



Fuente: http://www.heraldo.es/noticias/suplementos/tercer_milenio/el_programa_guad_echa_pulso_las_avenidas_fluviales.html

Aplicación de Modelos Numéricos para la Zonificación de la Amenaza para Eventos Hidrológicos y Geológicos. Aplicación al Caso Colombiano

Barrachina M. Jordi
Duarte C. Jaime

Aplicación de Modelos Numéricos para la Zonificación de la Amenaza para Eventos Hidrológicos y Geológicos. Aplicación al Caso Colombiano

BARRACHINA M. Jordi
Grupo INCLAM,
jordi.barrachina@inclam.com
M.Sc. ingeniería geológica. MBA. Gerente Inclam Sucursal Ecuador

DUARTE C. Jaime
Grupo INCLAM,
jaime.duarte@inclam.com

Docente-Investigador, Universidad Santo Tomás, Gerente Inclam Sucursal Colombia

Resumen: La determinación de las amenazas, vulnerabilidades y riesgos ante eventos naturales es un factor clave a la hora de desarrollar la planificación territorial. Así, la mayoría de legislaciones para la planificación territorial –incluyendo la colombiana– recogen esta necesidad y obligan a este tipo de estudios de caracterización de amenazas y riesgos. La zonificación de las distintas amenazas se debe basar en criterios claros y basarse, preferiblemente, en modelos numéricos que, junto a las actuales herramientas de Sistemas de Información Geográfica SIG, permite definir en cada punto del área de estudio cuál es la amenaza existente para un determinado evento. En este artículo se analizan los métodos y los modelos numéricos utilizados para la determinación de las amenazas para eventos hidrológicos (avenidas e inundaciones) y para los eventos geológicos (movimientos de masa) en 8 municipios de la región de Cundinamarca (Colombia). Copyright © L'sprit Ingenieux. Este artículo es la base para el proyecto de investigación que se está desarrollando en la Universidad Santo Tomás en el tema de modelamiento hídrico con el uso de aplicaciones digitales y de SIG.

Palabras clave: Amenaza, vulnerabilidad, riesgo, inundaciones, avenidas, movimientos de masa, GUAD2D, ESLA.

Abstract: The determination of hazards, vulnerabilities and risks for natural disasters is a key factor to develop the territorial planning. So, most of the territorial planning legislations – including the Colombian– incorporate this need and force to elaborate studies of hazard and risks' characterizations. Different hazards and risks' zoning should be based on clear criteria and, preferably, on numerical models, with current GIS tools. These methods allow defining, for each point of the study area, which is the existing hazard of a particular kind of natural disaster. At this article, some methods and models are analyzed in order to determinate the hazards related to hydrologic events (floods) and geological events (mass movements) at 8 municipalities of the region of Cundinamarca (Colombia). This article is the base for the investigation project that is been developing by the Universidad de Santo Tomás at the hydrologic modelling area with using GIS and digital applications.

Keywords: Hazards, vulnerability, risk, floods, mass movements, GUAD2D, ESLA.

1. Introducción:

La mayoría de legislaciones mundiales que afectan a la planificación territorial incorporan en su articulado la necesidad de incluir en esta planificación el factor riesgo tratándolo como un factor limitante o modificante de esta misma planificación.

La legislación colombiana no es ajena a esta situación. Así, en el año 2012 se promulgan el Decreto Ley 019 y la Ley 1523 que obligan a los entes territoriales a realizar la delimitación y zonificación de las zonas de amenaza y riesgo y, en condiciones de riesgo, establecer las respectivas medidas de mitigación.

Para los Planes de Ordenación Territorial (POT) se requiere la zonificación de las amenazas, vulnerabilidades y riesgos para los eventos de inundaciones, avenidas torrenciales –que generan la amenaza y riesgo hidrológico–, movimientos de masa –que genera la amenaza y riesgo geológico– e incendios forestales –que genera la amenaza y riesgo forestal–.

En este proceso hay que considerar, como se dice anteriormente, la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo, conceptos básicos que se definirán con más detalle en este documento.

La zonificación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo para los eventos de incendios forestales esta ya definida según una metodología propuesta por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales en Colombia –IDEAM– (www.ideam.gov.co) la cual se basa principalmente en la categorización y parametrización de la información disponible, ya sea por la cartografía temática (usos del suelo, cobertura vegetal, mapa de pendientes, accesibilidad, etc.) o por datos climáticos (temperatura, precipitación, velocidad y dirección predominante de los vientos, etc.). Toda esta información parametrizada y categorizada, y mediante un tratamiento GIS, permite el establecimiento de la zonificación de la amenaza, de la vulnerabilidad y, por combinación de estos dos aspectos, del riesgo.

En cambio, para los eventos hidrológicos y geológicos no existe una metodología tan específica

y se requiere previamente analizar qué metodologías y, sobre todo, qué modelos son los óptimos para el establecimiento de esta zonificación, especialmente para la caracterización de la amenaza.

Este artículo expone la metodología utilizada para la caracterización de la amenaza y su zonificación para los eventos hidrológicos y geológicos en ocho municipios de Cundinamarca así como los resultados obtenidos en la aplicación de estas metodologías.

2. Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo

Aunque se traten de conceptos ampliamente conocidos, es necesario recordarlos para no generar confusión, ya que es habitual confundir riesgo y amenaza y, muchas veces, son utilizados indistintamente generando confusión.

Se define amenaza como “factor de riesgo externo de un sujeto o un sistema, representado por un peligro latente asociado con un fenómeno físico de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre, que puede manifestarse en un sitio específico y en un tiempo determinado, produciendo efectos adversos en las personas, los bienes, y/o el medio ambiente. Matemáticamente, se expresa como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con una cierta intensidad, en un sitio específico y en un periodo de tiempo determinado” (Cardona, 1993).

Según la anterior definición, la amenaza incorpora tres variables a considerar; el lugar –dónde se produce–, la intensidad –qué grave puede ser ese evento– y la frecuencia –cada cuánto se produce un evento de características similares–. Por tanto, la determinación de la amenaza se debe basar en la obtención de estas tres variables.

En cambio, la vulnerabilidad se define como “la probabilidad de que una comunidad expuesta a una amenaza natural, según el grado de fragilidad de sus elementos (infraestructura, vivienda, actividades productivas, grado de organización, sistemas de alerta, desarrollo político-institucional...), pueda sufrir daños humanos y materiales” (CEPAL & BID, 2000).

En este caso, la vulnerabilidad se relaciona con la capacidad de que un determinado evento afecte al hombre, a sus actividades o a sus infraestructuras. Se puede hacer una distinción entre la vulnerabilidad territorial, aquellos elementos que se encuentran en el territorio –infraestructurales– y la vulnerabilidad poblacional, que incorpora aspectos más sociales, demográficos y culturales.

Finalmente tenemos el riesgo, el cual se define como “una idea compuesta por la eventualidad, el contexto y las consecuencias, lo cual se materializa en la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias (materiales) económicas, sociales o ambientales en un cierto sitio y durante un cierto periodo de tiempo, siendo entonces la convolución (concomitancia y mutuo condicionamiento) de la amenaza y la vulnerabilidad” (Cardona, 2001).

Por tanto, tenemos que el riesgo es la combinación de la amenaza con la vulnerabilidad, lo que significa que una amenaza alta no tiene por qué generar un riesgo alto. Una avenida torrencial de elevada intensidad en una zona deshabitada va a generar un riesgo bajo, mientras que una inundación moderada en una zona urbana generará un riesgo elevado.

3. Determinación de la Amenaza para Eventos Hidrológicos

Como se ha comentado en el apartado 2, la amenaza se determina a partir de la magnitud del evento y de la frecuencia de ocurrencia de los eventos.

Cuando hablamos de frecuencia de ocurrencia de un evento hidrológico inmediatamente nos viene a la cabeza el concepto de periodo de retorno, por lo que es habitual que se determinen las amenazas asociadas a un periodo de retorno predeterminado. Es un proceso similar a cuando se dimensionan infraestructuras de drenaje, las cuales se calculan para poder desaguar un determinado caudal de agua asociado a un cierto periodo de retorno.

Análogamente, la zonificación de la amenaza por un evento hidrológico estará relacionada con el caudal máximo circulante por la red de drenaje asociado al periodo de retorno que se preestablezca.

Por otro lado, la magnitud de un evento hidrológico se relaciona con dos variables: la velocidad del agua y el tirante alcanzado. Como ejemplo, la Federal Emergency Management Agency –FEMA– (www.fema.gov) establece que existe amenaza hidrológica si en un punto la velocidad del agua es superior a 1 m/s, si el tirante es superior a 1 metro o bien, el producto de la velocidad por el tirante es superior a un valor de $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$. El criterio de la FEMA se puede observar en la figura 1. El eje horizontal representa la velocidad del agua en ese punto, de tal modo que si la combinación tirante-velocidad se encuentra en la zona rallada se considera que no existe amenaza, mientras que si se supera esta zona, la FEMA considera que existe una amenaza para un evento hidrológico determinado.

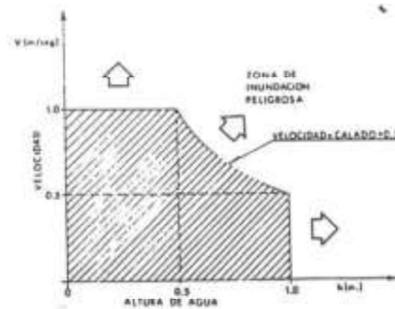


Figura 1. Criterio de la FEMA para la delimitación de zonas con amenaza por eventos hidrológicos

El criterio de la FEMA aunque sencillo, es excesivamente binario y sólo da dos categorías de amenaza: hay o no hay amenaza. Para evitar esta situación, se pueden aplicar otras metodologías, como la que se utilizó en Cundinamarca y que se basa en estudios de zonificación de amenaza por eventos hidrológicos realizados en varias regiones de España. Esta metodología se basa en una categorización del producto entre el tirante del agua en un punto y la velocidad del agua en ese mismo punto, categorización que se corrige con un parámetro asociado al periodo de retorno considerado para ese tirante y velocidad.

Gravedad de la amenaza	Rango	Factor de gravedad
Extrema	$C \cdot V > 2$	6
Alta	$1 < C \cdot V < 2$	4
Media	$0,5 < C \cdot V < 1$	2
Baja	$0,08 < C \cdot V < 1$	1
Muy baja	$C \cdot V < 0,08$	0,5

Teniendo en cuenta la categorización de las Tablas 1 y 2, la amenaza por eventos hidrológicos en un

punto se puede obtener por aplicación de la siguiente expresión:

$$\text{Amenaza} = [(c \cdot v) 25 * 2] + [(c \cdot v) 50 * 1,5] + [(c \cdot v) 100 * 1]$$

Donde $c \cdot v$ es el factor de gravedad que se obtiene de la Tabla 1 para el periodo de retorno del subíndice y el valor que multiplica es el factor de gravedad que se obtiene de la Tabla 2 para ese mismo periodo de retorno.

Periodo de retorno	Factor de gravedad
25 años	2
50 años	1,5
100 años	1

De esta metodología se desprende que se necesita obtener dos variables hidráulicas para la zonificación de la amenaza para eventos hidrológicos. Para cada punto del territorio y para cada uno de los periodos de retorno a considerar se requiere obtener tanto el tirante de agua (variable “ c ” en la Tabla 1) como la velocidad del agua (variable “ v ” en la Tabla 1).

Por ello es necesaria la ejecución de modelo hidráulico que obtenga, para cada punto del territorio y para cada periodo de retorno a analizar, los valores de tirante y velocidad del agua. Para este tipo de trabajos se recomienda encarecidamente la utilización de modelos hidráulicos bidimensionales, por encima de los más habituales modelos unidimensionales, ya que generan resultados más ajustados a la realidad y son capaces de representar movimientos transversales, entendidos como no coincidentes con los ejes fluviales, que son los movimientos más habituales en eventos de inundaciones. Para el caso de Cundinamarca se ha utilizado el modelo GUAD2D, modelo hidráulico bidimensional basado en métodos de cálculo de volúmenes finitos, desarrollado por INCLAM.

A partir de los caudales obtenidos para los distintos periodos de retorno, modelos digitales de los terrenos adaptados para modelos hidráulicos y otras informaciones como mapas de rugosidades, se han ejecutado los modelos hidráulicos para la obtención de las velocidades del agua y tirantes.

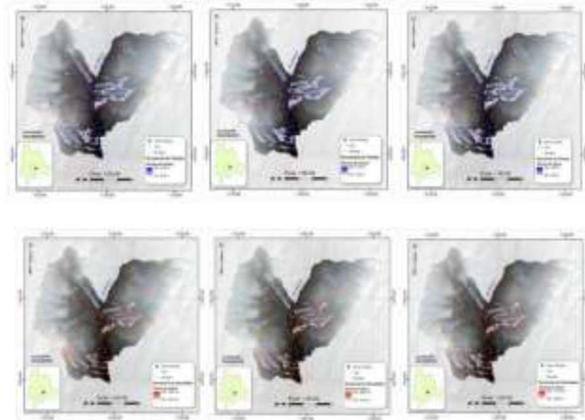


Figura 2. Ráster de tirantes (fila superior) y de velocidades de agua (fila inferior) para el municipio de Choachi para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años respectivamente

Una vez para cada punto tenemos las velocidades del agua y los tirantes, como se observa en la figura 2 y en aplicación de la fórmula (1), se puede realizar la zonificación de la amenaza para eventos hidrológicos.

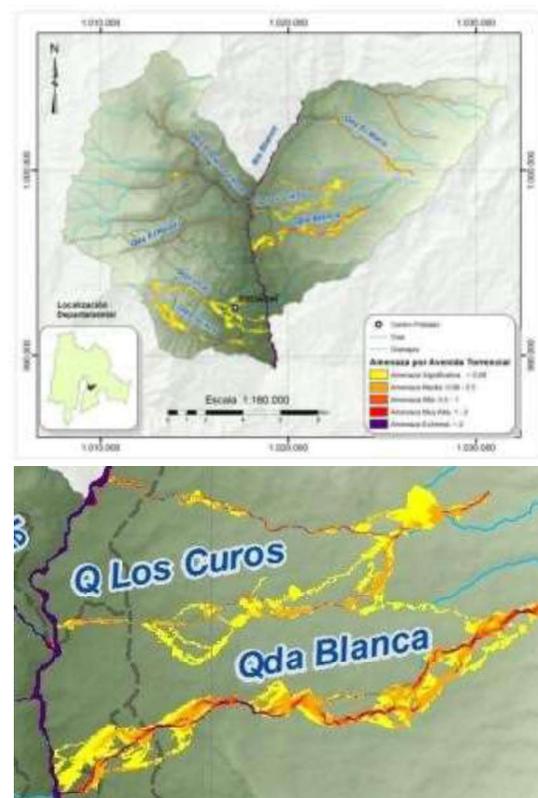


Figura 3. Zonificación de la amenaza para eventos hidrológicos para el municipio de Choachi (superior). Detalle de la zonificación de la amenaza (inferior)

En la Figura 3. se observa la zonificación de la amenaza obtenida en 5 categorías de acuerdo a la categorización utilizada, en la que el color morado representa la amenaza más extrema y el color amarillo la más ligera. Como es lógico, la amenaza se circunscribe al ámbito fluvial formado por los cauces de agua.

Estos conceptos serán validados al desarrollar un proyecto piloto, en un área municipal, enfocados en la temática de las inundaciones y avenidas torrenciales.

4. Determinación de la Amenaza para Eventos Geológicos

Como se ha comentado con anterioridad, como eventos geológicos entendemos la ocurrencia de movimientos de masa. En este caso, a diferencia de lo que ocurre con los eventos hidrológicos, es complicado relacionar un evento de movimientos de masa con una frecuencia de ocurrencia, pero sí es posible asociarlo a los denominados eventos detonadores, que son aquellos que provocan que se produzcan movimientos de masa. Los principales eventos detonadores considerados son el grado de saturación de agua en el suelo y los eventos sísmicos.

Por otro lado, la intensidad del evento también es un parámetro de difícil establecimiento. Generalmente, para la estabilidad de laderas se utiliza el Factor de Seguridad (FS), que se define como el cociente entre las fuerzas estabilizadoras y las fuerzas desestabilizadoras, de tal modo que si el FS es superior a 1, la ladera se supone estable, si es inferior a 1 se supone una ladera inestable y si es igual a 1, es una ladera en equilibrio.

Existen muchos métodos y modelos de cálculo de estabilidad de laderas, los llamados métodos de equilibrio límite, pero estos métodos son aplicables a laderas o taludes específicos y "per se" no permiten la zonificación de la amenaza, a no ser que se analizaran una por una las infinitas posibilidades de taludes y laderas a analizar.

Al no poder aplicar metodologías de equilibrio límite se deben buscar otras soluciones que puedan cuantificar la amenaza ante movimientos en masa. En este caso se optó por el modelo ESLA, desarrollado por la Universidad de Alicante

(España) y mejorado por INCLAM en su interface de entrada y salida de datos. Este modelo se basa en la incorporación del método estadístico de Montecarlo en el cálculo de la estabilidad de laderas bajo una hipótesis de talud infinito con rotura plana. Como resultado, para cada punto de territorio se obtiene una aceleración intrínseca la cual se relaciona directamente con la amenaza de que se produzca un evento de movimientos de masa.

Los datos que se requieren para este modelo son un ráster de pendientes del terreno, la caracterización geotécnica de las unidades geológicas mediante la densidad natural y saturada de los materiales, la cohesión y el ángulo de rozamiento interno y la cartografía de aceleraciones sísmicas en caso de que se quiera incorporar el sismo como un evento detonante.

Al basarse en un método estadístico, el de Montecarlo, es recomendable que cada unidad geológica considerada tenga el máximo de valores de caracterización geotécnica para un mejor resultado (densidades, cohesiones y ángulos de rozamiento interno). En el caso cundinamarqués se encontraron unidades geológicas con pocas caracterizaciones geotécnicas, lo cual podría generar problemas y dudas en los resultados, pero aun así estos fueron muy satisfactorios.

Dentro del proceso de zonificación de la amenaza para movimientos de masa se consideraron cuatro escenarios distintos: 1. Suelo no saturado sin sismo 2. Suelo no saturado con sismo 3. Suelo saturado sin sismo y 4. Suelo saturado con sismo. Evidentemente, el escenario extremo es el de suelo saturado y sismo ya que se unen los dos principales desencadenantes, y el escenario menos extremo es el de suelo no saturado sin sismo, aunque es el escenario que se considera más frecuente.

A partir de la aplicación del modelo ESLA, se obtienen resultados como los que se observan a continuación:

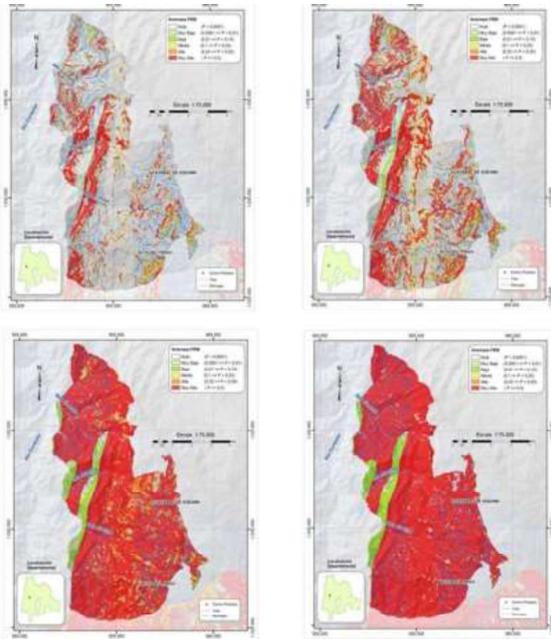


Figura 4. Zonificación de la amenaza para movimientos de masa para el municipio de Guayabal de Siquima (arriba a la izquierda, no saturado sin sismo, arriba a la derecha, no saturado con sismo, abajo a la izquierda, saturado sin sismo y abajo a la derecha, saturado con sismo).



Figura 5. Detalle de la zonificación para movimientos de masa para el caso de no saturado sin sismo

Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados de la zonificación obtenida, de tal modo que los colores verdes y amarillos indican amenazas bajas mientras que los colores naranjas y rojos indican los puntos del territorio con las amenazas más elevadas y, por tanto, más susceptibles de sufrir un evento de movimientos de masa.

Como se puede deducir a partir de la observación de la Figura 4, el principal factor desencadenante es el grado de saturación del suelo. Aun sin sismo pero con suelo saturado, la amenaza de movimientos de masa es muy alta en prácticamente todo el municipio y bastante más elevada que en los escenarios de suelo no saturado.

Como medida de la bondad del método y calibración cualitativa de los resultados, en un proceso de socialización inicial, solicitamos a la población que nos indicara qué zonas del municipio sufrían más eventos de movimientos de masa y nos los marcara en un mapa. El resultado obtenido de esta comparación se muestra en la Figura 6, en la que se observa una clara correspondencia entre las zonas marcadas por los habitantes de la zona (indicadas por el círculo negro) y las áreas con mayor amenaza, mostrándose en esta figura la amenaza obtenida para el escenario de suelo no saturado y sin sismo, que se trata del escenario más favorable y, por tanto, aquellas zonas con amenaza elevada van a ser las más susceptibles de sufrir movimientos de masa.

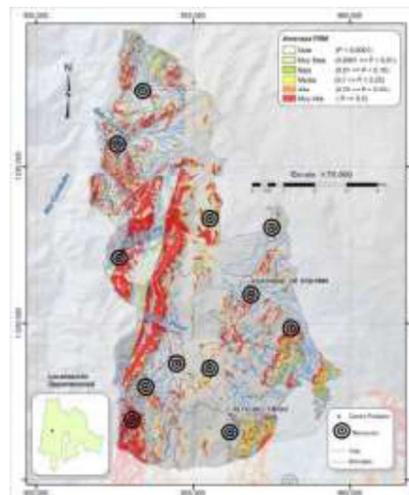


Figura 6. Correspondencia de los puntos detectados por los pobladores de la zona con los resultados del modelo para la situación de suelo no saturado sin sismo

5. Conclusiones

La primera conclusión que se extrae es que, tal como recoge la legislación, se requiere incorporar el concepto de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por eventos naturales a la planificación territorial para poder prever qué medidas reductoras del riesgo es necesario implementar y minimizar las afecciones a la población.

Para los eventos hidrológicos se recomienda utilizar metodologías de zonificación de la amenaza que incorporen como variables a considerar. Para ello es necesaria la utilización de modelos hidráulicos sean bidimensionales como el

modelo GUAD2D desarrollado por INCLAM ya que estos tienen una capacidad de generar unos resultados mucho más fiables que los generados por un modelo unidimensional.

Finalmente, para la zonificación de la amenaza para movimientos de masa en zonas amplias es poco recomendable la utilización de los modelos habituales de estabilidad de laderas basados en el equilibrio límite y, en este caso, se recomienda la utilización de modelos de estabilidad de laderas basados en métodos estadísticos como el método de Montecarlo. El modelo ESLA, modelo desarrollado por la Universidad de Alicante, es un modelo altamente adecuado para estas circunstancias con resultados altamente satisfactorios como los observados en su aplicación a los municipios cundinamarqueses.

6. Agradecimiento

Los autores queremos agradecer a todo el equipo de INCLAM y, especialmente, a las ingenieras Cristina Lobera, Mary Silva, Isabel Gómez y Berta López, por su participación y colaboración en este estudio.

También queremos agradecer a todo el equipo de excelentes profesionales colombianos que participaron en el proyecto, equipo liderado por los ingenieros Julián Serna, Sergio Amaya, Darwin Mena y Gabriel Páramo.

7. Glosario

Para clarificar el significado de algunos conceptos presentes en este artículo, se incorpora un glosario para mejor interpretación del lector.

Los principales conceptos a considerar son los de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, los cuales ya se definen con profundidad en el Apartado 2 de este artículo.

- Avenida. Elevación del agua en un curso fluvial significativamente mayor al habitual.
- Evento detonante. Suceso que al producirse genera un cambio en las condiciones de equilibrio de una ladera de tal modo que desencadene un movimiento de masa. Puede ser de origen natural (precipitaciones, sismos),

antrópico (excavaciones, cambio del sistema de drenaje natural) o animal (paso de animales).

- Inundación. Ocupación por parte del agua de una zona que habitualmente está libre de ella.
- Modelo digital del terreno. Conjunto de datos estructurados que contienen información del terreno, como la elevación de éste respecto de una cota de referencia.
- Modelo numérico. Programa informático cuyo fin es crear una simulación de un modelo abstracto de un determinado sistema mediante la resolución de una o un conjunto de ecuaciones matemáticas.
- Movimiento de masa. Corrimiento de tierras provocado por la inestabilidad de un talud o ladera por efecto de la gravedad.
- Periodo de retorno. También llamado periodo de recurrencia. Es el tiempo transcurrido entre dos sucesos de baja probabilidad. En meteorología es el tiempo medio entre dos precipitaciones iguales o superiores a una precipitación determinada.

8. Referencias

- Cardona, O. (1993). Manejo ambiental y prevención de desastres: dos temas asociados. La Red, 75- 93.
- Cardona, O. (2001). La necesidad de repensar de manera holística, los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Una crítica y una revisión necesaria para la gestión.
- CEPAL & BID. (2000). La reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres: un tema de desarrollo.

9. Autores

JORDI BARRACHINA MONTES es ingeniero geólogo y M.Sc. en ingeniería geológica por la Universitat Politècnica de Catalunya –UPC– (España), máster en administración y dirección de empresas (MBA) y posgrado en análisis de proyectos hidráulicos. Con 16 años de experiencia laboral, ha trabajado tanto en la administración pública hidráulica española, en la que realizó funciones de técnico asesor de situaciones de emergencia hidrológica, como en la empresa privada. Desde hace 4 años trabaja en el Grupo INCLAM, siendo actualmente el responsable del mercado ecuatoriano, aunque colaborando

activamente en proyectos de otros países como Colombia y Perú.

JAIME ALBERTO DUARTE CASTRO es ingeniero catastral y geodesta de la Universidad Distrital de Bogotá, master en Cooperación Internacional. Experiencia de 2 décadas en generación de cartografía, diseño de Sistemas de Información Geográfica y procesamiento de imágenes de satélite. Actualmente, gerencia el mercado de INCLAM para Colombia que desarrolla actividades en gestión del riesgo por eventos naturales y ordenación de cuencas hídricas. Así mismo, es docente e investigador de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás en la especialización de Gestión Territorial y Avalúos.