

Zonificación de la susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos de masa. Microcuencas Agua Blanca y La Laja. Andes venezolanos

*Susceptibility zoning to occurrence of mass movements.
Micro basins Agua Blanca and La Laja. Venezuelan Andes*

Ayala Omaña Rubén I.¹, Dal Pozzo Franchesco² y Sánchez D. Daniela I.¹

Recibido: octubre, 2014 / Aceptado: marzo, 2015

Resumen

Se aplicó una metodología bajo un enfoque heurístico basado en la combinación de factores, para zonificar áreas susceptibles a la ocurrencia de movimientos de masa en las microcuencas Agua Blanca y La Laja del estado Táchira, que actualmente presentan periódicas manifestaciones de procesos geomorfológicos que se traducen en la ocurrencia de procesos gravitacionales, que causan el deterioro de la mayor parte de las infraestructuras. Los resultados permitieron conocer cuáles son los sitios más inestables y propensos a que ocurra este tipo de procesos, con el beneficio de consolidar información relevante para prever y planificar los correctivos que mitiguen los daños.

Palabras clave: Susceptibilidad; movimientos de masa; zonificación; SIG; estado Táchira.

Abstract

A methodology under a heuristic approach, based on combination of factors, for zoning susceptible areas to occurrence of mass movement was applied in the micro-basins Agua Blanca and La Laja in Táchira State. These micro-basins are currently having manifestations of morphological processes that result in the occurrence of mass movements that have caused damage to most of infrastructures. The results allows us to know which are the most unstable and susceptible places to the occurrence of this type of process, with the benefit of consolidating relevant information to anticipate and plan corrections to mitigate damages.

Key words: Susceptibility; mass movements; zoning; SIG; Táchira State.

1 Universidad de Los Andes, Escuela de Geografía, Laboratorio de Geomorfología. Mérida-Venezuela

2 Universidad de Los Andes, Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales. Mérida-Venezuela
Correo electrónico: ayalar@ula.ve; alpozzof@gmail.com; danielasanchez95@hotmail.com

1. Introducción

Las microcuencas Agua Blanca y Las Lajas presentan periódicas manifestaciones de procesos geomorfológicos que se traducen en la ocurrencia de una gran cantidad de movimientos de masa, que han causado el deterioro de buena parte de las infraestructuras, generando condiciones inestables de manera progresiva. El objetivo de esta investigación es la aplicación de una metodología para zonificar áreas susceptibles a que sobrevengan movimientos de masa, mediante la evaluación y superposición de las variables o factores físico-naturales que ejercen mayor influencia en la ocurrencia de este tipo de procesos. Dicho objetivo obedece a la alta dinámica de crecimiento poblacional, que ha generado la ocupación de espacios no aptos para la localización de infraestructura y viviendas, en zonas propensas a procesos gravitacionales.

2. El área de estudio

Se ubica en los Andes venezolanos, al suroeste del estado Táchira, en la parte alta de la cuenca del río Táchira, enmarcada dentro de cuatro puntos con las siguientes coordenadas UTM, cuyo datum es REGVEN, elipsoide GRS-80: Punto 1= 839.560 m Norte, 782.482 m Este; Punto 2= 837.950 m Norte, 780.846 m. Este; Punto 3= 836.824 m Norte, 783.499 m Este; Punto 4= 838.099 m Norte, 786.315 m Este. Desde el punto de vista político-administrativo pertenece a la parroquia Delicias, aldeas Toronjal y Centro del municipio Rafael Urdaneta,

cuyos límites corresponden, al Norte con la aldea La Honda y el municipio Junín, al Sur con las aldeas Palma y Oso, Aguditas y El Reposo, al Este con el municipio Junín y al Oeste con la República de Colombia (Figura 1).

En su conjunto abarca una extensión territorial de 10,36 km² (1.036,23 hectáreas) aproximadamente, y está conformada principalmente por las microcuencas Agua Blanca y La Laja, lo que constituye el 5,4 % de la superficie total del municipio.

Desde el punto de vista geomorfológico, el área se encuentra enmarcada en lo que corresponde a la región del páramo El Tamá - Pico El Cobre (MARNR, 2001), caracterizada por presentar relieves de tipo montañoso, asociados a la conformación de la cordillera de los Andes en su prolongación del Macizo Oriental Colombiano (MARNR, 1993), cuyas formas características son rectas o de cuesta a lo largo de las vertientes (MARNR, 2001), presentando en su mayor parte una topografía muy abrupta de vertientes escarpadas con pendientes que varían entre los 26,7° y los 45°, así como también pendientes bajas que oscilan entre los 8,65° y 16,7° en los depósitos de relleno de los fondos de valle.

Las máximas altitudes se ubican hacia la zona del cerro Pico de Vela, que alcanza una elevación aproximada de 2.820 msnm, mientras que las menores cotas se encuentran hacia las confluencias de las quebradas Agua Blanca y La Laja con el río Táchira a una altitud aproximada de 1.280 msnm (Figura 1).

Los elevados valores de pendiente en las zonas de vertiente favorecen el escudrimiento superficial y la presencia de

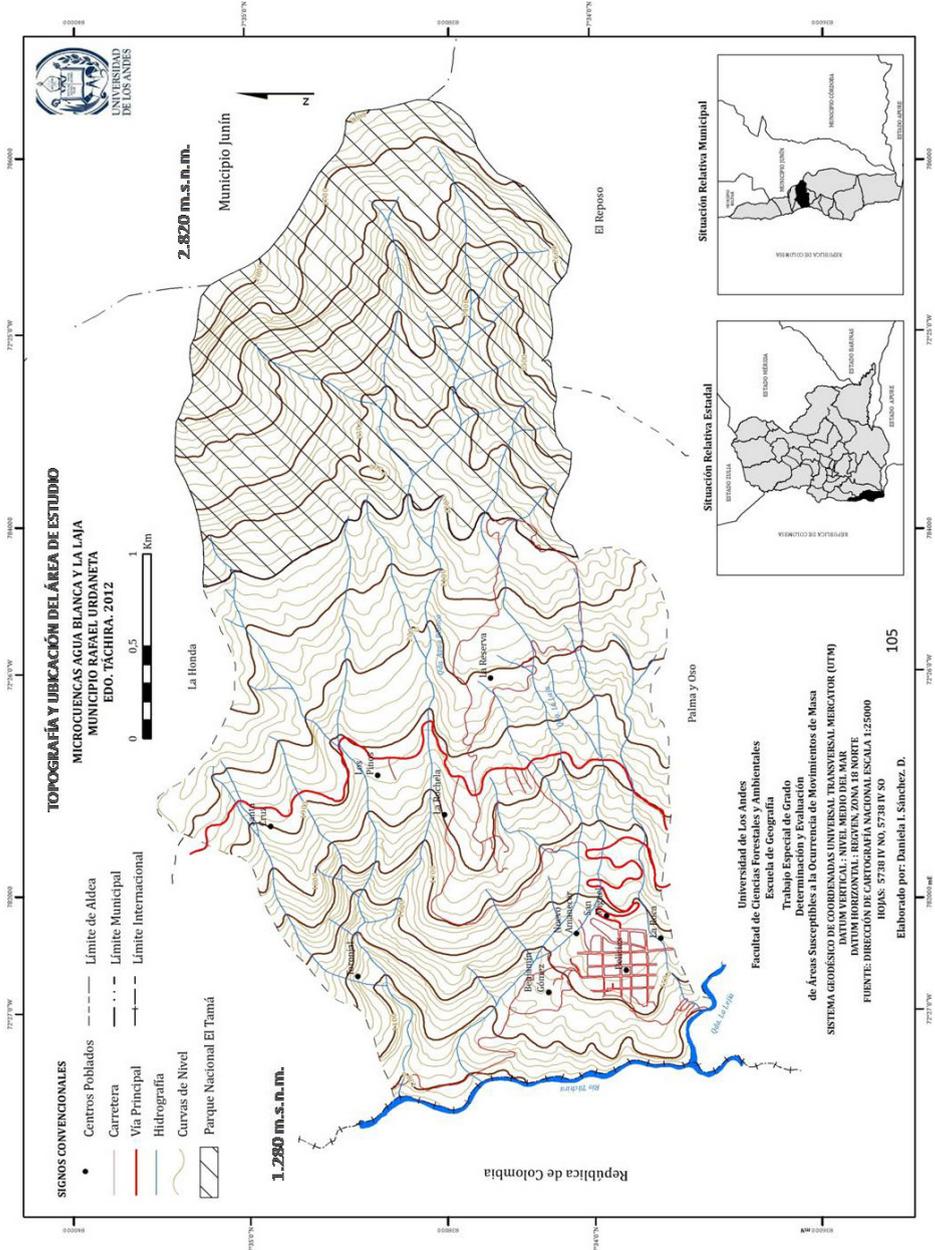


Figura 1. Topografía y localización

procesos erosivos, lo que se evidencia, tal como lo señalan López y Vielma (1982), por la profunda incisión de los cauces fluviales, asociada también a la rápida elevación de la codillera durante el paroxismo orogénético Plio-Pleistoceno de los Andes (Schubert y Vivas, 1993), y por el espesor de las acumulaciones cuaternarias de fondo de valle a lo largo y ancho del municipio, representadas por abanicos, terrazas aluviales y depósitos coluviales. Tal como lo afirma el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (2001), esto se corrobora por la presencia de una red de drenaje con patrón dendrítico y alta densidad de cauces, producto de las características topográficas y geológicas, las fuertes pendientes y las condiciones climáticas, lo que da lugar a un tipo de drenaje subsuperficial de índole regmático¹, que aporta escurrimiento entre las fisuras o diaclasas de las rocas y, por lo tanto, incrementa el caudal aguas abajo en su resurgencia.

De acuerdo a la clasificación taxonómica creada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica (*Soil Taxonomy*, 1992; citado en MARNR, 2001), el área de estudio presenta, en un contexto general, los siguientes tipos de suelos: Typics Haplohumults, distribuidos hacia las cercanías de la margen derecha de la quebrada Agua Blanca y la zona norte y centro del área de estudio, y suelos de tipo Typics Humitropepts, repartidos hacia la margen derecha del río Táchira y al norte y suroeste de la población de Delicias.

La cobertura vegetal presente, según la clasificación de Holdridge (Ewel, 1968),

está catalogada como Bosque Húmedo Montano Bajo y Bosque Húmedo Pre-montano. El primero (Bh – mb) se localiza desde los 2.080 msnm hasta una altitud máxima correspondiente a los 2.820 msnm, predominando en las vertientes empinadas. Debido a la intensidad del uso agrícola y ganadero, existe solo remanentes del bosque primario, a excepción del área que se encuentra protegida por el parque nacional (El Tamá), la cual presentan árboles de 20-25 m de altura, troncos de buen fuste con copas densas que permiten el paso de luz al sotobosque, donde se observa la presencia de musgos y bromelias.

Por su parte, el Bosque Húmedo Pre-montano (Bh – pm) se localiza desde las áreas con menor altitud (1.280 msnm) hasta una altitud cercana a los 2.080 msnm; debido al extenso uso agrícola que se le ha dado por muchos años a esta zona de vida, el bosque original ha desaparecido encontrándose solo remanentes, árboles con alturas de 20 a 30 metros dejados para la sombra del café en los lugares de fuertes pendientes o donde los suelos son muy pobres.

Desde el punto de vista geológico, el área se encuentra emplazada en una zona de fallas menores de ajuste oblicuas a la traza principal de la falla de Boconó, donde incide la falla del sector de Delicias, la cual se dispone perpendicular a la falla de Bramón. Dichas fallas disectan varias unidades de rocas sedimentarias del período Cretácico. Los afloramientos de estas unidades litoestratigráficas (Figura 2) corresponden específicamente a las formaciones Aguardiente (Kag), Capacho (Kcp) y La Luna (Kl).

Formación Aguardiente (Cretácico Albiense): en el área de estudio esta unidad se encuentra conformada por areniscas cuarzosas, de grano variable, interestratificadas con lutitas negras micáceas y carbonáceas que presentan alto grado de fracturación y meteorización, donde la proporción de lutitas es mayor a la de areniscas (Figura 3). La formación Aguardiente aflora entre las microcuencas Agua Blanca y La Laja, al norte del casco central de la población de Delicias, en las inmediaciones de los sectores Los Pinos y La Rochela, y en casi la totalidad de la zona que comprende el Parque Nacional El Tamá, hasta su prolongación en el talud principal del río Táchira, abarcando aproximadamente el 75% del área de estudio.

Formación Capacho (Cretácico Albiense-Turoniense): consta de tres miembros que, de más antiguo a más joven, son: La Grita, Seboruco y Guayacán. El miembro Seboruco, esencialmente lutítico, es el que domina en el área de estudio, donde se caracteriza por presentar lutitas friables fracturadas de color gris oscuro a negro (Figura 4), cuya proporción supera la de las calizas bioclásticas fracturadas y la de las ocasionales limolitas presentes.

Los mayores afloramientos de la formación Capacho se localizan en los alrededores del centro poblado Delicias y en la zona noroeste, hacia las inmediaciones del sector Santa Cruz y la parte baja del sector Toronjal, ocupando el 24% de la superficie total.

Formación La Luna (Cretácico Cenomaniense-Campaniense): consiste típicamente de calizas y lutitas calcáreas fétidas, con abundante materia orgánica laminada y finamente dispersa, delgadamente estratificadas y laminadas, densas, de color gris oscuro a negro; la ftanita negra es frecuente en forma de vetas, nódulos y capas delgadas (Ministerio de Energía y Minas, 2011). En el área de estudio se encuentra localizada hacia la zona norte en áreas aledañas al centro poblado Santa Cruz, ocupando un área de 0,06 km² correspondiente al 1% de la superficie total del área de estudio, donde exhibe principalmente lutitas y calizas calcáreas, fisiles, de acentuada laminación y alto grado de fracturación (Figura 5), con niveles moderados de meteorización, que gradan a colores ocres y rojizos por oxidación.

Desde el punto de vista de su hidrografía se reflejan dos microcuencas principales: Agua Blanca cubriendo una extensión el 64,1 % del área de estudio, y La Laja que ocupa el 22,2 %. El área de estudio consta además de un subsector hidrográfico constituido por una vertiente principal cercana al centro poblado Delicias y un área interfluvial, con drenajes de carácter intermitente de orientación este-oeste, que ocupa un 13,4 % del área total, los que en conjunto reciben sus nacientes desde los relieves montañosos del Parque Nacional El Tamá, y cuyas vertientes drenan sus aguas de escurrimiento hacia el río Táchira, bordeando a la población de Delicias y estableciendo el límite internacional con la república de Colombia (Figura 6).



Figura 3. Areniscas interestratificadas con lutitas micáceas de la fm. Aguardiente. De izquierda a derecha: Sector Los Pinos (F1), Sector Benjamín Gómez (F2). Vía hacia la Aldea Aguaditas (F3). Obsérvese el alto grado de meteorización y fracturación. Fotografías: Daniela Sánchez



Figura 4. Material lutítico presente en afloramientos de la fm. Capacho. De izquierda a derecha (Sector Toronjal: F1 y F2, Sector Santa Cruz: F3). Se puede observar el elevado grado de meteorización y fracturación. Fotografías: Daniela Sánchez



Figura 5. De izquierda a derecha: calizas fracturadas de la fm. La Luna (F1). Material lutítico disgregado (F2). Estratos de caliza (F3). Se observa el grado de meteorización y de fracturación localizada -Sector La Cortada- Aldea Toronjal. Fotografías: Daniela Sánchez

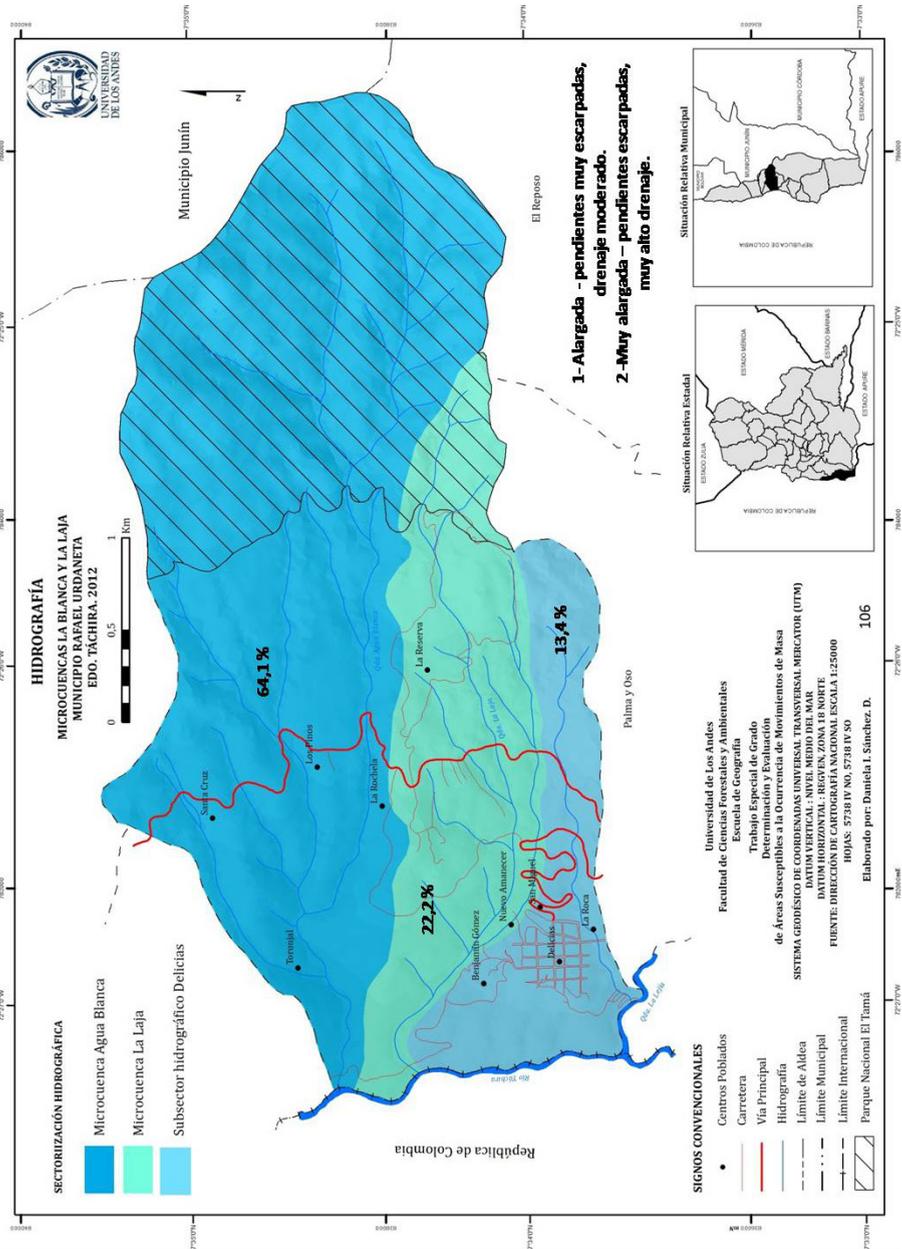


Figura 6. Hidrografía

En lo que respecta al uso de la tierra, se debe destacar que el área de estudio se ha visto afectada por la expansión de la frontera agrícola, condición que funda la necesidad de preservar esta zona por la importancia de sus recursos, lo cual fue reconocido por el Ejecutivo Nacional, que decidió incorporarla al régimen de áreas naturales protegidas, mediante la creación del Parque Nacional El Tamá, según Decreto N° 2.984 en el año 1978 (Gaceta Oficial de la República de Venezuela, 1979), abarcando una superficie total de 139.000 ha, de las cuales 376 forman parte del área de estudio, lo que representa un 35 % de su superficie total, con una cobertura natural constituida como ABRAE (Área Bajo Régimen de Administración Especial), (Gaceta Oficial de la República de Venezuela, 1991). El porcentaje que ocupan las cuatro categorías de uso restantes son: urbano (4 %), agrícola (28 %), agropecuario (10%) y agricultura de bajo impacto (23 %).

3. Materiales y métodos

El método heurístico aplicado para la zonificación de la susceptibilidad es una variante del propuesto por Degraff y Romesburg (1980) y consiste en la elaboración de un mapa de los factores que ejercen mayor influencia en la ocurrencia de movimientos de masa, el cual se combina con el mapa de inventario de movimientos de masa, con la finalidad de conocer cuáles son las combinaciones de factores más frecuentes en los sitios donde ocurren los movimientos de masa dentro del área de estudio, apoyándose en la pro-

porción que ocupan éstos con relación a la superficie total de cada combinación de factores. Este procedimiento se realizó mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Tal como lo señala Ramírez (1998), esta metodología se fundamenta en el hecho de considerar a la ocurrencia de movimientos de masa como un fenómeno que se produce bajo la conjunción de ciertos factores físicos, y asume que existen altas posibilidades de colapsos potenciales en los sitios en donde estas condiciones se repiten.

Para llevar a cabo el análisis, se asignaron valores de peso a cada una de las categorías de los factores seleccionados, considerando algunos de los criterios utilizados por Suárez (1998), Nicholson y Hencher (1997; citados en Suárez, 1998) y la Asociación Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1981; citado en González de Vallejo *et al.*, 2004), sustentado en el reconocimiento cartográfico y de campo para el área de estudio, lo que permitió analizar cada uno de ellos de la siguiente manera:

3.1 Factores condicionantes

3.1.1 Valores de pendiente

El análisis de este factor se efectuó a partir de la información obtenida del mapa de Cartografía Nacional a escala 1:25.000, que permitió generar el mapa de pendientes (Figura 7), realizado con base en las curvas de nivel digitalizadas a una equidistancia de 20 m., mediante el empleo del software *ArcGIS* 9.3.

El criterio para establecer los rangos de pendiente (Cuadro 1) fue tomado de Suárez (1998). Estos rangos se transfor-

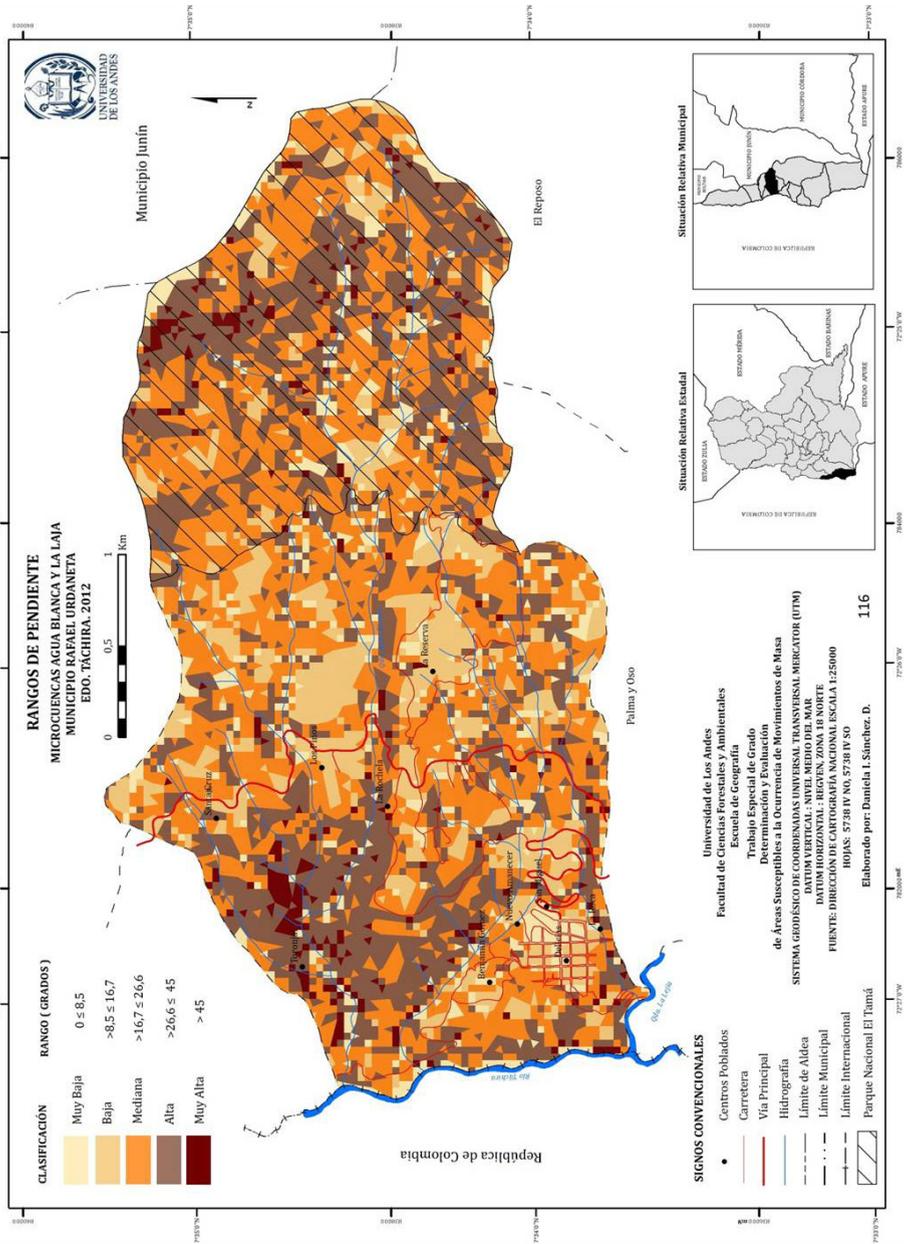


Figura 7. Pendiente media en grados

maron de formato raster a formato vectorial, para efectos de su manejo, al igual que los demás factores.

3.1.2 Geología

Para analizar este factor se consideraron los parámetros litología, grado de meteorización, grado de fracturación y presencia de fallas. La información geológica se levantó tomando como base el mapa geológico de la región de San Cristóbal-Río Uribante, estado Táchira a escala 1:50.000 del Ministerio de Minas e Hidrocarburos; mediante visitas de campo con el propósito de identificar y corroborar las diferentes unidades litológicas que afloran en el área de estudio, así como la descripción y caracterización del grado de meteorización y fracturación que éstas exhiben, además de las morfoestructuras que evidencian la presencia de fallas (observadas en campo y a través de fotografías aéreas de la misión 0102100, faja 2, fotos 013 y 014, a escala 1:25.000, del año 1974). Tomando como base dicha información se logró definir y vectorizar a las unidades litoestratigrá-

ficas y los rasgos estructurales del mapa geológico (Figura 2).

3.1.3 Litología

Los diferentes tipos litológicos poseen distintos niveles de susceptibilidad a la rotura y ocurrencia de movimientos de masa. Estas propiedades físicas y resistentes de cada tipo de material gobiernan su comportamiento tenso-deformacional y, por tanto, su estabilidad (González de Vallejo *et al.*, 2004). Los criterios utilizados para darle valores de peso a los diferentes grupos litológicos presentes en el área de estudio (Cuadro 2) se tomaron de Suárez (1998) y González de Vallejo *et al.* (2004).

3.1.4 Grado de meteorización

Condiciona las propiedades mecánicas de las rocas. A medida que la meteorización avanza, aumenta la porosidad, la permeabilidad y deformabilidad de los materiales, al tiempo que disminuye la resistencia del macizo rocoso (González de Vallejo *et al.*, 2004). Para su cualificación se consideró la evaluación propuesta por

Cuadro 1. Clasificación utilizada para la cualificación del factor pendiente

| Clasificación | Rangos de Pendiente(grados) | Peso |
|---------------|-----------------------------|------|
| Muy Baja | $0 \leq 8,5$ | 1 |
| Baja | $>8,5 \leq 16,7$ | 2 |
| Mediana | $>16,7 \leq 26,6$ | 3 |
| Alta | $>26,6 \leq 45$ | 4 |
| Muy Alta | > 45 | 5 |

Modificado de Suárez (1998)

Cuadro 2. Evaluación del parámetro litológico

| Unidad estratigráfica | | Litología | Condiciones del material | Peso |
|--------------------------------------|-----|--|--|------|
| Formación Capacho (Miembro Seboruco) | Kcp | Lutitas físilas oscuras, algunas calizas bioclásticas y limolitas | En la mayoría de los afloramientos estas rocas se encuentran muy alterados y son muy friables, gradando a colores ocres y rojizos por alteración. Materiales que son altamente susceptibles al lavado superficial y a los procesos de erosión, así como también a la formación de cáscaras y láminas. Se rompen fácilmente a través de los planos de laminación. Las limolitas cuarzosas observadas y algunas lutitas de color oscuro gradan a colores crema u ocres por meteorización, son muy compactas, algunas porosas, con fractura concoidal | 7 |
| Formación La Luna | Kl | Calizas y lutitas negras biomicríticas intercaladas con ftanitas negras muy resistentes | Se observaron altamente fracturadas, muy alteradas, de colores pálidos por meteorización. Susceptibles al lavado superficial y procesos de erosión, a la formación de cavidades y colapso. En general, presentan baja calidad geomecánica en relación a las condiciones de sus afloramientos, a pesar de su condición de resistencia natural | 6 |
| Formación Aguardiente | Kag | Conformada por areniscas cuarzosas de grano fino a grueso, bien consolidadas, intercaladas con lutitas negras carbonosas | Estos materiales presentaron colores rojizos y amarillentos por oxidación, a pesar de que son rocas con características resistentes, son consideradas como rocas de muy baja calidad geomecánica por el alto grado de fracturación y alteración que presentan. Las areniscas cuarzosas muy fracturadas y las lutitas carbonosas son susceptibles al debilitamiento, al lavado de finos y a la disgregación acentuada en la mayoría de los afloramientos. | 5 |

la Asociación Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1981; citado en González de Vallejo *et al.*, 2004), a través de la observación directa de los afloramientos rocosos y su comparación con los índices estándares propuestos (Cuadro 3).

3.1.5 Grado de fracturación

Fue asociado directamente al número de familias de discontinuidades observadas en los afloramientos de roca analizados, los cuales reflejaron diferentes tipos de inestabilidad según el número de ellas presentes. Para asignar valores a este parámetro, se tomó en cuenta la clasifi-

cación propuesta por la Asociación Internacional de Mecánica de Rocas ISRM (1981; citado en González de Vallejo *et al.*, 2004) asignando pesos correlativos según el número de familias de discontinuidades presentes (Cuadro 4).

3.1.6 Presencia de fallas

El sistema de fallas presentes en el área de estudio ejerce influencia directa en la estabilidad de los macizos rocosos y constituye una fuente sismogénica potencial. Para su análisis se tomaron en cuenta los valores (Cuadro 5) propuestos por el *Asian Technical Committee on*

Cuadro 3. Evaluación del grado de meteorización

| Grado de meteorización | Tipo | Descripción | Peso |
|-------------------------------|---------------------------|--|-------------|
| I | Fresco | No aparecen signos de meteorización | 1 |
| II | Ligeramente meteorizado | La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización | 2 |
| III | Moderadamente meteorizado | Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados | 3 |
| IV | Altamente meteorizado | Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada parece como una estructura continua o como núcleos aislados | 4 |
| V | Completamente meteorizado | Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso | 5 |
| VI | Suelo Residual | Todo el macizo rocoso se ha transformado en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material | 6 |

Modificado de la Asociación Internacional de Mecánica de Rocas ISRM (1981; en González de Vallejo *et al.*, 2004)

Cuadro 4. Evaluación del grado de fracturación

| Tipo de macizo rocoso | Número de familias | Peso |
|------------------------------|---|-------------|
| I | Masivo, discontinuidades ocasionales | 1 |
| II | Una familia de discontinuidades | 2 |
| III | Una familia de discontinuidades mas otras ocasionales | 3 |
| IV | Dos familias de discontinuidades | 4 |
| V | Dos familias de discontinuidades más otras ocasionales | 5 |
| VI | Tres familias de discontinuidades | 6 |
| VII | Tres familias de discontinuidades mas otras ocasionales | 7 |
| VIII | Cuatro o más familias de discontinuidades | 8 |
| IX | Brechificado | 9 |

Modificado de la Asociación Internacional de Mecánica de Rocas ISRM, 1981, (citado en González de Vallejo *et al.*, 2004)

Cuadro 5. Valoración de la presencia de fallas

| Factor | Características | Peso |
|---------------------------|-----------------|------|
| Fallas alrededor del área | Presentes | 3 |
| | Ausentes | 0 |

Tomado de la valoración de factores para evaluación de susceptibilidad a deslizamientos (*Asian Technical committee on geotechnology for natural Hazards in ISSMFE* (1997; citado en Suárez 1998)

Geotechnology for Natural Hazards in ISSMFE (1997; citado en Suárez 1998), considerando que las áreas con afectación directa estarían a una distancia de 250 m de cada traza de falla, lo cual permitió establecer la demarcación mediante el análisis de proximidad (buffers), utilizando las herramientas de edición de *ArcGIS* 9.3.

La sumatoria de los valores de peso previamente definidos para los parámetros del factor geológico, arrojó como resultado los rangos o clases de condiciones geomecánicas (Cuadro 6).

Estos son el resultado del proceso de combinación cartográfica de dichos parámetros por medio del SIG, resultando en el mapa de rangos de condiciones geomecánicas del área de estudio (Figura 8).

3.2 Factores externos

3.2.1 Uso y cobertura de la tierra

Su análisis se realizó con base en la delimitación territorial que conforman los tipos de actividades socioeconómicas que predominan en el área de estudio, así como también de algunas tipologías de cobertura vegetal que suponen un grado de influencia en la ocurrencia de movimientos de masa. Para efectuar

la sectorización de estas áreas se utilizó material cartográfico referido al catastro municipal del área de estudio y la hoja cartográfica de Usos del Territorio y Áreas Compatibles, correspondiente al Plan de Ordenación del Territorio del estado Táchira (MARNR, 2005), a través de los cuales se logró digitalizar y clasificar la información existente, actualizada mediante la aplicación de un conjunto de técnicas a las imágenes satelitales pancromáticas y multiespectrales *SPOT-5* del año 2010. Lo anterior se complementó con la información levantada en campo y apoyándose en criterios jerárquicos para cualificar este factor (Cuadro 7) de acuerdo a los tipos de uso localizados y a su influencia en el incremento de la inestabilidad, logrando elaborar de esta manera el mapa de usos (Figura 9).

3.3 Inventario de movimientos de masa

Se realizó a través del reconocimiento y levantamiento de información en el campo y de la interpretación y análisis de las fotografías aéreas de la misión 0102100, faja 2, fotos 013 y 014, a escala 1:25.000, del año 1974, con la finalidad de identificar evidencias geomorfológicas de procesos antiguos y actuales. El trabajo de

Cuadro 6. Sumatoria de los parámetros seleccionados para evaluar el factor geología y clases de condiciones geomecánicas

| Evaluación del factor geológico | | | | |
|--|------------------------|---|--|----------------------------|
| Factor | Parámetro | Descripción | Peso | |
| Geológico | Litología | Formación Capacho | 7 | |
| | | Formación La Luna | 6 | |
| | | Formación Aguardiente | 5 | |
| | Grado de meteorización | Moderadamente meteorizado | 3 | |
| | | Altamente meteorizado | 4 | |
| Desencadenantes | Grado de fracturación | Intensamente fracturado | 8 | |
| | | Moderadamente fracturado | 7 | |
| | Estructuras | Ausencia | 0 | |
| | | Presencia | 3 | |
| | | | | |
| Rangos de condiciones geomecánicas (sumatoria de valores de peso) | | Clases de condiciones geomecánicas | Legenda | Cualificación final |
| 18 - 22 | | Muy malas |  | 3 |
| 12 - 17 | | Malas |  | 2 |
| 6 - 11 | | Moderadas |  | 1 |
| 0 - 5 | | Buenas |  | 0 |

Según los valores propuestos por Suárez (1998), Nicholson y Hencher (1997; citado en Suárez, 1998); y de la Asociación Internacional de Mecánica de Rocas ISRM (1981; citado en González de Vallejo *et al.*, 2002)

Cuadro 7. Criterios de clasificación para la evaluación del factor uso y cobertura de la tierra

| Tipo de Uso | Afectación | Peso |
|-----------------------------|-------------------|-------------|
| Urbano | Muy alta | 4 |
| Agrícola | Alta | 3 |
| Agropecuario | Moderada | 2 |
| Agricultura de bajo impacto | Baja | 1 |
| ABRAE | Muy baja | 0 |

Asignados de manera jerárquica según su grado de influencia

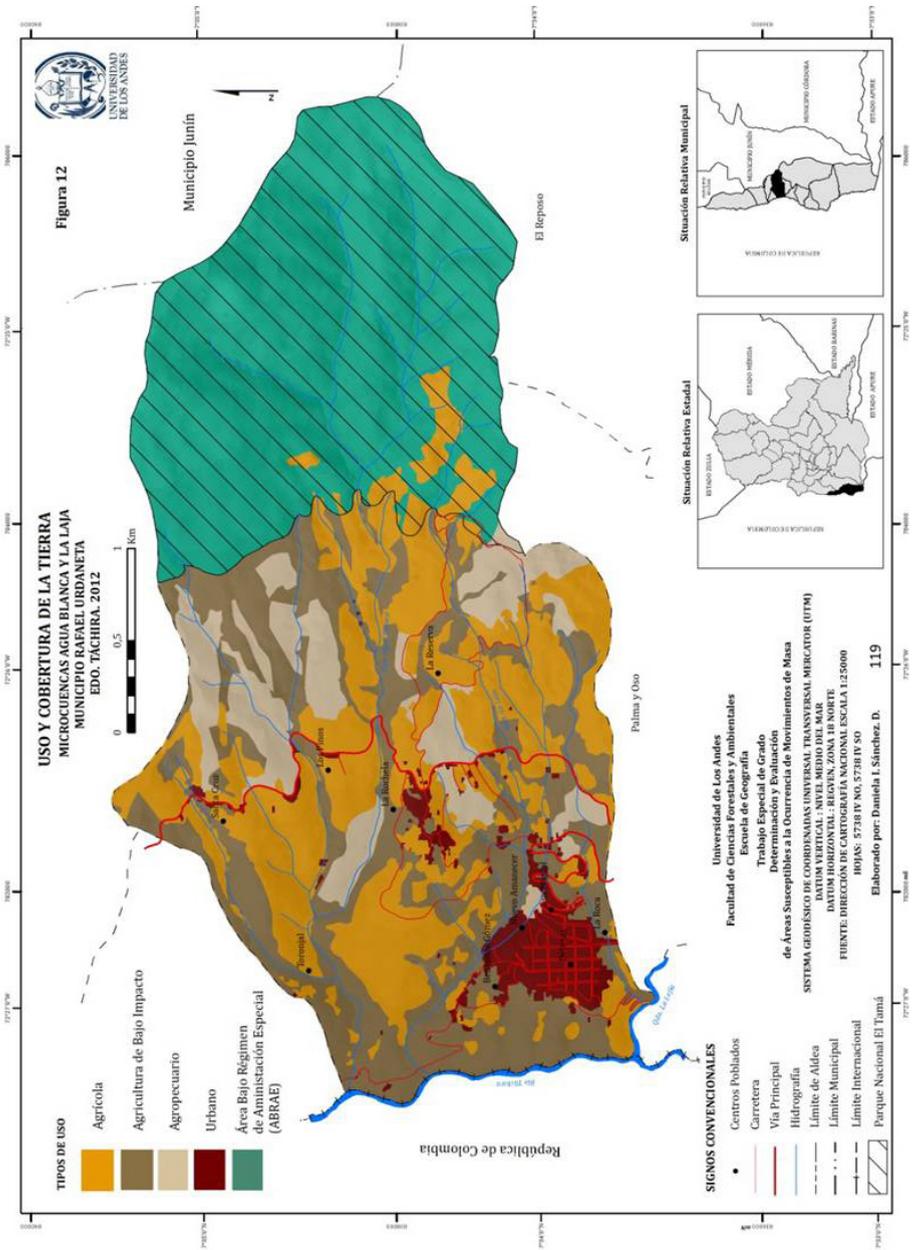


Figura 9. Usos de la tierra

campo consistió en la localización y registro de aquellos lugares que presentaron evidencias de movimientos de masa y otros procesos erosivos (escarpes, coronas, cicatrices, masas deslizadas, áreas de escurrimiento concentrado y cárcavas). Para la identificación y reconocimiento de las tipologías se tomó como criterio la clasificación de Varnes (1978). La representación cartográfica se muestra en la figura 10. Luego se delimitaron los que registraron actividad de movimientos de masa para efectos del cálculo de las áreas afectadas por ellos.

3.4 Procedimiento cartográfico para la zonificación de la susceptibilidad

Una vez analizados y digitalizados cada uno de los factores considerados, se procedió a combinarlos con el propósito de obtener la zonificación de áreas susceptibles a la ocurrencia de movimientos de masa. Los valores de peso asignados para el análisis de todos los factores que contribuyen a la susceptibilidad se resumen en el cuadro 8.

El tratamiento cartográfico para zonificar las áreas susceptibles se inicia con la combinación de los mapas de factores mediante el uso del *ArcGis* 9.3, a través de la herramienta 'Union' del *Arctoolbox*, agrupados en una capa vectorial con el nombre 'factores combinados'.

Para realizar el análisis de susceptibilidad fue necesario conocer el área ocupada por cada una de las clases de cada uno de los factores, lo cual fue hecho a través de la extensión 'Summarize' en la columna de cada factor. Luego se superpuso el

mapa de inventario de movimientos de masa con el mapa de factores combinados; para ello se realizó un 'Clip' desde la caja de herramientas de *ArcGis* 9.3, permitiendo cortar las áreas definidas por la ocurrencia de éstos sobre cada uno de los factores evaluados. Posteriormente, sobre la tabla de atributos de la capa vectorial 'factores combinados', se adicionó un campo para cada factor donde se calculó el grado de influencia que representa cada uno de ellos en la generación de movimientos de masa. Para realizar este cálculo, con la herramienta 'Field Calculator' de *ArcGis* 9.3, se estimó el valor para cada uno de los polígonos del mapa de factores combinados, aplicando la siguiente ecuación de susceptibilidad:

$$\begin{aligned} &\text{Susceptibilidad (factor } x) \\ &= \frac{100 \times (\text{área del factor } x \text{ afectada por} \\ &\text{movimientos de masa})}{(\text{Área total que ocupa el factor } x)} \end{aligned}$$

Finalmente se creó un nuevo campo en la tabla de atributos de la capa de factores combinados, donde se calculó la susceptibilidad total para cada polígono del mapa de factores combinados, a través de la sumatoria de la susceptibilidad por factor y los valores de los pesos asignados a cada uno de los factores considerados. Los valores obtenidos de la combinación y sumatoria de factores, representan la propensión del terreno a generar movimientos de masa. Los resultados se agruparon en 4 clases de susceptibilidad: baja, moderada, alta y muy alta (Figura 11).

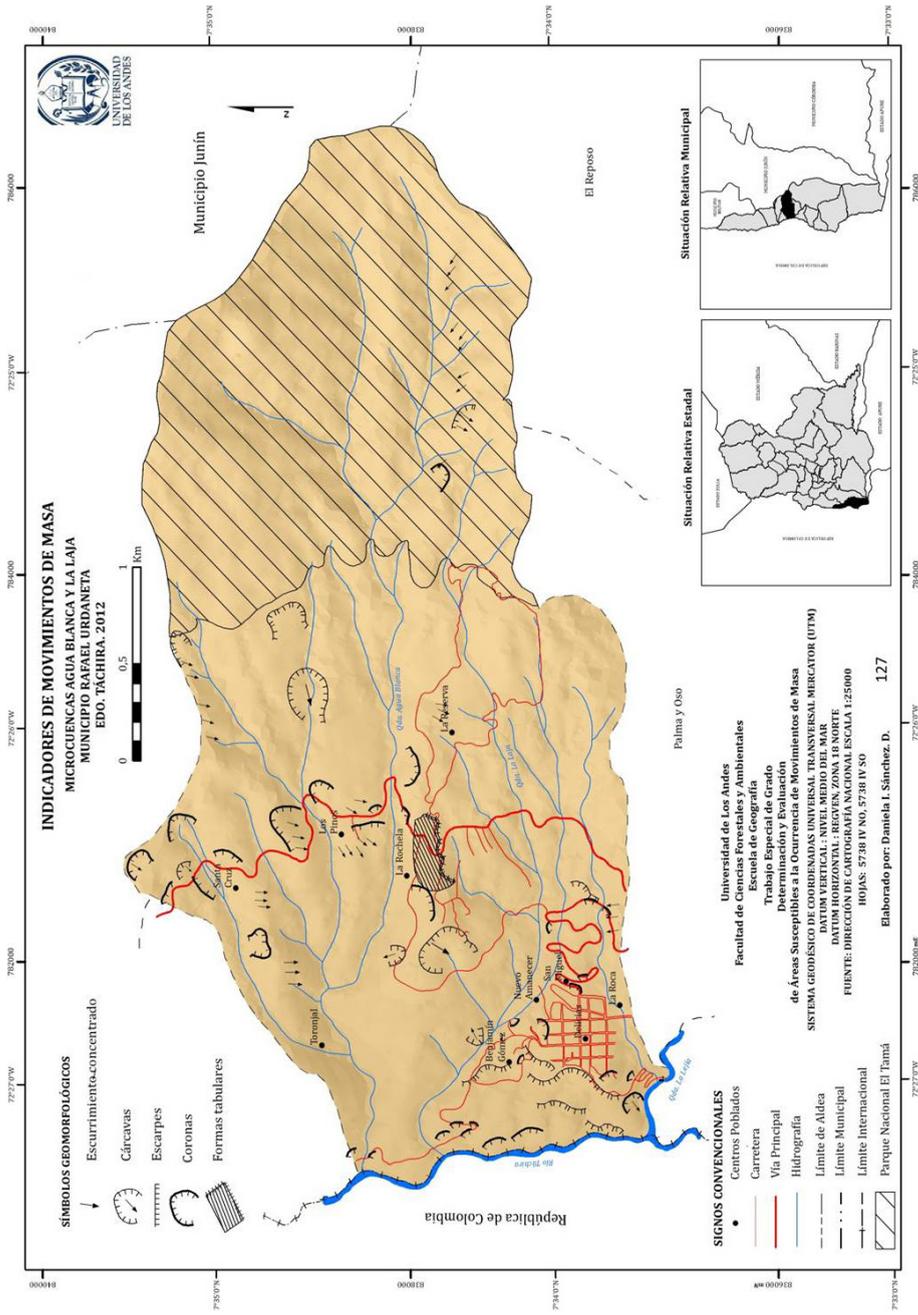


Figura 10. Mapa de evidencias de movimientos de masa

Cuadro 8. Evaluación de factores seleccionados para el análisis de susceptibilidad

| Evaluación de Factores | | | |
|----------------------------------|--|----------------------------------|--|
| Factores | Parámetro | Descripción | Peso |
| Condicionantes | Geológico. Condiciones Geomecánicas | Muy malo | 3 |
| | | Malo | 2 |
| | | Moderado | 1 |
| | | Bueno | 0 |
| Desencadenantes | Valores de pendiente | $0 \leq 8,5^\circ$ | 1 |
| | | $> 8,5^\circ \leq 16,7^\circ$ | 2 |
| | | $>16,7^\circ \leq 26,6^\circ$ | 3 |
| | | $>26,6^\circ \leq 45^\circ$ | 4 |
| | | $>45^\circ$ | 5 |
| Desencadenantes | Uso y cobertura de la tierra. Tipos de uso | Urbano | 4 |
| | | Agrícola | 3 |
| | | Agropecuario | 2 |
| | | Agricultura de bajo impacto | 1 |
| | | ABRAE | 0 |
| RANGOS DE SUSCEPTIBILIDAD | | CLASES DE SUSCEPTIBILIDAD | Leyenda |
| 0 < Susceptibilidad ≤ 3 | | Baja |  |
| 3 < Susceptibilidad ≤ 6 | | Media |  |
| 6 < Susceptibilidad ≤ 9 | | Alta |  |
| >9 | | Muy alta |  |

Según los valores propuestos por Suárez (1998), Nicholson y Hencher (1997; citado en Suárez, 1998); y de la Asociación Internacional de Mecánica de Rocas ISRM (1981; citado en González de Vallejo *et al.*, 2002)

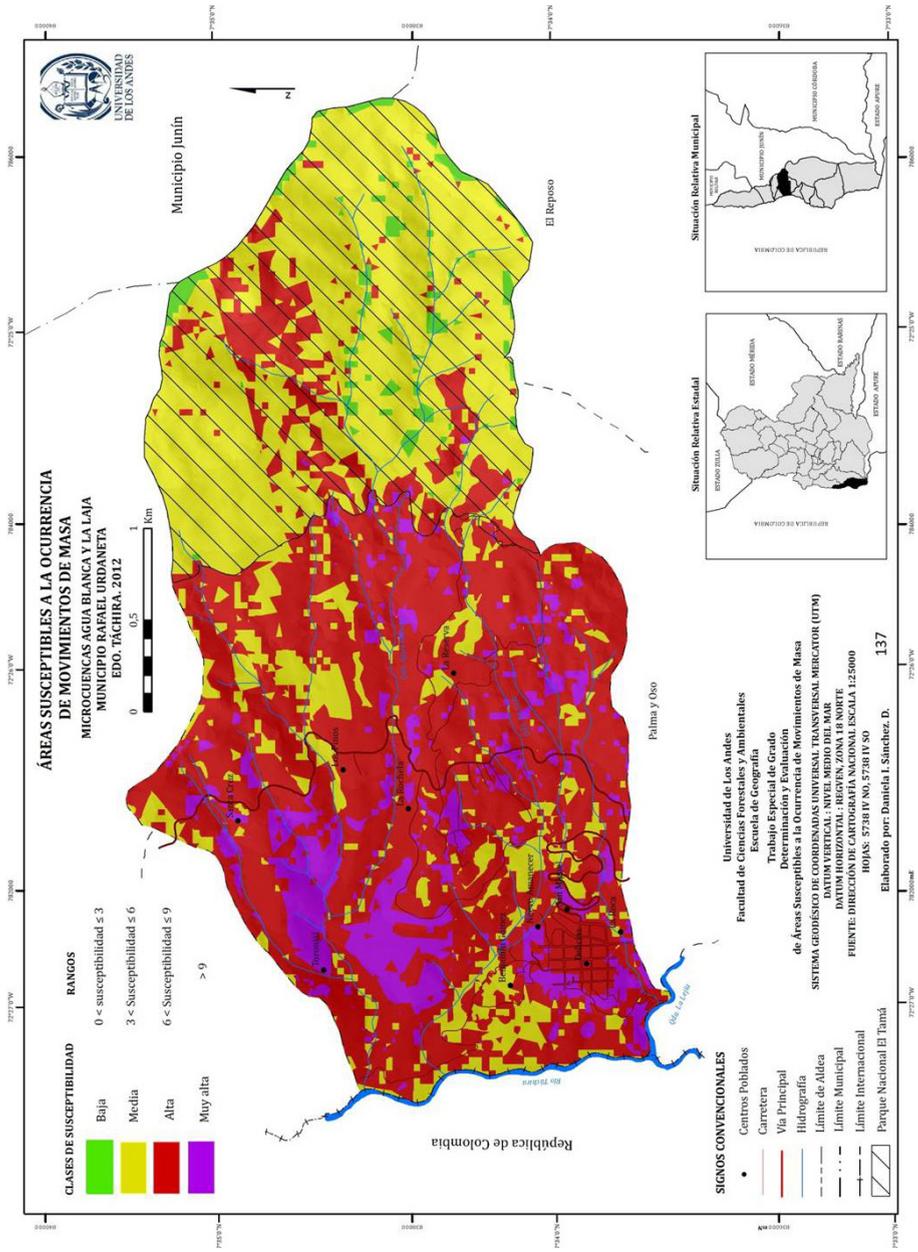


Figura 11. Mapa de áreas susceptibles a la ocurrencia de movimientos de masa

4. Resultados y análisis

El grado de influencia de cada uno de los factores considerados en el análisis de la susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos de masa, se determinó de acuerdo al porcentaje de área que ocupa cada factor respecto a la superficie total del área de estudio que presenta actividad de movimientos de masa.

Con relación al factor geología, los rangos de condiciones geomecánicas de las unidades que constituyen el sustrato del área de estudio (Figura 8), ejercen influencia directa en la ocurrencia de movimientos de masa. El 61%, (6,29 km² de los 10,36 km² de área total), presenta condiciones geomecánicas en el rango de 'muy malas', específicamente hacia las zonas del casco central del centro poblado Delicias (donde aflora la formación Capacho) y en el sector La Rochela (donde aflora la formación Aguardiente), situación a la que se debe prestar especial atención, ya que son los sitios que presentan mayor concentración poblacional y mayor interacción en la dinámica socioespacial del área de estudio. A pesar de que las condiciones de fracturación y meteorización de la formación Aguardiente son semejantes a las de las formaciones Capacho y La Luna, es esa unidad la que registra mayor ocurrencia de movimientos de masa; lo cual se explica en primer lugar, por la superficie que abarca (75 % del área de estudio) y, en segundo lugar, por presentar localmente una alta proporción de lutitas carbonosas fisiles interestratificadas con una menor proporción de areniscas cuarzosas fracturadas.

Las pendientes y el uso de la tierra en las áreas ocupadas por la formación Aguardiente también son responsables del gran número de procesos gravitacionales registrados. Los sectores que exhiben condiciones geomecánicas clasificadas como 'malas' ocupan los 4,07 km² restantes del área de estudio (39%) y, aunque en menor grado, también promueven en gran medida la ocurrencia de procesos gravitacionales. Las áreas con este tipo de condiciones se distribuyen principalmente hacia el sector Los Pinos y las áreas del barrio Benjamín Gómez, así como gran parte de las áreas que comprende el Parque Nacional El Tamá, las cuales no registran tantos procesos de ladera debido al uso protector dado al suelo.

El componente estructural en el área de estudio representado por las fallas observadas e inferidas, influye en el grado de fracturación de las rocas. A pesar de que no se contaron con datos precisos de sismicidad activa para estas fallas, los rasgos estructurales asociados a la zona de fallas de Boconó y al denominado nodo sísmico de Pamplona en la República de Colombia, sugieren no descartar a la sismicidad como posible detonante de movimientos de masa futuros. Esta condición sismogénica se pone de manifiesto en algunos informes realizados por parte de la Alcaldía del municipio y en algunos reportes realizados por parte del Instituto Colombiano de Ingeniería y Minería (Ministerio de Minas y Energía, 2000) sobre la red sismológica para la zona del norte de Santander, recordando la interacción fronteriza que estos sistemas pre-

sentan en la realidad del área de estudio y la importancia de la actividad sísmica en el eje fronterizo.

La pendiente del terreno se encuentra directamente relacionada con la estabilidad de las laderas y la incidencia de procesos gravitacionales. Para el área de estudio, el mapa de pendientes (Figura 7) refleja que la mayor parte de la superficie (casi el 73%) se encuentra dominada por rangos de pendientes medias ($>16,7^\circ$ hasta $\leq 26,6^\circ$) y altas ($>26,6^\circ$ hasta $\leq 45^\circ$). El rango de pendientes medias ocupa $4,01\text{km}^2$ (41%) del área de estudio y representa el 43% de las áreas que registran movimientos de masa. Las pendientes altas dominan el 32% del área de estudio y representan el 32% de las áreas donde se registra ocurrencia de movimientos de masa, los sitios donde se presenta este rango de pendientes corresponde a la parte baja de la aldea Toronjal, al sector La Reserva, y las inmediaciones del Parque Nacional El Tamá, lugares estos donde prevalece la ocurrencia de movimientos de masa y otros procesos erosivos producto del escurrimiento concentrado.

Las pendientes muy altas abarcan el 3%, las cuales conforman los relieves de mayor altitud del área en las elevaciones del cerro Pico de Vela, y representan el 3% de las áreas donde hay actividad de movimientos de masa. Mientras que la categoría de pendientes bajas y muy bajas ($\leq 16,7^\circ$) abarcan el 24% restante del área de estudio y contienen el 3% de las áreas donde se registraron movimientos de masa. Estas últimas corresponden a los depósitos de relleno de fondos de va-

lle, como es el caso de los sectores sobre las que se encuentra asentado el casco central de la población de Delicias y los centros poblados Los Pinos, Santa Cruz y la Rochela.

A pesar que en estos sitios las pendientes bajas ofrecen condiciones adecuadas para el asentamiento de infraestructuras, en los escarpes erosivos que delimitan estos depósitos sedimentarios las pendientes son mucho mayores, favoreciendo la ocurrencia de colapsos por caídas de rocas (derrumbes) hacia las vías principales, además de flujos y deslizamientos, como en el caso del escarpe que vierte sus aguas al río Táchira (Figura 12).

El uso y cobertura de la tierra como factor externo que podría llegar a convertirse en un factor desencadenante es evidente en casi la totalidad del área de estudio, a excepción de aquellas áreas que conforman el parque nacional. Las prácticas agropecuarias afectan la estabilidad de las vertientes, debido a la pérdida significativa de vegetación, exponiendo a las laderas donde existe este tipo de prácticas a procesos de erosión y de remoción en masa. Los cambios en la topografía de algunas vertientes, producto del corte de las mismas para la construcción de infraestructuras, alteran el ángulo de equilibrio y generan sobrecargas que incrementan los niveles de inestabilidad.

La infiltración de agua proveniente de la fuga en tuberías rotas provenientes de los sistemas de aguas blancas y aguas servidas de algunos centros poblados como Delicias y de algunos sistemas de riego utilizados para la actividad agrícola, tam-



Figura 12. Cicatrices de flujos y deslizamientos en el escarpe principal del río Táchira, fm. Capacho. Toma fotográfica del escarpe desde el sector El Oasis-República de Colombia. Fotografía: Daniela Sánchez

bién podría actuar como desencadenante al saturar los materiales a nivel sub-superficial, modificando sus propiedades y la resistencia al corte, haciéndolos mucho más propensos al desequilibrio y la inestabilidad.

Se debe destacar también el papel de las precipitaciones como factor detonante de los movimientos de masa; es así como al levantar la información de movimientos de masa en campo se observó que la mayoría de ellos presentan un contenido de humedad importante, permitiendo argumentar que los mecanismos de activación de los mismos muy probablemente estén asociados a períodos de lluvias intensas y a las fluctuaciones del nivel freático debido a las causas antes señaladas, lo que aunado a las malas condiciones geomecánicas y a

las pendientes predominantes, propician la generación y reactivación de procesos gravitacionales.

La zonificación final de los niveles de susceptibilidad resultó un fiel reflejo de la realidad del área de estudio; es así como aquellos sectores que arrojaron niveles de 'susceptibilidad baja' se corresponden principalmente con áreas donde aflora la formación Aguardiente, la que a pesar de presentar condiciones geomecánicas catalogadas como malas y pendientes elevadas, está protegida por una densa cobertura vegetal en áreas poco intervenidas del Parque Nacional El Tamá. Mientras que, los lugares donde los resultados de la metodología aplicada arrojaron niveles de 'susceptibilidad media' son aquellos donde se desarrollan actividades de agricultura de bajo impacto

y afloran predominantemente las formaciones Aguardiente, Capacho y La Luna, que presentan condiciones geomecánicas catalogadas en los rangos de ‘malas y muy malas’ en pendientes moderadas, y existe evidencia de la ocurrencia de procesos de escurrimiento concentrado y movimientos de masa; predominantemente hacia las zonas adyacentes al escarpe principal del río Táchira en gran parte del Parque Nacional El Tamá y en los sectores, La Roca, San Miguel y una parte del sector Benjamín Gómez. Por su parte, las áreas representadas por niveles de ‘susceptibilidad alta’ ocupan el 50 % del área de estudio, condicionadas por el comportamiento geomecánico deficiente (alto grado de fracturación y meteorización) de las formaciones Aguardiente y Capacho, en pendientes bajas, moderadas y altas, donde se desarrollan actividades agrícolas y se asientan la mayoría de los centros poblados, lugares estos caracterizados por la amplia distribución y recurrencia de procesos de movimientos de masa. Finalmente los sectores que ostentan los niveles de ‘susceptibilidad muy alta’ ocupan el 10 % del área de estudio y corresponden a aquellos lugares donde las formaciones Capacho y Aguardiente poseen condiciones geomecánicas catalogadas como ‘muy malas’, en pendientes altas y muy altas ($> 45^\circ$), coincidiendo en su mayoría con los escarpes erosivos de los distintos cursos fluviales que delimitan al centro poblado de Delicias y las aldeas Toronjal, San Miguel y La Rochela. En esos lugares, las actividades agrícolas y otras que se derivan del uso urbano de la tierra, en combinación con las condi-

ciones mencionadas, determinan un alto grado de ocurrencia de movimientos de masa y procesos de escurrimiento concentrado.

5. Conclusiones

- La metodología desarrollada cumplió con el objetivo de generar una zonificación de áreas susceptibles a la ocurrencia de movimientos de masa, para lo cual fue necesario analizar las variables o factores que ejercen mayor influencia en la estabilidad de las vertientes, permitiendo realizar una caracterización general del área de estudio en relación a las condiciones geodinámicas más influyentes.
- Los valores de peso asignados para cualificar los factores resultaron válidos para caracterizar el comportamiento del área de estudio, considerando la escala de trabajo utilizada.
- Las combinaciones de factores en los lugares donde están ocurriendo o han ocurrido movimientos de masa permitió inferir la propensión a su ocurrencia en otras áreas donde dichas combinaciones se repiten aunque todavía allí no hayan ocurrido, dando como resultado la zonificación de áreas de ocurrencia potencial de este tipo de procesos.
- En términos generales, el nivel de susceptibilidad predominante en el área de estudio es la ‘susceptibilidad alta’. Este nivel abarca el 50% del total del área de estudio lo que refleja la potencialidad de ocurrencia de movimientos de masa.

6. Nota

- 1 Un drenaje subsuperficial de índole regmático es aquel que aporta escurrimiento entre las fisuras de rocas diaclasadas en un sistema de fracturación regmática. Según autores tales como: Coira, B. *et al.* (1975), Gay (1972; 1973), Moody & Hill (1956) y Moody (1973), los sistemas de fracturación regmática generalmente consisten en fracturas que ocurren en el basamento, las cuales han experimentado desplazamientos de rumbo que afectan a las rocas sedimentarias suprayacentes. Estas fracturas regmáticas se evidencian por la presencia de uno o más sistemas conjugados de lineamientos a lo largo de su traza, que ejercen control estructural del drenaje o por alineamientos observables en el suelo o la vegetación. La deformación asociada a estos sistemas de fracturación también ejerce control sobre la orientación de los sistemas de plegamiento, las fallas secundarias, la creación de relieve, y el emplazamiento de los intrusivos post-orogénicos.

7. Referencias citadas

- COIRA, B.; NULLO, F. E.; PROSERPIO, C. A. y V. A. RAMOS. 1975. *Tectónica de basamento de la región occidental del Macizo Nordpatagónico (provincias de Río Negro y del Chubut)*. **Revista de la Asociación Geológica Argentina**, 30: 361-383.
- DEGRAFF, J. & H. ROMESBURG. 1980. Regional Landslide – Susceptibility Assessment for Wildland Management: A Matrix Approach. En: Coates, D. y Vitek, J. (Eds). **Thresholds in Geomorfology**. 401-414. Allen & Unwin. London-UK.
- EWEL, J. 1968. **Zonas de Vida de Venezuela: memoria explicativa sobre el mapa ecológico**. Ministerio de Agricultura y Cría, Dirección de Investigación. Caracas-Venezuela. 235 p.
- GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE VENEZUELA. 1979. *Creación del Parque Nacional El Tamá*. N° E- 2.417, decreto N° 2.984 de fecha 12 de diciembre de 1978.
- GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE VENEZUELA. 1991. *Plan de Ordenamiento y Uso del Parque Nacional El Tamá*. N° 34.856, decreto N° 1.844.
- GAY, S. P. 1972. *Fundamental characteristics of aeromagnetic lineaments, their geological significance, and their significance to geology*. Salt Lake City, Utah: American Stereo Map Company, 94 p.
- GAY, S. P. 1973. *Pervasive orthogonal fracturing in earth's continental crust: American Stereo Map Co.*, Salt Lake City, Utah, 123 p.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. y C. OTEO. 2004. **Ingeniería Geológica**. Pearson Prentice Hall. 715 p.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ROCKS MECHANICS (ISRM). 1981. **Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. ISRM suggested methods**. Ed. E.T. Brown. Pergamon Press.
- LÓPEZ, M. y P. VIELMA. 1982. **Estudio Geográfico del Municipio Delicias, Distrito Junín-Estado Táchira**. Servicio de Geografía y Cartografía de las Fuerzas Armadas. Ministerio de la Defensa. Publicación G-70. Caracas-Venezuela. 95 p.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES (MARNR). 1993. *Estudio Integral, Zonas*

- Cafetaleras del Estado Táchira. Municipios Junín y Bolívar. San Cristóbal-Venezuela. 163 p.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES (MARNR). 2001. *Plan de Manejo Integral de la Subcuenca Binacional del Río Táchira, Parte Alta y Media. Consorcio Binacional Venezuela y Colombia, Diagnóstico Físico – Natural*. San Cristóbal-Venezuela. 90 p.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES, (MARNR), 2005. *Hoja cartográfica de Usos del Territorio y Áreas Compatibles*. Dirección Estatal Ambiental Táchira-Comisión Estatal de Ordenación del Territorio en el Plan de Ordenación del Territorio del Estado Táchira. Escala 1:100.000.
- MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. 2011. **Léxico Estratigráfico de Venezuela**. Disponible en: <http://www.pdv.com/lexico/lexicoh.htm>
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. 2000. *Informe técnico sobre fenómenos de remoción en masa que afectan el municipio de Herrán, Departamento de Norte de Santander*. Santa Fe de Bogotá-República de Colombia. 56 p.
- MOODY, J. D. & M. J. HILL. 1956. *Wrench faults tectonics*. **Geol. Soc. América Bull.** 67: 1.207-1.246.
- MOODY, J. D. 1973. *Petroleum exploration aspects of wrench-fault tectonics*. **Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.** 57: 449-476.
- NICHOLSON, D. T. & S. HENCHER. 1997. Assessing the potential for deterioration of engineered rock slopes. *Proceeding International Symposium on Engineering Geology and the environment*. 911-917. Athens.
- RAMÍREZ, R. 1998. *Aplicación de una metodología para la determinación de áreas susceptibles a la ocurrencia de movimientos de masa. Caso: Microcuenca La Piñalera, Cuenca del río Dorada, estado Táchira*. Centro de Estudios de Postgrado. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Tesis de Maestría. 32 p.
- SCHUBERT, C. y L. VIVAS. 1993. **El Cuaternario de la cordillera de Mérida. Andes venezolanos**. Universidad de Los Andes / Fundación Polar. Mérida-Venezuela.
- SUÁREZ, J. 1998. **Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales**. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga-Colombia. 541 p.
- VARNES, D. 1978. *Slope movement types and processes*. 11 – 2. Special report 176: Landslide: Analysis and control (R.L Schuster and R.J Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C. 234 p.

Fecha de culminación: octubre, 2014

Lugar: Mérida-Venezuela