

Tlamati Sabiduría



Zonificación de la susceptibilidad por inestabilidad de laderas en la Subcuenca Río Unión RH20Ec, Estado de Guerrero

Ignacio Ari-Zhaell Pardo-Pedrote¹
Rosalva Pérez-Gutiérrez^{2*}

¹Colectivo para la Evaluación y Prevención de Riesgos Geológicos: Tlalli Chabacano 4, Col. Juan N. Álvarez, 40020, Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

²Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero. Ex Hacienda de San Juan Bautista s/n, 40323, Taxco el Viejo, Guerrero, México.

*Autor de correspondencia
rperezg@uagro.mx

Resumen

En septiembre de 2013, y como resultado del impacto de los fenómenos hidrometeorológicos Ingrid y Manuel, 58 comunidades de la Región de la Montaña del estado de Guerrero sufrieron afectaciones importantes por procesos de remoción en masa (PRM); de ahí el interés por identificar los factores que condicionaron la ocurrencia de estos procesos y con ello contribuir en la mitigación del riesgo. En la zonificación de la susceptibilidad a PRM, se empleó la metodología de Macrozonificación, ampliamente utilizada en el estudio de cuencas en regiones tropicales y subtropicales, definiendo como área de estudio el límite de la subcuenca RH20Ec, que incluye parte de los municipios de Malinaltepec, Tlacoapa, Zapotitlán Tablas, Acatepec, Atlixnac y Ayutla de los Libres. Se consideraron cinco factores condicionantes: litología, pendiente del terreno, uso de suelo y vegetación, densidad de drenaje e índice de humedad topográfica. La ponderación de las variables se realizó a partir de la matriz de comparación por pares o matriz de Saaty. Se obtuvo un mapa donde se representan cinco niveles de susceptibilidad a procesos de remoción en masa (PRM): muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. Se generó un inventario de deslizamientos tratando de acotar aquellos eventos relacionados con los fenómenos hidrometeorológicos Ingrid y Manuel en el año 2013, para

Información del Artículo

Cómo citar el artículo:

Pardo-Pedrote, I.A., Pérez-Gutiérrez, R. (2024). Zonificación de la susceptibilidad por inestabilidad de laderas en la Subcuenca Río Unión RH20Ec, Estado de Guerrero. *Tlamati Sabiduría*, 18, 156-177.

Editores Invitados: Dra. Rosalva Pérez-Gutiérrez, Dr. Oscar Frausto-Martínez, Dr. Julio Cesar Morales-Hernández.

este propósito se empleó el conjunto de imágenes satelitales provistas por diversos sensores (Lansat, Copernicus, Maxar, entre otros) alojadas en Google Earth, obteniendo un total de 1,305 registros. Estos puntos fueron contrastados con el modelo multicriterio de susceptibilidad, resaltando que el 91.4% de los registros (1,193) coinciden con niveles de susceptibilidad alta y muy alta, permitiendo validar el modelo.

Palabras clave: Peligros hidrogeológicos, Procesos gravitacionales, Análisis multicriterio.

Abstract

In September 2013, as a result of the impact of the hydrometeorological phenomena Ingrid and Manuel, 58 communities in the Mountain Region of the state of Guerrero suffered significant damages due to mass movement processes. Therefore, there was an interest in identifying the factors that conditioned the occurrence of these processes and thereby to contribute to risk mitigation. The methodology of Macrozonification widely used in the study of basins in tropical and subtropical regions, was employed for the zoning of susceptibility to mass movement processes. The study area was defined as the boundary of the RH20Ec sub-basin, which includes parts of the municipalities of Malinaltepec, Tlacoapa, Zapotitlán Tablas, Acatepec, Atlixac, and Ayutla de los Libres. Five conditioning factors were considered: lithology, terrain slope, land use and vegetation, drainage density, and topographic moisture index. The weighting of the variables was carried out based on the pairwise comparison matrix or Saaty matrix. A map was obtained representing five levels of susceptibility to mass movement processes: very low, low, medium, high, and very high. An inventory of landslides was generated, aiming to identify events related to the hydrometeorological phenomena Ingrid and Manuel in 2013. For this purpose, satellite images from various sensors (Landsat, Copernicus, Maxar, among others) hosted on Google Earth were used. A total of 1,305 records were obtained. These points were compared with the multicriteria susceptibility model and 91.4% of the records (1,193) coincided with high and very high susceptibility levels, validating the model.

Keywords: Hydrogeological hazards, Gravitational processes, Multicriteria analysis.

Introducción

En el periodo 2000-2020, la Base de Datos Internacional de Desastres (EM-DAT) registró un total de 7,348 eventos relacionados con fenómenos naturales en todo el mundo (UNDRR, 2020). Los sucesos asociados a fenómenos hidrometeorológicos fueron los más frecuentes, mientras que los geológicos ocuparon el segundo puesto, siendo los sismos los de mayor impacto. Menos del 1% de las incidencias corresponden a Procesos de Remoción en Masa (PRM). Sin embargo, en este informe se ha documentado un incremento sustancial respecto al periodo 1980-1999 (UNDRR, 2020).

México ha sufrido afectaciones económicas y pérdidas humanas derivadas del fenómeno de inestabilidad de laderas. Algunos casos relevantes, por el número de pérdidas humanas y daños materiales, son Tijuana, Baja California (1993); Teziutlán, Puebla (1999); el Río Grijalva, Chiapas (2007); Santa María Tlahuitoltepec, Oaxaca (2010) y La Pintada, Guerrero (2013) (Alcántara-Ayala, 2004; Hinojosa-Corona *et al.*, 2011; CENAPRED, 2019; El País, 2010).

Son múltiples las condiciones fisicogeográficas que predisponen las amenazas y los riesgos en el Estado de Guerrero. En principio, se ubica en el límite donde la Placa de Cocos subduce la Placa

Norteamericana, por lo que es una zona de intensa actividad sísmica. En segundo lugar, se encuentra en la Zona de Convergencia Intertropical, donde la dinámica de los vientos fríos provenientes del norte y cálidos del sur propicia las condiciones para la generación de tormentas y ciclones. Adicionalmente, la transformación del medio, el crecimiento poblacional y el cambio climático, han obligado a los ciudadanos a habitar zonas de actividad intensa ante agentes modeladores del paisaje como lechos de ríos, cárcavas, laderas con pendientes pronunciadas, lagos y otros escenarios, que tienen potencial de riesgo. Respecto de los aspectos socioeconómicos, Guerrero es el segundo estado más pobre del país, situación que se acentúa con índices de rezago y marginación altos (CONEVAL, 2022).

Referente a los PRM, Guerrero ha tenido diversos episodios como los ocurridos en La Pintada (2013), Taxco de Alarcón (2017), Huitzapula (2015, 2021), Chilpancingo de los Bravo (2013, 2015), El Cuahulote, Cualác (2017) y Pie de Cuesta, Atoyac (2013). Una de las zonas más afectadas por este fenómeno es la Región de La Montaña, que comprende 19 municipios, de los cuales Malinaltepec, Acatepec Zapotitlán Tablas, Tlapa, Xalpatláhuac y Tlacoapa han sido los más afectados, siendo necesaria la relocalización de viviendas e infraestructura de algunas comunidades.

Las condiciones físicas predominantes en la zona, que incluyen a la litología, la pendiente y la humedad natural del terreno, aunado a las transformaciones derivadas de factores antrópicos como la deforestación, la tala clandestina y los incendios forestales, que modifican la cobertura vegetal, juegan un papel importante en la delimitación de sitios potenciales para la ocurrencia de PRM. Los fenómenos hidrometeorológicos y la actividad sísmica, próxima a la región, potencian la amenaza.

Por ello, es necesario representar cartográficamente a los elementos involucrados en su ocurrencia, a fin de determinar y zonificar niveles de susceptibilidad, para facilitar su comprensión y que sea de utilidad como un instrumento para la toma oportuna de decisiones en materia de gestión integral ante estos fenómenos.

Metodología

Para cumplir con el propósito de zonificar el fenómeno de inestabilidad de laderas en la Región de La Montaña, y en apego a las consideraciones de la metodología sobre su aplicación en cuencas, se designó como área de estudio el polígono de la Subcuenca Hidrológica Río Unión RH20Ec (Figura 1), perteneciente a la Cuenca Río Papagayo de la Red Hidrológica Costa Chica-Río Verde, que se extiende por un área de 1542.58 km² y 221.87 km perimetrales y elevaciones máxima y mínima de 2890 y 300 msnm, respectivamente. La longitud de la red principal es de 110.13 km, integrada por la convergencia de los ríos Malinaltepec y Acatepec para formar el Río Velero. El área, incluye comunidades de los municipios de Atlixnac, Malinaltepec, Tlacoapa, Zapotitlán Tablas, Acatepec y Ayutla de los Libres.

En el proceso de creación de modelos para la zonificación de PRM, deben cumplirse diversas condiciones (Oliva-González, 2015): 1) que exista la evidencia y documentación necesaria para realizar un diagnóstico preliminar y un seguimientos del comportamiento del fenómeno en determinada área, 2) la identificación de los elementos que convergen para la generación de escenarios de susceptibilidad ante determinado peligro, 3) un método estadístico que permita la transformación de variables cualitativas en valores cuantitativos que puedan ser expresados y calculados numéricamente, y 4) hacer uso de Sistemas de Información Geográfica para el análisis, integración y representación de los datos obtenidos.

Para la generación del modelo de susceptibilidad ante la ocurrencia de PRM se aplicó la metodología de Macrozonificación también conocida como Mora y Vahrson (1994), ésta permite el análisis conjunto de diversos factores condicionantes y desencadenantes. Considera como factores condicionantes a todos aquellos que representan la estabilidad del terreno, variables continuas y que no sufren modificaciones sustanciales con el paso del tiempo como las rocas en términos de su composición, textura y estructura, es decir, elementos que determinan su resistencia ante

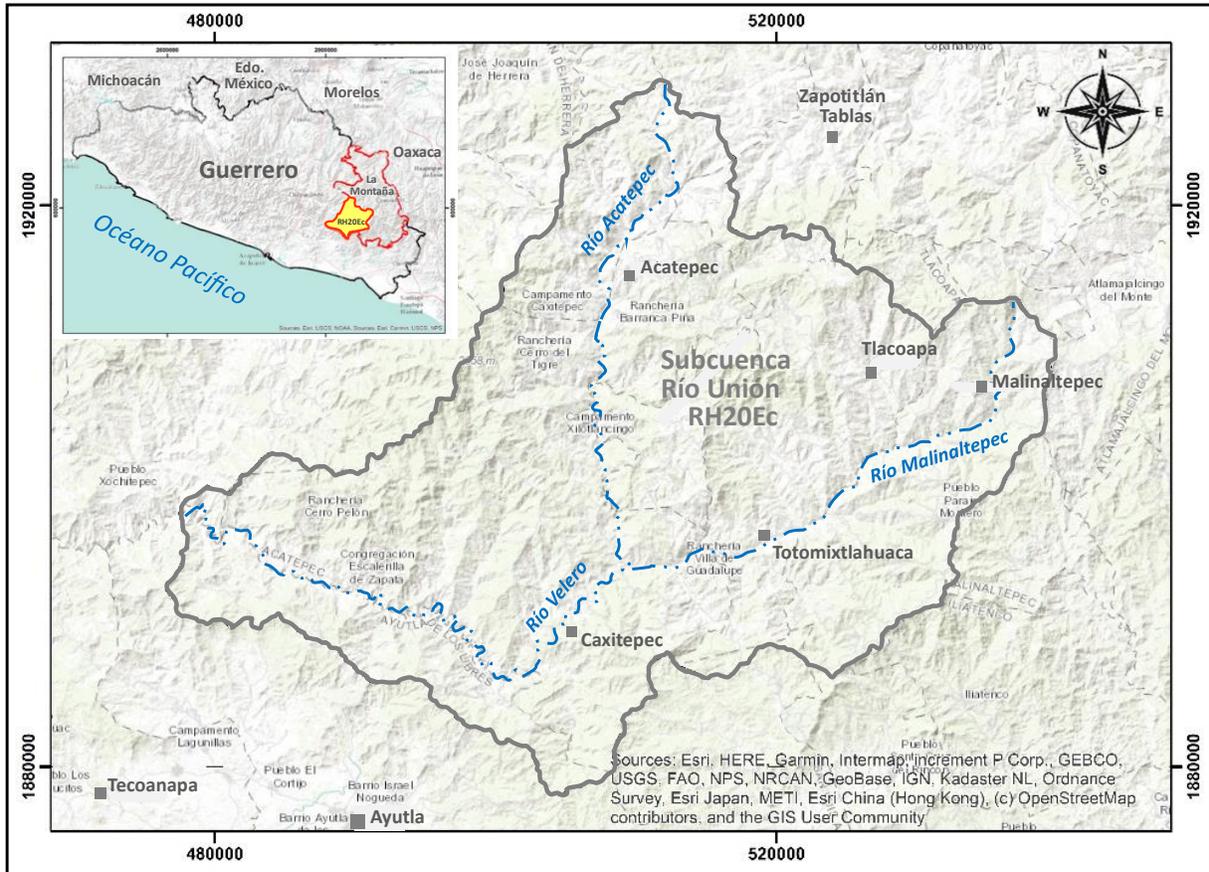


Figura 1. Ubicación de la Subcuenca Río Unión RH20Ec en la porción suroeste de la Región de la Montaña, al oriente del Estado de Guerrero.

procesos de intemperismo y erosión. La pendiente, toda vez que el grado de inclinación de la ladera puede alterar el ángulo de reposo de los materiales favoreciendo su desplazamiento. La permeabilidad, que puede controlar el nivel de absorción de agua en los materiales (suelo y rocas) aumentando su peso y modificando su estructura en términos de expansión de contracción. La cobertura vegetal, pues elementos como las raíces, pueden funcionar como un anclaje natural, pero también como promotor de disgregación de las rocas por intemperismo mecánico. La edafología en función de su composición, por ejemplo, la presencia de arcillas expansivas, compacidad, granulometría, textura y estructura. Por otro lado, los factores desencadenantes serán aquellos que rompen con la estabilidad del terreno y pueden provocar modificaciones agresivas en él, como las lluvias,

los sismos, las erupciones volcánicas y las actividades antropogénicas a mediana escala, tales como la minería intensiva, desarrollo de carreteras y en general, cualquiera que provoque modificaciones sustanciales en la topografía por el desplazamientos de volúmenes importantes de masas en un periodo corto, en el orden de meses o un par de años.

Las variables seleccionadas para el presente estudio fueron cinco: 1) pendiente del terreno (pT), 2) litología (Lt), 3) uso de suelo y vegetación (USV), 4) densidad de drenaje (Dd), y 5) índice de humedad topográfica (IHT o TWI, por sus siglas en inglés, *Topographic Weatness Index*).

Los elementos pT, Dd e IHT, derivaron del análisis morfométrico en un ambiente SIG de un Modelo Digital de Elevación (MDE) *Airbus World4DEM* con resolución 24 m/px. El mapa de

uso de suelos y vegetación, se generó con base en la metodología propuesta por el IDEAM (2010) que es una modificación y adaptación para Latinoamérica del método CORINE-Landcover, producto de la clasificación supervisada de imágenes satelitales *Lansat 8*, obtenidas de *Earth Explorer*. Las imágenes fueron elegidas considerando niveles de nubosidad menores al 10% a las cuales se aplicó un tratamiento preliminar de corrección atmosférica, para minimizar el efecto de los aerosoles en las firmas espectrales de los elementos propios del terreno. Posteriormente, se seleccionaron clústeres de píxeles que fueron asignados a categorías en función de las coberturas observadas en campo. Finalmente, en la actualización de la cartografía litológica se consideró como base la información geológica en escala 1:250,000 del INEGI y el SGM, ya que para el área no hay disponibilidad en escala 1:50,000. En el análisis de esta información y con base en el conocimiento previo del área de estudio, se identificaron inconsistencias en los límites de las unidades y en la tipología de rocas representadas, por lo que se realizó la reinterpretación de los contactos a partir de un modelo de sombras en función de los cambios texturales, tonalidades de grises, cauces y parteaguas en la cuenca. Los límites interpretados y la distribución de las unidades de roca fueron comprobados con el trabajo de campo y, posteriormente, corregidos hasta obtener el producto final.

La información base tanto en formato ráster (variables continuas) como vectoriales (variables discretas) posee resoluciones y escalas diferentes, por lo que tuvieron que ser homogeneizadas con base en el criterio de área mínima cartografiable (AMC) para que los archivos de salida fueran en escala 1:100,000.

Con la finalidad de realizar un diagnóstico preliminar de la inestabilidad de laderas, se realizó un inventario de deslizamientos no diferenciados (sin considerar mecanismos de rotura) asociados a los fenómenos hidrometeorológicos Ingrid y Manuel (2013). Este insumo se elaboró mediante imágenes satelitales provistas por diversos sensores (*Lansat*, *Copernicus*, *Maxar*, entre otros) alojadas en *Google Earth*, obteniendo un total de 1,305 registros.

Estos puntos se utilizaron como *fishnet* (red de pesca) o como estaciones de muestreo, a través de las cuales se extrajeron los valores asignados a las subclases de las capas vectoriales y ráster, con la finalidad de identificar las condiciones particulares de cada caso. Una vez generada la base de datos, se contabilizó el número de incidencias en cada subclase y para cada una de las variables, a fin de obtener los rangos dominantes o de mayor ocurrencia ante PRM, donde resaltaron las siguientes observaciones: 1) La unidad litológica donde ocurrieron más eventos fue la secuencia volcánico sedimentaria metamorfozada (Tabla 1), con un total de 596, es decir, el 45.67% del total, seguido por las calizas con 275 (21.07%); 2) Los intervalos de pendientes predominantes fueron 16-35° con 880 registros (63,7%) y 35-55° con 325 (24.90%) (Tabla 2), sólo en estos dos dominios se acumularon el 88.6% del conteo total; 3) En el uso de suelo y vegetación se reconoció a la unidad de bosques dispersos como la más propicia para la ocurrencia de PRM, teniendo un total de 878 sucesos (67.28%) (Tabla 3) seguido por la unidad de matorrales y pastizales (naturales e inducidos) con 177 (13.56%) y 182 (13.95%), respectivamente; 4) En la variable de densidad de drenaje (Tabla 4), las concentraciones de puntos se dieron en las categorías donde la relación de longitud de los cauces entre unidad de área fue superior a 2 km/km², con un recuento de 655 (50.19%) en el rango de 2-3 km/km² y 538 (41.23%) en el > 3 km/km², en decir, solo estos valores reunieron el 91.42% del total de registros; y, 5) En la condicionante por IHT, que es representada por unidades adimensionales, fueron el nivel 2 y 3 los predominantes con 678 (51.95%) y 344 (26.36%) incidencias, respectivamente (Tabla 5).

Los valores de factor de seguridad (Fs) asignados a cada componente de las variables empleadas, parten de los lineamientos establecidos en la bibliografía, de la información obtenida a partir del inventario de deslizamientos, así como de las observaciones realizadas en campo (Tablas 6, 7, 8, 9 y 10). Los valores de factor de seguridad (Fs) asignados a cada componente de las variables empleadas, parten de los lineamientos establecidos en la bibliografía,

Tabla 1. Deslizamientos por unidad litológica.

Litología	Registros	Porcentaje (%)
Riolita	0	0.00
Aluvial	2	0.15
Arenisca-Lutita	36	2.76
Conglomerado Limolita	45	3.45
Conglomerado Caliza	154	11.80
Granito-Granodiorita	197	15.10
Caliza	275	21.07
Secuencia volcánico sedimentaria metamorfizada	596	45.67
Total	1305	100.00

Tabla 2. Deslizamientos por rango de pendiente.

Rango pendiente	Registros	Porcentaje (%)	Condiciones del terreno
0-2	0	0	Planicie sin denudación apreciable
2-4	3	0.23	Pendiente muy baja, peligro de erosión
4-8	6	0.46	Pendiente baja, peligro severo de erosión
8-16	91	6.97	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligros de erosión severa
16-35	880	67.43	Pendiente fuerte, procesos de denudación intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos
35-55	325	24.90	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos de denudación intensos, reforestación difícil
>55	0	0	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos de denudación severos (caída de rocas) cobertura vegetal limitada
Total	1305	100	

Tabla 3. Deslizamientos por unidad de uso de suelo y vegetación.

Clase	Registros	Porcentaje (%)
Bosques dispersos	878	67.28
Matorrales	177	13.56
Pastizales (naturales e inducidos)	182	13.95
Cultivos	0	0
Construcciones	0	0
Suelo desprovisto o de escasa vegetación	68	5.21
Cuerpos de agua	0	0
Total	1305	100

Tabla 4. Deslizamientos por rango de densidad de drenaje.

Rango (Km/Km ²)	Registros	Porcentaje (%)
<1.0	1	0.08
1.0-2.0	111	8.51
2.0-3.0	655	50.19
>3.0	538	41.23
Total	1305	100

Tabla 5. Deslizamientos por nivel de índice de humedad topográfica.

Nivel	Registros	Porcentaje (%)
1	31	2.38
2	678	51.95
3	344	26.36
4	161	12.34
5	91	6.97
Total	1,305	100

de la información obtenida a partir del inventario de deslizamientos, así como de las observaciones realizadas en campo (Tablas 6, 7, 8, 9 y 10).

Estas observaciones integradas al proceso de análisis heurístico sobre la inestabilidad de laderas en el área de la Subcuenca RH20Ec, permitió inferir una escala de jerarquía entre las variables. Sin embargo, aún era necesaria la conversión de estas premisas en valores numéricos a partir de los cuáles se pudiera hacer un cálculo con el fin de integrar estos conocimientos en un producto único, el mapa de susceptibilidad. Cumpliendo con este objetivo, se utilizó el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, también llamado Matriz de Saaty) que está diseñado para resolver problemas multivariantes complejos (Saaty, 1980). El método requiere que los tomadores de decisiones hagan juicios subjetivos sobre la importancia relativa de cada variable y luego determinen las preferencias para cada alternativa.

Tabla 6. Factor de seguridad por rango de pendiente.

Pendiente (rangos)	Fs
0-2	1
2-4	2
4-8	3
8-16	4
16-35	5
35-55	6
>55	7

Tabla 7. Factor de seguridad por unidad litológica.

Litología	Fs
Riolita	1
Granito-Granodiorita	2
Arenisca-Lutita	3
Conglomerado Limolita	3
Caliza	3
Conglomerado Caliza	4
Secuencia volcánico sedimentaria metamorfizada	4
Aluvial	5

Tabla 8. Factor de seguridad por unidad de uso de suelo y vegetación.

USV (clases)	Fs
Cuerpos de agua	0
Construcciones	1
Cultivos	2
Suelo desprovisto o de escasa vegetación	3
Matorrales	4
Pastizales (naturales e inducidos)	4
Bosques dispersos	5

Tabla 9. Factor de seguridad por rango de densidad de drenaje.

Dd	Fs
<1.0	1
1.0-2.0	2
2.0-3.0	3
>3.0	4

Tabla 10. Factor de seguridad por nivel de índice de humedad topográfica.

IHT	Fs
1	1
5	2
4	3
3	4
2	5

El AHP da como resultado una jerarquía que enfatiza la tendencia de cada decisión y sus alternativas y, permite la inclusión de elementos cualitativos que normalmente se excluyen del análisis debido a la complejidad de la medición, pero que pueden ser significativos en muchos casos. Para ello se tiene en cuenta la experiencia de decisores, expertos e investigaciones *in situ*, y en este sentido también posibilita una decisión grupal conteniendo opiniones, de manera que se cumple una relación mutua al comparar dos objetos.

La metodología tradicionalmente consta de tres fases: i) valoración, ii) normalización y iii) priorización, estos datos finalmente son validados a través del Índice de consistencia (CI), que refleja la desviación de los juicios respecto de las prioridades u objetivos; Ratio o razón de consistencia (CR), que es el valor obtenido de dividir CI, por el valor esperado e Índice de consistencia, que se obtiene de la matriz de comparaciones por pares generada en forma aleatoria.

La construcción de la matriz implica seguir una serie de pasos:

1) En la matriz de comparación de pares, se evalúa la intensidad de preferencia de un factor contra otro. Se seleccionan los valores con el apoyo de la escala ordinal de comparación desarrollada por Saaty (1980), la cual incluye valores entre 1-9 y sus inversos, 1/3-1/9 (Tabla 11).

2) La matriz se diseñó partiendo de la cantidad de componentes o criterios a comparar, en este caso se realizó una matriz de 5 x 5. El análisis se inició comparando filas con respecto de columnas, y para rellenar las celdas se agregaron número enteros sólo en la parte superior respecto de la diagonal del centro, cuyo valor siempre será igual a 1, por ser una comparación entre el mismo factor y, por tal motivo, de igual magnitud (Tabla 12). Los valores de celdas por debajo de la diagonal fueron asignados automáticamente agregando la función 1 entre el valor establecido, de forma que, si para un factor A respecto de B tuvo un valor de 3, entonces B respecto de A tendría un valor de 1/3.

3) Para explicar este paso, se tomó como referencia la columna que contiene la asignación de los valores de la pendiente, en contraste con los factores descritos en las filas.

Pendiente vs Litología. Es importante señalar que el macizo rocoso y sus características de compacidad, permeabilidad; así como, la presencia de estructuras geológicas, como fallas y fracturas, representa por sí mismo una condición de susceptibilidad cuya relación con la pendiente del terreno es indivisible, puesto que someterá en mayor o menor medida a los materiales a un estrés adicional, dependiendo del ángulo de inclinación. Es entonces que, al ser dos de los factores imprescindibles para el estudio del fenómeno de inestabilidad de laderas, se consideran vectores paralelos, por ende, la relación entre ellos será de igual importancia. Teniendo en cuenta esa premisa, y con base en la postulación verbal en la Tabla 11, se ha asignado el valor 1.

Pendiente vs Uso de suelo y vegetación. En el USV, se plasma el espacio geográfico, donde los seres humanos desarrollan comunidades y actividades económicas e identifica su distribución respecto al medio natural, esta información es importante para la determinación

Tabla 11. Guía para la asignación de valores.

Valor numérico	Postulación verbal	Descripción
9	Absoluta o muchísimo más importante o preferido que:	Al comparar un factor contra otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo
7	Mucho más importante o preferido que:	Al comparar un factor contra otro, el primero se considera mucho más importante o preferido que el segundo
5	Más importante o preferido que:	Al comparar un factor contra otro, el primero se considera más importante o preferido que el segundo
3	Ligeramente más importante o preferido que:	Al comparar un factor contra otro, el primero se considera ligeramente más importante o preferido que el segundo
1	Igual que:	No hay diferencia al comparar un factor frente a otro
1/3	Ligeramente menos importante o preferido que:	Al comparar un factor contra otro, el primero se considera ligeramente menos importante o preferido que el segundo
1/5	Menos importante o preferido que:	Al comparar un factor contra otro, el primero se considera menos importante o preferido que el segundo
1/7	Mucho menos importante o preferido que:	Al comparar un factor contra otro, el primero se considera mucho menos importante o preferido que el segundo
1/9	Absoluta o muchísimo menos importante o preferido que:	Al comparar un factor contra otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo menos importante que el segundo
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos factores adyacentes, que son empleados cuando se requiere un valor medio entre intensidades	

Tabla 12. Matriz de comparación por pares o Matriz de Saaty. En esta Matriz de 5 x 5 se comparan las variables aplicadas en la determinación de la susceptibilidad por PRM.

Factores	Pendiente	Litología	Uso de suelo y vegetación	Densidad de drenaje	Índice de humedad topográfica
Pendiente	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00
Litología	1.00	1.00	3.00	1.00	2.00
Uso de suelo y vegetación	0.50	0.30	1.00	1.00	2.00
Densidad de drenaje	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00
Índice de humedad topográfica	0.30	0.50	0.50	1.00	1.00
Suma	3.30	3.80	7.50	6.00	9.00
1/Suma	0.30	0.26	0.13	0.17	0.11

de la susceptibilidad por PRM. Sin embargo, los parámetros morfométricos constituyen la base para la caracterización de procesos geomorfológicos y son de mayor importancia para la zonificación de un peligro. Con base en esa premisa, se otorgó a la pendiente el valor de 2, entre las postulaciones verbales que describen

que el factor es preferible, sin llegar a ser mucho más importante que el USV.

Pendiente vs Densidad de drenaje. Es necesario resaltar que la pendiente del terreno y la densidad de drenaje, son algunas de las expresiones resultantes de la dinámica de la Tierra y los agentes erosivos sobre los materiales litológicos.

No obstante, la pendiente ejerce un control directo sobre el ángulo de reposo de los materiales; por ello se le considera más importante o preferible cuando se comparan, por lo que se le asignó, un valor de 2.

Pendiente vs Índice de humedad topográfica
Dentro de los parámetros morfológicos, el IHT es un auxiliar para la identificación de sitios donde las lluvias que escurren de la manera superficial pueden acumularse o infiltrarse. Esto es importante en términos de los elementos presentes en el área, como suelos y rocas, en razón de que afecta su cohesión y provoca variabilidad en la densidad de los mismos. No obstante, es la pendiente la que tiene un control directo sobre el ángulo de reposo de los materiales, por ello se considera un factor más importante y se le asignó un valor de 3.

4) Se dividió 1 entre el resultado de la sumatoria de todos los valores, por columna y por cada factor. En el caso de la pendiente, serán 1, 1, 0.5, 0.5, 0.3, para un total de 3.3, teniendo entonces $1/3.3 = 0.30$.

5) El cociente de la división, se multiplicó por la entidad numérica expresada en cada celda que conforma la columna del factor, los resultados fueron la base para la construcción de la matriz de normalización (Tabla 13), la cual muestra el vector de priorización o ponderación de cada factor, es decir, la importancia que tienen individualmente para el estudio de la susceptibilidad por PRM. Retomando el ejemplo de la pendiente, los números son 1, 1, 0.5, 0.5, 0.3 y serán multiplicados por 0.30.

6) El vector de priorización (VP) se obtuvo al sumar los valores de cada fila por factor y dividiendo el resultado entre el total de factores, cinco en este caso. Para obtener la ponderación de los factores (%), se multiplicó por 100 el VP.

7) La corroboración de la validez de la calificación asignada a los factores, tras la comparación de pares, se realizó a partir de un análisis de Relación o razón de consistencia (RC). En función de ello, se construyó una tabla de resultados de operación de matrices (Tabla 14), que es se obtiene de multiplicar el VP, por el valor de cada una de las celdas que conforman la columna de cada factor. Continuando con el

ejemplo de la pendiente, el VP sería 0.299, por cada uno de los valores de celda 1, 1, 0.5, 0.5, 0.3. La suma de las filas, da como resultado el Vector de suma ponderada (VSP) (Saaty, 1980).

8) Continuando con el cálculo de Índice de consistencia (CI), se buscó el índice máximo de autovaloración (λ_{max}), que resulta de dividir el VSP entre el VP de cada uno de los factores, para continuar con la suma de los resultados y dividir el total entre la dimensión de la matriz (n), es decir, el total de factores considerados (Tabla 15).

Una vez reconocido el valor de λ_{max} (5.181), se le restará la dimensión de la matriz (cinco) y será dividido entre el valor de la matriz misma, menos la unidad, es decir, cuatro.

$$\begin{aligned} IC &= \lambda_{max} - n - 1 \\ IC &= (5.181) - 5 - 1 \\ IC &= 0.1814 = 0.045 \end{aligned}$$

9) Siguiendo con el cálculo, se determinó la Razón de consistencia (RC) dividiendo el IC (0.045), entre el Índice de aleatoriedad (IA) (Saaty, 1980), éste último, es una constante establecida en función de las dimensiones de la matriz y puede consultarse en la Tabla 16.

$$\begin{aligned} RC &= IC/IA \\ RC &= 0.045/1.115 \\ RC &= 0.041 \end{aligned}$$

10) Una vez calculados los índices IC e IA, se verificó la RC, este valor es una constante definida por la dimensión de la matriz (n), Tabla 17. Los resultados varían entre $RC < 0,10$ y $RC > 0,10$. En el caso que el RC sea mayor al 0,10, se interpreta que los juicios establecidos son inconsistentes, las prioridades obtenidas son inválidas para la toma de decisiones y se deberá revisar los juicios instaurados. Si el RC, es igual o menor a 0,10, significa que la consistencia de las comparaciones es aceptable, las prioridades calculadas son válidas y aceptadas para la toma de decisiones. Para este trabajo en específico, el $RC = 0.041$.

Una vez construida y validada la matriz de comparación por pares, se establecieron las ponderaciones de cada factor condicionante.

Tabla 13. Matriz de normalización para la obtención de vectores de priorización y ponderación de factores.

Factor	Pendiente	Litología	USV	Densidad de drenaje	ÍHT	Vector priorización
Pendiente	0.300	0.261	0.267	0.333	0.333	0.299
Litología	0.300	0.261	0.400	0.167	0.222	0.270
USV	0.150	0.087	0.133	0.167	0.222	0.152
Densidad de drenaje	0.150	0.261	0.133	0.167	0.111	0.164
ÍHT	0.100	0.130	0.067	0.157	0.111	0.115

Tabla 14. Matriz para determinar el Vector de suma ponderada (VSP).

Resultados de la operación de matrices					Vector suma ponderada
0.299	0.270	0.304	0.329	0.345	1.546
0.299	0.270	0.456	0.164	0.230	1.419
0.149	0.090	0.152	0.164	0.230	0.786
0.149	0.270	0.152	0.164	0.115	0.851
0.100	0.135	0.076	0.164	0.115	0.590

Tabla 15. Índices máximos de autovaloración para los factores (λ_{max}).

Factores	VSP/VP
Pendiente	5.174
Litología	5.255
USV	5.174
Densidad drenaje	5.174
IHT	5.130
Suma	25.907
Promedio	5.181

Redondeando los valores obtenidos, se tuvo como resultado el porcentaje de influencia de cada factor sobre el cálculo del índice de susceptibilidad:

Pendiente = 30%

Litología = 27%

Uso de suelo y vegetación = 15%

Densidad de drenaje = 16%

Índice de humedad topográfica= 12%

En la zonificación de la susceptibilidad por PRM para la zona de estudio, se consideraron cinco factores: litología, pendiente, uso de suelo y vegetación, densidad de drenaje e índice de

humedad topográfica. A continuación, se describe cada elemento y el proceso a través del cual fueron obtenidos.

Litología

La actualización litológica se realizó a través del proceso de interpretación heurística y constó de tres fases:

1. Utilizando información geológica vectorial en escala 1:250,000 del Servicio Geológico Mexicano y, la georeferenciación y vectorización de las cartas geológicas editadas por el INEGI (compilación de diversas ediciones), se obtuvo la base litológica. En este proceso, fue importante estandarizar las escalas y los datum de cada elemento, con el propósito de evitar desfases importantes o deformaciones en los productos.

2. A partir de un Modelo Digital de Elevación de 24 x 24 m de resolución obtenido de *Airbus WolrdDEM* (2019) facilitado por la Secretaría de Protección Civil Guerrero (PCGro), se generó un Modelo Digital del Terreno (MDT) o Modelo de sombras, así como la red de drenaje. Estos elementos se utilizaron como base para la interpretación heurística de la distribución litológica en el área de estudio, auxiliado de aspectos como los rasgos morfológicos (expresiones de altos y bajos topográficos, como cañadas y parteaguas) y la gama de grises y

contraste. También, se incluyó el uso de imágenes satelitales en RGB, obtenidas desde *Bing Aerial* y descargadas con ayuda del *software SasPLANET*; las imágenes en RGB, tienen la virtud de que el color y tonalidad permiten inferir y observar diferencias entre los materiales litológicos.

3. Se realizaron varios recorridos de campo, cuyas rutas fueron trazadas con base en la delimitación litológica realizada en gabinete y en el conocimiento previo del área de estudio, a fin de optimizar el tiempo y obtener la mayor cantidad de puntos de control que permitieran corroborar la cartografía obtenida y, en su caso, realizar las modificaciones pertinentes.

Derivado del proceso anterior hubo modificaciones de la distribución litológica, lo que permitió redefinir los límites de las unidades (Figura 2). Esto es importante, pues los materiales y el comportamiento mecánico de los mismos, constituyen uno de los factores condicionantes más relevantes en cuanto a la estabilidad de laderas, en función de la consistencia, compacidad y erodabilidad de los materiales.

Uso de suelo y vegetación

Partiendo de la premisa, de que la inestabilidad de laderas es uno de los peligros naturales en el que las actividades humanas más influencia tienen, es necesario conocer el uso del suelo y la vegetación predominante en la zona. Se generó un mapa de coberturas (Figura 3), con imágenes satelitales *Landsat 8* (30 x 30 m) y aplicando una versión simplificada del método *Corine Land Cover* (1990). Este método fue desarrollado en la Unión Europea bajo el nombre de Cobertura de la Tierra (*Land Cover*), dentro del programa de Coordinación de Información sobre el Medio Ambiente (CORINE por sus siglas en inglés), e implica el uso de imágenes satelitales de mediana resolución (*Sentinel 2*) permitiendo describir, caracterizar y comparar las características de la cobertura de uso de suelo, para la generación de mapas en diferentes escalas (IDEAM, 2010).

Pendiente del terreno

La inclinación de las laderas, es el elemento que mayor perturbación sufre por acción del hombre y uno de los principales factores para la

generación de PRM. Para entender cómo la pendiente contribuye a la generación de éstos, muchas metodologías han sido propuestas. Una de las más utilizadas es la postulada por [van Zuidam \(1986\)](#), que, a partir de diversas modificaciones, se han adaptado a las necesidades específicas de cada sitio. Sin embargo, en el esquema global se incluyen y describen otros procesos. En la clasificación general, se establece una relación directa entre el ángulo de inclinación de la ladera, las condiciones del terreno y los procesos característicos que hablan implícitamente de la energía del relieve (Figura 4).

Índice de humedad topográfica

El índice de humedad topográfica (IHT) es una medida cuantitativa de la humedad relativa del suelo en una cuenca, cuya aplicación en la gestión de peligros naturales se ha enfocado principalmente en identificar zonas potenciales ante inundaciones. No obstante, diversos autores han empleado esta metodología para resaltar puntos de acumulación de humedad en laderas, convirtiéndolo en un insumo importante para el estudio de PRM ([Dai y Lee, 2002](#); [Sørensen et al., 2006](#); [Rozycka et al., 2016](#); [Baharin Bin et al., 2014](#)).

El IHT se puede obtener a partir de un modelo digital de elevación (MDE), utilizando algoritmos que calculan la humedad relativa del suelo en función de la topografía de la cuenca. En general, se utilizan dos métodos principales para calcular el IHT: el método de acumulación de flujo (o acumulación de humedad) y el método de curvatura de la pendiente ([Pusineri et al., 2005](#); [Sørensen et al., 2006](#)).

El método de acumulación de flujo se basa en el supuesto de que el agua fluye por la pendiente del terreno y se acumula en las áreas de menor pendiente. Se calcula el flujo de agua a lo largo de la cuenca y se acumula en cada punto de la cuenca, para luego normalizar la acumulación de agua por unidad de área. El resultado es un mapa de IHT que representa la humedad relativa del suelo en la cuenca.

El método de curvatura de la pendiente se basa en el supuesto de que la humedad del suelo está relacionada con la topografía del terreno, y se

Tabla 16. Valor del Índice de aleatoriedad en función del número de criterios considerados en la matriz (Aguarón y Moreno, 2001).

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

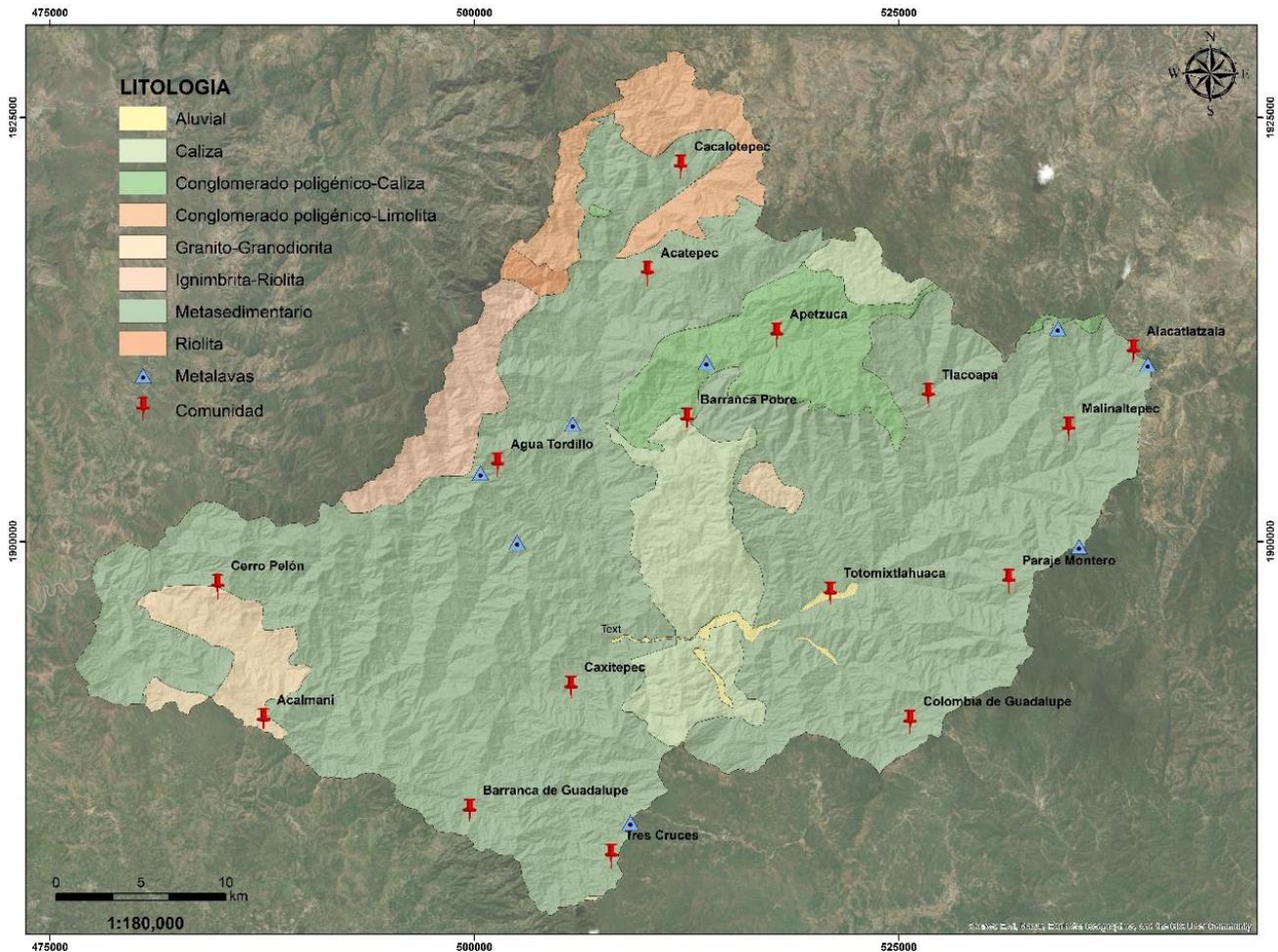


Figura 2. Unidades litológicas en el área de la cuenca RH20Ec

Tabla 17. Porcentajes máximos de la relación de consistencia RC en función de las variables consideradas.

Tamaño de matriz (n)	Razón de consistencia (%)
3	5
4	9
5 o mayor	10

calcula la curvatura de la pendiente en cada punto de la cuenca. La curvatura de la pendiente se utiliza para calcular la humedad relativa del suelo, y se normaliza por unidad de área para obtener el mapa de IHT (Rozycka *et al.*, 2016).

Para este caso, el IHT se calculó utilizando un Modelo Digital de Elevación (MDE) y ArcGIS como *software* de análisis geoespacial (GIS y Beers, 2020). Los pasos generales para obtener el IHT son los siguientes:

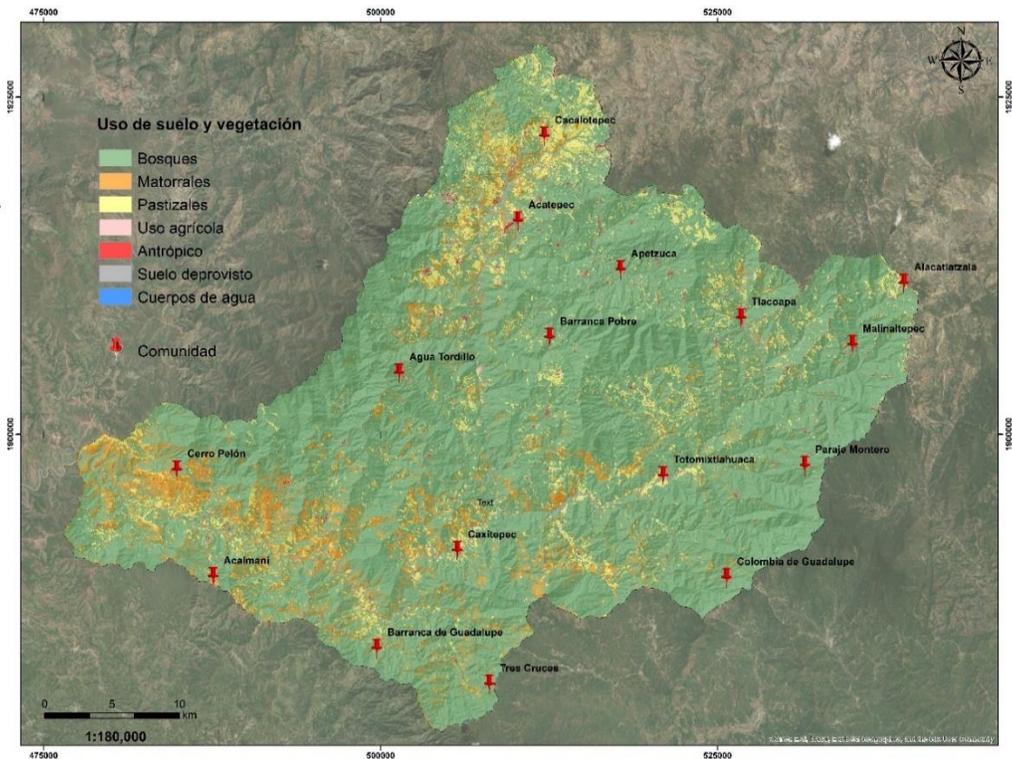


Figura 3. Uso de suelo y vegetación de la Subcuenca Hidrológica Río Unión RH20Ec.

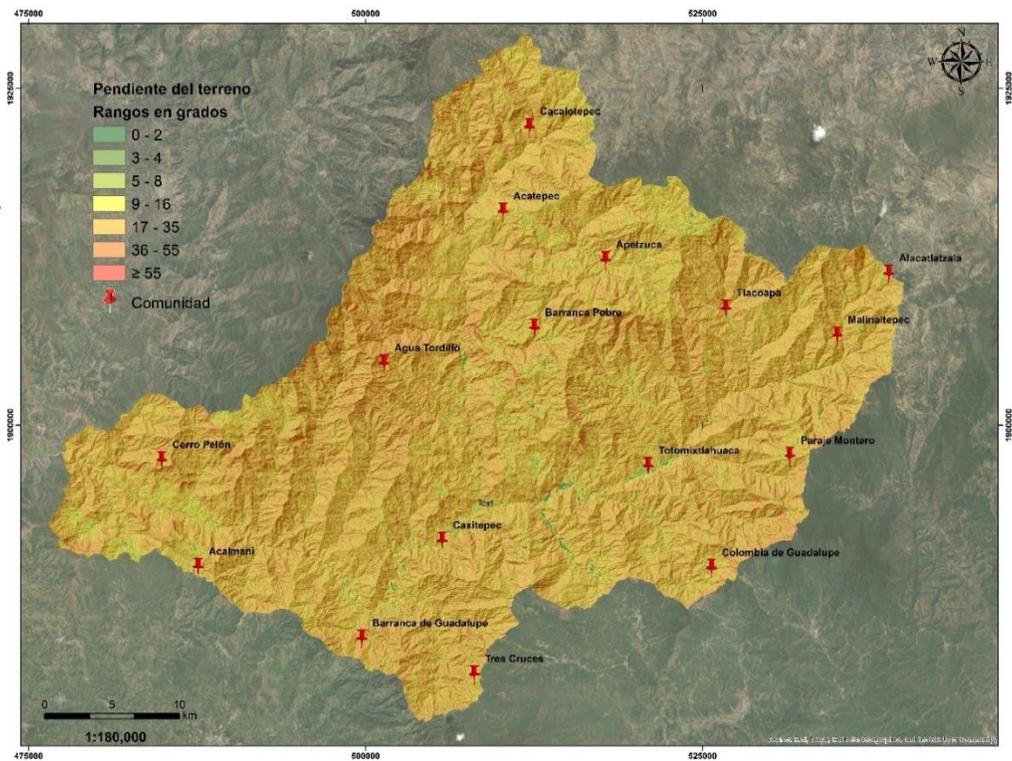


Figura 4. Pendiente del terreno en la Subcuenca RH20Ec. Distribución de rangos realizada con base en la propuesta de van Zuidam (1986).

Preparación de los datos: es necesario obtener un MDE de alta resolución y libre de errores, en formato ráster. En el presente trabajo se empleó un MDE de 24 x 24 m de resolución, obtenido de *Airbus WolrdDEM* (2019).

Cálculo del flujo de agua: utilizando la herramienta "Fill" de ArcGIS, se corrigen los vacíos en los datos del MDE y se asignan valores de elevación adecuados. A continuación, se utilizó la herramienta "Flow Direction" para calcular la dirección del flujo de agua en cada celda.

Cálculo de la acumulación de flujo: utilizando la herramienta "Flow Accumulation" de ArcGIS, se obtuvo la acumulación de flujo de agua en cada celda del MDE.

Se calculó el valor de la contribución de aguas arriba (UCA).

$UCA = ([Flow\ Accumulation] + 1) * \text{Tamaño de píxel (24)}$.

Donde, UCA es igual a la acumulación de flujo más uno, multiplicado por el tamaño de píxel del MDE empleado, en este caso 24 m.

Se calculó la pendiente del terreno en grados, utilizando la herramienta "Slope" y posteriormente se convirtió en radianes mediante la calculadora raster, ingresando la fórmula:

$$("slopeG") * ("0.01745")$$

Donde, "slopeG" es la capa raster que contiene los valores de pendiente en grados y 0.01745 es el factor de conversión de grados a radianes.

Posteriormente, se calculó la tangente de la pendiente (ST) empleando la siguiente fórmula:

$$ST = \text{Con}([SR]>0, \text{Tan}([SR]), 0.001)$$

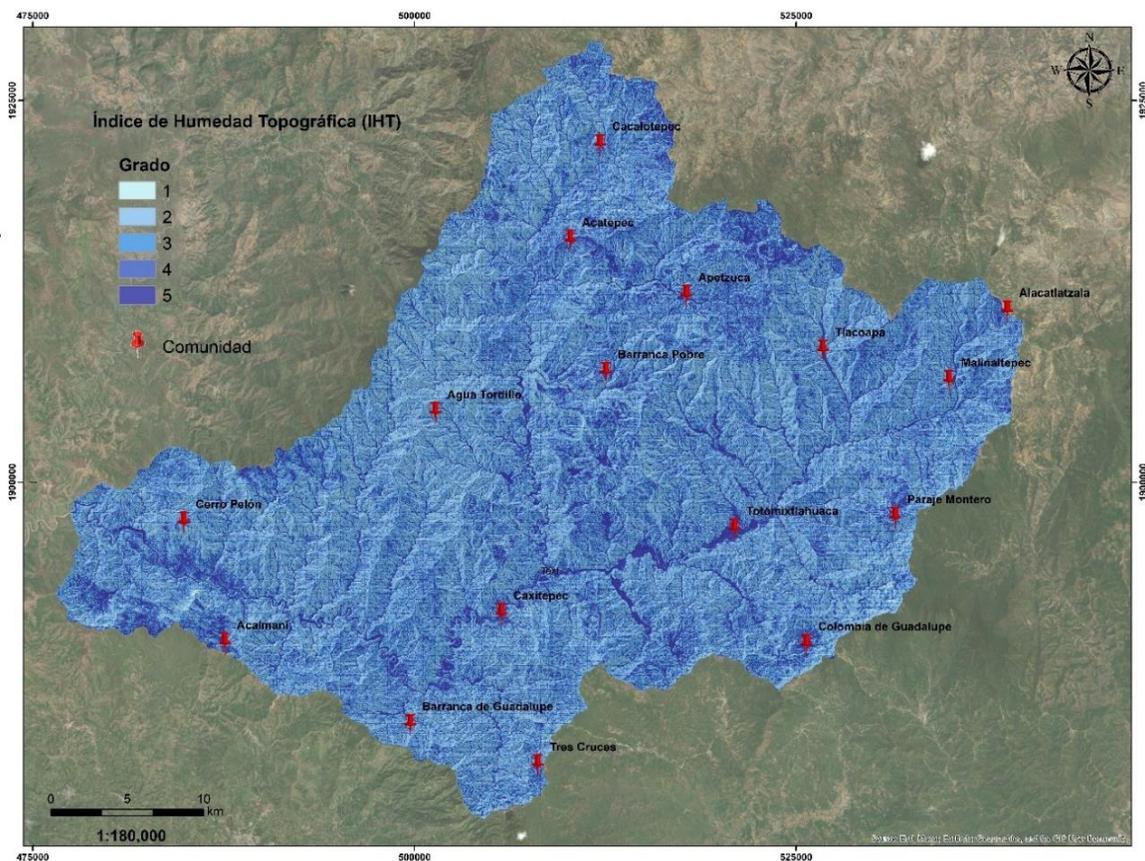


Figura 5. Índice de humedad topográfica, se resaltan las zonas de acumulación de precipitaciones con base en la diferencia de pendientes.

Finalmente, para el cálculo del IHT se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{IHT} = \text{Ln}(\text{UCA}) / (\text{ST})$$

Donde: Ln = corresponde al logaritmo natural; UCA = contribución de aguas arriba; ST = tangente de la pendiente en radianes.

Los valores de IHT, se clasificaron en cinco rangos para identificar áreas de alta y baja humedad en el terreno (Figura 5) (Taguas *et al.*, 2010).

Densidad de Drenaje

En el argot hidrológico, se entiende como red de drenaje, al conjunto de ríos, arroyos y barrancas donde confluyen y se transporta superficialmente el agua de las lluvias, hacia un punto de desfogue común como un lago, un embalse, el mar o incluso otra cuenca (Strahler, 1957). Es uno de los elementos más utilizados para el análisis de cuencas, debido a que, a partir de ella, se pueden obtener otros productos, como la densidad de drenaje (Dd), que es una medida de la cantidad de corrientes de agua por unidad de área.

La Dd se calcula dividiendo la longitud total de los cauces entre el área total de la cuenca, y en términos matemáticos, se puede expresar como:

$$Dd = L / A$$

Donde:

Dd = densidad de drenaje

L = longitud total de los cauces

A = área total

La unidad de medida de la densidad de drenaje es típicamente kilómetros por kilómetro cuadrado (km/km²) o metros por hectárea (m/ha).

El valor de la Dd indica la capacidad de la cuenca para evacuar o retener el agua de lluvia. En general, una densidad alta de drenaje indicará una mayor capacidad para drenar el agua; esta cualidad, puede estar relacionada con la presencia de materiales impermeables, favoreciendo que el agua fluya sobre la superficie de la tierra con mayor facilidad en lugar de infiltrarse en el subsuelo (Figura 6).

En contraste, una densidad baja de drenaje, indica una reducida capacidad para expulsar agua de las lluvias y puede estar relacionada con la presencia de rocas y suelos más permeables, que permiten que el agua se infiltre en el subsuelo y haya una menor disposición de fluir sobre la superficie de la Tierra (Horton, 1945).

Es importante resaltar que, aunque se ha identificado que es el suelo el material de mayor susceptibilidad a deslizarse, los recursos disponibles para su análisis publicados por fuentes nacionales, se encuentran desactualizados o en el caso de las cartas edafológicas en escala 1:50,000 y 1:250,000, no presentan una variabilidad importante en la distribución de los materiales dentro del área de la subcuenca; de forma que, al ser tan uniforme, no permite la discriminación en miembros para la asignación de un factor de seguridad, por ello se excluyó del análisis multicriterio, sin que esto afectara sustancialmente al producto obtenido.

Una vez que se tuvieron claros los antecedentes de susceptibilidad para el área de estudio, que se identificaron los factores involucrados y las variables fueron debidamente ponderados, se pasó a la aplicación de la Metodología de Macrozonificación y la representación gráfica del mapa de susceptibilidad.

El método es descrito por la siguiente fórmula:

$$S = Fc \times Fd$$

Donde S = grado de peligro ante la ocurrencia de deslizamientos; Fc = conjunto de factores condicionantes o inherentes al terreno o factor de susceptibilidad; Fd = factores desencadenantes o de disparo como lluvias y sismos o factor de amenaza.

Entre los factores condicionantes se puede encontrar que:

$$Fc = Fc_1 * Fc_2 * Fc_3 * Fc_4 * Fc_5$$

Donde Fc₁ = pendiente del terreno; Fc₂ = litología; Fc₃ = uso de suelo y vegetación; Fc₄ = densidad de drenaje; Fc₅ = índice de humedad topográfica.

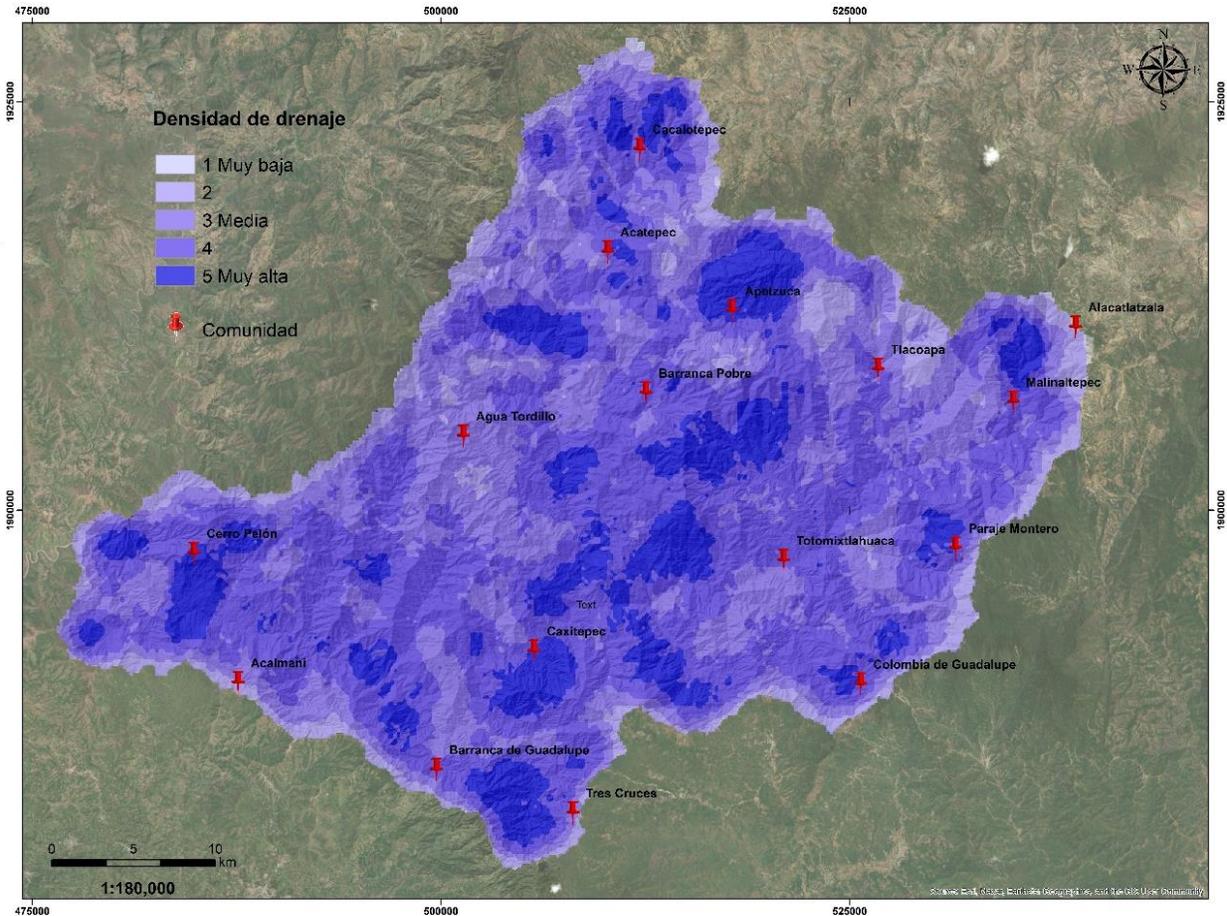


Figura 6. Densidad de drenaje de la Subcuenca Hidrológica Río Unión RH20Ec.

Se pueden incluir más elementos a fin de que el conjunto de datos describa de manera efectiva las condiciones presentes en la zona; por ejemplo, la distribución de la red de drenaje, la orientación de las laderas, la rugosidad del terreno, los lineamientos, entre otros.

Respecto de la representación gráfica de la susceptibilidad por PRM, se sugiere que los valores obtenidos sean distribuidos en cinco categorías a fin de facilitar la comprensión e interpretación de los datos. Por ello se eligió una paleta de colores a manera de semáforo (verde, amarillo, anaranjado y rojo), facilitando la interpretación y comprensión por parte de la población en general, en el entendido de que hacer amigable y accesible la información es vital para socializar el conocimiento.

Hay que tener en cuenta que las metodologías que parten del análisis de criterios múltiples son muy flexibles en cuanto a los elementos de

análisis y estarán definidos por las particularidades de la zona de estudio.

Resultados

Tras la identificación y ponderación de las variables utilizadas en el análisis multicriterio, se obtuvo la zonificación de la susceptibilidad ante PRM, identificando cinco niveles: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. Como puede observarse en el mapa de pendientes del terreno (Figura 7), la mayor parte de los deslizamientos ocurren en zonas con inclinaciones relativamente suaves que van de los 16 a los 35 grados, que de acuerdo con la descripción de los rangos establecidos en la clasificación de [van Zuidam \(1986\)](#) y, con base en la energía del relieve, implica un peligro severo por erosión, potenciando los efectos denudativos sobre el terreno, cuyas formas distintivas asociadas son los PRM de la subclase de

reptaciones y deslizamientos (no diferenciados), que involucran principalmente al suelo como material movilizado.

En cuanto a la influencia de la litología y con base en el inventario de deslizamientos, se reconoce a la secuencia metavolcánica-sedimentaria, como la de mayor susceptibilidad ante estos procesos; principalmente, por la intensa deformación frágil-dúctil evidenciada por distintos sistemas de fracturamiento y fallamiento, que, combinado con los planos de estratificación y esquistosidad, facilitan su disgregación y disposición como material deslizable (p.e. flujos de detritos).

Respecto del uso de suelo y vegetación, puede observarse que la mayor parte de los registros en el inventario de deslizamientos de 2013

ocurrieron en la unidad de bosques dispersos; esto se debe a la intensa actividad de deforestación acontecida durante las últimas cuatro décadas, cuyos efectos son visibles en el área de estudio, por ejemplo, en las localidades Huixolotepec, Huixtlatzala y Zoquitlán, pertenecientes al municipio de Atlixac, y Alacatlazala, en Malinaltepec. La pérdida de cobertura arbórea, disminuye la capacidad de infiltración del agua que escurre en la superficie del terreno durante la temporada de lluvias; en este sentido, una cobertura muy dispersa pierde su capacidad como control de la erosión del suelo, favoreciendo la pérdida de cohesión del mismo.

La Dd también es un parámetro utilizado para el análisis de la susceptibilidad de PRM. Para aprovechar esta información y con base en los

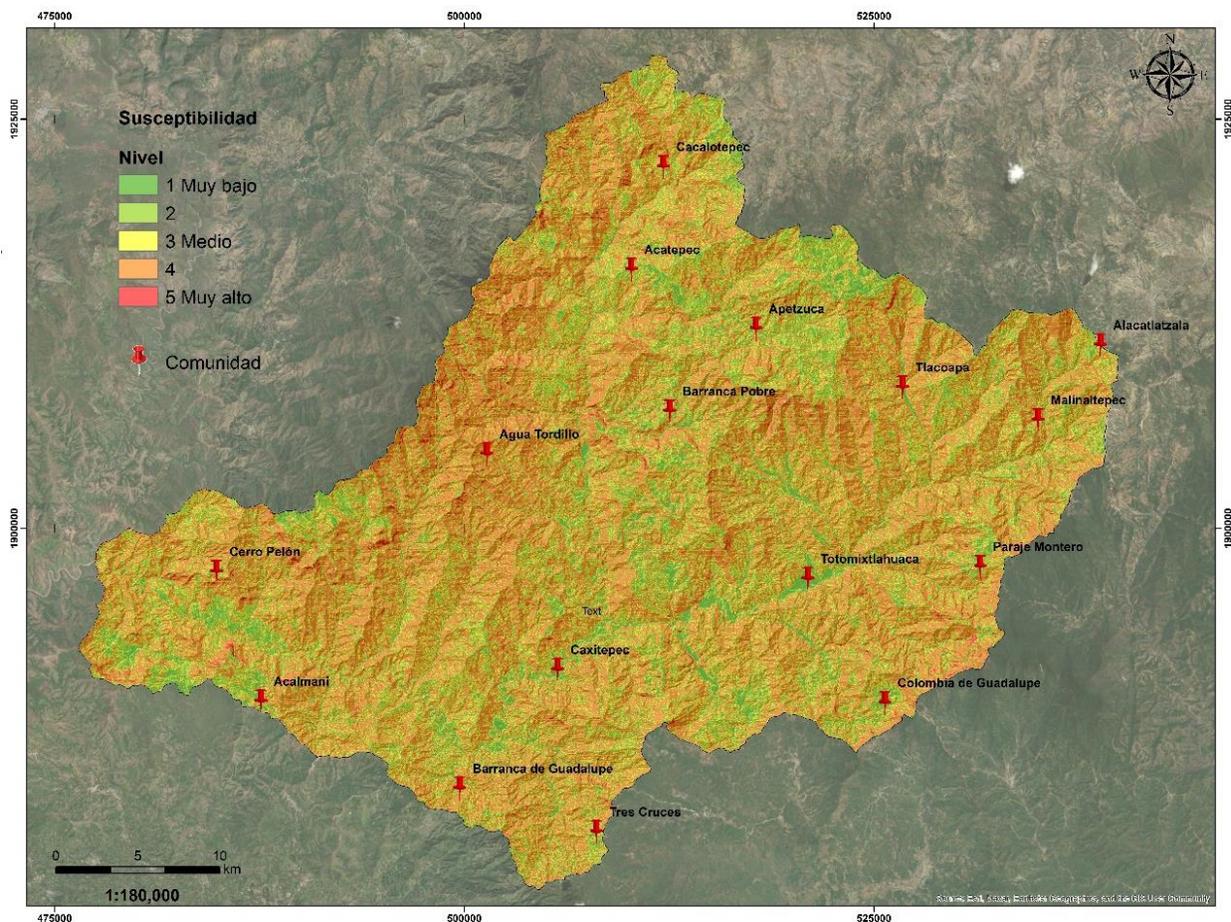


Figura 7. Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa de la Subcuenca Hidrológica Río Unión RH20Ec.

puntos del inventario de deslizamientos para el año 2013, se realizó una correlación entre los rangos de Dd y el registro de deslizamientos. En primer lugar, el rango 2.0-3.0 km/km² con 655 eventos (50.19%), seguido por >3.0 km/km² con 538 (41.23%) casos, el rango 1.0-2.0 km/km² con 111 (8.51%) registros y, finalmente, el dominio <1.0 con sólo 1 incidente (0.08%).

Por otro lado, el IHT es una medida que se utiliza para evaluar la humedad del suelo en función de las diferencias relativas en la pendiente del terreno. Este índice no posee unidades de medida tradicionales como metros o porcentaje de humedad, pues es una relación adimensional. Los valores medios de IHT, serán los más importantes

respecto del estudio de la inestabilidad de laderas, puesto que los más altos pertenecen al dominio del peligro por inundaciones. Derivado de la correlación entre incidencias por deslizamientos y niveles de IHT se obtuvo que el 51.95% de los registros se generó en el nivel 2 contra el 26.36% en el nivel 3, sólo en estos dos niveles se acumuló el 78.31% (1,022) del total de eventos; esto expresa una acumulación puntual de la humedad en la ladera. Alrededor del 19.31% (152) de los registros ocurrieron en los niveles 3 y 4 que están más asociados a la dinámica fluvial.

Las áreas de mayor susceptibilidad son las que circundan a las comunidades de Malinaltepec, Tlacoapa, Barranca Pobre y Agua Tordillo,

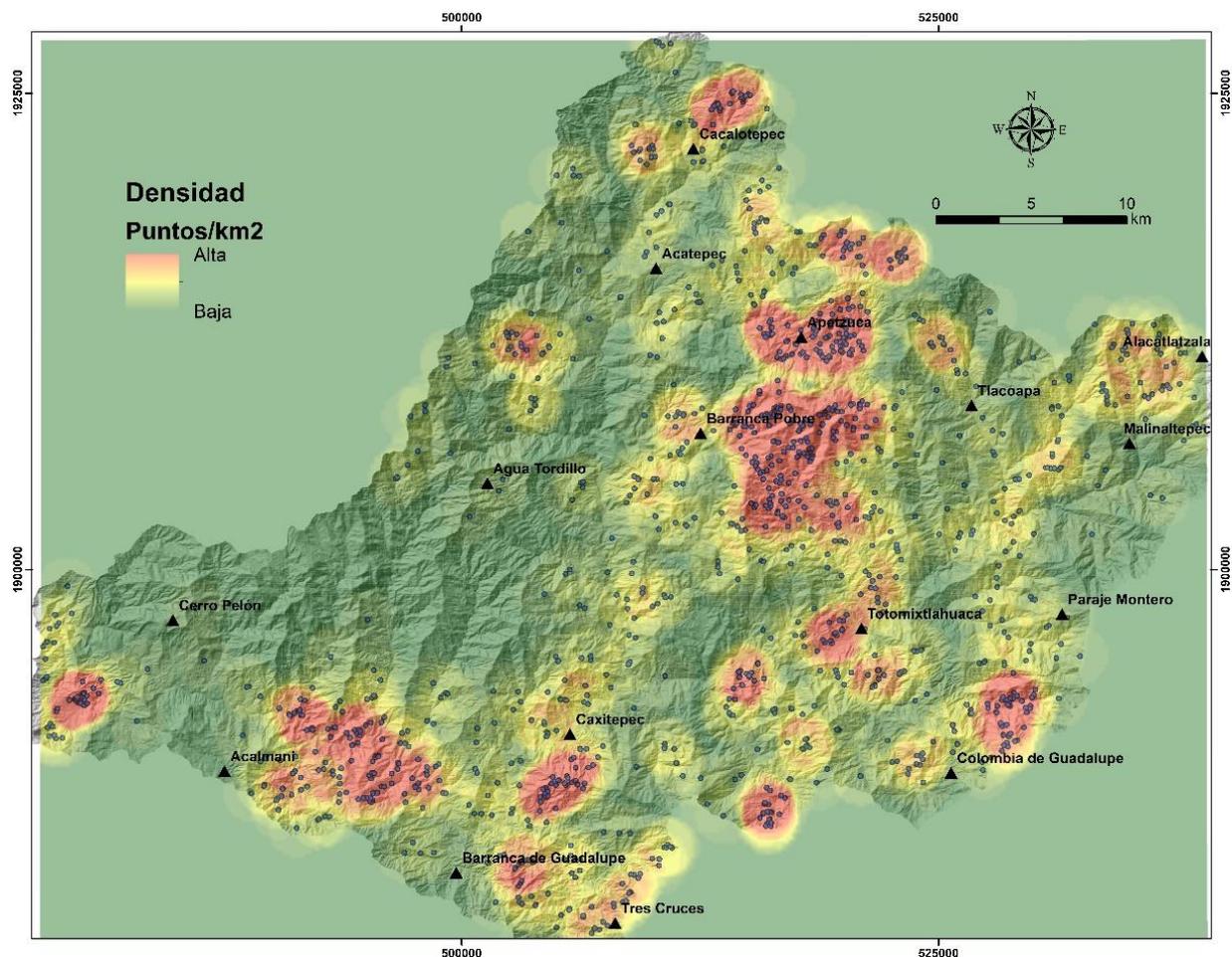


Figura 8. Densidad de puntos generada a partir del inventario de deslizamientos en la Subcuenca Hidrológica Río Unión RH20Ec para el año 2013.

mientras que, los sitios con menor susceptibilidad son los próximos a Caxitepec, Totomixtlahuaca y Colombia de Guadalupe (Figura 6).

Otra de las aplicaciones del inventario de deslizamientos, es que, al ser puntos que poseen una ubicación geográfica, pueden emplearse para determinar la concentración de puntos por unidad de área, con el objetivo de determinar cuáles son las zonas donde existe una mayor incidencia, el producto obtenido recibe el nombre de mapa de densidad de puntos, mapa de calor o *hot spot* (Legorreta-Paulín *et al.*, 2014).

La visualización de los *hot spots* en un mapa ayuda a identificar patrones espaciales, áreas problemáticas o de interés, y también puede ayudar a establecer relaciones o correlaciones espaciales entre diferentes fenómenos. Sin embargo, no deben considerarse como una explicación causal en sí mismos, sino como una herramienta para identificar patrones y áreas de interés que pueden requerir un análisis más detallado (Legorreta-Paulín, 2014).

El mapa de calor obtenido para el inventario de deslizamientos del año 2013 (Figura 7) también fue utilizado como instrumento para la validación del mapa de susceptibilidad (Figura 8). En él se pueden observar zonas de alta concentración de incidencias, específicamente el norte de Cacalotepec, en la región este respecto de la comunidad de Barranca Pobre, las zonas circundantes a Apetzuca y Totomixtlahuaca, el sur de Caxitepec y el noreste de Colombia de Guadalupe, estos elementos ofrecen un panorama preliminar de la problemática, no obstante, las interpretaciones fueron sustentadas en los factores condicionantes que imperan en el área de estudio.

Discusión

En materia de peligros naturales asociados al efecto de fenómenos hidrometeorológicos, considerando la base de datos de desastres (EM-DAT) en los periodos 1980-2000 y 2001-2020, los PRM experimentaron una tendencia al alza, en cuanto a intensidad y ocurrencia; principalmente, a causa de los efectos del cambio climático y del crecimiento poblacional, y en el caso específico de la Región de la Montaña en Guerrero, a la necesidad de recursos tales como la madera, cuyo

uso más extendido es en la construcción de viviendas y como combustible.

Si bien, el análisis de susceptibilidad ante PRM a partir de modelos estáticos, puede excluir muchas de las variantes involucradas en su estructura y dinámica, sí permite, mediante una serie de insumos base, tener una aproximación válida para la zonificación del fenómeno, que es corroborable en campo.

La metodología de Macrozonación o Mora-Varhson (Mora y Varhson, 1994), describe una serie de factores que condicionan y desencadenan PRM. Sin embargo, tiene como limitante que no distingue entre los mecanismos de rotura, el tipo de desplazamiento y materiales afectados ni procesos especiales, como reptaciones o expansiones laterales, no obstante, establece una relación directa de los factores que participan en la inestabilidad de laderas.

Tras el lanzamiento del Mapa Nacional de Riesgos en 2020 por parte de CENAPRED, que incluye entre otros elementos, la capa nacional de susceptibilidad por deslizamientos, podría parecer que poco puede aportarse al estudio y zonificación de los PRM en el país. Sin embargo, existe un área de oportunidad para la mejora de los insumos utilizados. Por ejemplo, algunas cartas geológicas tienen errores de interpretación al momento de clasificar las litologías, discriminar los miembros que componen una formación o el límite de las mismas; por supuesto, estos elementos no son cuestionados, porque provienen de instituciones gubernamentales y es información geoespacial oficial y de calidad. Otros inconvenientes son la limitada disponibilidad de cartas geológicas en escala 1:50,000, así como la desactualización de recursos tales como el uso de suelo y vegetación, edafología, entre otros.

Las metodologías utilizadas para la zonificación de la susceptibilidad por PRM, asumen que la pendiente es el principal condicionante. Sin embargo, se ha identificado que el suelo y litologías muy disgregadas pueden desplazarse en pendientes suaves y moderadas, de esta forma, muchos sitios suelen ser omitidos por una aplicación metodológica lineal, sin una comprensión real del área de estudio.

Si bien esta metodología no reemplaza a los estudios necesarios *in situ*, para la determinación de condiciones de seguridad ante PRM durante la proyección de desarrollo de viviendas o en escalas de trabajo grandes (p.e 1:10,000 y 1:5,000), sí permite establecer un factor de seguridad, al nivel de comunidades o municipios, toda vez que reconocer y representar el peligro en un medio cartográfico, mejora el conocimiento del territorio y se convierte en un instrumento para la toma oportuna de decisiones en materia de prevención. Además, la paleta de colores elegida para establecer los diferentes niveles de susceptibilidad, a semejanza de semáforo yendo del verde al rojo, facilita la interpretación por parte de la población en general.

Es importante agregar que los modelos predictivos tienen una vida útil, porque dependen de insumos que tienden a sufrir cambios sustanciales con el tiempo, por lo que se recomienda hacer una reevaluación periódica cada 5 años.

Conclusiones

En la zonificación de la susceptibilidad ante PRM para la Subcuenca Hidrológica Río Unión RH20Ec, se consideraron cinco factores condicionantes: litología, pendiente del terreno, uso de suelo y vegetación, densidad de drenaje e índice de humedad topográfica.

En el mapa obtenido a partir del análisis multicriterio se representan cinco niveles de susceptibilidad ante PRM, siendo prevalecientes en el área los rangos moderados a muy altos que ocupan el 85.68% del total del área de la cuenca.

En el inventario de deslizamientos relacionados con los fenómenos hidrometeorológicos Ingrid y Manuel, en el año 2013, se identificaron 1,305 eventos. Su distribución fue contrastada con el modelo de susceptibilidad obteniendo que el 91.4% de los registros ocurrieron en zonas con niveles de susceptibilidad alta y muy alta, lo que permite validar el modelo. De forma que la disponibilidad de espacio para el desarrollo de las comunidades, es limitado, y una expansión sin planificación implicaría un incremento significativo en las incidencias por PRM.

Referencias

- Aguarón, J., Moreno-Jiménez, J.P. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research*, 147, 137-145.
- Alcántara-Ayala, I. (2004). Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology*, 61, 19-40.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.11.004>
- Baharin Bin, A., Mojaradi, B., Sattari, F. (2014). Using Frequency Ratio Method for Spatial Landslide Prediction. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7, 3174-3180.
<https://doi.org/10.19026/rjaset.7.658>
- CENAPRED (2019). El deslizamiento de ladera en la comunidad La Pintada, Guerrero. Nota electrónica. Centro Nacional de Prevención de Desastres.
<https://www.gob.mx/cenapred/articulos/el-deslizamiento-de-ladera-en-la-comunidad-la-pintada-guerrero#:~:text=La%20masa%20deslizada%20impact%C3%B3%2C%20destruy%C3%B3,d el%20material%20de%20la%20ladera.>
- CONEVAL (2022). Boletín Institucional 2022. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social.
<https://www.coneval.org.mx/SalaPrensa/Paginas/Newsletter/2022.aspx>
- Dai, F.C., Lee, C.F. (2002). Landslide Characteristics and Slope Instability Modeling Using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42, 213-228.
[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00087-3)
- El País (2010). Un corrimiento de tierras sepulta centenares de casas en Oaxaca. Nota electrónica.
https://elpais.com/internacional/2010/09/28/actualidad/1285624805_850215.html
- GIS y Beers (2020). Cálculo del Índice Topográfico de Humedad (TWI).
<http://www.gisandbeers.com/calculo-del-indice-topografico-de-humedad-twi/>
- Hinojosa-Corona, A., Rodríguez-Moreno, V.M., Munguía-Orozco, L., Meillón-Menchaca, O.

- (2011). El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63, 15-38.
- Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-370.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- IDEAM (2010). Informe de Gestión 2010. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial República de Colombia. Consultado 26 enero 2023.
<http://www.ideam.gov.co/documents/24024/84386/Informe+de+Gestion+2010+IDEAM.pdf/a964fab3-b5c6-4068-9e11-37b1fd341c03?version=1.0>
- Legorreta-Paulín, G., Galicia-Hernández, G., Bautista-Zúñiga, F., Macías, J.L., Córdova, J.M., García-Palomo, A., Sánchez-Núñez, J.M. (2014). Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66, 343-354.
- Mora C.S., Vahrson, W.G. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, XXXI, 49-58.
[MacrozonationMethodologyforLandslideHazardDetermination.pdf](#)
- Oliva-González, A.O. (2015). Estabilidad de taludes y laderas. Análisis cuantitativo y cualitativo.
[ESTABILIDADDETALUDESYLADERAS_AldoO.Oliva_UDCIMxico\(1\).pdf](#)
- Pusineri, G., Pedraza, R., Lozeco, C. (2005). Uso de modelos digitales de elevación y de sistemas de información geográfica en la modelación hidrológica. *Geográfica Digital*, 2.
<https://doi.org/10.30972/geo.232664>
- Rozycka, M., Migoń, P., Michniewicz, A. (2016). Topographic Wetness Index and Terrain Ruggedness Index in geomorphic characterisation of landslide terrains, on examples from the Sudetes, SW Poland. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*. 61.
https://doi.org/10.1127/zfg_suppl/2016/0328
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, and Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York.
- Sørensen, R., Zinko, U. Seibert, J. (2006). On the Calculation of the Topographic Wetness Index: Evaluation of Different Methods Based on Field Observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 101-112.
<https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>
- Strahler, A.N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 38, 913-920.
<https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Taguas, E., Yuan, Y., Peña, A., Ayuso, J.L. (2010). Predicción de cárcavas efímeras mediante el índice topográfico combinado en una microcuenca de olivar en Andalucía (España). *Agrociencia*, 44, 409-426.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952010000400002
- UNDRR (2020). *The human cost of disasters 2000-2019*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
<https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-2000-2019>
- van Zuidam, R.A. (1986). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*: Hague, Smits, Netherlands, 442p.