

LA LLUVIA Y LOS DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN ANTIOQUIA: ANÁLISIS DE SU OCURRENCIA EN LAS ESCALAS INTERANUAL, INTRAANUAL Y DIARIA

HERNÁN ALONSO MORENO¹; MARÍA VICTORIA VÉLEZ²;
JUAN DAVID MONTOYA³; REMBERTO LUIS RHENALS⁴.

RESUMEN

Se estudia la relación entre la lluvia y los deslizamientos reportados en el departamento de Antioquia para el período comprendido entre 1929 y 1999. Se realiza la georreferenciación de 405 deslizamientos posiblemente producidos por lluvia en la región de estudio y se efectúa el análisis de la ocurrencia de los deslizamientos durante las fases cálida y fría del fenómeno ENSO (El Niño Southern Oscillation) y el ciclo intraanual de la precipitación en Colombia. La Niña, en la escala interanual, y los dos períodos más lluviosos sobre la zona andina, en la escala intraanual, favorecen un incremento en el número de deslizamientos de tierra. Mediante análisis de la precipitación diaria acumulada en estaciones cercanas al sitio de cada deslizamiento, se propone un umbral de lluvia y se describen las posibles combinaciones de lluvia acumulada antecedente. Las condiciones de lluvia más comunes para el desencadenamiento de un movimiento de suelo tienen que ver con altas cantidades de lluvia acumulada en el mediano plazo (15 días o más). Este estudio constituye un primer acercamiento al modelamiento de la lluvia y su influencia sobre los deslizamientos de tierra, lo cual puede dar apoyo a las autoridades en prevención de desastres para declarar estados de alerta ante condiciones de superación de umbrales de lluvia. El análisis tiene que complementarse considerando las condiciones geotécnicas, morfológicas, hidráulicas y antropogénicas propias de cada lugar para tener una visión integral del fenómeno de los deslizamientos.

PALABRAS CLAVE: lluvia; deslizamientos; desastres en Antioquia; ENSO y ciclo anual; umbrales de precipitación.

¹ Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Ingeniería-Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia. Profesor EIA. pfhemo@eia.edu.co.

² Ingeniera Civil, Universidad Nacional de Colombia. DEA, École des Mines de Paris. Profesora Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. mvvelez@unalmed.edu.co.

³ Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Ingeniería-Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia. jdmonto5@unalmed.edu.co.

⁴ Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de Colombia. Estudiante de Maestría en Ingeniería-Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia. rlrhenals@unalmed.edu.co.

ABSTRACT

Relationship between rain and reported landslides in the department of Antioquia for the period of 1929 to 1999 is studied. The georeference of 405 landslides possibly produced by rain is made, on the region of study. The analysis of the occurrence of landslides during the warm and cold phases of ENSO phenomenon (El Niño Southern Oscillation) and the behavior of the intra-annual cycle are described. La Niña, on inter-annual scale, and the two rainiest periods in Andean zone, on intra-annual scale, contribute to increase the number of landslides per year. Analysis of precipitation data associated with historical landslide events in Antioquia has resulted in the identification of precipitation thresholds for the initiation of landslides and the possible combinations of preceding accumulated rain are described. The data indicated that the cumulative precipitation (15 days or more) influences the amount of subsequent 3-day precipitation that is needed to initiate ground movement. This study constitutes a first intend toward rain modeling and its influence on landslides occurrence which can help authorities on disasters prevention to declare states of emergency by conditions of threshold exceed. The analysis must be complemented having into account geotechnical, morphological, hydraulics, and anthropogenic conditions own to each place to have an integral view of the landslide phenomenon.

KEY WORDS: rain; landslides; disasters in Antioquia; ENSO and annual cycle; precipitation thresholds.

1. INTRODUCCIÓN

La zona andina colombiana es altamente vulnerable a los deslizamientos de tierra por la conjunción de factores geológicos, geomorfológicos, climáticos y antrópicos (construcción de carreteras, centros poblados, etc.). A lo largo de los años, este fenómeno ha traído consigo numerosas pérdidas en el ámbito social y económico (Polanco, 2001), situación que se hace particularmente grave durante los períodos invernales, cuando las lluvias prolongadas y las lluvias intensas de corta duración desencadenan deslizamientos, sin que hasta el momento se haya aplicado para el departamento de Antioquia un modelo de pronóstico basado en la determinación de los umbrales de lluvia, el cual puede servir de indicador de la lluvia crítica o desencadenante de los deslizamientos.

Los deslizamientos de tierra pueden catalogarse entre profundos y superficiales, de acuerdo con el espesor de la capa de meteorización involucrada en el movimiento en masa, que es la directamente afectada por la saturación de agua, la cual, a su

vez, provoca disminución en la cohesión y pérdida de la cementación entre las partículas de suelo, así como incremento en las presiones de poros (Sidle y O'Loughlin, 1985; Suárez, 1998). Todo esto hace que las fuerzas desestabilizadoras desequilibren el sistema y permitan que una porción de tierra se deslice por una pendiente. Por esto, aunque la geología, la geomorfología y los factores antrópicos son muy importantes, nos concentraremos en la lluvia, como uno de los elementos desencadenantes y decisivos para la ocurrencia de la mayoría de los deslizamientos de tierra que históricamente han causado desastres reportados en Antioquia, como un primer paso para el estudio en profundidad de este fenómeno importante.

En la literatura especializada la incidencia de las precipitaciones, como factor desencadenante de los deslizamientos, ha sido muy estudiada, y muchos autores han reconocido la importancia de la hidrogeología en la zonificación por riesgo al deslizamiento. Investigadores como Sterret y Edil (1982), Clifton *et al.* (1985) y Arango (2000) estudiaron los niveles freáticos y su incidencia en el



factor de seguridad de los taludes. A partir de esto obtuvieron correlaciones entre niveles freáticos y precipitación, demostrando que la respuesta a eventos de lluvia tiene un tiempo de rezago promedio de 15 días en la mayoría de deslizamientos que estudiaron; además, concluyeron que las lluvias más frecuentes pero de menor intensidad producen la mayor respuesta del suelo a la infiltración, por acción del frente húmedo. Lógicamente este número de 15 días tiene variaciones relacionadas ante todo con el espesor de la capa meteorizada del suelo y la capacidad de agua que la puede saturar.

Otros autores como Guidicini e Iwasa (1977), Ceccarini *et al.* (1981), Canuti *et al.* (1985) y Paz y Torres (1989), basados en análisis estadísticos, buscaron determinar la duración de la lluvia que más influye sobre los deslizamientos (lluvia incidente) y el umbral a partir del cual la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento es alta. De aquí, concluyeron que la lluvia de 15 días de duración, anterior a un deslizamiento es la que más podría influir sobre él, aunque presentara un período de retorno bajo. Concluyeron, además, que la mayor parte de los deslizamientos ocurren cuando la lluvia acumulada hasta el día del evento fue considerable o cuando la lluvia en el día del deslizamiento fue excepcional, respecto de los valores de lluvia esperados para tormentas en la zona. En un trabajo más reciente, (Chleborad, 2000) se desarrolla un método para anticipar la ocurrencia de deslizamientos basado en los índices de precipitación. Estos índices no son más que umbrales, resultantes del análisis de la precipitación antecedente de 3 días, seleccionada gracias a estudios previos, en los que se resalta que los deslizamientos son desencadenados por tormentas de alta intensidad, en intervalos de 72 horas o menores, (Wieczorek, 2001) y la lluvia acumulada de los 15 días anteriores a este período.

En Colombia, Gómez (1990) estudió la relación existente entre las infiltraciones distantes

con los movimientos de masa profundos, así como también la que existe entre las tormentas locales y los deslizamientos someros o superficiales, mediante un modelo de predicción de niveles freáticos a partir de la precipitación. Van Westen (1992) desarrolló un modelo hidrológico bidimensional que permite obtener las fluctuaciones en el nivel freático a partir de datos hidrometeorológicos básicos y las propiedades hidráulicas de los suelos. También se destacan los trabajos de Western y Terlien (1996) y Arango (2000), quienes establecen relaciones entre lluvias antecedentes y lluvias diarias.

En este trabajo se explora la influencia de la precipitación, en las escalas interanual, intraanual y diaria, sobre el desencadenamiento de movimientos en masa, como un primer paso en el entendimiento de estos fenómenos complejos, fundamentalmente para lograr avances significativos en los sistemas de alerta temprana y prevención de desastres.

2. METODOLOGÍA

La figura 1 ilustra el departamento de Antioquia, región para la cual se tiene el registro de 405 deslizamientos ocurridos entre los años 1929 y 1999 (Polanco, 2001), posiblemente causados por lluvia, a los cuales se les hizo el proceso de georreferenciación (latitud, longitud), mediante la ayuda de mapas 1:10.000 y 1:25.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. La figura 2a muestra la ubicación de estos deslizamientos en Antioquia, que en la mayoría de los casos implicaron pérdidas de vidas humanas, daños materiales o bloqueo de vías importantes.

Se seleccionaron 41 estaciones de registro diario de lluvia pertenecientes a Antioquia y departamentos cercanos (Universidad Nacional de Colombia, 2000), cuya distribución geográfica se ilustra en la figura 2b. Puede observarse la gran concentración de las estaciones en la zona central del departamento de Antioquia.

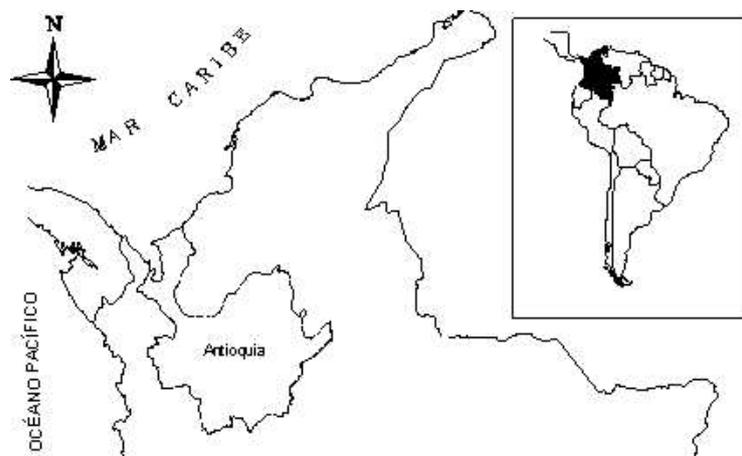


Figura 1. Localización zona de estudio.

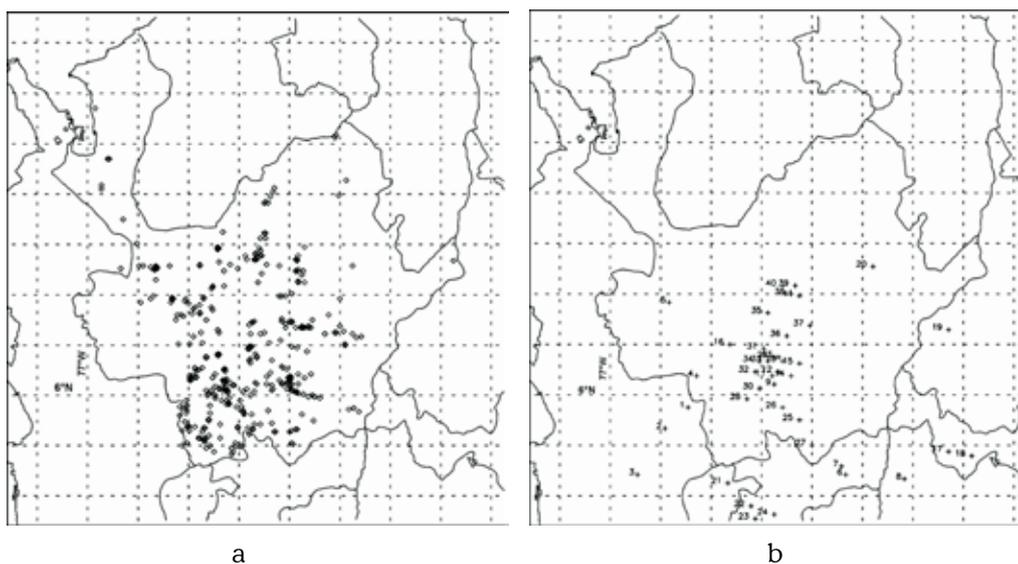


Figura 2. (a) Ubicación de los deslizamientos causados por lluvia en el departamento de Antioquia entre 1929 y 1999. Fuente: Base de datos DesInventar, Polanco (2001). (b) Ubicación de las estaciones de registro de lluvia diaria en el departamento de Antioquia. Fuente: Atlas Hidrológico de Colombia, Posgrado de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia. 2000.

Para analizar la variabilidad del número de deslizamientos de tierra en diferentes escalas temporales, se desplegará la serie de tiempo de los eventos reportados entre 1929 y 1999, se explorará la posible influencia de las dos fases del ENSO (El Niño y La Niña) sobre la variabilidad interanual y se hará una breve descripción del comportamiento intraanual del número y distribución de los deslizamientos ocurridos contra la lluvia promedio mensual en esta

región de Colombia. Todos estos análisis se realizarán por medio de gráficas comparativas.

Se realizará el análisis de la lluvia acumulada de 3, 5, 10 y 15 días antecedente a los deslizamientos, registrada en estaciones cercanas al sitio del movimiento en masa, con radios de búsqueda de 4, 5, 6, 11 y 16 kilómetros de distancia, para identificar relaciones generalizadas de lluvia acumulada y la



ocurrencia de deslizamientos, tratando de entender la dinámica lluvia-suelo que genera este tipo de eventos y avanzar hacia una aproximación matemática del fenómeno físico. Ya en trabajos anteriores se encontró que la precipitación acumulada es importante a la hora de desencadenarse un deslizamiento (Arango, 2000; Paz, 1989; Chleborad, 2000). En este trabajo no se hace ningún tipo de corrección por la selección de las estaciones de precipitación que no están exactamente en el sitio del deslizamiento, a la vez que es bien conocida la alta variabilidad espacial de la precipitación en esta zona del trópico. Toda la información pluviométrica de resolución temporal diaria con la cual se hicieron los análisis que involucran lluvia fue obtenida del software HydroSig Java desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia (2000).

Del análisis de la lluvia acumulada, se propone un umbral de lluvia propicio para la ocurrencia de deslizamientos, basado en la precipitación acumulada antecedente de 3 días y la de 15 días precedente a esta última, vinculada a cada deslizamiento de la base de datos. La metodología de construcción de estos umbrales consistió en realizar, para cada deslizamiento, la suma de las láminas de agua precipitadas en los 3 días anteriores al deslizamiento y la de los 15 días precedente a esta última, para tener un punto en la gráfica, y con todos los puntos proponer un umbral.

Para el análisis de lluvia antecedente no se utilizaron todos los deslizamientos, ya que el período común de registros de todas las estaciones de lluvia diaria comprende desde el 1° de enero de 1974 al 31 de diciembre de 1998. De esta manera se seleccionaron 283 deslizamientos comprendidos en este intervalo.

3. RESULTADOS

3.1 Variabilidad interanual de los deslizamientos : influencia de El Niño y La Niña

Existen contundentes evidencias de la influencia del ENSO sobre la hidrología colombiana (Poveda *et al.*, 1997; Poveda *et al.*, 1998, 2001; Moreno y Vieira, 2001; Waylen y Poveda, 2002); por ello, aquí se explora el efecto de dicho fenómeno macroclimático como condición propicia y desencadenante sobre el número y magnitud de deslizamientos de tierra por año en Antioquia.

La figura 3 describe la ocurrencia interanual de los deslizamientos provocados por lluvia en Antioquia (Polanco, 2001). Se observa que los años con mayor número de deslizamientos reportados son: 1984 con 57 casos; 1996 con 33; 1995, 27; 1988, 22; 1999, 19 y 1990, 17, en orden descendente. Se observa, además, que en tiempos recientes se han venido reportando más deslizamientos que en años pasados, debido tal vez al crecimiento poblacional y al avance de las comunicaciones en el país. Sin embargo, un análisis del número de deslizamientos de los años con eventos ENSO y sin ellos (denominados normales) ilustra una mayor cantidad de deslizamientos durante La Niña, mientras que El Niño reporta lo contrario, como lo ilustra la figura 4, de donde se deduce que el excedente de lluvia presentado por la fase fría del ENSO (La Niña) ha incrementado el número de deslizamientos ocurridos en el departamento de Antioquia. Esta deducción está en correspondencia con la que sostiene el aumento en la cantidad de lluvia en años con eventos La Niña en Colombia (Poveda *et al.*, 1997; Poveda *et al.*, 1998, 2001; Moreno y Vieira, 2001; Waylen y Poveda, 2002).

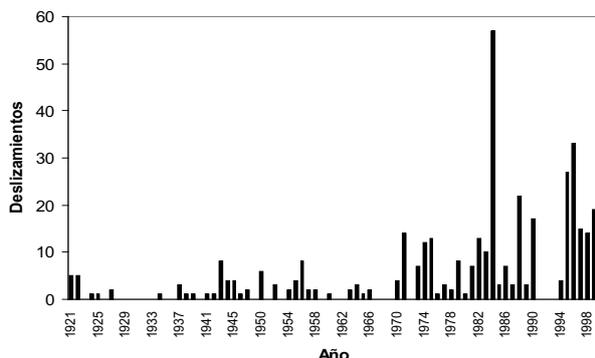


Figura 3. Ocurrencia anual de deslizamientos reportados en Antioquia entre 1921 y 1999.

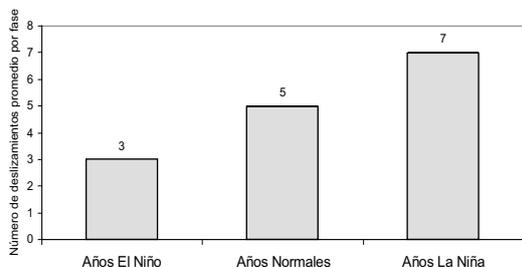


Figura 4. Distribución anual estándar de deslizamientos reportados en años El Niño, La Niña y normales en el departamento de Antioquia.*

3.2 Los deslizamientos y el ciclo intraanual de la lluvia

Una exploración que se hace inevitable es la comparación del ciclo intraanual promedio de la lluvia en Antioquia contra el número de deslizamientos expresados como el porcentaje del total de eventos anuales. La figura 5 muestra el ciclo intraanual de la lluvia promedio en las 41 estaciones de estudio, pertenecientes a la región andina colombiana, y el comportamiento mensual de los deslizamientos en términos del total anual. Nótese que los dos períodos húmedos anuales tienen influencia directa sobre el número promedio de deslizamientos correspondientes ocurridos en cada mes. Los trimestres abril-junio y septiembre-noviembre son los más lluviosos, siendo mayo y octubre los meses de máximas precipitaciones con cantidades similares en los promedios mensuales.

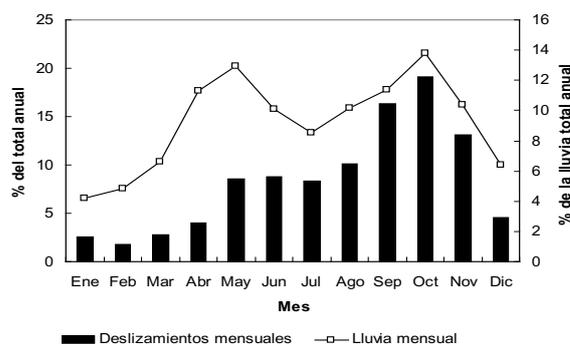


Figura 5. Ciclo intraanual de la lluvia promedio en Antioquia y comportamiento intraanual promedio de los deslizamientos reportados.

Las barras de porcentaje del total anual de los deslizamientos dejan ver un comportamiento algo similar al del ciclo bimodal presentado por la lluvia en el año. Sin embargo, la primera moda del año, en abril, mayo y junio, no presenta un elevado número de deslizamientos, comparados con los que ocurren en el segundo semestre, los cuales representan la segunda moda. Esto es debido a que el veranillo de mitad de año no presenta una reducción de lluvia tan notoria como el del principio de año y, entonces, tampoco disminuye de manera significativa el número de deslizamientos respecto a la última temporada húmeda. Esto puede explicarse por el almacenamiento de humedad en el suelo debido a la infiltración. De esta forma, después del primer período lluvioso del año, el suelo conserva parte de la humedad para los meses siguientes (julio y agosto). Este hecho hace que cuando llega el siguiente pico lluvioso, el suelo alcanza rápidamente la saturación y, por esta razón, puede ser objeto de movimientos. No ocurre así con los meses de abril, mayo y junio que, a pesar de corresponder al primer período lluvioso del año, presentan más bajos índices de deslizamientos que los de la segunda temporada del año, debido a que el suelo se deshace del agua almacenada en la temporada anual más seca (diciembre, enero y febrero). Esto lleva a concluir que hay un efecto rezago sobre el número de deslizamientos mensuales

* Esta gráfica fue construida a partir del número de deslizamientos ocurridos en todos los años El Niño, La Niña y normales y dividiendo el número de deslizamientos en cada fase del fenómeno por el número de años comprendidos. La lista de años hidrológicos El Niño y La Niña puede ser consultada en la página web www.coaps.fsu.edu/products/jma_index.php.



respecto al ciclo anual de la lluvia en Antioquia, dado por el efecto del almacenamiento del agua en el suelo.

Febrero es el mes de menor número de deslizamientos (menos del 3% de los totales anuales), siendo enero el mes más seco del año. Lo anterior favorece la condición de baja humedad antecedente para generación de deslizamientos. El mes con más alta probabilidad de deslizamientos en Antioquia es octubre con una ocurrencia promedio del 18% del total anual, coincidiendo con el mes de mayor precipitación promedio en el segundo semestre del año.

3.2 Relación entre ocurrencia de los deslizamientos y lluvia antecedente de 3 y 15 días

Esta investigación se dirige hacia la identificación de rangos de precipitaciones críticas que generan deslizamientos, teniendo en cuenta que la humedad antecedente del suelo es uno de los factores condicionantes en la ocurrencia de un movimiento en masa. Se realiza el análisis de los deslizamientos ocurridos para diferentes combinaciones de lluvia acumulada de 3, 5, 10 y 15 días antecedente a la lluvia de 3 días precedente al deslizamiento, para radios de búsqueda de 4, 5, 6, 11 y 16 kilómetros de estaciones pluviométricas cercanas al sitio de cada deslizamiento, ya que la fuerte variación espacial de la precipitación podría no dar una visión clara de las condiciones reales de cada movimiento.

Como se explicó en la metodología, se propone el umbral de lluvia que se muestra en la figura 6. El porcentaje de deslizamientos que hay por encima del umbral propuesto puede verse en la tabla 1. La figura 6 permite ver regiones más o menos definidas para la ocurrencia de deslizamientos de acuerdo con la cantidad de lluvia antecedente. La figura 7 y la tabla 2 describen tales regiones y la figura 8 muestra el promedio de días en el año en que los registros acumulados de lluvia en estaciones cercanas a los deslizamientos se ubican en cada región de la gráfica.

Tabla 1. Porcentaje de deslizamientos ocurridos por encima del umbral propuesto para lluvia antecedente acumulada de 3 y 15 días precedente a la de 3 días para diferentes radios de búsqueda de estaciones pluviométricas.

Distancia a estación	Número de datos	Datos por encima del umbral
< 16 km	112	85%
< 11 km	64	80%
< 6 km	27	78%
< 5 km	15	67%
< 4 km	8	62%

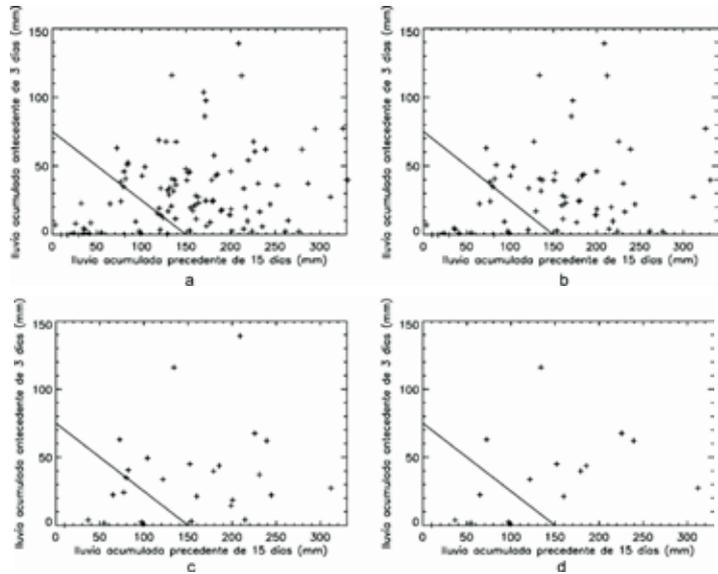


Figura 6. Umbrales propuestos para la ocurrencia de deslizamientos con estaciones pluviométricas asignadas a un radio menor o igual a: (a) 16 km, (b) 11 km, (c) 6 km y (d) 5 km de distancia desde el sitio del deslizamiento.

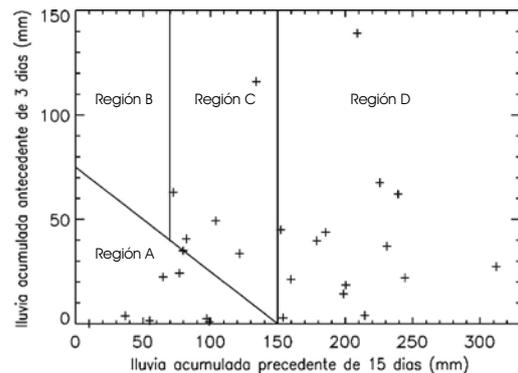


Figura 7. Regiones representativas de lluvia antecedente para deslizamientos reportados en Antioquia con un radio de búsqueda de estaciones de lluvia de 6 km.

Tabla 2. Descripción de las regiones representativas de la figura 7.

Región	Descripción
A	$P_{15} < 70$ mm no supera umbral
B	$P_{15} < 70$ mm supera umbral
C	$70 < P_{15} < 150$ mm supera umbral
D	$P_{15} > 150$ mm supera umbral

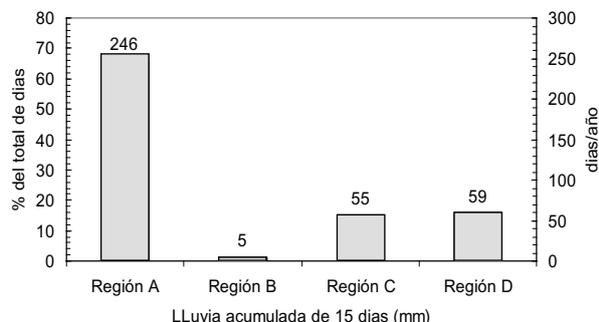


Figura 8. Porcentaje de días y número promedio de días al año en que la lluvia de 15 días antecedente se encuentra en una de las regiones mencionadas. Resultados provenientes del registro histórico de las estaciones de lluvia cercanas a los sitios de los movimientos en masa.

De los resultados de las figuras 6, 7 y 8 se pueden hacer las siguientes afirmaciones con referencia a las cuatro regiones planteadas en la figura 7.

Región A. Se encuentra por debajo del umbral propuesto. Esto significa que existen deslizamientos de tierra dadas estas condiciones de poca lluvia en los sitios de los movimientos reportados. El 25% de los datos de deslizamientos ocurridos pertenecen a esta región. Los deslizamientos acaecidos tal vez no tengan mucho que ver con la lluvia acumulada antecedente y, por el contrario, los factores antrópico y geológico cumplen un papel muy importante para el desencadenamiento del movimiento en masa. Las condiciones para que la lluvia antecedente se sitúe en la región A ocurren en promedio 246 días al año, es decir, la mayoría de las veces la lluvia acumulada se encuentra por debajo del umbral propuesto.

Región B. No se registran deslizamientos para esta combinación de lluvias en las estaciones

de trabajo. Existen bajas condiciones de humedad antecedente en el suelo y los fuertes aguaceros aislados que puedan ocurrir muy posiblemente no causarán un deslizamiento. Solo 5 días en el año, en promedio, se da este tipo de lluvias mayores que el umbral, típicas de un período largo de verano seguido de una corta temporada de lluvias.

Región C. En esta zona de la gráfica ocurrió el 20% de los deslizamientos reportados en Antioquia, la cual corresponde a una lluvia acumulada antecedente de 15 días entre 70 mm y 150 mm (según el umbral teórico propuesto) seguida por tormentas fuertes que causan una gran lámina acumulada en los tres días anteriores al deslizamiento. Estas condiciones de lluvia se presentan en promedio en Antioquia 55 días en el año y podrían ser un buen indicador de condiciones peligrosas para taludes y laderas inestables, en carreteras y construcciones civiles en general.

Región D. Puede catalogarse como la región donde ocurren las láminas mayores acumuladas de 15 días; el suelo permanece saturado por almacenamiento de agua lluvia durante un largo período de tiempo. En esta región de la gráfica, ocurre el 55% de los deslizamientos registrados, y las condiciones de lluvia mayores que el umbral propuesto ocurren en promedio 59 días al año. Puede haber grandes movimientos de masa por aumento de los niveles del agua en el subsuelo y se sugiere prestar especial atención a taludes potencialmente inestables y con factores de seguridad bajos, laderas con poca vegetación y con procesos erosivos avanzados.

Lo anterior no quiere decir que cada vez que se supere el umbral se producirá un alud. Quiere decir que el factor lluvia es favorable a la ocurrencia de un deslizamiento, a la vez que se dan ciertas condiciones relativas al estado actual del talud o la ladera en cuestión que involucran ante todo factores geotécnicos y antrópicos. Como ejemplo, obsérvese la cantidad no despreciable de deslizamientos no explicados por la lluvia acumulada ocurridos en la región A de la figura 7.



La ecuación de la línea recta propuesta en este trabajo como umbral de lluvia antecedente, según la figura 6, tiene la forma:

$$P_3 = -0,5P_{15} + 75\text{mm}, \text{ con } 0 < P_{15} < 150\text{mm} \quad (1)$$

donde P_3 es la lluvia acumulada antecedente de 3 días (mm), P_{15} es la lluvia acumulada antecedente de 15 días precedente a la de 3 días (mm)

Según la ecuación (1) y la figura 7, cuando $P_{15} > 150$ mm, una precipitación acumulada muy pequeña de 3 días, P_3 , puede desencadenar un deslizamiento.

De acuerdo con ello, los autores definimos un índice de riesgo para la ocurrencia de los deslizamientos, según la ecuación (2):

$$R = P_3 + 0,5P_{15} - 75 \text{ para } -75 < R < \infty \quad (2)$$

donde: R es un índice numérico de riesgo por precipitación.

Un valor de R negativo implica condición de no superación del umbral de lluvia, lo cual significa un bajo riesgo al deslizamiento. Por el contrario, un valor positivo de R significa condición de alta pluviosidad que genera saturación de suelo y nivel de riesgo para la ocurrencia de un deslizamiento. Se pueden, entonces, definir las condiciones promedio de riesgo al deslizamiento producido por lluvia en Antioquia:

- Cuando $0 < P_{15} < 150$ mm y $R > 0$ (regiones B y C de la figura 7) debe existir un nivel de alerta ante posibles deslizamientos, sobre todo en zonas de alta peligrosidad: algunos taludes descubiertos y recién cortados y laderas con altos niveles de meteorización y procesos erosivos.
- Cuando $P_{15} > 150$ mm el suelo ya tiene una buena cantidad de agua almacenada y se dan las condiciones críticas para que una lluvia acumulada pequeña, de 3 días, desencadene el deslizamiento en sitios potencialmente inestables. Son posibles grandes movimientos en masa.

Un refinamiento de esta metodología de umbrales podría llevar a la construcción de un sistema de alerta temprana ante aludes en zonas críticas de Antioquia, fundamentado en la información en tiempo real de pluviómetros cercanos a aquellos sitios críticos, para tomar decisiones con anticipación y evitar pérdidas humanas y materiales.

4. CONCLUSIONES

Se ha realizado la georreferenciación de una base de datos de deslizamientos reportados para el departamento de Antioquia en el período 1929-1999 y se han recopilado datos de la lluvia diaria acumulada de estaciones cercanas al sitio de cada evento, con el fin de establecer una relación entre la cantidad de lluvia antecedente y la ocurrencia del deslizamiento.

Los grandes períodos secos y húmedos causados por fenómenos macroclimáticos afectan el número de deslizamientos que ocurren en Antioquia. Dado que en Colombia, durante la fase cálida del fenómeno ENSO (temporada El Niño), ocurre una disminución de la cantidad de lluvia total anual y lo contrario durante la fase fría (La Niña), puede establecerse una relación directa de influencia de tales fenómenos sobre el número de deslizamientos por año respecto a los años normales (sin eventos ENSO), dando cuenta de un mayor número de deslizamientos por año en épocas de La Niña y una disminución de ellos en la fase de El Niño.

Los dos períodos húmedos anuales tienen influencia directa sobre el número promedio de deslizamientos ocurridos en cada mes, pero existe un efecto de rezago sobre el número de deslizamientos mensuales respecto al ciclo anual de la lluvia en Antioquia, dado por el almacenamiento de agua en el suelo. Febrero es el mes de menor número de deslizamientos (menos del 3% del total anual), siendo enero el mes más seco del año. Lo anterior favorece la condición de baja humedad antecedente para generación de deslizamientos. El mes con más alta probabilidad de deslizamientos desencadenados por

Lluvia en Antioquia es octubre con una ocurrencia promedio del 18% de los que hay en el año.

Se propone un umbral para la ocurrencia de deslizamientos, basado en la lluvia acumulada antecedente de 3 días y precedente de 15 días a esta última que generan deslizamientos. La condición de superación del umbral de lluvia no implica un deslizamiento, pero se dan las condiciones de humedad para que ocurra, teniendo en cuenta el estado del talud o la ladera en cuestión y factores geológicos y antrópicos que condicionen la ocurrencia de los deslizamientos.

Un refinamiento de esta metodología de umbrales podría conducir a la construcción de un sistema de alerta temprana ante aludes en zonas críticas de Antioquia en una plataforma SIG, apoyado en la información en tiempo real de pluviómetros cercanos a aquellos sitios críticos, para tomar decisiones con anticipación y evitar pérdidas humanas y materiales. De otro lado, la integración de factores geomorfológicos, hidráulicos, geológicos y antrópicos en un estudio de modelamiento del fenómeno podría otorgar un mejor acercamiento a la explicación de la causa de los deslizamientos ocurridos, que no parecen responder a la superación del umbral de lluvia propuesto en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- ARANGO, Juan (2000). Relaciones lluvia-deslizamiento y zonificación geotécnica en la comuna 2 de la ciudad de Manizales. Tesis de Grado, Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- CANUTI, P., FOCARDI, P. and GARZONIO, C. (1985). Correlation between rainfalls and landslides. IAEG Bull.n.32:49-53.
- CECCARINI, F.; FOCARDI, P. e ZANCHI, C. (1981). Modello per la previsione delle oscillazioni di falda in funzione dei parametri climatici. Istituto Sperimentale Studio Difesa Suolo, Firenze, N°12: pp. 161-173.
- CHLEBORAD, A. (2000). F. Preliminary method for anticipating the occurrence of precipitation-induced landslides in Seattle, Washington. U.S. Geological Survey, [open-file report ; 00-469](#).
- CLIFTON, A.; YOSHIDA, T. and CHURSINOFF, W. (1985). Regina Beach town landslide. Can Geotech J. Canada, N°1: pp. 60-68.
- GÓMEZ, Sully (1990). Predicción de niveles freáticos a partir de la precipitación y su influencia en la estabilidad de taludes (caso de aplicación en la meseta de Bucaramanga). Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 180 p.
- GUIDICINI, G. and IWASA, O. (1977). Tentative correlation rainfall and landslides in a humid tropical environment. Bulletin International Association Engineering Geology, Sao Paulo, N°16: pp. 13-20.
- MORENO, H. y VIEIRA, S. (2001). Caracterización del ciclo diurno de la precipitación en los Andes tropicales de Colombia. Tesis de Grado, Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 150 p.
- PAZ, C. y TORRES, A. (1989). Precipitación y su influencia sobre algunos deslizamientos ocurridos en las laderas del valle de Aburrá. Tesis de Grado, Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 174 p.
- POLANCO, C. (2001). Inventario y sistematización de los desastres naturales ocurridos en los municipios del departamento de Antioquia, exceptuando los municipios del valle del Aburrá, entre 1920-1999. Universidad Eafit. Medellín.
- POVEDA, G.; MESA, O. y CARVAJAL, L. (1997). Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 390 p.
- POVEDA G.; JARAMILLO, A.; GIL M. M.; QUICENO, N. and MANTILLA, R. (2001). Seasonality in ENSO related precipitation, river discharges, soil moisture and vegetation index in Colombia. Wat. Res. Res. Vol. 37 No. 8 : 2169-2178.
- POVEDA G.; GIL, M. M. and QUICENO, N. (1998). The relationship between ENSO and the annual cycle of Colombia's hydro-climatology. Proc. Second International Conference on Climate and Water. Helsinki, August 17-20, 1323-1331.
- SIDLE, P. and O'LOUGHLIN, C. (1985). Hillslope stability and land use. American Geophysical Union. Washington DC. 140 p.
- STERETT, R. and EDIL, T. (1982). Groundwater flow systems and stability of a slope. Groundwater Canada. N°20: pp. 5-11.
- SUÁREZ, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander. 557 p.



- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (2000). Atlas hidrológico de Antioquia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Medellín, 200 p.
- VAN WESTEN, C. (1992). Scale related GIS techniques in the analysis of landslide hazard. En: Proceedings 1er Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el Estudio de Riesgos Naturales, Bogotá, Colombia, (1992), pp. 484-498.
- WAYLEN, P. and POVEDA G. (2002). El Niño-Southern Oscillation and aspects of Western South America hydro-climatology, *Hydrol. Proc.*, 16: 1247-1260.
- WESTERN, C. J. and TERLIEN, T. J. (1996). An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS. A case study from Manizales (Colombia), *Earth Processes and Landforms*, vol. 21, pp. 853-868.
- WIECZOREK, G. F.; LARSEN, M. C.; EATON, L. S.; MORGAN, B. A. and BLAIR, J. L., (2001), Debris-flow and flooding hazards associated with the December 1999 storm in coastal Venezuela and strategies for mitigation. U.S. Geological Survey Open File Report 01-144, 40 p., 3 tables, 2 appendices, 3 plates, 1 CD.

