



Zonificación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la Cordillera de Guaniguanico, Cuba. Un aporte al ordenamiento del territorio

Carlos Javier Cueto Gil¹; Elmidio Estévez Cruz²; Alexis Ordaz Hernández³

Recibido: 7 de febrero del 2018/ Enviado a evaluar: 17 de octubre del 2018/ Aceptado: 27 de febrero del 2019

Resumen. La presente investigación está dirigida a identificar las áreas más susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos en la Cordillera de Guaniguanico. La cartografía obtenida robustece los futuros planes de ordenamiento territorial para el sitio de estudio. Para lograr el objetivo se realizó un inventario de deslizamientos a partir de la fotointerpretación y los trabajos de campo. El inventario permitió establecer la correlación entre los deslizamientos y los distintos factores causales, lo cual facilitó ponderar las diferentes variables que controlan estos movimientos en el área. En el trabajo se aplican diferentes métodos de modelación de la susceptibilidad en SIG, como la Superposición indexada, la Lógica booleana, el Proceso analítico jerárquico (AHP), la Lógica difusa, y el Análisis estadístico bivariado (BSA). Se reveló que aproximadamente el 25% de la Cordillera de Guaniguanico es susceptible a la ocurrencia de deslizamientos, de ellos casi el 10% posee alta susceptibilidad. La validación de los resultados demostró que las clases de alta susceptibilidad en todos los métodos ocupan un área relativamente pequeña (<20%), al tiempo que revelan un alto porcentaje de los deslizamientos inventariados. Por otra parte, los métodos de modelación Lógica fuzzy y AHP brindan los mejores resultados considerando los estimados del porcentaje de certeza.

Palabras claves: Susceptibilidad a los deslizamientos; Cordillera de Guaniguanico; ordenamiento territorial; SIG.

[en] Zoning of the susceptibility to landslides in the Cordillera de Guaniguanico, Cuba. A contribution to the ordering of the territory

Abstract. This research is aimed at identifying the landslides susceptibility zoning in Cordillera de Guaniguanico. The obtained susceptibility mapping supports land use planning for the study area. A landslide inventory was compiled from visual image interpretation and field work studies. The inventory allowed to establish the correlation between the landslides and the different causal factors, which facilitated the weighting of the different variables controlling these movements in the area. Different methods of GIS susceptibility modeling, such as Indexed overlay, Boolean logic, Hierarchical analytical

¹ Universidad de Pinar del Río (Cuba)

E-mail: carlos@upr.edu.cu

² Universidad de Pinar del Río (Cuba)

E-mail: estevez@upr.edu.cu

³ Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México (México).

E-mail: alexisordaz.1978@gmail.com

process (AHP), Fuzzy logic, and Bivariate statistical analysis (BSA) are applied in the study. It was revealed that approximately 25% of the Cordillera de Guaniguanico is susceptible to landslides occurrence, of which almost 10% have high susceptibility. The results validation showed that the high susceptibility classes occupy a relatively small area (<20%), while revealing a high percentage of the landslides inventoried. On the other hand, the Fuzzy logic and AHP modeling methods provide the best results considering the percent accuracy estimates.

Key words: Susceptibilidad a los deslizamientos; Cordillera de Guaniguanico; ordenamiento territorial; SIG.

[fr] Zonage de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la Cordillère de Guaniguanico, Cuba. Une contribution à la commande du territoire

Résumé. Cette recherche vise à identifier les zones les plus sensibles à l'apparition de phénomènes glissements de terrain dans la Chaîne de Guaniguanico. La cartographie obtenue renforce les futurs plans d'aménagement du territoire pour le site d'étude. Pour atteindre cet objectif, un inventaire des glissements de terrain a été réalisé sur la base de la photo-interprétation et du travail de terrain. L'inventaire a permis établir la corrélation entre les glissements de terrain et les différents facteurs de cause, ce qui a permis de pondérer les différentes variables qui contrôlent ces mouvements dans la région. Au travail, des différentes méthodes de modélisation de la sensibilité en SIG s'appliquent, tels que l'entrecroisement indexé, la logique booléenne, le processus d'analyse hiérarchique (AHP), la logique floue et l'analyse statistique bi-variée (BSA). Il a été révélé qu'environ 25% de la Chaîne de Guaniguanico est sensible à l'apparition de glissement de terrain. Parmi eux, près de 10% ont une sensibilité élevée. La validation des résultats a montré que les classes de haut susceptibilité en tous les méthodes employent une petit 20 % surface, en même, temps qui montrent un haut pourcentage des glissements sur l'inventaire. Dans une autre partie, les méthodes de modelation logique "Fuzzy et AHP" montrent les meilleurs résultats en prenant compte de l'estimation du pourcentage de certitude.

Mots clés: Susceptibilité aux glissements de terrain ; Chaîne de Guaniguanico ; aménagement du territoire ; SIG.

Cómo citar. Cueto Gil, C.J., Estévez Cruz, E. y Ordaz Hernández, A. (2019): Zonificación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la Cordillera de Guaniguanico, Cuba. Un aporte al ordenamiento del territorio. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 39(1), 11-38.

Sumario. 1. Introducción. 2. Geología del área. 3. Materiales y métodos. 4. Análisis y discusión de los resultados. 4.1. Inventario de deslizamientos. 4.2. Factores de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos. 4.2.1. Factor geológico. 4.2.2. Distancia a Fallas. 4.2.3. Factor geomorfológico. 4.2.4. Factor Edafológico. 4.2.5. Factor red vial. 4.3. Resultados de los métodos de modelación de la susceptibilidad. 4.4. Zonificación de la susceptibilidad por la metodología de la AMA. 4.5. Zonificación de la susceptibilidad por la Metodología de la AMA modificada, utilizando el análisis estadístico bivariado (BSA) para determinar los pesos de las clases. 4.6. Método de superposición indexada aplicando pesos de los factores calculados a partir del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). 4.7. Método de lógica difusa. 4.8. Validación. 4.9. Sugerencias de manejo para la Cordillera de Guaniguanico en función del uso de la superficie y los niveles de susceptibilidad a deslizamientos. 5. Conclusiones. 6. Bibliografía

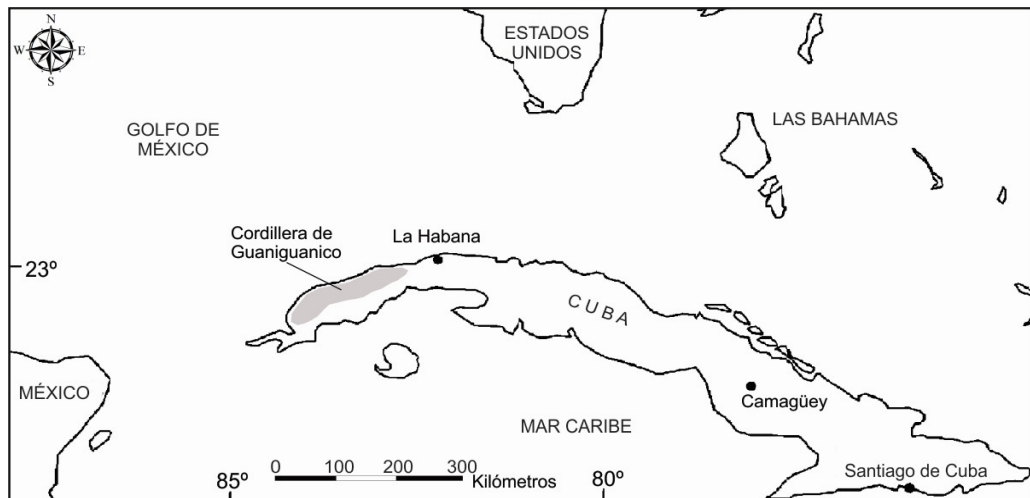
1. Introducción

El ordenamiento territorial (OT) es concebido como la expresión espacial de la política económica, social, cultural y ambiental de toda la sociedad. Según Padrón (2013), es una disciplina científico-técnica, administrativa y política orientada al

desarrollo equilibrado del territorio y a la organización física del espacio. Hernández (2010), Gregório de Andrade (2010), Ferrufino y Grande (2013), entre otros, coinciden en que el ordenamiento territorial conforma un marco de referencia para asegurar el impulso económico en coherencia con el desarrollo físico-espacial.

La incorporación de los argumentos sobre las distintas áreas físicas con riesgo potencial ante desastres y su adecuado manejo contribuyen a dar mayor solidez, profundización y rigor a los planes de ordenamiento territorial (POT) (Padrón, 2013). Lamentablemente para América Latina, existen múltiples ejemplos de malas prácticas en materia de ordenamiento, que han conducido a trágicos desastres. Los ejemplos más recientes se ubican en los Andes de Perú en marzo del 2017 y en el Departamento de Putumayo en el sur de Colombia, también en marzo del 2017. Otros ejemplos representativos, ocurridos anteriormente, los constituyen el deslizamiento del Berrinche en Tegucigalpa (Honduras) en octubre de 1998 y los trágicos sucesos en Vargas en diciembre del 1999. La causa común para todos estos casos, lo constituyó la reducida visión o los limitados argumentos en los POT, especialmente en aspecto físicos del territorio.

Figura 1. Mapa de localización geográfica de la Cordillera de Guaniguanico.



Fuente: Elaboración propia.

Los fenómenos gravitacionales, entendidos como el desplazamiento de materiales en una ladera o talud impulsados por su propio peso, así como por otros factores que favorecen el inicio del movimiento, se reconocen como el tercer tipo de desastre natural en orden de importancia (Zillman, 1999 en: Castellanos, 2008). En muchos casos, los desastres como los deslizamientos de terreno alcanzan una magnitud que resulta imposible evitarlos o detener la actividad del proceso que los provoca. Por otra parte, para poder mitigar los impactos ocasionados por estos procesos geológicos lo fundamental es conocer las áreas donde los mismos han ocurrido y donde es más

probable que se manifiesten en el futuro. Esta tarea fundamental se resuelve construyendo mapas de zonificación, los cuales intentan cartografiar las áreas más proclives a desprendimientos de rocas, flujos, deslizamientos u otros movimientos de laderas.

En este trabajo los autores se enfocan en la cartografía de la susceptibilidad a los deslizamientos en la Cordillera de Guaniguanico (Figura 1), al mismo tiempo se evalúa la efectividad de la aplicación de diferentes metodologías. Este macizo montañoso ubicado en Cuba occidental, alberga múltiples asentamientos humanos y vías de comunicación. Pero especialmente destaca por las invaluable riquezas naturales, entre ellas la reserva de la biosfera que ocupa gran parte de la Sierra del Rosario y los paisajes kársticos del Valle de Viñales, declarado en 1999 Patrimonio Natural de la Humanidad por la UNESCO. En general la Cordillera de Guaniguanico es un espacio de indudables potencialidades para el desarrollo turístico a corto plazo; donde la incorporación de evaluaciones de rigor técnico en materia de peligros geológicos es una prioridad para alcanzar planes de ordenamientos territoriales confiables y sustentables de cara al futuro.

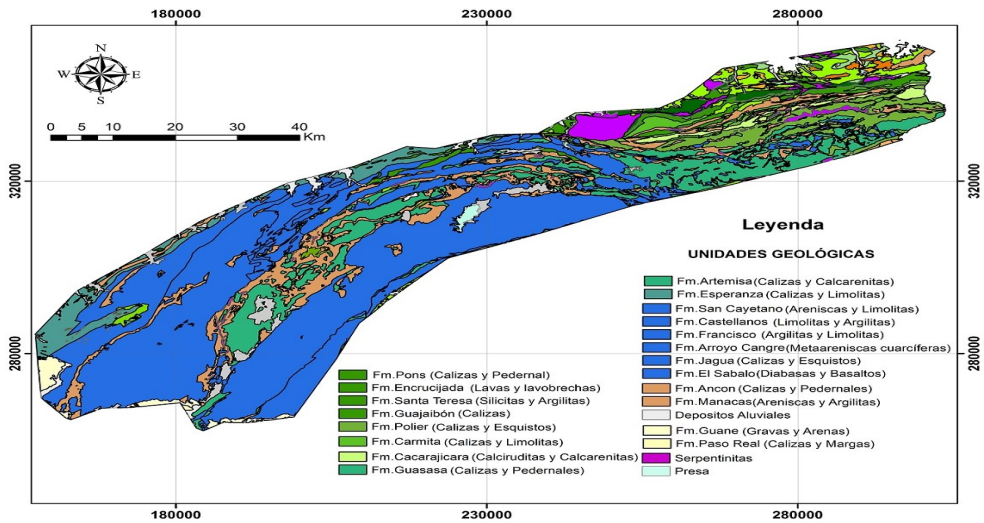
En el área de estudio se han realizado importantes trabajos asociados con la temática, los cuales constituyen los referentes iniciales, y aportaron los antecedentes metodológicos a esta investigación (García y Ordaz, 2007; Santos, 2012; Bee, 2013; De la Torre, 2014 y Cueto-Gil, 2014). Además, se consultaron algunos trabajos de carácter internacional que permitieron obtener una visión actualizada de las principales metodologías utilizadas en investigaciones de zonificación de la susceptibilidad (Awawdeh et al., 2018; Lin et al., 2018; Laldintluanga et al., 2016).

2. Geología del área

Las secuencias rocosas de la Cordillera de Guaniguanico son cortadas por la falla Pinar en su sector sur, el bloque descendente denominado Cuenca de Los Palacios, está cubierto por los productos de la erosión de las montañas situadas al norte. La falla Pinar es una gran dislocación tectónica de larga duración y posibles cambios en la naturaleza de sus movimientos (Cobiella, 2000). Por el NE las secuencias de Guaniguanico son cubiertas tectónicamente por ofiolitas y rocas de un arco volcánico cretácico (Figuras 2 y 3).

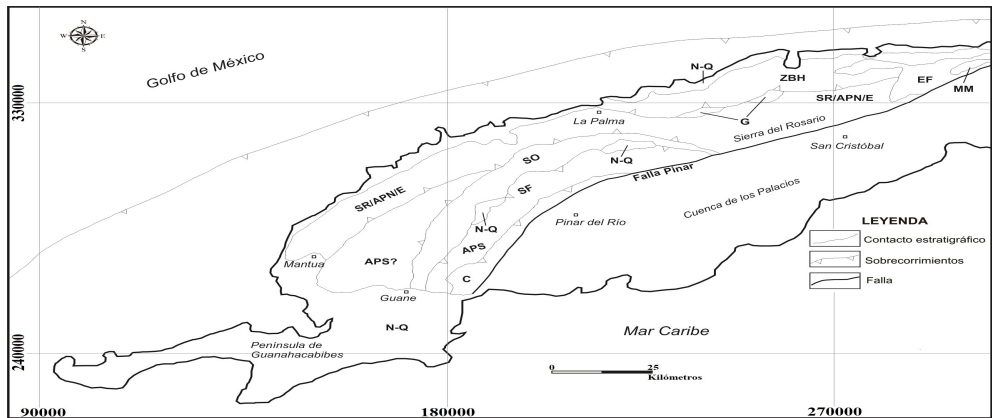
Según Cobiella (2008), la Cordillera de Guaniguanico forma el afloramiento más extenso del paleomargen pasivo septentrional (PPS). Este autor divide el macizo montañoso en cinco unidades tectono - estratigráficas: (1) Cabalgamientos de Sierra de los Órganos (SO), (2) Alturas de Pizarras del Sur (APS), (3) Cinturón Cangre (C), (4) Cabalgamientos de Sierra del Rosario/Alturas de Pizarras del Norte/ Esperanza (SR/APN/E), y (5) Pan de Guajaibón (G) (Figura 3). Cada una de estas unidades es un enorme paquete formado por varios mantos de cabalgamiento superpuestos, con un corte estratigráfico propio que la identifica.

Figura 2. Mapa Geológico. Formaciones geológicas presentes en la Cordillera de Guaniguanico, Pinar del Río, modificado del Instituto de Geología y Paleontología de Cuba.



Fuente: Elaboración propia, a partir de IGP (2005).

Figura 3. Esquema tectónico simplificado de Cuba occidental propuesto por Cobiella (2008)⁴.



Fuente: Elaboración propia.

⁴ Grandes unidades tectono - estratigráficas: SO: Sierra de los Órganos, APS: Alturas de Pizarras del Sur, C: Cinturón Cangre, SR/APN/E: Sierra del Rosario/ Alturas de Pizarras del Norte/ Esperanza, G: Pan de Guajaibón, ZBH: zona Bahía Honda. La cuenca de Los Palacios es una depresión cenozoica, vinculada a la falla Pinar. Otros símbolos: Ef: Turbiditas y margas del Paleoceno y Eoceno Inferior, N-Q: Mioceno-Cuaternario, SF: ventana tectónica de Cayos de San Felipe, MM: ventana erosional de Martín Mesa.

En general, el corte estratigráfico de las unidades de la Cordillera está compuesto por sedimentos terrígenos en su porción inferior (hasta el Oxfordiano medio), que forman un complejo deltaico jurásico (Formación San Cayetano), de considerable espesor. En dicho complejo, los depósitos de SR-APN-E constituyen mayormente turbiditas, en tanto las capas de APS y SO se acumularon en aguas someras o en la porción subaérea de la llanura deltaica. El corte suprayacente, Oxfordiano alto-Daniano, es rico en calizas (Figura 2). En la Sierra de los Órganos, las calizas del Kimmeridgiano-Tithoniano forman un potente banco carbonatado de cientos de metros de espesor (Formación Guasasa), constituido por calizas de aguas someras, con estratificación gruesa a masiva. En el caso de SR-APN-E, los depósitos carbonatados coetáneos son de aguas más profundas y están bien estratificados, con abundantes intercalaciones areno-arcillosas (Formación Artemisa) (Cobiella, 2008). Esto marca una notable diferencia en lo referente a la susceptibilidad del corte estratigráfico a los deslizamientos en las unidades que conforman la cordillera. Por otra parte, el corte carbonatado Jurásico Superior-Cretácico está ausente en las Alturas de Pizarras del Sur y poco desarrollado en Alturas de Pizarras del Norte.

3. Materiales y métodos

El éxito de los estudios de susceptibilidad a los deslizamientos radica básicamente en la disponibilidad de información geocientífica regional de calidad adecuada, la existencia de un modelo conceptual confiable, donde se reflejen los principales factores condicionantes y disparadores y la existencia de un inventario actualizado y completo de los movimientos de ladera.

Las principales etapas en este trabajo fueron: Selección de los factores controladores (modelo conceptual de deslizamiento), inventarios de deslizamientos, construcción de las bases de datos digitales, procesamiento de datos, integración y análisis y validación de los resultados (Figura 4).

El modelo conceptual refleja los factores controladores de los deslizamientos y determina el marco teórico de la evaluación. El mismo fue construido teniendo en cuenta las investigaciones anteriores (García y Ordaz, 2007; Santos, 2012; Bee, 2013; De la Torre, 2014 y Cueto-Gil 2014), los resultados del inventario de deslizamientos, así como la posibilidad de ser cartografiado a nivel regional. Los factores controladores o condicionantes son aquellos que provocan que las vertientes sean susceptibles a los deslizamientos, pero no los inician. La tabla 1 muestra los principales factores seleccionados, las bases de datos espaciales usadas para cartografiarlos y los pesos según las recomendaciones de la Agencia de Medio Ambiente (AMA, 2012).

Tabla 1. Factores condicionantes utilizados, variables derivadas y mapas usados para su cartografía (*Peso de los factores y variables).

Factor	Variables	Mapa /Escala	Fuente
Geológico (0.5)*	Unidad geológica (0.9)	Mapa geológico 1:100 000	IGP, 2005
	Distancia a fallas (0.1)		
Geomorfológico (0.3)*	Pendiente (0.6)	MDE Pixel -25m	Geocuba, 2001
	Relieve interno (0.2)		
	Aspecto (0.1)		
	Distancia a ríos (0.1)	Mapa red fluvial 1: 25 000	Mapa topográfico 1:25 000
Edafológico (0.15)*	Tipo de suelo (0.5)	Mapa de suelo 1: 25 000	MINAGRI, 2002
	Profundidad del suelo(0.5)		
Red vial (0.05)*	Distancia (1.0)	Mapa de la red vial 1:25 000	Mapa topográfico 1:25 000

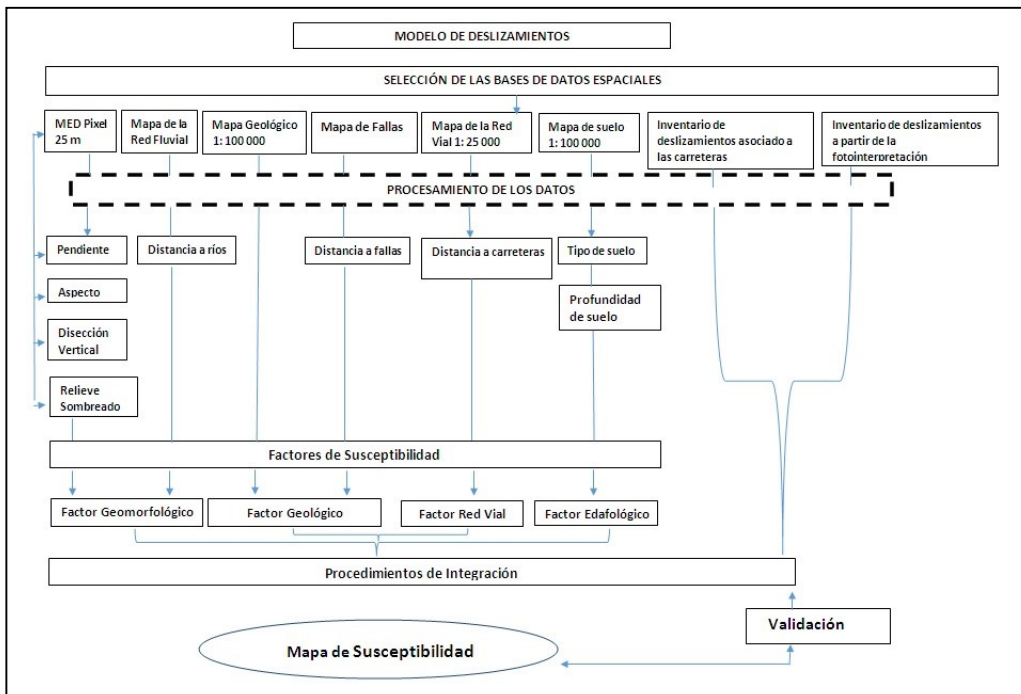
Fuente: Modificado de AMA (2012).

Un inventario de deslizamientos no es más que un registro ordenado de la localización y características individuales de estos movimientos en un área dada. En él se sintetizan los rasgos más característicos de acuerdo con atributos de tipo geológico, geomorfológico, edafológico, geotécnico y de efectos causados. El inventario de deslizamientos se elaboró a través de trabajos de campo desarrollados en toda la cordillera (Tabla 2), complementado con la interpretación de imágenes satelitales del Google Earth (Figura 6). Al mismo tiempo los deslizamientos fueron agrupados en dos grandes inventarios, el primero está básicamente vinculado a la red de carreteras, mientras que el segundo incorpora los deslizamientos ocurrido en condiciones naturales del macizo rocoso y no están influenciados por factores antropogénicos.

A continuación, se procesan los datos primarios con vistas a extraer las evidencias críticas para el pronóstico de los deslizamientos. La idea subyacente es cartografiar a partir de los mapas seleccionados los factores condicionantes o controladores, empleando distintas operaciones espaciales como reclasificación, filtrado espacial, combinaciones lógicas, mapas de proximidad (buffer), etc.

Como se conoce no existen criterios universales para la selección de los parámetros o factores que influyen en los deslizamientos y que puedan ser usados en la zonificación de la susceptibilidad. La selección de los factores condicionantes está en función de la naturaleza del área de estudio y la disponibilidad de datos (Cascini, 2005).

Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología empleada para determinar la susceptibilidad a los deslizamientos en la Cordillera de Guaniguanico.



Fuente: Elaboración propia.

En este trabajo los factores geológicos, geomorfológicos, edafológicos y de la red vial se seleccionaron en base a los trabajos anteriores, las recomendaciones que aparecen en la literatura y su cobertura regional. Al modelo digital de elevación digital (MDE) se le aplicaron filtros estándares para obtener los mapas morfométricos: pendiente, relieve interno o disección vertical (Dv) y aspecto de la pendiente. Todos los mapas fueron reclasificados para agrupar, por un lado, las unidades que poseen interés para la zonificación, y por otro, las que son poco susceptibles (Figura 5).

El mapa geológico fue generalizado en un número limitado de clases manteniendo la información relevante para el estudio, o sea, las formaciones geológicas fueron agrupadas atendiendo a la susceptibilidad a los deslizamientos de las litologías que las conforman. A partir de los mapas de fallas, carreteras y ríos se construyeron los mapas de distancia o proximidad, los cuales fueron reclasificados en clases según los diferentes cuantiles.

Tabla 2. Inventario de fenómenos gravitacionales a partir de la fotointerpretación.

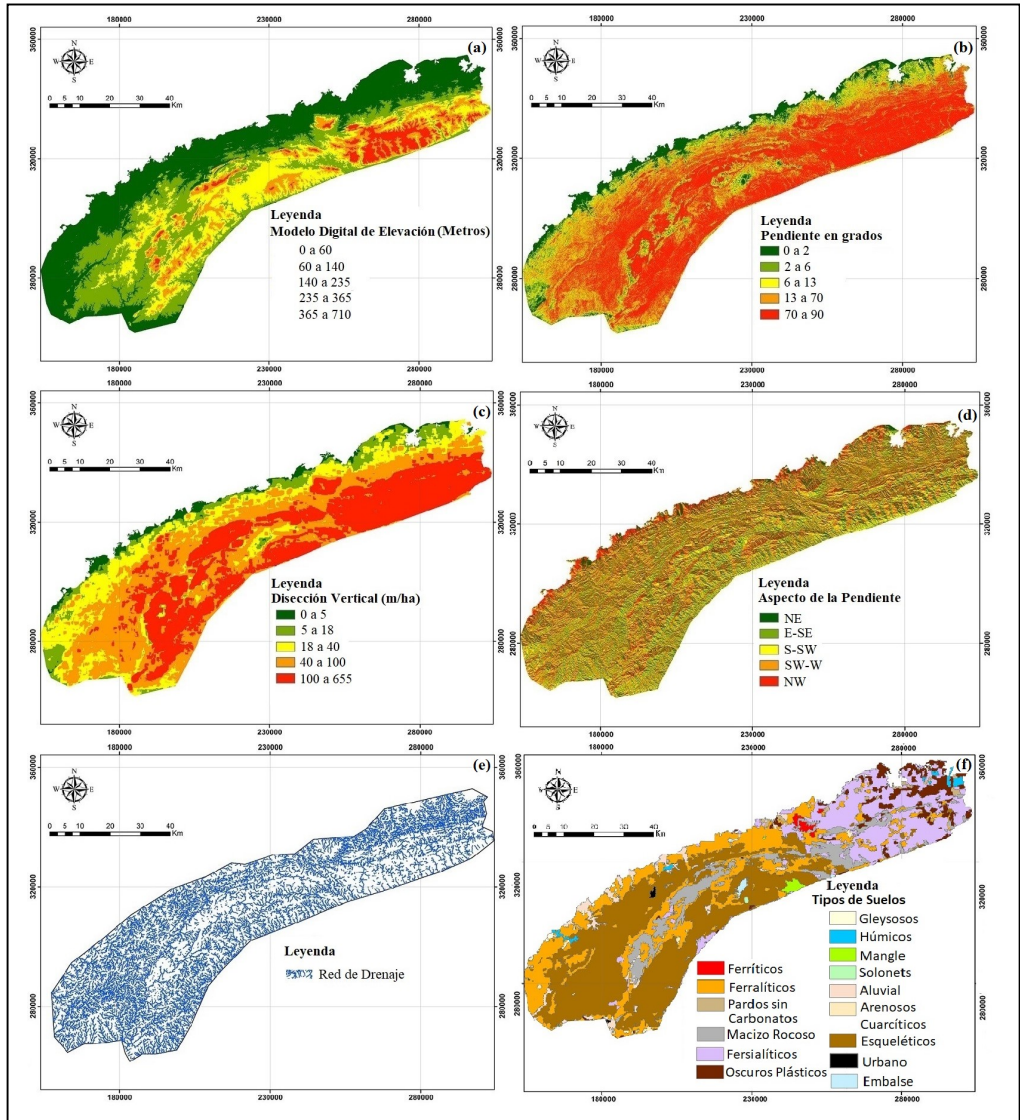
	X	Y	Formación Geológica	Tipos de movimientos	Clasificación	Material	Volumen (m ³)
1	201962.5	299143.3	Guasasa	Desprendimiento	caída	roca	1000 a 100 000
2	205349.2	300982.1	Guasasa	Desprendimiento	caída	roca	1000 a 100 000
3	210964.8	316120.2	Guasasa	Desprendimiento	caída	roca	1000 a 100 000
4	216025.3	318471.7	Manaca	Desprendimiento	caída	roca	1000 a 100 000
5	257300.7	331218.5	Guajaibón	Deslizamiento	rotacional	detritos	1000 a 100 000
6	261214.7	319096.2	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	<200
7	261386.3	319707.3	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	<200
8	268778.5	320331.2	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	<200
9	279748.3	323917.2	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	<200
10	280001.0	324183.1	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	<200
11	279891.2	324347.1	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	<200
12	279166.2	325453.7	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	<200
13	287171.3	327214.4	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	<200
14	291408.6	329291.6	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	<200
15	284686.6	328811.8	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	<200
16	285339.5	330143.6	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	<200
17	286917.1	330143.6	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	1000 a 100 000
18	287383.7	331490.0	Artemisa	Deslizamiento	rotacional	detritos	1000 a 100 000

Fuente: Elaboración propia.

El paso siguiente consistió en la integración de los mapas de evidencias y el posterior análisis del mapa obtenido de susceptibilidad. Antes del proceso de fusión o combinación de los mapas se determina la importancia o peso relativo de cada uno de ellos y de las clases que lo conforman con el empleo de los métodos objetivos (basados en los datos) y subjetivos (basados en el conocimiento).

En este caso, los métodos de integración utilizados son aquellos que mayor atención han recibido en la literatura científica (Bonham-Carter, 1996; Harris et al., 2001 y en la Agencia de Medio ambiente, 2012), y que además se adaptan a las particularidades del área de estudio. En el trabajo se integran los modelos basados en el conocimiento: Superposición indexada (Harris et al., 2001), Proceso analítico jerárquico (AHP) (Saaty, 1980) y la Lógica difusa (Bonham-Carter, 1994); modelos basados en los datos: Análisis Estadístico Bivariado (BSA) (Süzen y Doyuran, 2004) y modelos híbridos (mixtos).

Figura 5. Cartografía temática básica empleada. Donde: (a) Modelo digital de elevación del terreno, (b) Pendiente del terreno, (c) Disección vertical, (d) Aspecto de las pendientes (e) Red fluvial y (f) Distribución de los principales tipos de suelos.



Fuente: Elaboración propia.

Como punto de partida se utilizó la metodología desarrollada por la Agencia de Medio Ambiente (AMA, 2012), la misma es utilizada en Cuba para los Estudios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo. Esta propuesta preconiza la estandarización de los métodos de integración y los pesos de los diferentes mapas y sus clases temáticas, permitiendo la comparación de los resultados en los diferentes territorios y facilitando la toma las decisiones sobre la gestión del riesgo asociado a estos fenómenos (Tabla 1). Por otro lado, la generalización a nivel de país también implica debilidades dada la heterogeneidad de la estructura geológica. Los resultados obtenidos de la aplicación de esta metodología son comparados con el resto de los métodos aplicados.

También se utilizaron otras variantes para estimar los pesos de las clases y los mapas de factores, de modo que se pudiera acomodar las ponderaciones a las particularidades del área de trabajo. En este sentido fueron utilizados los métodos de Análisis Estadístico Bivariado y Procesos Jerárquicos Analíticos (AHP).

Como alternativa a la integración empleando combinaciones lineales (aditivas) de mapas de factores se aplicó la lógica difusa, la cual posee flexibilidad en la asignación de los pesos y la combinación de operadores, permite trabajar con mapas multiclasas y continuos, sin que exista necesidad de reclasificación de las variables cuantitativas continuas.

4. Análisis y discusión de los resultados

4.1. Inventario de deslizamientos

Para la Cordillera de Guaniguanico, se identificó un total de 60 deslizamientos (Figura 7), de ellos 42 se relacionan con taludes de la red vial, lo que indica malas prácticas en el cálculo de sus elementos geométricos. El mapa del inventario fue un primer acercamiento a la susceptibilidad del territorio, y representa el punto de partida para el empleo de métodos basados en el conocimiento. El análisis del inventario se centra básicamente en el obtenido por la fotointerpretación, en sitios separados de las principales carreteras, al considerarse que refleja mucho mejor predisposición natural de la secuencia rocosa a los deslizamientos.

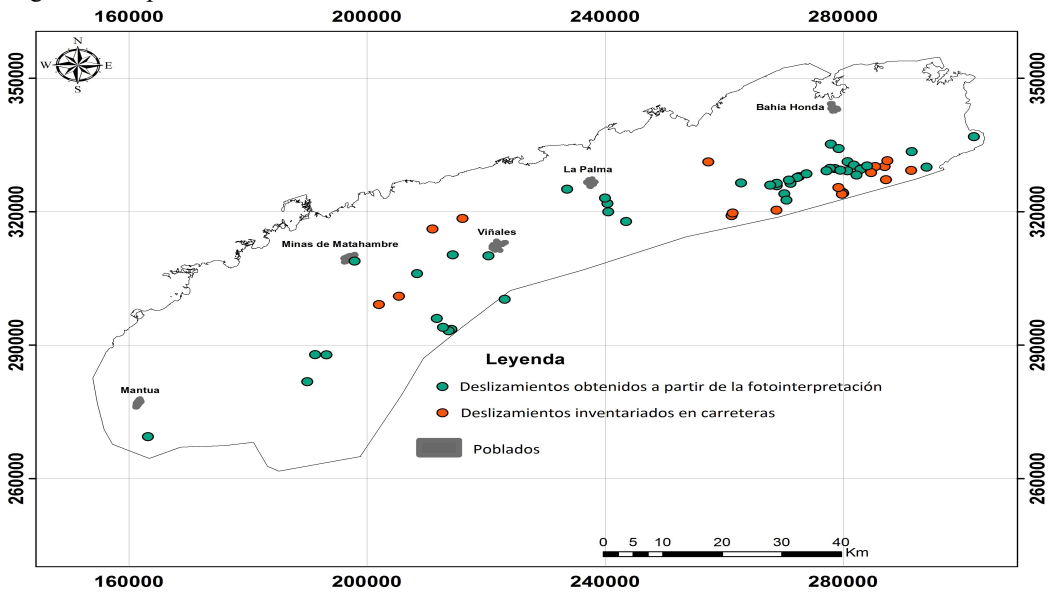
Como se puede apreciar en la tabla 2, la formación más susceptible a la ocurrencia de fenómenos gravitacionales es la Fm. Artemisa, donde se registran 13 deslizamientos de los 18 fenómenos identificados para un 72.2%. La predisposición de esta unidad está condicionada por su carácter estratificado, en ella las calizas micríticas en capas finas a medianas se intercalan con calcilulitas, calcarenitas, y silicitas. Por otra parte, los desprendimientos se asocian fundamentalmente a las formaciones carbonatadas de estratificación gruesa o masiva (Formación Guasasa).

Figura 6. Muestra de deslizamientos rotacionales inventariados en la Sierra del Rosario⁵.



Fuente: Imagen de Google Map (2015).

Figura 7. Mapa de inventarios de deslizamientos.



Fuente: Elaboración propia.

⁵ A la derecha deslizamiento en las rocas de la Formación Artemisa, en la Cuenca de Río Hondo, Municipio San Cristóbal. A la izquierda, deslizamiento en rocas de la Formación Guajaibón, localizado en la ladera norte del Pan de Guajaibón, Municipio La Palma.

El inventario también permitió esclarecer algunos elementos de la distribución espacial de los movimientos de las laderas. Se demostró la presencia de fenómenos gravitacionales en toda el área, especialmente deslizamientos y desprendimientos, revelando que el sector más propenso al desarrollo de los mismos es la zona más oriental de la Cordillera de Guaniguanico (Sierra del Rosario), lo que se explica por la composición litológica, las particularidades de las formaciones geológicas que afloran (formaciones Artemisa y Manacas) y por los movimientos neotectónicos que se manifiestan en la zona.

4.2. Factores de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos

Para entender el patrón de distribución espacial y el control que ejercen los diferentes factores condicionantes sobre la ocurrencia de los deslizamientos, el mapa de inventario obtenido de la interpretación de fotos aéreas, se superpone con los mapas temáticos reclasificados, que representan las diferentes variables estudiadas.

4.2.1. Factor geológico

Las condiciones geológicas del área determinan la susceptibilidad a los deslizamientos. Los planos de estratificación, discontinuidades o zonas de contacto de estructuras geológicas, se convierten con frecuencia en potenciales superficies de fallas del cuerpo deslizante. La composición litológica determina las propiedades físico mecánicas de las rocas y por consiguiente su susceptibilidad al desarrollo de los deslizamientos. La presencia de rocas muy foliadas con planos de debilidad facilita la inestabilidad de las laderas. Para caracterizar la influencia de las condiciones geológicas se integran dos mapas: Unidades geológicas y Distancia a fallas (Figura 8a).

Tabla 3. Distribución de los deslizamientos por formaciones geológicas y los pesos estimados según los diferentes métodos

Formación Geológica	Área, (Km ²)	Área %	No. des liz.	% de desliz.	Susceptibilidad (AMA)	BSA (pesos)	Membresía fuzzy
Artemisa (Calizas bien estratificadas, calcilulitas y calcarenitas)	309.11	2.83	13	72.22	Muy Alta (0.46)	0.72	0.9
Guajaibón (Calizas, calcarenitas y calciruditas)	10.13	0.09	1	5.55	Alta (0.26)	0.05	0.8
Guasasa (Calizas micríticas masiva con pedernales)	499.52	4.58	3	16.66	Moderada (0.16)	0.16	0.8
Manacas (Areniscas polimícticas, limolitas, argilitas, argilitas, depósitos caóticos de matriz terrígena)	271.50	2.49	1	5.55	Baja (0.09)	0.05	0.8
Restantes formaciones	3993.84	78.80	0		Muy Baja (0.04)	0	0.4

(*BSA (pesos): Pesos obtenidos por el método de análisis estadístico divariado)

Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla 3 las formaciones más proclives al desarrollo de deslizamientos son las formaciones Artemisa, Guasasa, Guajaibón y Manacas. En el caso de la Fm. Manacas su alto grado de tectonismo y cizallamiento, unido a la composición limo arcillosa de su matriz heterolítica facilitan el desarrollo de estos procesos.

4.2.2. Distancia a Fallas

Las zonas que presenten alta densidad de fallas son por lo general más propensas a la inestabilidad de sus pendientes. Un alto grado de deformación y fracturación del macizo rocoso (grietas, estructuras de foliación, fallas, etc.) debilitan considerablemente su resistencia, y facilitan la ocurrencia de deslizamientos. En la tabla 4 se puede apreciar la relación entre la cantidad de deslizamientos y la distancia a fallas. En las proximidades de estas estructuras se localiza el mayor número de movimientos de ladera.

Tabla 4. Distribución de los deslizamientos en función de la distancia a fallas.

Intervalos(m)	Área Km ²	% Área	No. Desliz.	% Desliz.	Susceptibilidad (AMA)	BSA(pesos)
0 - 136	1415.78	12.98	7	38.88	Muy Alta (0.46)	0.38
136 - 390	957.08	8.78	4	22.22	Alta (0.26)	0.22
390-957	833.29	7.64	4	22.22	Moderada (0.16)	0.22
957-2617	617.64	5.66	3	16.66	Baja (0.09)	0.16

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Factor geomorfológico

Para caracterizar la influencia de la geomorfología se integran tres mapas morfométricos, derivados de MED (pendiente, disección vertical y aspecto), y el mapa de distancia a la red fluvial (Figura 8b).

Pendiente

Los procesos de laderas están controlados por la fuerza de gravedad y mientras mayor sea la pendiente y la posición hipsométrica del cuerpo rocoso mayor será la susceptibilidad a deslizarse.

Como se muestra en la tabla 5 el 100 % de los deslizamientos se localizan en la clase de mayor pendiente que abarca el rango entre 12.8° y 75°. En el área estudiada el 16.02 % de la misma corresponde a pendientes superiores a 12.8 °, lo que debe tenerse en cuenta en los análisis de susceptibilidad.

Tabla 5. Distribución de los deslizamientos en función de la pendiente.

Intervalos (°)	Área (Km ²)	Área %	No. Desliz	% Desliz.	Susc (AMA)	BSA (pesos)
0 - 0.8	4.98	0.04			Muy Baja (0.04)	0
0.8 - 2.63	5333.58	49.36			Baja (0.09)	0
2.63 - 6.15	1959.98	18.13			Moderada (0.16)	0
6.15 - 12.8	1759.83	16.28			Alta (0.26)	0
12.8 - 75.0	1746.38	16.02	18	100	Muy Alta (0.46)	1

Fuente: Elaboración propia.

Diseción Vertical

El mapa de diseción vertical (relieve interno) muestra una clara diferenciación de este parámetro dentro de la Cordillera de Guaniguanico. Los valores más elevados se manifiestan en la Sierra del Rosario y en la franja de Mogote de la Sierra de los Órganos, provocando un mayor desarrollo e intensidad de los deslizamientos (Figura 5c).

En las tablas 5 y 6 se evidencia que la mayoría de los deslizamientos reportados están asociados a zonas de elevada pendiente y diseción vertical lo que corrobora el control que ejerce el relieve sobre su manifestación. Las dos variables son dependientes y tienen un similar impacto en la ocurrencia de estos procesos gravitacionales.

Tabla 6. Distribución de los deslizamientos en función de la diseción vertical.

Intervalos (m/ha)	Área (Km ²)	% Área	No. Desliz.	% Desliz.	Susc (AMA)	BSA(pesos)
0 - 5.14	11.35	0.09			Muy Baja (0.04)	0
5.14 - 18.0	4442.69	37.83			Baja (0.09)	0
18.0 - 41.1	2644.47	22.51			Moderada (0.16)	0
41.1 - 102.8	2372.45	20.20			Alta (0.26)	0
102.8 - 653.2	2272.23	20.84	18	100	Muy Alta (0.46)	1

Fuente: Elaboración propia.

Aspecto

Esta variable se estudia con el objetivo de conocer como las diversas direcciones de las vertientes influyen en la ocurrencia de deslizamientos. A partir de los deslizamientos registrados en el área de estudio y su distribución en función del aspecto, se puede concluir que esta variable no ejerce control sobre estos fenómenos, pues existe una distribución casi uniforme en cada una de las clases.

Red Fluvial

Los ríos que fluyen por la base de las laderas provocan el socavamiento de las mismas y por consiguiente el debilitamiento del macizo rocoso. Sin embargo, a partir de los resultados obtenidos de la superposición del mapa reclasificado de distancia a ríos con

el inventario se puede concluir que el control que ejerce este factor no es determinante ya que el 88.8 % de los fenómenos gravitacionales (deslizamientos y desprendimientos) se localizan a distancias superiores a 400m.

4.2.4. Factor Edafológico

La presencia de un potente perfil edafológico es un factor importante para el desarrollo de los procesos de laderas, los cuales aprovechan la zona de contacto de la roca fresca y la corteza de meteorización como superficie de rotura, especialmente en aquellas zonas donde el espesor de los sedimentos friables es considerable.

Tipo de suelo

A partir del análisis de la evidencia, la cual se resume y relaciona en la tabla 7, se puede verificar que el 66.6 % de los deslizamientos registrados ocurren en suelo de tipología “Macizos Rocosos” los que representa el 3.2% de la superficie total estudiada y el resto de los deslizamientos (33.3 %) se asocia a suelos de tipo “fersialíticos” (Figura 8c).

Tabla 7. Distribución de los deslizamientos en función del tipo de suelo.

Tipo de suelo	Área (Km ²)	% Área	No Desliz.	% Desliz.	Susc. (AMA)	BSA (pesos)	Membresía fuzzy
Fersialíticos	582.17	5.34	6	33.33	Alta	0.33	0.8
Macizos Rocosos	348.69	3.19	12	66.66	Muy Alta	0.66	0.9
El resto de los suelos					Baja		0.4 y 0.2

Fuente: Elaboración propia.

Profundidad del suelo

La tabla 8 refleja que el 66.6% de los deslizamientos ocurren en suelos con menos de 1.7 m de espesor, lo que permite afirmar que mientras menor es la profundidad de suelo, mayor es la probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos. Esta contradicción se puede explicar si se considera que los deslizamientos ocurren en las zonas más elevadas del relieve y de mayor pendiente, precisamente los sectores donde los espesores del perfil edafológico deben disminuir producto de la erosión, por tal motivo la mayor cantidad de estos movimientos se concentran en las clases de menor espesor.

Tabla 8. Distribución de los deslizamientos en función de la profundidad del suelo.

Intervalos(m)	Área (Km ²)	% Área	No Desliz.	% Desliz.	Susc(AMA)	BSA(pesos)	Membresía (pesos)
0 - 1.7	2048.78	18.79	12	66.66	Muy Alta	0.66	0.6
1.7 - 3.8	2044.58	18.75	2	11.11	Alta	0.11	0.3
3.8 - 5.0	2554.31	23.43	2	11.11	Moderada	0.11	0.3
5.0 - 6.6	1706.68	15.65	1	5.55	Baja	0.05	0.3
6.6 - 3.60	1671.51	15.33	1	5.55	Muy Baja	0.05	0.3

Fuente: Elaboración propia.

4.2.5. Factor red vial

La red vial es un factor antrópico que ejerce una gran influencia sobre el desarrollo de los deslizamientos, los cortes de laderas y los taludes generados provocan la disminución sustancial de la resistencia del macizo rocoso. Es importante aclarar que algunos autores desaconsejan mezclar factores artificiales (red vial) con naturales en los estudios de susceptibilidad (Ayalew et al., 2005). En este caso, se desestimaron los deslizamientos vinculados a la red vial, arrojando los resultados plasmados en la tabla 9 (Figura 8d).

Tabla 9. Distribución de los deslizamientos en función de la distancia a la red vial.

Distancia (m)	Área (Km ²)	% Área	Desliz	% Desliz.	Susc. (AMA)
0 - 122.4	2183.06	20.02	0	0	Muy Alta
122.4 - 489.8	1928.27	17.69	0	0	Alta
489.8 - 979.6	2613.45	23.97	1	5.5	Moderada
979.6 - 1714.3	2257.88	20.71	4	2.2	Baja
>1714.3	1928.96	17.69	13	72.2	Muy Baja

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Resultados de los métodos de modelación de la susceptibilidad

Para la obtención de los mapas (zonificación) de susceptibilidad a los deslizamientos, se utilizaron diferentes métodos de modelación, tomando como caso base el empleo de la metodología y las recomendaciones de la Agencia de Medio Ambiente (AMA), los factores internos o condicionantes fueron integrados en el mapa de susceptibilidad, utilizando diferentes variantes (Tabla 10).

Tabla 10. Variantes utilizadas de modelación de la susceptibilidad.

Variantes modelación	Método de integración	Factores o Variables utilizadas	Peso de las variables	Pesos de las clases
Var -AMA	Superposición Indexada	Formación geológica, distancia a fallas, pendiente, disección vertical, tipo de suelo, profundidad del suelo, distancia red vial	Criterio de experto (AMA, 2012)	Criterio de experto (AMA, 2012)
BSA	Superposición Indexada	Formación geológica, distancia a fallas, pendiente, disección vertical, tipo de suelo, profundidad del suelo	Criterio de experto (AMA, 2012)	Análisis estadístico bivariado
AHP	Superposición Indexada	Formación geológica, distancia a fallas, pendiente, disección vertical, tipo de suelo, profundidad del suelo	Proceso analítico jerárquico	Análisis estadístico bivariado
Fuzzy	Lógica difusa	Formación geológica, distancia a fallas, pendiente, disección vertical, tipo de suelo, profundidad del suelo	Membresia Fuzzy Funciones analíticas (Large fuzzification algorithm y Small fuzzification algorithm)	

Fuente: Elaboración propia.

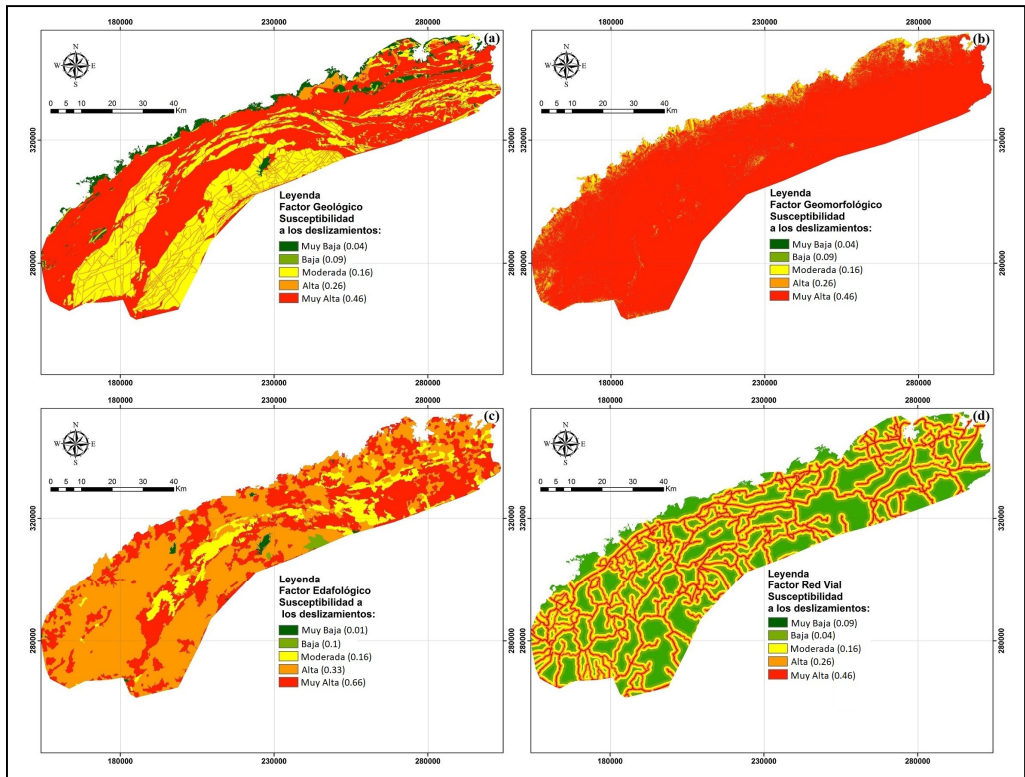
4.4. Zonificación de la susceptibilidad por la metodología de la AMA

Esta metodología utiliza la superposición indexada como método de integración. La ponderación de los mapas de evidencias y sus clases, se basan en el conocimiento que posee el investigador sobre el espacio geográfico estudiado. El mapa resultante (mapa de susceptibilidad) es una combinación lineal ponderada de todas las variables estudiadas (Bonham-Carter, 1994; Harris et al., 2001).

En la “Guía metodológica para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo por deslizamientos de terreno a nivel municipal” (AMA, 2012) se recomiendan: los factores condicionantes, las clases en que deben ser reclasificados y sus límites, además de los pesos de cada factor y sus clases temáticas (Tablas 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9). Las recomendaciones de esta agencia se resumen en la siguiente combinación lineal ponderada, los pesos de cada factor reflejan los criterios de los especialistas consultados por la AMA:

Mapa de susceptibilidad = $0.5 \cdot \text{Factor geológico} + 0.37 \cdot \text{Factor geomorfológico} + 0.08 \cdot \text{Factor edafológico} + 0.05 \cdot \text{Factor red vial}$

Figura 8. Principales factores de susceptibilidad resultantes de la integración de las diferentes variables estudiadas⁶.



Fuente: Elaboración propia.

En el mapa preliminar de susceptibilidad se emplearon los siguientes ocho mapas de factores: mapa geológico, disección vertical, pendiente, distancia a ríos, distancia a fallas, distancia a carreteras, tipo de suelo y profundidad de suelo.

Los resultados obtenidos indican que las zonas más sensibles a la ocurrencia de deslizamientos se localizan hacia la parte axial de la Cordillera de Guaniguanico, e incluyen la faja de mogotes en la Sierra de los Órganos y la parte meridional de Sierra

⁶ (a) Geología, (b) Geomorfología, (c) Edafología y (d) Red Vial. Entre paréntesis se indica los pesos estimados.

del Rosario. Los deslizamientos conocidos se concentran básicamente en las áreas, donde se obtuvieron altos valores de susceptibilidad, lo que en cierta forma valida el procedimiento utilizado (Figura 9 a).

4.5. Zonificación de la susceptibilidad por la Metodología de la AMA modificada, utilizando el análisis estadístico bivariado (BSA) para determinar los pesos de las clases

Los pesos asignados a cada clase de las variables estudiadas, responden a opiniones de expertos, que, a partir de la experiencia acumulada en estudios previos en Cuba, plasmaron sus criterios en la guía metodológica (AMA, 2012). Sin embargo, los niveles de importancia sugeridos para cada criterio, necesariamente no tienen que coincidir con la situación geológica concreta de cada territorio. Con vista a reducir esta incertidumbre, se aplicó el método “análisis estadístico bivariado” (BSA) para estimar el peso de cada clase.

La esencia del método consiste en determinar la densidad de deslizamiento dentro de cada clase temática de los mapas de factores o parámetros, y derivar los pesos atendiendo a dicha distribución (Süzen y Doyuran, 2004). El inventario de deslizamientos de la cordillera fue usado para establecer la frecuencia de ocurrencia en cada escenario posible, permitiendo de esta forma asignar pesos debidamente argumentados.

El mapa de susceptibilidad obtenido (Figura 9 b), reclasificado en tres niveles, muestra una buena asociación espacial de la clase “alta susceptibilidad” con el inventario empleado. Las zonas de mayor probabilidad de ocurrencia se localizan en la parte más oriental de la cordillera, mientras que el cinturón de mogotes posee susceptibilidad media.

4.6. Método de superposición indexada aplicando pesos de los factores calculados a partir del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Con el objetivo de ampliar el análisis y continuar adaptando la metodología aplicada a las condiciones reales de la Cordillera de Guaniguanico, se decidió recalcular los pesos de las variables que controlan la ocurrencia de deslizamientos, por el método AHP. En este método, sobre la base del criterio de los decisores, se conforma la matriz de comparaciones binarias entre variables correspondientes, asignando valores entre 1 y 9 a cada una de las comparaciones dos a dos, verificándose que $a_{ij} = 1/a_{ji}$ (Tabla 11).

Tabla 11. Matriz de comparaciones binarias.

	Disección Vertical	Pendiente	Distancia Fallas	Tipo Suelo	Profundidad Suelo
Geología	3	2	5	1/2	8
Disección Vertical		1/3	2	1/4	5
Pendiente			4	1/3	6
Distancia Fallas				1/5	4
Tipo de Suelo					9

Fuente: Elaboración propia.

Después de obtenida la matriz de comparaciones binarias se utiliza el programa Expert Choice para calcular los pesos. La ratio de inconsistencia resultante es 0,04 inferior al 10%, lo que indica que la consistencia obtenida es aceptable. En la tabla 12 se muestran los pesos (w) asignados a cada criterio. Las variables tipos de suelos, geología y pendiente recibieron los mayores niveles de ponderación.

Tabla 12. Vector de pesos de las principales variables según el método AHP.

	Geología	Disección Vertical	Pendiente	Distancia Fallas	Tipo Suelos	Profundidad Suelos
W (pesos)	0.258	0.095	0.180	0.062	0.378	0.026

Fuente: Elaboración propia.

El mapa de susceptibilidad (Figura 9 c), se obtiene a partir de la siguiente combinación lineal ponderada: Mapa de susceptibilidad = $0.378 \cdot \text{Tipo de suelo} + 0.258 \cdot \text{geología} + 0.180 \cdot \text{pendiente} + 0.095 \cdot \text{disección vertical} + 0.062 \cdot \text{distancia a fallas} + 0.026 \cdot \text{profundidad de suelo}$.

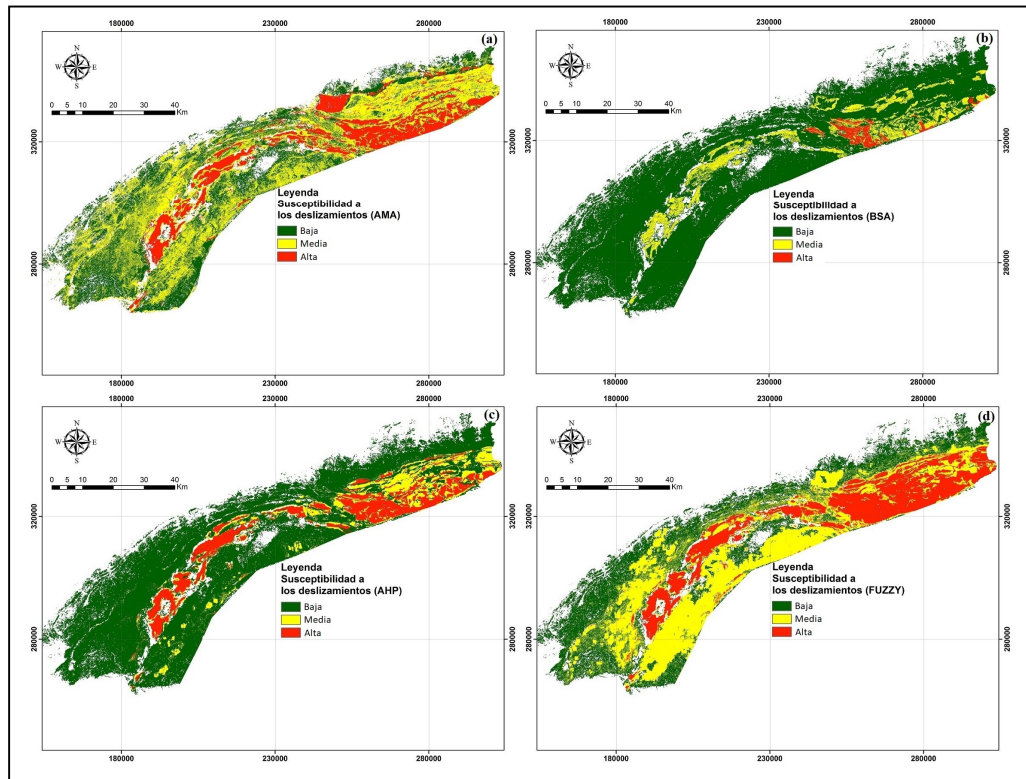
El patrón de susceptibilidad revelado es muy similar a los anteriores, aunque eleva la favorabilidad de la faja de Mogotes en el centro de la cordillera y la faja Cangre en parte meridional. Las zonas susceptibles tienen correlación espacial con los deslizamientos conocidos lo que valida el resultado obtenido.

4.7. Método de lógica difusa

Se recurre a la lógica difusa para superar el carácter lineal y aditivo de los procedimientos anteriores, además el método evita la reclasificación de las variables cuantitativas continuas. La codificación (fuzzification) de los seis mapas primarios (pendiente, disección vertical, tipo de suelo, profundidad de suelo, distancia a fallas y geología (unidades geológicas)) se realizó por 2 vías diferentes: valoración subjetiva y funciones analíticas (Tsoukalas y Uhrig, 1997). Los valores de membresía se asignaron de forma subjetiva sobre la base

del conocimiento del modelo conceptual de deslizamiento y la importancia relativa de cada una de las clases en los mapas correspondientes (Figura 9).

Figura 9. Mapas de susceptibilidad a los deslizamientos en la Cordillera de Guaniguanico, aplicando diferentes métodos⁷.



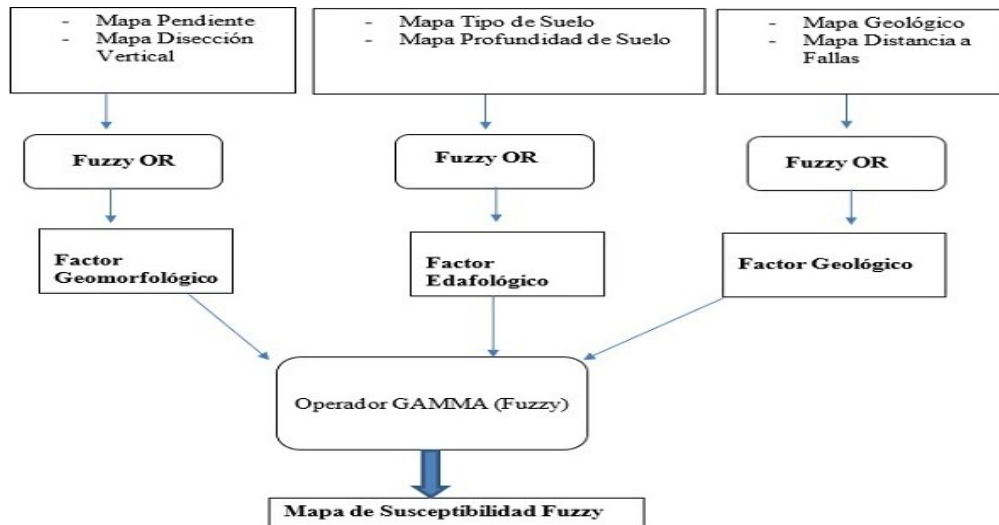
Fuente: Elaboración propia.

Como un mapa de evidencia puede indicar la presencia o ausencia de más de un factor controlador o un mismo factor puede ser cartografiado por varios mapas de evidencias, la red de inferencia diseñada (Figura 10), refleja las relaciones existentes entre los fenómenos gravitacionales, los factores controladores y los mapas de

⁷ Mapas de susceptibilidad a los deslizamientos en la Cordillera de Guaniguanico, aplicando diferentes métodos: (a) Superposición Indexada propuesta por la Agencia de Medio Ambiente de Cuba (AMA, 2012), (b) Análisis Estadístico Bivariado (BSA), (c) Proceso Analítico Jerárquico (AHP), (d) Lógica difusa (FUZZY). Los sectores en color blanco indican zonas con nulas posibilidades a la ocurrencia de los deslizamientos con pendientes inferiores a los 3°.

evidencias disponibles. Inicialmente se realizan las combinaciones de los mapas Dv con el de pendiente, tipo de suelo con el de profundidad de suelo y distancia a fallas con el geológico a través del operador difuso OR. Finalmente, los mapas resultantes fueron procesados utilizando el operador GAMMA, con un valor del parámetro de 0.75.

Figura 10. Red de inferencia desarrollada para la integración a través de la lógica difusa.



Fuente: Elaboración propia.

El mapa final (Figura 9 d) revela un patrón de zonas susceptibles similar al resultante de la aplicación de la superposición indexada en cada una de las variantes de ponderación. Se destacan en ellos las zonas localizadas a lo largo de la parte oriental de la Sierra del Rosario y la parte axial de la Cordillera de Guaniguanico. La principal diferencia con los anteriores mapas de susceptibilidad a los deslizamientos presentados, radica en la extensión más amplia e intensa de las zonas con valores intermedios de susceptibilidad (Pizarras del Sur). En sentido general se puede considerar que la lógica difusa, en comparación con la superposición indexada, brinda resultados más ajustados a la realidad.

4.8. Validación

Los mapas de susceptibilidad y el modelo conceptual de deslizamiento aplicado se validan comprobando si las zonas de alta susceptibilidad son capaces de revelar los deslizamientos conocidos e identificar nuevos sectores que no aparecen en el inventario. El análisis se realizó a partir de la combinación de cada mapa de susceptibilidad con los mapas de inventarios, de esta forma la cantidad de fenómenos y la distribución de los mismos en cada clase fue estimada.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 13. En sentido general, la clase de alta susceptibilidad en todos los métodos ocupan un área relativamente pequeña (<20%), mientras que revela un alto porcentaje de los deslizamientos no asociados a las carreteras. Los métodos de la lógica fuzzy y AHP brindan los mejores resultados al asignar el 100 % de los deslizamientos a esta clase. También resulta muy significativo que la lógica difusa revela la mayor cantidad de deslizamientos asociados a las carreteras en la clase alta susceptibilidad. Esto demuestra la consistencia del método y su capacidad predictiva.

Tabla 13. Resultados de la validación de los mapas de susceptibilidad, obtenidos por los diferentes métodos.

Métodos	Inventario por carreteras						Inventario mediante fotointerpretación			Porcentaje de certeza*
	Clases						Clases			
	Bajo	Área (%)	Medio	Área (%)	Alto	Área (%)	Bajo	Medio	Alto	
AMA	6	36.51	23	48.64	16	14.83	0	2	16	89
BSA	17	70.75	18	23.51	10	5.72	0	5	13	72
AHP	17	65.81	23	22.64	5	11.54	0	0	18	100
Lógica difusa	5	46.71	15	36.32	24	16.96	0	0	18	100

*Porcentaje de certeza = cantidad de deslizamientos en la clase "Alta susceptibilidad" / Total de deslizamientos

Fuente: Elaboración propia.

4.9. Sugerencias de manejo para la Cordillera de Guaniguanico en función del uso de la superficie y los niveles de susceptibilidad a deslizamientos

De modo general es consenso que el ordenamiento del territorio requiere un adecuado diagnóstico inicial del espacio geográfico, justamente en este sentido estaría la contribución esencial de este trabajo. Evidentemente la ocurrencia de movimientos gravitacionales y específicamente los deslizamientos, no son la única variable regulatoria en el manejo de la Cordillera de Guaniguanico. Pero su análisis es una contribución de consideración, especialmente en un entorno geográfico donde más del 50% del territorio presenta pendientes sobre los 30°.

En la tabla 14, se agruparon las principales sugerencias de manejo y regulaciones futuras para la gestión sustentable de la Cordillera de Guaniguanico. Las recomendaciones se agruparon atendiendo a los cuatro usos actuales de la superficie en el territorio: Parques y Reservas Naturales, Zonas Agrícolas o forestales, Zonas Urbanas y Red Vial.

Tabla 14. Sugerencias de manejo para la cordillera de Guaniguanico en función del uso de la superficie y los niveles de susceptibilidad a los deslizamientos determinados en este trabajo.

Niveles de susceptibilidad	Sugerencias de acuerdo al uso de la superficie			
	Red vial	Asentamiento humanos	Zonas agrícolas o forestales	Parques y Reservas naturales
Bajo	<p>a. Conservación, mantenimiento y monitoreo sistemático de la red vial.</p>	<p>a. Conservación, mantenimiento y monitoreo sistemático de conjuntos habitacionales y de la infraestructura en general. b. Medidas de drenaje en laderas o taludes cercanos a infraestructuras. c. Aplicación de medidas estabilizadoras: modificación de la geometría de taludes, construcción de muros u otros elementos de contención. d. Restringir nuevos proyectos. e. En caso de nuevos proyectos, exigir de carácter obligatorio estudios de estabilidad de taludes a escala 1: 1000 y de mayor de detalle.</p>	<p>a. Prácticas agronómicas: siembra en contorno, barreras vivas. Rotación de cultivos.</p>	<p>a. Monitoreo sistemático de laderas y taludes. b. En caso de desarrollarse algunas de los tres usos anteriores aplican las respectivas sugerencias.</p>
Medio	<p>a. Conservación, mantenimiento y monitoreo sistemático de la red vial ya construida. b. Medidas de drenaje en laderas o taludes adyacentes a la red vial. c. Restringir nuevos proyectos viales. d. En caso de nuevos proyectos, exigir de carácter obligatorio estudios de estabilidad de taludes a escala 1: 1000 y de mayor de detalle.</p>	<p>a. Conservación, mantenimiento y monitoreo sistemático de conjuntos habitacionales y de la infraestructura en general. b. Medidas de drenaje en laderas o taludes cercanos a infraestructuras. c. Aplicación de medidas estabilizadoras: modificación de la geometría de taludes, construcción de muros u otros elementos de contención. d. Restringir nuevos proyectos, exigir de carácter obligatorio estudios de estabilidad de taludes a escala 1: 1000 y de mayor de detalle. e. En caso de nuevos proyectos, exigir de carácter obligatorio estudios de estabilidad de taludes a escala 1: 1000 y de mayor de detalle. f. En caso de desarrollarse algunas de los tres usos anteriores aplican las respectivas sugerencias.</p>	<p>a. Prácticas agronómicas: cultivos en fajas perpendiculares a la dirección de la pendiente, barreras vivas. Rotación de cultivos. b. Obras biogénicas de conservación de suelos. c. En caso de zona forestal aplicar medidas de control de cárcavas en caminos forestales.</p>	<p>a. Restringir nuevos proyectos constructivos. b. En caso de nuevos proyectos, exigir de carácter obligatorio estudios de estabilidad de taludes a escala 1: 1000 y de mayor de detalle. c. En caso de desarrollarse algunas de los tres usos anteriores aplican las respectivas sugerencias.</p>
Alto	<p>a. Conservación, mantenimiento y monitoreo sistemático de la red vial ya construida. b. Medidas de drenaje en laderas o taludes adyacentes a la red vial. c. Aplicación de medidas estabilizadoras: Modificación de la geometría de taludes, introducción en el terreno de elementos estructurales resistentes, Construcción de muros u otros elementos de contención. d. Prohibir nuevos proyectos viales.</p>	<p>a. Conservación, mantenimiento y monitoreo sistemático de conjuntos habitacionales y de la infraestructura.. b. Medidas de drenaje en laderas o taludes cercanos a infraestructuras. c. Análisis de estabilidad de laderas o taludes a escalas 1: 1000 o mayores. d. Aplicación de medidas estabilizadoras: Modificación de la geometría de taludes, introducción en el terreno de elementos estructurales resistentes, construcción de muros u otros. e. Prohibir nuevos proyectos constructivos.</p>	<p>a. Cambio de uso, en este caso a cubierta forestal, con prohibición o restricciones para la extracción de madera.</p>	<p>a. Prohibir nuevos proyectos constructivos. b. En caso de desarrollarse algunas de los tres usos anteriores aplican las respectivas sugerencias.</p>

Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones

1. Los inventarios de deslizamientos representan una herramienta útil como punto de partida para los estudios de susceptibilidad y riesgo de un territorio, su uso en este trabajo demostró que el sector más propenso al desarrollo de deslizamientos es la zona más oriental de la cordillera, con una vasta densidad de estos movimientos, lo que puede estar asociado, por una lado, a la composición litológica y las particularidades de las formaciones geológicas que afloran y por otro, a los movimientos neotectónicos que se manifiestan.
2. Los factores que mayor control ejercen sobre los deslizamientos son el edafológico, geomorfológico y geológico. El factor edafológico representado por el mapa “tipo de suelo” mostró la mayor capacidad predictiva (mayor asociación espacial) al revelar un número significativo de los deslizamientos conocidos y poseer una extensión areal, relativamente limitada, de los tipos de suelo más susceptibles.
3. La integración del inventario con los diferentes mapas de factores condicionantes permitió establecer que las áreas más propensas a los deslizamientos se manifiestan donde; a) afloran las formaciones Artemisa (Calizas bien estratificadas y calcarenitas), Guasasa (Calizas masivas y pedernales) y Guajaibón (Calizas, calcarenitas y calciruditas), b) se desarrollan suelos de los tipos “Fersialíticos” y “Macizos rocosos”, c) la disección vertical alcanza valores superiores a 102.8 m/ha y las pendientes supera los 12°.
4. La zonificación de la susceptibilidad por los diferentes métodos empleados reveló que aproximadamente el 25% del territorio es susceptible a la ocurrencia de los deslizamientos. De ellos aproximadamente el 10% posee alta susceptibilidad.
5. La aplicación de los métodos de modelación de la susceptibilidad a los deslizamientos en SIG arrojó que las zonas más susceptibles corresponden espacialmente a las Sierra del Rosario. Mientras que la validación demostró que, en este caso, la lógica difusa brinda resultados superiores si se considera su capacidad predictiva en los dos inventarios utilizados.
6. Se ofrecen alternativas viables para el manejo de la cordillera de Guaniguanico en función del uso de la superficie actual y de los niveles de susceptibilidad a los deslizamientos determinados en este trabajo.

6. Bibliografía

- Agencia de Medio Ambiente (AMA) (2012): Guía metodológica para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo por deslizamientos de terreno a nivel municipal, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba.
- Awawdeh, M., ElMughrabi, M. A, Atallah, M. (2018): Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from North Jordan. *Environmental Earth Sciences* 77(21).
- Bee, C. (2013): Estudio de susceptibilidad a los deslizamientos de terrenos en el distrito geográfico de Pinar del Río. Tesis en opción al título de Ingeniero en Geología. Facultad de Ciencias Técnicas. Universidad Hermanos Saiz, Pinar del Río, Cuba.

- Bonham-Carter, G.F. (1994): *Geographic Information Systems for Geoscientists, Modelling with GIS*. Pergamon, Ontario.
<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780080418674> [Consulta: 4 enero 2018].
- Cascini, L., Bonnard, Ch., Corominas, J., Jibson, R., Montero-Olarte, J. (2005): *Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development*. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (Eds.), *Landslide Risk Management*. Taylor and Francis, London.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.457.1151&rep=rep1&type=pdf> [Consulta: 4 enero 2018].
- Castellanos, E. (2008): *Multi-scale landslide risk assessment in Cuba*”, Tesis Doctoral, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands.
<https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/30890/index.htm?sequence=35> [Consulta: 4 enero 2018].
- Cobiella, J. L. (2008): *Reconstrucción palinospástica del paleomargen mesozoico de América del Norte en Cuba occidental y el sudeste del Golfo de México. Implicaciones para la evolución de SE del Golfo de México*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25, (3), 382-401.
<http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcg/v25n3/v25n3a2.pdf> [Consulta: 5 enero 2018].
- Cobiella, J. L., Gil, S., Hernández, A. y Díaz, N. (2000): *Estratigrafía y tectónica de la Sierra del Rosario, Cordillera de Guaniguanico, Cuba Occidental*. *Minería y Geología*, 17, (1), 5-15.
<https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/1/1> [Consulta: 5 enero 2018].
- Cueto-Gil, C. J. (2014): *Estudio de la susceptibilidad a los deslizamientos en la antigua provincia de Pinar del Río*. Tesis en opción al título de Master en Geología, Facultad de Ciencias Técnicas. Universidad Hermanos Saiz, Pinar del Río, Cuba.
- De la Torre, P. (2014): *Procedimiento para la evaluación de la estabilidad de taludes. Casos de estudio: carreteras de montaña de la Sierra del Rosario, Cuba Occidental*. Tesis en opción al título de Master en Geología, Facultad de Ciencias Técnicas. Universidad Hermanos Saiz, Pinar del Río, Cuba.
- Ferrufino, C.E. y Grande, C.E. (2013): *Tendencias de ordenamiento territorial en América Central y República Dominicana (2009-2012)*. Informe del Proyecto de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible en Centroamérica (ODETCA), San Salvador, El Salvador, Mayo 2013.
<https://www.giz.de/en/downloads/giz2013-sp-tendencias-ordenamiento-territorialamerica-central.pdf> [Consulta: 5 enero 2018].
- García, J.A. y Ordaz, A. (2007): *Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos a escala 1: 250 000 en las vías de interés nacional de la Provincia de Pinar del Río*. *Memorias 2da Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*. La Habana, Cuba.
- GEOCUBA (2001): *Modelo digital del terreno (MDT) con 30 m de resolución espacial*. La Habana.
- Gregório de Andrade, R. (2010): *Política Nacional de ordenamiento territorial: El caso de Brasil*. *Espacio y Desarrollo* 22, 119-134.

file:///C:/Users/pcmaster/Downloads/Dialnet-PoliticaNacionalDeOrdenamientoTerritorial-5339534.pdf [Consulta: 5 enero 2018].

- Harris, J.R., Wilkinson, L., Heather, K., Fumerton, S., Bernier, M.A., Ayer, J., Dahn, R. (2001): Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps-a case study: Mesothermal Au in the Wayze Greenstone Belt, Ontario, Canada. *Natural Resources Research*, 10, (2), 91–124.
- Hernández, Y.T. (2010): El ordenamiento territorial y su construcción social en Colombia: ¿un instrumento para el desarrollo sustentable? *Cuadernos de Geografía Revista Colombiana de Geografía*, 19, 97-109.
- <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/16854/17724>[Consulta: 5 enero 2018].
- Instituto de Geología y Paleontología (IGP). (2006): Mapa geológico a escala 1:50 000. La Habana: Centro de Información Geológica.
- Laldintluanga, E. H., Lalbiakmawia, F., Lalbiaknungi, E. R. (2016): Hazard zonation along state highway between Aizawl city and Aibawk town, mizoram, India using geospatial techniques. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 5, (2), 342-355.
- https://www.researchgate.net/publication/326648092_LANDSLIDE_HAZARD_ZONATION_ALONG_STATE_HIGHWAY_BETWEEN_AIZAWL_CITY_AND_AIBAWK_TOWN_MIZORAM_INDIA_USING_GEOSPATIAL_TECHNIQUES[Consulta: 2 abril 2019].
- Lin, L., Lin, Q., Wang, Y. (2018): Landslide susceptibility mapping on a global scale using the method of logistic regression, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 1411-1424
- <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1411-2017>, 2017 [Consulta: 5 enero 2018].
- Ministerio de la Agricultura (MINAGRI) (2002): Mapa de suelos a escala 1:25 000. La Habana: Instituto de Suelos.
- Padrón, M. (2013): Plan general de Ordenamiento Territorial y Urbanismo. Dirección General de Ordenamiento Territorial y Urbanismo. Instituto de Planificación Física de Cuba.
- <http://www.ipf.cu/es/content/plan-general-de-ordenamiento-territorial-y-urbanismo> [Consulta: 5 enero 2018].
- Saaty, T. L. (1980): *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Santos, L. (2012): Movimientos de masa en la región central de la Sierra de los Órganos, Cuba. Tesis en opción al título de Ingeniero en Geología. Facultad de Ciencias Técnicas. Universidad Hermanos Saiz, Pinar del Río, Cuba.
- Süzen, M.L. y Doyuran, V., (2004): Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information 665 systems: method and application to Asarsuyu Catchment, Turkey. *Engineering Geology*, 71, 303-321.
- Tsoukalas, L.H. y Uhrig, R.E. (1997): *Fuzzy and neural approaches in engineering*. New York, John Wiley and Sons.
- <https://www.wiley.com/en-us/Fuzzy+And+Neural+Approaches+in+Engineering-p-9780471160038> [Consulta: 5 enero 2018].