

Evaluation and zoning of landslides susceptibility and hazard in the Marocaso River basin, Colombia

Evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en la cuenca del Río Marocaso, Colombia

Moisés Carvajal Angarita ^a

^a Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. mcarvajala@unal.edu.co

Abstract

The Marocaso River basin is located between the municipalities of Riohacha and San Juan del Cesar in the department of La Guajira. This case study aims to perform the evaluation and zoning of susceptibility and hazard models at a 1:25000 scale. The susceptibility model utilized is a combined model, incorporating bivariate methods (Weight of Evidence) and heuristic methods (APH). Additionally, to assess the hazard considering precipitation as a triggering factor, a physically based model called SHALSTAB is employed.

Keywords: Marocaso River, susceptibility, Hazard, landslides, models.

Resumen

La cuenca del Río Marocaso se encuentra localizada entre los municipios de Riohacha y San Juan del Cesar, en el departamento de La Guajira. Para este caso de estudio se busca realizar la evaluación y zonificación de modelos de susceptibilidad y amenaza en escala 1:25000. El modelo utilizado para la susceptibilidad es un modelo combinado, en donde se emplean métodos bivariados (Peso de la Evidencia) y heurísticos (APH). Por otro lado, para determinar la amenaza teniendo en cuenta la precipitación como ente detonante, se utiliza un modelo con base física llamado SHALSTAB.

Palabras clave: Río Marocaso, amenaza, susceptibilidad, movimientos en masa, modelos.

1 Introducción

Los movimientos en masa son fenómenos reiterativos con una gran capacidad destructiva [1] y causan grandes pérdidas tanto económicas como de vidas humanas en todo el mundo [2], por ello, es de suma importancia reconocer la potencial amenaza de estos fenómenos en múltiples zonas mediante la evaluación, zonificación y predicción de su ocurrencia ante la presencia de factores detonantes [3]. Es de gran relevancia el entendimiento de estos eventos, pues al comprender detalladamente cuáles son las zonas susceptibles a movimientos en masa se disminuirá el riesgo ante la presencia de factores detonantes como los sismos o precipitaciones. Por ende, la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza se vuelven un pilar fundamental para el ordenamiento territorial [4].

La evaluación y zonificación de la susceptibilidad ante movimientos en masa está comprendida por diversas metodologías, entre ellas se destacan las basadas en el conocimiento o heurísticas [5] y métodos basados en datos [6]. En el presente trabajo se utilizará el método de Peso de la evidencia o WOE (Weight of Evidence en inglés) que hace parte de los métodos bivariados basados en datos, para determinar la distribución espacial de los movimientos en masa en función de los factores condicionantes que son intrínsecos al área de estudio. Sin

embargo, dicho método no permite generar la evaluación y zonificación de la amenaza ante los movimientos en masa, pues no tienen en consideración el factor detonante.

Colombia es un país tropical de carácter lluvioso, el cual está dominado por terrenos en esencia montañosos debido a la imponente presencia de los Andes Colombianos. Es por esto, que las precipitaciones se presentan como el principal factor desencadenante que promueve la ocurrencia de movimientos en masa [7]. Por lo tanto, se utilizará las precipitaciones como factor detonante, esto conlleva al uso de métodos con base física, específicamente el modelo SHALSTAB.

1.1 Zona de estudio

Para llevar a cabo los métodos de evaluación y zonificación propuestos para la susceptibilidad y amenaza en escala 1:25000, se trabajará en el área rural del departamento de la Guajira, entre los municipios de Riohacha y San Juan del Cesar, específicamente para la cuenca del Río Marocaso o también conocido como Río Saurino. Esta cuenca nace directamente en la Sierra Nevada de Santa Marta a unos 2700 m.s.n.m. aproximadamente y es afluente directo del Río Ranchería a los 600 m.s.n.m. Cuenta con un área de aproximadamente 55.4 km² y un perímetro de 46 km, en general la

cuenca posee una forma alargada y poco ancha, en función a cauce principal, alcanzando un largo de 17 km y un ancho de 4.3 km.

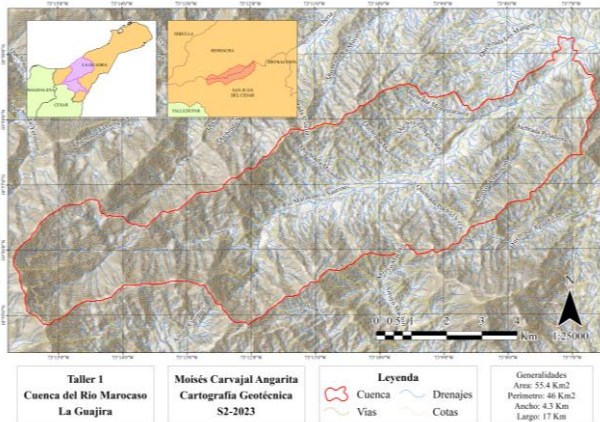


Figura 1. Mapa de localización de la cuenca. Fuente propia.

2 Información requerida

Para generar las evaluaciones y zonificaciones respectivas, se requiere de información tanto regional como local para suministrar variedad de datos que aporten robustez a los métodos empleados. En términos generales, se requiere de la obtención de datos de cartografía base y los factores tanto condicionantes como el detonante.

2.1 Cartografía base

Para generar las salidas visuales, se ocuparon las planchas de cartografía base del IGAC en escala 1:25000, específicamente las planchas 20ID, 20IC, 20ID, 20IIB, 20IVA y 20IVB, las cuales fueron extraídas del portal Colombia en Mapas [8].

2.2 Información secundaria

Como información secundaria, se extraen los factores tanto condicionantes como detonantes para la ocurrencia de movimientos en masa.

2.2.1 Factores condicionantes

Con el objetivo de determinar cómo se distribuirán los eventos a lo largo de la zona de estudio es importante adquirir variables que revelen la disposición del terreno de manera adecuada. Para ello, en la Tabla 1 se muestran los parámetros requeridos en cada modelo en específico.

Tabla 1. Factores condicionantes requeridos para los modelos. Fuente propia.

Factor condicionante	Método Peso de la evidencia	Método SHALSTAB
Geología	X	
Geomorfología	X	
Pendiente	X	X
Curvatura	X	
Aspecto	X	
Flujo acumulado	X	X
Altitud	X	
Cohesión		X
Ángulo de fricción		X
Permeabilidad		X
Peso unitario		X
Espesor		X

La geología y la geomorfología se obtuvieron a partir de la plancha geológica y geomorfológica número 20 (San Juan del Cesar), la cual estaba a escala 1:100000. En particular la geología se ajustó a escala 1:25000 de acuerdo con la disposición del terreno. Por otro lado, la geomorfología se encontraba en escala de unidad, sin embargo, se bajó a nivel de subunidad para lograr trabajar a escala 1:25000. Las variables de las pendientes, curvatura, aspecto, flujo acumulado y altitud se obtuvieron a partir de procesamiento del DEM 12.5 x 12.5. Este DEM fue obtenido de Alos Palsar mediante Alaska Vertex [9].

Los factores adicionales para utilizar el método SHALSTAB se obtuvieron haciendo uso de tablas con parámetros geotécnicos [10], las Tablas 2 y 3 cumplieron este propósito y permitieron, además, clasificar las diversas unidades litológicas.

Tabla 2. Parámetros geotécnicos 1. Fuente [10].

Tipo	Descripción	Peso unitario (kN/m³)		ϕ (°)
		Saturado	Seco	
No cohesivo Suelo	Arena suelta, tamaño de grano de uniforme	19	14	28-34
	Arena densa, tamaño de grano de uniforme	21	17	32-40
	Arena suelta, diferentes tamaños de grano	20	16	34-40
	Arena densa, diferentes tamaños de grano	21	18	38-46
	Grava, tamaño de grano uniforme	22	20	34-37
	Arena y grava, mezcla de tamaños	19	17	48-45
No cohesivo Roca	Roca fracturada o volada: Basalto	22	17	40-50
	Roca fracturada o volada: Granito	20	17	45-50
	Roca fracturada o volada: Limolita	19	16	35-40
	Roca fracturada o volada: Arenisca	17	13	35-45
	Roca fracturada o volada: Lutitas	20	16	30-35
Cohesivos Suelo	Montmorillonita (bentonita blanda)	13	6	7-13
	Arcilla orgánica muy blanda	14	6	12-16
	Arcilla blanda, ligeramente orgánica	16	10	22-27
	Arcilla glaciar blanda	17	12	27-32
	Arcilla glaciar rígida	20	17	30-32
Cohesivo Rocas	Rocas ígneas duras:			
	Granitos, basalto, pórfidos	25	30	35-45
	Rocas metamórficas:			
	Cuarcita, neiss, pizarras	25	28	30-40
	Rocas sedimentarias duras:			
	Limolita, dolomita, areniscas	23	28	35-45
	Rocas sedimentarias blandas:			
	Arenisca, carbón, lutita	17	23	25-35

Tabla 3. Parámetros geotécnicos 2. Fuente [11].

MATERIAL	n'	e _{muestra}	CORRELACIÓN DE PEARSON									
			TIPO	r	r²	m	ϕ'	C'	σ_m	σ_c	σ_v	σ_h
QF IB (OCC)	18	23.1	Directa o positiva muy alta	0.875	0.766	0.592	31	24	0.164	9	26.0	
QF IC (OCC)	191	7.1	Directa o positiva muy alta	0.876	0.768	0.507	27	28	0.040	2	31.5	
QF IC (Oriental)	265	6.0	Directa o positiva muy alta	0.882	0.778	0.493	26	25	0.032	2	33.2	
IB Anfibolita	15	25.3	Directa o positiva muy alta	0.971	0.943	0.592	31	20	0.081	5	16.5	
IB Dunita	22	20.9	Directa o positiva muy alta	0.851	0.724	0.530	28	23	0.146	8	32.6	
IB Gabro	12	28.3	Directa o positiva alta	0.668	0.447	0.590	31	28	0.416	23	37.7	
IB Gneis	21	21.4	Directa o positiva muy alta	0.828	0.685	0.444	24	44	0.138	8	31.4	
IB Granodiorita	25	19.6	Directa o positiva muy alta	0.850	0.723	0.425	23	42	0.110	6	21.2	
IC Anfibolita	152	7.9	Directa o positiva muy alta	0.864	0.746	0.604	31	15	0.057	3	38.2	
IC Diorita	74	11.4	Directa o positiva muy alta	0.842	0.709	0.564	29	22	0.085	5	38.9	
IC Dunita	103	9.7	Directa o positiva muy alta	0.828	0.686	0.492	26	32	0.066	4	44.9	
IC Esquisto	24	20.0	Directa o positiva muy alta	0.972	0.946	0.530	28	13	0.054	3	18.4	
IC Gabro	127	8.7	Directa o positiva muy alta	0.840	0.706	0.514	27	32	0.059	3	42.6	
IC Gneis	190	7.1	Directa o positiva muy alta	0.898	0.806	0.556	29	33	0.040	2	33.0	
IC Granodiorita	287	5.8	Directa o positiva muy alta	0.954	0.909	0.506	27	25	0.019	1	27.2	
IC Granulita	15	25.3	Directa o positiva moderada	0.419	0.176	0.432	23	42	0.519	27	113.3	
IC Migmatita	138	8.3	Directa o positiva muy alta	0.916	0.839	0.638	33	10	0.048	3	34.8	

2.2.2 Factor detonante

Para lograr generar el mapa de amenaza, se requiere información sobre la precipitación media que cae en toda la cuenca en unidades de mm/h. Para este parámetro se utilizó la estación meteorológica PUEBLITO EL HACIENDA [15065020] del IDEAM, la cual está localizada en todo el punto de desfogue. Como estas estaciones ofrecen valores diarios, se realizó un promedio con todos los valores del mes del último año y luego se dividió dicho promedio entre 24, obteniendo así valores horarios.

3 Inventario de movimientos en masa

Es indispensable tener un inventario de movimientos en masa, ya que es la base fundamental para la aplicación de cualquier método [12]. La cuenca del Río Marocaso no tenía una base de datos sobre reportes de movimientos en masa. Se realizó una búsqueda en la base de datos de movimientos en masa reportados en entidades como el SIMMA [13] o GEOHAZARD [14], sin embargo, para la cuenca del Río Marocaso no se contaba con información. Por ende, se generó un inventario de movimientos en masa a partir de imágenes satelitales (Landsat 7 y Sentinel 2) y Google Earth Pro.

El inventario generado, constó de polígonos de todo el movimiento en masa y se logró el registro de movimientos en masa de los años 2004, 2010, 2012, 2015, 2016, 2017, 2021, 2022 y 2023. De manera detallada, se registraron los años en donde se presentó el movimiento, la actividad (Figura 3), el tipo de movimiento en masa (Figura 2) y la fecha de desaparición.

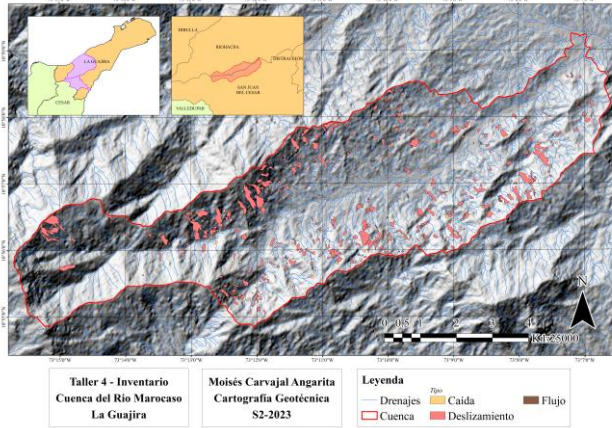


Figura 2. Inventario según tipo de movimiento. Fuente propia.

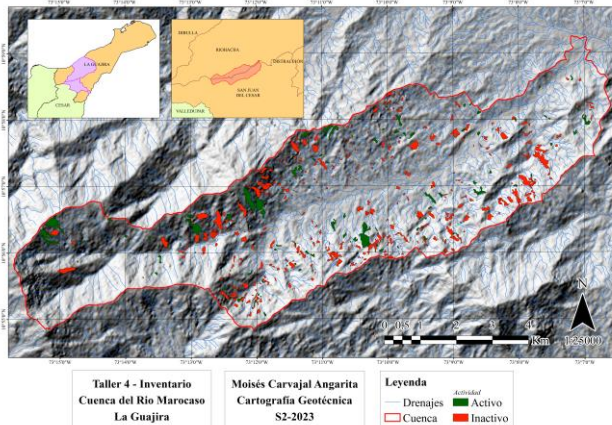


Figura 3. Inventario según actividad. Fuente propia.

En el inventario de movimientos en masa se generó un registro de 598 movimientos en masa, dentro de los cuales se encuentran 521 deslizamientos, 40 caída de rocas y 37 flujos. En particular, hay 146 movimientos activos y 452 están actualmente inactivos.

4 Mapa de susceptibilidad

Para evaluar la probabilidad espacial, se prefirió el “Peso de la Evidencia”, el cual es un método estadístico bivariado [15]. En este método se estudia la relación entre las zonas donde ocurrieron movimientos en masa y la distribución de los factores condicionantes del terreno [16]. En particular, este método da como resultado los pesos de las clases que conforman los factores condicionantes, lo que genera que cada clase tenga una influencia directa sobre la ocurrencia de movimientos en masa [15].

Los pesos positivos (W^+) denotan la presencia de la clase como ente que favorece los movimientos en masa. Del mismo modo, los pesos negativos (W^-) denotan la usencia de la clase en la ocurrencia de movimientos en masa [12]. Dichos pesos se definen como:

$$W^+ = \frac{\frac{A1}{A1 + A2}}{\frac{A3}{A3 + A4}} \quad (1)$$

$$W^- = \frac{\frac{A2}{A1 + A2}}{\frac{A4}{A3 + A4}} \quad (2)$$

En donde:

- A1 es el número de píxeles con movimientos en masa en la clase.
- A2 es el número de píxeles con movimientos en masa fuera de la clase
- A3 es el número de píxeles sin movimientos en masa en la clase
- A4 es el número de píxeles sin movimientos en masa fuera de la clase

Para cada variable, se le puede determinar el peso de contraste (C):

$$C = W^+ + W^- \quad (2)$$

Este valor C indica la asociación que tiene una clase para la predicción de movimientos en masa Rodríguez et al., 2017. Por lo tanto, si:

$$\begin{aligned} C > 0 & \text{ asociación directa} \\ C = 0 & \text{ la clase no afecta} \\ C < 0 & \text{ asociación inversa} \end{aligned}$$

De este modo, se obtiene el peso de cada clase de cada una de las 7 variables. Para posteriormente calcular el Índice de Susceptibilidad (IS) en cada celda, como se aprecia en la siguiente ecuación.

$$IS = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{j=1}^n C_j \quad (3)$$

Cabe destacar que estos procesos funcionan de manera perfecta para variables categóricas, en este caso la geología y la geomorfología. Por lo tanto, las variables continuas son

convertidas a categóricas de manera manual, para facilitar este proceso, se tomaron en cuenta los Natural Breaks de los histogramas de densidad en función de los movimientos en masa (Figura 4) y las zonas donde se cruzan los datos de densidad con y sin movimientos en masa.

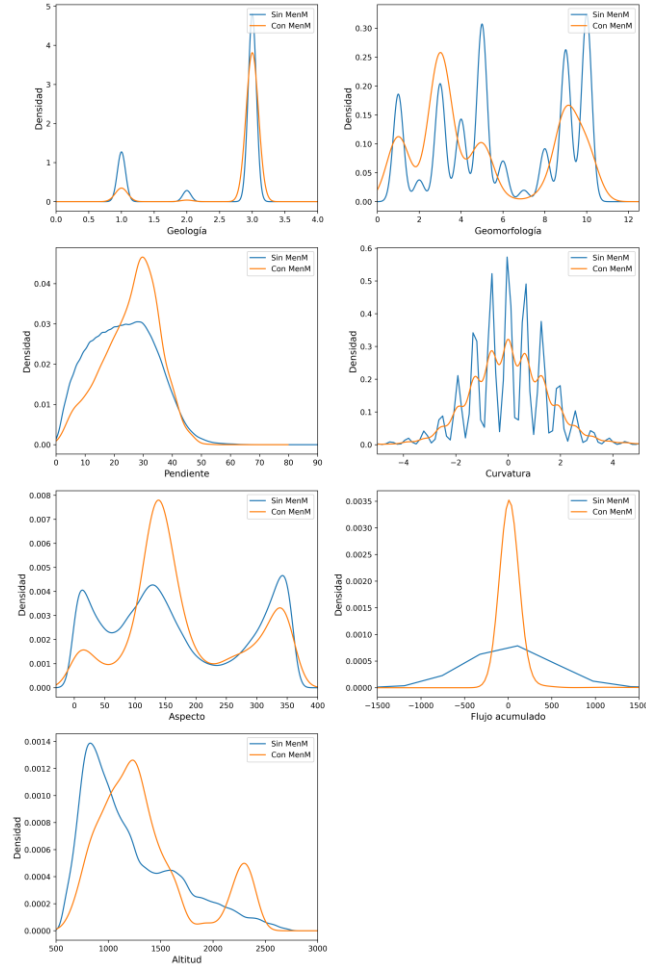


Figura 4. Histograma de densidad en función de movimientos en masa. Fuente propia.

De esta manera, la pendiente, la curvatura, el aspecto, el flujo acumulado y la altitud son transformados a variables categóricas, a las cuales ya se les puede aplicar el método del peso de la evidencia. Al aplicar este método se obtienen los pesos de las clases que sería igual al peso de contraste.

En búsqueda de obtener un modelo más preciso, se tiene en cuenta que a las variables no es posible asignárseles peso, por lo tanto, se consideró combinar el método bivariado con el método heurístico APH. Obteniendo así el siguiente Índice de Susceptibilidad:

$$IS = W_1C_1 + W_2C_2 + \dots + W_nC_n = \sum_{j=1}^n W_jC_j \quad (4)$$

Para realizar el análisis jerárquico de procesos (APH) se hace uso de una matriz de Saaty, a la cual se le asignaron valores coherentes entre las posibles relaciones de los valores condicionantes (Figura 5). La asignación de valores en la matriz fue exitosa, pues se obtuvo un radio de consistencia inferior al 0.1, siendo 0.08.

De esta manera, se puede determinar que el mayor vector propio sacado a partir de la matriz de Saaty indica el peso para cada variable (Tabla 4).

Geología		3	0.14	0.2	1	0.33333333	1
Geomorfología	0.33		0.142857143	0.142857143	0.333333333	0.333333333	1
Pendiente	7	7		1	1	3	7
Curvatura	5	7	3		3	3	5
Aspecto	1	3	1	0.333333333		0.333333333	1
Flujo	2	3	0.333333333	0.333333333	3		7
Altitud	1	1	0.142857143	0.2	1	0.142857143	1

Figura 5. Matriz de Saaty. Fuente propia.

Tabla 4. Pesos de las variables. Fuente propia.

Variables condicionantes	Peso
Geología	0.059278
Geomorfología	0.034674
Pendiente	0.276465
Curvatura	0.273753
Aspecto	0.095086
Flujo acumulado	0.161765
Altitud	0.046163

Finalmente, se puede obtener el Índice de Susceptibilidad a partir de la Ecuación 4.

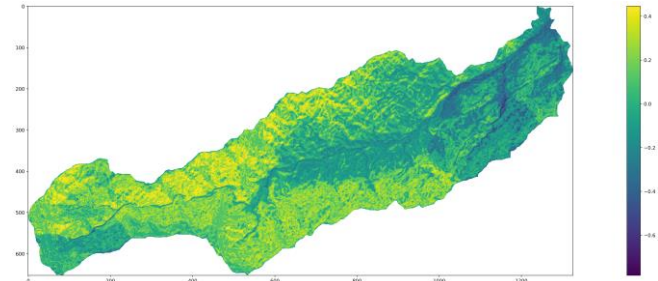


Figura 6. Mapa de susceptibilidad. Fuente propia.

4.1 Evaluación del modelo

Posterior a la realización del modelo combinando entre el método bivariado WOE con el método heurístico APH, se procede a evaluar la eficacia de este modelo.

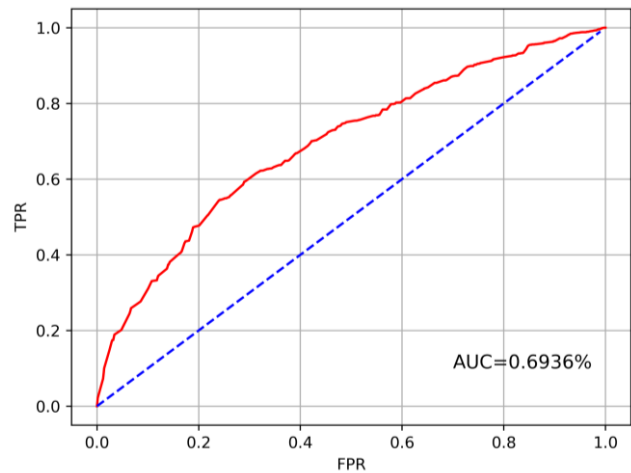


Figura 7. Curva ROC. Fuente propia.

La curva que se obtiene al graficar las tasas de datos correctamente identificados como sensibilidad se conoce como curva ROC (Figura 7). Esta curva se construye al evaluar las predicciones con diversos umbrales propuestos para las probabilidades de fallo, convirtiendo así la gráfica en un evaluador binario. El área bajo la curva en la curva ROC representa la eficiencia con la que el modelo puede predecir eventos, siendo un indicador clave de su rendimiento predictivo.

De esta manera, el área bajo la curva da un valor de 0.6936%, el cual es un dato lo suficientemente robusto para determinar la veracidad del modelo propuesto.

4.2 Mapa de zonificación de la susceptibilidad

Como se identificó mediante la curva ROC, el modelo propuesto presenta un AUC aceptable y robusto para usarse. De esta manera, se utiliza la gráfica para establecer los límites de zonificación respectivos (Figura 8).

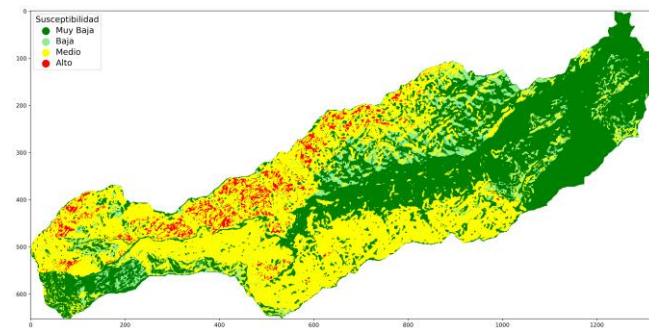


Figura 8. Mapa de zonificación de la susceptibilidad. Fuente propia.

5 Mapa de amenaza a partir de precipitaciones como factor detonante.

La Lluvia es el factor detonante principal en zonas tropicales como Colombia [7], por dicha razón, evaluar la probabilidad temporal de la ocurrencia de movimientos en masa desencadenados por precipitaciones es de suma importancia, ya que acompañados de la probabilidad espacial, permite generar el mapa de amenaza.

Con el fin de conocer la respuesta de la cuenca para determinado evento de lluvia, se utilizó el método SHALSTAB (Montgomery & Dietrich, 1994). Para llevar a cabo este modelo, es necesario tener datos geotécnicos como la cohesión, fricción, peso unitario, profundidad y permeabilidad, además, se requieren parámetros previamente usados como la pendiente y el flujo acumulado.

De esta forma, se generó un mapa para la zona de estudio, que presenta cuatro escenarios como respuesta a los eventos de lluvia, los cuales son: estable (4), inestable (3), incondicionalmente inestable (2) e incondicionalmente estable (1). Además, se generó un segundo mapa que permite determinar a qué valores de precipitaciones fallan las celdas en las cuencas [7].

Dichos parámetros geotécnicos se estimaron gracias al uso de las Tablas 3 y 4, y de múltiples valores de permeabilidades para determinadas litologías [10]. En cuanto al evento detonante, se estimó una intensidad de 70 mm/h, el cual se clasificaría de alta intensidad.

Es notorio que las celdas inestables en la Figura 9 no se presentan con tanta continuidad, posiblemente por los parámetros de la reología presente en la cuenca. Lo que es claro, es el dominio de las celdas incondicionalmente estables en zonas regularmente de pendientes bajas y el dominio de las celdas incondicionalmente inestables sobre vertientes con mayor pendiente.

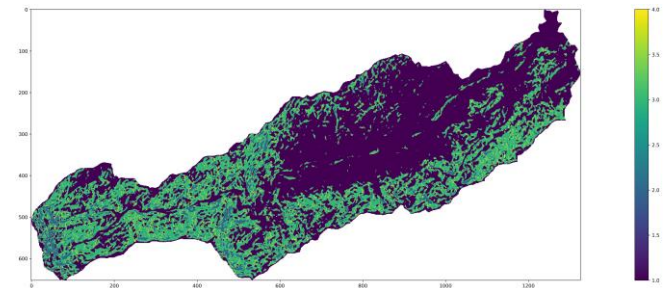


Figura 9. Mapa de estabilidad para eventos de lluvia. Fuente propia.

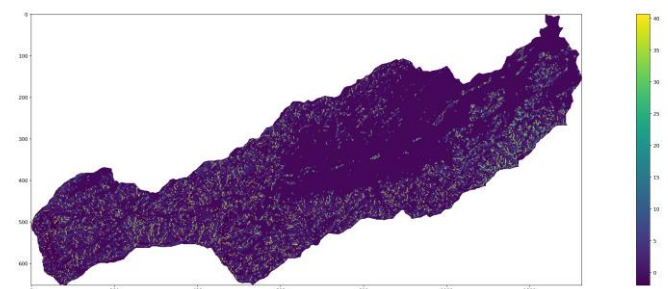


Figura 10. Mapa de intensidad necesaria para el fallo. Fuente propia.

Referencias

- [1] A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps”, Eng. Geol., Vol. 58, N.º 3-4, pp.271-289, dic. 2000.
- [2] Schuster, R.L., Highland, M.L. 2001. Socioeconomic and environmental impacts of landslides in the Western Hemisphere. Open file report 01-0276. USGS.
- [3] Aleotti P.; Chowdhury R. 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Volume 58, Number 1. Pág. 21-44.
- [4] Changnon, S., Pielke Jr., R., Changnon, D., Sylves, R., Pulwarty, R., 2000. Human factors explain the increased losses from weather and climate extreme. Bull. Am. Meteorol. Soc. 81(3), 437-442.
- [5] J. I. Barredo, A. Benavides, J. Hervás y C. J. Van Westen, “Comparing Heuristic Landslide Hazard Assessment Techniques Using gis in the Tirajana Basin, Gran Canaria Island, Spain”, Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., vol. 2000, n.º 1, pp. 9–23, 2000.
- [6] H. Hong, B. Pradhan, C. Xu y D. Tien Bui, “Spatial Prediction of Landslide Hazard at the Yihuang Area (China) Using Two-class Kernel Logistic Regression, Alternating Decision Tree and Support Vector Machines”, Catena, vol. 133, pp. 266-281, 2015.
- [7] Sánchez, O., y Aristizábal, E. (2017). Análisis de los impactos por movimientos en masa en Colombia. XVI Congreso Colombiano de Geología, Santa Marta, Colombia.
- [8] IGAC, Colombia en Mapas. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-74.0163482980649,6.942731541838988,-73.60916751193263,7.177827806194858,4686&b=igac&l=168&u=0&t=23&servicio=5#>.
- [9] Alos Palsar, Data Search Vertex. <https://search.asf.alaska.edu/#/>

- [10] Hoek, E. and Bray, J.W. Rock slope engineering. Institution of Mining and Metallurgy, London. 1981.
- [11] J. D. Echeverry Aguilar, «Correlación de parámetros de resistencia con propiedades índice y de clasificación para 7 suelos producto de la meteorización en el Valle de Aburrá y municipios aledaños,» Medellín, 2019.
- [12] E. Aristizábal, Libro Cartografía Geotécnica. Universidad Nacional. https://edieraristizabal.github.io/Libro_cartoGeotecnia/.
- [13] Servicio Geológico Colombiano – Sistema de información de movimientos en masa (SIMMA). <https://simma.sgc.gov.co/#/>
- [14] GEOHAZARD, grupo de investigación. Geovisor. <https://geohazards.com.co/visor-geohazard.html>
- [15] Van Westen, C.J., Rengers, N., and Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*,30(3), 399-419.
- [16] Regmi, N.G., Giardino, J.R., and Vitek, J.D. (2010). Modeling susceptibility to landslide using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115(1-2), 172-187.