

## **IMPORTANCIA DE LA PREDICCIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA EN EL VALLE DE ABURRÁ**

Roberto J. Marín\*

Ingeniero Civil

Grupo de Investigación en Infraestructura (GII)

Facultad de Ingeniería

Universidad de Antioquia

Un movimiento en masa es un movimiento de suelo o roca hacia abajo de un talud, causado por efecto de la gravedad (Biansoongnern, Plungkang, & Susuk, 2016). De acuerdo al espesor de suelo que se desplaza, suelen ser divididos en dos tipos: superficiales y profundos, estos últimos con espesores superiores a dos metros (Sidle & Bogaard, 2016). La ocurrencia de este fenómeno representa una causa frecuente de desastres en todo el mundo, debido a que las vidas y propiedades humanas se ven afectadas en muchos casos (Aristizábal & Yokota, 2006).

Si bien la ocurrencia de desastres de este tipo han afectado a un gran número de personas localizadas en zonas de amenaza y que los daños aumentan considerablemente debido a la expansión del desarrollo humano sobre las laderas, así como al crecimiento acelerado de la población, se debe reconocer que los movimientos en masa hacen parte del proceso natural del desarrollo paisajístico (Aristizábal & Gómez, 2007; Aristizábal & Yokota, 2006).

La causa más común de los movimientos en masa son las lluvias. Lluvias de alta intensidad, larga duración o alta frecuencia de eventos de precipitación en corto tiempo pueden ser factores detonantes de este fenómeno (An et al., 2016). El Valle de Aburrá, ubicado en la zona intertropical, presenta una gran variabilidad en la lluvia anual y registra constantemente eventos de precipitación intensos y/o de larga duración, que sumado a sus características de alta montaña, constituye un territorio propenso a la ocurrencia de movimientos en masa.

A nivel global, la predicción de movimientos en masa es posiblemente el objetivo principal en la investigación relacionada con este fenómeno. Para reducir las víctimas humanas y las pérdidas económicas debidas a daños en las propiedades, toma una gran relevancia la predicción tanto espacial como temporal. Para esto, inicialmente se puede determinar la ubicación del talud inestable para luego descifrar el momento en que ocurrirá el movimiento en masa. Debido a la complejidad de este fenómeno, su predicción es actualmente un problema en todo el mundo (Li & Li, 2012).

Desde el punto de vista espacial, intervenir las áreas propensas a movimientos en masa para la mitigación del riesgo a menudo enfrenta problemas relacionados con la falta de recursos económicos, impacto ambiental y/o diversas dificultades que pueden presentarse para la realización de obras de infraestructura. En este sentido, los sistemas de alerta temprana son una alternativa de bajo costo para reducir el riesgo con bajo impacto ambiental y económico (Intrieri, Gigli, Mugnai, Fanti, & Casagli, 2012). Los sistemas de alerta temprana se definen como “dispositivos de monitoreo diseñados para evitar, o al menos minimizar, el impacto impuesto por una amenaza a los seres humanos, daños a la propiedad, al medio ambiente y/o a elementos básicos como los medios de sustento” (Medina-Cetina & Nadim, 2008).

---

\* Autor de correspondencia: Roberto J. Marín. Correo electrónico: [rjose.marin@udea.edu.co](mailto:rjose.marin@udea.edu.co)

Intrieri, Gigli, Casagli, & Nadim (2013) describen los sistemas de alerta temprana de movimientos en masa como una combinación de cuatro actividades principales: diseño, monitoreo, pronóstico y educación, como se ilustra en la Figura 1.



**Figura 1.** Subdivisión de un sistema de alerta temprana genérico en sus cuatro componentes fundamentales  
Fuente: Intrieri et al., 2013

El diseño implica el conocimiento de las condiciones geológicas y escenarios de riesgo, para lo cual es necesario determinar las necesidades y vulnerabilidades de la población en riesgo, identificar cualquier impedimento para llevar a cabo las acciones requeridas cuando se emite una advertencia y caracterizar las condiciones geológicas y meteorológicas que inducen a la iniciación de un movimiento en masa (Intrieri et al., 2013).

El monitoreo inicia desde el estudio del comportamiento y ocurrencia de los movimientos en masa. En esta fase conviene la ejecución de actividades operativas y de investigación. El monitoreo en tiempo real puede permitir una notificación inmediata asociada a movimientos en masa que puede ser crítica para proteger las vidas humanas. La transmisión de información de las condiciones de este fenómeno vía internet es extremadamente valioso para una gran cantidad de usuarios como servicios de emergencia, ingenieros geotécnicos, investigadores y el público en general (Reid, Baum, LaHusen, & Ellis, 2008).

El pronóstico incluye la definición de umbrales (sean de cualquier tipo, como velocidad de movimiento o valores de intensidad y duración de lluvia; dependen de cada caso en específico), modelos y todas las actividades que llevan a notificar una alarma. Típicamente, los sistemas de alerta temprana se basan en la definición de umbrales de lluvia, los cuales son valores de lluvia críticos sobre los cuales existe una alta probabilidad de ocurrencia de movimiento en masa (Schilirò, Montrasio, & Mugnozza, 2016). Estos pueden

ser determinados mediante modelos empíricos (Godt, Baum, & Chleborad, 2006; Guzzetti, Peruccacci, Rossi, & Stark, 2008), estadísticos (Coe et al., 2004; Crovelli, 2000; Guzzetti, Galli, Reichenbach, Ardizzone, & Cardinali, 2006) y modelos basados en los procesos físicos (Baum, Savage, & Godt, 2008; Montgomery & Dietrich, 1994; Montrasio, Valentino, & Losi, 2011).

Un umbral excesivamente alto reduce el tiempo para la activación de planes de emergencias y, en el peor de los casos, el mismo evento podría no ser notificado. En contraste, un umbral muy conservador podría inducir a una gran cantidad de falsas alarmas. Se debe definir el criterio de riesgo aceptable y la tolerancia a las falsas alarmas para determinar el rango posible en el cual se puede determinar el umbral (Intrieri et al., 2013).

Incluso en áreas donde frecuentemente ocurren movimientos en masa y existe alguna forma de sistema de alerta de este fenómeno, gran parte del público no está informada acerca de los efectos y la respuesta apropiada ante su ocurrencia (Baum & Godt, 2010). La educación es necesaria para incrementar la percepción del público al riesgo y explicar el comportamiento que se debe tener para la prevención de daños o pérdidas. Además, es importante transmitir apropiadamente información de cómo reaccionar a falsas alarmas y comunicar el mensaje de que estas deben ocurrir durante la vida funcional del sistema de alerta temprana. Se debe tener en cuenta que las falsas alarmas nunca pueden ser eliminadas completamente (Intrieri et al., 2013).

### **Predicción de movimientos en masa en el Valle de Aburrá**

Entidades que trabajan en la gestión del riesgo, como el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá – SIATA, proveen un importante servicio para los municipios que conforman el territorio metropolitano en relación con la ocurrencia de movimientos en masa, con el objetivo de reducir los desastres causados por este fenómeno y sus efectos catastróficos en la sociedad y el medio ambiente. Si bien hay avances en esta región en el diseño, monitoreo, pronóstico y educación, se hace trascendental el aporte investigativo de las áreas de ingeniería con relación directa con el fenómeno en cuestión (estabilidad de taludes, dinámica de suelos, infiltración, modelación hidrológica y geotécnica, entre otras) orientando un diseño específico para la implementación en el sistema de alerta de movimientos en masa de la región. Con esto, es posible desarrollar un escenario apropiado para el desarrollo de la actividad de pronóstico y lograr avances contundentes en predicción de movimientos en masa.

De acuerdo a Baum & Godt (2010), para un adecuado sistema que permita el pronóstico de movimientos en masa se requiere mínimamente cierta información básica, como:

1. Mapas de susceptibilidad y amenaza que identifiquen las áreas en donde se pueda esperar un movimiento en masa dado que se supere un umbral de lluvia.
2. Lluvias antecedentes o niveles de humedad de suelo requeridos para su ocurrencia, que si bien no se consideran un predictor consistente, las condiciones antecedentes de humedad tienen influencia en la magnitud de los movimientos de tipo flujo cuando estos son desencadenados.
3. Intensidades y duraciones de lluvia necesarios para la iniciación de movimientos en masa. Se pueden emplear indistintamente umbrales de intensidad y duración de lluvia o acumulados de lluvia durante un periodo de tiempo dado (Baum, 2007). Desarrollar umbrales de lluvia en nuevas áreas consume tiempo porque se requieren esfuerzos considerables para hallar y compilar registros históricos de movimientos en masa que coincidan temporal y espacialmente con la

información de precipitación. Es importante mencionar que las cantidades de precipitación y las condiciones antecedentes requeridas para la iniciación de movimientos en masa varían en diferentes sitios con el clima, geología y vegetación.

4. Datos y pronósticos meteorológicos en tiempo real. Además, se deben considerar otros factores geotécnicos e hidrológicos de los diferentes sitios de estudio y se debe implementar verificación en campo para corroborar y mejorar la exactitud de los pronósticos y las alertas emitidas. Si bien la información en tiempo real de datos meteorológicos, hidrológicos y geotécnicos son la base del monitoreo en cualquier sistema de alerta de movimientos en masa operacional, su utilidad se extiende a la implementación en el pronóstico y su mejoramiento constante incide significativamente en el éxito predictivo.

Por medio del SIATA, en Medellín y el Valle de Aburrá se emplea de forma estratégica para la gestión del riesgo la transmisión de información en tiempo real asociada a la posible ocurrencia de eventos extremos que afecten la calidad de vida de los habitantes, tales como precipitaciones de alta intensidad, inundaciones y movimientos en masa. Al contar con diversos sensores instalados en puntos estratégicos de la región, se monitorea en tiempo real las condiciones meteorológicas e hidrológicas. Asimismo, se desarrolla y se emplean modelos de pronóstico meteorológico e hidrológico para las condiciones del valle, implementando la información de pronóstico y de monitoreo para entregar de forma inmediata y oportuna la información a la comunidad y a las entidades que trabajan en la gestión del riesgo (Mejía Chavarriaga, 2016).

Las herramientas con las que cuenta el SIATA representan una gran ventaja para la predicción y el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá. Si bien actualmente su beneficio para el pronóstico son principalmente por la información de precipitación en tiempo real otorgada por su amplia red de monitoreo de lluvia (pluviómetros y estaciones meteorológicas) y el radar meteorológico ubicado en Santa Elena, en dicha entidad se avanza en el monitoreo de laderas con la instalación de algunas estaciones de humedad.

No obstante, como se mencionó anteriormente, en el Valle de Aburrá es necesario llevar a cabo un trabajo investigativo específicamente orientado a la actividad de diseño para un sistema de alerta temprana de movimientos en masa, en el cual los responsables del diseño del subsistema técnico deben definir los procesos de forma eficiente. Esto implica ampliar la información requerida en la elaboración de los mapas de susceptibilidad y amenaza, una actualización continua de los mismos, incrementar el conocimiento asociado a la definición de umbrales de lluvia, las metodologías empleadas, entre otras. En este sentido, la información básica que se requiere para el funcionamiento de la actividad de pronóstico, y todo el sistema de alerta temprana de movimientos en masa, debe ser ampliada y mejorada de forma continua y sistemática.

En las metodologías para la definición de umbrales de lluvia, se resalta la necesidad de implementar técnicas basadas en modelos en base física, puesto que se han adelantado importantes investigaciones (Aristizábal, García, & Martínez, 2015; Aristizábal, Martínez-Carvajal, & García-Aristizábal, 2017; Aristizábal, Vélez, Martínez, & Jaboyedoff, 2016) que validan su aplicabilidad en esta región. Si bien la implementación de metodologías para definir umbrales de lluvia que desencadenan movimientos en masa ha sido exitosa en diferentes lugares del mundo, tiene gran relevancia la evaluación del desempeño de estos modelos en el Valle de Aburrá por sus características de región montañosa ubicada en la zona intertropical.

## Referencias

- An, H., Viet, T. T., Lee, G., Kim, Y., Kim, M., Noh, S., & Noh, J. (2016). Development of time-variant landslide-prediction software considering three-dimensional subsurface unsaturated flow. *Environmental Modelling & Software*, *85*, 172–183.
- Aristizábal, E., García, E., & Martínez, C. (2015). Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains. *Natural Hazards*, *78*(1), 621–634.
- Aristizábal, E., & Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá. Originados por fenómenos naturales y antrópicos en el período 1880-2007. *Gestión Y Ambiente*, *10*(2), 17–30.
- Aristizábal, E., Martínez-Carvajal, H., & García-Aristizábal, E. (2017). Modelling Shallow Landslides Triggered by Rainfall in Tropical and Mountainous Basins. In *Workshop on World Landslide Forum* (pp. 207–212). Springer.
- Aristizábal, E., Vélez, J. I., Martínez, H. E., & Jaboyedoff, M. (2016). SHIA\_Landslide: a distributed conceptual and physically based model to forecast the temporal and spatial occurrence of shallow landslides triggered by rainfall in tropical and mountainous basins. *Landslides*, *13*(3), 497–517.
- Aristizábal, E., & Yokota, S. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburrá. *Dyna*, *73*(149).
- Baum, R. L. (2007). Landslide warning capabilities in the United States—2006. In *Proceedings of the 1st North America Landslide Conference, Vail, Colorado* (pp. 1–13).
- Baum, R. L., & Godt, J. W. (2010). Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides*, *7*(3), 259–272.
- Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2008). *TRIGRS- A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2. 0*. U.S. Geological Survey Open-File Report.
- Biansoongnern, S., Plungkang, B., & Susuk, S. (2016). Development of low cost vibration sensor network for early warning system of landslides. *Energy Procedia*, *89*, 417–420.
- Coe, J. A., Michael, J. A., Crovelli, R. A., Savage, W. Z., Laprade, W. T., & Nashem, W. D. (2004). Probabilistic assessment of precipitation-triggered landslides using historical records of landslide occurrence, Seattle, Washington. *Environmental & Engineering Geoscience*, *10*(2), 103–122.
- Crovelli, R. A. (2000). *Probability models for estimation of number and costs of landslides*. US Geological Survey,.
- Godt, J. W., Baum, R. L., & Chleborad, A. F. (2006). Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, *31*(1), 97–110.
- Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F., & Cardinali, M. (2006). Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Science*, *6*(1), 115–131.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2008). The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, *5*(1), 3–17.
- Intrieri, E., Gigli, G., Casagli, N., & Nadim, F. (2013). Brief communication“ Landslide Early Warning System: toolbox and general concepts.” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *13*(1), 85–90.
- Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., & Casagli, N. (2012). Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, *147*, 124–136.
- Li, X. P., & Li, Y. A. (2012). Design of GIS-based monitoring and early-warning system of landslide hazard in Diao Zhongba. *Energy Procedia*, *16*, 1174–1179.
- Medina-Cetina, Z., & Nadim, F. (2008). Stochastic design of an early warning system. *Georisk*, *2*(4), 223–236.
- Mejía Chavarriaga, M. L. (2016). Lecciones aprendidas Proyecto Sistema de Alertas Tempranas de la ciudad de Medellín y el Valle de Aburrá-SIATA. Universidad EAFIT.

Marín, R. Importancia de la predicción de movimientos en masa en el Valle de Aburrá.

- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4), 1153–1171.
- Montrasio, L., Valentino, R., & Losi, G. L. (2011). Towards a real-time susceptibility assessment of rainfall-induced shallow landslides on a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(7), 1927–1947.
- Reid, M. E., Baum, R. L., LaHusen, R. G., & Ellis, W. L. (2008). Capturing landslide dynamics and hydrologic triggers using near-real-time monitoring. *Landslides and Engineered Slopes, Edited by: Chen, Z., Zhang, J., Li, Z., Wu, F., and Ho, K., Taylor and Francis Group, London*, 179–191.
- Schilirò, L., Montrasio, L., & Mugnozza, G. S. (2016). Prediction of shallow landslide occurrence: Validation of a physically-based approach through a real case study. *Science of the Total Environment*, 569, 134–144.
- Side, R. C., & Bogaard, T. A. (2016). Dynamic earth system and ecological controls of rainfall-initiated landslides. *Earth-Science Reviews*.