



Terra Nueva Etapa
ISSN: 1012-7089
vidal.saezsaez@gmail.com
Universidad Central de Venezuela
Venezuela

Aplicación de modelo de susceptibilidad a deslizamientos superficiales e índices de erosión en la cuenca del río Mamo y subcuenca El Tigre. Estado Vargas. Venezuela

Batista, J.R.; Bustos Catarí, X.

Aplicación de modelo de susceptibilidad a deslizamientos superficiales e índices de erosión en la cuenca del río Mamo y subcuenca El Tigre. Estado Vargas. Venezuela

Terra Nueva Etapa, vol. XXXIV, núm. 55, 2018

Universidad Central de Venezuela, Venezuela

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72156172017>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Aplicación de modelo de susceptibilidad a deslizamientos superficiales e índices de erosión en la cuenca del río Mamo y subcuenca El Tigre. Estado Vargas. Venezuela

Susceptibility Model application to superficial landslides and erosion indices in the Mamo river basin and El Tigre river sub-basin. Vargas State. Venezuela

J.R. Batista

*Centro de Estudios Integrales del Ambiente - Universidad
Central de Venezuela, Venezuela*
juanbatista@ucv.ve

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72156172017>

X. Bustos Catari

*Centro de Estudios Integrales del Ambiente - Universidad
Central de Venezuela (UCV), Venezuela*
xavier.bustos@ucv.ve

Recepción: 12 Enero 2018
Aprobación: 21 Marzo 2018

RESUMEN:

La finalidad de este trabajo es estudiar los movimientos de masa y procesos erosivos que han ocurrido en la cuenca del río Mamo y la subcuenca El Tigre, estado Vargas, Venezuela y también identificar las áreas de la cuenca más susceptibles a inducir deslizamientos y erosión. Para lograrlo, se emplearon los siguientes métodos: 1) cálculo de factor de certeza (semi probabilístico), el cual es aplicado a cinco capas temáticas ponderadas para definir las áreas susceptibles a deslizamientos para toda la cuenca; 2) método SINMAP que permitió calibrar el resultado obtenido a partir del primer método, y 3) método (determinístico) que se relaciona con la aplicación de índices de erosión para cartografiar las áreas susceptibles a estos procesos de degradación. Esta investigación se apoyó principalmente en el inventario de deslizamientos activos durante los últimos 60 años, un Modelo de Elevación Digital (MED), imágenes de sensores remotos, geología y data de precipitaciones. Los resultados obtenidos para los modelos de susceptibilidad y estabilidad de taludes indican que la cuenca baja densamente poblada del río Mamo y la subcuenca del río El Tigre, son las más susceptibles a deslizamientos que las cuencas medias y altas de la misma. Esto se complementa con el cálculo de los índices de erosión total (TSP), unitario (USP) y de esfuerzo cortante (SSP), en donde para el primero se resaltan los procesos de erosión en la parte baja de la cuenca, mientras que para los índices USP y SSP se observa una erosión significativa en sus partes media y baja. Con este último índice, se detecta además una erosión relevante a lo largo de la subcuenca del río El Tigre.

PALABRAS CLAVE: Deslizamiento, erosión, Sistema de Información Geográfica, modelo, cuenca.

ABSTRACT:

The purpose of this work is to study the mass movements and erosion processes that have occurred in the Mamo river basin and El Tigre river sub basin, Vargas state, Venezuela, and also to identify the most susceptible areas of the basin to induce landslides and erosion. To achieve it, the following methods were used: 1) calculation of certainty factor (semi-probabilistic), which is applied to five thematic layers which are weighted to define the landslide susceptibility areas for the entire basin; 2) SINMAP method that allowed to calibrate the result acquired from the first method, and 3) the deterministic method that is related to the application of erosion indexes to map the susceptible areas to these processes of degradation. This research was based mainly on the inventory of

NOTAS DE AUTOR

Juan Rafael Batista. Maestría en Ciencias Geológicas, UCV 2015, Licenciado en Geografía, UCV 1996. Profesor Instructor investigador docente adscrito al Centro de Estudios Integrales del Ambiente y Profesor de la materia "Introducción a la teledetección en la Escuela de Geografía - Universidad Central de Venezuela (UCV). Áreas de Investigación: Sistemas de Información Geográfica y desarrollos en Internet. Correo electrónico: juanbatista@ucv.ve

Xavier Bustos C. Doctorado en Ciencias de la Computación, UCV 2015, Maestría en Ciencias de la Computación, UCV 2000, Licenciado en Ciencias de la Computación, UCV 1994. Profesor Titular adscrito al Centro de Estudios Integrales del Ambiente y la Escuela de Geografía - Universidad Central de Venezuela (UCV). Coordinador de Investigación y Miembro del Comité Académico de la Maestría en Planificación Integral del Ambiente, CENAMB UCV. Correo electrónico: xavier.bustos@ucv.ve

active landslides for the last 60 years, a Digital Elevation Model (DEM), remote sensing imagery, geology and precipitation data. The results obtained for stability index and susceptibility models indicate that for low basin densely populated of the Mamo river and El Tigre river sub basin, are the most susceptible to landslides than the middle and upper areas of it. This is complemented with the calculation of the Total Erosion Power (TEP), Unit Stream Power (USP) and Shear Stress Power (SSP) indices, where for the first one the presence of erosion in the lower part of the basin is important, while for The USP and SSP indices show a significant erosion in the middle and lower parts of the same, with this last index a significant erosion is detected through “El Tigre” watershed.

KEYWORDS: Landslide, Geographical Information System, model, basin.

INTRODUCCIÓN

En cuanto a los desastres naturales que afectan a las comunidades cada año, los deslizamientos de tierra o movimientos de masas son algunos de los de mayor frecuencia e impacto. En Venezuela a partir de las fuertes precipitaciones ocasionadas por las tormentas que afectaron el área de estudio: cuenca del río Mamo en los años 1999, 2005 y 2011, se desencadenaron y/o reactivaron deslizamientos en la misma, de igual manera las fuertes lluvias ocasionaron inundaciones y flujos detríticos que dañaron las comunidades que hacen vida en esa área (ej. Marapa, Piache, etc.) y que afectaron las obras de infraestructura del canal del río. Debido a que se conocen casos de deslizamientos en la cuenca del río Mamo (Batista, 2015) hemos constatado que es un fenómeno recurrente de data reciente en los años de 2005 y 2011.

Esta investigación es importante para aportar una metodología que nos permita ubicar aquellas áreas que sean propensas a deslizamientos y a erosión, con el fin de cartografiar zonas pobladas que se puedan ver afectadas por deslizamientos y la tasa de erosión. Su aplicación nos permitirá conocer mejor la dinámica geomorfológica con respecto a eventos extraordinarios para esta cuenca y otras colindantes dentro de la Cordillera de la Costa, además de realizar aportes en el campo geomático respecto al empleo de herramientas para el modelado de amenazas hidrometeorológicas.

Área de estudio

El área de estudio limita al norte con el Mar Caribe, al sur con los estados Aragua y Miranda, al este con las cuencas de las quebradas La Zorra y Tacagua y al oeste con las cuencas del río Oricao y Chichiriviche. Comprende el municipio Vargas, parroquias Catia La Mar, Carayaca y El Junko del estado Vargas. La cuenca del río Mamo abarca una superficie de 144,6 Km². La misma pertenece a la Serranía del Litoral Central.

“El río Mamo nace en el Pico Geremba (El Palmar) a una altura de 2.210 msnm y recorre 38,4 km antes de descargar sus aguas al Mar Caribe justo en el Club de Mamo con una pendiente de fondo de 1,4 %. Está formado por numerosos afluentes entre los que cabe destacar al río Petaquire y a las quebradas Yaguara, El Piache y El Tigre” (COTEV, 2004). Ver figura 1.

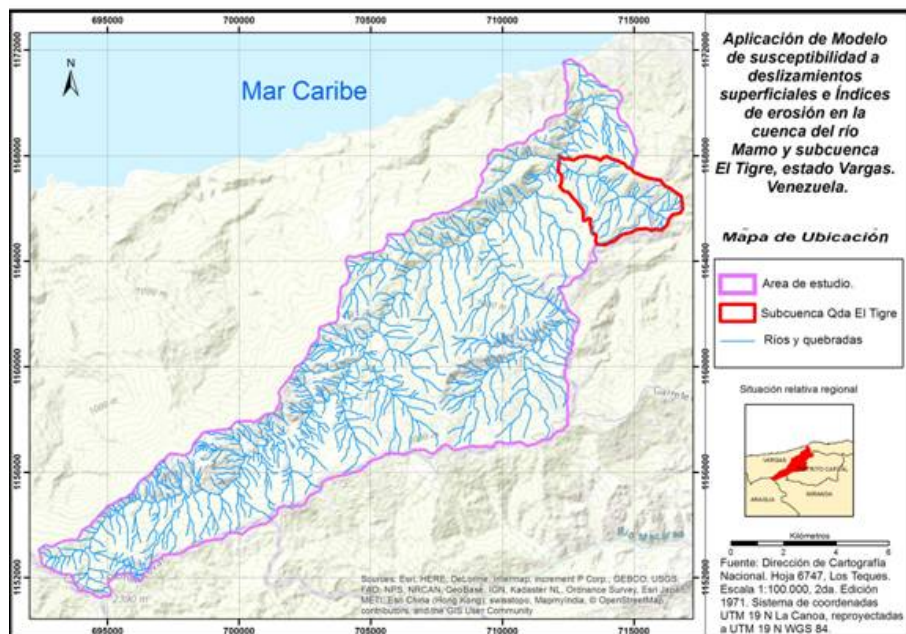


FIGURA 1
Localización del área de estudio y drenaje
Fuente: Elaboración propia.

MARCO TEORICO Y METODOLOGICO

Según Van Westen (2005) “existe una amplia variedad de nombres para los procesos denudacionales donde el suelo o roca es desplazado a lo largo de la pendiente por fuerzas gravitacionales.

- movimientos en masa
- movimientos de pendiente,
- deslizamiento”

Así mismo define deslizamiento como “movimiento de una masa de roca, debris o tierra, pendiente abajo”. Mientras que el término “talud” (“slope”) es utilizado tanto para pendientes naturales como artificiales. “A los taludes naturales se les conoce también como “ladera”, mientras que un talud artificial puede ser en “corte” o en “lleno (relleno)” (Suárez, 1998). Un talud estable puede convertirse en un “deslizamiento”, por lo que los deslizamientos son “taludes inestables” (*Op cit.*, 1998).

Para esta investigación se aplica el concepto de susceptibilidad a deslizamientos manejado por Cereceda (Cereceda, 2006) quien indica que “la susceptibilidad es la potencialidad de un terreno o área a la ocurrencia de deslizamientos y no implica el aspecto temporal del fenómeno”.

En la cuenca del río Mamo se han hecho estudios poco detallados de estabilidad de taludes, pero no de susceptibilidad a deslizamientos o índices de erosión, por lo que esta investigación es de tipo exploratoria. Para este artículo se trabajó con una combinación de técnicas de geomorfología cuantitativa y de métodos estadísticos-determinísticos. Estos últimos para lograr una zonificación de las áreas de mayor susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos, mediante la evaluación de factores causantes y el inventario de dichos eventos; mediante la implementación de un SIG (Cereceda, 2006; Wilson y Gallant, 2000).

El modelo de susceptibilidad se hace combinando distintas coberturas de cartografía temática, mediante la aplicación de la función de probabilidad llamada factor de certeza (F.C.). Al obtener el mapa de susceptibilidad se compara con el mapa de estabilidad de taludes, generado con el programa SINMAP

(Stability Index Mapping), (Pack *et. al.*, 2005); este producto sirve para calibrar el mapa de susceptibilidad. Después se cruza el resultado (validado) con los índices de erosión con el fin de identificar las áreas más vulnerables de la cuenca.

Para elaborar el modelo de factor de certeza se establecieron unos parámetros de ocurrencia que permiten determinar la susceptibilidad del área (a deslizamientos), se calcula el índice de estabilidad de laderas (figura 2).

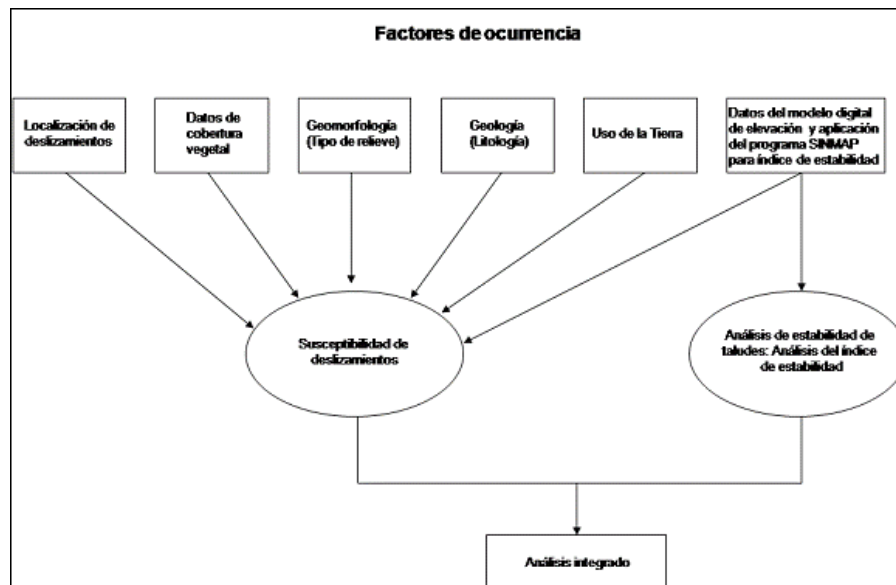


FIGURA 2
Metodología para establecer la susceptibilidad a deslizamientos
Fuente: Elaboración propia

FACTORES CONDICIONANTES, DESENCADENANTES Y EXPUESTOS

El modelo de susceptibilidad se hace combinando las siguientes coberturas: litología, geomorfología, pendiente, uso de la tierra y cobertura vegetal, mediante la aplicación de la función de probabilidad llamada Factor de Certeza (F.C.) (cuadro 1); calculado por las siguientes ecuaciones:

F.C. = Si: PPa mayor o igual a PPs

F.C. = Si: PPa menor a PPs

Donde:

PPa: Superficie probable de deslizamientos por cada factor de ocurrencia (km² o ha de deslizamientos por cada tipo de litología, de pendiente, de vegetación, etc.).

PPs: número probable de superficie de deslizamientos en el área total de estudio.

Y, la probabilidad:

$Ppa = \text{Área de deslizamiento por cada clase del factor de ocurrencia} / \text{Área de cada clase de factor de ocurrencia}$

$Pps = \text{Área total de deslizamientos por cada factor de ocurrencia} / \text{Área total de la zona de estudio}$

Grado	Rango	Descripción	Clase de peligro
1	-1 a -0,5	Minima certeza en la ocurrencia de un deslizamiento	Alta estabilidad
2	-0,5 a -0,05	Baja certeza en la ocurrencia de un deslizamiento	Mediana Estabilidad
3	-0,05 a 0,05	Incertidumbre Los valores de F.C. dentro de este rango representan un intervalo en el cual la certeza en la ocurrencia de deslizamientos no puede ser Expresado.	Incertidumbre
4	0,05 a 0,3	Baja certeza en la ocurrencia de un deslizamiento.	Baja Inestabilidad
5	0,3 a 0,8	Mediana certeza en la ocurrencia de un deslizamiento.	Mediana Inestabilidad
6	0,8 a 1	Alta certeza en la ocurrencia de un deslizamiento.	Alta inestabilidad

CUADRO 1
Clasificación de los peligros en base al F.C.
Fuente: Cereceda, 2006.

ESTABILIDAD DE TALUDES O LADERAS

Para determinar la estabilidad de los taludes o laderas, como insumo para calibrar el mapa de susceptibilidad, se procedió de la siguiente manera:

$$IS = Prob (Fs > 1)$$

Para determinar el índice de estabilidad de taludes (IS) se procede a integrar ecuaciones y modelos matemáticos bajo un módulo de SIG llamado *Stability Index MAPing (SINMAP)*, inventario de deslizamientos e inferencia de ciertos parámetros de precipitación.

“La estabilidad de taludes se basa principalmente en el concepto de Factor de seguridad (FS), donde el FS se define como la relación que existe entre la resistencia al corte del suelo o roca y los esfuerzos cortantes a lo largo de una superficie de falla” (Cereceda, 2006).

Para calcular el grado de estabilidad de laderas, en base al factor de seguridad (Cereceda, 2006) se necesita primero un Modelo de Estabilidad Infinita de Taludes + Modelo Hidrológico (TOPMODEL) + Índice Topográfico de Humedad = Índice de estabilidad de taludes. Ver cuadro 2

IS	CLASES	ESTABILIDAD	Categorías de SinMap
$IS > 1,5$	1	Alta estabilidad	Estable
$1,5 > IS > 1,25$	2	Estabilidad media	Moderadamente estable
$1,25 > IS > 1,0$	3	Baja estabilidad	Nominalmente estable
$1,0 > IS > 0,5$	4	Baja Inestabilidad	Umbral inferior de inestabilidad
$0,5 > IS > 0,0$	5	Inestabilidad media	Umbral superior de inestabilidad
$IS = 0$	6	Alta inestabilidad	Inestable

CUADRO 2
Grados de estabilidad en función a los IS
Fuente: Cereceda, 2006

En cuanto a los índices de erosión (Stream Power Index-SPI), estos se consideran parámetros generalizados útiles para el modelado de procesos erosivos. El análisis se basa, como una predicción, en la tasa de incisión en el lecho de roca vista como una función de la potencia de la corriente (Finlayson et al, 2002, Tucker

y Whipple, 2002). La siguiente ecuación es la expresión general utilizada para el cálculo de los índices de erosión.

$$e = kA_s^m S^n$$

Donde e representa la tasa de incisión local, A_s es el área de drenaje (desagüe) aguas arriba (tomada como una aproximación para el caudal), S es el valor de la pendiente local, mientras que k se relaciona directamente con la litología y es llamado el coeficiente de erodabilidad que refleja la dureza (Whipple, 2001). Diferentes valores de m y n pueden ser usados dependiendo de la forma como son controladas las tasas de incisión de los ríos.

Potencia Total del Flujo (TSP): La erosión está controlada por la potencia o poder de flujo de agua que puede existir en la cuenca, en este caso $m=1$ y $n=1$. Por lo que:

$$TSP = kA_s S$$

Potencia Unitaria del Flujo (USP): La tasa de incisión está controlada por la amplitud o ancho del canal, $m=1/2$, $n=1$.

$$USP = kA_s^{0.5} S$$

Potencia de Corte del Flujo (SSP): La incisión es controlada por la potencia del esfuerzo cortante sobre el lecho del curso de agua, $m=1/3$, $n=2/3$.

$$SSP = kA_s^{0.33} S^{0.67}$$

El factor k (peso litológico) se asigna de acuerdo a la litología local (ver cuadro 3), para el caso de los índices de erosión se tomó la precipitación acumulada para 12 años registrada en Bookhagen (Bookhagen, 2010), mostrada en la figura 3.

Código Unidad Geológica	Peso	Litología	Tipo de Roca
Qal	2	Aluvión	
CN	0.5	Anfibolita de Nurgua	Ígneo-metamórficas
ASJ	0.5	Complejo San Julián	Ígneo-metamórficas
CaB	0.5	Esquistos de Las Brisas	Ígneo-metamórficas
CT	0.5	Esquistos de Tacagua	Ígneo-metamórficas
ACT	0.5	Gneis de la Colonia Tovar	Ígneo-metamórficas
GCB	2	Grupo Cabo Blanco	Sedimentarias
CA	0.5	Mármol de Antimano	Ígneo-metamórficas
Sp	0.6	Serpentinita	Ultramáficas
Sp	0.6	Serpentinita	Ultramáficas
Sp	0.6	Serpentinita	Ultramáficas
Sp	0.6	Serpentinita	Ultramáficas
Sp	0.6	Serpentinita	Ultramáficas

CUADRO 3

Valores litológicos con sus pesos asociados, pesos similares son utilizados en Bustos (Bustos, 2016) y Anbalagan (Anbalagan *et al.*, 2008)

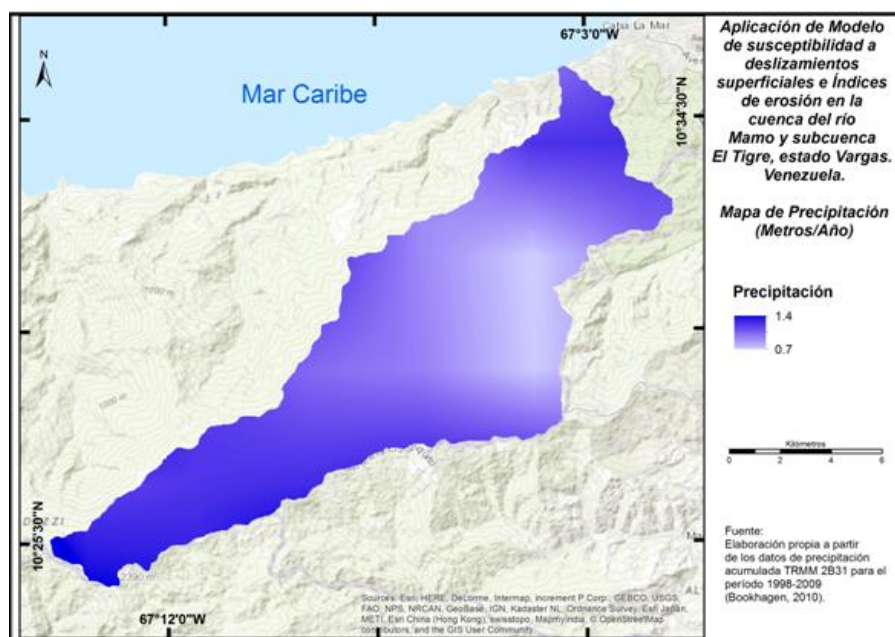


FIGURA 3

Mapa de precipitación (metros/año) para un acumulado de 12 años (Bookhagen, 2010)

Todo este procesamiento se realizó con la plataforma ArcGis versión 10.2 -ESRI, en particular se empleó la herramienta Hydrology y la aplicación SINMAP (que se ejecuta bajo este software). Los análisis espaciales se realizan sobre modelo *Raster* con celdas o píxeles de 30 metros de resolución espacial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación presentaremos y discutiremos los mapas generados en este trabajo:

Categorías (índices) de susceptibilidad para la cuenca

En esta etapa de la investigación a cada mapa correspondiente a los “factores de ocurrencia” (litología, geomorfología, pendiente, uso de la tierra y cobertura vegetal) se les asocia una categoría de “factor de certeza”: 1. alta estabilidad, 2. mediana estabilidad, 3. incertidumbre, 4. baja inestabilidad, 5. mediana inestabilidad y 6. alta inestabilidad (ver cuadro 1), en este caso solo se alcanzó hasta la quinta (5) categoría, no presentándose alta inestabilidad (categoría 6). Posteriormente, se transformaron todas las capas de “factores de ocurrencia” de formato vectorial a formato raster para realizar álgebra de mapas y así poder obtener un mapa final de susceptibilidad; seguidamente una vez sumados los 5 factores, se normalizaron a escala de 1 a 5 (F.C.) para obtener finalmente el mapa de susceptibilidad de la cuenca (figura 4). En este caso, predomina la categoría de “Incertidumbre” con un 47 % de la superficie de la cuenca, luego le sigue en importancia “Baja inestabilidad” con un 29 %, “Mediana estabilidad” con un 23 % y “Mediana inestabilidad” con un 1 %, no se observa “Alta estabilidad” ya que la categoría no alcanza valores de 1 %. Se puede decir que hay menores probabilidades de ocurrencia de deslizamientos en la cuenca, ya que el 70 % de las categorías (47 % de “Incertidumbre” + mas 23 % de “Mediana estabilidad”) están en el rango de valores que van de 0 a -1 y, tienden a ser más estables (figura 5).

Durante el proceso de generación del mapa de susceptibilidad se observó que aquellos con mayor peso e importancia son la geología, geomorfología y cobertura vegetal.

Para los tipos de relieve (factor geomorfológico) de la cuenca predominan las geoformas de concavidades (60,9 %), sobre este tipo de geoforma se localizan el 57,5 % del total de deslizamientos que históricamente se han reportado para toda la cuenca.

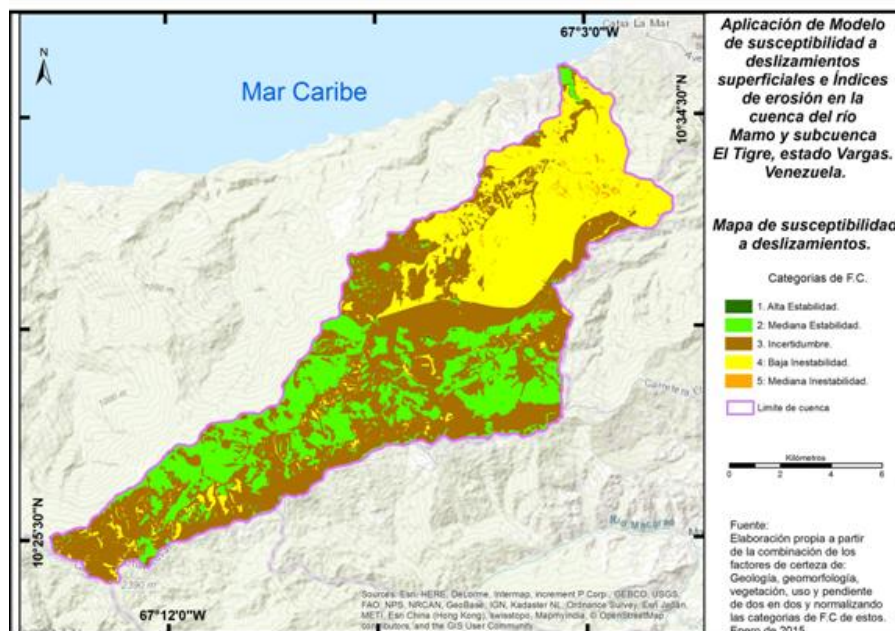


FIGURA 4

Mapa de susceptibilidad final de la cuenca

Fuente: Elaboración propia a partir de la combinación de los FC. Enero de 2015

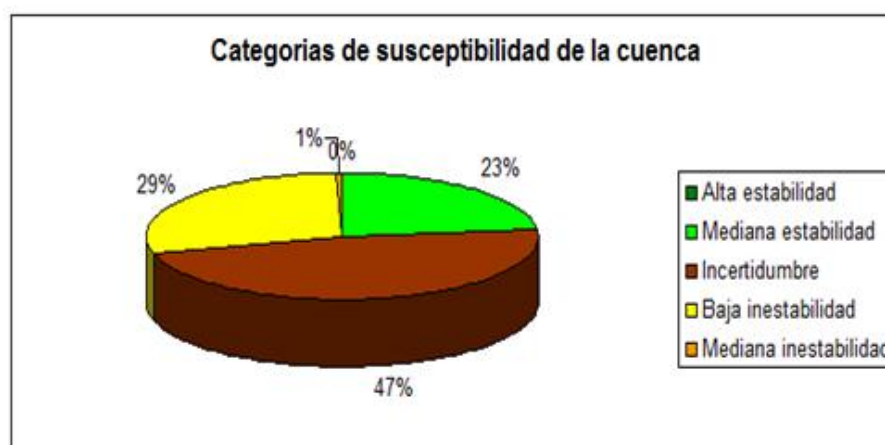


FIGURA 5

Categorías de Susceptibilidad para la Cuenca del Río Mamo

Fuente: Elaboración propia

El 69,19 % de los deslizamientos que han ocurrido en la cuenca se han dado en la formación “Mármol de Antímano” (mármol y anfíbolitas), a pesar de que el 54,7 % de la cuenca está ocupada por la formación “Esquisto de Las Brisas” (esquistos cuarzo albitico muscovítico clorítico).

El 48,02 % de los deslizamientos se presenta en la cobertura vegetal tipo “Matorral”; a pesar de que en toda la cuenca predomina la categoría de “Bosque” (37,4 %).

MODELO DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Este mapa empleado para calibrar el mapa de susceptibilidad genera el Factor de Seguridad (FS) que es el grado de estabilidad de laderas. Para este trabajo, se calculó de manera automática mediante el modelo SINMAP (*Stability Index MAPing*), el cual es un software estadístico-matemático para ArcGis, que produce el FS. El Modelo SINMAP (Pack *et al.*, 2005) integra la computación y la ubicación geográfica del índice de estabilidad de taludes a partir del Modelo Digital de Elevación, “se basa en el Modelo de Estabilidad Infinita de Taludes” (Cereceda, 2006).

Con respecto al Modelo de Estabilidad de Taludes para la cuenca del río Mamo, se puede decir que el 63 % de la cuenca tiende a ser “estable”, ya que un 24 % es “Nominalmente estable” (“Baja estabilidad” según sus rangos de valor de índices de estabilidad (Index Stability o IS), el 23 % es “Estable” (“Alta estabilidad” según el IS) y un 16 % que es “Moderadamente estable” (“Estabilidad media” según el IS), ver cuadro 2 y figura 6.

Índices de erosión para la cuenca

Para el cálculo de la erosión tomando en cuenta la precipitación y la litología se sigue la metodología empleada por Bustos (2016) quien la aplicó en otras regiones de Venezuela. El resultado del índice TSP pesado con precipitación y litología, se muestra en la figura 7. Se observan trazos de erosión en la parte media y baja de la cuenca, predominantemente en esta última. El índice TSP solo muestra erosión en el curso del río principal de la cuenca (río Mamo).

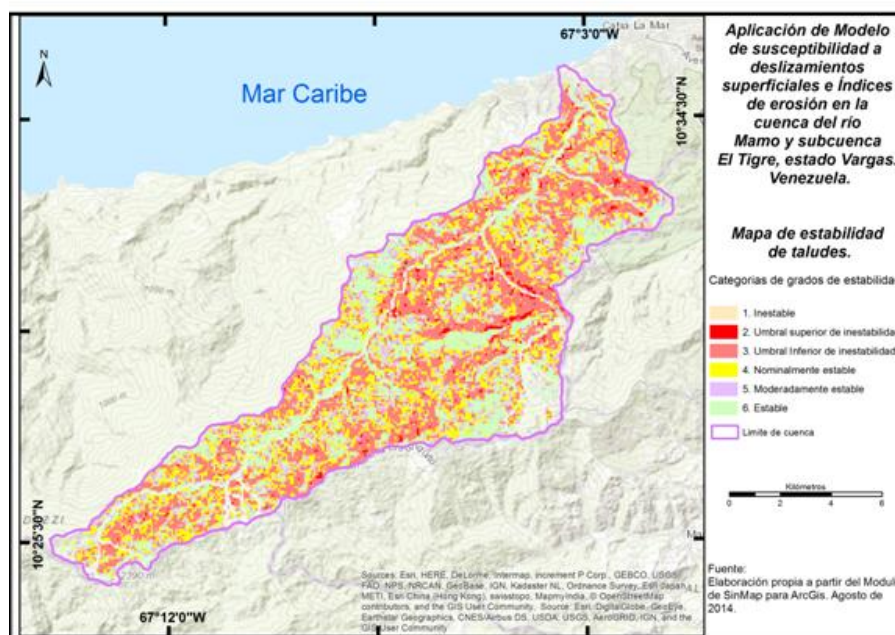


FIGURA 6

Mapa de índices de estabilidad de taludes

Fuente: Elaboración propia a partir del uso del Módulo SinMap para el programa *ArcGis*

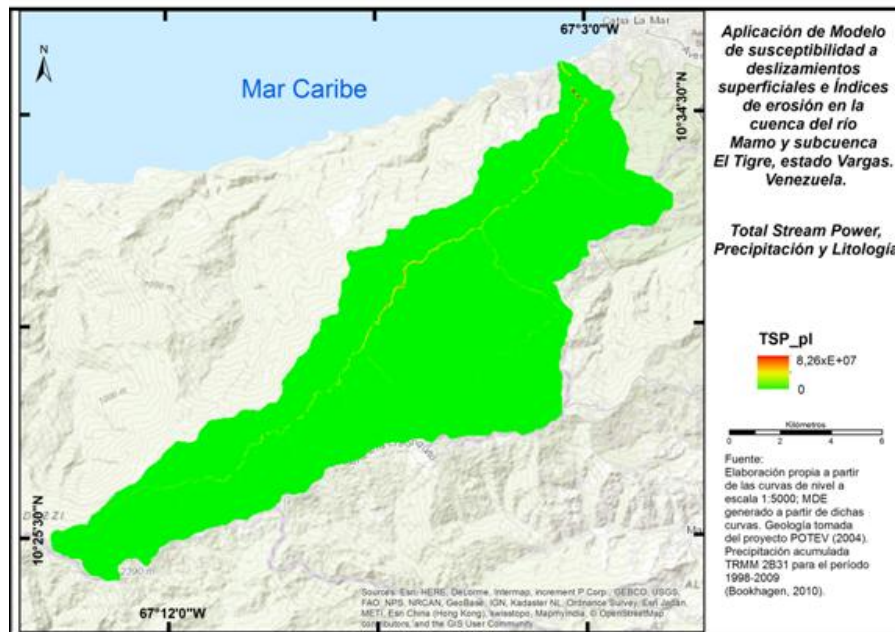


FIGURA 7
Índice de erosión Total (Total Stream Power - TSP)
Fuente: Elaboración propia

El resultado del índice USP con precipitación y litología, se muestra en la figura 8. Con la adición de este índice es posible apreciar de mejor manera la erosión en el curso principal del río Mamo y se comienza a observar en menor grado la erosión en algunas de las subcuencas. En la parte alta de la misma no se observa erosión significativa.

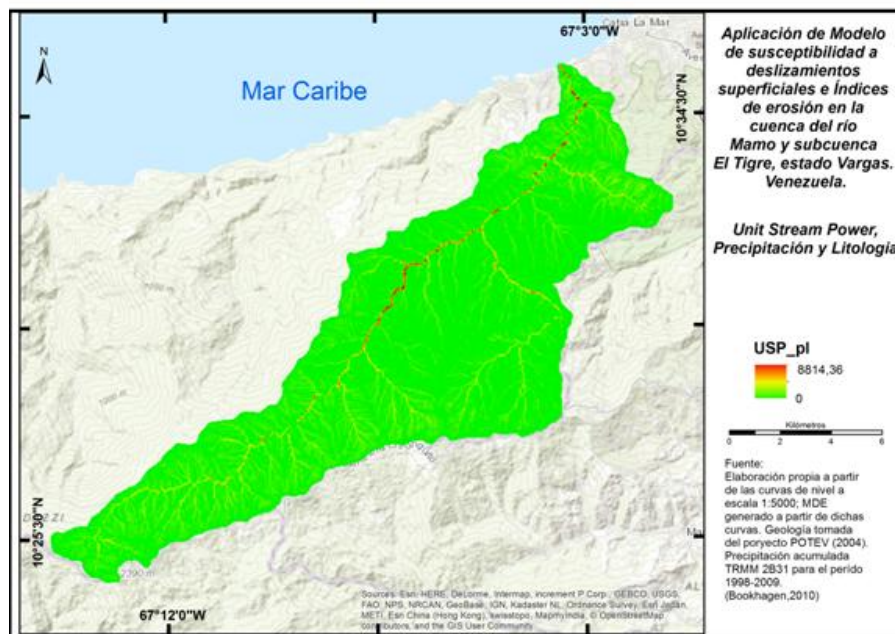


FIGURA 8
Índice de erosión Unitario (Unit Stream Power - USP)
Fuente: Elaboración propia

El resultado del índice SSP pesado con precipitación y litología, se muestra en la figura 9. Se detalla mucho mejor la erosión en el cauce principal; así como en algunas de las subcuencas (ej. El Tigre).

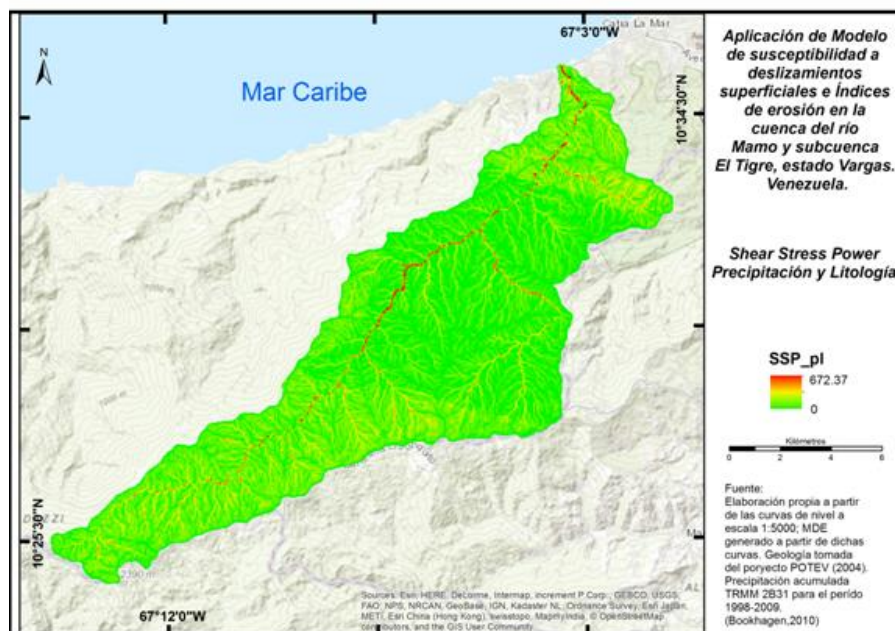


FIGURA 9
Índice de erosión de esfuerzo cortante (SSP)
Fuente: Elaboración propia

INTEGRACIÓN DE MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD E ÍNDICES DE EROSIÓN

El modelo de susceptibilidad combinado con los diferentes mapas de índices de erosión coincide o tienen en común que los deslizamientos y áreas de mayor erosión ocurren en la parte baja de la cuenca, afectando zonas urbanas o de uso agrícola intensivo (presentes en la zona media), de hecho solo alrededor de un 30 % de los terrenos de la cuenca expresan una propensión a sufrir algún tipo de deslizamiento, ubicándose estos principalmente en la parte baja (densamente poblada) y media-baja de la cuenca (Batista, 2015). Mientras que para la parte media y alta la incidencia de deslizamientos es menor o casi nula debido a que son colinas suaves de poca pendiente con una vegetación de pastos que cubren uniformemente el terreno, también se observaron algunas obras de estabilización de taludes como la siembra de bosques de pinos. Es de resaltar que en las salidas de campo realizadas a la cuenca (años 2011, 2013 y 2016) se observaron pocos deslizamientos y de baja magnitud en las partes altas de la cuenca (ejemplo de uno de los deslizamientos más grandes que, sin embargo, no llegó a bloquear la vía (figura 10), mientras que en la parte baja se presenta acumulación de sedimentos y movimientos en masa de mayor magnitud (figura 11); respecto a este último fenómeno hidrometeorológico los mismos pueden activarse o reactivarse cuando se presentan lluvias extraordinarias como las acontecidas en los años 1999 y 2011.



FIGURA 10

Ejemplo de deslizamiento en la parte alta de la cuenca del río Mamo. Salida de campo, 16/12/2013

Un caso que llama la atención es la subcuenca de la Quebrada El Tigre, la cual presenta gran cantidad de deslizamientos registrados en los años 1952, 1999, y 2005 (Courtel, 2008), además de valores notables de erosión (USP-SSP). Lo que podría explicarse porque en las nacientes de la misma predominan: 1) litología de material esquistoso; 2) vegetación de matorral (por intervención humana); 3) geomorfología cóncava, 4) una alta intervención humana en sus cabeceras ya que allí se encuentra el urbanismo llamado “Ciudad Caribia”, cuyos trabajos de construcción empezaron en el año 2008.

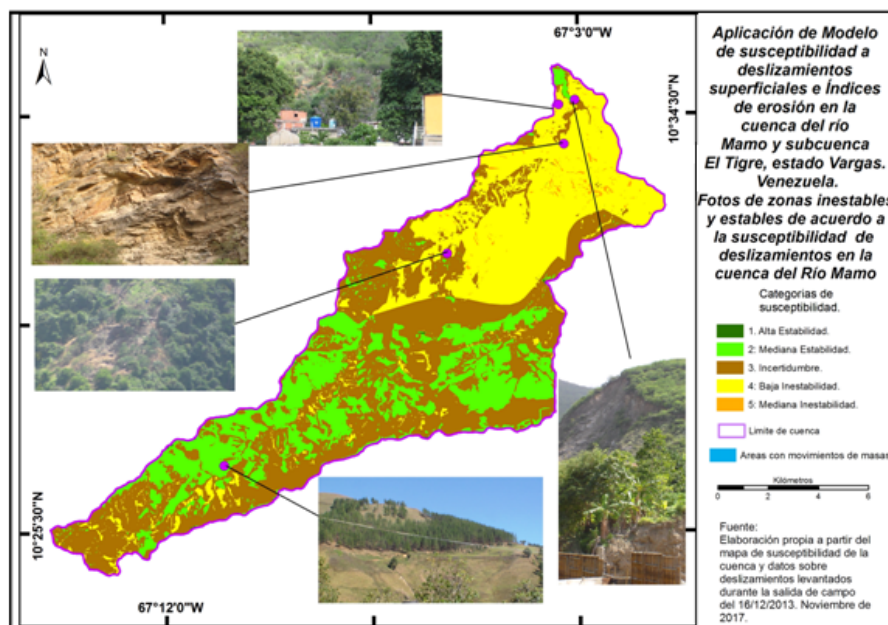


FIGURA 11
Ejemplos de deslizamientos en zonas de distinta
susceptibilidad a deslizamientos en la Cuenca del Río Mamo
Fuente: Elaboración propia. Año 2013

CASO SUBCUENCA QUEBRADA EL TIGRE

Esta subcuenca está ubicada al noreste de la cuenca de Mamo, tiene una superficie de aproximada 9,71 Km², una pendiente promedio de 46 %, con unos valores altitudinales entre los 140 y 960 msnm. Ver ubicación de la subcuenca en la figura 12.

Es importante señalar el aporte de sedimentos a la cuenca baja del Río Mamo proveniente de esta subcuenca; debido a que en la zona Centro-Norte de la misma se presenta una combinación de altas pendientes (46 % en promedio), una litología de esquistos, propensa a que se produzca o reactiven deslizamientos y se presenten altos niveles de erosión (tal como muestra el índice SSP, figura 13). Respecto a la asociación entre la litología y los deslizamientos se observa que el 43 % de esta subcuenca está ocupada por la formación Mármol de Antímamo, en donde se concentra la mayor superficie de deslizamientos, ya que es una formación que esta compuesta por una mezcla compleja de litologías fundamentalmente de esquistos de variada mineralogía que tienden a meteorizarse muy fácilmente con la presencia de la lluvia sobre todo cuando las laderas poseen una pobre cobertura vegetal.

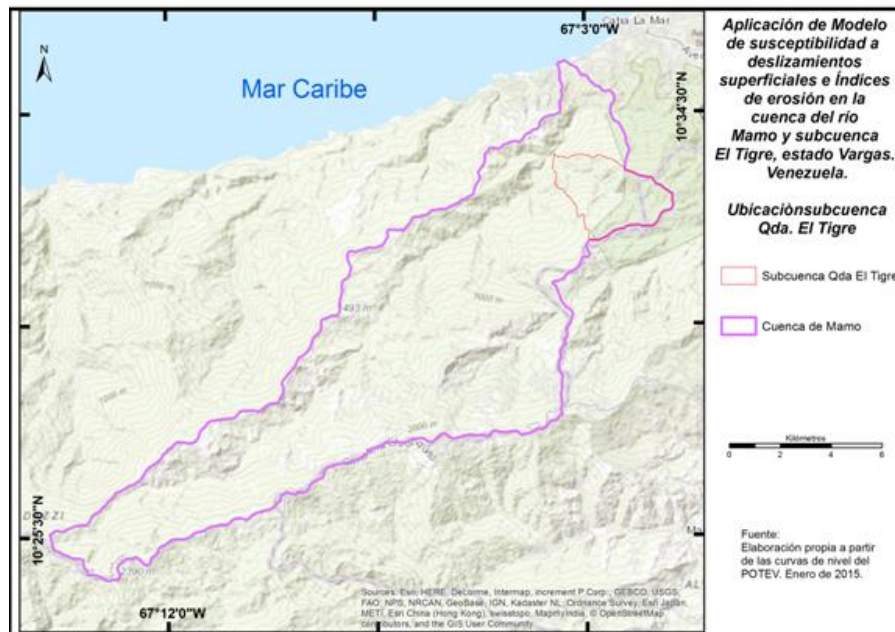


FIGURA 12
Ubicación de la subcuenca Quebrada El Tigre

Esto se corrobora con el índice de erosión SSP que presenta valores altos para esa litología; con respecto a la cobertura vegetal, se observó que el 62,8 % de la subcuenca está ocupada por matorral y sobre estos ocurren la mayor parte de los deslizamientos, a diferencia de la parte alta de la cuenca que está ocupada por pastos y ocasionalmente bosques en zonas de suaves pendientes. Finalmente, se tiene que la mayoría de los deslizamientos de la subcuenca (53,86 %) ocurren en tipos de relieve cóncavos (geomorfología). Esto sumado a los urbanismos desarrollados en la cabecera de la cuenca ocasiona que a la hora de presentarse lluvias excepcionales se incremente la posibilidad de que ocurran aludes torrenciales tal como se presentaron en la semana santa del año 2011.

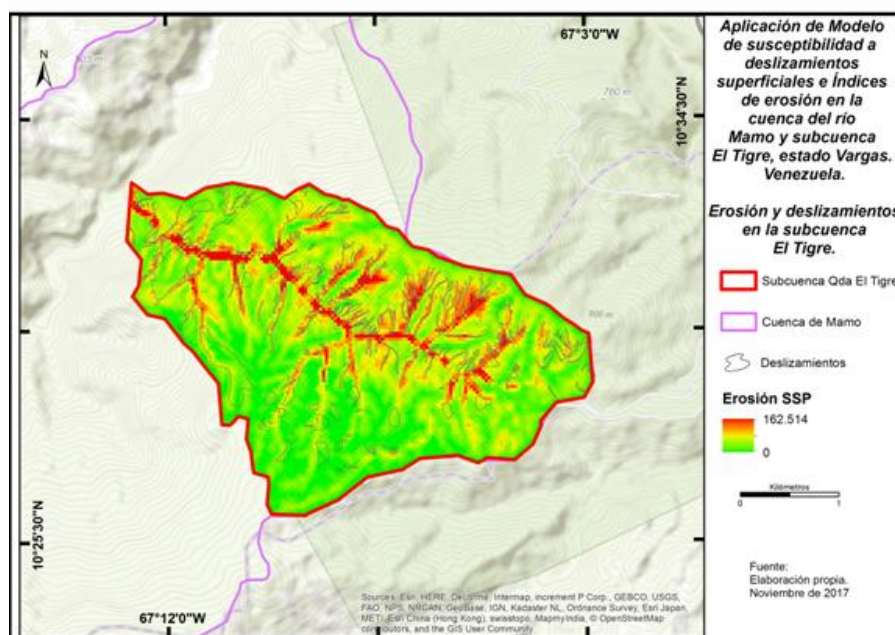


FIGURA 13
Erosión y deslizamientos en la subcuenca de quebrada El Tigre

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con respecto a la susceptibilidad para la cuenca del río Mamo (144,5 km²) se concluye que hay pocas probabilidades de ocurrencia de deslizamientos, ya que el 70 % de las categorías (47 % de “Incertidumbre” más 23 % de “Mediana estabilidad”) están en el rango de valores que tienden a la estabilidad.

Muy importante, para toda la cuenca solo alrededor de un 30 % de los terrenos de la misma expresan una propensión a sufrir algún tipo de deslizamiento (Zonas inestables), distribuidos principalmente en la parte baja que además está densamente poblada.

El tipo de relieve predominante para la cuenca es cóncavo (60,9 %), en donde históricamente se han concentrado los deslizamientos (57,5 %) del total los mismos.

Para toda la cuenca, el 69,19 % de los deslizamientos se han dado en la formación “Mármol de Antímano” compuesta por una mezcla compleja de litologías fundamentalmente de esquistos de variada mineralogía (micas, anfíbolitas, mármol, anfíbolitas granatíferas, etc.) que tienden a meteorizarse muy fácilmente con la presencia de la lluvia sobre todo cuando las laderas poseen una pobre cobertura vegetal.

En cuanto a la cobertura vegetal la categoría que recoge o concentra la mayoría de los deslizamientos que han ocurrido en la cuenca es el “Matorral” (48,02 %); sin embargo, para toda la cuenca predomina la categoría “Bosque”.

Con respecto a la estabilidad de taludes para la cuenca del Río Mamo, se puede decir que el 63 % de la cuenca tiende a ser “estable” (24 % corresponde a “Baja estabilidad”, 23 % se corresponde con “Alta estabilidad” y un 16 % a “Estabilidad media”) de acuerdo a las categorías de índices de estabilidad (IS).

El modelo de susceptibilidad combinado con los de índices de erosión para toda la cuenca coinciden en que los deslizamientos y áreas de mayor erosión ocurren en la parte baja de la misma, afectando zonas urbanas densamente pobladas (Marapa y El Piache). En esta área (zona baja) se localiza aproximadamente el 30 % del total de terrenos que tienden a ser inestables.

En la parte media y alta de la cuenca la incidencia de deslizamientos es menor o casi nula debido a que en estos sectores se localizan suaves colinas de poca pendiente con una vegetación de pastos y bosques que cubren uniformemente el terreno, también se observaron algunas obras de estabilización de taludes como la siembra de bosques de pinos, además según el Plan de Ordenamiento Territorial del Estado Vargas -POTEV (COTEV, 2004) las características litológicas de estas zonas le dan mayor estabilidad a diferencia de la zonas bajas. Es de resaltar que en las salidas de campo realizadas (años 2011, 2013 y 2016) se corroboró que el 70 % de la parte media y alta de la cuenca tiende a ser estable.

Con respecto a las variables analizadas para la totalidad del área de estudio (geología-litología, geomorfología y vegetación), el mismo patrón se repite a menor escala en la subcuenca quebrada “El Tigre” la cual representa aproximadamente el 6,74 % del área de estudio.

A diferencia de los cálculos de susceptibilidad para toda el área de estudio, la subcuenca El Tigre tiende a ser inestable, ya que aproximadamente el 80 % de la misma presenta una “Media y Baja Inestabilidad”.

Para la subcuenca El Tigre, los valores más altos de erosión (índice SSP) tienden a localizarse en la franja de susceptibilidad donde se han concentrado históricamente los deslizamientos.

Por lo anterior, se concluye que existen dos dinámicas para toda la cuenca; Durante la ocurrencia de lluvias extraordinarias o de alta intensidad se afecta principalmente la parte baja de la cuenca y en menor medida las zonas medias y altas.

Los modelos de índices de erosión y de susceptibilidad de deslizamiento son complementarios por lo que se deberían utilizar en conjunto para análisis futuro de otras subcuencas del área de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo de Desarrollo Científico y Urbanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela por el financiamiento al proyecto N°: PI.21-8659-2013/1.

REFERENCIAS

- ANBALAGAN, R. CHAKRABORTY, D. KOHLI, A. (2008). Landslide Hazard Zonation (LHZ) mapping on meso-scale for systematic town planning in mountainous terrain. *Journal of Scientific and Industrial Research*, v. 67, p. 486–497.
- BATISTA, J. (2015). Modelo de susceptibilidad de deslizamientos mediante la aplicación de un sistema de información geográfica (SIG) en la cuenca del Río Mamo, Estado Vargas. Trabajo especial de grado Maestría. Inédito. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela (UCV), Caracas.
- BOOKHAGEN, B. (2010). High resolution spatiotemporal distribution of rainfall seasonality and extreme events based on a 12-year TRMM time series in review. (1998-2009). <http://www.geog.ucsb.edu/~bodo/TRMM/>.
- BUSTOS, X. (2016). Estudio de procesos de erosión hídrica al nor-oeste de la cuenca del Río Orinoco, empleando geomorfología cuantitativa, geomática y programación orientada a objetos. Trabajo de Ascenso para optar a la Categoría de profesor Titular. Facultad de Humanidades y Educación. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- CERECEDA, I. (2006). Uso de los SIG en el análisis de susceptibilidad y predicción de deslizamientos. *Compendio de trabajos de investigación CNDG – Biblioteca Instituto Geofísico del Perú*, V. 7: 191 – 202.
- COMISIÓN ESTADAL DE ORDENACIÓN TERRITORIAL DE VARGAS – COTEV (2004). Plan de ordenación del territorio del estado Vargas (POTEV). Documento técnico. Volumen I y II. La Guaira
- COURTEL, F. (2008). Cap. 9. Umbrales de precipitación. Trabajo no publicado. Universidad Central de Venezuela. Instituto de Mecánica de Fluidos (IMF), Caracas.
- FINLAYSON, D., MONTGOMERY, D., HALLET, B. (2002) Spatial coincidence of rapid inferred erosion with young metamorphic massifs in the Himalayas. *Geological Society of America. Geology*; March 2002, v.30, (3).

- PACK, R., TARBOTON, D., GOODWIN, C (2005), SINMAP 2. A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping, Users 's Manual Version for ArcGis 9.x and Higher. Consultado el 02 de Julio de 2010, Utah State University, página Web de SINMAP 2.0:
- SUÁREZ, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga – Colombia. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos / Ingeniería de Suelos Ltda. 550 p. Disponible: <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf> [Consulta: 2009, Diciembre 15]
- TUCKER, G. & WHIPPLE, K. (2002). Topographic outcomes predicted by stream erosion models: Sensitivity analysis and intermodal comparison, J. Geophys. Res., 10.1029/2001JB000162.
- VAN WESTEN, C. (2005). Introducción a los deslizamientos. Tipos y causas. Documento en Línea Presentación en power point elaborada por International Institute for Geo-Information Science Earth Observation (ITC) de Holanda. Disponible en: <http://www.itc.nl/external/unesco-rapca/Presentaciones%20Powerpoint/04%20Amenaza%20por%20Deslizamientos/Uso%20de%20Sensores%20Remotos%20deslizamientos.pdf> [Consulta: 2008, noviembre 28]
- WHIPPLE, K. (2001). Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? American Journal of Science, v.301, p.313-325.
- WILSON, J., & GALLANT, J. (2000). Digital Terrain Analysis. (eds), Terrain Analysis: Principles and Applications, New York :John Wiley and Sons, p.1 – 26.

FINANCIAMIENTO

Fuente: Consejo de Desarrollo Científico y Urbanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela
Nº de contrato: Nº: PI.21-8659-2013/1
Beneficiario: Batista de S. Juan Rafael