, en la Figura 8 se presentan los perfiles longitudinales que ilustran la configuración de las líneas equipotenciales coincidentes con los gradientes hidráulicos, los cuales al emerger en la superficie libre del perfil del suelo franco-arenoso, se presentan el

escurrimiento superficial, mismo que se comportó con tendencia creciente conforme se incrementaba el gradiente hidráulico, en este caso la línea equipotencial en color amarillo indica el escenario más desfavorable que se pudiera presentar en un escenario hidrogeológico con las características representadas en la unidad de estudio de permeabilidad.

Tabla 1. Resultados de simulación en cada escenario.

Perfil de medio poroso franco - arenoso	
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	Sobresaturación sin cambios en el perfil
25 cm / 0.0 cm	Sobresaturación con pequeñas socavaciones
28 cm / 0.0 cm	Sobresaturación con deslizamiento superficial suave y pequeñas socavaciones.

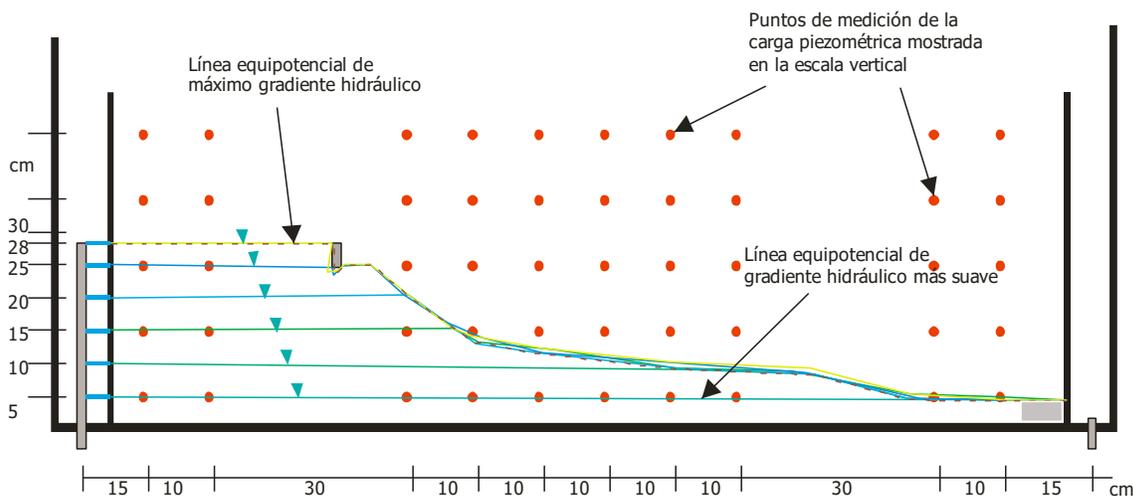


Figura 8. Ilustración de los escenarios finales donde se generaron las condiciones de saturación y medición de las cargas hidráulicas que permitieron configurar las líneas equipotenciales y las



condiciones de escurrimiento sobre la superficie del perfil franco-arenoso, así como la aparición de las pequeñas socavaciones y deslizamientos superficiales suaves para el escenario de gradiente hidráulico máximo.

DISCUSIONES

Considerando los resultados obtenidos producto de las simulaciones del tránsito de un flujo subsuperficial en un medio poroso franco – arenoso, se logra por un lado constatar que la Unidad de Estudio de Permeabilidad permite reproducir adecuadamente los escenarios de flujo acotados espacialmente por los gradientes hidráulicos propuestos y por el otro, se logra identificar la influencia del flujo subsuperficial en la aparición de deslizamientos superficiales muy suaves, situación que en este caso muestra que solamente se pueden generar para el gradiente máximo, es decir, la carga hidráulica en la entrada del medio poroso de 28 cm y de 0.0 cm en la salida del mismo, condición que ilustra también, que no se espera en el escenario real (San Ana Jilotzingo) un evento con estas características de manera frecuente, ya que no es muy común la formación de gradientes hidráulicos como el referido, sin embargo, aunque con muy poca frecuencia si se llegan a presentar y pueden generar desde un deslizamiento superficial suave hasta uno de grandes

proporciones[1] y [4].

Se pone en evidencia con los trabajos de modelación física ilustrados en este trabajo, que la reproducción a escala controlada de procesos como los de sobresaturación del suelo ayudan a conocer la evolución de la aparición de socavaciones y deslizamientos, en sitios donde la presencia de infraestructura como es un muro de contención, dren colector de agua superficial o la estructura de una carretera pueden sufrir daños desde pequeños hasta de gran magnitud, además, permite conocer que factores son influyentes directos en la presencia de referidos procesos.

Por lo anterior se puede decir que el aporte de este trabajo radica principalmente en mostrar la utilidad del modelo físico como un equipo adaptado acertadamente para realizar trabajos futuros con características similares a las presentadas en este trabajo y su aplicación puede generar amplios productos de investigación aplicada.

CONCLUSIONES

Acorde con las características, alcances y limitaciones de los resultados obtenidos,



se formularon las siguientes conclusiones.

Las simulaciones del tránsito de un flujo subsuperficial en un perfil de medio poroso franco–arenoso, similar al del sitio conocido como Santa Ana Jilotzingo, se reprodujeron satisfactoriamente en una escala controlada de 1:100.

La presencia de socavones se produjo solamente para los escenarios donde se utilizó los gradientes $H1 = 25$ cm de carga hidráulica a la entrada del perfil y $H2 = 0.0$ cm en la salida (de manera ligera) y $H1 = 28$ cm en la entrada y $H2 = 0.0$ cm en la salida (mayormente visible).

Solamente para el gradiente máximo con $H1 = 28$ cm y $H2 = 0.0$ cm de carga hidráulica se logró reproducir un deslizamiento suave, por lo que la influencia del flujo subsuperficial en un deslizamiento de mayor proporción, estaría influido por otros factores como la presencia de un sismo y se descartó la posibilidad de que solamente influyó la circulación del flujo subsuperficial.

Se confirmó la hipótesis de que la Unidad de Estudio de Permeabilidad puede tener más aplicaciones similares a la realizada en este trabajo, por lo que se queda expuesta su utilidad en trabajos futuros.

Finalmente se expresa un especial agradecimiento al Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua por el

apoyo con la disposición del equipo, espacio en el Laboratorio de Modelos Hidráulicos y del personal técnico.

REFERENCIAS

Collins, B y Znidarcic, D. (2004). "Stability analyses of rainfall induced landslides", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 4, núm. 130, pp. 362–372.

Jibson, R. (2005). "Landslide hazards at La Conchita. California", (Report 2005 - 1067), USA: USGS, p. 12.

Salvador Eduardo Teófilo, (2015). "Propuesta metodológica para la estimación de la infiltración eficaz con uso del infiltrómetro de cilindros concéntricos rediseñado", (Tesis de Maestría), Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca Estado de México.

Salvador Eduardo Teófilo, (2019). "Modelo hidrogeomecánico 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