

ESTIMACIÓN DE PESOS PONDERADOS DE VARIABLES PARA GENERAR MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA A TRAVÉS DE LA EVALUACIÓN ESPACIAL MULTICRITERIOS

ESTIMATION OF ADJUSTED WEIGHTS OF VARIABLES FOR THE GENERATION
OF SUSCEPTIBILITY MAPS THROUGH THE SPATIAL MULTICRITERIA EVALUATION

**ARISMAR MARCANO, SCARLET CARTAYA,
HENRY PACHECO Y WILLIAMS MÉNDEZ**

RESUMEN

Las geociencias y la geomática han abordado la reducción de riesgos a través de la gestión del territorio, requiriendo la construcción y análisis de mapas. Sin embargo, uno de los aspectos más cuestionados está dado por la objetividad al asignar pesos a las variables que se evaluarán para generarlos. Este trabajo pretende analizar el método de jerarquías analíticas de la evaluación espacial multicriterios (EEM) como mecanismo de ponderación de variables para la construcción de mapas de susceptibilidad a movimientos en masa. Para aplicar esta investigación de tipo correlacional-explicativa, se procedió a enviar a un grupo de expertos matrices de jerarquías analíticas considerando las variables: geología de superficie, geomorfología, pendiente media del terreno y conflicto de uso (constituido por la discrepancia entre el uso actual y uso potencial). Entre los resultados destaca que, la geología obtuvo el mayor peso relativo (0,39); seguida por la pendiente (0,29); la geomorfología (0,23) y los conflictos de uso (0,06). Como conclusiones del ensayo metodológico se puede considerar que: (a) concibe mayor objetividad a la asignación de pesos de las variables, sin sesgar la información al área de conocimiento del experto consultado; (b) permite que cada una de las unidades componentes de las variables, compitan entre sí, quedando jerarquizadas con criterios más objetivos; (c) contribuye a minimizar el algoritmo de mapas. No obstante, presenta inconvenientes en ciertas variables, ya que no todos los criterios o unidades son posibles de contrastar, por lo que se deben aclarar las unidades y la dimensión que se pretenden comparar antes de desarrollar las matrices.

Palabras clave: evaluación multicriterio, matriz, estimación, mapa, susceptibilidad

ABSTRACT

Geoscience and geomatics have addressed risk reduction through land management, requiring the construction and analysis of maps. However, one of the most criticized aspects is given by the objectivity to assign weights to the variables that will be crossed to generate them. This paper analyzes the method of Analytical Hierarchy of the Multicriteria evaluation as a weighting of variables mechanism, to construct maps of land movements' susceptibility. To apply this correlational-explanatory type investigation, it was proceeded to send to a group of experts, matrices of analytical hierarchies considering the variables: surface geology, geomorphology, average slope of the area and use conflict (formed by the confluence of current and potential use). The results highlight that geology scored the highest relative weight (0.39); followed by the slope (0.29); geomorphology (0.23) and the use conflicts (0.06). This leads to the conclusion that: (a) It conceives more objectivity to the assignment of weight of variables without biasing the information to the area of knowledge of the expert consulted; (b) it allows each of the component units of the variables, competing against each other, leaving hierarchical with more objective criteria; (c) it helps minimize the maps algorithm. However, it presents disadvantages in certain variables, since not all units or criteria are possible to contrasting, therefore, units and the possibility of comparison should be clarified before developing the matrices.

Keywords: Multicriteria Evaluation, Matrice, Estimation, susceptibility, map.

INTRODUCCIÓN

La temática de riesgos por deslizamientos, con el énfasis de generar mapas a través de la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica ha sido abordado por numerosos investigadores como, por ejemplo, Lima y González (2000); González y Lima (2001); Gutiérrez, Castrillo y Hervoüet (s/f); Castro, Ojeda, Valencia y Fonseca (2001); Eustaquio (2004); Cartaya (2005); Cartaya, Méndez y Pacheco (2006), Marcano (2011) y Marcano y Cartaya (2013), entre otros. Numerosos aspectos comunes tienen estos trabajos, sin embargo, para la superposición de mapas y el desarrollo de la cartografía final, se valen de aplicación de métodos estadísticos y pesos ponderados diferentes para cada una de las variables.

Las diferencias entre ellos, están dadas por la aplicación de los pesos ponderados y la asignación de valores, a pesar que por juicio de expertos hay variables como la litología y la resistencia las que tienen mayor consideración.

Como se ha comentado, en la mayoría de los casos la selección de los pesos ponderados de las variables son por juicios de expertos o por índices predeterminados por la naturaleza de la variable (Método Mora- Vharson); por lo que en la presente investigación se pretende analizar la teoría compensatoria aditiva o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) de Saaty (1990; 2008) del método de las jerarquías analíticas (MJA) de la evaluación multicriterios (EMC), como mecanismo de ponderación de variables, para la construcción de mapas de susceptibilidad a movimientos en masa, con la finalidad de otorgar mayor objetividad al tratamiento de las variables y seguir metodologías empleadas por Gómez y Barredo (2005), Abarca y Quiroz (2005), y Roa (2007).

METODOLOGÍA EMPLEADA

Se sirve de una matriz de doble entrada, donde filas y columnas coinciden en un cuadrante, y al ser comparados por cada par, se les asigna un valor relativo a la variable que se aborda. Esta teoría de medida por parejas de comparaciones que confía en los juicios de expertos para obtener valores prioritarios. Se mide en términos relativos y las comparaciones son hechas usando una escala de los juicios absolutos que representa, cuanto más, un elemento domina el otro en lo que concierne a un atributo dado. La metodología puede, según Saaty (1990; 2008), mejorar los juicios para obtener la mejor consistencia (cuadro 1).

Cuadro 1.
Modelo de Matriz de Jerarquías Analíticas para la ponderación de variables
intervinientes en la génesis de procesos de remoción en masa

(x) \ (j)	Geología	Pendiente del terreno	Geomorfología	Conflictos de usos	$\sum x_j$	$\sum x_j/n$	Peso relativo $\frac{\sum(\sum x_j/n)}{\sum x_j/n}$
Geología	1						
Pendiente del terreno		1					
Geomorfología			1				
Conflictos de usos				1			
					$\sum x_j =$		

A fin de aplicar la técnica, se considerará como área de estudio “tipo” las cuencas comprendidas entre Camurí Chico y Punta Tigrillo, estado Vargas-Venezuela y las cuatro variables comúnmente empleada por los investigadores para la generación de mapas de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa, a saber: geología de superficie, geomorfología, pendiente media del terreno y conflicto de uso.

Para obtener los datos, se procedió a enviar vía correo electrónico, a un grupo de sesenta y siete expertos en las áreas de geografía física, geología, ciencias de la tierra, biogeografía, geomorfología, educación ambiental, entre otros, de diversas instituciones nacionales e internacionales, las matrices de jerarquías analíticas por cada una de las variables; se recibieron veinte matrices resueltas. Estos datos obtenidos se procesaron estadísticamente para generar las matrices de jerarquización de cada una de las variables del estudio, de acuerdo a los criterios de valoración (cuadro 2).

Así mismo, se construyó la tabla de estadísticos del peso de cada unidad en la susceptibilidad a deslizamientos, para determinar sus grados respectivos (cuadro 3).

Con los resultados obtenidos en la ponderación de la variable, se procedió a calcular los estadísticos para lograr los mapas de susceptibilidad específica ponderada, a partir de la definición de los rangos (cuadro 4).

Cuadro 2.

Escala de valoración para estimar el coeficiente a asignarle a cada una de las variables consideradas en la matriz de jerarquías analíticas de acuerdo a Roa (2007)

Importancia	Definición	Descripción
1	Igual Preferencia	Los dos criterios (x, j) contribuyen de igual manera a los procesos de remoción en masa
2	Moderada Preferencia	Pasadas experiencias favorecen ligeramente al criterio (x) sobre el (j)
3	Fuerte Preferencia	Prácticamente la dominancia del criterio (x) sobre el (j) está demostrada
4	Absoluta Preferencia	Existe evidencia que determina la supremacía del criterio (x)

Cuadro 3.

Modelo estadístico del peso de cada unidad en la susceptibilidad a deslizamientos

Código	Unidad	Sup. Unidad (Km ²)	Sup. Deslizada (Km ²)	Peso Unidad %	Ponderación variable	Grado Susceptibilidad

Cuadro 4.

Modelo de categorías de susceptibilidad a los deslizamientos para mapas de susceptibilidad específica ponderada y final

Valor	Rango	Categoría de Susceptibilidad	Color
1		Muy bajo	Azul
2		Bajo	Verde
3		Medio	Amarillo
4		Alto	Naranja
5		Muy alto	Rojo

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Geología de superficie. En el caso de la variable geología de superficie, las siete (7) unidades que conforman a la variable fueron sometidas por pares entre ella misma y posteriormente, entre cada una de las variables seleccionadas para el ensayo metodológico. A continuación se presenta la matriz conformada para la variable geología de superficie (cuadro 5), la cual dio paso al cálculo estadístico del peso ponderado para estas unidades, estableciéndose rangos, los cuales se escogieron en función del análisis estadístico de la totalidad de los datos de las variables. Luego estos rasgos se conformaron estadísticamente y ratificados por juicio de expertos, finalizando el procedimiento asignándoles colores a cada grado de susceptibilidad, en este caso azul, verde, amarillo, naranja y rojo, para poderlos percibir claramente en la cartografía generada.

Como se puede observar en estos cuadros, la unidad con mayor peso es el Augengneis de Peña de Mora con 9,01% y un grado de susceptibilidad de 5. Otras unidades poseen también este grado de susceptibilidad, como son: los Esquistos de Tacagua (3,28%), la Asociación Metamórfica del Ávila (2,9%) y los Aluviones (0,48%). Es importante destacar, que a pesar de las diferencias entre estas unidades y los pesos relativos que obtuvieron en la matriz (cuadros 5 y 6) son reclasificadas con el mismo grado de susceptibilidad, ya que al ajustar los rangos para categorizar en los cinco (05) grados de susceptibilidad (cuadro 7) sus pesos son iguales o superiores a 0,14, por lo que se agrupan en la misma categoría.

Por su parte, el Complejo San Julián (2,9%) obtuvo el grado 4, el Metagranito de Naiguatá (0,26%) grado 2 y la Meta-Ígnea de Tócome (sin peso) fue ponderada con grado de susceptibilidad 1 (figura 1).

Cuadro 5.
Matriz de geología de superficie

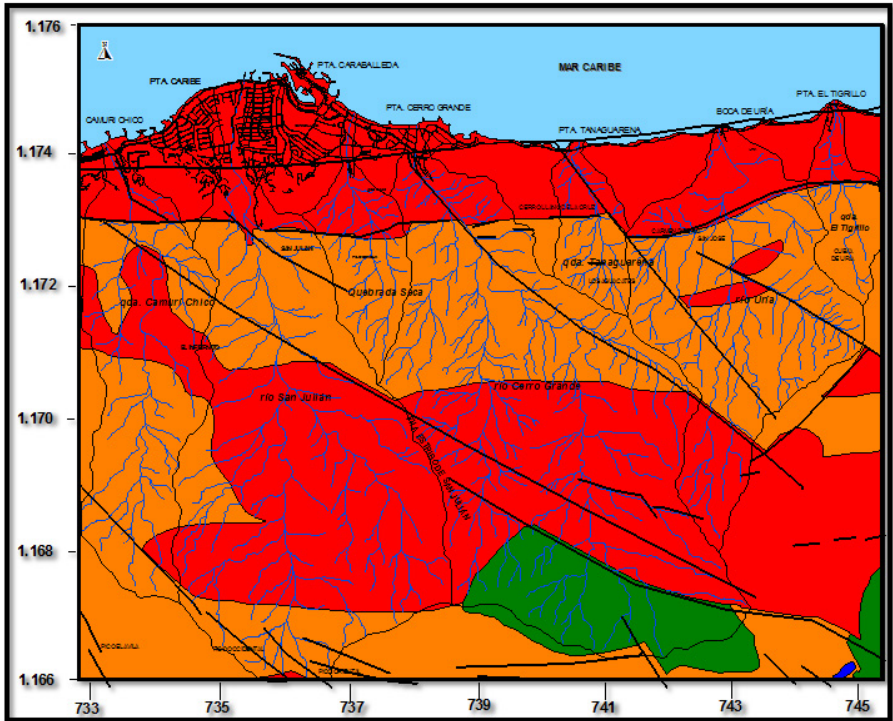
(x) \ (j)	Aluvión Cuaternario	Esquistos de Tacagua	Augengneis Peña Mora	Asoc. Metamórfica del Ávila	Complejo San Julián	Metagrano de Naiguatá	MetaÍgneas de Tócome	Σx_j	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo
Aluvión Cuaternario	1	3	3	3	3	3	2	18	2,57	0,23
Esquistos de Tacagua	0,33	1	4	4	3	3	2	17	2,42	0,22
Augengneis Peña de Mora	0,33	0,25	1	4	4	3	2	14,58	2,06	0,19
Asoc. Metamórfica del Ávila	0,33	0,25	0,25	1	4	3	2	10,83	1,54	0,14
Complejo San Julián	0,33	0,33	0,25	0,25	1	3	2	7,16	1,02	0,10
Metagrano de Naiguatá	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1	2	4,65	0,66	0,07
Meta-Ígneas de Tócome	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	3,83	0,54	0,05
$\Sigma(\Sigma x_j/n) = 10,81$									1,00	

Cuadro 6.
Estadístico del peso de las unidades de geología de superficie en la susceptibilidad a movimientos en masas

Código	Unidad	Sup. Unidad (Km ²)	Sup. Deslizada (Km ²)	Peso Unidad %	Ponderación	Grado de Susceptibilidad
1	Aluvión Cuaternario	6,23	0,03	0,48	0,23	5
2	Esquistos de Tacagua	12,79	0,42	3,28	0,22	5
3	Augengneis Peña de Mora	10,21	0,92	9,01	0,19	5
4	Asoc. Metamórfica del Ávila	25,92	2,9	11,2	0,14	5
5	Complejo San Julián	51,54	2,9	5,63	0,10	4
6	Metagrano de Naiguatá	6,34	0,26	4,1	0,07	2
7	Meta Ígnea de Tócome	0,11	0	0	0,05	1
Total		113,14	7,53	33,7	1,00	

Estimación de pesos ponderados de variables para generar mapas de susceptibilidad a movimientos en masa a través de la Evaluación Espacial Multicriterios

Figura 1.
Mapa de susceptibilidad específica ponderada de la variable geología de superficie



MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD ESPECÍFICA PONDERADA: GEOLOGÍA DE SUPERFICIE

UNIDAD	PESO VARIABLE	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD
Aluvión Cuaternario	0,23	MUY ALTO (5)
Esquistos de Tacagua	0,22	MUY ALTO (5)
Augengneis Peña de Mora	0,19	MUY ALTO (5)
Asoc. Metamórfica del Ávila	0,14	MUY ALTO (5)
Complejo San Julián	0,10	ALTO (4)
Metagranito de Naiguatá	0,07	BAJO (2)
Meta Ígnea de Tócome	0,05	MUY BAJO (1)

SIGNOS CONVENCIONALES

- Río permanente
- Río intermitente
- Línea "ganada al mar"
- Curva de nivel
- Línea de estado
- Camino pavimentado
- Camino no pavimentado
- Cambio de tierra
- Puente
- Túnel

SITUACIÓN RELATIVA NACIONAL Y REGIONAL E ÍNDICE DE HOJAS

Escala: 1:50,000

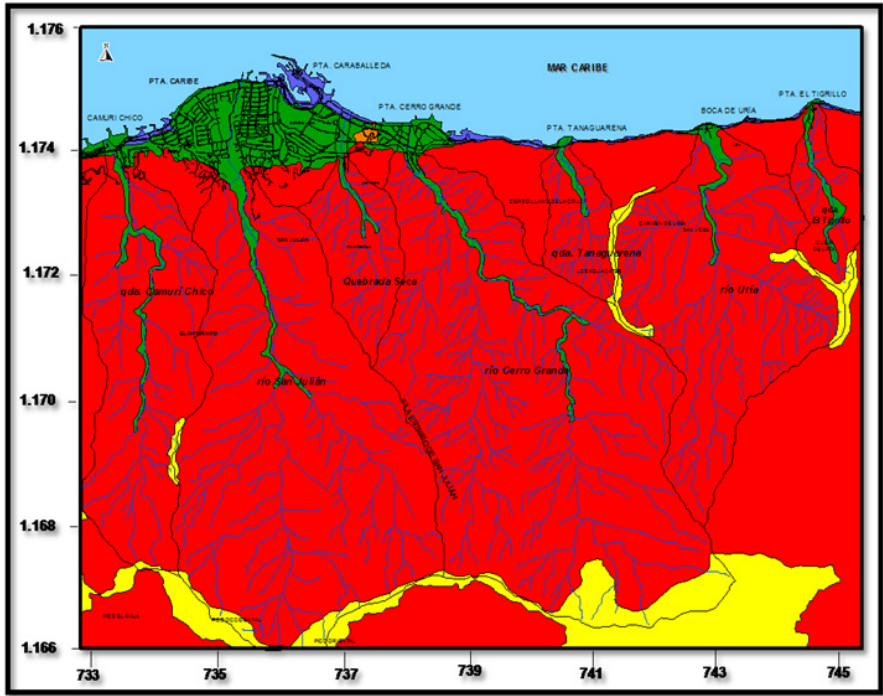
Arismar Marciano • Scarlet Cartaya • Henry Pacheco • Williams Méndez

Cuadro 7.**Categorías de susceptibilidad a los deslizamientos para mapas de susceptibilidad específica ponderada de Geología de superficie**

Valor	Rango	Categoría de Susceptibilidad	Color
1	$\leq 0,05$	Muy bajo	Azul
2	0,06-0,07	Bajo	Verde
3	0,08-0,9	Medio	Amarillo
4	0,10- 0,13	Alto	Naranja
5	$\geq 0,14$	Muy alto	Rojo

Geomorfología. El procedimiento anterior se repite para todas las variables. En este caso en particular, el número de unidades son ocho, y se puede observar que la unidad con más peso es la Ladera Estructural poco disectada con 8,03% con categoría de susceptibilidad 5, junto con la ladera rocosa con valles en V (4,44%). Las colinas bajas no poseen peso pero obtuvo un grado 4. Las cumbres colinadas con evidencia de paleomodelado (2,09%) continua con grado 3; los lechos de crecidas (0,85%) y conos antiguos (0,33%) son de grado 2; finalizando con grado de susceptibilidad 1 a la playa y cordón Arenogravoso y el cordón y banco de playa sin pesos (cuadros 8, 9, 10) (figura 2).

Figura 2.
Mapa de susceptibilidad específica ponderada de la variable geomorfología



**MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD ESPECÍFICA
 PONDERADA: GEOMORFOLOGÍA**

UNIDADES	PESO VARIABLE	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD
Ladera estructural poco disectada	0,22	MUY ALTA (5)
Laderas rocosas de valle en V	0,20	MUY ALTA (5)
Colinas bajas	0,16	ALTA (4)
Cumbre colinada con evidencia paleomodelado	0,12	MEDIA (3)
Conos de deyección antiguos	0,10	BAJA (2)
Lechos de crecidas con agradación de bloques y lodo	0,11	BAJA (2)
Playa y Cordón Arenogravoso	0,05	MUY BAJA (1)
Cordón y Banco de Playa	0,04	MUY BAJA (1)

SIGNOS CONVENCIONALES

- Río permanente
- Quebrada intermitente
- Tomas "gemelas al mar"
- Cunha de nivel marítimo
- Límite de estado
- Calletera pavimentada
- Calletera no pavimentada
- Calletera de tierra
- Puente
- Túnel

SITUACION RELATIVA NACIONAL Y REGIONAL E INDICE DE HOJAS

Arismar Marciano • Scarlet Cartaya • Henry Pacheco • Williams Méndez

Cuadro 8.
Matriz de geomorfología

(x) \ (j)	Ladera estructural poco disectada	Laderas rocosas de valle en V	Colinas bajas	Cumbre colinada con evidencia paleomodelado	Conos de deyección antiguos	Lechos de crecidas con agradación de bloques y lodo	Playa y Cordón Arenogravoso	Cordón y Banco de Playa	Σx_j	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo $\Sigma(\Sigma x_j/n)/\Sigma x_j/n$
Ladera estructural poco disectada	1	4	3	3	3	3	2	2	21	2,62	0,22
Laderas rocosas de valle V	0,25	1	4	4	3	3	2	2	19,25	2,40	0,20
Colinas bajas	0,25	0,25	1	4	3	3	2	2	15,5	1,93	0,16
Cumbre colinada con evidencia paleomodelado de erosión	0,33	0,25	0,25	1	3	3	2	2	10,83	1,35	0,12
Conos de deyección antiguos	0,33	0,33	0,33	0,33	1	4	2	2	10,32	1,29	0,10
Lechos de crecidas con agradación de bloques y lodo	0,33	0,33	0,33	0,33	0,25	1	4	4	10,57	1,32	0,11
Playa y Cordón Arenogravoso	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	1	2	5,75	0,71	0,05
Cordón y Banco de Playa	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,5	1	4,25	0,53	0,04
									$\Sigma(\Sigma x_j/n)=$	12,15	1,00

Estimación de pesos ponderados de variables para generar mapas de susceptibilidad a movimientos en masa a través de la Evaluación Espacial Multicriterios

Cuadro 9.

Cálculo estadístico del peso o sus susceptibilidades de las unidades geomorfológicas a los fenómenos de remoción en masa.

Código	Unidad	Sup. Unidad (Km ²)	Sup. Deslizada (Km ²)	Peso Unidad %	Ponderación	Grado de Susceptibilidad
1	Ladera estructural poco disectada	84,32	6,77	8,03	0,22	5
2	Laderas rocosas de valle V	11,71	0,52	4,44	0,20	5
3	Colinas bajas	0,077	0	0	0,16	4
4	Cumbre colinada con evidencia paleomodelado de erosión	9,59	0,2	2,09	0,12	3
5	Conos de deyección antiguos	0,6	0,002	0,33	0,10	2
6	Lechos de crecidas con agradación de bloques y lodo	5,903	0,05	0,85	0,11	2
7	Playa y Cordón Arenogravoso	0,49	0	0	0,05	1
8	Cordón y Banco de Playa	0,45	0	0	0,04	1
Total		113,14	7,54	15,7		

Cuadro 10.

Categorías de susceptibilidad a los deslizamientos para mapas de susceptibilidad específica ponderada de geomorfología

Valor	Rango	Categoría de Susceptibilidad	Color
1	≤0,05	Muy bajo	Azul
2	0,06- 0,11	Bajo	Verde
3	0,12-0,15	Medio	Amarillo
4	0,16-0,19	Alto	Naranja
5	≥0,20	Muy alto	Rojo

Pendiente media del terreno. Para calcular la pendiente media del terreno en el área de estudio y así hacer más objetiva la conformación de las clases, se empleó el método de análisis de distribución de pendiente. Este consiste en la realización de transeptos del área a igual posición altitudinal, considerando la cuenca alta, media alta, media y baja. De allí, se conformó la distribución de transectos de sur a norte de las cuencas, numeradas consecutivamente de uno (1) en la cuenca alta, y cinco (5) en las desembocaduras de las cuencas hacia el Mar Caribe.

Estos transeptos permitieron la generación con el SIG, de perfiles transversales, determinación de valores promedios de pendiente por cada uno y el análisis estadístico, para determinar los rangos de pendiente media del terreno que caracterizan el área de estudio.

Considerando los datos estadísticamente obtenidos, se calcularon las clases para estructurar definitivamente los rangos del mapa índice de la variable pendiente, que posteriormente se procedió a ponderar a través de la MJA

Como se aprecia en los cuadros las unidades con mayores pesos está conformada por los rangos de pendiente más abruptas, siendo mayor a 42° (7,98%) y 35°- 42° (7,65%) ambos con grado de susceptibilidad 5. Así mismo, el rango de 28-35 (6,96%), el de 21-28 (6,45%) y de 14-21(5,57%) son categorizados con grado 4. Sin haber datos

Cuadro 11.
Matriz de pendiente media del terreno

(x) \ (j)	≥42	35-42	28-35	21-28	14-21	7-14	≤ 7	Σxj	Σxj/n	Peso relativo
≥42	1	4	4	2	2	3	3	19,00	2,71	0,22
35-42	0,25	1	4	4	2	3	2	16,25	2,32	0,19
28-35	0,25	0,25	1	4	4	3	2	14,50	2,07	0,17
21-28	0,50	0,25	0,25	1	4	4	3	13,00	1,86	0,16
14-21	0,50	0,50	0,25	0,25	1	4	4	10,50	1,50	0,14
7-14	0,33	0,33	0,33	0,25	0,25	1	4	6,49	0,93	0,08
≤ 7	0,33	0,50	0,05	0,33	0,25	0,25	1	3,16	0,45	0,04
								Σ(Σxj/n)=	11,84	1,00

Cuadro 12.

Estadístico del peso de los valores de pendientes en la susceptibilidad a los fenómenos de remoción en masa

Código	Unidad	Sup. Unidad (Km ²)	Sup. Deslizada (Km ²)	Peso Unidad %	Ponderación de la Variable	Grado de Susceptibilidad
1	≤ 7	4,35	0,07	1,61	0,04	1
2	7-14	4,04	0,12	2,97	0,08	2
3	14-21	11,13	0,62	5,57	0,14	4
4	21-28	23,25	1,5	6,45	0,16	4
5	28-35	33,04	2,3	6,96	0,17	4
6	35-42	24,17	1,85	7,65	0,19	5
7	42 ≥	13,16	1,05	7,98	0,22	5
Total		113,14	7,51	39,2		

Cuadro 13.

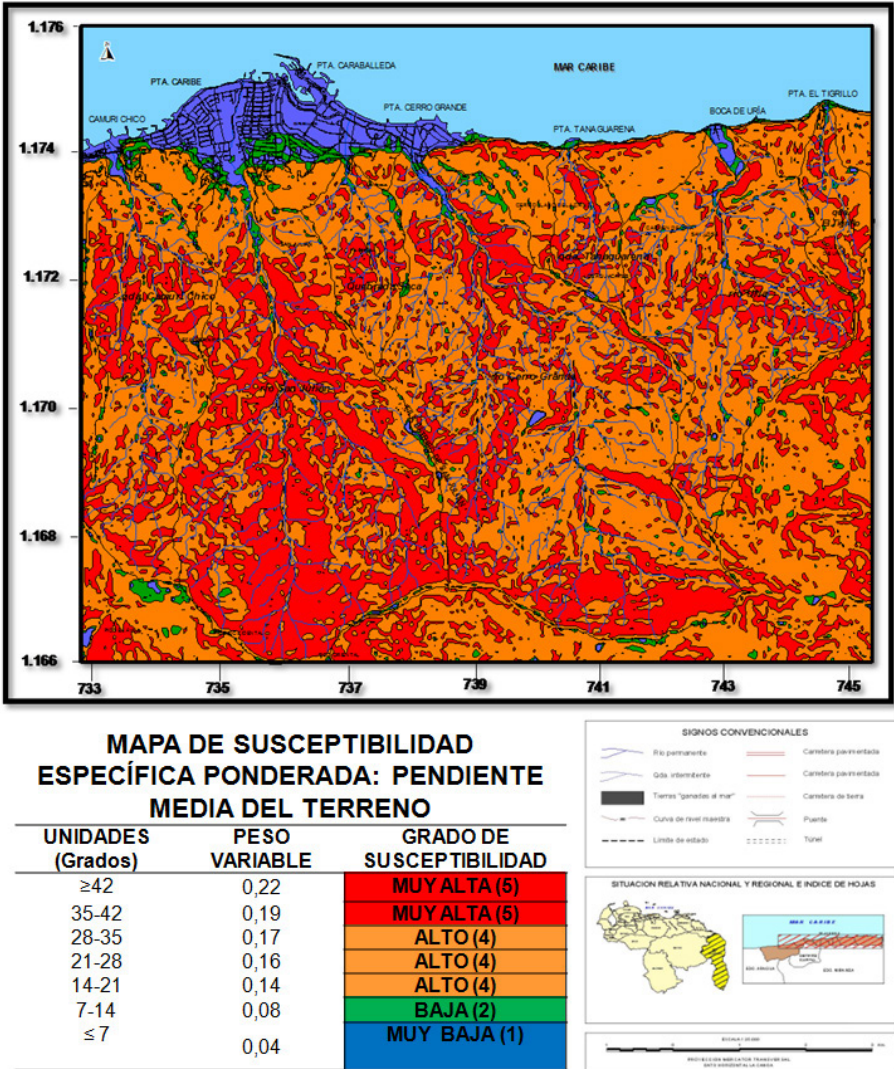
Categorías de susceptibilidad a los deslizamientos para mapas de susceptibilidad específica ponderada de Pendiente media del terreno

Valor	Rango	Categoría de Susceptibilidad	Color
1	≤ 0,05	Muy bajo	Azul
2	0,06-0,09	Bajo	Verde
3	0,10- 0,13	Medio	Amarillo
4	0,14- 0,17	Alto	Naranja
5	≥0,18	Muy alto	Rojo

para el grado de susceptibilidad 3, de 7-14 con 2,97% del peso de la unidad, obtiene el grado 2. Por último, con la pendiente de menor inclinación, inferior a 7°, con 1,61% en grado de susceptibilidad 1 (figura 3).

Conflicto de Uso. Esta variable, se maneja en esta investigación como indicador del

Figura 3.
Mapa de susceptibilidad específica ponderada de la variable pendiente media del terreno



Estimación de pesos ponderados de variables para generar mapas de susceptibilidad a movimientos en masa a través de la Evaluación Espacial Multicriterios

efecto de la actividad antrópica sobre los suelos.

El procedimiento para su obtención, requiere de actividades previas debido a que el conflicto de uso surge a partir de una operación geométrica al cruzar el uso actual de la tierra y el uso potencial.

Considerando la necesidad de este cruce, se procedió a construir una matriz para cada una de las sub-unidades. En el primer caso, el uso actual, posterior se le realiza su tratamiento estadístico conformando los rangos que darían los grados de susceptibilidad a estas unidades (cuadros 14,15). Como lo indican los pesos relativos para esta sub-variable, los contrastes son importantes ya que todos los vinculados con infraestructuras y asentamiento humano coincidieron con el grado de susceptibilidad 4. En el otro caso, las dos unidades referidas a Áreas Bajo Régimen de Administración Especial (ABRAE) en la figura del Parque Nacional El Ávila (PNA) y otras áreas verdes no protegidas, obtienen el grado de susceptibilidad 1. Sólo existen esos dos (2) valores.

En cuanto a la otra sub-unidad, el uso potencial, se hizo una operación similar, expresado en los cuadros 16 y 17, donde se generan los rangos de susceptibilidad siguientes: PNA con grado 1, las unidades con tendencia a la recuperación y protección de cauces y borde costero con grado 2 y los vinculados al establecimiento urbano, con grado de susceptibilidad 4. Estos valores fueron empleados para superponer las capas y obtener el mapa de conflicto de uso. Al reajustarse los rangos y asignarle los colores de acuerdo a su grado de susceptibilidad (azul, verde, amarillo, naranja y rojo respectivamente) se desarrolló el estadístico del peso de las unidades de la variable conflicto de uso (cuadro 18).

Para este nuevo mapa (figura 4) la unidad con mayor peso es conflictos muy bajos con 7,14% coincidente con el PNA por lo que su grado de susceptibilidad es 1. En contraste, la segunda unidad con mayor peso (2,95%) es conflictos muy altos asociados con los centros urbanos principalmente espontáneos, siendo flanqueado por conflictos altos (1,51%) con categoría 4, con desarrollos urbanos, recreacionales y otros. Finalmente, los conflictos medios (1,02%) y bajos (0,57%) obtienen grados 3 y 2 respectivamente.

Cuadro 14.

Matriz de uso actual

(x) \ (j)	DUR	DE	SA	Res	RI	Rec	AM	PNA	AVNP	Σx_j	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo
DUR	1	1	3	1	1	1	1	4	4	17	1,88	0,15
DE	1	1	3	1	1	1	1	4	4	17	1,88	0,15
SA	0,33	0,33	1	2	2	2	1	4	3	15,66	1,74	0,13
Res	1	1	0,5	1	1	1	1	4	3	13,5	1,5	0,12
RI	1	1	0,5	1	1	1	1	4	3	13,5	1,5	0,12
Rec	1	1	0,5	1	1	1	1	4	3	13,5	1,5	0,12
AM	1	1	1	1	1	1	1	4	3	14	1,55	0,12
PNA	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1	1	3,75	0,41	0,03
AVNP	0,25	0,25	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1	1	4,15	0,46	0,03
$\Sigma(\Sigma x_j/n)=12,45$												1,00

Nota. Desarrollo Urbano y Recreacional (DUR), Desarrollo Espontáneo (DE), Sector Agrícola (SA), Residencial (Res), Residencial Informal (RI), Recreativo (Rec), Área Militar (AM), Parque Nacional El Ávila (PNA), Área verde no protegida (AVNP)

Cuadro 15.

Categorías para definir los pesos de las variables para el mapa de uso actual

Valor	Rango	Categoría de Susceptibilidad
1	$\leq 0,03$	Muy bajo
2	0,04-0,07	Bajo
3	0,08-0,11	Medio
4	0,12-0,15	Alto
5	$0,16 \geq$	Muy alto

Cuadro 16.

Matriz de uso potencial

(x) \ (j)	UU	RPC	DBCI	PNA	Σx_j	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo
UU	1	2	2	4	9,0	2,25	0,43
RPC	0,5	1	1	3	5,5	1,375	0,26
DBCI	0,5	1	1	1	3,5	0,875	0,17
PNA	0,25	0,33	1	1	2,58	0,645	0,12
$\Sigma(\Sigma x_j/n)=$						5,145	1,00

Basado en los usos potenciales de la Autoridad Única para el estado Vargas (2005) Nota. Uso Urbano (UU), Recuperación y Protección de Cauces para uso recreacional y agrícola (RPC), Desarrollo del borde costero urbano (DBCU), Parque Nacional El Ávila (PNA).

Cuadro 17.
Categorías para definir los pesos de las variables para el mapa de uso potencial

Valor	Rango	Categoría de Susceptibilidad
1	$\leq 0,12$	Muy bajo
2	0,13-0,26	Bajo
3	0,27- 0,40	Medio
4	0,41- 0,54	Alto
5	$0,55 \geq$	Muy alto

Cuadro 18.

Cálculo estadístico de la susceptibilidad de las unidades de conflicto de uso a los fenómenos de remoción en masa

Código	Unidad	Sup. Unidad (Km ²)	Sup. Deslizada (Km ²)	Peso Unidad %	Grado de Susceptibilidad	Color
1	Muy Bajo	102,7	7,34	7,14	1	Azul
2	Bajo	1,749	0,01	0,57	2	Verde
3	Medio	1,956	0,02	1,02	3	Amarillo
4	Alto	3,979	0,06	1,51	4	Naranja
5	Muy Alto	2,756	0,08	2,9	5	Rojo
Total		113,14	7,51	13,1		

Estos procedimientos realizados ponderaron las variables importantes para cruzar los cuatro mapas y así generar el mapa de susceptibilidad final.

En el cuadro 19, presenta la MJA de las variables entre sí, aportando los pesos relativos para la aplicación del algoritmo de mapa que se requiere emplear para obtener el mapa de susceptibilidad, el cual se elaboró mediante el análisis multivariado de los cuatro mapas de susceptibilidad específica ponderada obtenidos en los procedimientos anteriormente descritos. El algoritmo empleado parte de la modificación del modelo propuesto por Sánchez, Urrego, Mayorga, Vargas (2002), a saber:

$$SF = \frac{SGs(pp)+SGm(pp)+SPn(pp)+Scu(pp)}{Ntv}$$

Donde:

- SF Susceptibilidad final
- SGs Susceptibilidad de la variable geología de superficie ponderada
- SGm Susceptibilidad de la variable geomorfología ponderada
- SPn Susceptibilidad de la variable pendiente media del terreno

- ponderada
- SCu Susceptibilidad de la variable conflictos de uso ponderada
- pp Peso ponderado de la variable obtenido del MJA
- Ntv Número total de variables

Cuadro 19.
Matriz de Jerarquías Analíticas para la ponderación de susceptibilidad, de las variables intervinientes en la génesis de procesos de remoción en masa

(x) \ (j)	Geología	Pendiente del terreno	Geomorfología	Conflictos de usos	Σx_j	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo
Geología	1	2	3	4	10	2,50	0,39
Pendiente media del terreno	0,50	1	2	4	7,5	1,87	0,29
Geomorfología	0,33	0,50	1	4	5,83	1,45	0,23
Conflictos de usos	0,25	0,25	0,25	1	1,75	0,43	0,06
$\Sigma(\Sigma x_j/n)=$						6,27	1,00

La geología de superficie obtiene el mayor peso relativo con 0,39, coherentemente fue por considerable diferencia, la variable de mayor peso por los investigadores, acorde a los sustentos teóricos que refieren su importancia en los procesos de remoción en masa al considerar la litología y los productos obtenidos debido a la exposición de los agentes de intemperismo, la tectónica y su influencia en el comportamiento de la roca, significando esto, la resistencia y modo de desplazamiento producto de las fracturas existentes. Su comportamiento geotectónico o los aspectos principales del perfil del suelo que confieren su estabilidad (textura, porosidad, profundidad, drenaje, entre otros).

La variable siguiente, considerando el peso de 0,29, es la pendiente media del terreno. Al analizar los rangos de la pendiente media del terreno discutidos anteriormente, y al recordar que la variable en este sistema montañoso en promedio son superiores a los 20° (altos), es razonable que sea seleccionada en esta posición por los investigadores. Las pendientes abruptas junto a la gravedad son dos elementos

determinantes para producir energías que estimulan los movimientos de remoción en masa.

En cuanto a la geomorfología, ponderada con 0,23 es producto de la valoración de las formas cóncavas y convexas presentes en colinas y valles que abundan en el área, que al vincularse con las otras variables, justifican su condición en dicha proporción. Finalmente, los conflictos de uso con un contrastante 0,06, es la única variable socioambiental incluida, debido a que son las diversas acciones antrópicas las que podrían estar estimulando los procesos de remoción en masa, como las construcciones de infraestructuras (viviendas, vialidad, cortes de carreteras, y actividades agrícolas, por citar algunos) sin planificación urbana sustentable.

Paradójicamente recibe una ponderación prácticamente insignificante (en comparación con las otras variables) y esta situación podría estar referida a que, al superponer los deslizamientos y visitar los movimientos en esta área, surgen tanto en las partes bajas intervenidas por los seres humanos y en las partes altas del sistema orográfico, esta el Parque Nacional El Ávila.

CONCLUSIONES

La aplicación de la técnica compensatoria aditiva del método de las Jerarquías Analíticas (MJA) de la evaluación multicriterios (EMC), con la finalidad de asignar puntajes ponderados a las variables y sus unidades, permitió establecer algunas consideraciones puntuales, como: (a) genera mayor objetividad a la asignación de pesos a cada una de las variables, sin sesgar la información al área de conocimiento de los expertos consultados; (b) permite que cada una de las unidades que componen las variables, compitan entre sí, quedando también jerarquizadas o ponderadas con criterios más objetivos; (c) contribuye a minimizar el proceso de algoritmo de mapas, ya que no es necesario generar capas de susceptibilidad específicos y posteriormente, los de susceptibilidad específica ponderada. Es decir, a través de la obtención de los pesos de cada unidad, se obtienen los mapas específicos ponderados directamente.

Además, se puede referir que la asignación de ponderaciones es viable y satisfactoria. Este criterio se basó en la calibración del modelo obtenido a partir de la generación de una capa de movimientos en masa digitalizados a través del análisis visual a las imágenes Ikonos (2000), Landsat (2000), Spot 5 (2007), donde es posible calcular el área removida en cada unidad de las variables, empleando la herramienta SIG, para determinar tanto el área de la superficie removida como el área de cada unidad y variable, en kilómetros cuadrados (Km²).

Ciertamente, se reconoce que en la actualidad existe la posibilidad de considerar

aparte de las variables indicadas en este trabajo, una gran diversidad de índices al algoritmo de mapa para estimar con mayor certeza la susceptibilidad y la amenaza por procesos de remoción en masa, como los empleados por Pacheco (2012), a saber: inclinación y orientación de la pendiente, curvatura del terreno, índice topográfico de humedad, índice de la potencia del flujo superficial, índice de la capacidad de transporte de los sedimentos, riesgo de erosión potencial, índice de vegetación de diferencia normalizada, entre otros.

Lo importante a resaltar es que sean las variables específicas asumidas por los investigadores para cualquier estudio de esta naturaleza, se considere la mayor objetividad en la ponderación de las variables y las matrices de las jerarquías analíticas refieren una metodología factible para ello.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABARCA, O. y QUIROZ, J. (2005). Modelo cartográfico de riesgo de incendios en el Parque Nacional Henry Pittier. Estudio de caso: Vertiente sur, área colindante con la ciudad de Maracay. Maracay, Aragua: *Agronomía Tropical*, 55(1).
- CARTAYA, S. (2005). *Adaptación y aplicación de un modelo para el análisis espacial de la susceptibilidad a deslizamientos, empleando SIG, en la micro cuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, Estado Vargas-Venezuela*. Trabajo de ascenso no publicado. Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Instituto Pedagógico de Caracas, Caracas, Venezuela.
- CARTAYA, S, MÉNDEZ, W y PACHECO, H. (2006). Modelo de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa a través de un sistema de información geográfico. *Interciencia* 9(31) 638-646.
- CASTRO, E., VALENCIA, A., OJEDA, J., MUÑOZ, F., y FONSECA, S. (2001). *Evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa: Guía metodológica*. Santa Fé de Bogotá, Colombia: INGEOMINAS/Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca / Escuela Colombiana de Ingeniería
- EUSTAQUIO, C. (2004). *Aplicación de Sistemas de Información geográfica en la determinación de áreas vulnerables a riesgos naturales*. Lima, Perú: Instituto Nacional de Defensa Civil, Proyecto Sistema de Información Geográfica

(GEODECI).

- GÓMEZ, M. y BARREDO, J. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, España: Ra-Ma.
- GONZÁLEZ M., M. y LIMA DE M., Y. (2001). *Cartografía del riesgo a los deslizamientos en la zona central del principado de Asturias*. Documento en Línea. Disponible: <http://www.mappinginteractivo.com>
- GUTIÉRREZ, J., CASTRILLO, J.T. y HERVOUET, Y. (s/f). *Cartografía de riesgo naturales utilizando sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG). Alrededores de la ciudad de Valera*. Documento en Línea. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/jgutie/investigacion/EcosNordGlissement.htm>
- LIMA DE M., Y. y GONZÁLEZ, M. (2000). *Sistema de Información Geográfica (SIG) para generar mapas de riesgo a los deslizamientos* [Documento en DC]. En Seminario Internacional Los Aludes Torrenciales de Diciembre 1999 en Venezuela, Caracas. Disponible: Seminario Internacional Los Aludes Torrenciales de Diciembre 1999 en Venezuela, Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería 2000. Caracas: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de Fluidos.
- MARCANO, A. (2011). *Susceptibilidad a movimientos de remoción en masa*. Caso: Río San Julián, Estado Vargas-Venezuela. Madrid, España: EAE
- MARCANO, A. y CARTAYA, S. (2013). Zonificación de la amenaza por procesos de remoción en masa originados por las precipitaciones en las cuencas comprendidas entre Camurí Chico y Punta Tigrillo, estado Vargas, Venezuela. *Revista de Investigación* 80 (37) Septiembre-Diciembre 2013. Pp. 189-2014.
- PACHECO, H. (2012). *Zonificación de Amenaza por movimientos en masa en la vertiente norte del Macizo Ávila utilizando Tecnologías de la Información Geográfica*. Madrid, España: EAE
- ROA, J. G. 2007. Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes de satélites: Cuenca del río Mocoties, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 48(2), 183-219.
- SAATY, T. 1990. Multicriteria Decision Making - *The Analytic Hierarch Process*

(Volume I). N.Y. New York, USA: Mc Graw Hill.

SAATY, T. 2008. Decision making with the analytic hieracchy process. *Int. J.Services Scienses*, 1(1). 83-98.

SÁNCHEZ, URREGO, MAYORGA y VARGAS. (2002). Modelo para el pronóstico de la amenaza por los deslizamientos en tiempo real. Documento en Línea. En *Simposio Latinoamericano de Control de Erosión*. Disponible en: http://www.docentes.unal.edu.co/gvargasc/docs/PUBLICACIONES_RIESGOS/Modelo-pronosticoFRM.pdf

Arismar Marcano Montilla. Profesora en Geografía e Historia de la UPEL-IPC, Magister en Geografía, mención Geografía Física de la UPEL-IPC y Participante del Doctorado de Educación Ambiental, UPEL-IPC. Profesora Agregado a Dedicación Exclusiva de la UPEL- Instituto Pedagógico de Caracas, adscrita al Departamento de Ciencias de la Tierra en la Cátedra de Hidrometeorología e investigadora activa del Centro Investigación Estudios del Medio Físico Venezolano, en la línea de investigación Geografía de los Riesgos Naturales y Antrópicos. Acreditada por el Ministerio de Ciencia y Tecnología como miembro del Programa de Estimulo al Investigador e Innovador 2012-2014 (PEII-A) y 2014-2016 (PEII-A2).

Correo electrónico: arismarcano@gmail.com

Scarlet Cartaya Ríos. Profesora de Ciencias Sociales Mención Geografía (UPEL-IPC). Magister en Geografía Mención Geografía Física (UPEL-IPC). Doctora en Ciencias Sociales (UCV). Profesora Asociado a Dedicación Exclusiva adscrita a la Cátedra de Geografía Física del Departamento de Geografía e Historia (UPEL-IPC). Investigadora miembro del Centro de Investigación “Estudios del Medio Físico Venezolano” (CIEMEFIVE). Miembro activo en el PEII, Investigadora Tipo B. Tutora de Trabajos de Investigación de Pregrado y de Tesis de Postgrado. Jefa de la Cátedra de Geografía Física (UPEL-IPC). Autora y co-autora de artículos de investigación publicados en revistas especializadas. Becario participante en el Proyecto Prometeo de la República del Ecuador.

Correo electrónico: scarletcartaya@gmail.com

Henry Pacheco Gil. Profesor de Ciencias Naturales Mención Ciencias de la Tierra (UPEL-IPC). Magister en Geografía Mención Geografía Física (UPEL-IPC). Doctor en Ciencias de la Ingeniería (UCV). Profesor Asociado a Dedicación Exclusiva adscrito a la Cátedra de Geodesia del Departamento de Ciencias de la Tierra (UPEL-IPC). Investigador activo miembro del Centro de Investigación “Estudios del Medio Físico Venezolano” (CIEMEFIVE). Miembro activo en el PEII, Investigador Tipo C. Tutor de Trabajos de Investigación de Pregrado y de Tesis de Postgrado. Autor y co-autor de artículos de investigación publicados en revistas especializadas. Becario participante en el Proyecto Prometeo de la República del Ecuador.

Correo electrónico: henrypacheco@gmail.com

Williams Méndez Mata. Profesor de Ciencias Naturales Mención Ciencias de la Tierra (UPEL-IPC). Magister en Geografía Mención Geografía Física (UPEL-IPC). Doctor en Ciencias de la Ingeniería (UCV). Profesor Agregado a Dedicación Exclusiva adscrito a la Cátedra de Geología del Departamento de Ciencias de la Tierra (UPEL-IPC). Investigador activo miembro del Centro de Investigación “Estudios del Medio Físico Venezolano” (CIEMEFIVE). Miembro activo en el PEII, Investigador Tipo B. Tutor de Trabajos de Investigación de Pregrado y de Tesis de Postgrado. Autor y co-autor de artículos de investigación publicados en revistas especializadas. Coordinador del CIEMEFIVE. Miembro permanente de la Comisión de Asesoría Técnica del Área Geografía en la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales (ACFIMAN).

Correo electrónico: williamsmendez@gmail.com