## Estimacion de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela

The use of satellite data and imagery for landslide susceptibility mapping in the Mocotíes River Basin, Mérida State-Venezuela

## Roa José Gregorio\*

Recibido: noviembre, 2005 / Aceptado: octubre, 2006

#### Resumen

En el presente trabajo se propone la utilización de imágenes y datos satelitales para la evaluación rápida y efectiva de la susceptibilidad y amenazas por deslizamientos. Como caso de estudio se seleccionó la cuenca del río Mocotíes en los Andes venezolanos, la cual fue afectada por un proceso de deslizamientos / flujo de detritos durante el mes de febrero de 2005. En el transcurso de las tres semanas posteriores al evento, se elaboró un mapa de susceptibilidad y tres de amenazas por deslizamientos para la mencionada cuenca, con información fundamentalmente proveniente de los programas SRTM y LANDSAT. El modelamiento y final integración de los datos se realizó a través de una Evaluación Espacial Multicriterio.

**Palabras clave**: susceptibilidad; deslizamientos; flujo de detritos; evaluación espacial multicriterio; imágenes de satélite.

#### Abstract

During February 11 and 12, 2005; a debris flow-landsliding event affected a populated basin in the Venezuelan Andes, causing an intensive damage. Three weeks later, the first landslide susceptibility and hazard maps for that area were elaborated based mostly on remotely sensed imagery and data such as those coming from the SRTM and LANDSAT programs. The main idea of this exercise was to illustrate the use of satellite data and imagery for natural disaster issues, particularly its potential use to perform a rapid disaster assessment. The processing of the data layers generated from the satellite information was carried out in a raster oriented GIS environment. Spatial Multicriteria Evaluation methodology was applied for modelling and final data integration.

Key words: landslide hazard; debris flow; spatial multicriteria analysis; satellite imagery.

<sup>\*</sup> Universidad de Los Andes, Área de Geografía, Grupo GEOCIENCIA, Trujillo - Venezuela, e-mail: jose\_roa@ yahoo.com

## Introduccion

La cuenca del río Mocotíes es una unidad hidrográfica de 511 Km<sup>2</sup>, de relieve montañoso, con un rango altitudinal entre 300 y 3600 msnm. La cuenca está definida por dos vertientes asimétricas y es atravesada por un amplio y definido valle aluvial (río Mocotíes). Se localiza en el frente noroeste de los Andes venezolanos y forma parte de los valles centrales longitudinales de la cordillera de Mérida.

Durante los días 11 y 12 de febrero del 2005, intensas precipitaciones afectaron el occidente de Venezuela y particularmente la zona andina, donde se localiza la cuenca del río Mocotíes. Dado que los meses de diciembre, enero y febrero se corresponden, históricamente, con el período seco de la vertiente lacustre de la cordillera de Mérida, este inusual evento fue ocasionado por una vaguada atmosférica, que generó lluvias extraordinarias, particularmente en nuestra área de análisis, la cuenca del Mocotíes (Figura 1).

Este evento meteorológico sirvió como detonante de todo un proceso de movimientos de masa y erosión en las vertientes (por el intenso escurrimiento y pérdida de cohesión de los suelos debido a su saturación hídrica), que dada su momentaneidad y simultaneidad, generó destructivos flujos de detritos (*debris flow*), los cuales, en el caso del área analizada, se canalizaron a lo largo del curso del río Mocotíes y sus afluentes. Si bien la intrincada topografía presente en esta cuenca permitió en gran parte, el confinamiento de los flujos de detritos en ciertos segmentos, éstos fueron totalmente perjudiciales, causando pérdidas humanas y de infraestructuras. El impacto negativo de este evento natural en la cuenca del Mocotíes está asociado directamente a la vulnerabilidad de ciertas áreas a este tipo de fenómenos, siendo esta vulnerabilidad una funesta combinación de áreas susceptibles a deslizamientos / flujos de detritos y una arbitraria ocupación / uso antrópico de éstas (Crozier, 1986).

Dos semanas despúes de la tragedia suscitada en la cuenca del río Mocotíes, se elaboró un mapa preliminar de susceptibilidad a deslizamientos con base en la información satelital provista por el Global Land Cover Facility (GLCF, 2005). Una semana más tarde se añadió información sobre la distribución normal de las precipitaciones en el área de estudio, la cual, al incorporarse al mapa previo de susceptibilidad, generó tres mapas de amenazas por deslizamientos (la información sobre la distribución anual promedio de las precipitaciones se dividió en tres períodos estacionales).

La técnica aplicada fue la Evaluación Espacial Multicriterio (EEM). Ésta se define como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones, mediante la descripción, ordenación, jerarquización y selección de alternativas de acuerdo a ciertos postulados, los cuales a su vez dependen de los objetivos planteados (Gómez y Baredo, 2005). En este trabajo, el objetivo planteado fue la zonificación de la susceptibilidad y amenazas por deslizamientos en la cuenca del Mocotíes, para lo cual se asumió una serie de factores involucrados en la generación de deslizamien-



Figura 1. Imagen satelital GOES infrarrojo, mostrando la nubosidad generada por las bajas presiones de la vaguada. El punto máximo del desarrollo nuboso, asociado con las mayores precipitaciones, se identifica por un tono blancuzco localizado en la orilla sur del lago de Maracaibo. El fenómeno hidro-meteorológico de febrero 2005, maximizó su efectividad en la región de la cuenca del río Mocotíes debido a: la ubicación de la cuenca dentro de las zonas de mayor precipitación, su orientación (sureste-noroeste), paralela a los corredores de vientos y desplazamiento de la trayectoria de bajas presiones, y la exposición general de la pendiente del valle. Imagen satelital en pseudo color tomada de NASA (2005), gráficos de la cuenca corresponden al autor

tos (pendientes, disección del relieve, distancia a drenajes, litología, cobertura vegetal y distribución temporal de las precipitaciones), los cuales fueron luego ordenados y jerarquizados de acuerdo a un postulado único que es su proclividad a generar deslizamientos. De esta manera, se elaboró una serie de construcciones teóricas y articulaciones lógicas que pretendieron explicar y predecir el comportamiento de los agentes o factores decisores reales. Finalmente, estos factores fueron seleccionados y compensados para modelar los mapas de susceptibilidad y amenazas aquí ofrecidos. Si bien los flujos de detritos fue la expresión espacial más resaltante del evento ocurrido en la cuenca del Mocotíes, este análisis está dirigido solamente a la estimación de las áreas susceptibles y bajo amenaza por deslizamientos.

## Justificación

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2006) contempla la elaboración de Rápidas Evaluaciones Ambientales (REA) o Rapid Environmental Assesment, en situaciones inmediatas a la ocurrencia de un desastre natural (Benfield Hazard Research Centre et al., 2003). Una REA se puede usar desde momentos antes de la contingencia hasta 120 días luego de su ocurrencia. Esta evaluación no proporciona respuestas a como resolver los problemas ambientales, pero si provee suficiente información a las organizaciones que atienden la emergencia, permitiendo así la formulación de soluciones a muchos de los aspectos negativos identificados. Un ejemplo de REA desarrollado por el Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP, 2006), lo encontramos en el desastre ocurrido debido al tsunami del 26 de diciembre del 2004 en el sudoeste asiático. En este caso se identificó, como impedimento en el proceso de recuperación post-desastre, la falta de mapas de vulnerabilidad y riegos ambientales, así como de información ambiental básica. De allí que, en el informe final, se recomienda una detallada evaluación ambiental y de vulnerabilidad, la cual se considera un punto critico dentro de los planes de reconstrucción y rehabilitación.

En nuestro caso, si bien los flujos de detritos ocurridos en la cuenca del río Mocotíes tuvieron como factor detonante la intensa precipitación, los factores pasivos (pendientes, litología, etc.) jugaron un rol fundamental en su desarrollo y magnitud, siendo éstos, de mejor comprensión y modelamiento que la predicción de eventos hidrometeorológicos (Nettleton et al., 2005). Por lo tanto, la zonificación de la cuenca del Mocotíes, en áreas de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos, es un paso fundamental para la comprensión de este tipo de fenómenos así como para la formulación de futuras estrategias para la reducción de la vulnerabilidad y, por ende, del riesgo asociado con amenazas naturales. La susceptibilidad describe donde podría generarse un deslizamiento, tomando en cuenta el potencial de inestabilidad que presenten las variables geográficas asociadas a este tipo de eventos (Ej. pendientes, distancia a ríos o carreteras, cobertura vegetal, etc.), (Cruden, 1991), mientras que la amenaza se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente dañino (flujo de detritos / deslizamientos), en un período específico para un área determinada (Varnes, 1984).

Considerando lo anterior, en este trabajo se propone la utilización de métodos y procedimientos rápidos, razonables y de fácil aplicación en cualquier sistema de información geográfica (SIG), que permitan una pronta respuesta a requerimientos propios de toda REA, tales como el mapeo de susceptibilidad y vulnerabilidad de un área a determinado tipo de amenaza natural. Igualmente, se hace énfasis en el uso de información teledetectada, debido a que ésta se consigue en formatos digeribles por los SIG, facilitando su procesamiento y consecución del resultado final que sería al menos una versión preliminar del mapeo de sensibilidad, vulnerabilidad y amenaza natural.

## **Objetivos**

El objetivo general de este trabajo fue la elaboración de los mapas de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos para la cuenca del río Mocotíes, a través de la manipulación de imágenes y datos satelitales, ilustrando así la validez y conveniencia de la información teledetectada tanto para el análisis del contexto general, como para los factores involucrados en todo desastre natural. Específicamente se elaboró: un mapa de susceptibilidad a deslizamientos y tres mapas de amenazas por deslizamientos; estos últimos según la variación estacional de las lluvias. Como objetivos particulares estuvieron: la aplicación de la técnica de Evaluación Multicriterio en un estudio físico-geográfico, la demostración de su utilidad en un típico caso de aplicación de una Rápida Evaluación Ambiental (REA) y, finalmente, una aproximación a su validación mediante el uso de información remota.

## **Datos y fuentes**

Para la elaboración final del mapa 'Susceptibilidad a Deslizamientos' se utilizaron mapas de pendientes (en grados), relieve interno (o disección del relieve). y distancias a drenajes (buffer zone); todos extraídos a partir de un Modelo de Elevación Digital (MED) de 90 m de resolución, construido con los datos de SRTM (Shuttle Radar Topographical Misión). Igualmente, fue necesario estimar la cobertura vegetal de la cuenca a través del cálculo del NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), de una imagen LANDSAT ETM+ del 09 de marzo, 2003, con 28.5 m de resolución. Esta imagen fue georeferenciada y rectificada al MED (datum WGS-84, UTM 19N), y calibrada radiométricamente según el procedimiento estándar descrito por Chander y Markham (2003). Dada la diferente resolución espacial de la data (el MED está a 90 m mientras que la imagen Landsat posee 28.5 m resolución de celda), fue necesario generar en el MED treinta sitios de convergencia del drenaje para luego utilizarlos como referencia con los correspondientes sitios de convergencia registrados por la imagen Landsat, obteniendo un error RMS cercano a 1 (transformación Afine). Se asume que este error es minimizado, posteriormente, dado que el NDVI resultante del tratamiento de la imagen Landsat es acopado por el método del vecino más cercano a la resolución de 90 m del MED. Los productos LANDSAT y SRTM se consiguen libremente en el GLCF (www.landcover.org).

La cobertura o mapa relativo a unidades litológicas fue elaborado con base al mapa geológico-estructural de Venezuela (Bellizia *et al.*, 1976), y la información aportada por el 'Código Estratigráfico de

Cuencas Petroleras de Venezuela' (PDV-SA-INTEVEP, 2005). Si bien la información aportada por el código estratigráfico mencionado es detallada, el mapa obtenido a partir de esta fuente es generalizado v probablemente no definido, en cuanto a los límites de las unidades litológicas, debido a su escala (1:500.000), por lo que fue necesario precisarlos mediante dos técnicas: 1) lineamientos, en donde ciertos límites de contacto son claramente definidos por lineamientos ilustrados en el MED y sus derivados (formas y curvatura de las pendientes), (ejemplo de ello son ciertos límites entre las unidades de origen metamórfico e ígneo, e inclusive es posible estimar lineamientos neotectónicos en depósitos cuaternarios a lo largo del valle del Mocotíes). Sin embargo, dado que nuestro interés se limitó al factor litológico, para la estimación del límite de los sedimentos se estableció: 2) la inclinación de la pendiente, donde se asume que los terrenos de fondo de valle, con áreas contiguas de pendientes menores a 12°, potencialmente corresponden a terrazas y abanicos aluviales, constituidos por conglomerados y aluviones cuaternarios.

Para la extracción de estas áreas de nuestro MED se aplicó un procedimiento similar a la técnica descrita en Miliaresis (2001), quien a partir del procesamiento de un MED define un algoritmo de segmentación para la extracción de Bajadas y Playas en el Valle de la Muerte, California, lo cual fue validado luego exitosamente, a través de imágenes Landsat ETM+ (para una completa documentación se sugiere revisar el portal: http://hydrogis.geology.upatras. gr/PAGE/\_lists.htm). El anexo 6.2 ofrece un mapa sobre las unidades litológicas identificadas y el peso asignado.

Es necesario aclarar que características relativas a fallamientos estructurales, foliación y buzamiento en las unidades litológicas no fueron analizadas en este trabajo, por cuanto demandaban un mayor detalle y trabajo de campo, ambos no concebidos en el alcance inicial de este análisis. Igualmente, mayor información sobre el procesamiento de los mapas factores se ofrece en el apartado "La normalización de los mapas generados", e ilustrado en los anexos 6.1, 6.2 y 6.3.

Posteriormente, el mapa de susceptibilidad resultante se utilizó para elaborar los mapas de amenazas por deslizamientos, para lo cual se le adicionaron los mapas de distribución de la precipitación en la cuenca del Mocotíes; estos últimos se generaron empleando una interpolación tipo kriging a los datos puntuales de registros mensuales de precipitación (por estación meteorológica o climatológica), ofrecidos por la Dirección de Climatología del Ministerio del Ambiente (MAR-NR, 2004). Los registros de precipitación muestran el comportamiento promedio de las precipitaciones en la cuenca del Mocotíes, de tal manera que con base en las tendencias descritas en la figura 2, se producen tres mapas cada uno representando un período de cuatro meses: Seguía (diciembre-marzo), comienzo del período lluvioso (abril-julio) y final del período lluvioso (agosto-noviembre), (Anexo 6.3).



Figura 2. Distribución mensual de las precipitaciones en estaciones relativas a la cuenca del río Mocotíes. Basado en datos del MARNR, 2004

Los mapas, imágenes y datos originales empleados en este análisis fueron procesados, clasificados, estandarizados, compensados y finalmente combinados, mediante las capacidades de ENVI 4.0 (Research Systems Inc., 2004) e ILWIS 3.2 (ITC, 2003), los cuales son soportes lógicos orientados a formato de celdas (raster), facilitando así el trabajo con imágenes satelitales.

## Método

La evaluación de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos ejecutada en este análisis, se realizó siguiendo los procedimientos exigidos a toda Evaluación Espacial Multicriterio (EEM) y señalados por Saaty (1990). En este análisis, la EEM consistió en dos partes básicas:

## La descripción del evento ocurrido en la cuenca del río Mocotíes, mediante:

- La discriminación de los procesos involucrados en el evento.
- La selección de factores ambientales relativos a los procesos.
- La selección y producción de la cartografía representativa de estos factores.

*Descripción del evento*. En términos generales, un flujo de detritos es un rápido movimiento de masa compuesto de sólidos granulares, agua y aire (Cruden y Varnes, 1996), que fluye en dirección de la pendiente y es frecuentemente confinado a un canal preexistente (Haeberli *et al.*, 1990). Sus típicas formas de acumulación / sedimentación son los diques laterales a ambos lados del corredor del flujo y un abanico aluvial final de caótica sedimentación (Zimmermann, 1990). De acuerdo con Zimmermann y Haeberli (1992), los detonantes de un flujo de detritos pueden ser directos (ejemplo: eventos hidrometeorológicos) o indirectos (ejemplo: susceptibilidad a erosión v deslizamientos, pendientes, etc.). En nuestra área de análisis asumimos que las fuertes precipitaciones del 11 y 12 de febrero del 2005, contribuyeron a la generación simultánea de deslizamientos que luego catalizaron la formación de flujos de detritos, los cuales se magnificaron debido a los factores y/o características hidrogeomorfológicas presentes en el área (Figura 3).

Siguiendo el formato metodológico, este evento puede ser analizado por factores, procesos y criterios. Los factores caracterizan los parámetros, propiedades y agentes que contribuyeron al fenómeno, mientras que los procesos describen los diferentes estados del evento. Los procesos vienen a ser el marco de acción e interacción de los conceptos descritos en los factores.

Basándonos en la observación empírica del evento se deduce la siguiente interacción de procesos (Figura 4):

- La intensa precipitación generó un vertiginoso escurrimiento que participó activamente en la conformación de caudales y fuerte erosión laminar. Igualmente, la infiltración de este escurrimiento sobresaturó el terreno propiciando movimientos de masa.
- Estos movimientos de masa se asociaron a la pérdida de cohesión en los perfiles superiores del suelo y a la susceptibilidad intrínseca de éstos a deslizamientos, resultando en deslizamientos superficiales (*shallow slides*), y potenciando el carácter erosivo.
- Esta inestabilidad aportó el material necesario que luego se combinó al caudal proveniente del escurrimiento, generando el flujo de detritos y posterior sedimentación.



Figura 3. Factores relativos al proceso de flujo de detritos / deslizamientos en la cuenca del río Mocotíes



Figura 4. Interacción de los procesos del flujo de detritos / deslizamientos, febrero 12/2005, cuenca del río Mocotíes

Los criterios son la unidad pragmática de evaluación indirecta de la magnitud de los procesos. Un criterio es la base de una decisión que puede ser medida y evaluada (Eastman et al., 1995). El cuadro 1 describe los factores -conceptualmente señalados-, los procesos observados en el evento analizado y los criterios considerados. La definición de criterios guarda estrecha relación con la esencia y disponibilidad de los datos, por ejemplo no todos los factores señalados en el cuadro 1, que explicarían con mayor propiedad los procesos observados, son de fácil obtención y disponibilidad (por esta razón, a falta de datos de intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones, en este análisis se utilizaron los promedios mensuales, luego acumulados en períodos tetramensuales); de tal manera que este análisis se orientó al uso de la información teledetectada por ser los criterios considerados factibles de obtener a partir de este tipo de fuentes.

**El modelamiento de sensibilidad y amenaza**. En esta fase, los mapas generados (inclinación de las pendientes, relieve interno, cobertura vegetal, unidades litológicas, distancia a cursos de agua y distribución tetramensual de las precipitaciones), a partir del tratamiento bajo SIG de la información satelital y otras fuentes documentales, deben ser tratados para incorporarlos a la EEM, mediante:

## La normalización de los mapas generados

Los valores contenidos en los mapas generados tienen diferentes significados y unidades de medida, por esta razón y para poder compararlos se requiere estandarizar sus valores a una misma unidad de medida, por ejemplo a una escala de o a 1 (o representa la más baja potencialidad del criterio a desarrollar deslizamientos, mientras que 1 representa la más alta potencialidad a encontrar en el criterio para

Factores				
	Intensidad	Drocococ	Criterios	
Precipitaciones	Duración	Procesos		
	Período de retorno			
	Área			
Hidrología de la cuenca	Velocidad de escurrimiento superficial	Escurrimiento	Pendientes	
	Infiltración	Maximiantas da masa		
Susceptibilidad a desliza- mientos / erosión	Morfología	Movimientos de masa	Relieve interno	
	Pendientes	Deslizamientos super-		
	Geología	ficiales	– Cobertura vegetal	
	Uso de la tierra	For all for an annual time a		
	Fuente / perfil de alteración	Erosion momentanea		
Fuentes y propiedades de	Movilidad			
	Tamaño de los materiales	- Fluie de detuites	Litologia	
Corredores de flujos	Geometría	- Flujo de detritos		
	Potencial de entrampamiento			
	Abanicos aluviales	Cadimanta di Ka	Distancia a cursos de agua	
	Bancos laterales	Segimentación		

Cuadro 1. Factores, procesos y criterios involucrados en el flujo de detritos ocurrido en febrero 12	/ 2005,
cuenca del río Mocotíes	

desarrollar deslizamientos). En nuestro caso, los mapas fueron estandarizados por el método del valor máximo, el cual consiste en dividir los valores de cada mapa por su máximo valor a encontrar (Castellanos *et al.*, 2005; Jiang and Eastman, 2000; Malczewski, 1999).

Cuando en los mapas los criterios están representados por valores numéricos racionales tales como los mapas de pendientes, relieve interno y distancia a cursos de agua, este procedimiento es sencillo. Por ejemplo, el mapa de inclinación de las pendientes generado a partir del procesamiento del MED contiene valores de pendientes entre o° y 60,99°, aplicando el método del valor máximo dividimos este mapa entre su valor máximo (60,99°), resultando en el mapa normalizado de pendientes (interpretado ya como una cobertura de criterio), cuyos valores oscilan entre o y 1, y siguiendo el postulado previamente mencionado, la propensión de esta cobertura de criterio a generar deslizamientos es interpretada como baja (valores tendentes a cero) a muy alta (valores tendentes a 1); igual tratamiento reciben los mapas de relieve interno y distancia a cursos de agua sólo que en este último se decidió establecer dos tipos de distancias: una franja de 100 m (ambos lados) para los cauces considerados principales y otra de 50 m para otros cauces, asignándose el valor de 1 y 0,5 respectivamente (para mayor ilustración ver Anexos 6.1 y 6.3).

Mapas como el NDVI (indicativo de la densidad de la cobertura vegetal), cuvos valores fluctúan entre -1 y 1, debe ser llevado a una escala de valores positivos para luego estandarizarlo. Es de hacer notar que en este análisis se trabajó con el NDVI normalizado inverso, el cual es meramente la inversión de los valores del índice original; de esta manera, los valores bajos representaran alta cobertura vegetal mientras que los valores altos una baja cobertura, adecuándose de esta manera su combinación con las demás coberturas de criterios, donde altos valores representan mayor propensión a deslizamientos y viceversa (Anexo 6.2).

El mapa litológico se reclasificó a una asignación arbitraria de pesos según el comportamiento típico de los materiales representados a la meteorización y erosión, asignando valores tendentes a 1 (o de alta propensión) a deslizamientos a unidades litológicas arcillosas (texturas finas), sedimentadas en ambientes paleo-marinos, y valores tendentes a o a los conglomerados y aluviones cuaternarios (Cuadro 2). Esta clasificación no toma en cuenta las condiciones locales de meteorización y aunque tal información enriquecería cualquier análisis de susceptibilidad a deslizamientos, no fue parte del alcance de este trabajo la determinación del estado de meteorización de éstos.

Con respecto a los mapas de distri-

bución de la precipitación se produjeron tres mapas representativos de los valores acumulados de precipitación en períodos tetramensuales (abril a julio, agosto a noviembre y diciembre a marzo). Para su normalización, el valor máximo denominador debe ser el valor máximo de precipitación ocurrido durante el año (495.6 mm en este caso, correspondiente al acumulado del período agosto a noviembre); de esta manera, los mapas originales son normalizados a coberturas de criterios. Posteriormente, para poder combinar estas coberturas de criterios en un mapa final, se debe asignar pesos que compensen la participación de cada una de estas coberturas en el proceso de deslizamientos. Por tanto, coberturas de criterios que tengan mayor participación en el proceso demandarán un mayor peso. El cuadro 3 esquematiza los rangos de valores máximos y mínimos encontrados en los mapas generados y en las subsiguientes coberturas de criterios. Es necesario recordar que a excepción del mapa litológico, en su condición de mapa generado, todos los demás mapas generados y normalizados están representados en un dominio de valor y no de clases. Los anexos 6.1, 6.2 y 6.3 son ilustrativos de estos mapas y la levenda incluida es sólo indicativa y con fines de mejorar la representación cartográfica (stretch), por lo tanto no aluden a clases.

#### La determinación de los pesos

Para la determinación de los pesos dados a los criterios, en este trabajo se empleó la Matriz de Jerarquización Analítica (MJA)

CÓDIGO	FORMACIÓN*	LITOLOGÍA*	VALOR ASIGNADO
KS2	La Luna	Lutitas, pizarras bituminosas con intercalaciones de pizarras y calizas	1.0
КІ	Aguardiente	Areniscas calcáreas duras con intercalaciones de pizarras y calizas	0.9
Pzc3-p3	Sabaneta	Meta conglomerados de matriz arenosa	0.7
Pzc2-p2	Mucuchachí	Filitas, pizarras, meta-areniscas	0.6
Pzq1-s1	Tostós	Filitas, pizarras, esquistos	0.5
PESi	Asoc. Sierra Nevada	Gneiss granítico, esquistos micáceos	0.4
PzYa3	Intrusivos ácidos del Pz. superior	Granitos intrusvos ácidos, pegmatitas, granodioritas	0.1
Qp /Q <sub>Hol</sub>	Sedimentos	Aluvión, conglomerados no consolidados	0.1

Cuadro 2	. Valores asignad	os a las unidade	s litológicas j	presentes en	el área de e	studio

\* Información litológica y formación fue condensada del Código Estratigráfico, PDVSA, 2005

Cuadro 3. Valores máximos y mínimos de los rangos representados en los mapas generados y no	rmalizados
en este análisis	

	Mapas g	enerados	Mapas normalizados		
Factores (unidades de medida)	Valor min.	Valor max.	Valor min.	Valor max.	
Inclinación de las pendientes (ángulo de inclinación)	0	60,99	0	1	
Relieve interno (m)	2	413	0,005	1	
Cobertura vegetal (ndvi)	-1	0,63	0	1	
Litología	Clases litológicas		0,1	1	
Distancia a cursos de agua (m)	0	2000	0,5	1	
Precipitación acum. Abril a julio (mm)	278,2	452,2	0,6	0,9	
Precipitación acum. Agosto a noviembre (mm)	328,5	495,6	0,66	1	
Precipitación acum. Diciembre a marzo (mm)	123,3	235,4	0,3	0,5	

o Analytic Hierarchy Process (AHP). Este método, desarrollado por Saaty (1990), se basa en el desarrollo de prioridades (en este caso, la importancia del criterio para la generación de un proceso de deslizamiento), que a su vez son derivadas a partir de una evaluación de pares de concordancia o Pairwise, llamados así debido a que sólo se permite el análisis de relación de un par de criterios a la vez.

Luego de identificar los pares de criterios, éstos son cualificados y cuantificados mediante ciertos parámetros (Huang *et al.*, 2003). En este análisis, cada parámetro asigna un puntaje entre 1 y 4 de acuerdo al nivel de importancia concedida por el investigador a la relación de pares analizados (Cuadro 4). Estos valores de pares inteligentes son luego ingresados a la MJA (Cuadro 5), convirtiendo esta evaluación subjetiva en un conjunto de pesos lineares (Malczewski, 1996). Una extensa documentación en español sobre la construcción, funcionamiento y usos de la Matriz de Jerarquización Analítica se encuentra en Gómez y Baredo (2005).

## La construcción del mapa de susceptibilidad y de los mapas de amenazas por deslizamientos

Una vez procesados y estandarizados los mapas generados a coberturas de criterios se combinan tomando en cuenta los pesos relativos calculados en la Matriz de Jerarquización Analítica, tal como se ilustra en la figura 5. Para la construcción del

# Cuadro 4. Parámetros usados para la calificación / cuantificación de los pares de concordancia o Pairwise de los criterios involucrados en el flujo de detritos (febrero 12, 2005), cuenca del río Mocotíes

NIVEL DE IMPORTANCIA	DEFINICIÓN	DESCRIPCIÓN
1	lgual preferencia	Los dos criterios (x, j) contribuyen de igual manera al proceso de deslizamiento
2	Moderada referencia	Pasadas experiencias favorecen ligeramente al criterio (x) sobre el otro (j)
3	Fuerte preferencia	Prácticamente la dominancia del criterio (x) sobre el otro (j) está demostrada
4	Absoluta preferencia	Existe evidencia que determina la supremacía del criterio (x)

#### Cuadro 5. Determinación de los pesos de los criterios mediante la Matriz de Jerarquización Analítica (MJA)

MATRIZ DE JERARQUIZACIÓN ANALÍTICA (MJA) (j)	PENDIENTES	RELIEVE INTERNO	COBERTURA VEGETAL	LITILOGÍA	DISTANCIA A CURSOS DE AGUA	Σxjj/n	PESO RELATIVO (Σxij / n) / (Σxj)
PENDIENTES	1	2	3	3	4	2.6	0.33
RELIEVE INTERNO	0.5	1	3	3	4	2.3	0.29
COBERTURA VEGETAL	0.33	0.33	1	2	3	1.33	0.17
LITOLOGÍA	0.33	0.33	0.5	1	4	1.23	0.16
DISTANCIA A CURSOS DE AGUA	0.25	0.25	0.33	0.25	1	0.42	0.05
					Σxj	7.88	1

mapa de susceptibilidad a deslizamientos a partir de los nuevos datos, se combinaron sólo las coberturas que representaban los factores pasivos o intrínsecos al proceso de deslizamiento analizado. De esta manera, el álgebra para el mapa de susceptibilidad sería:

SUSCEPTIBILIDAD = 0,33 (PENDIENTES) + 0,29 (RELIEVE INTERNO) + 0,05 (CINTURONES DE DRENAJE) + 0,17 (COBERTURA VEGETAL) + 0,16 (UNIDADES LITOLOGICAS) (1)

Debido a que la amenaza es el resultado de la susceptibilidad anteriormente calculada, más el efecto de un agente externo catalizador de la inestabilidad, en este análisis utilizamos los mapas de distribución promedio de la precipitación en la cuenca del Mocotíes como el agente detonante. Para esta adición se consideró nuevamente la asignación de pesos, de una manera similar al anterior proceso, pero que dada su simplicidad (al ser sólo dos criterios a combinar) no es ilustrado aquí. Se consideró que la susceptibilidad intrínseca de la cuenca tiene mayor responsabilidad en los procesos de deslizamientos que la ocurrencia de precipitaciones, de allí que los mapas de amenazas fueron calculados por las formulas:

AMENAZAS POR DESLIZAMIENTOS (DIC-MAR) = (0.7) SUSCEP-TIBILIDAD + 0,3 (pp norm. DICIEMBRE-MARZO)

AMENAZAS POR DESLIZAMIENTOS (ABR-JUL) = (0.7) SUSCEPTI-BILIDAD + 0,3 (pp norm. ABRIL - JULIO)

AMENAZAS POR DESLIZAMIENTOS (AGO-NOV) = (0.7) SUSCEP-TIBILIDAD + 0,3 (pp norm.AGOSTO-NOVIEMBRE)

(2)

Los valores finales que conforman tanto el mapa de susceptibilidad como los de amenazas pueden ser editados en una escala de o (menor susceptibilidad o amenaza) a 1 (mayor susceptibilidad o amenaza), por lo que la levenda de éstos pudiera estar basada en esta gradación de valores de 0 a 1; sin embargo, considerando que el usuario final demanda una mayor simplicidad en la lectura de estos mapas, se procedió entonces a clasificarlos en la habitual escala de cuatro niveles: Bajo, Moderado, Alto y Muy Alto. Para ello es necesario calcular el diagrama de frecuencias o histograma del mapa y la curva de acumulados, definiendo entonces los valores límites entre las clases en las inflexiones de la curva. Igual tratamiento se hace con los mapas de amenazas, solo que los valores límites entre las clases han de ser iguales para los tres mapas; en este caso, se utilizó el histograma de valores medios (el mapa de amenazas para el primer período lluvioso, abril-julio), para definir los valores límites a aplicar en el conjunto de mapas. La figura 6 ilustra el histograma de frecuencias - curva de acumulados del mapa calculado de susceptibilidad y los dominios considerados para su clasificación en cuatro clases (Anexo 1).

## Lectura de los mapas de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos (Anexo 1), fragmenta la cuenca del Mocotíes en áreas categorizadas se-



Figura 5. Datos, mapas generados o de criterios y pesos asignados para la elaboración de los mapas de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos en la cuenca del Mocotíes. Nótese que cuatro de los mapas relativos a pendientes, relieve interno, red-cinturones de drenaje y cobertura vegetal fueron obtenidos del procesamiento de datos e imágenes satelitales. Litología y precipitaciones provienen de fuentes tradicionales de información

gún su potencial latente de inestabilidad, mientras que en los mapas de amenazas (Anexos 2, 3 y 4), las áreas están categorizadas de acuerdo a una probable ocurrencia de deslizamientos al cumplirse dos condiciones: la existencia de una susceptibilidad (factor pasivo), frente a un agente detonante (factor activo); en este caso son consideradas las lluvias. Por esta razón, en los mapas de amenazas la intensidad de la susceptibilidad es incrementada o disminuida de acuerdo a



Figura 6. Histograma de frecuencias y curva de acumulados del mapa calculado de susceptibilidad, y dominios considerados para su clasificación en cuatro clases

la magnitud de las lluvias; por ejemplo, la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos durante el período seco (Anexo 2), es menor que durante el segundo período lluvioso (Anexo 4), siendo sin embargo la susceptibilidad a deslizamientos teóricamente la misma en ambos períodos (Anexo 1).

Las áreas clasificadas como susceptibles y de amenaza a deslizamientos en estos mapas, reflejan la potencialidad de iniciarse un proceso de deslizamiento en sectores así evaluados, pero no necesariamente indican la distancia que puede recorrer el material deslizado o donde éste (o los flujos de detritos) se transporta y deposita; de allí que los cauces no son clasificados como áreas de alta o muy alta susceptibilidad. Se supone una amenaza adicional aguas abajo de las áreas clasificadas como de muy alta susceptibilidad y/o amenaza en los mapas ofrecidos, y en los trayectos y desembocaduras de los drenajes de estas áreas, particularmente si los cauces no son encajonados y atraviesan áreas de baja pendiente, pero tal modelamiento no está contenido en la propuesta de este trabajo.

Debido al mayor peso asignado a los criterios de pendientes y relieve interno

(ver ecuación 1), los mismos son determinantes en la estimación de áreas susceptibles a deslizamientos; sin embargo, también es posible discernir la presencia e importancia de los demás criterios en ciertas áreas de la cuenca del Mocotíes. A grandes rasgos tenemos que las áreas menos susceptibles a deslizamientos son los fondos de valle, particularmente el valle del río Mocotíes (Anexo 1); no obstante, tal como se explicaba anteriormente estas áreas son vulnerables a los flujos de detritos generados en las cuencas superiores. La vertiente norte del río Mocotíes presenta una susceptibilidad gobernada por el rápido desnivel topográfico presente en sus cauces, lo cual facilita la erosión basal y disección de los lechos; esta característica es notable aguas abajo de la ciudad de Tovar, donde los niveles altos y muy altos de susceptibilidad se disponen mayormente a lo largo de los cauces, mientras que aguas arriba de Tovar, la susceptibilidad tiende a ampliarse a toda la superficie que conforma las subcuencas, posiblemente explicado por el cambio a litologías mas blandas o alteradas (esta zona está dentro del cinturón de fallamiento del Mocotíes) y la reducción de la cobertura vegetal en algunas subcuencas.

Aunque la superficie de escurrimiento presente en la vertiente norte es menor que en la vertiente sur, investigaciones han demostrado que a menor tamaño de la cuenca, menor longitud de su pendiente y a mayor ángulo de inclinación la eficiencia del escurrimiento es mayor (FAO, 1991; Kanji *et al.*, 2000). Por esta razón, las subcuencas localizadas en la vertiente norte del río Mocotíes, poseen un considerable potencial de generación de flujos y son afectadas a su vez por períodos de lluvias intensas (Figura 2; Anexos 3 y 4); por lo tanto, las medidas a tomar para la mitigación de este tipo de susceptibilidad y amenaza podrían facilitar el escurrimiento a través de infraestructuras relativas y mantenimiento de los cauces.

La vertiente sur del río Mocotíes es mas extensa y posee subcuencas de mavor desarrollo, lo que indudablemente contribuyó al evento flujo de detritos / deslizamientos analizado. En toda esta vertiente, las áreas consideradas de alta a muy alta susceptibilidad / amenaza por deslizamientos (Anexos 1, 2, 3 y 4), se corresponden, mayormente, con zonas de altas pendientes y de relieve muy disectado. Es posible advertir dos patrones de susceptibilidad y amenazas en esta vertiente: para la parte suroeste es sumamente activo y controlado, al parecer por procesos de erosión basal retrogresiva a lo largo de los principales cauces y particularmente en sus cuencas altas. En la parte sureste, la susceptibilidad y amenazas están mucho más dispersas; al parecer, las pendientes y cobertura vegetal juegan un rol principal, por lo que los movimientos de masa están más relacionados con la erosión de suelos y saprolitos en terrenos de muy poca protección vegetal. Es de hacer notar que según los mapas de distribución de la precipitación generados (Anexo 6.3), esta zona es la más lluviosa y húmeda de toda la cuenca del Mocotíes.

El valle del río Mocotíes y otros valles convergentes, si bien sirvieron como co-

rredores de tránsito para los flujos de detritos, están clasificados en la cartografía producida como zonas de baja - moderada susceptibilidad y amenaza, debido a que la metodología empleada estima las áreas propensas a generar deslizamientos y no las áreas o corredores de tránsito de éstos. Estos corredores de tránsito de fluios de detritos corresponden a áreas de baja pendiente, donde convergen e incluso se depositan los flujos por gravedad, pero no son, en términos generales, áreas de origen. Eventualmente, el material allí depositado puede convertirse en una fuente alterna de detritos para futuros eventos y su estudio debe ser abordado bajo una perspectiva diferente a la utilizada en este análisis. Una mejor ilustración es ofrecida por Kanji et al. (2000), quien desarrolla un modelo metodológico para el análisis de susceptibilidad de las cuencas a flujos de detritos basado en factores tales como: intensidad de las lluvias, pendiente de los cauces, área de las microcuencas involucradas, altura de la pendientes, entre otros; factores éstos no contemplados en este análisis por estar fuera del alcance metodológico empleado y de los objetivos propuestos.

## Aproximación a su validación

La forma más recomendable de validar los mapas elaborados en este trabajo es mediante una inspección de campo para cartografiar las áreas con presencia de deslizamientos y luego compararlas con las estimadas como susceptibles y bajo amenaza por deslizamientos. No fue parte de este análisis la inspección de campo y la validación absoluta de los mapas de susceptibilidad v amenazas; sin embargo, la disponibilidad de una imagen LAND-SAT ETM+ post desastre, de febrero 26, 2005, y obtenida de GLCF (2005), permitió una aproximación a la evaluación de los resultados. Esta imagen Landsat adolece de problemas de origen (falla del sistema de barrido del Landsat ETM+) v de nubosidad, sombras v aerosoles en áreas estimadas como susceptibles a deslizamientos, pero era, hasta los momentos de redactar este artículo, la única imagen satelital post desastre de libre acceso del área analizada. Mavor ilustración online sobre esta falla se encuentra http://landsat.usgs.gov/data\_proen: ducts/slc\_off\_data\_products/

La figura 7 muestra en principio dos composiciones en falso color de la cuenca del Mocotíes, correspondiendo los tonos más claros a centros poblados, nubes y suelos desnudos. Se debe advertir que en la imagen del 2005, el tono más claro en el cauce del río Mocotíes, particularmente en la sección entre Tovar y Santa Cruz de Mora, es el resultado del trayecto realizado por el flujo de detritos. En este trayecto se dejó al descubierto roca fresca (con alto contenido de sílice), cantos rodados y depósitos de gravas y arenas, materiales de alta reflectancia fácilmente registrada por las bandas espectrales de la imagen Landsat. Igualmente, esta imagen muestra franjas negras o de información nula debido a una falla en el corrector de barrido linear (SLC-off) del sensor de LANDSAT 7 ETM+, lo cual causa que desde el 14 de julio de 2003, las imágenes capturadas presenten un trazado diagonal con ausencia de información (USGS, 2005). La imagen aquí empleada describe ese patrón de ausencia de información espacial. En segundo término, la misma figura (Figura 7) muestra una ampliación de la imagen LANDSAT ETM+ 2005 en la zona aledaña a Tovar, la cual a su vez se compara con la misma zona correspondiente al mapa de susceptibilidad producido en este análisis (nótese que el mapa de sus-



Figura 7. Ilustración de la interrelación encontrada entre las áreas de alta a muy alta susceptibilidad a deslizamientos (colores rojo y anaranjado), con la depositación de detritos aguas abajo de éstas y registrada en la cc 432 de la imagen Landsat ETM+ 2005 post desastre. Obsérvese el contraste dado por la depositación de detritos entre Tovar y Santa Cruz de Mora en las imágenes pre (2003) y post desastre (2005)

ceptibilidad está sobrepuesto al MED del área). La comparación se realiza a través de dos ventanas en las cuales se observan cauces que, al parecer (debido a su tonalidad clara), transportaron gran cantidad de detritos; estos cauces, según el mapa de susceptibilidad, presentan en sus cuencas superiores, áreas de alta y muy alta susceptibilidad a deslizamientos, de donde se supone provino el material que conformó el flujo de detritos. En otros sectores de la cuenca también se describe esta coincidencia, donde las áreas estimadas como de alta y muy alta susceptibilidad a deslizamientos, corresponden a las cuencas altas y medias de los cauces que sirvieron de corredores a los flujos de detritos. A fin de evaluar cuantitativamente la información post desastre ofrecida en esta imagen y los mapas finales de susceptibilidad y amenazas, se elaboró un mapa preliminar inventario de deslizamientos a partir de la información espectral contenida en la imagen Landsat ETM+ 2005. Para ello el procedimiento seguido fue:

**Pre-procesamiento de la imagen Landsat ETM+**. Esta imagen correspondiente al corredor (path) 007, fila (row) 054, según el sistema localizador estándar utilizado por el GLCF (2006); fue georeferenciada y rectificada en los mapas de susceptibilidad y amenazas (datum WGS-84, UTM 19N) y calibrada radiométricamente según el procedimiento estándar descrito por Chander y Markham (2003), quienes presentan una detallada explicación sobre este procedimiento, particularmente en cuanto a la descripción de los datos de entrada y ecuaciones utilizadas para la conversión de valores DN (*digital number*) a reflectancias, lo cual es posteriormente confirmado en un trabajo de calibración definitiva realizado por Teillet *et al.* (2004). Un ejemplo del uso de este procedimiento en imágenes Landsat ETM+ se ilustra en Squeo *et al.* (2006), para un estudio temporal comparativo en el desierto de Atacama.

En nuestro caso, los datos de la imagen fueron transformados de valores DN (digital number) a valores de reflectancia usando los valores de calibración de la imagen, ángulo solar al cenit, y distancia Tierra-Sol. Los rangos dinámicos necesarios para la conversión a valores de reflectancia provienen de los valores de radiancia  $L_{MIN}$  y  $L_{MAX}$  en W/(m<sup>2</sup> sr  $\mu$ m), los cuales son ofrecidos en la metadata adiunta a los archivos de la escena. Dada la diferente resolución de la data (los mapas fueron generados con 90 m de resolución de celda, mientras que la imagen Landsat posee 30 m de resolución de celda) fue necesario acoplar la cartografía de los mapas producidos de 90 m a 30 m de resolución de celda, para permitir así la posterior superposición y cruzamiento de la data, maximizando de esta manera la información aportada por la imagen Landsat.

**Procesamiento de la imagen Landsat ETM+ con un algoritmo de ampliación de contrastes** (Gond *et al.*, 2004). El objetivo de este paso fue facilitar la discriminación e inferencia de los escarpes de deslizamientos en el área de estudio. El principio de este procesamiento se basa en el uso del contraste entre el objeto a discriminar (los escarpes de deslizamientos) y el medio circundante. Debido a que la imagen Landsat analizada corresponde a días luego del evento, se asume que los escarpes de deslizamientos poseen una mayor reflectancia -por ser terrenos recientemente denudados-, que la reflectancia del área circundante, no denudada y en este caso generalmente bajo cobertura vegetal, facilitando de esta manera su aislamiento e identificación. Este método de ampliación de contrastes ha sido utilizado con éxito en la identificación de los 'garimpos' en la Guayana Francesa (Gond y Brognoli, 2005). El algoritmo está basado en la composición de una imagen falso color con el NDWI en el canal rojo, el NDVI en el canal verde y la banda infrarrojo medio en el canal azul, donde:

NDWI o Índice normalizado de diferencias de humedad es: (PIR-MIR)/ (PIR+MIR), (Gao, 1996); NDVI o Índice normalizado de diferencias de vegetación es:

(PIR-VIS)/(PIR+VIS), (Rouse *et al.*, 1974);

Siendo PIR = Banda infrarrojo cercano, MIR=Banda infrarrojo medio y VIS=Banda roja.

Las bandas espectrales PIR, MIR y VIS se corresponden en el sistema Landsat con las bandas 4, 5 y 3 respectivamente (USGS, 2005).

Identificación de los escarpes de deslizamientos recientes. La com-

posición falso color arriba explicada presenta una ampliación de contrastes entre las celdas que constituyen la imagen, es entonces cuando se asume que la celda (o grupos de celdas) ampliamente contrastante con las celdas adyacentes podría estar representando un escarpe de deslizamiento reciente, por lo que durante este proceso es necesario comparar esta imagen con la composición color natural (en nuestro caso se prefirió utilizar la composición de color cc742 por ofrecer mayor definición visual), para confirmar la presencia de un escarpe en las celdas evaluadas. Finalmente, estas celdas son vectorizadas y luego pasterizadas, creando con ello un mapa inventario de escarpes de deslizamientos recientes (Anexos 5.1 y 5.2).

Problemas en la identificación de escarpes de deslizamientos. Aunque el principio metodológico empleado para la identificación de deslizamientos es funcional, se debe aclarar que no es infalible y que posee (para nuestro caso) tres debilidades: 1) La presencia de fallas de origen en la imagen (tales como el bandeamiento con información nula y la presencia de aerosoles, nubes y sombras -se incluye también las sombras proyectadas por el relieve), no permitió la discriminación de posibles deslizamientos en ciertas áreas de la cuenca. 2) Si bien la resolución espacial (30 m) de la imagen permite tener seguridad para delimitar áreas de deslizamientos mayores a esta resolución, es insegura para delimitar deslizamientos de menor magnitud. Para atenuar este obstáculo fue necesario am-

pliar las posibilidades dadas por la resolución espectral de la imagen y de allí el algoritmo utilizado. 3) Al poseer la infraestructura, viviendas, campos de cultivo desnudos y rocas expuestas, una reflectancia similar a los escarpes recientes y detritos expuestos, se pueden confundir con éstos; de allí que el mapa inventario de deslizamientos, elaborado mediante esta técnica debe ser confirmado con trabajo de campo y/u otros sensores remotos tales como fotografías aéreas v/o imágenes de mayor resolución espacial. Para este trabajo no pudimos contar con estos recursos. Sin embargo, a pesar de estas desventajas, el mapa inventario de deslizamientos generado suministra información valiosa de la distribución de los escarpes de deslizamientos en la cuenca del Mocotíes, luego del evento de febrero del 2005.

**Cruzamiento de mapas**. En este último paso, el mapa inventario de deslizamientos fue superpuesto y cruzado con cada uno de los mapas de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos. De esta forma, se generó una tabla de frecuencias que indica en términos porcentuales la distribución de las áreas de deslizamientos entre las cuatro categorías (Baja, Moderada, Alta y Muy Alta), para cada mapa de susceptibilidad y amenazas, (Cuadro 6 v Figura 8). Es de hacer notar que debido a la falla de origen de la imagen Landsat ETM + 2005, la cual genera bandas diagonales sin información, las áreas de los mapas de susceptibilidad y amenazas comparadas se corresponden exactamente con las áreas con información de la imagen Landsat ETM+ 2005, haciendo de esta manera el procedimiento comparativo lo más preciso posible tomando en cuenta el problema antes indicado.

**Interpretación de la validación**. Asumiendo como cierto el mapa de deslizamientos generado a partir del procesamiento de la imagen Landsat ETM+ 2005 del área de estudio, se ofrecen las siguientes conclusiones:

 - 57.9% del área afectada por deslizamientos ha sido clasificada como áreas de Alta y Muy Alta susceptibilidad a deslizamientos según la metodología

Cuadro 6. Distribución del área de deslizamientos (%) entre las clases representadas en los mapas de susceptibilidad (SUSCEP.), amenazas período agosto-noviembre (Am.ASON), amenazas período abril-julio (Am. AMJJ) y amenazas período diciembre-marzo (Am.DEFM)

	SUSCEP.	Am.ASON	Am.AMJJ	Am.DEFM
Muy alta amenaza	15.9	66.7	46.9	1.8
Alta amenaza	42.0	20.9	24.6	6.7
Moderada amenaza	37.3	10.6	22.6	29.2
Baja amenaza	4.9	1.8	5.8	62.3



Figura 8. Distribución del área de deslizamientos (%) entre las clases representadas en los mapas de susceptibilidad (SUSCEP.), amenazas período agosto-noviembre (Am.ASON), amenazas período abril-julio (Am. AMJJ) y amenazas período diciembre-marzo (Am.DEFM)

seguida, incrementándose en los mapas de amenazas correspondientes a los períodos lluviosos (para el período agosto-noviembre se predice hasta el 87.6% de las áreas con deslizamientos y de abril a julio, hasta el 71.5%). Estos porcentajes provienen de la suma de las clases Alta y Muy Alta amenaza especificadas en los mapas correspondientes. El mapa de amenazas correspondiente al período seco (diciembre-marzo), apenas predice menos del 10% de los deslizamientos ocurridos en el área (8.7%), resultado esperado si se toma en cuenta la distribución normal de las lluvias en el área (Figura 2), y que el evento meteorológico de febrero 2005 es inusual y no se corresponde con los datos de comportamiento medio anual de las lluvias utilizado en este análisis.

 En los mapas de amenazas para períodos lluviosos, la mayor correspondencia del área deslizada es con el factor detonante lluvias, en lugar de los factores pasivos, en la interpretación de los procesos de deslizamientos / flujos de detritos registrado en la cuenca del Mocotíes.

La validación realizada en este estudio sitúa la capacidad predictiva del método de la Evaluación Multicriterio para deslizamientos en una condición de Moderada a Alta. Si bien Bonham-Carter (1994) estipula que una correspondencia por el orden del 80% se considera satisfactoria, su enunciado está basado en la aplicación del método de los pesos de evidencia (una mejor ilustración de la aplicación de pesos de evidencia en casos de deslizamientos se encuentra en Lee y Choi, 2004), para el cual se requiere, como data de entrada, el mapa de deslizamientos de la zona a analizar. Igualmente, Van Westen *et al.* (2003) encuentra que el método geomorfológico acierta con más del 90% en la predicción de deslizamientos en las clases consideradas como de Muy Alta Susceptibilidad; sin embargo, al igual que en el método de los pesos de evidencia, se requiere la cartografía y la subsiguiente inclusión del mapa de deslizamientos en el modelamiento.

El método de la Evaluación Multicriterio se aplicó de forma independiente de la cartografía de deslizamientos, basándose sólo en el ordenamiento y en los factores considerados y al posterior desarrollo de jerarquías, dada su importancia para la generación de un proceso de deslizamiento (ver apartado 'la determinación de los pesos'). Por lo tanto, aplicando el método de la Evaluación Multicriterio no se podría aspirar a una correspondencia igual o mayor a un resultado obtenido según los otros métodos mencionados, pero el logro está en su utilidad para generar una cartografía -al menos preliminar- de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos tan necesaria en los primeros estadios del desastre natural, tal y como lo demanda la técnica de Rápida Evaluación Ambiental (REA) mencionada como parte de la justificación de esta investigación.

## Conclusiones

En cuanto a la utilización de datos teledetectados. Este análisis comprueba la utilidad de los datos satelitales para el diagnóstico de desastres naturales, cuando se necesita aplicar una Rápida Evaluación Ambiental (REA), y no exista o no se disponga de la información ambiental básica. El nivel de detalle de esta evaluación de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos dependerá de la resolución del sensor v el producto satelital a emplear. La utilización de datos de elevación del SRTM a 90 m de resolución espacial es un gran avance en este tipo de estudios y, probablemente, será indispensable una vez se disponga del SRTM a 30 m de resolución. En cuanto al uso de imágenes satelitales, las aportadas por LANDSAT son de gran utilidad, dada su alta resolución temporal, particularmente para el levantamiento de la cobertura vegetal y dinámica ambiental. Sin duda que el problema de las franjas de información nula que presentan las imágenes del LANDS-AT 7 ETM+ plantea un obstáculo para el reconocimiento de hechos muy definidos como el trayecto del flujo de detritos; igualmente, su resolución espacial (30 m), limita la posibilidad de realizar un detallado inventario de deslizamientos. En este último caso se hace imprescindible el empleo de data satelital de mayor resolución espacial, tal como imágenes ASTER (15 m), IKONOS (1m pan, 4m multibanda) y Quick Bird (0,6 m pan, 1m multibanda), las cuales aumentarían su utilidad al facilitar la generación de MED, proporcionando así la mejor de las herramientas de teledetección para el estudio de procesos de deslizamientos a nivel local y regional.

En cuanto a la descripción y selección

de factores ambientales. Este análisis se orientó a una evaluación de la susceptibilidad de la cuenca del Mocotíes a deslizamientos (Anexo 1). Por esta razón se enfocó principalmente al tratamiento de los factores pasivos que contribuyeron en los procesos de deslizamientos. Asimismo, dado que la mayoría de datos provenían de fuentes satelitales, las coberturas de criterios computadas (representantes de los factores y procesos ambientales), dependieron en gran medida de las posibilidades técnicas dadas por la información y su procesamiento.

En cuanto a la metodología y validación. La Evaluación Espacial Multicriterio (EEM) es una metodología recomendable para un análisis tipo REA, por cuanto le permite al usuario obtener un resultado satisfactorio en corto tiempo. Aun no incorporando información sobre la distribución de los deslizamientos en la cuenca del Mocotíes, se pueden obtener resultados positivos tales como 57,9% y 87,6% de garantía en las capacidades predictivas de los mapas de susceptibilidad y de amenazas por deslizamientos (agosto-noviembre) respectivamente.

La estandarización inicial de los mapas criterios a través del método del valor máximo es una técnica difundida y funcional (Jiang y Eastman, 2000), mientras que el cálculo de pares de concordancia (pairwise) y su ingreso en la Matriz de Jerarquización Analítica (MJA) permite la síntesis linear de criterios, cuya fuente de origen es múltiple (experiencia, panel de expertos, literatura especializada, etc.).

Los mapas de amenazas aquí presentados (Anexos 2, 3 y 4) se podrían mejorar si la información a utilizar con respecto a las precipitaciones, se refina en términos de intensidad, duración y frecuencia y se espacializa para su debido tratamiento bajo la EEM. Es altamente recomendable validar estos resultados en campo, a fin de conocer más sobre los procesos y factores del evento de febrero 11/12, y ajustar los pesos asignados a los criterios escogidos. La utilización del algoritmo de ampliación de contrastes para la generación del mapa inventario de deslizamientos puede ser una técnica alternativa en casos donde no se disponga de información espacial post desastre (ejem: fotografías aéreas, levantamientos de campo, etc.) al menos en los siguientes 120 días, según los requerimientos de una REA (UNEP, 2006); e igualmente puede ser considerada una técnica complementaria en la cartografía final de deslizamientos, ya que podría ser una guía en los procedimientos de levantamiento, verificación y confirmación de los mismos.

#### Nota

El autor agradece las recomendaciones hechas por los evaluadores de la Revista Geográfica Venezolana y el apoyo prestado por el GLCF (Universidad de Maryland), para el desarrollo de estos mapas, los cuales fueron donados al Instituto de Prevención de Riesgos del Estado Mérida (INPRADEM), como contribución del GLCF y GEOCIENCIA de la ULA-Trujillo, a la prevención de riesgos naturales en la cuenca del Mocotíes.

## **Referencias citadas**

- BELLIZZIA, A.; PIMENTEL, N. y R. BAJO. 1976. Mapa geológico-estructural de Venezuela, escala 1:500.000. Ministerio de Minas e Hidrocarburos, Dirección de Geología. Caracas.
- BENFIELD HAZARD RESEARCH CENTRE, UNIVERSITY COLLEGE LONDON AND CARE INTERNATIONAL. 2003. Guidelines for rapid environmental impactat assessment in disasters, version 4.2. Charles Kelly (ed). [On line] http://www.forcedmigration.org/sphere/pdf/shelter/benfield-hazard/rea-guidelines-4-2.pdf (última visita 29 de agosto, 2005)
- BONHAM-CARTER, G. F. 1994. Geographic information systems for geoscientists-modelling with GIS. New York. Elsevier Science Inc. 398 p.
- CASTELLANOS ABELLA, E. A. and C. J. VAN WESTEN. 2005. Development of a system for landslide risk assessment for Cuba. En: Hungr, O.; Fell, R.; Couture, R. and E. Eberhardt (eds.). Proceedings of the international conference on landslide risk management. 1-10. (31 May-3 June, 2005, Vancouver). London. Balkema.
- CHANDER, G. and B. MARKHAM. 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SEN-SING. 41(11).
- CROZIER, M. J. 1986. Landslides: Causes, consequences and environment. Croom Helm. London.
- CRUDEN, D. M. and D. J. VARNES. 1996. Landslide types and processes. En: Turner, A. K. and R. L. Schuster (eds.). Landslides-

Investigation and mitigation. Transportation research board special report. 247: 36-75. National Academy of Sciences. Washington, D. C.

- CRUDEN, D. M. 1991. A simple definition of a Landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. 43: 27-29.
- EASTMAN, J. R.; JIN, W.; KYEM, P. A. K. and J. TOLEDANO. 1995. Raster procedures for multi-criteria/multiobjective decisions.
  Photogrammetry and Remote Sensing. 61(5): 539- 547.
- GAO, B-C. 1996. NDWI a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**. 275: 257-266.
- GOMEZ, M. y J. BAREDO. 2005. Sistemas de Informacion Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. (2<sup>da</sup> ed.). RA-MA. 276 p.
- GOND, V. e C. BROGNOLI. 2005. Sensoriamento remoto e gestão do território: localização e identificação dos sítios de garimpo ilegais na Guiana Francesa. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoramiento Remoto. INPE. 3029-3036. Goiânia-Brasil (16-21 de abril).
- GOND, V.; BARTHOLOME, E.; OUATTARA, F.; NONGUIERMA, A. et L. BADO. 2004. Surveillance et cartographie des plan d'eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l'instrument VEGETATION embarqué sur SPOT 4. International Journal of Remote Sensing. 25: 987-1004.
- GLOBAL LAND COVER FACILITY (GLCF). UNIVERSIDAD DE MARYLAND. 2006. LANDSAT ETM+ and SRTM data. [On line] www.landcover.org (última visita 25 de agosto, 2006).

- HAEBERLI, W.; RICKENMANN, D.; ZIMMER-MANN, M. and U. ROSSLI. 1990. Investigation of 1987 debris flows in the Swiss Alps: General concept and geophysical soundings. IAHS Publication. 194: 303–310.
- HUANG, B.; CHEU, R. and Y. LIEW. 2003. GIS-AHP model for HAZMAT routing with security considerations. 2003. IEEE 6<sup>th</sup> International Conference of Intelligent Transportation Systems. Shanghai-China (10-12 de octubre).
- INTERNATIONAL INSTITUTE FOR GEO-IN-FORMATION SCIENCE AND EARTH OB-SERVATION (ITC). 2003. User's Guide. (ILWIS 3.2 ACADEMIC). Enschede. The Netherlands.
- JIANG, H. and J. R. EASTMAN. 2000. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. International Journal of Geographical Information Systems 14(2): 173-184.
- KANJI, M. A.; GRAMANI, M. F.; MASSAD,
  F.; CRUZ, P. T. and H. A. ARAUJO FILHO.
  2000. Main factors intervening in the risk assessment of debris flows. *International Workshop on the Debris Flows Disaster of December 1999 in Venezuela*. Caracas-Venezuela.
- LEE S. and J. CHOI. 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model. International Journal of Geographical Information Science. 18(8): 789-814.
- MALCZEWSKI, J. 1999. **GIS and multiplecriteria decision analysis.** New York. John Wiley & Sons.
- MALCZEWSKI, J. 1996. A GIS-based approach to multiple criteria group decision making.
   International. Journal of Geographical Information Systems. 10(8): 955-971.

- MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RE-CURSOS NATURALES RENOVABLES (MARNR). 2004. Datos de precipitación de las estaciones ubicadas en el estado Mérida. Division de Meteorología y Climatología. (Archivos internos). Caracas.
- MILIARESIS, G. CH. 2001. Extraction of Bajadas from digital elevation models and satellite imagery. **Computers & Geosciences**. 27(10): 1159-1169.
- NASA-GLOBAL HYDROLOGICAL AND CLI-MATE CENTER. 2005. GOES-East Satellite Weather image from Northern South America. [On line] http://weather.msfc.nasa. gov/GOES (última visita agosto 23, 2005).
- NETTLETON, I.; MARTIN, S.; HENCHER, S. and R. MOORE. 2005. Debris flow types and mechanisms. From: SCOTTISH ROAD NETWORK LANDSLIDES STUDY. SCOTTISH EXECUTIVE PUBLICATIONS.
  [On line] http://www.scotland.gov.uk/Publications/2005/07/08131738/17492
- PDVSA-INTEVEP. 2005. *Código estratigráfico de las cuencas petroleras de Venezuela*. [On line] http://www.pdv.com/lexico/lexicoh. htm (última visita 29 de agosto, 2005).

- ROUSE, J.; HASS, R.; SCHELL, J.; DEERING, D. and J. HARLAN. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC. Type III, final report. 371 p.
- SAATY, T. L. 1990. Multicriteria decision making - The analytic hierarchy process. Volume I. AHP Series. McGrawHill. New York, NY.
- SQUEO, F. A.; TRACOL, Y. D.; LOPEZ, J.; GUTIÉRREZ, R.; CORDOVA, A. M. and J. R. EHLERINGER. 2006. ENSO effects on primary productivity in Southern Ataca-

RESEARCH SYSTEMS INC. 2004. ENVI 4.0 v.

*ma desert.* Advances in Geosciences 6: 273-277.

- TEILLET, P. M.; HELDER, D. L.; RUGGLES, T.; LANDRY, R.; AHERN, F. J.; HIGGS, N. J.; BARSI, J.; CHANDER, G.; MARKHAM, B.
  L.; BARKER, J. L.; THOME, K. J.; SCHOTT, J. R. and F. D. PALLUCONI. 2004. A definitive calibration record for the Landsat-5 Thematic Mapper anchored to the Landsat-7 radiometric scale. Canadian Journal of Remote Sensing. 30(4): 631-643.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PRO-GRAMME (UNEP). 2006. After the tsunami, rapid environmental assessment. [On line] http://www.unep.org/tsunami/reports/TSUNAMI\_report\_complete.pdf (última visita 25 de agosto, 2006).
- UNITED NATIONS FOOD AND AGRICULTU-RE ORGANIZATION (FAO). 1991. Water harvesting. [On line] http://www.fao.org/ docrep/U3160E/u3160eoo.htm#Contents
- USGS. 2006. *LANDSAT Project*. [On line] http://landsat.usgs.gov/slc\_off.html
- VAN WESTEN, C.J.; RENGERS, N. and R. SOETERS. 2003. Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. Natural Hazards. 30: 399-419.
- VARNES, D. J. 1984. Landslide hazard zonation. A review of principles and practice. UNESCO press. Paris. 63 p.
- ZIMMERMANN, M. 1990. Debris flows 1987 in Switzerland: Geomorphological and meteorological aspects. IAHS. Hydrol. Mountainous Regions. 2(194): 387-393.
- ZIMMERMANN, M. and HAEBERLI, W. 1992. Climatic change and debris flow activity in high-mountain areas – A case study in the Swiss Alps. Greenhouse-Impact on Cold-Climate Ecosystems and Landscapes. Catena. 22: 59-72.















Anexo 6.1 Mapas generados y correspondiente cobertura de criterio



## Anexo 6.2 Mapas generados y correspondiente cobertura de criterio



