

Comparación entre los métodos Mora-Vahrson y Lógica difusa en la susceptibilidad a movimientos de tierra en el cantón Morona-Amazonía ecuatoriana

Comparison between the Mora-Vahrson and Fuzzy Logic methods to landslides in the Morona canton-Ecuadorian Amazon

Iván Fernando Palacios Orejuela¹

Recibido 11 de septiembre de 2023; aceptado 15 de marzo de 2024

RESUMEN

Los deslizamientos representan aproximadamente el 17% del total de muertes provocadas por riesgos naturales a nivel mundial, y debido a los efectos del cambio climático, se pronostica que las pérdidas humanas y económicas no disminuirán. Existen varias metodologías para mapear la susceptibilidad a deslizamientos, entre las que se encuentran Mora-Vahrson y Lógica difusa. Ecuador es un país tropical que ha sufrido varios desastres naturales, el más reciente fue un deslizamiento sucedido en el cantón de Alausí donde murieron al menos 65 personas. Sin embargo, todavía persisten zonas poco estudiadas sobre este fenómeno, como la Amazonía ecuatoriana, en la que se toma al cantón Morona para el presente estudio. El objetivo principal fue generar un modelo de susceptibilidad a deslizamientos mediante Lógica difusa y Mora-Vahrson para determinar el método que mejor se ajuste a su realidad geográfica. Los modelos resultantes fueron clasificados en cinco niveles de riesgo, donde la validación mediante el coeficiente de contingencia corregido fue de 0.894 para Fuzzy frente al 0.866 de Mora-Vahrson, por lo que en este estudio el método probabilístico fue más preciso que el método semianalítico heurístico. El cotejamiento entre modelos determinó que varias parroquias presentaron mayor susceptibilidad, pero con el modelamiento probabilístico difuso se logró identificar más detalladamente el nivel de riesgo a equipamientos presente en el territorio. Esta ventaja puede deberse a la forma de trabajar con variables

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Dirección de Planificación, GAD Municipal del Cantón Morona, Macas, Ecuador, correo electrónico: ivan199632@hotmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3209-9810>

físicas continuas que son utilizadas en cada método y que inciden en la precisión de los resultados, por lo que para fines de gestión de riesgos y planificación es recomendable utilizar metodologías probabilísticas como Lógica difusa.

Palabras clave: *cambio climático, deslizamientos, Mora-Vahrson, Lógica difusa, modelamiento probabilístico.*

ABSTRACT

Landslides represent approximately 17% of total deaths caused by natural hazards worldwide, and due to the effects of climate change, it is forecasted that human and economic losses will not decrease. There are several methodologies for mapping landslide susceptibility, including Mora-Vahrson and Fuzzy Logic. Ecuador is a tropical country that has experienced several natural disasters, the most recent being a landslide in the Alausí canton where at least 65 people died. However, there are still poorly studied areas regarding this phenomenon, such as the Ecuadorian Amazon, where the Morona canton is chosen for the present study. The main objective was to generate a landslide susceptibility model using Fuzzy Logic and Mora-Vahrson to determine which method best fits its geographic reality. The resulting models were classified into five levels of risk, where validation using the corrected contingency coefficient was 0.894 for Fuzzy compared to 0.866 for Mora-Vahrson, making the probabilistic method more accurate than the heuristic semi-analytical method in this study. Model comparison determined that several parishes showed higher susceptibility, but with the fuzzy probabilistic modeling, the level of risk to facilities in the territory was more precisely identified. This advantage may be due to the way of working with continuous physical variables used in each method, which affect the accuracy of the results, so for risk management and planning purposes it is recommended to use probabilistic methodologies such as Fuzzy Logic.

Key words: *climate change, landslides, Mora-Vahrson, Fuzzy Logic, probabilistic modeling.*

1. Introducción

Durante las últimas décadas, la literatura científica sobre el mapeo de amenazas naturales ha tomado relevancia a nivel mundial. Los deslizamientos de tierra, son uno de los riesgos naturales que han causado mayores daños en zonas montañosas y tropicales (Aristizábal & Sánchez, 2020; Pourghasemi *et al.*, 2012). Según el Centro de Investigación sobre Epidemiología de Catástrofes (CRED por sus siglas en inglés), del total de muertes provocadas por riesgos naturales en el mundo, aproximadamente el 17% corresponden únicamente a deslizamientos (Petley, 2012). Esta cantidad se espera que incremente a futuro debido a la deforestación, malas prácticas agrícolas, los efectos del cambio climático el cual genera un aumento en la intensidad de lluvias incrementando la erosión del suelo, así como por el crecimiento no planificado de asentamientos humanos (Intergovernmental Panel on Climate Change —IPCC, 2018; Kanungo *et al.*, 2009; Ozturk *et al.*, 2022).

Los daños e impactos socioeconómicos que produce un deslizamiento han sido un desencadenante para profundizar la investigación debido a la importancia que radica el mapeo de la susceptibilidad a deslizamientos, al aumento sobre áreas antrópicas en zonas donde antes eran menos habitadas (Aleotti & Chowdhury, 1999), y en la pérdida del recurso suelo como materia prima de las actividades agroproductivas (Abdullah *et al.*, 2019; Pradhan *et al.*, 2012).

Solo en 2018, los desastres naturales afectaron a 68.5 millones de personas en todo el mundo, y generaron pérdidas por aproximadamente USD 132 mil millones (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters —CRED, 2019). En Ecuador, debido a su situación geodinámica, ubicación geográfica y características climáticas, ha sufrido a lo largo de su historia varios desastres naturales, entre los más recientes están el terremoto de 2016 que presentó un costo total de reconstrucción de USD 3.344 millones (Toulkeridis *et al.*, 2017; World Bank, 2021), así como el deslizamiento ocurrido en Alausí (provincia de Chimborazo) en marzo del 2023 donde fallecieron al menos 65 personas (SGR, 2023). Bajo esta premisa, los desastres de origen natural se han convertido en el tercer factor que pueden complicar la economía ecuatoriana en el 2023, según el Fondo Monetario Internacional (FMI). En base de lo mencionado, se fundamenta la significancia del estudio continuo y monitoreo de desastres naturales, como la susceptibilidad a deslizamientos, objeto de este trabajo.

El mapeo de la susceptibilidad a deslizamientos ha sido analizado desde distintos enfoques metodológicos, tales como frecuencia de ratio (Li *et al.*, 2022; Shano *et al.*, 2021), regresión lineal (Nanda *et al.*, 2021), Mora-Vahrson (Quesada & Boraschi, 2018), Lógica difusa (Palacios, 2020), por mencionar algunos. En los trabajos de López *et al.* (2020) y de Pedreros y Rivera (2020), proponen el uso de Mora - Vahrson para la zonificación de deslizamientos en países tropicales, como es el caso de Ecuador; además, según Palacios y Toulkeridis (2020), así como Salcedo *et al.*, (2017) la lógica difusa ha sido implementada en varios sitios del Ecuador con buenos resultados predictivos. Sin embargo, existen pocos estudios que han comparado estos métodos, centrando su análisis en áreas pequeñas de estudio y en la región central del país (Jaramillo *et al.*, 2018).

Por tanto, esta investigación considera a la región amazónica del Ecuador como zona de análisis, específicamente en el cantón Morona, con el objetivo de generar un modelo de susceptibilidad a deslizamientos mediante la aplicación y comparación de lógica difusa y Mora - Vahrson, de manera que permita determinar el método que mejor se ajuste a la realidad geográfica y sirva como insumo para la identificación de potenciales zonas de riesgo y la toma de decisiones.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El cantón Morona se ubica al suroriente de la región amazónica del Ecuador, siendo uno de los 12 cantones de la provincia de Morona Santiago. Posee una superficie de 4367.92 km² aproximadamente, la cual se extiende desde las estribaciones de la cordillera de los Andes al oeste hasta la planicie amazónica al este, abarcando una zona de transición entre la región Sierra y Oriente, esto ha generado un biotopo adecuado para el desarrollo de sus habitantes desde hace cientos de años atrás (Palacios, 2023a, 2023b). Gracias a su ubicación geográfica, presenta varias zonas naturales que están bajo conservación del Estado, entre las que se destaca el Parque Nacional Sangay, en el que se halla el estratovolcán del mismo nombre, el Bosque Kutukú-Shaimi, que en conjunto denotan la riqueza natural del área de estudio (Palacios & Rodríguez, 2021).

La ciudad de Macas es la capital cantonal y provincial, ubicada geográficamente a 2° 17' 54.94" de latitud sur y 78° 09' 59.03" de longitud oeste (Carrera *et al.*, 2021; Palacios & Arellano, 2022). Se conecta hacia el resto del país mediante la vía estatal E-45 hacia el norte-sur, y la vía E-46 hacia la parte central del Ecuador; de estos ejes viales, el último ha presentado históricamente problemas debido a movimientos de tierra que han generado reiterados cierres viales y pérdidas humanas (Palacios & Toulkeridis, 2020). Además, la ampliación de la frontera agrícola y el cambio de cobertura del suelo es una problemática en todo el cantón (Palacios & Arellano, 2021), lo cual propende un escenario poco alentador ante esta amenaza natural que podría afectar directa o indirectamente a sus 61479 habitantes (INEC, 2023). En la Figura 1 se muestra el área de estudio.

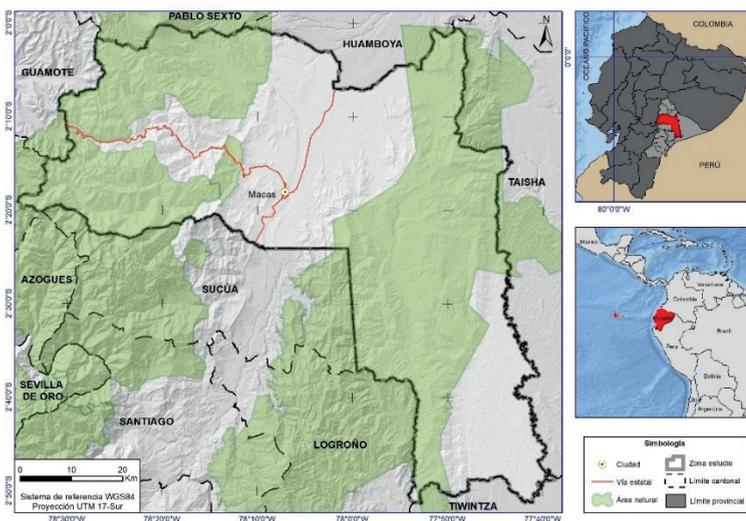


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio: cantón Morona-Ecuador.

2.2 Método Mora-Vahrson

El método Mora-Vahrson es un modelo de tipo explícito semianalítico y permite la caracterización del nivel de riesgo a deslizamientos en zonas tropicales sísmicamente activas (Mora & Vahrson, 1994). Considera la interacción de dos factores: condicionantes y desencadenantes para determinar la susceptibilidad a esta amenaza natural. Los factores condicionantes hacen referencia a elementos pasivos que aportan características subyacentes propias del lugar analizado (relieve relativo, humedad del suelo, litología); mientras que los factores desencadenantes son elementos de disparo que activan el fenómeno de movimiento de masas (sismicidad, precipitación) (Mora, 2004). Mora y Vahrson (1993) propusieron una modificación en el cálculo de estos factores, incorporando variables como un factor morfométrico y la cobertura del suelo (o indicadores morfodinámicos) para expresar el elemento pasivo de un deslizamiento. Esta modificación ha sido usada en el proyecto “Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25.000” llevado a cabo en el Ecuador, motivo por el que se utilizó dicha variante en el presente estudio. Matemáticamente, el método se expresa de la forma:

$$P = (F_m * F_{cv} * F_l) * (F_s + F_p) \quad (1)$$

Donde P es la susceptibilidad a deslizamientos, y F_m , F_{cv} , F_l , F_s , F_p corresponde a los factores morfométrico, cobertura vegetal, litológico, sísmico y precipitación respectivamente. F_m corresponde a las características geomorfológicas relacionadas con la pendiente del terreno (s) y la longitud de las vertientes (l_v), y se calcula mediante la ecuación (2):

$$F_m = 4 * s + l_v \quad (2)$$

Cada factor es parametrizado en categorías a las que se asigna una ponderación específica, de cuya combinación se obtiene un nivel relativo de . Los datos de litología y longitud de vertiente fueron obtenidos de la información oficial del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), mientras que la pendiente fue calculada a partir del modelo digital de elevaciones ALOS PALSAR, el cual representa mejor la topografía en la región amazónica (Palacios & Toulkeridis, 2022), y la cobertura vegetal fue generada del procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8 y Sentinel 2 del año 2022 a través de una clasificación supervisada (Cepeda *et al.*, 2018; Palacios *et al.*, 2021). En la Tabla 1 se muestra los pesos para cada variable, según los valores presentes en el área de estudio:

Tabla 1. Ponderación de factores condicionantes

<i>Factor</i>	<i>Parametrización</i>	<i>Peso</i>
F_m	Pendiente (%)	
	0-12	0
	12-40	1
	40-70	2
	>70	3
	Longitud de vertiente (m)	
	<15	1
	15-50	2
	50-250	3
	250-500	4
>500	5	
F_{cv}	Área poblada	
	Bosque nativo	
	Cuerpo de agua	1
	Infraestructura antrópica	
	Plantación forestal	
	Pastizal	
	Vegetación arbustiva	
	Vegetación herbácea	2
	Cultivo	
	Mosaico agropecuario	
F_i	Páramo	
	Erial	3
	Glaciar	
	Depósitos aluviales	
	Formaciones Arajuno, Macuma, Mera, Santiago, Tena	1
	Serie Zamora	
	Depósitos lahárticos, volcánicos	
	Formaciones Abanico, Chambira, Pumbuiza	2
	Rocas intrusivas y metamórficas	
	Volcánicos no diferenciados del volcán Sangay	
Depósitos coluviales, fluvio glaciares, fluvio lacustres, glaciares	3	
Formaciones Chalcana, Chapiza, Hollin, Napo, Tarqui, Tiyuyacu		

Fuente: adaptado de Mora & Vahrson (1993).

En cuanto a la sismicidad, se utilizaron datos del registro histórico de sismos (1901 al 2023) del Instituto Geofísico (IG) de la Escuela Politécnica Nacional (283 sismos), y se complementó con la base de datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (61 sismos); por otro lado, la información sobre la precipitación se obtuvo de la página oficial del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) con datos del registro histórico disponible entre 1981-2010. En la Tabla 2 se resumen la ponderación colocada, en función de los datos recopilados.

Tabla 2. Ponderación de factores desencadenantes

<i>Factor</i>	<i>Parametrización</i>	<i>Peso</i>
F_s (magnitud Richter)	3.9 - 4.5	0
	>4.5 - 5.5	1
	>5.5 - 6.0	2
	>6.0	3
F_p (media mensual anual en mm)	<20	0
	>20 - 50	1
	>50 - 70	2
	>70	3

Fuente: adaptado de (Mora & Vahrson, 1993).

2.3 Método Lógica difusa

La Lógica difusa o también conocida como Lógica Fuzzy, es una metodología que trata de emular el razonamiento humano, basado en la probabilidad de que un elemento pertenezca a la ocurrencia del fenómeno bajo estudio (Bahrami *et al.*, 2021). Fuzzy permite representar modelos matemáticos no lineales con la integración de condiciones definidas (Sur *et al.*, 2020). Las probabilidades del sistema se analizan mediante relaciones trigonométricas, denominadas función de membresía, que se asemejan a una distribución Gaussiana en se puede tener tres escenarios: el primero corresponde a la función senoidal en el rango $0-\pi$ radianes, el segundo se ajusta con la función cosenoidal con rango $0-\pi/2$ radianes, y el tercero que trabaja con la misma función que el primer escenario, pero en el rango $0-\pi/2$ (Palacios, 2020).

Acorde a la relación directa o inversa de la variable independiente con el fenómeno analizado (susceptibilidad a deslizamientos), corresponde una función de membresía, donde seno representa una incidencia directa y coseno una inversa (Palacios & Toulkeridis, 2020). Matemáticamente, las funciones de membresía se expresan de la forma:

$$\varphi_A(V_o) = \text{sen}(\pi/2 * N) \qquad 0 \leq \varphi_A(V_o) \leq 1 \qquad (3)$$

$$\varphi_A(V_o) = \text{sen}(\pi/2 * N) \qquad 0 \leq \varphi_A(V_o) \leq 1 \cdot \qquad (4)$$

Donde $\varphi_A (V_o)$ si es 1 o 0 representa la membresía total o nula de la variable independiente para el conjunto difuso, y si $0 < \varphi_A (V_o) < 1$ indica una pertenencia parcia al conjunto; es la variable normalizada mediante la función de membresía asignada. Para el modelamiento con Fuzzy, se consideraron siete variables, de las cuales la pendiente, precipitación y litología tienen una relación directa (tercer escenario) ya que a medida que se incrementa su valor, también aumenta la probabilidad de un deslizamiento; por otro lado, la distancia a ríos, vías, fallas geológicas, y cobertura vegetal presentan una relación inversa (segundo escenario) debido a que su incremento en valor significa una menor probabilidad de que ocurra un deslizamiento. Finalmente, al combinar todas las variables se deriva la probabilidad a un deslizamiento en una superficie, que viene dada por la ecuación (5), donde x_i son las variables independientes ingresadas en la función de membresía, n es el número de variables, y P_d corresponde a la susceptibilidad del deslizamiento.

$$P_d = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5)$$

2.3 Validación del modelo espacial

La etapa de validación de un modelo espacial es de fundamental importancia, ya que permite evidenciar la bondad de ajuste del mismo, es decir, la precisión en representar la realidad en el territorio del fenómeno analizado (en este caso la susceptibilidad a deslizamientos). Es necesario considerar que todo modelamiento espacial posee un error subyacente en su resultado (Palacios *et al.*, 2021), por lo que obtener un ajuste perfecto no es posible.

Para fines de la presente investigación se utilizó la información levantada en el programa Desinventar (Desinventar.org, 2020), en cuanto al registro de deslizamientos suscitados en el área de estudio, a partir de los cuales se construyó una matriz de contingencia para calcular el coeficiente de contingencia corregido que permita identificar estadísticamente el modelo con mayor correlación entre las zonas susceptibles a deslizamientos con la presencia de estos.

3. Análisis y discusión de resultados

En esta investigación se aplicaron dos metodologías para determinar la susceptibilidad a deslizamientos a una escala cantonal en el territorio de la región amazónica del Ecuador, como es el cantón Morona. El resultado del modelamiento espacial mediante Mora-Vahrson y Lógica Fuzzy se puede representar mediante niveles de susceptibilidad del fenómeno estudiando, en función a los valores obtenidos de las ecuaciones 1 y 5, respectivamente.

Según Mora-Vahrson (1994), la clasificación del riesgo potencial de un deslizamiento, se representa en seis niveles que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de niveles del riesgo potencial a deslizamientos con Mora-Vahrson

<i>Valor de P</i>	<i>Clase</i>	<i>Clasificación del riesgo potencial de un deslizamiento</i>
<6	I	Muy bajo
7-32	II	Bajo
33-162	III	Moderado
163-512	IV	Medio
513-1250	V	Alto
>1250	VI	Muy alto

Fuente: Mora-Vahrson (1994).

Conforme la clasificación del modelo Mora-Vahrson, en el área de estudio existen los cinco niveles iniciales de riesgo por deslizamiento, siendo la clase V (alto) el que mayor presencia en la superficie cantonal con el 24.93%, seguido en orden descendente por las clases II (bajo), IV (medio), I (muy bajo) y III (moderado) con el 22.16%, 21.91%, 21.89% y 9.11% respectivamente. En la Figura 2 se representa el modelamiento espacial mediante este método, en el que se observa que las zonas donde presentan mayor susceptibilidad a deslizamientos, están localizadas en las estribaciones de las cordilleras que atraviesan al cantón Morona, tanto al oriente (cordillera del Kutukú), y al occidente (estribaciones de la cordillera de los Andes).

Por otro lado, el modelamiento realizado con Fuzzy está expresado en valores de probabilidad, y para clasificar su nivel de riesgo potencial se utilizaron los rangos de valores de la función de membresía sugeridos por Ilanloo (2011), representados en cinco zonas de susceptibilidad a deslizamientos que se resumen en la Tabla 4:

Tabla 4. Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos sobre la base de funciones de membresía difusas

<i>Zona</i>	<i>Valor de función de membresía</i>	<i>Descripción</i>
I	<0.1	Muy baja susceptibilidad
II	0.1-0.4	Baja susceptibilidad
III	0.4-0.6	Media susceptibilidad
IV	0.6-0.75	Alta susceptibilidad
V	>0.75	Muy alta susceptibilidad

Fuente: Ilanloo (2011).

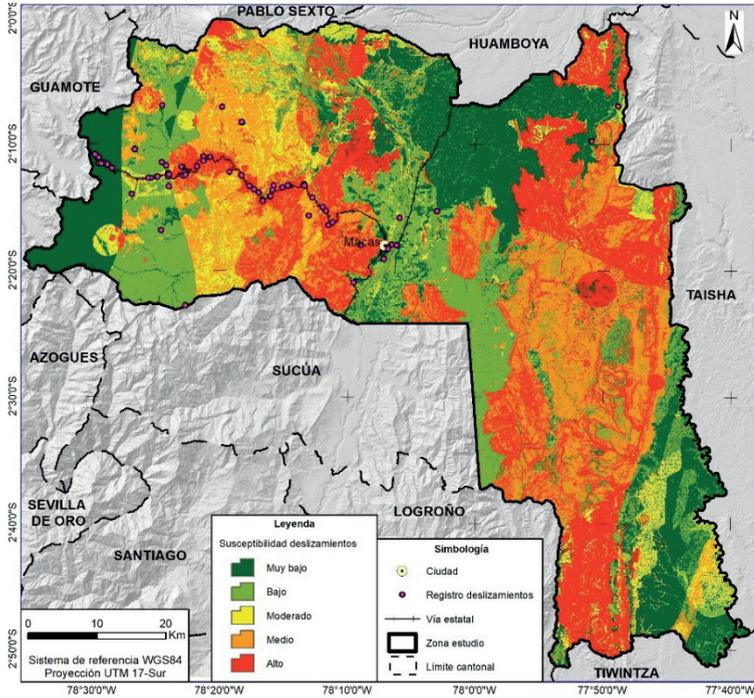


Figura 2. Modelo de susceptibilidad a deslizamientos con Mora-Vahrson.

Mediante Fuzzy, la distribución de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos tuvo un comportamiento más irregular, donde las zonas III y IV (media y alta susceptibilidad) presentaron la mayor proporción de superficie cantonal, con el 34.78% y 33.60% respectivamente, seguido por el 18.11% de la zona II (baja susceptibilidad), el 8.66% de la zona I (muy baja susceptibilidad) y el 4.85% de la zona V (muy alta susceptibilidad). Al igual que el modelo anterior, la ubicación de las áreas con mayor nivel de susceptibilidad a deslizamientos se concentran en los flancos de las cadenas montañosas, principalmente al occidente del cantón (estribaciones de los Andes), como se aprecia en la Figura 3.

Sobre la base del registro de deslizamientos ocurridos en el área de estudio que constan en la base de datos de Desinventar, misma que está articulada con el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE) del Ecuador, se identificaron el número de eventos ocurridos por nivel de susceptibilidad en cada modelo generado, cuyos resultados se resumen en la Tabla 5.

Acorde a la tabla anterior, se observa que en el modelo generado con Mora-Vahrson, el 68.81% de los deslizamientos ocurridos se encuentran en los niveles de medio y alto, aunque también registró un 24.77% de estos eventos en lugares que tuvieron una clasificación de riesgo potencial entre muy bajo y bajo. Por otro lado, con el modelo Fuzzy, se identificó que más del 80% de los deslizamientos registrados se encuentran en los niveles de alta y muy alta

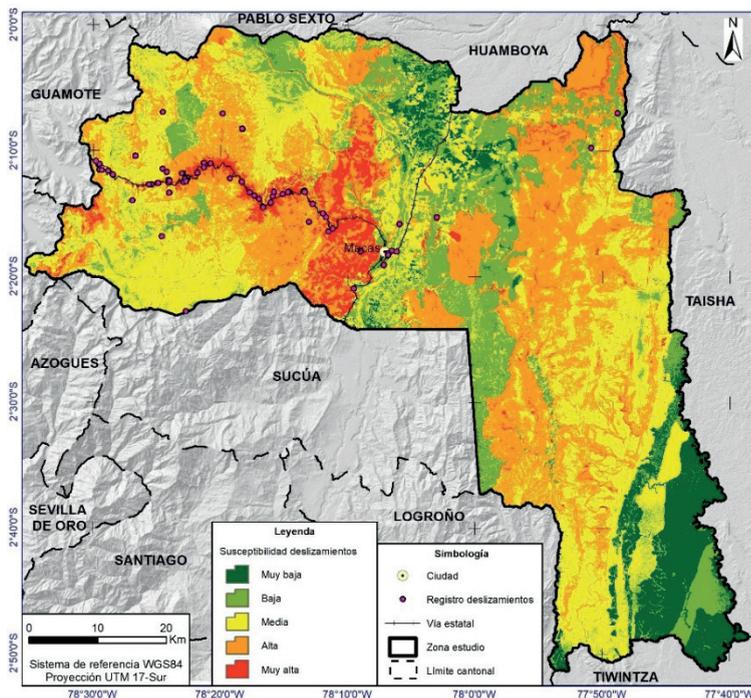


Figura 3. Modelo de susceptibilidad a deslizamientos con Lógica difusa.

Tabla 5. Deslizamientos ocurridos según el nivel de susceptibilidad en cada modelo

<i>Mora-Vahrson</i>					
	Muy bajo	Bajo	Moderado	Medio	Alto
Número de deslizamientos	11	16	7	36	39
%	10.09	14.68	6.42	33.03	35.78
<i>Lógica difusa</i>					
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Número de deslizamientos	0	3	18	37	51
%	0.0	2.75	16.51	33.94	46.79

susceptibilidad, y con apenas el 2.75% de ellos, se presentaron en el nivel de baja susceptibilidad.

Para determinar el modelo que mejor precisión presentó en el área de estudio, se utilizaron los datos de la Tabla 3 para construir una matriz de contingencia dentro del software estadístico SPSS, con el que se computó estadísticos como el Chi cuadrado de Pearson y el coeficiente de contingencia corregido. El modelo Fuzzy obtuvo un valor de Chi cuadrado de 436 con 16 grados de libertad y un coeficiente de 0.894; mientras que el modelo realizado con Mora-Vahrson presentó un Chi cuadrado de 327 con 9 grados de libertad y un coeficiente de 0.866. Con estos resultados, se identificó que el modelo difuso alcanzó un coeficiente de contingencia corregido ligeramente más elevado que el modelo de Mora-Vahrson, por lo que alcanzó una mayor correlación entre las zonas susceptibles a deslizamientos con la presencia de estos en el área de estudio. Cabe indicar además que en ambos modelos, el p-value asintótico fue menor a 0.05, por lo que son estadísticamente significativos los valores obtenidos (Rodríguez & Mora, 2001).

La comparación entre estas metodologías ha sido objeto de análisis en distintos lugares, como el realizado por Jaramillo *et al.* (2018) en Ecuador, quienes obtuvieron resultados similares a los mostrados en esta investigación, con el modelo Fuzzy ligeramente más preciso que el modelo con Mora-Vahrson. Según Xu *et al.* (2012), debido al enfoque heurístico de Mora-Vahrson con el que se ponderan las variables de forma desigual, los valores pueden ser subjetivos y poco reproducibles, siendo la principal desventaja frente a los métodos cuantitativos como Lógica difusa.

A partir del resultado obtenido a través del modelo que presentó mayor precisión en el área de estudio, se analizaron los elementos expuestos que están asentados sobre zonas con los niveles más altos de susceptibilidad a deslizamientos, entre ellos se identificó que el trazado de la vía estatal E-46 que conecta a Morona con la Sierra central del país tiene el 76% de su longitud, asentado en zonas de alta y muy alta susceptibilidad del modelo con Fuzzy, lo que coincide con trabajos anteriores que sugieren un alto riesgo frente a este tipo de desastres en la mencionada área del cantón (Palacios & Toulkeridis, 2020).

Además, mediante Lógica difusa se identificaron equipamientos que se encontrarían en zonas de riesgo, entre los que se destacan 14 centros educativos y un centro de salud sobre un nivel de alta susceptibilidad a deslizamientos; mientras que los dos proyectos hidroeléctricos presentes en el territorio cantonal ninguno está bajo un nivel de riesgo considerable. Si se compara con el modelo de Mora-Vahrson se tienen resultados similares al anterior en cuanto a los centros de salud y proyectos hidroeléctricos, pero difieren en la cantidad de centros educativos susceptibles a deslizamientos, identificando nueve de ellos en lugares de alto riesgo potencial. Esta divergencia entre los modelos, puede deberse a la influencia de los factores desencadenantes que integran el modelamiento espacial de Mora-Vahrson, principalmente la variable de sismicidad que se encuentra a una escala $\approx 1:90000$, y que condiciona la

precisión del modelo final, por lo que autores como Quesada y Boraschi (2018) y Segura *et al.*, (2011) sugieren que este método trabaja correctamente para zonificar la susceptibilidad a deslizamientos a escalas no mayores a 1:50000. Sin embargo, en este estudio se observó que con los datos proporcionados por fuentes internacionales como la USGS, permitió incorporar información en lugares donde los registros nacionales no disponían, lo que ayudó a ajustar el mapa resultante de Mora-Vahrson y generar resultados comparables con los obtenidos mediante Fuzzy.

A pesar de las limitaciones de información en el método Mora-Vahrson, ha sido ampliamente usado en estudios regionales, principalmente en Centroamérica, gracias a su fácil y rápida aplicación, que permite obtener una línea base para posteriores estudios ingenieriles o de planificación del territorio, como el desarrollado en Ecuador, donde a través de este método se llevó a cabo el proyecto denominado “Elaboración de mapas preliminares de amenaza por movimientos en masa a escala 1:50.000” (SNGRE, 2019), cuyo modelo es ocupado por los municipios a escala nacional para fines de ordenación y gestión del suelo.

Es importante señalar también que ambos modelos identificaron a la parte central del cantón con un nivel de susceptibilidad muy bajo o bajo, en cuya área se encuentra asentada la mayor densidad poblacional, lo que de cierta forma ha permitido el desarrollo de las actividades antrópicas sin mayores inconvenientes ante esta amenaza natural. Al analizar los modelos generados mediante Fuzzy y Mora-Vahrson por cada parroquia del cantón, se puede caracterizar el nivel de susceptibilidad de forma más específica, como se resume en las Tablas 6 y 7 respectivamente.

Con el modelo difuso se observó que las parroquias de Macas, Alshi, Zúñac y San Isidro presentaron mayores porcentajes de alta y muy alta susceptibilidad (Tabla 6), lo que puede corresponder a la presencia de estribaciones montañosas combinadas con la expansión de la frontera agrícola que es predominante en esta zona; si bien esto también se presenta en las parroquias de Sevilla Don Bosco y Cuchaentza, la diferencia radica que en las estribaciones del Bosque Kutukú todavía mantiene gran cantidad de bosque primario (Palacios *et al.*, 2019), por lo que su porcentaje de susceptibilidad está condicionado netamente a la topografía del lugar y su significancia igualitaria para todas las variables incluidas en el modelo Fuzzy (Aristizábal *et al.*, 2015; Huggel *et al.*, 2012).

Además, en el caso específico de Macas se identificó que la superficie con la mayor susceptibilidad se ubica precisamente en la zona con menor densidad poblacional (suelo rural), lo cual refleja la realidad del territorio; contrariamente a lo que sucede en los asentamientos humanos de Zúñac y Alshi donde las zonas pobladas están limitadas e incluso intersecadas con áreas susceptibles a deslizamientos (Figura 3), y por ende mantienen un riesgo latente ante esta amenaza natural.

Tabla 6. Porcentaje de susceptibilidad a deslizamientos por parroquia según Lógica difusa

Parroquia	<i>Nivel de susceptibilidad</i>				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Macas	16.63 ha	913.59 ha	656.16 ha	1302.61 ha	2041.84 ha
	0.34 %	18.53 %	13.31 %	26.42 %	41.40 %
Alshi	0.09 ha	364.19 ha	7555.55 ha	15698.59 ha	3310.08 ha
	0.00 %	1.35 %	28.06 %	58.30 %	12.29 %
Río Blanco	42.14 ha	1538.25 ha	11209.19 ha	6231.53 ha	3456.66 ha
	0.19 %	6.84 %	49.87 %	27.73 %	15.37 %
Sinaí	4402.94 ha	13042.33 ha	14153.33 ha	8529.55 ha	403.73 ha
	10.86 %	32.18 %	34.92 %	21.04 %	1.00 %
Cuchaentza	22.50 ha	7948.34 ha	5893.76 ha	19454.78 ha	1186.47 ha
	0.07 %	23.03 %	17.08 %	56.38 %	3.44 %
General Proaño	8.98 ha	1302.58 ha	2135.92 ha	1787.80 ha	2098.48 ha
	0.12 %	17.76 %	29.12 %	24.38 %	28.62 %
Zúñac	54.17 ha	6991.64 ha	32187.27 ha	20907.25 ha	2338.48 ha
	0.09 %	11.19 %	51.52 %	33.46 %	3.74 %
San Isidro	193.66 ha	1688.88 ha	2027.03 ha	5039.45 ha	3962.79 ha
	1.50 %	13.08 %	15.70 %	39.03 %	30.69 %
Sevilla Don Bosco	33058.08 ha	45306.61 ha	76060.66 ha	67767.55 ha	2370.83 ha
	14.72 %	20.18 %	33.87 %	30.18 %	1.05 %

Por su lado, el modelo Mora-Vahrson refleja un comportamiento similar al resultado con Lógica difusa, destacando las parroquias de Macas, Alshi, Zúñac y San Isidro donde se encuentran los mayores niveles de riesgo potencial, pero se incrementa en este listado a la parroquia de Cuchaentza (Tabla 7). Del mismo modo, en el caso de Alshi y Zúñac se identificaron como zonas de interés ya que a pesar no mostrar un porcentaje significativo en relación al total del territorio parroquial, los niveles de medio y alto riesgo potencial se ubican adyacentes a estos los centros poblados, y que históricamente se han visto afectados por deslizamientos.

Finalmente, este tipo de estudios representan insumos fundamentales para el ordenamiento territorial, con los que se puede prever las zonas de expansión urbana (Palacios, 2020), la clasificación del suelo rural, o la evaluación de los efectos del cambio climático (Lin *et al.*, 2022). Por ello, es importante y necesario cotejar metodologías para generar nueva información más precisa que coadyuve al entendimiento de este tipo de desastres naturales, sobre todo en áreas menos estudiadas como es el caso de la Amazonía ecuatoriana, y que a través

Tabla 7. Porcentaje de susceptibilidad a deslizamientos por parroquia según Mora-Vahrson

<i>Clasificación del riesgo potencial de un deslizamiento</i>					
Parroquia	Muy bajo	Bajo	Moderado	Medio	Alta
Macas	762.81 ha	731.89 ha	137.10 ha	1171.96 ha	2127.03 ha
	15.47 %	14.84 %	2.78 %	23.78 %	43.13 %
Alshi	413.61 ha	1673.65 ha	4538.21 ha	12592.51 ha	7710.50 ha
	1.54 %	6.21 %	16.85 %	46.76 %	28.64 %
Río Blanco	4724.46 ha	5948.61 ha	2049.50 ha	4838.56 ha	4916.62 ha
	21.02 %	26.46 %	9.13 %	21.52 %	21.87 %
Sinaí	12108.81 ha	9468.53 ha	6720.50 ha	5802.61 ha	6431.42 ha
	29.87 %	23.36 %	16.58 %	14.32 %	15.87 %
Cuchaentza	9547.0 ha	3254.61 ha	2959.57 ha	4577.14 ha	14167.5 ha
	27.67 %	9.44 %	8.58 %	13.26 %	41.05 %
General Proaño	789.59 ha	2986.42 ha	501.0 ha	1585.57 ha	1471.17 ha
	10.76 %	40.72 %	6.83 %	21.62 %	20.07
Zúñac	13026.62 ha	21115.87 ha	8539.06 ha	15422.23 ha	4375.01 ha
	20.85 %	33.79 %	13.67 %	24.68 %	7.01 %
San Isidro	2413.43 ha	2237.06 ha	777.34 ha	977.90 ha	6506.06 ha
	18.69 %	17.33 %	6.02 %	7.57 %	50.39 %
Sevilla Don Bosco	51818.89 ha	49369.14 ha	13497.20 ha	48697.84 ha	61180.6 ha
	23.07 %	21.98 %	6.01 %	21.69 %	27.25 %

de la integración de sistemas de información geográfica (SIG), sensores remotos y modelos matemáticos probabilísticos, permiten zonificar los deslizamientos de mejor forma y generar políticas públicas para evitar pérdidas humanas y económicas.

4. Conclusiones

El presente estudio comparó dos metodologías para modelar la susceptibilidad a deslizamientos y su respectiva zonificación, como son Mora-Vahrson y Lógica difusa en el cantón Morona al sureste de la Amazonía ecuatoriana. El resultado de la validación a través del coeficiente de contingencia corregido determinó que el modelo Fuzzy obtuvo una mejor correlación entre las zonas susceptibles a deslizamientos con la presencia de estos, con el 0.894, frente al 0.866 mostrado en el modelo de Mora-Vahrson. En este sentido, se puede concluir que en el área de estudio, el método probabilístico se ajustó de mejor manera a la realidad del territorio, que el método semianalítico heurístico.

Conforme los resultados obtenidos, es recomendable utilizar modelos espaciales derivados de métodos probabilísticos, como es Fuzzy, en especial para trabajos a escalas $\geq 1:50000$, y en territorios similares a los que se analizó en este estudio, como son los territorios amazónicos del Ecuador, donde existe menor disponibilidad de información espacial.

El modelo de Lógica difusa presenta algunas ventajas frente al método Mora-Vahrson referente al proceso de cálculo, debido a que se limita la subjetividad en la ponderación de las variables mediante las funciones de membresía aplicadas a variables físicas continuas, además de reducir la influencia de variables específicas que desencadenan el deslizamiento, tomando todas por igual en una combinación lineal que expresa la probabilidad del deslizamiento, y que en función a los resultados de este estudio, sugiere una mejora para fines generalizados de planificación y evaluación del territorio.

Este tipo de investigaciones son de gran ayuda para fines de cartografía de pronta respuesta, gestión de riesgos y ordenación territorial, con los que se puede tomar medidas de prevención y mitigación para evitar pérdidas humanas y económicas, cuyas proyecciones están correlacionadas con el cambio climático, por lo que es imperante institucionalizar una verdadera transversalización de estos estudios en la generación de políticas públicas e instrumentos de planificación.

Bibliografía

- Abdullah, A.; Aimrun, W.; Nasidi, N.; Hazari, K.; Mohd, L. & Selamat, Z. (2019). Modelling erosion and landslides induced by farming activities at Hilly Areas, Cameron Highlands, Malaysia. *Jurnal Teknologi*, 81 (6), 195-204.
DOI: <https://doi.org/10.11113/jt.v81.13795>
- Aleotti, P. & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin Engineering Geology Environment*, 58, 21-44.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- Aristizábal, E.; García, E. & Martínez, C. (2015). Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains. *Natural Hazards*, 78 (1), 621-634.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1736-4>
- Aristizábal, E. & Sánchez, O. (2020). Spatial and temporal patterns and the socioeconomic impacts of landslides in the tropical and mountainous Colombian Andes. *Disasters*, 44 (3), 596-618. DOI: <https://doi.org/10.1111/disa.12391>
- Bahrami, Y.; Hassani, H. & Maghsoudi, A. (2021). Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran. *GeoJournal*, 86, 1797-1816.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10162-y>
- Carrera, D., Palacios, I., Albán, T., Barahona, J., Calderón, D., Castelo, A., & Vega, M. (2021). Variation of Drinking Water Consumption Due to the Health Emergency of SARS-CoV-2 through Dynamic Modeling in Macas City, Amazon from Ecuador. Information and Communication Technologies. TICEC 2021. *Communications in Computer and Information Science*. 1456, (pp. 267-280).
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89941-7_19

- Cepeda, M.; Palacios, I.; Tierra, A. & Kirby, E. (2018). Multiresolution analysis in the visible spectrum of Landsat-TM images through Wavelet Transform. *Geographia Technica*, 13(1), 20-29. DOI: https://doi.org/10.21163/GT_2018.131.03
- CRED (2019). Natural disasters 2018. Report of the Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. <https://www.emdat.be/publications>
- Desinventar.org. (2020). Desinventar Sendai. <https://db.desinventar.org/>
- Huggel, C.; Clague, J. & Korup, O. (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms*, 37 (1), 77-91. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.2223>
- Ilanloo, M. (2011). A comparative study of fuzzy logic approach for landslide susceptibility mapping using GIS: An experience of Karaj dam basin in Iran. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 19, 668-676.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.05.184>
- INEC (2023). Estimaciones y Proyecciones de Población. <https://sni.gob.ec/proyecciones-y-estudios-demograficos>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2018). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Jaramillo, C., Cruz, M., Padilla, O. & Toulkeridis, T. (2018). Comparative Determination of the Probability of Landslide Occurrences and Susceptibility in Central Quito, Ecuador. 2018 International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG), 136-143. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEDEG.2018.8372341>
- Kanungo, D.; Arora, M.; Sarkar, S. & Gupta, R. (2009). Landslide susceptibility zonation (LSZ) mapping - a review. *Journal of South Asia Disaster Studies*, 2 (1), 81-105.
- Li, L.; Nahayo, I.; Habiyaemye, G. & Christophe, M. (2022). Applicability and performance of statistical index, certain factor and frequency ratio models in mapping landslides susceptibility in Rwanda. *Geocarto International*, 37 (2), 638-656. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1730451>
- Lin, Q.; Steger, S.; Pittore, M.; Zhang, J.; Wang, L.; Jiang, T. & Wang, Y. (2022). Evaluation of potential changes in landslide susceptibility and landslide occurrence frequency in China under climate change. *Science of The Total Environment*, 850. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158049>
- López, R.; Zuluaga, A.; Gómez, F. & Tapia, L. (2020). Aplicación del Método Mora-Vahrson para evaluar la susceptibilidad a deslizamiento en el municipio de Manaure, Cesar, Colombia. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción de Riesgos de Desastres*, 4 (2), 57-70. DOI: <https://doi.org/10.55467/reder.v4i2.50>
- Mora, R. (2004). Evaluación de la Susceptibilidad al Deslizamiento del Cantón de San José, Provincia de San José, Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología.
- Mora, S. & Vahrson, W. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. *Tecnología ICE*, 3, p. 32.
- Mora, S. & Vahrson, W. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulleting of the Association of Engineering and Geologist*, 31 (1), 49-58.
- Nanda, A.; Lone, F.; Ahmed, P. & Kanth, T. (2021). Rainfall-induced landslide movements using linear regression analysis along national highway 1D (Jammu and Kashmir, India). *Modeling Earth Systems and Environment*, 1863-1875. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00908>

- Ozturk, U.; Bozzolan, E.; Holcombe, E.; Shukla, R.; Pianosi, F. & Wagener, T. (2022). How climate change and unplanned urban sprawl bring more landslides. *Nature*, 608 (7922), 262-265.
- Palacios, I. (2020). *Generación de un modelo de crecimiento tendencial urbano de la ciudad de Macas (Ecuador) al año 2030, mediante técnicas de modelación espacial multivariable*. [Tesis de maestría, Universitat de Barcelona]. Barcelona.
- Palacios, I. (2020). Susceptibilidad a deslizamientos en la vía Alóag-Santo Domingo, mediante Lógica difusa. *Revista Geoespacial*, 17 (2), 1-12.
DOI: <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v17i2.1571>
- Palacios, I. (2023a). Uso de drones para la caracterización morfométrica de sitios arqueológicos en Morona-Amazonía ecuatoriana. *Revista Geoespacial*, 20 (1), 1-17. DOI: <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v20i1.3170>
- Palacios, I. (2023b). Fotogrametría aérea con UAV como herramienta para la conservación de sitios arqueológicos. Caso de estudio: Complejo La Esperanza. *Antropología. Cuadernos de Investigación* (28), 59-70.
DOI: <https://doi.org/10.26807/raci.vi28.307>
- Palacios, I. & Arellano, K. (2022). Obtención de alturas niveladas mediante nivelación GPS Caso de estudio: Morona-Ecuador. *Uniciencia*, 36 (1), 429-441.
DOI: <https://doi.org/10.15359/ru.36-1.26>
- Palacios, I. & Arellano, K. (2021). Modelo predictivo del cambio de cobertura forestal en el Área de Conservación Municipal Quílamo-Cantón Morona. *Revista Geoespacial*, 18 (1), 1-13. DOI: <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v18i1.2201>
- Palacios, I. & Rodríguez, F. (2021). Economic valuation of environmental goods and services of the Protector Forest Kutukú – Shaimi, SE Ecuador. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 27 (2), 117-132.
- Palacios, I., & Toulkeridis, T. (2020). Evaluation of the susceptibility to landslides through diffuse logic and analytical hierarchy process (AHP) between Macas and Riobamba in Central Ecuador. 2020 Seventh International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG). (pp. 201-207).
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEDEG48599.2020.9096879>
- Palacios, I. & Toulkeridis, T. (2022). Analysis of the precision of different: digital models of global and local elevations in continental Ecuador. *Revista Geográfica Venezolana*, 63(2), 110-127.
- Palacios, I., Castro, S., & Rodríguez, F. (2019). Almacenamiento de carbono como servicio ambiental en tres reservas naturales del Ecuador. *Revista Geoespacial*, 16 (1), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v16i1.1275>
- Palacios, I.; Ushiña, D. & Carrera, D. (2021). Pixel Purity Index Applied to the Mapping of Degraded Soils by the Presence of Cangahuas in the Ilaló Volcano, Ecuador. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 11 (5), 2121-2127. DOI: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.5.14684>
- Palacios, I.; Leiva, C.; Bueaño, X.; Chicaiza, E. & Toulkeridis, T. (2021). Geoid undulation modeling through the Cokriging method–A case study of Guayaquil, Ecuador. *Geodesy and Geodynamics*, 12(5), 356-367.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.04.004>
- Pedreras, L. & Rivera, S. (2020). Risk indicators of mass removal phenomena according to the Mora - Vahrson method, applied in Pitalito and Campoalegre municipalities. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1154, 012037. Cartagena. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1154/1/012037>

- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40 (10), 927-930. DOI: <https://doi.org/10.1130/G33217.1>
- Pourghasemi, H.; Mohammady, M. & Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena*, 97, 71-84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.05.005>
- Pradhan, B., Chaudhari, A., Adinarayana, J. & Buchroithner, M. (2012). Soil erosion assessment and its correlation with landslide events using remote sensing data and GIS: a case study at Penang Island, Malaysia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 715-727. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1996-8>
- Quesada, A. & Boraschi, S. (2018). Comparación de la Metodología Mora-Vahrson y el Método Morfométrico para Determinar Áreas Susceptibles a Deslizamientos en la Microcuenca del Río Macho, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, (61), 17-45. <https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.1>
- Rodríguez, M. & Mora, R. (2001). *Estadística Informática. Casos y ejemplos con el SPSS*. Universidad de Alicante.
- Salcedo, D., Padilla, O. & Morales, T. T. (2017). Evaluación de susceptibilidad a deslizamientos mediante lógica Fuzzy y técnicas de evaluación multicriterio en la Avenida Simón Bolívar, Quito. *Revista Geoespacial*, 14(2), 1-20.
- Segura, G., Badilla, E. & Obando, L. (2011). Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba. *Revista Geológica de América Central*, 2(45), 101-121. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rgac/n45/a6n45.pdf>
- SGR. (2023). SitRep No. 95 – Deslizamiento Casual - Alausí. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/SITREP-Nro.-95-Deslizamiento-Alausi-14082023-15h00.pdf>
- Shano, L.; Raghuvanshi, T. & Meten, M. (2021). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio model: the case of Gamo highland, South Ethiopia. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 623. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06995-7>
- SNGRE (2019). Propuesta metodológica para el análisis de amenaza ante movimientos en masa en Ecuador Continental. Quito.
- Sur, U.; Singh, P. & Meena, S. (2020). Landslide susceptibility assessment in a lesser Himalayan road corridor (India) applying fuzzy AHP technique and earth-observation data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11 (1), 2176-2209. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1836038>
- Toulkeridis, T.; Chunga, K.; Rentería, W.; Rodríguez, F.; Mato, F.; Nikolaou, S.; Cruz, M.; Besenon, D.; Ruiz, H.; Parra, H. & Vera, X. (2017). The 7.8 Mw Earthquake and Tsunami of the 16th April 2016 in Ecuador - Seismic evaluation, geological field survey and economic implications. *Science of tsunami hazards*, 36, 197-242 https://www.researchgate.net/publication/321596484_The_7.8_Mw_Earthquake_and_Tsunami_of_the_16th_April_2016_in_Ecuador_-_Seismic_evaluation_Geological_field_survey_and_Economic_implications
- World Bank (2021). Ecuador: Disaster Risk Financial Management Strategy. <https://www.bancomundial.org/es/country/ecuador/publication/ecuador-estrategia-de-gesti-n-financiera-ante-el-riesgo-de-desastres>
- Xu, C.; Xu, X.; Dai, F.; Xiao, J.; Tan, X. & Yuan, R. *et al.* (2012) Landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence model in Qingshui River watershed of 2008 Wenchuan earthquake struck region. *Journal of Earth Science*, 23 (1), 97-120. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12583-012-0236-7>