

“MODELADO DE LA SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA APLICANDO TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA. CASO DE ESTUDIO: REGIÓN DE LA MONTAÑA, GUERRERO.”

**Juan Artemio
Mendoza Mosso**

Av. Lázaro Cárdenas S/N
Ciudad Universitaria
Interior FI Chilpancingo
Guerrero, C.P. 39070
7471109149

J10_eo@hotmail.com

**Wendy Romero
Rojas**

Av. Lázaro Cárdenas
S/N Ciudad
Universitaria Interior FI
Chilpancingo Guerrero,
C.P. 39070
7474727943

geowromero@gmail.com

**René Vázquez-
Jiménez**

Av. Lázaro Cárdenas
S/N Ciudad
Universitaria Interior FI
Chilpancingo Guerrero,
C.P. 39070
7474727943

rvazquez@uagro.mx

**Roció Nayelly
Ramos Bernal**

Av. Lázaro Cárdenas
S/N Ciudad
Universitaria Interior FI
Chilpancingo Guerrero,
C.P. 39070
4.417474727943

rnramos@uagro.mx

RESUMEN

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM) asociados a eventos hidrometeorológicos extraordinarios forman parte de los procesos geológicos más recurrentes en México, específicamente en la Región de la Montaña del Estado de Guerrero.

Existen herramientas geotecnológicas que en conjunto ayudan generar modelos con capacidad predictiva para la mitigación de riesgo; entre estas herramientas destacan la Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica.

Los factores que controlan la incidencia en los PRM están generalizados en las características inherentes de la topografía, geología y el tipo de suelo. A partir de estos factores detonantes; y con base a trabajos previos, se realizó un modelo acumulativo de susceptibilidad que mostró las zonas vulnerables a este tipo de procesos. El modelo arrojó que la susceptibilidad “media” es la predominante en el área de estudio y que los factores que controlan la susceptibilidad están íntimamente relacionados a la presencia de discontinuidades geológicas y su asociación con los escurrimientos superficiales

Palabras clave

Procesos de remoción en masa, susceptibilidad, percepción remota.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años México ha presentado eventos meteorológicos extraordinarios con los cuales, se ha evidenciado la amenaza y vulnerabilidad de distintas partes de la población [1]. Según Ramos-Bernal, et al. [2], existen procesos que en conjunto con los fenómenos climáticos, conllevan a un riesgo latente para los asentamientos humanos, tal es el caso de los Procesos de Remoción en Masa (PRM), cuya incidencia en México ha incrementado de manera considerable. Entre los factores detonantes de estos fenómenos se le atribuyen el cambio climático, la deforestación y actividades antropogénicas en cuyo caso involucra el uso del suelo de manera indiscriminada [3].

El Estado de Guerrero presenta rasgos fisiográficos y geológicos propicios para la generación de PRM; en septiembre de 2013,

hubo un incremento de estos fenómenos relacionados directamente a los eventos hidrometeorológicos Ingrid y Manuel, tal es el caso de la comunidad de La Pintada en el municipio de Atoyac de Álvarez, cuyos reportes muestran la desaparición de 70 personas, 379 damnificados y 20 construcciones dañadas [4]; asimismo, se registraron grandes PRM en el municipio de Chilpancingo, cerca de la región de Jaleaca de Catalán y otros deslizamientos de menor tamaño en los municipios de Leonardo Bravo, General Heliodoro Castillo y Coyuca de Benítez.

La zona de la montaña de Guerrero fue una de las regiones con mayor número de afectaciones por PRM; entre los municipios más dañados se encuentran; Acatepec, Malinaltepec, Tlacoapa, Iliatenco, Copanatoyac, Metlatónoc y Cochoapa, lugares donde los PRM dejaron daños en viviendas y parcelas en más de 80 comunidades, de igual manera en los municipios de San Luis Acatlan y Atlamajalcingo del Monte donde también se tiene registro de deslizamientos en las comunidades de Mixtecapan y Huehuetepic, un deslizamiento a considerar se registró en esta última, en el Cerro de Ixtle dejando en riesgo a 70 familias [5].

Entre los factores importantes que involucran a los procesos de remoción en masa, se encuentran los activos que son los sismos y lluvias fuertes, y en los pasivos se tiene el tipo de suelo o roca, su contenido de agua, la cantidad de minerales como la arcilla, el relieve del terreno y planos de roca o de suelo inclinados a favor de la pendiente estos últimos ayudan a los activos para que se produzca un deslizamiento [3].

Existen herramientas geo tecnológicas y marcos teóricos encargadas de generar información, métodos y procedimientos que ayudan a la mitigación del riesgo y vulnerabilidad de las poblaciones, tal es el caso de la Percepción Remota, la cual está encargada de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto con el objeto de manera física [6]. La técnica consiste en utilizar detectores diminutos que captan imágenes a través de un sensor que mide la radiación electromagnética (energía) que refleja la superficie de la Tierra y los objetos que hay en ella. La relación está dada por la reflexión de la energía solar o de un haz energético solar y este sea transmitido a la superficie terrestre para ser interpretada por una aplicación.

Existe una estrecha relación entre la Percepción Remota, los Sistemas de Información Geográfica y las herramientas de análisis y modelado espacial, interactuando y complementándose entre sí bajo marcos teóricos de disciplinas específicas que estudios con fines específicos demandan; desde la adquisición de la información por sensores remotos, su posible integración en Sistemas de Información Geográfica, su análisis y modelado, concluyendo con la generación de productos finales a través de mapas, informes, gráficos o datos estadísticos; todo ello bajo el marco global de la ciencia Geomática. [7].

El presente trabajo tiene como objetivo generar un mapa de susceptibilidad a PRM, con base a factores condicionantes que, en cuyos casos ya han sido evaluados en trabajos previos [1,2], donde las características fisiográficas y geológicas son similares al área de estudio.

Zona de estudio

El área de estudio se localiza en la región de la montaña del Estado de Guerrero, la cual comprende 5 municipios, Copanatoyac, Tlacoapa, Malinaltepec, Atlamajalcingo del Monte y Cochoapa el Grande, con una superficie total de 1746.863 hectáreas. Los principales poblados que se encuentran dentro de la zona corresponden a Moyotepec, El Tejocote, Tilapa, El Salto, El Obispo, El Cerro del Ixtle y el Calvario (Figura 1).

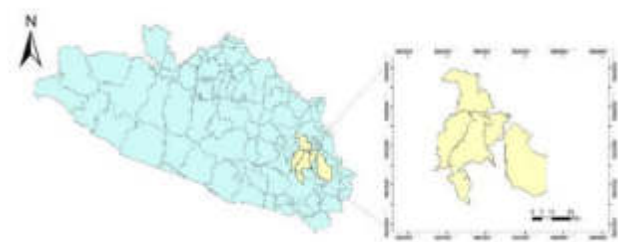


Figura 1. Localización del área de estudio.

1.- METODOLOGÍA

Materiales

De manera inicial, se requirieron los datos vectoriales disponibles del INEGI. Para el desarrollo de los insumos topográficos, se descargaron las cartas topográficas de los municipios Iliatenco, San Luis, Tlapa de Comonfort, Xalpatlahuac, Pueblo Hidalgo, Potoichan, Metlatonoc y Ahuacutzingo en escala 1:50 000; de igual manera se descargaron los datos vectoriales de la edafología de México en escala 1:1'000,000 y las cartas geológicas de Chilpancingo y Acapulco con escala 1:250,000.

El proceso para la obtención del modelado espacial se realizó con los softwares Dinamica EGO y ArcGIS para la elaboración del mapa final de susceptibilidad.

Preprocesamiento

Para la construcción del mapa de susceptibilidad a PRM se realizaron mapas base de los factores que intervienen en los procesos, a partir de un conjunto de variables que involucran

factores físicos como la topografía, geología regional y la edafología. A continuación, se muestra un resumen de los mapas iniciales y sus insumos finales (Figura 2).

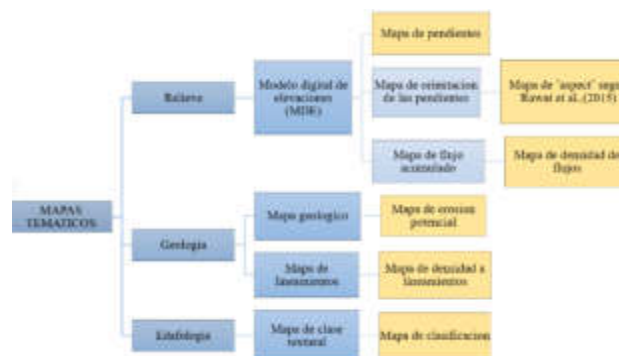


Figura 2. Resumen de los mapas iniciales y sus insumos finales.

Elementos geológicos

Mapa de erosión potencial

Es de vital importancia conocer las propiedades geológicas que presenta la zona de estudio para una mejor interpretación al momento de involucrar los diferentes factores a considerar en la generación de los procesos de remoción en masa.

En este caso, la información geológica se derivó a partir de las cartas geológicas del INEGI en escala 1:250,000 de los municipios de Acapulco y Chilpancingo, cuyos datos corresponden a las cartas E14C57 y E14C28 respectivamente. De los datos disponibles, se utilizaron los polígonos correspondientes a las unidades estratigráficas y se realizó el recorte con base al área de estudio; posteriormente, el mapa resultante se convirtió a formato raster y se realizó una clasificación de las unidades litológicas con base a la propuesta de Aguiló-Alonso et al. [8], quien hace referencia al comportamiento mecánico de cada tipo de roca así como el grado de cohesión y la erosión potencial; en este caso, sólo se tomó en cuenta la erosión potencial debido a su relación con la escorrentía superficial por factores hidrológicos ya que el agua es uno de los principales detonantes en la generación de los procesos de remoción [1]. Finalmente, los datos fueron categorizados del 1 al 5, donde 1 es el índice "Muy bajo" y el 5 el índice de "Muy alto" con ayuda del software Dinamica Ego y fue utilizado como mapa insumo del modelo final de susceptibilidad (Figura 3).

Mapa Densidad a lineamientos

Los lineamientos son estructuras inherentes a los procesos geológicos que nos determinan parte de la resistencia de las unidades geológicas, por lo tanto, su interferencia dentro de los PRM es de suma importancia en su incorporación dentro del modelo. De la misma manera que el mapa de erosión potencial, se utilizaron los datos vectoriales de las cartas geológicas, en este caso, se utilizaron los datos de líneas correspondientes a los datos estructurales, es decir, fallas y fracturas en el área de estudio. Nuevamente se recortó en proporción a la zona de estudio y se generó un formato raster de la información resultante. Para la generación del mapa de densidad a lineamientos, se utilizó el módulo density line de ArcGIS, donde se calcula una magnitud por unidad de área de un lineamiento (falla o fractura) que se encuentra dentro de un radio específico

de cada pixel. En este trabajo, se utilizó un radio de 250 metros con base al trabajo de [1], (Figura 4). El mapa final será incorporado al modelo de susceptibilidad.

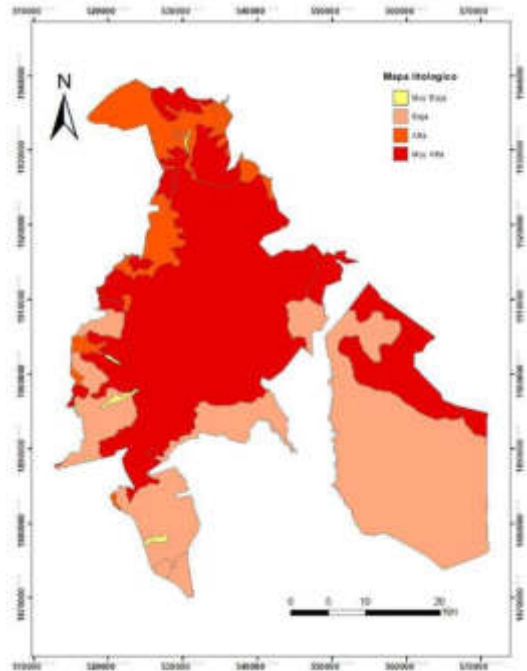


Figura 3. Mapa de erosión potencial.

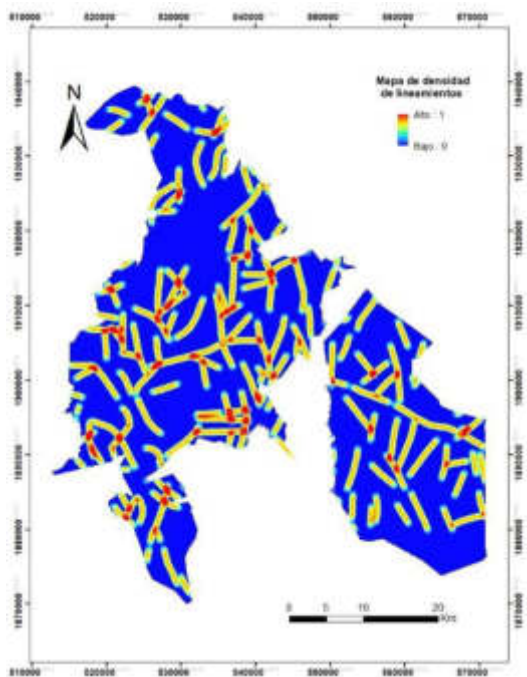


Figura 4. Mapa de densidad a lineamientos.

Elementos topográficos

Las características geomorfológicas se obtuvieron con diversos mapas que engloban los principales rasgos fisiográficos. Los mapas base parten del Modelo Digital de Elevación; para su

realización se utilizaron las cartas topográficas escala 1:50 000 cuyas claves son: E14D21, E14D41, E14D42, E14D31, E14D52, E14D51, E14D22, E14D32, correspondientes al área de estudio. Los datos vectoriales se trataron en la herramienta 3D Analyst Tool, la cual consiste en la generación de una red irregular triangulada (TIN), en este caso se utilizó una resolución espacial de 15 metros (Figura 5).

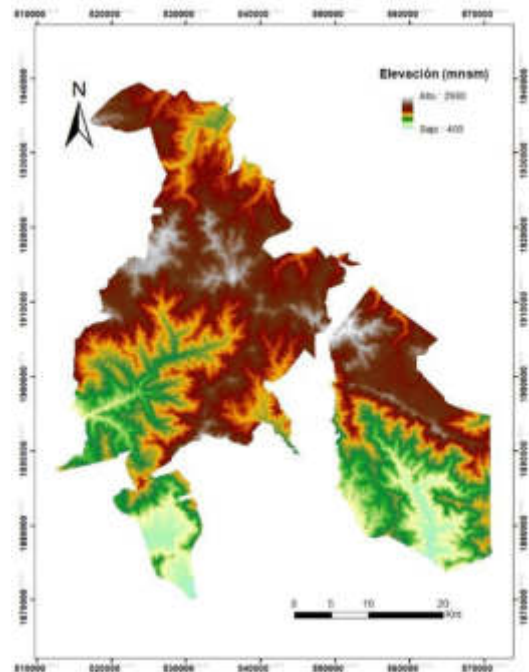


Figura 5. Modelo digital de elevaciones.

Mapa de orientación de las pendientes según Rawat et., (2015)

Para este caso, la orientación está basada en la pendiente donde se implementó una salida ante los deslizamientos. A partir del MDE, se generó el mapa de pendientes a partir de la función slope en Spatial analyst Toolbar de ArcGIS, donde se calcula la tasa de cambio máxima en Z entre cada célula y sus vecinas, es decir, las diferencias de alturas vs diferencias de distancias [1].

Posteriormente, se generó una categorización donde se tomó una pendiente mínima de 5° como valor mínimo para la generación de PRM según Recondo et al., [12]. Con base a estos datos, se les asignó el valor de 1 a las pendientes mayores o iguales a 6°, con ayuda del software de Dinamica EGO. Finalmente, el mapa resultante que se integró al modelo de susceptibilidad corresponde al de orientación de las pendientes según Rawat et al, [9], en el cual se estimaron las orientaciones preferenciales en dirección del azimut en sentido horario de la pendiente a partir del Norte. La generación de este proceso fue en el apartado de Raster Surfer y finalmente Aspect en ArcGIS. La clasificación final se realizó en función de la propuesta por Rawat et al, [9] para PRM y consistió en 8 clases (Tabla 1). El mapa final será mostrado como insumo en la generación del modelo de susceptibilidad (Figura 6).

Tabla 1. Clasificación de los frentes de las pendientes con base al azimut según Rawat et al, [9].

Azimut	Grados
Frente norte	337.50-22.50
Noreste	22.50-67.50
Frente este	67.50-112.50
Sureste	112.50-157.50
Frente sur	157.50-202.50
Suroeste	202.50-247.50
Frente oeste	247.50-292.50
Noroeste	292.50-337.50

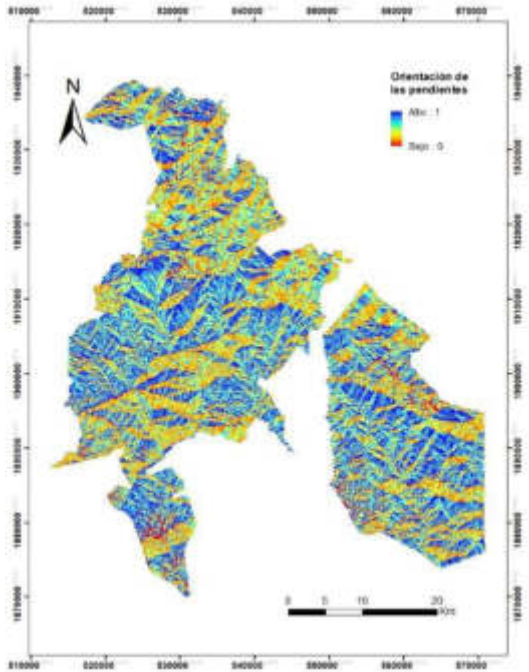


Figura 6. Mapa de orientación de las pendientes según Rawat et al, [9].

Densidad a flujos

Dada la importancia en la ocurrencia de los PRM, los factores hidrológicos son importantes en la integración final del modelo de susceptibilidad. El mapa generado inicialmente, consistió en un mapa de flujo acumulado el cual está caracterizado por medir el número de líneas de flujo que atraviesa cada pixel a través de su trayectoria [10]; a partir del MDE, se obtuvo la trayectoria y la dirección de los flujos de agua que pasa por cada pixel, este proceso se realizó en el módulo de spatial analyst tools, hidrology de ArcGIS.

Posteriormente, se realizó un mapa de escurrimientos en cuyo caso se generó una reclasificación de los valores de los pixeles, es decir, los valores que fueran ≥ 750 se consideraran flujos y se les asignó el número 1 y los de menor valor se les asignó el número 0. Los datos finales del mapa de escurrimientos se incorporaron a un mapa final, el cual consistió en un mapa de densidad a flujos donde a partir del proceso similar al mapa de

densidad a lineamientos, se generó un radio máximo de 200 metros con base a [11] (Figura 7).



Figura 7. Mapa de densidad a flujos

Suelos-clasificación textural

Un factor a tener en consideración en un estudio de susceptibilidad es el tipo de suelo que presenta el lugar ya que, dependiendo del tipo de suelo, se puede dictar que tan susceptible es que se encuentra esa zona ante un deslizamiento. Para la generación del mapa de suelo se descargó la carta edafológica de México del INEGI con una escala de 1:100 000 en formato vectorial; se generó el recorte del área de estudio y se seleccionaron los valores de la clasificación textural en cuyo caso se identificaron tres clases: fino, medio y grueso. Posteriormente, se realizó la conversión en formato raster para generar una reclasificación de los datos con base a su grado de susceptibilidad respecto a su granulometría (Tabla 2). El mapa reclasificado sirvió como insumo en la generación del modelo de susceptibilidad (Figura 8) categorización clase suelos.

Tabla 2. categorización de la clase textural de los suelos.

Clase textural	Grado de susceptibilidad
Fino	Baja
Medio	Media
Grueso	Alta

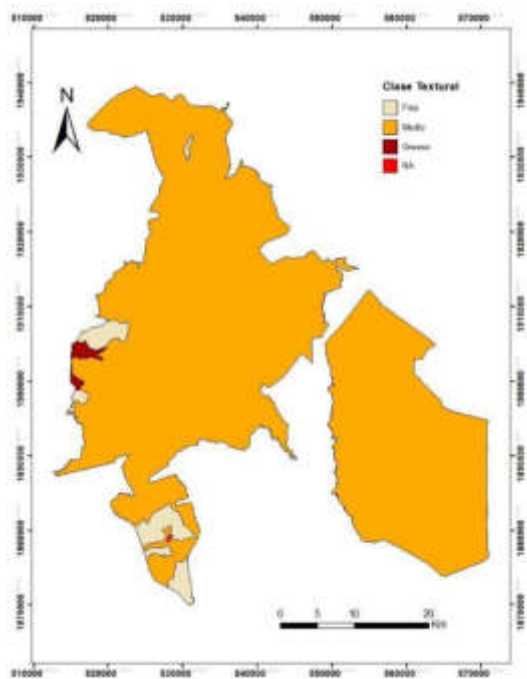


Figura 8. Mapa de clase textural de los suelos

Normalización de los factores

Debido a que los mapas resultantes nos reportan valores continuos y categóricos, fue necesaria la implementación de la normalización de estos valores para unificar la aportación en el modelo final de susceptibilidad, en cuyo caso los valores se centraron entre 0 y 1 como valores mínimos y máximos respectivamente.

Modelo de susceptibilidad

El proceso de generación del modelo de susceptibilidad involucró el modelo propuesto por Recondo et al., [12], el cual consiste en la acumulación de los aportes individuales de cada uno de los factores condicionantes en la generación de los PRM.

El índice de susceptibilidad se determinó a partir de la ecuación siguiente:

$$IS = SN + AN + DEN + IEPN + DLN \quad (1)$$

Donde:

IS: Índice de susceptibilidad,

SN: Pendiente normalizada,

AN: Aspecto normalizado,

IEPN: Índice de Erosión potencial normalizado y

DLN: Densidad de lineamientos normalizada.

El mapa obtenido presenta la información de la integración final de todos los factores. Los valores muestran se presentan en valores continuos que indican los grados de susceptibilidad

según su valor, que va desde 0.2 (muy bajo) hasta 3.4 (alto). El mapa resultante se muestra en la figura 9.

2.- RESULTADOS

El mapa final de susceptibilidad a procesos de remoción en masa muestra valores que van desde 0.2 hasta 3.47762 en el mapa categórico; en color azul se encuentran las zonas con menos susceptibilidad mientras que las zonas de color rojo son las más propensas a sufrir deslizamientos (Figura 9).

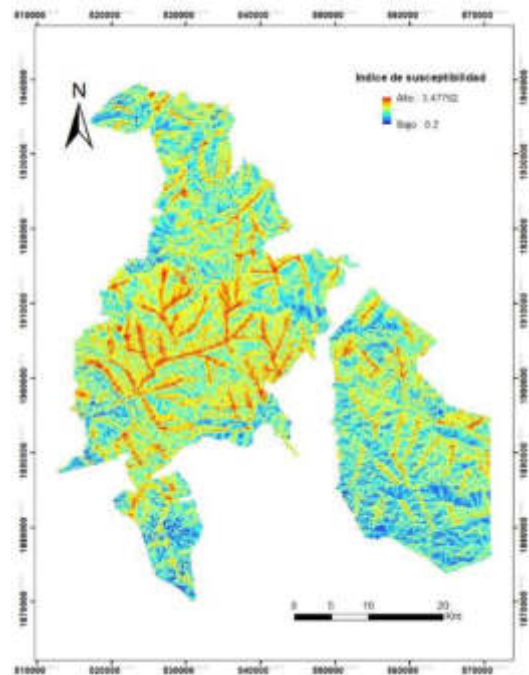


Figura 9. Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa

Con la finalidad de apreciar la clasificación del grado de susceptibilidad, en valores categóricos, se aplicó el método de Natural Breaks [2] para definir cinco clases de susceptibilidad: 1: Muy Baja, 2: Baja, 3: Media, 4: Alta y 5: Muy Alta. Este mapa categórico se muestra en la (figura 10).

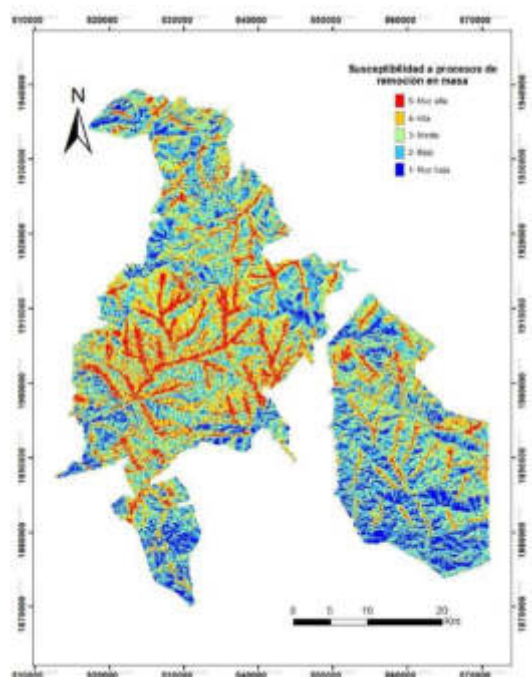


Figura 10. Mapa categórico de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

El mapa final muestra la concentración de zonas de susceptibilidad a procesos de remoción (Figura 10); según la Tabla 3, la clase de mayor extensión territorial es la correspondiente a la “Clase Media” con un total de 518.249 ha, y la de menor superficie corresponde a la clase “Muy Alta” con 158.554 ha.

Tabla 3. Superficie por categoría del mapa de susceptibilidad

Categoría	Superficie (Ha)	%
1-Muy alta	211.191	12.09
2-Baja	463.566	26.54
3- Media	518.249	29.65
4-Alta	395.303	22.63
5-Muy alta	158.554	09.07

Las áreas que presentan las coberturas de mayor susceptibilidad (Alta y Muy Alta), están íntimamente relacionadas a zonas de interacción entre la densidad a flujos y la densidad a lineamientos geológicos (Figura 4 y 7); en ambos casos hay zonas donde intersectan más de dos flujos o lineamientos en un mismo punto lo que incrementa la susceptibilidad; asimismo también se observa que las zonas de mayor riesgo están delimitadas por la presencia de grandes elevaciones, caso contrario a las zonas de menor elevación, en cuyos casos están relacionadas a las clasificaciones de menor impacto en la susceptibilidad. Las zonas con mayor acumulación de las todas categorías están relacionadas a la ubicación de litología con alta erosión potencial; las rocas presentes en esa área muestran una predisposición al fracturamiento debido a la presencia de planos de debilidad aunados a la presencia de lineamientos y flujos que

atraviesan a partir de ellas. Estas zonas son las menos recomendables para uso antrópico dentro del área de estudio.

3.- CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos, se pueden obtener resultados satisfactorios a partir del uso de la Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica para la generación de mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Se logró generar una regionalización de la susceptibilidad con base a los factores que se incorporaron al modelo. Este trabajo ayudo a determinar que las características geológicas e hidrológicas, juegan un papel importante en la generación de procesos de remoción.

El uso de estos mapas podría ser de gran utilidad en procesos de planeamiento territorial, desarrollo de planes de mitigación y gestión de riesgo por PRM en la propia zona de estudio.

Con base a este estudio, se sugiere la presencia de inventarios de deslizamientos para corroborar la información generada y de esta manera mejorar las técnicas en la generación de cartografía para la susceptibilidad a procesos de remoción.

El proceso aquí presentado, puede replicarse en zonas con características similares con resultados parecidos a los aquí presentados.

RECONOCIMIENTOS

Agradezco al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), por la información proporcionada.

REFERENCIAS

- [1] Romero-Rojas, W., Ramos-Bernal, R. N., Vázquez-Jiménez, R., Arrogante-Funes, P., & Sánchez-Tizapa, S (2017). Detección de deslizamientos de laderas por el método de Regresión Lineal utilizando imágenes Aster en la zona centro del Estado de Guerrero, México. XXV Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles, Madrid, España. Pp. 1-10, 25-27 de octubre de 2017. DOI: <https://doi.org/10.15366/ntc.2017>.
- [2] Ramos-Bernal, R.N., Vázquez-Jiménez, R., Romero-Rojas, W. (2018). Modelación de la susceptibilidad a deslizamientos de laderas mediante técnicas de Percepción Remota. Caso de estudio: zona centro del Estado de Guerrero, México. En X Congreso Internacional de Geomática, la Habana, Cuba; del 19 al 23 de marzo de 2018. ISBN: 978-959-7255-00-0.
- [3] González de Vallejo, Luis I, Ferrer M, Ortuño L, Oteo C. (2002). "Ingeniería geológica". Pearson educación.
- [4] Ramos-Bernal RN, Vázquez-Jiménez R, Romero-Calcerrada R, Novillo CJ, Arrogante-Funes P, Sánchez Tizapa S. (2015). "Identificación de deslizamientos de laderas aplicando técnicas de detección de cambios a imágenes Landsat en la zona costera del Estado de Guerrero, México". In: Juan de la Riva, Paloma Ibarra, Raquel Montorio, Marcos Rodríguez, editores. Análisis espacial y representación geográfica: innovación y

aplicación Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza; p. 827-834.

- [5] AristeguiNoticias, 2013. "Olvida " Gobierno de Guerrero a la Montaña y Tierra Caliente, afectados por lluvias.
- [6] Chuvieco, E., (2010), Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Editorial Planeta, S. A. Barcelona
- [7] Vázquez-Jiménez R. (2017). Tesis Doctoral: "Método alternativo para la elaboración de cartografía consistente de ocupación y uso del suelo, orientado a estudios de dinámica territorial", Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España. 2017, 267 p.
- [8] Aguiló-Alonso, M. (2006). Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Tercera edición. Madrid, España. Ministerio de Medio Ambiente.
- [9] Rawat M, Uniyal D, Dobhal R, Joshi V, Rawat B, Bartwal A. "Study of landslide hazard zonation in Mandakini Valley, Rudraprayag district, Uttarakhand using remote sensing and GIS", Curr.Sci. 2015, Vol.109, No.1, 158-170.
- [10] Hernández-Mena, Z. 2008. Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción de masa con base en análisis multivariado: La región de Zapotitlán de Méndez, Puebla. Centro de Geociencias. UNAM. Tesis de maestría. Juriquilla, Querétaro, México. 110 p.
- [11] Wang F, Xu P, Wang C, Wang N, Jiang N. "Application of a GIS-Based Slope Unit Method for Landslide Susceptibility Mapping along the Longzi River, Southeastern Tibetan Plateau, China", ISPRS International Journal of Geo-Information 2017, Vol. 6, No.6, p. 172.
- [12] Recondo C, Menéndez C, García P, González R, Sáez E. (2000). "Estudio de las zonas propensas a sufrir deslizamientos en los Concejos de Oviedo y Mieres (Asturias) a partir de una imagen Landsat-TM y de un Modelo Digital de Elevaciones", Revista de teledetección, Vol.14.
- [13] Alcántara Ayala, I., & Murillo García, F. G. (2008). Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. Investigaciones geográficas, (66), 47-64.