

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/330426131>

Uso de sensores de humedad en el monitoreo del avance del frente húmedo en un suelo residual compactado

Conference Paper · November 2018

CITATIONS

0

READS

394

3 authors:



Tiana Rosania

National University of Colombia

3 PUBLICATIONS 1 CITATION

[SEE PROFILE](#)



Oscar Echeverri

National University of Colombia

28 PUBLICATIONS 59 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Edier Aristizábal

Universität Potsdam

86 PUBLICATIONS 673 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Infiltración de agua en suelos [View project](#)



Geotechnical Dam type Selection [View project](#)

Uso de sensores de humedad en el monitoreo del avance del frente húmedo en un suelo residual compactado

Study of the wetting front advance in a tropical compacted soil profile through soil moisture sensors

Tiana Rosanía Altahona, Oscar Echeverri Ramírez, Edier Aristizábal

Estudiante de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Profesor asociado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Profesor asistente, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

tarosaniaa@unal.edu.co

Resumen

Se diseñó, instaló y probó un montaje de laboratorio flexible y de bajo costo orientado al monitoreo del avance del frente húmedo dentro de suelo tropical compactado a través de sensores de humedad análogos, como herramienta para comprender el funcionamiento de este tipo de instrumentación, y sus limitaciones enfocadas a la generación de alertas tempranas para movimientos en masa detonados por lluvia. Se encontró que los sensores estudiados tienen una resolución que permite observar cambios dentro de la humedad del suelo en tiempos cortos, pero mostraron subestimar la humedad del suelo al comparar los datos registrados por estos con ensayos de laboratorio.

Abstract

A flexible and low-cost laboratory assembly was designed, installed and proved during the investigation with the purpose of study the wetting front advance within a compacted tropical soil profile, through the installation of soil moisture sensors. The study pursues the comprehension of the soil moisture sensor as a tool for early warning systems on rainfall-triggered landslides. The resolution of the evaluated sensors is acceptable due to the rapid moisture changes registered, however these values were lower than those measured in laboratory.

1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la base de datos DesInventar, implementada y auspiciada por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres Desde el año 1920 se han reportado en Colombia cerca de 9625 movimientos en masa, que han causado la muerte de 7.110 personas, y pérdidas económicas superiores a los 40 mil millones de pesos colombianos (UNISDR, 2018). De estos eventos, al menos el 41% ha tenido como causa reportada la precipitación y el 13% se ha producido en el Departamento de Antioquia.

Al analizar los desastres por fenómenos de origen natural se observa que estos fenómenos ocurren con una frecuencia superior a la que tiene la economía para recuperarse (Guzzetti et al., 2005), razón por la cual a nivel mundial se han orientado esfuerzos hacia la prevención de estos fenómenos ya sea con políticas de regulación de

uso del suelo, o implementación de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) que permitan a las autoridades tomar decisiones de evacuación oportuna. Ejemplos de estos sistemas se tienen en Hong Kong (República Popular China), Bahía de San Francisco (California), Nagasaki (Japón), Río de Janeiro (Brasil) y Campania (Italia), entre otros (Greco, Guida, Damiano, y Olivares, 2010).

En general, existen dos tipos de modelos que intentan predecir la ocurrencia de movimientos en masa detonados por lluvias: físicos y empíricos. Los primeros se basan en las relaciones físicas existentes entre variables meteorológicas y propiedades del suelo, mientras los empíricos se basan en correlaciones entre parámetros hidrológicos y movimientos en masa registrados (Chae y Kim, 2012; Greco et al., 2010).

Los modelos empíricos se usan con frecuencia en SAT debido a su simplicidad, sin embargo, tienen como principal desventaja que no tienen en

cuenta el estado del suelo previo a la precipitación, razón por la cual en muchos modelos se incluye el concepto de lluvia antecedente. Por su parte, los modelos físicos requieren de información detallada de geología, geotecnia e hidrología de la zona de análisis, que no siempre está disponible.

En Antioquia, los esfuerzos se han orientado principalmente hacia los modelos empíricos con la propuesta de umbrales de lluvias para la Cuenca de la Quebrada La Iguaná (Echeverri y Valencia, 2003), el Valle de Aburrá (Aristizábal, Gamboa y Leoz, 2010) y Antioquia (Moreno, Vélez, Montoya y Rhenals, 2008). Pero también se están enfocando esfuerzos en la implementación del modelo físico denominado SHIA_LANDSLIDE (Simulación hidrológica Abierta), que simula movimientos en masa superficiales bajo condiciones saturadas basándose en información de geometría del talud, precipitación, propiedades del suelo y propiedades hidráulicas de la zona.

En el Valle de Aburrá, los movimientos en masa son los eventos con la segunda mayor recurrencia (35%), provocando el mayor número de muertes (77%) (Aristizábal y Gómez, 2007). En atención a esta situación, es constituido en 2006, el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), que ha dispuesto estaciones de humedad de suelo y una densa red de pluviómetros como herramienta para la toma de decisiones, orientada hacia los movimientos en masa superficiales detonados por lluvias.

En la búsqueda de una mejor comprensión de las lecturas de los sensores de humedad de suelo instalados por el SIATA, en sus estaciones de humedad, en el presente trabajo se diseñó e implementó un montaje de laboratorio flexible y de bajo costo, que permite monitorear el avance del frente húmedo en un suelo compactado bajo diferentes intensidades de lluvia, en un ambiente controlado.

El montaje de laboratorio implementado está compuesto por una columna de infiltración de 1.80 m de alto, simulador de lluvias y se instrumentó con sensores de humedad del tipo MAS-1.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Columna de infiltración

La columna de infiltración es un montaje de laboratorio diseñado con el propósito de evaluar el avance del frente húmedo dentro del suelo. Consta de tres componentes: estructura principal, estructura auxiliar y simulador de lluvias (Figura 1).

2.1.1 Estructura principal y estructura auxiliar

La estructura principal contiene el suelo compactado y la instrumentación. Cuenta con un diámetro interno de 20 cm y una altura de 1.80 m. Además, se encuentra perforada para realizar la instrumentación, posterior a la compactación del material. Las perforaciones se sellan con tapones de caucho antes del inicio de los ensayos para garantizar un sistema estanco.

La estructura principal cuenta con una manguera de rebose en su parte alta para evitar el encharcamiento y simular escorrentía. En la parte inferior, cuenta con una válvula de drenaje que permite la ejecución de ensayos drenados o no drenados.

La estructura auxiliar tiene por objeto facilitar el proceso de compactación de una manera estándar y dar estabilidad a la estructura principal garantizando la seguridad durante el proceso de compactación e instrumentación, así como la nivelación durante la ejecución de los ensayos de infiltración. Está compuesta por mástil de compactación, base de apoyo y tensores de nivelación.

2.1.2 Simulador de lluvias

El simulador de lluvias fue diseñado durante la investigación. Es del tipo “formador de gotas” lo que implica que trabaja por gravedad, con velocidad de gota que inicia desde el reposo. El simulador trabaja bajo el principio del Vaso de Mariotte, lo que garantiza que se conserve la presión de agua constante durante la ejecución de los ensayos. Para hacer la descarga del agua se utilizan agujas hipodérmicas. El número de agujas usadas depende de la intensidad de lluvia objetivo que se quiera reproducir.

El simulador de lluvias se calibró para obtener una familia de ecuaciones que permitiera estimar la intensidad de lluvia, de acuerdo con el calibre de la aguja usada, el número de agujas funcionales y la cabeza de agua que representa la presión constante.



Figura 1. Columna de infiltración.

2.2 Instrumentación

Se usaron sensores de humedad del tipo MAS-1 de la marca METER Group para monitorear el avance del frente húmedo a través del suelo.

Los sensores MAS-1 funcionan con reflectometría en el dominio de la frecuencia, FDR, por sus siglas en inglés (Frequency Domain Reflectometry). El sensor tipo MAS-1 funciona como un condensador de placas paralelas insertado dentro de un material dieléctrico (suelo).

Cuando se produce una diferencia de voltaje entre dos electrodos (extremos del sensor), se polarizan las moléculas de agua presentes en el suelo, dando lugar a un almacenamiento de carga eléctrica por un periodo de tiempo. A la capacidad del material para almacenar esa carga se le denomina permitividad dieléctrica o constante dieléctrica (Castiglione, 2014).

La constante dieléctrica del suelo depende de los minerales que lo componen, la cantidad de aire y la cantidad de agua. Como se espera que los sólidos del suelo permanezcan constantes y el aire puede almacenar poca carga, se espera que el valor de la constante dieléctrica se relacione de manera efectiva con la presencia de agua en el suelo, a través de una ecuación de calibración (Campbell, 2014).

El fabricante de los sensores presenta en su manual del instrumento ecuaciones de calibración para suelos minerales, sin embargo, recomienda

realizar una calibración específica para el suelo donde se introducirá el sensor, indicando también que la calibración sólo es válida para un rango de variación del 20% de la densidad seca del suelo con el cual se realiza la calibración (Cobos & Chambers, 2010).

Se llevó a cabo la calibración específica usando el método de homogeneización del suelo “Homogenized soil method”, obteniendo una ecuación de calibración para cada uno de los sensores de humedad usados durante la investigación. Los modelos de regresión construidos para cada sensor se evaluaron a través de sus residuales, verificando normalidad, homocedasticidad y no autocorrelación de los errores.

La detección de valores extremos para depurar los datos se realizó usando la distancia de Cook y residuales estudentizados.

2.3 Caracterización del suelo

El suelo usado fue extraído de la Ladrillera La Alcarraza, ubicada en el Municipio de Itagüí, al sur de la Ciudad de Medellín. Proviene de la formación denominada Stock de Altavista, un cuerpo ígneo que va de plutónico a hipoabisal que presenta textura y composición heterogéneas. El suelo se identificó como el Horizonte IC, de acuerdo con la clasificación de Deere y Patton (1971), derivado de dioritas y microdioritas.

La caracterización del material se llevó a cabo a partir de ensayos de granulometría por lavado sobre el tamiz No. 200, límites de consistencia, humedad natural, gravedad específica y densidad. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización del material

Variable	Magnitud
% Gravas	2%
% Arenas	68%
% Finos	30%
LL	35
IP	7
USCS	SM
W _n [%]	12%-20%
G _s	2.83
γ_h [kN/m ³]	19.8
γ_d [kN/m ³]	17.8

2.4 Registro de los datos

Se registraron datos de los sensores de humedad cada 5 segundos. Se determinó la humedad inicial y final de la columna de infiltración en horno de convección para establecer una comparación entre

la humedad gravimétrica medida de manera convencional y la calculada de acuerdo con datos extraídos de los sensores MAS-1.

3 RESULTADOS

Se llevaron a cabo seis ensayos de infiltración haciendo uso del montaje y la instrumentación descrita.

Se alcanzó una densidad seca media de 1601 kg/m^3 , humedad de compactación de 12.5% y relación de vacíos de 0.77. Mientras que las

intensidades de lluvia aplicadas sobre la columna estuvieron entre los 10 y 200 mm/h.

No se observó drenaje hacia la parte baja de la columna, mientras que se tuvo encharcamiento y escorrentía durante la ejecución de todos los ensayos.

Los sensores detectaron con rapidez el aumento de la humedad dentro del suelo, lo que permite establecer asociaciones de ésta con el inicio y duración de las lluvias (Figura 2).

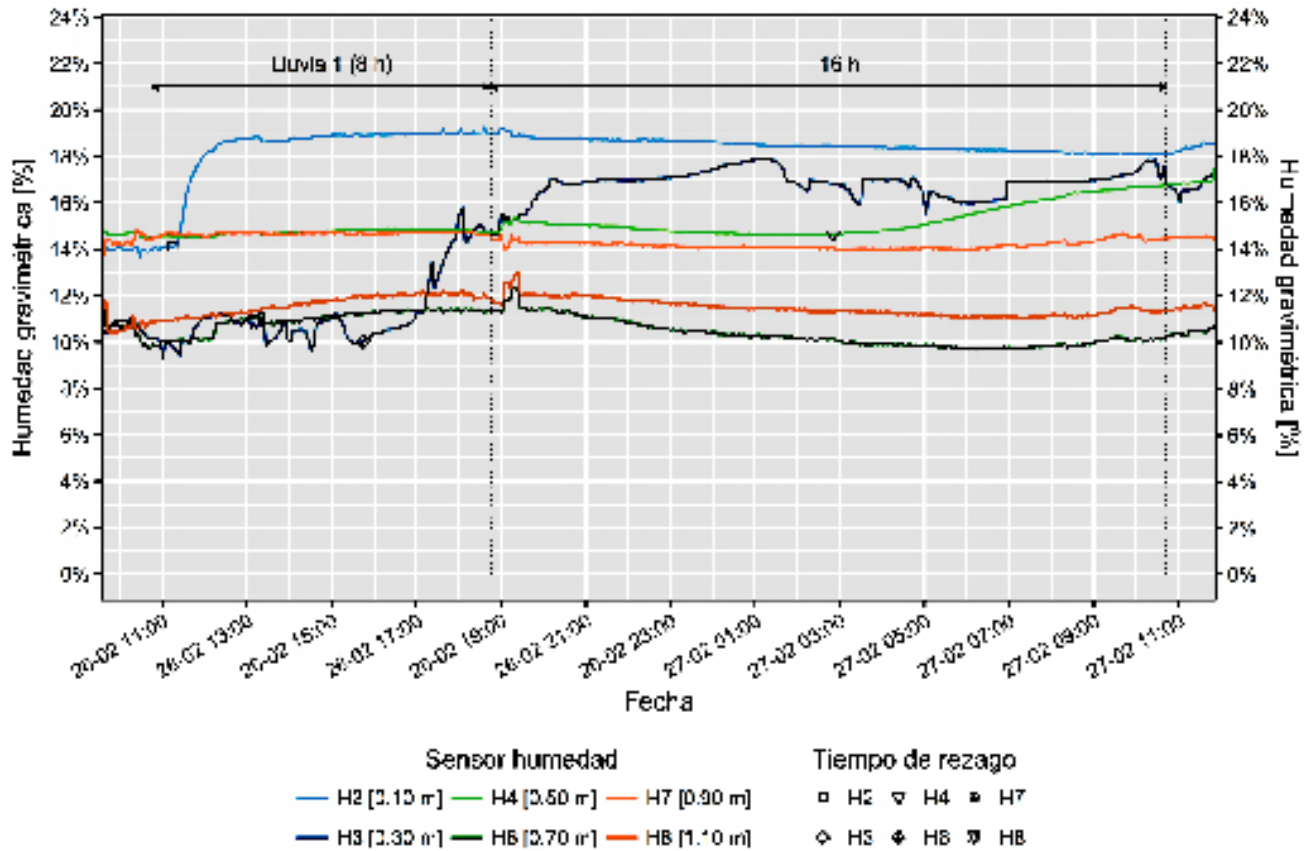


Figura 2. Respuesta de sensores de humedad ante lluvia.

Las humedades gravimétricas registradas por los sensores de humedad se mantuvieron, en general, por debajo del 20%, con saturaciones máximas del 80%, por lo que se considera que los sensores MAS-1 estuvieron ubicados en las zonas de transmisión y humedecimiento del frente húmedo.

En los primeros 10 cm de suelo es posible observar que la humedad aumenta durante el periodo de lluvia, pero una vez éste finaliza empieza a descender por efectos de la redistribución del agua en el suelo, así como por la evaporación que se produce en la parte alta de la

columna. En contraste, el sensor ubicado a 1.10 m no presenta aumento claro de la humedad sino hasta un periodo de lluvias superior a las 32 horas de duración a intensidad variable.

El aumento de la humedad en sintonía con el inicio y fin de las lluvias simuladas se observó hasta profundidades entre los 30 cm y 70 cm. Más allá de este punto, el efecto de las lluvias se encuentra retrasado.

El análisis de la variación de la humedad con el tiempo y la profundidad para los ensayos realizados mostró avance del frente húmedo en profundidad y aumento de la humedad dentro del

mismo. Sin embargo, en periodos de reposo el frente húmedo continuó su avance a través del drenaje de agua de la parte alta hacia la parte baja de la columna.

La baja relación de vacíos que se manejó durante los ensayos, así como el alto contenido de finos del material, resultaron en un suelo compactado con una permeabilidad baja, lo que causó que todas las intensidades de lluvia aplicadas generaran encharcamiento y escorrentía.

Al establecer comparaciones entre las humedades registradas por los sensores y las medidas en laboratorio, con horno de convección, se observó que los sensores subestimaron el valor de humedad en varios puntos porcentuales. Adicionalmente, estos errores en las lecturas de los sensores no se mantienen en el tiempo.

4 CONCLUSIONES

Es posible monitorear el avance del frente húmedo dentro del suelo a través del uso de sensores de humedad, lo que podría implementarse dentro de una red de alertas tempranas orientada a movimientos en masa detonados por lluvia.

La resolución que manejan los sensores de humedad es adecuada pues permite observar con rapidez cambios en la humedad dentro del suelo, lo que permite detectar un talud no saturado en proceso de falla por pérdida de succión. Sin embargo, el hecho de que la humedad medida por los sensores sea inferior a la real implica que las alertas tempranas derivadas del uso de estos instrumentos no serían oportunas por lo que se requiere aumentar la exactitud y precisión de las lecturas, a través del mejoramiento en el método de instalación y calibración de los instrumentos.

Se descarta la posibilidad de aplicar factores de corrección sobre el valor de humedad dado que los errores en las lecturas de los sensores no se mantienen constantes en el tiempo. En ese sentido se debe considerar mejorar los métodos de instalación y calibración de los sensores MAS-1 o usar sensores con mejores especificaciones que garanticen lecturas más estables y de mejor calidad.

5 REFERENCIAS

- Aristizábal, E., Gamboa, M., & Leoz, F. (2010). "Sistema de alerta temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia para el Valle de Aburrá", Colombia. Revista EIA, 155-169.
- Aristizábal, E., & Gómez, J. (2007, agosto 2). "Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá. Originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007". Gestión y ambiente, 10, 17-30.
- Aristizábal, E., Martínez, H., & Vélez, J. I. (2010). "Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias". Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, XXXIV, 209-227.
- Campbell, C. (2014). "Soil Moisture 201: Water content measurement theory and application". Recuperado de <https://www.decagon.com/en/education/virtual-seminars-copy/soil-moisture-201-water-content-measurement-theory-application/>
- Castiglione, P. (2014). "Fundamentals and perspectives on soil moisture measurements". Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=5fwEYfy4Mo>
- Chae, B.-G., & Kim, M.-I. (2012). "Suggestion of a method for landslide early warning using the change in the volumetric water content gradient due to rainfall infiltration". Environmental Earth Sciences, 66(7), 1973-1986. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1423-z>
- Cobos, D., & Chambers, C. (2010, noviembre 17). "Calibrating ECH2O Soil Moisture Sensors". Decagon Devices Inc.
- Echeverri, O., & Valencia, Y. (2003). "Análisis de los deslizamientos en la cuenca de la quebrada La Iguaná de la ciudad de Medellín a partir de la interacción lluvia-pendiente-formación geológica". Presentado en XII Jornadas geotécnicas de la Ingeniería Colombiana y V Foro sobre geotecnia de la Sabana de Bogotá, Bogotá.
- Greco, R., Guida, A., Damiano, E., & Olivares, L. (2010). "Soil water content and suction monitoring in model slopes for shallow flowslides early warning applications". Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 35(3-5), 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.12.003>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. 2005. "Definition of critical threshold for different scenarios. RISK-Advance Weather Forecast System to Advice on Risk Events and Management". 36 pág. http://palpatine.irpi.cnr.it/Gيومorphology/projects1/completed/riskaware/doc/report_wp1_16.pdf/view.
- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D., & Rhenals, R. (2008). "La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: Análisis de su ocurrencia en la escala interanual, intraanual y diaria". Revista EIA, 59-69.
- UNISDR. (2018). DesInventar Sendai. Recuperado 9 de junio de 2018, de <https://www.desinventar.net/index.html>