

SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR MOVIMIENTOS EN MASA INDUCIDOS POR LLUVIA PARA EL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA

EDIER ARISTIZÁBAL*
MARCO FIDEL GAMBOA**
FRANCISCO JAVIER LEOZ***

RESUMEN

En el valle de Aburrá las complejas condiciones físicas del territorio, sumadas a los altos índices de vulnerabilidad, han propiciado escenarios con un alto potencial de pérdidas humanas y económicas ante la ocurrencia de fenómenos de origen natural tales como movimientos en masa, los cuales representan el 35 % de los eventos que ocurren en el valle y el 77 % de las víctimas mortales. Debido a esta grave problemática, desde el año 2008 se ha venido utilizando un sistema de alerta temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia soportado en umbrales de lluvia empíricos. Estos sistemas proporcionan un rápido medio para monitorear y comunicar información sobre amenazas a una comunidad vulnerable, por lo que se usan para proteger vidas, señalando con anterioridad la posibilidad de un evento, lo que proporciona tiempo para tomar acciones que pueden reducir las condiciones de riesgo. Este artículo describe la definición y ajuste del modelo, al igual que presenta los resultados de la validación de los umbrales para el periodo 2004-2008. Los resultados encontrados indican que, aunque el modelo ajustado predice la ocurrencia de un alto porcentaje de eventos para la ciudad de Medellín, existe aún un gran número de eventos que se presentan en condiciones normales, lo cual indica que se requiere la definición de umbrales que se ajusten a las condiciones locales del valle y reduzcan los niveles de incertidumbre propios de un modelo estocástico.

PALABRAS CLAVE: sistema de alerta temprana; movimientos en masa; valle de Aburrá.

* Ingeniero Geólogo, Magíster en Ingeniería y Doctor (c) en Ingeniería. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Medellín, Colombia. edieraristizabal@gmail.com

** Ingeniero Geólogo. Sistema de Alerta Temprana Ambiental (SIATA). Medellín, Colombia. marco.geologo@gmail.com

*** Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de Colombia. Profesional Especializado, Subdirección de Ecosistemas, Corporación Autónoma Ambiental del Centro de Antioquia (Corantioquia). Medellín, Colombia. fleoz@corantioquia.gov.co

EARLY WARNING SYSTEM FOR RAINFALL-INDUCED LANDSLIDES IN THE ABURRÁ VALLEY, COLOMBIA

ABSTRACT

The complex physical conditions of the Aburrá Valley coupled with high vulnerability levels led to scenarios with a high potential for human and economic losses upon the occurrence of natural phenomena such as mass movements, which represent 35 % of events occurring in the valley and 77 % of dead people. Due to these severe problems, since 2008, an early warning system for rainfall-induced landslides assisted by empirical rainfall thresholds has been used. Early warning systems provide a rapid means for monitoring and communicating information about threats to a vulnerable community, so they are used primarily to protect lives, noting the possibility of occurrence of an event in advance, providing time to take action that can reduce the risk conditions. This paper describes the definition and model fit as well as presents the results of the validation of thresholds for the period 2004-2008. The found results indicate that, although the fitted model predicts the occurrence of a high percentage of events for the city of Medellín, there are still many events that occur in normal conditions, indicating that it requires the definition of local thresholds according to the valley conditions and reduce levels of uncertainty inherent in a stochastic model.

KEY WORDS: early warning systems; mass movements; Aburrá Valley.

SISTEMA DE ALERTA ADIANTADA POR MOVIMENTOS EM MASSA INDUZIDOS POR CHUVA PARA O VALE DE ABURRÁ, NA COLÔMBIA

RESUMO

No vale de Aburrá as complexas condições físicas do território, somadas aos altos índices de vulnerabilidade, propiciaram cenários com um alto potencial de perdas humanas e econômicas ante a ocorrência de fenômenos de origem natural tais como movimentos em massa, os quais representam 35 % dos eventos que ocorrem no vale e 77 % das vítimas fatais. Devido a esta grave problemática, desde o ano 2008 se vem utilizando um sistema de alerta adiantada por movimentos em massa induzidos por chuva suportado em umbrais de chuva empíricos. Estes sistemas proporcionam um rápido meio para monitorar e comunicar informação sobre ameaças a uma comunidade vulnerável, por isso usam-se para proteger vidas, assinalando anteriormente a possibilidade de um evento, o que proporciona tempo para tomar ações que podem reduzir as condições de risco. Este artigo descreve a definição e ajuste do modelo, da mesma forma que apresenta os resultados da validação dos umbrais para o período 2004-2008. Os resultados achados indicam que, mesmo que o modelo ajustado prediz a ocorrência de uma porcentagem alta de eventos para a cidade de Medellín, existe ainda um grande número de eventos que se apresentam em condições normais, o qual indica que se requer a definição de umbrais que se ajustem às condições locais do vale e reduzam os níveis de incerteza próprios de um modelo estocástico.

PALAVRAS CÓDIGO: sistema de alerta adiantada; movimentos em massa; vale de Aburrá.

1. INTRODUCCIÓN

En el valle de Aburrá las complejas condiciones físicas del territorio, sumadas a los altos índices de vulnerabilidad, han propiciado escenarios con un alto potencial de pérdidas humanas y económicas ante la ocurrencia de fenómenos de origen

natural tales como movimientos en masa (figura 1). Los movimientos en masa representan el 35 % de los eventos que ocurren en el valle y el 77 % de las víctimas mortales, lo que refleja la capacidad de destrucción de estos eventos (Aristizábal y Gómez, 2007; Aristizábal, 2008). Tan solo cuatro eventos como Media Luna (1954), Santo Domingo Savio



(1974), Villatina (1987) y El Socorro (2008) suman un total cercano a las 800 personas muertas. Esta cifra exige la incorporación de nuevas herramientas para la gestión del riesgo en el valle de Aburrá que permita reducir la afectación de estos fenómenos a niveles de riesgo aceptable.

El valle de Aburrá tiene una población estimada en 3,4 millones de habitantes, donde el 95 % corresponde a población urbana localizada en tan sólo el 26 % del área de los municipios que lo conforman (DANE, 2005). Este crecimiento ha sido un proceso extremadamente acelerado; en un siglo la población del valle se multiplicó por 32, de 103.305 personas en el año 1905 se incrementó a 3'317.166 en el 2005. Sólo en Medellín existe un total de 29.174 hogares localizados en zonas de alto riesgo no recuperable, equivalente a 112.697 personas, lo que significa el 4,9 % del total de los hogares y el 5 % de los habitantes del municipio (UNal-EAFIT, 2005). Para el resto de municipios del valle de Aburrá estudios recientes han establecido un total de 17.593 viviendas en zonas de alto riesgo, las cuales corresponden a 61.687 personas (UNal, 2009).

Debido a esta grave problemática numerosos estudios se han adelantado en los últimos años, que han permitido entender cada vez más las causas que involucran la súbita ocurrencia de movimientos en masa. No obstante, debido a la complejidad que envuelve este tipo de fenómenos, aún existe una gran incertidumbre alrededor, específicamente en la predicción temporal de su ocurrencia. Los fenómenos de remoción en masa tienen múltiples causas, tales como la geología, la morfología o los aspectos físicos y humanos, lo que exige una mirada interdisciplinaria desde diferentes campos como la geología, mecánica de suelos, hidrología y geomorfología (Crosta y Frattini, 2008). La amenaza por movimientos en masa es función de la susceptibilidad de las vertientes, como factor condicionante, y de la frecuencia y magnitud del fenómeno, como factor detonante (Brunsden, 2002).

Para ambientes tropicales, como el valle de Aburrá, un alto porcentaje de estos movimientos son desencadenados por intensas o continuas precipitaciones. Aristizábal y Gómez (2007) comparan el inventario de desastres y los datos de precipitación en el periodo 1880-2007, identificando su estrecha relación, con una tendencia bimodal y picos en los meses de mayo y octubre. De cada 10 eventos que se presentan en el valle, 8 son de origen hidrometeorológico, esencialmente movimientos en masa e inundaciones.

Pocos estudios acerca de la precipitación como factor detonante de los movimientos en masa se han realizado en el valle de Aburrá. Los primeros estudios surgen con Paz y Torres (1989), quienes concluyen que los movimientos en masa en el valle ocurren durante eventos de precipitación normal en cualquier día del año, donde la mayoría de los movimientos se presentan en condiciones normales. Echeverri y Valencia (2004) analizan los movimientos en masa en la cuenca de la quebrada La Iguañá y encuentran como umbrales críticos 60 mm de lluvia antecedente para 3 días y 120 mm para lluvia precedente de 15 días. Vélez *et al.* (2004) desarrollan un modelo físico para el pronóstico de movimientos en masa desencadenados por lluvia acoplado un modelo hidrológico, que evalúa la altura del nivel freático colgado, con un modelo infinito de estabilidad de ladera, el cual determina el factor de seguridad para los niveles colgados estimados por el modelo hidrológico, pero dicho modelo no ha sido aplicado para el valle.

Moreno *et al.* (2006) estudian la relación entre lluvia y movimiento en masa en el departamento de Antioquia y proponen umbrales de lluvia críticos, al igual que regiones, de acuerdo con la lluvia antecedente de 15 días y la lluvia de 3 días precedentes, como un primer acercamiento a un sistema de alerta temprana en el departamento de Antioquia. Estos autores resaltan la necesidad de refinar la metodología fundamentada en información en tiempo real y la necesidad de integrar factores geomorfológicos, hidráulicos, geológicos y antrópicos.

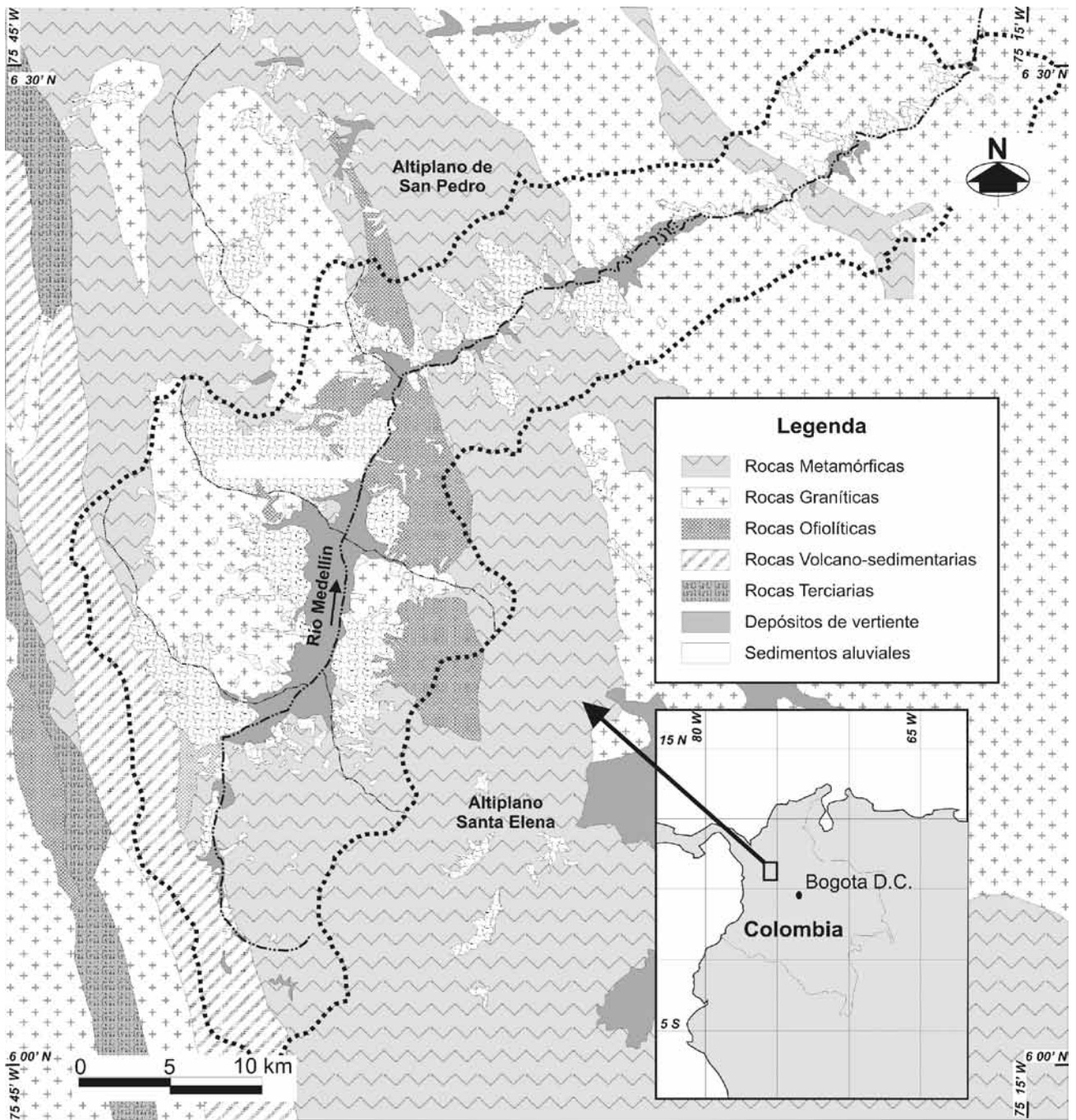


Figura 1. Localización y marco geológico simplificado del valle de Aburrá (Tomado de Aristizábal y Yokota, 2008)



La determinación de este tipo de umbrales críticos, también denominados empíricos, combinados con pronósticos de lluvias y seguimiento en tiempo real han sido aplicados en los últimos años alrededor del mundo como parte integral y fundamental de los sistemas de alerta temprana. Las ventajas de sistemas de alerta temprana basados en umbrales críticos de lluvia se soportan en que las lluvias son relativamente simples y cuesta poco medirlas a lo largo de grandes áreas. Si los datos de lluvia tienen densidad espacial suficiente, los umbrales pueden permitir una buena resolución espacial.

Los umbrales se definen como el mínimo o máximo nivel crítico de alguna cantidad necesaria, en este caso lluvia, para que un proceso ocurra (Reichenbach *et al.*, 1998). Los parámetros investigados más comunes son la lluvia total (acumulada), lluvia antecedente (preevento) y duración e intensidad de lluvia, o la combinación de estos. Partiendo de dicha información los umbrales son definidos considerando la intensidad de la lluvia, la relación duración e intensidad, la duración sobre un nivel de intensidad predefinido, la lluvia acumulada en un cierto periodo, la relación entre lluvia antecedente y diaria, la relación entre la lluvia del evento y la lluvia anual promedia, la relación entre lluvia diaria y lluvia de exceso antecedente (Guzzetti, Peruccacci y Rossi, 2005).

Tres acercamientos diferentes pueden realizarse con respecto a los umbrales como un límite inferior de tormentas desencadenantes de movimientos en masa, como una curva que las limita y separa de las tormentas no desencadenantes, o como límite superior de tormentas que no desencadenan movimientos en masa (Cepeda *et al.*, 2009).

2. SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA POR MOVIMIENTOS EN MASA

Los sistemas de alerta temprana por movimientos en masa proporcionan un rápido medio para comunicar y monitorizar información sobre

las amenazas a una comunidad vulnerable. Tales sistemas señalan con anticipación la posibilidad de ocurrencia de un movimiento en masa que permite notificar y evacuar a las personas para proteger sus vidas (Larsen, 2008).

El análisis de la recurrencia temporal de las catástrofes naturales ha demostrado que las afectaciones generadas presentan una frecuencia mayor que la capacidad de recuperación que tienen la sociedad y la economía, por lo que los nuevos enfoques se han centrado en el desarrollo e implementación de sistemas de alerta temprana y regulación de suelos que minimicen la pérdida de vidas humanas e infraestructura (IEWP, 2005; Guzzetti, Peruccacci y Rossi, 2005).

Arattano y Marchi (2008) clasifican los sistemas de alerta temprana en dos clases principales: sistemas de alertas anticipadas y sistemas de alertas del evento. Los sistemas de alerta anticipada predicen un evento antes de su ocurrencia, monitorizando las condiciones precedentes. En tanto que los sistemas de alerta del evento detectan el evento cuando ya ha ocurrido y generan una alarma.

En general, un sistema de alerta temprana lo componen tres elementos básicos:

- 1) Sensores de lluvia y telemetría
- 2) Umbrales críticos de lluvia definidos por modelos físicos o estadísticos
- 3) Medios para la comunicación de las alertas a las autoridades y comunidad

En cuanto a los sensores de lluvia y telemetría, en forma general, existen dos métodos: estimación de precipitación cuantitativa (QPE por sus siglas en inglés) y pronóstico de precipitación cuantitativa (QPF por sus siglas en inglés) (NOAA-USGS, 2005). Basados en estos dos métodos existen estaciones que miden la lluvia cuantitativamente, como los pluviógrafos, e instrumentos que pueden estimar y pronosticar espacial y temporalmente la lluvia, como los radares.

Los pluviógrafos son las herramientas más clásicas para medir la precipitación. Son considerados el estándar para la medición de la QPE, pese a que sus datos pueden contener errores asociados a diferentes circunstancias de manipulación de los equipos y sistema de detección. En forma adicional, como una gran limitante, proveen información de un solo punto, el cual puede no ser representativo, especialmente en eventos de lluvia de tipo convectivo en terrenos montañosos, por lo que es necesario contar con una densa red de estos sensores, aumentando los costos de instalación y mantenimiento (NOAA-USGS, 2005).

Por otro lado, los radares tienen la capacidad de observar y monitorizar con una gran resolución la intensidad y patrón espacial de las lluvias. Los radares transmiten pulsos de energía de microondas que son reflejados por las gotas de lluvia y recibidos por las antenas. La señal de reflectividad se relaciona con la intensidad de la lluvia (NOAA-USGS, 2005).

Un importante factor en estos sistemas son los niveles o mensajes predefinidos. El Servicio Meteorológico de los Estados Unidos (NWS por sus siglas en inglés) considera tres mensajes o niveles (pronóstico, observación y alerta). El *pronóstico* es usado para indicar que un fenómeno atmosférico amenazante puede desarrollarse debido a las condiciones monitorizadas; este nivel provee información para aquellos que necesitan tiempo considerable para prepararse. Un fenómeno en *observación* es cuando la probabilidad de un fenómeno amenazante se ha incrementado significativamente, pero su ocurrencia, localización y tiempo son aún inciertos. La *alerta* se genera cuando el evento amenazante está ocurriendo, es inminente o tiene una muy alta probabilidad de ocurrencia.

Sólo en algunos lugares del mundo se han utilizado sistemas de alerta basados en umbrales críticos de lluvia. Uno de los primeros sistemas de alerta fue desarrollado por la NOAA y USGS en el área de la bahía de San Francisco en el periodo 1986-1995 como parte de un programa exploratorio. Este sistema se basó en pronósticos cuantitativos de lluvia

(QPF) y umbrales críticos de precipitación empíricos, y se soportó en una red con más de 40 estaciones de lluvia en tiempo real.

Algunos otros sistemas similares han sido desarrollados desde entonces en Japón, China, Brasil, Nueva Zelanda y Hong Kong (Aleotti, 2004; Guzzetti, Peruccacci y Rossi, 2005; Cannon, 2005).

En Japón se desarrolló un sistema para la alerta y evacuación basado en el proceso de infiltración y el flujo superficial. Fueron definidas cantidades de lluvia estándares determinadas como acumulaciones críticas de lluvia dentro de ciertos periodos de concentración, combinadas con modelos de estabilidad estáticos. Para mejorar la precisión de las predicciones combinaron estaciones de lluvia en tierra con mediciones de radares y telemetría en tiempo real (Guzzetti, Peruccacci y Rossi, 2005).

En el área del Yangtsé en China fue desarrollado un sistema en 1991 para monitorizar movimientos en masa utilizando más de 70 estaciones y 300 profesionales. Esta red protege una población de más de 300.000 personas y para el año 2005 había pronosticado más de 217 movimientos en masa evitando pérdidas económicas estimadas en 27 millones de dólares (IEWP, 2005).

En Río de Janeiro, GeoRio (Oficina de Ingeniería Geotécnica de Río de Janeiro) diseñó en 1996 un sistema conformado por una red de 30 estaciones de lluvia en tiempo real y radares meteorológicos, denominado Sistema de Alerta Río. Este sistema genera pronósticos y alertas para movimientos en masa e inundaciones rápidas a las agencias gubernamentales y la comunidad durante tormentas intensas (NOAA-USGS, 2005).

En Nueva Zelanda se desarrolló un sistema para predecir en tiempo real la ocurrencia de movimientos en masa superficiales desencadenados por lluvias, de acuerdo con pronósticos de clima generados por modelos globales y regionales. Los modelos globales de la United Kingdom Meteorological Office (UKMO) se combinan con modelos



atmosféricos regionales (New Zeland Limited Area Model, NZLAM). Después a escalas más detalladas se utilizan modelos hidrológicos de estado estático para estimar la humedad del suelo a escala local y se aplican modelos de estabilidad infinita para determinar los umbrales de agua en el suelo que desatan los movimientos. Este sistema genera entonces pronósticos probabilísticos espacio-temporales para la ocurrencia de movimientos en masa en diferentes regiones de Nueva Zelanda (Schmidt *et al.*, 2007).

En Hong Kong, una de las regiones con mayores afectaciones por la ocurrencia de movimientos en masa, la Oficina de Ingeniería Geotécnica (GEO por sus siglas en inglés), desarrolló un sistema computacional automático denominado Landslip Warning System (LWS), el cual constituye el primero de su tipo en el mundo que funciona las 24 horas los 7 días de la semana. Este sistema está basado en pronósticos de lluvias para tiempos cortos y lo componen 86 estaciones de lluvia. Adicionalmente es alimentado por radares e imágenes de satélite para monitorizar las variaciones y movimientos de las celdas de lluvia. El LWS está programado para que, cuando se superen los umbrales definidos, se generen alertas al público por los medios nacionales y locales como radio y televisión (Aleotti, 2004).

Otros sistemas de alerta temprana se están implantando en Alemania y Malasia (Bell *et al.*, 2009; Peng *et al.*, 2008).

3. MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR MOVIMIENTOS EN MASA

Para la implementación de un sistema de alerta temprana para el valle de Aburrá se acogieron los umbrales definidos por Moreno *et al.* (2006) para todo el departamento de Antioquia. Los umbrales definidos por estos autores surgen a partir de 405 eventos estudiados y 41 estaciones de registro diario de lluvia en el departamento. Proponen la existencia de cuatro regiones representativas de lluvia ante-

cedente para movimientos en masa con un radio de búsqueda de estaciones de 6 km, denominadas regiones A, B, C, y D.

En la región A, caracterizada por niveles bajos de lluvia, se presentan el 25 % de los eventos, lo cual permite suponer que dichos eventos están asociados a condiciones diferentes a la lluvia antecedente, como la intervención antrópica. En la región B se localizan escasos movimientos en masa y corresponde a condiciones de baja humedad en el suelo y fuertes aguaceros aislados, los cuales posiblemente no alcanzan a desatar movimientos en masa. La región C corresponde a una lluvia acumulada antecedente de 15 días entre 70 mm y 150 mm, donde ocurre el 20 % de los eventos, y finalmente la región D, que corresponde a una lluvia acumulada de 15 días de 150 mm, donde ocurre el 55 % de los eventos (Moreno *et al.*, 2006).

A estas regiones propuestas les fueron asignados colores que representan estados de alerta de acuerdo con los niveles definidos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia –IDEAM– de la siguiente manera (figura 2 y tabla 1):

Boletín. Mensaje oficial por el cual se difunde información sobre eventos observados, reportados o registrados y que puede contener algunos elementos de pronóstico a manera de orientación. Es diferente a un aviso y a una alerta, ya que el Boletín no está encaminado a alertar, sino a informar.

Aviso. Indica la persistencia de un fenómeno. No implica amenaza inmediata y es catalogado como un mensaje para informar. El aviso implica vigilancia continua, ya que las condiciones son propicias para el desarrollo de un fenómeno.

Alerta. Advierte sobre la amenaza que puede ocasionar un fenómeno con efectos adversos para la población, el cual requiere atención *inmediata*. Ésta se emite sólo cuando el evento es una amenaza inminente y cuando implique la movilización de personas y equipos.

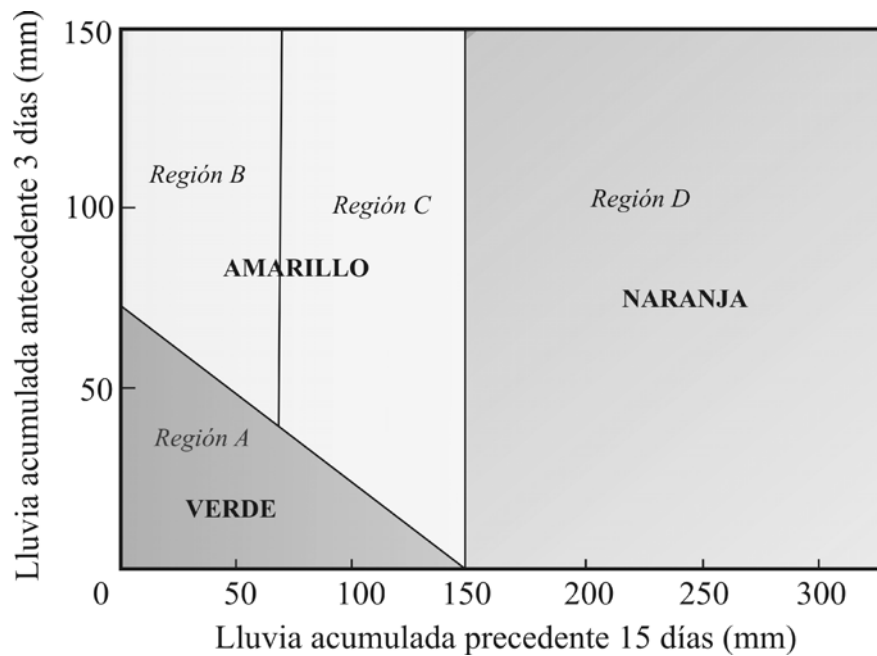


Figura 2. Umbrales de lluvia empíricos (modificado de Moreno *et al.*, 2006)

De esta forma a la región A se le asignó el color verde o estado sin alteración, periodo en el cual el Sistema de Alerta Temprana de la ciudad de Medellín (SIATA) suministra información dentro de los rangos normales e informa sobre la dinámica de las condiciones hidrometeorológicas. Aunque no representa un alto riesgo de ocurrencia, se requiere una verificación periódica de las laderas y drenajes que permita tomar acciones preventivas ante la evolución de un evento. Las regiones B y C fueron agrupadas en el nivel amarillo o estado de preparación, periodo en el cual el SIATA emite *Boletines* que indican la formación progresiva de condiciones de susceptibilidad suficientes para que ocurra un evento, por lo tanto, se deberá aumentar el seguimiento e inspección de sectores críticos regularmente afectados por este tipo de problemas. Es también necesaria la adquisición de recursos previsibles para la atención de una emergencia y el reporte inmediato a los cuerpos de socorro. La

región D corresponde al color naranja o estado de disposición, en el cual se emiten *Avisos*, que exige una disposición de 24 horas de la comisión técnica y operativa que integra los Comités Locales para la Prevención y Atención de Desastres –CLOPAD–. Se deberá además preparar el alistamiento de recursos y la definición de un sistema de seguimiento en campo constante de los sectores más críticos. En caso de alguna señal adicional en campo se deberán tomar las medidas de evacuación requeridas de forma inmediata.

Finalmente se consideró un estado de alerta denominado rojo o estado de atención, el cual no corresponde propiamente a una región de los umbrales definidos. Este estado representa que el evento ha ocurrido, está en evolución o es inminente su ocurrencia, por lo cual el SIATA emite *Alertas*. Es evidente que representa la movilización propia de todos los recursos preparados durante los estados anteriores.



Tabla 1. Criterios y definición de estados de alerta

Situación	Estado de alerta	Tipo de medidas
Verde (Región A)	Estado sin alteración	La comisión técnica del CLOPAD inspeccionará los sectores definidos como amenaza media y alta en cada uno de los mapas existentes. Verificará el estado de las laderas y los drenajes.
Amarillo (Regiones B y C)	Estado de preparación (Boletín)	Convocarán al CLOPAD y a los comités barriales. Adquisición de recursos previsibles. Aumentan los registros e inspección en sectores históricamente afectados.
Naranja (Región D)	Estado de disposición (Aviso)	La comisión operativa y la comisión técnica estarán en disposición 24 horas y se definirá un sistema de seguimiento en campo. Alistamiento de recursos. Se verificarán cadenas de llamadas y acciones operativas como parte de los planes de emergencia y contingencia definidos en áreas potencialmente desastrosas.
Rojo Evento ocurrido, inminente o en evolución	Estado de atención (Alerta)	Se decreta por parte del alcalde, utilizando como soporte notificación realizada por el CLOPAD. Se utiliza como soporte para la posible declaración de urgencia manifiesta por parte del alcalde. Se movilizan todos los recursos y acciones operativas de acuerdo con la magnitud considerada. Definir nivel de emergencia.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL EN EL VALLE DE ABURRÁ

El SIATA tiene su centro de operaciones en la torre adjunta al estadio Atanasio Girardot, de Medellín, donde se administra y opera la red de estaciones de lluvia y la red acelerográfica de la región. En la actualidad se cuenta con un total de 36 estaciones de lluvia, y adicionalmente se recibe la información de lluvia de 21 estaciones propiedad de las Empresas Públicas de Medellín –EPM– con la cual fundamentalmente se implementó el modelo del sistema de Alerta Temprana por movimientos en masa.

Es importante considerar que, aunque el modelo propuesto por Moreno *et al.* (2006) requiere el seguimiento en tiempo real, la información recibida actualmente por el SIATA es del acumulado diario del día anterior, por lo cual el sistema de alerta tem-

prana estima en realidad el grado de susceptibilidad o la disposición a presentarse un movimiento en masa del día en que se emite el boletín. El SIATA se encuentra en proceso de actualización tecnológica, lo que permitirá durante el año 2010 tener un sistema de alerta temprana en tiempo real.

Para la aplicación del sistema de alerta por movimientos en masa sobre el territorio del valle de Aburrá, considerando que la red de estaciones de precipitación de EPM sólo cuenta con una estación por municipio, se procedió a dividir el valle en regiones que corresponden a cada uno de los municipios (Barbosa, Girardota, Copacabana, Itagüí, Sabaneta, Envigado y Caldas). Cada una de estas regiones está representada por la lluvia que registra dicha estación. Esta condición es gran limitante para el modelo, por lo cual se requiere en el mediano y largo plazo densificar la red de estaciones, para lograr valores más representativos de las condiciones

locales del territorio. En la implementación del sistema de alerta temprana por movimientos en masa no se incluyeron los municipios de Bello y La Estrella porque no contaban con estaciones disponibles.

Para la ciudad de Medellín, a diferencia del resto de municipios, se contó con un mayor número de estaciones, por lo cual fue dividida en cuatro áreas (NW, NE, SW, SE). A cada una de estas regiones se le asignaron las estaciones localizadas dentro de ella, promediando la precipitación diaria. Para la ladera Nororiental (NE) de la ciudad de Medellín se utilizan las estaciones Manantiales, Villa Hermosa y Chorrillos, de las cuales se obtienen un promedio diario y se compara contra los umbrales para definir el estado de alerta. Para la región Noroccidental (NW) se emplean los datos de las estaciones Pedregal y Cucaracho; para la región Suroccidental (SW), los de la estación San Antonio de Prado y de la estación localizada en el centro de operaciones del SIATA, y finalmente para la zona Suroriental (SE) se utilizan los datos de las estaciones Gerona y Ayurá y la estación en la Universidad CES.

La figura 3 representa la topografía y distribución de movimientos en masa reportados en los últimos 20 años a la base de datos DesInventar en el valle de Aburrá (Aristizábal y Gómez, 2007), al igual que las estaciones de EPM localizadas dentro del valle y que reportan datos al SIATA. La gran mayoría de movimientos en masa se localizan en el centro del valle, específicamente la ciudad de Medellín, sobre las laderas occidental y suroriental, donde se encuentran ubicadas las estaciones San Antonio de Prado, Astillero, San Cristóbal, Cucaracho, Pedregal, Manantiales, Miguel de Aguinaga y Villa Hermosa.

Por lo tanto, cada día es evaluado para cada región, de acuerdo con la estación asignada, la cantidad de lluvia precedente y antecedente y su correspondiente estado de alerta. Esta información se remite vía internet a cada CLOPAD y demás entidades de prevención y socorro en horas de la mañana por medio del Boletín Hidrometeorológico publicado por el Sistema de Alerta Temprana Am-

biental de la Ciudad de Medellín –SIATA–, el cual es uno de los programas bandera del Sistema Municipal de Prevención y Atención de Desastres –SIMPAD–, con el apoyo económico y técnico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá –AMVA–. De igual forma el Boletín se publica en el portal del Municipio de Medellín como se presenta en la figura 4. (http://www.medellin.gov.co/alcaldia/jsp/modulos/V_medellin/index.jsp?idPagina=1002).

5. VALIDACIÓN DEL MODELO

Aunque el sistema de alerta temprana se utiliza desde mediados del año 2008, la validación del sistema y ajuste del modelo fue realizada de acuerdo con los eventos que fueron reportados diariamente al número único de seguridad y emergencia –NUSE– 123 desde el 1 de enero de 2004 al 31 de agosto de 2009 en la ciudad de Medellín. En este periodo se registraron 13.151 reportes clasificados como movimientos en masa, que se dividieron en movimientos de la ladera oriental y ladera occidental.

Se seleccionaron las estaciones de lluvia de Chorrillos, Gerona, Manantiales y Villa Hermosa para la ladera oriental, y las estaciones San Antonio de Prado, Astilleros, San Cristóbal y Pedregal para la ladera occidental. De igual forma los movimientos en masa se diferenciaron para estas mismas laderas.

En términos generales, se observa la estrecha relación reportada por diferentes autores entre la precipitación y los movimientos en masa, en este caso se corrobora para reportes de lluvia y eventos diarios. La figura 5 presenta esta relación con los datos de lluvia de la estación Villa Hermosa, similar relación se observa para la totalidad de estaciones.

Para la ladera oriental, cuando al menos una de las estaciones evaluadas se encuentra en naranja o estado de disposición, se registra el 40 % de los eventos reportados al NUSE 123, al igual que para el nivel amarillo o de preparación. En tanto que cuando ninguna estación se encuentra en estado amarillo o naranja, es decir, las cuatro estaciones evaluadas se

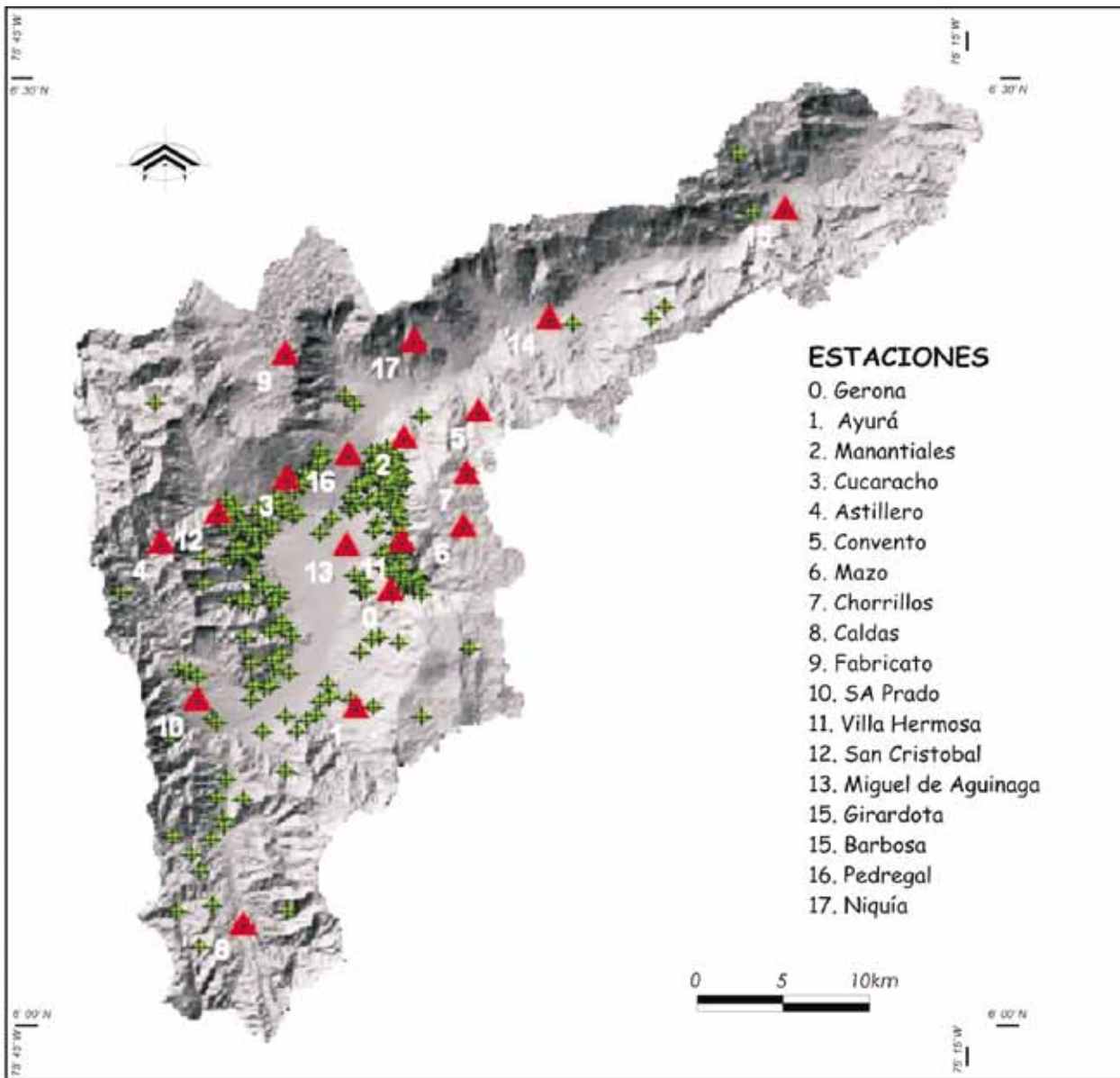


Figura 3. Distribución de movimientos en masa en el valle de Aburrá durante los últimos 20 años y ubicación de las estaciones de precipitación de EPM. Los triángulos representan las estaciones de lluvia, en tanto que los movimientos en masa están representados por círculos con cruces

encuentran en nivel verde o estado sin alteración, se presenta el 39 % de los eventos. El acumulado de dichos porcentajes no es el 100 %, ya que al mismo tiempo se pueden presentar estaciones en diferentes estados, amarillo y naranja, de acuerdo con los registros de lluvias locales.

Realizando el mismo análisis, pero tomando solo una estación, se observa que el 33 % de los eventos registrados en la ladera oriental se dan cuando la estación Chorrillos se encuentra en estado naranja, seguido por la estación Villa Hermosa con el 24 % de los eventos para el mismo nivel naranja. Para el

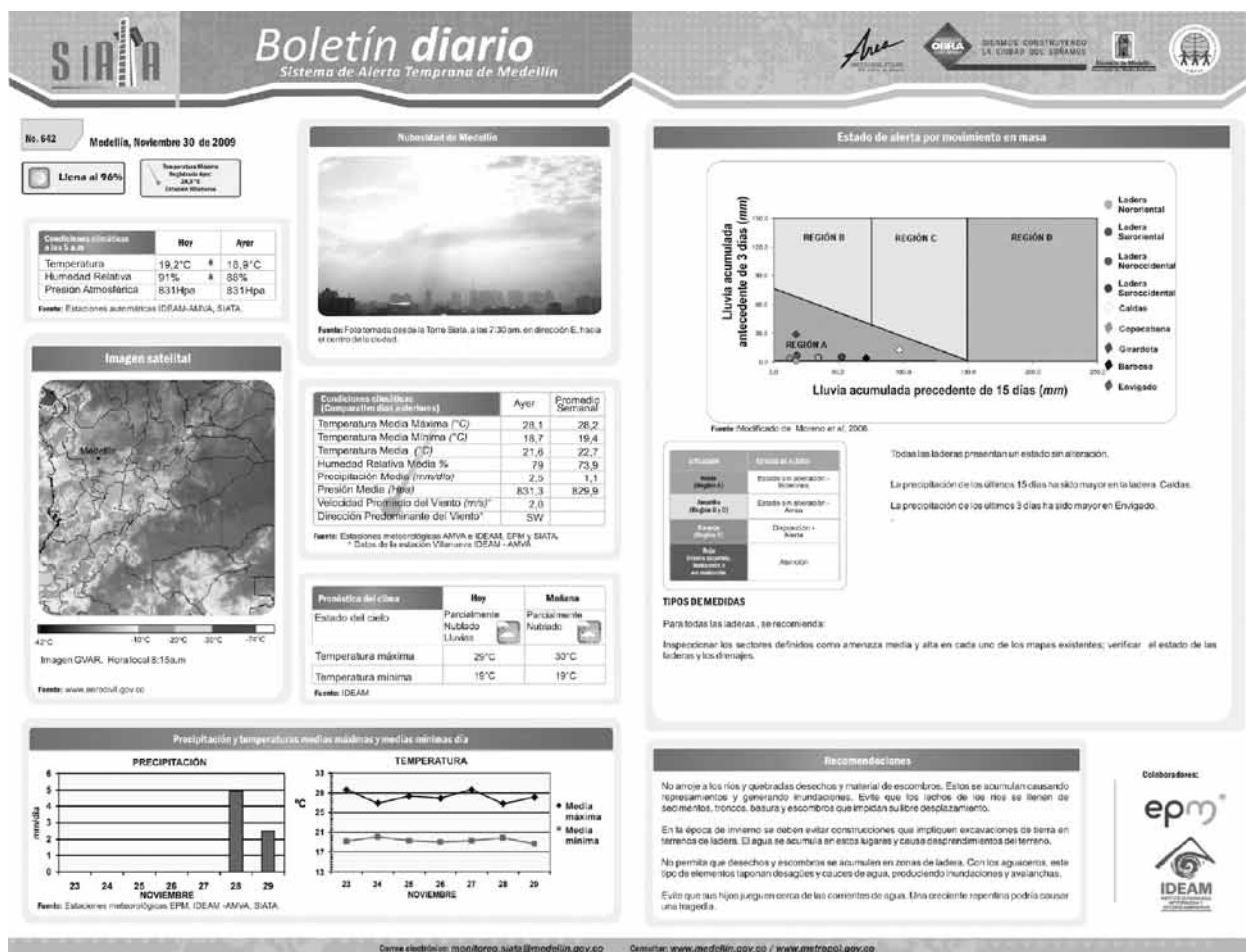


Figura 4. Boletín diario del SIATA. En la margen superior derecha aparece el estado de alerta por movimientos en masa

nivel amarillo los porcentajes de eventos registrados por cada una de las estaciones varían entre el 16 y el 20 %. Para el estado sin alteración o verde se presentan altos porcentajes de eventos reportados entre el 51 % para la estación Chorrillos y el 67 %, para la estación Gerona. Es decir, la estación Chorrillos es la que mejor representa los niveles reales de predisposición de las laderas, en tanto que Gerona es la estación en la ladera oriental que menos refleja estas circunstancias.

Para la ladera occidental, considerando todas las estaciones, predominan los eventos ocurridos

durante alertas naranjas con porcentajes mayores del 57 %, seguidos por el 36 % para alertas amarillas y tan solo se presenta el 27 % de los eventos cuando todas las estaciones se encuentran en verde o estado sin alteración. Individualmente los porcentajes de eventos en color naranja o estado de disposición varían alrededor del 40 %, muy superiores a los de la ladera oriental, y de color amarillo o estado de preparación varían alrededor del 16 % y 20 %. En tanto que la ocurrencia de eventos cuando la totalidad de estaciones al occidente se encuentran en verde varía entre el 42 % y 59 %. Sin embargo, la estación Pedregal presenta porcentajes de ocurrencia

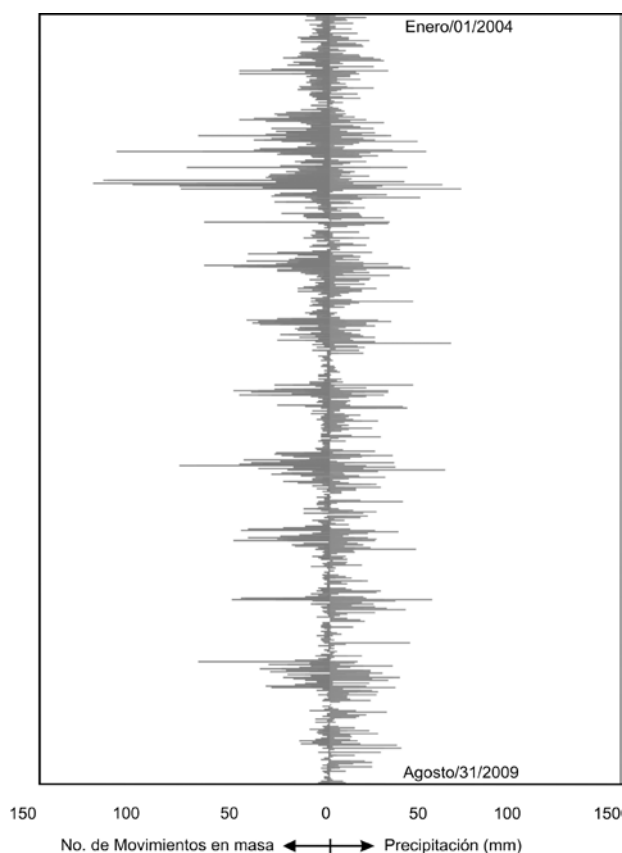


Figura 5. Registro de movimientos en masa diarios por el NUSE 123 contra precipitación diaria de la estación Villa Hermosa

en estado naranja y amarillo muy bajos del 7 % y 16 % respectivamente, y porcentajes de ocurrencia cuando se encuentra en verde del 78 %.

Es importante advertir que para evaluar el ajuste de los umbrales empíricos asumidos para la región, solo se consideraron las estaciones localizadas dentro de la ciudad de Medellín, debido a que sólo se contó con un registro del NUSE 123 detallado para esta ciudad; el resto de municipios del valle no presentan una base de datos lo suficientemente completa para un ejercicio similar. También es importante considerar que no se evaluaron las áreas estrictamente definidas por el SIATA con sus estaciones correspondientes. Se dividió la ciudad en laderas oriental y occidental y después se selec-

cionaron cuatro estaciones para cada ladera que se consideraron representativas por su distribución espacial sobre el área considerada.

6. CONCLUSIONES

Los resultados encontrados indican que un considerable porcentaje de movimientos en masa se presentan en días definidos como en estado de disposición o naranja, o en estado de preparación o amarillo, lo cual le permite tomar a la ciudad acciones que reduzcan los niveles de riesgo. No obstante, existe aún un gran porcentaje de eventos que se presentan bajo condiciones sin alteración o en estado verde. Un número importante está asociado a la alta complejidad del proceso físico que implica la ocurrencia de movimientos en masa y al carácter del modelo estocástico adoptado que involucra un error al pronóstico.

Parte del error incorporado puede estar asociado a que las estaciones consideradas para el análisis no representan en su totalidad las estaciones evaluadas por el modelo, aunque dicha influencia puede ser mínima, ya que se presentan porcentajes muy similares para todas las estaciones. En caso de que la selección de las estaciones influyera en forma considerable en el análisis, se presentarían variaciones considerables entre cada una de las estaciones seleccionadas.

Otra fuente de incertidumbre se asocia a que los umbrales definidos por Moreno *et al.* (2006), acogidos para el modelo, fueron definidos con eventos y lluvias de todo el departamento de Antioquia y no exclusivamente para el valle de Aburrá. Las condiciones tropicales en zonas de montaña, típicas de nuestro territorio, implican variaciones espaciales considerables en los regímenes de lluvia, entre sitios ubicados a corta distancia, situación que se observa incluso a menor escala dentro del valle de Aburrá; es común la presencia de lluvias sólo en algunos sectores de la ciudad con celdas de lluvia que pueden variar entre uno y solo unos pocos kilómetros de radio. Esta variabilidad climática tropical, por lo tanto,

es una fuerte restricción para extrapolar umbrales de áreas más amplias, lo cual se refleja en los niveles altos de incertidumbre que presenta el modelo.

Este elemento sugiere que se requiere la definición de umbrales de lluvia locales, definidos con eventos registrados y estaciones de lluvia dentro del valle de Aburrá. Dichos umbrales permitirán ajustar y mejorar las probabilidades del pronóstico. Además los resultados obtenidos sugieren que, mientras se definen umbrales locales para el valle de Aburrá, es recomendable eliminar de los promedios diarios las estaciones Pedregal y Gerona, debido a los altos porcentajes de eventos que se presentan cuando éstas se encuentra en estado sin alteración o color verde, lo que implica un incremento en el error.

De igual forma es necesario avanzar hacia la instalación de estaciones en tiempo real y con una red mucho más densa que permita, además de un seguimiento continuo y en tiempo real de cada estación, una mayor resolución espacial que logre captar la gran variabilidad espacial de la lluvia en el valle de Aburrá. En ambos aspectos se encuentran trabajando el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y el Sistema Municipal de Prevención y Atención de Desastres. Para el año 2010 se espera contar con un total de 57 estaciones en tiempo real y de consulta vía internet en un portal web exclusivo del SIATA.

REFERENCIAS

- Aleotti, P. (2004). "A warning system for rainfall-induced shallow failures". *Engineering Geology*, vol. 73, No. 3-4 (June), pp. 247-265.
- Arattano, M. and Marchi, L. (2008). "Systems and sensors for debris-flow monitoring and warning". *Sensors 2008*, No. 8, pp. 2436-2452.
- Aristizábal, E. (2008). "Características, dinámica y causa del movimiento en masa del barrio El Socorro (31 de mayo de 2008) en Medellín". *Revista EIA*, No. 10, pp. 19-29.
- Aristizábal, E. y Yokota, S. (2008). "Evolución geomorfológica del valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa". *Boletín Ciencias de la Tierra*, No. 24 (sep.-dic.), pp. 5-18.
- Aristizábal, E. y Gómez, J. (2007). "Inventario de emergencias y desastres en el valle de Aburrá: originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007". *Revista Gestión y Ambiente*, vol. 10, No. 2, pp. 17-30.
- Bell, R.; Glade, T.; Thiebes, B.; Jager, S.; Krummel, H.; Janik, M. and Holland, R. 2009. "Modelling and web processing of early warning". In: *Landslide processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling*. France. pp. 249-252.
- Brunsdon, D. (2002). "Geomorphological roulette for engineers and planners: some insights into and old game". *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 35, No. 2, pp. 101-142.
- Brunsdon, D. and Prior, D. *Slope instability*. John Wiley & Sons. 1984, 620 p.
- Cannon, S. H. 2005. A NOAA-USGS demonstration flash-flood and debris-flow early warning system: U.S. Geological Survey fact Sheet 2005-3104.
- Cepeda, J.; Hoeg, K.; Nadim, F.; Elverhoi, A. and Diaz, M. 2009. Decision tools for risk management of rainfall induced landslides: Application to the Metropolitan Area of San Salvador. Submitted to *Landslides*.
- Crosta, G. and Frattini, P. (2008). Rainfall-induced landslides and debris flows. *Hydrological Processes*, vol. 22, No. 4, pp. 473-477.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas –DANE–, 2005. Censo General 2005. (http://www.dane.gov.co/daneweb_V09/) consultado en enero 2010.
- Echeverri, O. y Valencia, Y. (2004). "Análisis de los deslizamientos en la cuenca de la quebrada La Iguañá de la ciudad de Medellín a partir de la integración lluvia-pendiente-formación geológica". *Dyna*, vol. 71, No. 142, pp. 33-45.
- Guzzetti, F.; Peruccacci, S. and Rossi, M. Definition of critical threshold for different scenarios. RISK-Advance Weather forecast system to advice on Risk Events and management, 2005, 36 p.
- International Early Warning Programme –IEWP– (2005), Dedicated to Reducing Disasters through Effective People-Centred Early Warning Systems, World Conference on Disaster Reduction, Kobe, Hyogo, Japan.
- Larsen, M. C. (2008). "Rainfall-triggered landslides, anthropogenic hazards, and mitigation strategies". *Advances in Geosciences*, No. 14, pp. 147-153.
- Moreno, H. A.; Vélez, M. V.; Montoya, J. D. y Rhenals, R. L. (2006). "La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria". *Revista EIA*, No 5, pp. 59-69.



- National Oceanic & Atmospheric Administration –NOAA–, United States Geological Survey –USGS–, 2005. NOAA-USGS Debris flow warning system-final report, circular 1283. <http://pubs.usgs.gov/circ/2005/1283/>.
- Paz, C. I. y Torres A. M. Precipitación y su influencia sobre algunos deslizamientos ocurridos en las laderas del Valle de Aburrá. Tesis pregrado, Universidad Nacional de Colombia, 1989, 174 p.
- Peng, K.; Lateh, H.; Sakai, N.; Morohoshi, O. and Fukuzono, T. 2008. The preliminary study on landslide prediction model in Malaysia. Proceedings of The First World Landslide Forum, Global Promotion Committee of the International Programme of Landslides. 18-21 November, Tokyo, Japan. Vol. 1, pp. 493-497.
- Reichenbach, P.; Cardinalli, M.; De Vita, P. and Guzzetti, F. 1998. "Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (central Italy)". *Environmental Geology*, vol. 35, No. 2-3, pp. 146-159.
- Schmidt, J.; Turek, G.; Clark, M. and Uddstrom, M., 2007. Real-time forecasting of shallow, rainfall-triggered landslides in New Zealand. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 9.
- Universidad Nacional de Colombia, 2009. Mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en el valle de Aburrá. Informe Interno Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Universidad Nacional de Colombia, Universidad EAFIT, 2005. Identificación y caracterización socioeconómica y geotécnica de las zonas de alto riesgo no recuperable de la ciudad de Medellín y formulación del plan integral para la gestión del riesgo. Informe Interno Municipio de Medellín-Corantioquia.
- Vélez, J. I.; Villarraga, M. R.; Álvarez, O. D.; Alarcón, J. E. y Quintero, F. 2004. Modelo distribuido para determinar la amenaza de deslizamiento superficial por efecto de tormentas intensas y sismos. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, Brasil.