

Evaluación multicriterio aplicada al análisis de movimientos en masa en carreteras de montaña: un caso de estudio en los Andes del sur del Ecuador

Multi-criteria Evaluation Applied to the Analysis of Mass Movements on Mountain Roads: A Case Study in the Andes of Southern Ecuador

Marco Álvarez¹, Fernando Oñate-Valdivieso², Carmen Esparza³, Arianna Oñate-Paladines⁴

¹Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, maalvarez³@hotmail.com

² <https://orcid.org/0000-0002-2400-0510>. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, fronate@utpl.edu.ec

³ <https://orcid.org/0000-0003-0540-8956>. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, caesparza@utpl.edu.ec

⁴ Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, ayonate@outlook.es

Fecha de recepción: 15/08/2020 - Fecha de aceptación del artículo: 27/10/2020



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: [DOI 10.18041/1794-4953/avances.2.6633](https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6633)

Cómo citar: Oñate-Valdivieso, F., Álvarez, M., Esparza, C., & Oñate-Paladines, A. (2020). Evaluación multicriterio aplicada al análisis de movimientos en masa en carreteras de montaña: un caso de estudio en los Andes del sur del Ecuador. *Avances: Investigación En Ingeniería*, 17(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6633>

Resumen

Los movimientos en masa son los responsables de cuantiosas pérdidas humanas y materiales. La principal medida para prevenir los movimientos de ladera es la elaboración de mapas de susceptibilidad, de manera rápida y económica, mediante la aplicación de técnicas de evaluación que se basan en identificar factores condicionantes y desencadenantes que provocan la inestabilidad de las laderas, ponderados según su influencia para la ocurrencia del fenómeno en estudio. En el presente artículo, se usaron técnicas de evaluación multicriterio para definir la susceptibilidad a deslizamientos que presenta una carretera montañosa ubicada al sur de Ecuador. Se seleccionaron variables que tienen influencia directa en la ocurrencia de los movimientos en masa y se relacionaron con diferentes eventos observados en campo para definir una categorización temática de cada variable y determinar los factores de ponderación. La susceptibilidad fue se definió mediante una ponderación lineal. Se identificaron niveles de susceptibilidad medio y alto en la vía en estudio con la presencia de deslizamientos rotacionales y traslacionales.

Palabras clave: evaluación multicriterio, movimientos en masa, susceptibilidad.

Abstract

Mass movements are responsible for large human and material losses. The main action for the prevention of hillside movements is the creation of susceptibility maps, which can be carried out quickly and economically through the application of multi-criteria evaluation techniques. These are based on the identification of conditioning and triggers factors that cause the instability of the slopes, which are weighted according to their influence for the occurrence of the phenomenon under study. In the present work, multi-criteria evaluation techniques were applied to define the susceptibility to landslides in a mountainous road located

in the south of Ecuador. Variables that have a direct influence on the occurrence of mass movements were selected and related to different events observed in the field to define a thematic categorization of each variable and to determine weighting factors. Susceptibility was defined by linear weighting. Medium and high levels of susceptibility were identified in the road understudy with the presence of rotational and translational landslides.

Keywords: multi-criteria evaluation, mass movements, susceptibility.

Introducción

Los movimientos de ladera son eventos que han generado cuantiosas pérdidas económicas y humanas alrededor de todo el mundo, especialmente en países montañosos, debido a sus características fisiográficas y socioeconómicas [1], [2].

La susceptibilidad es una propiedad de una zona que indica qué tan favorable o desfavorable son las condiciones de esta, para que pueda ocurrir un movimiento en masa [3], [4]. Por esto, una medida fundamental para la prevención y mitigación de las pérdidas producidas por los procesos de inestabilidad de laderas es la elaboración de mapas de susceptibilidad del terreno a los movimientos de ladera [5].

La evaluación multicriterio permite orientar la toma de decisiones a partir de varios criterios comunes. Este método se destina esencialmente a comprender y a solucionar problemas de decisión. Se utiliza para emitir un juicio comparativo entre proyectos o medidas heterogéneas, por lo que puede emplearse en evaluación [3]. La evaluación multicriterio aplicada mediante un sistema de información geográfica ha demostrado tener notable utilidad en diferentes áreas del conocimiento [6]-[8]. Ello permite, además, el análisis de información en combinación con la experiencia de los tomadores de decisiones [9], [10].

Entre las técnicas multicriterio, la ponderación lineal aborda situaciones de incertidumbre con poca información y es un método fácil y utilizado ampliamente en el mundo [11]-[13]. Una de las técnicas más utilizadas para definir pesos es el proceso de jerarquía analítica [10], [14], que se centra en comparar por pares con el objetivo de encontrar el grado en que una alternativa supera a las otras según criterios establecidos [12], [13].

La evaluación multicriterio aplicada a la determinación de la susceptibilidad de una zona a los movimientos en masa se apoya en la identificación de factores condicionantes y desencadenantes que provocan la inestabilidad de las laderas, ponderados según su influencia para la ocurrencia del fenómeno en estudio [3], [8].

Este artículo reseña la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio, cuyo propósito es definir la susceptibilidad a deslizamientos que presenta una carretera montañosa ubicada al sur de Ecuador. Para ello se seleccionaron variables que influyen directamente en la ocurrencia de los movimientos en masa, las cuales se relacionan con diferentes eventos observados en campo, a efectos de definir una categorización temática de cada variable y determinar factores de ponderación (pesos). La susceptibilidad se define mediante una ponderación lineal.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: inicialmente, se describió el área de estudio, así como la información recopilada. La metodología empleada para elaborar el mapa

de susceptibilidad se describe a continuación y se aplica a la zona de estudio y sus datos. Finalmente, se presentan y discuten los resultados de dicho análisis y se extraen las conclusiones correspondientes.

1. Materiales y métodos

1.1. Zona de estudio

En el presente trabajo se estudió la vía Loja-Zamora, que se encuentra al sur del Ecuador, entre los $3^{\circ}55'54,5''$ y los $4^{\circ}4'1''$ de latitud sur y los $79^{\circ}6'31,1''$ y $78^{\circ}58'24''$ de longitud oeste. La vía tiene una longitud de 57,24 km. El tramo de estudio cubre las abscisas 30+600 hasta 55+200. En el recorrido de la vía, la morfología es variable; inicia en una zona de premontaña que se constituye en el límite oriental de la cuenca sedimentaria. Gradualmente, conservando la misma dirección, se produce otro cambio de morfología a una zona de montaña con elevaciones de hasta 3400 m; posteriormente, el relieve abrupto cambia a un relieve moderado con elevaciones que alcanzan los 2850 m [15]. La vía atraviesa por zonas cubiertas con pastos y zonas cubiertas de bosques naturales. La precipitación promedio anual que existe en la zona de estudio tiene rangos entre 1500 a 3000 mm; la precipitación aumenta de oeste a este. Esta se presenta a lo largo del año, con un máximo entre los meses de marzo y junio [16].

Geológicamente hablando, la vía atraviesa dos formaciones geológicas: a) unidad Chinguinda (Paleozoico), que aflora desde el kilómetro 6+500 hasta el 38+600. Litológicamente, está compuesta por esquistos, filitas gráficas y cuarcitas. Muchas de estas rocas se encuentran plegadas y localmente falladas. La principal propiedad de la unidad es la formación de suelo residual, misma que puede alcanzar espesores de 25 m, y b) unidad Sabanilla (Paleozoico y Triásico), que aflora desde el kilómetro 38+600 hasta el 55+200. Litológicamente, se caracteriza por la presencia de orto y paragneisis con cuarcitas. A lo largo de la vía se puede observar una característica: la presencia de escombros al pie de talud y suelo de tipo residual. La ubicación de la zona de estudio se presenta en la figura 1.

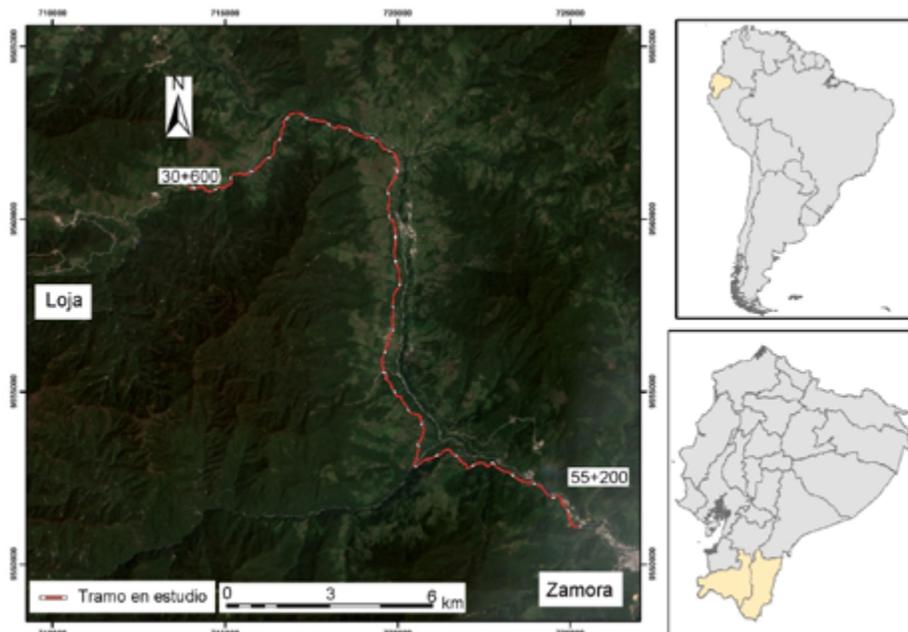


Figura 1. Zona de estudio. Fuente:[21]

1.2. Análisis de susceptibilidad

De la base de datos del Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Ecuador [17] se seleccionaron 7 eventos de movimientos en masa ocurridos a causa de la precipitación en el periodo 2013-2016; de estos se disponía fecha precisa de ocurrencia y una adecuada geolocalización. Para el análisis de la susceptibilidad se empleó la siguiente información:

- Mapa geológico de la República de Ecuador, a una escala 1:1.000.000 [18].
- Mapa de pendientes de la zona de estudio, derivado de un modelo de elevación digital, escala 1:3000 [19].
- Mapa de Isoyetas a escala 1:1.000.000 [20].
- Mapa de cobertura vegetal derivado mediante clasificación supervisada de una imagen Landsat 8, resolución espacial de 30 m [21]. Previo a la clasificación supervisada, se realizó una corrección atmosférica empleando el modelo FLAASH [22] y una corrección topográfica empleando un modelo de elevación digital [23]. Se tomaron 50 puntos de control uniformemente distribuidos en el área de estudio y se realizó una clasificación supervisada aplicando el método de máxima verosimilitud.

Todos estos datos fueron homogeneizados en términos de escala espacial, transformándolos a formato ráster con un tamaño de celda de 30 m.

Mediante visitas a la zona de estudio se recolectaron datos de campo, como: tipos de deslizamientos, inclinación de la pendiente de la ladera, distancia entre la cabecera del deslizamiento y el eje de la vía y condición de la superficie del terreno.

Adicionalmente, se contó con una lista de movimientos en masa del periodo 2013-2016 [17]. Para el análisis de susceptibilidad se consideró el número de deslizamientos ocurridos, mas no el tipo de estos. Los deslizamientos y sus características se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Eventos de movimientos en masa considerados

Evento	Abscisa	Fecha	Tipo
1	30+600	25/03/2016	Traslacional
2	35+850	01/01/2016	Desprendimiento
3	44+080	10/07/2014	Traslacional en cabecera y flujo al pie
4	44+200	28/07/2014	Traslacional en cabecera y flujo al pie
5	44+400	16/01/2013	Flujo de derrubios
6	49+235	17/01/2013	Desprendimiento
7	52+995	23/04/2016	Traslacional

Todos los mapas de las variables (geología, pendientes, precipitación y cobertura) fueron clasificados en categorías temáticas. A continuación, se verificó el número de movimientos en masa ocurridos en cada categoría temática de las variables. Finalmente, se recategorizó cada mapa en una escala de 1 a 5, donde 1 equivale al menor número de deslizamientos, y 5, a la mayor ocurrencia de estos.

Para establecer los pesos de las variables se analizó la prevalencia entre ellas empleando una matriz cuadrada como la que se muestra en la tabla 2 [3], [8], [14]. Las filas (i) y las columnas (j) están definidas por las variables que se van a ponderar. Al comparar dos variables, se analiza

cuál de ellas tiene mayor influencia para la ocurrencia de un deslizamiento; de esta manera, se determina el grado de prevalencia de la variable i por sobre la variable j para la ocurrencia de deslizamientos. Finalmente, se asigna un nivel de importancia según los criterios de la tabla 3 [5], [8] [14].

Tabla 2. Escala para comparación a pares

Grado de prevalencia	Definición	Importancia
Las variables (i, j) contribuyen de igual manera al proceso de deslizamiento	Equitativa	1
Existe una ligera prevalencia de la variable (i) sobre la variable (j)	Moderada	3
Existe una significativa prevalencia de la variable (i) sobre la variable (j)	Fuerte	5
Existe total prevalencia de la variable (i)	Absoluta	7

Tabla 3. Matriz para comparación de variables

Variable	A	B	C	D	Peso relativo
A	XAA	XAB	XAC	XAD	WA
B	XBA	XBA	XBA	XBA	WB
C	XCA	XCA	XCA	XCA	Wc
D	XDA	XDA	XDA	XDA	WD

El mapa de susceptibilidad a los deslizamientos se calculó con la suma ponderada de las variables recategorizadas (geología, pendientes, precipitación y cobertura); el factor de ponderación (peso) de cada variable se obtuvo mediante el análisis de prevalencia. Para la suma ponderada se empleó un sistema de información geográfica. El resultado final fue dividido en terciles, asignándoles tres niveles de susceptibilidad (baja, media y alta) según su rango de valores. Un esquema que resume la metodología empleada se presenta en la figura 2.

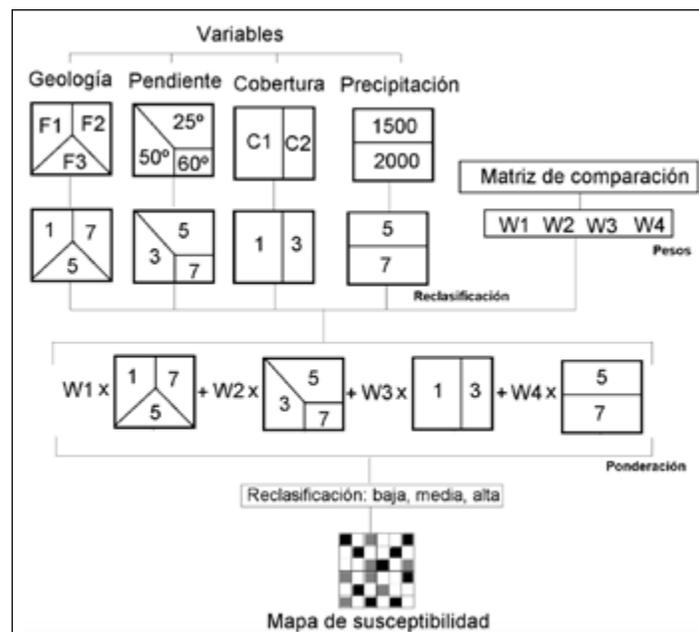


Figura 2. Esquema de la metodología empleada

2. Análisis de resultados

2.1. Recategorización de variables

2.1.1. Geología

Según la figura 3, en la unidad Sabanilla se presentan 5 de los 7 procesos de remoción en masa estudiados, seguido por la Unidad Chinguinda, donde hay 2. En consideración a aquello, se plantea la recategorización incluida en la tabla 4. Con la información recolectada en campo se definió que en la unidad Sabanilla se observan movimientos en masa de tipo desprendimiento, deslizamientos y flujos, en tanto que en la unidad Chinguinda hay movimientos en masa tipo deslizamientos, flujos, vuelcos y desprendimientos.

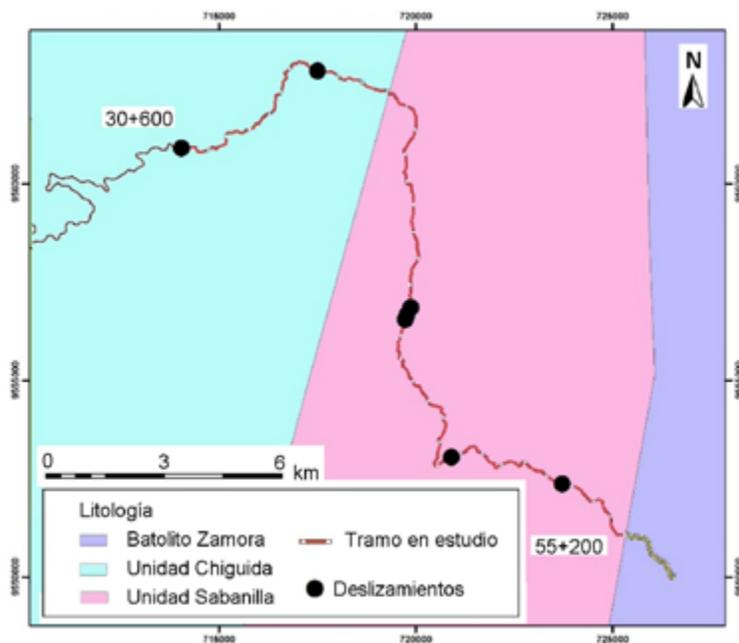


Figura 3. Geología presente en la zona de estudio. Fuente:[18]

Tabla 4. Recategorización de la variable geología en la zona de estudio

Geología en la zona de estudio	Categoría
Unidad Chinguinda	2
Unidad Sabanilla	5

2.1.2. Pendiente

El mapa de pendiente se presenta en la figura 4. Los rangos varían entre 0° y 85°, que evidencian que la zona de estudio presenta un relieve muy irregular y en diversas zonas con pendientes pronunciadas la susceptibilidad a los movimientos en masa puede ser mayor.

Con la inclinación de las laderas, medida en campo, se confirmó que el mayor número de procesos de remoción en masa ocurrieron en el rango de pendientes 51°-68°, seguido por los ocurridos el rango de 34°-51°. Las pendientes de las laderas mayores a 68° presentaron una menor ocurrencia de deslizamientos, debido a que se encuentran conformadas por un macizo rocoso competente. Los dos rangos más bajos de pendiente se consideraron menos susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos. Con estas consideraciones se adoptó la recategorización que se presenta en la tabla 5.

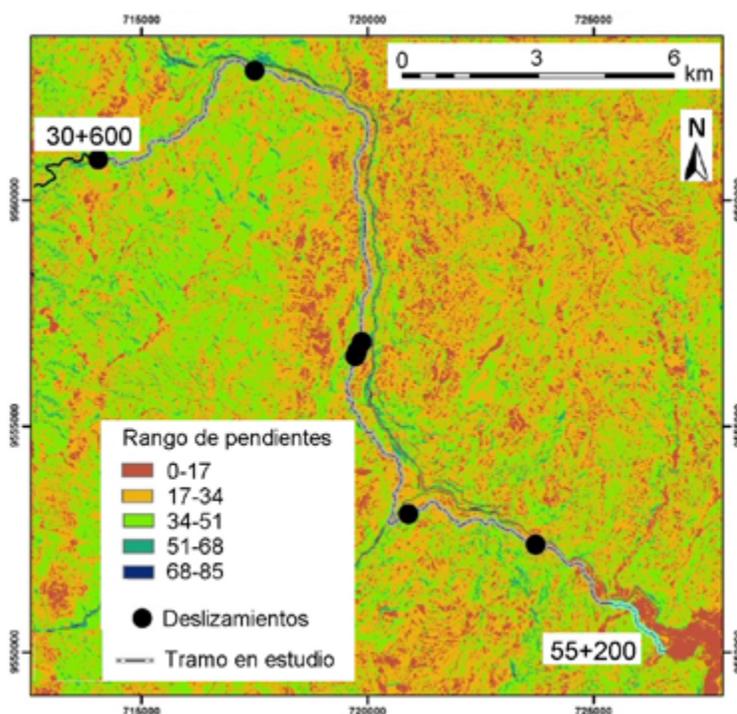


Figura 4. Pendientes presentes en la zona de estudio. Fuente: [19]

Tabla 5. Recategorización de la variable pendiente en la zona de estudio

Rango de pendiente en grados		Categoría
0,00	17,00	1
17,00	34,00	2
34,00	51,00	4
51,00	68,00	5
68,00	85,00	3

2.1.3. Cobertura vegetal.

En la figura 5 se presenta el mapa de cobertura del suelo del área de estudio. Como se puede observar a lo largo de la zona, existe una franja de pastos en la cual se ha producido la mayor cantidad de movimientos en masa seguido por las zonas sin cobertura, existiendo tan solo uno en la zona de bosque. Esto evidencia la importancia que la cobertura vegetal tiene en la prevención de los movimientos en masa.

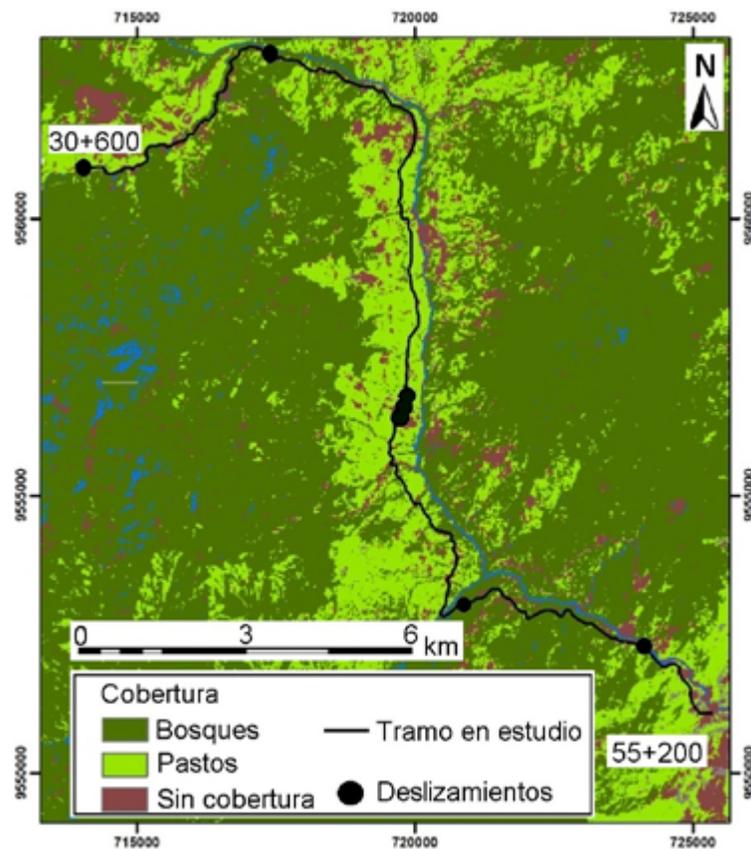


Figura 5. Cobertura del suelo presente en la zona de estudio. Fuente: [21]

Al ser la cobertura vegetal un factor que reduce la susceptibilidad a los deslizamientos, se adoptó la recategorización que se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Recategorización de la variable cobertura en la zona de estudio

Cobertura	Categoría
Bosques	1
Pastos	3
Suelo sin cobertura vegetal	2

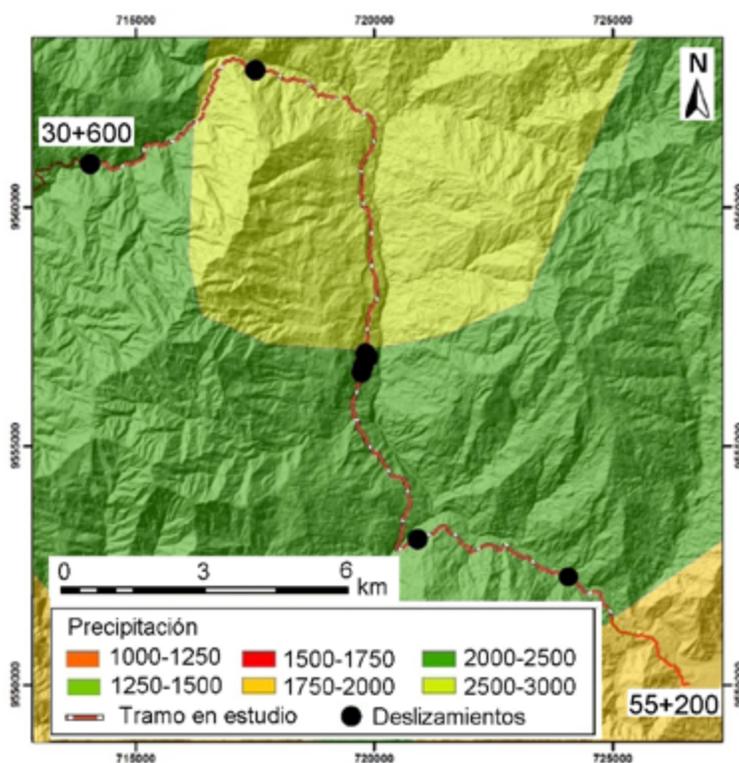
2.1.4. Precipitación

Los valores totales anuales plurianuales de la precipitación registrada en la zona de estudio se presentan en la figura 6. Se puede observar que el mayor número de movimientos en masa se encuentra en las zonas con niveles de precipitación superiores a 2000 anuales.

Considerando el número de deslizamientos ocurridos según cada rango de precipitación, se definió la recategorización de la variable precipitación que se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Recategorización de la variable precipitación en la zona de estudio

Rango (mm)		Categoría
2000,00	2500,00	5
2500,00	3000,00	1

**Figura 6.** Precipitación media anual en la zona de estudio. Fuente: [20]

2.2. Evaluación multicriterio

En la tabla 8 se presenta el cálculo de los factores de ponderación empleados para la evaluación multicriterio de la susceptibilidad a los movimientos en masa en la zona de estudio.

Tabla 8. Cálculo de los factores de ponderación (pesos)

Variables	Geología	Pendiente	Cobertura	Precipitación	$\Sigma(X_{ij})/n$	Peso
Geología	1	7	1	5	3,50	0,49
Pendiente	1/7	1	3	3	1,79	0,25
Cobertura vegetal	1	1/3	1	3	1,33	0,19
Precipitación	1/5	1/3	1/3	1,00	0,47	0,07
				Total	7,09	1,00

En campo se pudo comprobar que la geología tiene absoluta prevalencia sobre la pendiente en la ocurrencia de los movimientos en masa. Ejemplo de esto son las pendientes superiores a 68°, totalmente estables al presentarse en un macizo rocoso competente, por lo que se

asume un nivel de importancia de 7. Además, la ocurrencia de movimientos en masa depende más del estado de la superficie del terreno que de la pendiente. Al comparar la geología con la cobertura, se considera que poseen una prevalencia equitativa, ya que la cobertura vegetal reduce la susceptibilidad a los deslizamientos; por ende, se le asigna un valor de 1. Por último, al comparar la geología con la precipitación, se considera que la primera influye de forma absoluta en la ocurrencia de movimientos en masa si se compara con la precipitación, por lo que se adopta un nivel de importancia de 7. Este criterio considera que del estado de los materiales que componen la ladera (fisurado, agrietado) depende la infiltración de las aguas provenientes de la precipitación que originaría el deslizamiento.

Se considera que la pendiente tiene una ligera prevalencia sobre la vegetación para la ocurrencia de movimientos en masa, ya que la vía zonas cubiertas de pasto presenta la mayor ocurrencia de deslizamientos según la cobertura vegetal; por esto, se le asigna un nivel de importancia de 3. Ya que la vía en estudio está construida en zonas de montaña con pendientes significativas, la prevalencia de la pendiente se considera moderada sobre precipitación en la ocurrencia de movimientos en masa, por lo que se asume un nivel de importancia de 3.

Por otra parte, se ha considerado que la cobertura vegetal tiene una prevalencia moderada sobre la precipitación en la ocurrencia de movimientos en masa; esto debido a que la cantidad de agua infiltrada depende de la cobertura de vegetal del suelo; por eso, se asume un nivel de importancia de 3.

Finalmente, los pesos relativos adoptados para la evaluación multicriterio reflejan la influencia de cada uno de los factores considerados en la ocurrencia de movimientos en masa: geología: 49%; pendiente: 25%; cobertura: 19%, y precipitación: 7%.

2.3. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa

Una vez realizada la suma ponderada de las variables, empleando los pesos relativos como factor de ponderación, se obtuvo el mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa de la vía en estudio (figura 7). En este se observan tramos en los que se concentran grados altos y bajos de susceptibilidad a movimientos en masa a lo largo del tramo de estudio 30+600 hasta 55+200 Loja-Zamora. Ello evidencia la inestabilidad de las laderas de la zona de estudio. Los primeros 8 km del tramo de estudio poseen una susceptibilidad alta a movimientos en masa, debido a la influencia de la geología. En este tramo se observan movimientos en masa de tipo traslacional, flujo de derrubios (fragmentos rocosos y bloques en una matriz fina de limo y arcilla) y desprendimientos (caída de bloques).

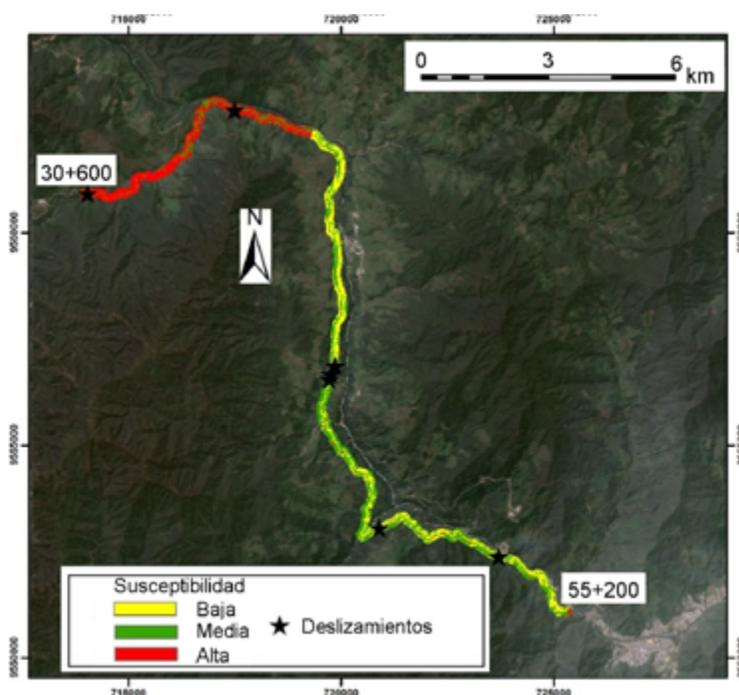


Figura 7. Mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa en la zona de estudio. Fuente:Elaboración propia

En el mapa de susceptibilidad, desde el kilómetro 38+600 hasta el 55+200, se observa un tramo de susceptibilidad media; sin embargo, dentro de aquel tramo existen áreas con susceptibilidad alta a movimientos en masa. Desde el tramo 44+080 hasta el 44+200 existen hallazgos de la ocurrencia de movimientos en masa, que son una combinación de movimientos traslacionales en cabecera y un flujo de pie.

Según el efecto observado en los eventos suscitados a lo largo de la vía en estudio, se afirma que los movimientos en masa ocurridos en el tramo definido con susceptibilidad media han tenido más impacto en términos de magnitud y daños que los producidos en los primeros 8 km del tramo de estudio. Pese a que la susceptibilidad es media, en dicho tramo existen viviendas y obras de infraestructura que fueron afectadas gravemente con la ocurrencia de los movimientos en masa. En otros tramos con susceptibilidad alta la afectación ha sido menor por la ausencia de obras de infraestructura o zonas habitadas.

Conclusiones

Se aplicaron técnicas de evaluación multicriterio para determinar la susceptibilidad a los movimientos en masa en un tramo vial ubicado en una zona andina del sur del Ecuador. Para el efecto se seleccionaron variables con influencia directa en la ocurrencia de movimientos en masa: geología, pendiente, cobertura y precipitación.

El proceso de evaluación multicriterio permitió definir que la geología fue el factor que más influyó en la ocurrencia de movimientos en masa, ya que es decisivo el tipo de material que conforma el talud y su estado.

La susceptibilidad a movimientos en masa del tramo en estudio es mayoritariamente media. Ello implica una probabilidad leve de ocurrencia de movimientos en masa; no obstante, existen 8 km con una susceptibilidad alta, tramo en el que se esperaría tener deslizamientos rotacionales y traslacionales.

La evaluación multicriterio constituye una herramienta eficiente y eficaz para la elaboración de mapas de susceptibilidad a movimientos en masa, ya que integra distintas capas temáticas relativas al problema planteado y obtiene resultados eficientes en corto tiempo.

Futuros trabajos relacionados con la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio podrían integrar variables como: relieve relativo, distancia a cursos de agua, distancia a vías y riesgo sísmico, entre otras.

Referencias

- [1] E. Aristizábal, T. González, J. D. Montoya, J. I. Vélez, H. Martínez y A. Guerra, "Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia". *Rev EIA*, vol. 8, n.º 15, pp. 95–111, 2011.
- [2] F. Gutiérrez, R. Linares, C. Roqué, M. Zarroca, D. Carbonel, J. Rosell y M. Gutiérrez, "Large landslides associated with a diapiric fold in Canelles reservoir (Spanish Pyrenees): detailed geological–geomorphological mapping, trenching and electrical resistivity imaging", *Geomorphology*, vol. 241, pp. 224–242, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.016>
- [3] C. S. J. Karlsson, Z. Kalantari, U. Mörtberg, B. Olofsson y S. W. Lyon, "Natural hazard susceptibility assessment for road planning using spatial multi-criteria analysis", *Environ. Manage.*, n.º 60, pp. 823–85, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0912-6>
- [4] M. Moharrami, A. Naboureh, T. G. Nachappa, O. Ghorbanzadeh, X. Guan y T. Blaschke, "National-Scale Landslide Susceptibility Mapping in Austria Using Fuzzy Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making", *Int. J. Geo-Inf.*, n.º 9, p. 393, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijgi9060393>
- [5] ElJazouli, A. Barakaty R. Khellouk, "GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco)", *Geoenviron Disasters*, vol. 6, n.º 3, 2019. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0119-7>
- [6] M. Liaghat, H. Shahabi, B. R. Deilami, F. S. Ardabili, S. N. Seyedic y H. Badric, "A multi-criteria evaluation using the analytic hierarchy process technique to analyze coastal tourism sites", *APCBEE Procedia*, n.º 5, pp. 479–485. 2013.
- [7] P. Hernández-Zaragoza, J. R. Valdez-Lazalde, A. Aldrete y T. Martínez-Trinidad, "Evaluación multicriterio y multiobjetivo para optimizar la selección de áreas para establecer plantaciones forestales", *Madera Bosques*, vol. 25, n.º 2, e2521819, 2019. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521819>
- [8] J. Vojteková y M. Vojtek, "Assessment of landslide susceptibility at a local spatial scale applying the multi-criteria analysis and GIS: a case study from Slovakia", *Geomatics, Nat. Hazards and Risk*, vol. 11, n.º 1, pp. 131–148, 2020. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1713233>

- [9] C. Delgado-Caballero, J. Valdez-Lazalde, A. Fierros, H. De Los Santos Posadas, A. Gomez-Guerrero, "Aptitud de áreas para plantaciones de eucalipto en Oaxaca y Veracruz: proceso de análisis jerarquizado vs. Álgebra booleana", *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 1, n.º 1, pp. 123-133, 2010.
- [10] T. L. Saaty, "How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process", *Eur. J. Oper. Res.*, n.º 48, pp. 9-26, 1990.
- [11] L. Ayalew, H. Yamagishi y N. Ugawa, "Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan", *Landslides*, vol. 1, n.º 1, pp. 73-81, 2004.
- [12] A. Bera, B. P. Mukhopadhyay y D. Das, "Landslide hazard zonation mapping using multi-criteria analysis with the help of GIS techniques: a case study from Eastern Himalayas, Namchi, South Sikkim", *Nat. Hazards*, vol. 96, n.º 2, pp. 935-959, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03580-w>
- [13] J. Mallick, R. K. Singh, M. A. AlAwadh, S. Islam, R. A. Khan y M. N. Qureshi, "GIS-based landslide susceptibility evaluation using fuzzy-AHP multi-criteria decision-making techniques in the Abha Watershed, Saudi Arabia", *Environ. Earth Sci.*, vol. 77, p. 276, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7451-1>
- [14] T. L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process", *Int. J. Services Sci.*, vol. 1, n.º 1, pp. 83-98, 2008.
- [15] C. J. Correa Campués, "Análisis de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa en estructuras lineales mediante la utilización de sistemas de información geográfica", tesis de maestría, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador, 2013 [en línea]. Disponible: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/2821>
- [16] F. Oñate-Valdivieso, V. Uchiari y A. Oñate-Paladines, "Large-scale climate variability patterns and drought: a case of study in South - America". *Water Resour. Manage.*, vol. 34, pp. 2061-2079, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02549-w>
- [17] Ministerio de Transportes y Obras Públicas, "Movimientos en masa periodo 2013-2016", 2017 [en línea]. Disponible: <http://www.obraspublicas.gob.ec/>
- [18] M. Litherland, J. A. Aspen y R. A. Jemielita, *The Metamorphic Belts of Ecuador*. Keyword, Nottingham: British Geological Survey, UK, 1994, p. 147.
- [19] Ministerio de Agricultura y Pesca, "Modelo de elevación digital", 2015 [en línea]. Disponible: <http://www.agricultura.gob.ec/>
- [20] Instituto Nacional de Meteorología e Higrología, "Isoyetas", 2018 [en línea]. Disponible: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>
- [21] USGS, "Imagen Satelital Landsat 8", 2017 [en línea]. Disponible: <http://www.usgs.gov/>
- [22] H. Aguilar Arias, R. Mora-Zamora y C. Vargas-Bolaños, "Metodología para la corrección atmosférica de imágenes ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 y LANDSAT 8 con el módulo FLAASH del software ENVI", *Rev. Geogr. Am. Cent.*, vol. 2, n.º 53, 2014. <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- [23] Q. Wu, Y. Jin y H. Fan, "Evaluating and comparing performances of topographic correction methods based on multi-source DEMs and Landsat-8 OLI data", *Int. J. Remote Sens.*, vol. 37, n.º 19, pp. 4712-4730, 2016. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1222101>