

Evaluación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa inducidos por huracanes y tormentas tropicales: Los Cabos, México

Evaluation of the Susceptibility to Landslides Induced by Hurricanes and Tropical Storms: Los Cabos, Mexico

Elías Gabriel Torres-Ruíz, División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Quintana Roo

Oscar Frausto-Martínez*, División de Desarrollo Sustentable, Universidad de Quintana Roo

*Autor para correspondencia: ofrausto@uqroo.edu.mx

RESUMEN. Los procesos de remoción en masa (PRM) son eventos morfodinámicos que causan pérdidas anuales de infraestructura pública, infraestructura privada e inclusive pérdidas de vidas. La creación de cartografía que zonifique la susceptibilidad a PRM ayuda a generar planes de prevención y mitigación que evitan o minimizan los posibles daños que estos eventos pueden ocasionar. El objetivo de este estudio es evaluar la susceptibilidad a PRM en el municipio de Los Cabos, Baja California Sur, México, a través del conocimiento de los factores condicionantes que contribuyen a su desarrollo en esta región, así como el conocer y comprender el factor detonante a la ocurrencia de éstos. El propósito de analizar el factor detonante (precipitación) fue determinar los umbrales de precipitación que propician PRM, con base en ello se analizaron las relaciones entre la distribución espacial de los PRM y la precipitación diaria acumulada para los huracanes Odile, Jimena y Paúl, así como de las tormentas tropicales Georgette, Norman, Juliette y Lorena. Para el análisis de los factores condicionantes se empleó el método estadístico ANN (Red neuronal artificial) y 27 variables espaciales. Los resultados del análisis de precipitación mostraron que el Huracán Odile detonó PRM con un umbral de precipitación de 233 a 371 mm, mientras que los otros eventos detonaron PRM con un umbral de 74 a 166 mm. Por su parte, los resultados de la modelación de la susceptibilidad sugieren que son 15 los factores condicionantes que propician la ocurrencia de PRM en esta región.

PALABRAS CLAVE: Eventos hidrometeorológicos, deslaves, umbral de precipitación, zonificación de amenaza

ABSTRACT. Landslides are morphodynamic events that cause annual losses of public infrastructure, private infrastructure and even loss of life. The creation of cartography that classifies the susceptibility to landslides helps to generate prevention and mitigation plans that avoid or minimize the possible damages that these events can cause. The aim of this study is to evaluate the susceptibility to landslides in the municipality of Los Cabos, Baja California Sur, Mexico, through the knowledge of the conditioning factors that contribute to its development in this region, added to it, it was also considered important to know and understand the detonating factor that induces their occurrence. The purpose of analyzing the detonating factor (precipitation) was to determine the rainfall thresholds that favor landslides, based on this, the relationships between the spatial distribution of the landslide and the accumulated daily rainfall for Hurricanes Odile, Jimena and Paul, as well as tropical storms Georgette, Norman, Juliette and Lorena, were analyzed. For the analysis of the conditioning factors, the statistical method ANN (Artificial Neuronal Network) and 27 spatial variables, were used. The results of the precipitation analysis showed that Hurricane Odile detonated landslides with a precipitation threshold of 233 and 371 mm, the other events detonated landslides with a threshold of 74 to 166 mm. On the other hand, the results of the modeling of susceptibility suggest that there are 15 conditioning factors that favor the occurrence of landslides in this region.

KEYWORDS: hydrometeorological events, landslides, precipitation threshold, threat zoning

1. Introducción

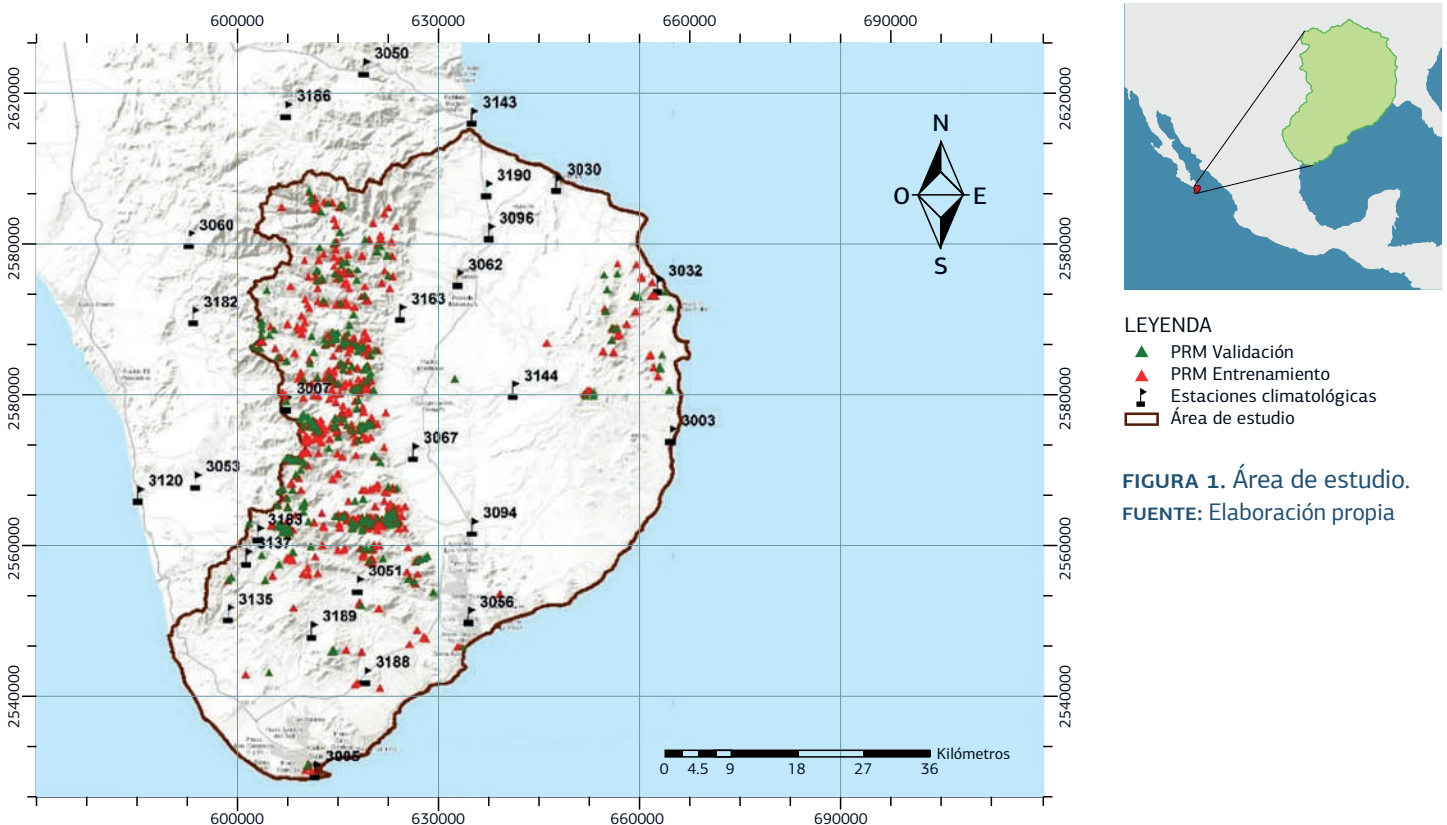
Los PRM son uno de los principales fenómenos de origen natural o antrópico responsables de la pérdida de bienes, servicios y en ocasiones de vidas humanas (Galindo y Alcántara, 2015:123). Iwan y col. (1999:1944) considera que la aplicación de medidas de preventivas y medidas de mitigación reduciría las pérdidas y minimizaría el coste estimado de los montos destinados a la recuperación. Es por ello que se hace hincapié en conocer el comportamiento de los PRM, los factores que los condicionan, así como los factores que lo detonan para poder identificar las zonas donde se pueden presentar nuevos eventos (Li y col. 2012:2720). Duque (2001:38) señala que “conocer e identificar las zonas amenazadas por la ocurrencia de un fenómeno natural es muy útil para poder trazar planes y tomar decisiones acerca de cómo se pueden prevenir o, por lo menos, minimizar sus consecuencias desfavorables”.

Diferentes métodos pueden ser encontrados en la literatura actual para la evaluación numérica de la susceptibilidad a PRM, incluyendo métodos heurísticos directos e indirectos, determinísticos y estadísticos (Pradhan y Lee, 2010:748). La ANN es una

metodología estadística alternativa, un modelo de relaciones no lineales que permite extraer información útil de relaciones espaciales y genera resultados razonables, aun cuando algunos de los insumos de origen son deficientes (Ermini y col. 2005:332; Kanungo y col. 2006:349).

Trabajos recientes de investigación de la susceptibilidad a PRM, donde la ANN ha sido empleada, han demostrado que el método es totalmente confiable, eficiente y muy preciso (Yilmaz, 2010; Pradhan y Lee, 2010; Rossi y col. 2010; Melchiorre y col. 2011; Nefeslioglu y col. 2011; Conforti y col. 2014; Tsangaratos y Benardos, 2014; Tien Bui y col. 2016).

Para este estudio se eligió el municipio de Los Cabos, Baja California Sur, México, un área con ambiente árido y semiárido, poco estudiada en nuestro país debido a la percepción de que los PRM están asociados con mayor frecuencia a zonas con clima cálido húmedo, cálido semihúmedo y climas templados (Ngadisih y col. 2016:060001-1). Adicionalmente, las características geográficas del lugar nos permiten analizar de manera individual un factor detonante, como es la precipitación originada principalmente por huracanes y tormentas tropicales; los cuales impactan en promedio una vez al año (Romero y Romero, 2016:64). Cabe destacar



que la cartografía de susceptibilidad a PRM para esta región se ha basado principalmente en la inclinación de las pendientes (CENAPRED, 2018), donde se consideran como zonas susceptibles todas aquellas áreas con una inclinación $> 6^\circ$. Para el caso del estudio de susceptibilidad a PRM en el Atlas de riesgos del municipio de Los Cabos, éstos fueron obtenidos de manera determinística de acuerdo al factor detonante de la sismicidad, modelado a través de las propiedades mecánicas del basamento litológico y la inclinación de las laderas (Gobierno Municipal de Los Cabos, 2013). En ambos estudios, se manejan áreas de susceptibilidad, sin señalar la relación puntual de los eventos reportados y la validación de los modelos. Para esto, Antinao y Farfan (2013), reconocen los factores detonantes asociados a precipitaciones extremas en el extremo sur de la península de Baja California, donde la geometría de la vertiente, geología, exposición y la orientación de las laderas jugaron un papel detonante en la formación de deslizamientos asociados a eventos de precipitaciones extremas; se destaca la identificación puntual de eventos de deslizamientos producto de los efectos del huracán Juliette.

El estudio se dividió en dos partes, en la primera se analiza el factor detonante de PRM (precipitación) asociado a varios eventos hidrometeorológicos que tuvieron lugar entre los años 2009-2014 y en la segunda, se analizan los factores condicionantes que contribuyeron al desarrollo de los PRM mediante el uso de la ANN.

2. Descripción del área de estudio

El área de estudio se delimitó con base al límite municipal de Los Cabos, Baja California Sur, México y se prolongó o acotó al parteaguas (Fig. 1). Limita al norte con el municipio de La Paz y al sur y este con el Golfo de California, la superficie total es de 3,815.63 km². Las elevaciones con respecto al nivel medio del mar varían entre 0 y 2082 metros (INEGI, 2015), un 38% del área de estudio está formada por un sistema montañoso el cual tiene en promedio una inclinación de pendiente de 25° (INEGI, 2015).

Los Cabos es el segundo municipio de estado de Baja California Sur con mayor probabilidad de ser impactado por un ciclón anualmente, en él impactan con mayor frecuencia huracanes de categorías 2 y 3; es una región árida que posee uno de los promedios de lluvia más bajo de todo el país (Romero y Romero, 2016:50) y donde se presentan precipitaciones extremas, generalmente en

el mes de septiembre, debido a los ciclones tropicales (Cavazos y col. 2008: 5). La precipitación media mensual de lluvias varía desde 0.5 a 141.9 mm, siendo los meses más lluviosos de julio a octubre, con un promedio mensual de lluvias de 34.5 mm, 82.3 mm, 141.9 mm y 34.8 mm, respectivamente (SMN, 2015). El promedio de la precipitación diaria máxima en 24 h varía de 0 a 105.60 mm, para los meses más lluviosos es de 4.75 a 105.60 mm; la cantidad mínima de precipitación diaria máxima en 24 h ocurre en el mes de septiembre y es de 39.64 mm (SMN, 2015), estas tendencias no han variado significativamente de las sinópticas de Pavía (2015), donde los meses de agosto y septiembre supera los 100 mm para la precipitación mensual acumulada, además en este municipio se concentran las afectaciones del denominado Monzón de Norte América (CNA, 2004 citado en Cavazos y col. 2008). La temperatura media mensual es de los 17.8° C a los 28.7° C, los meses con mayor promedio mensual de temperatura son julio, agosto y septiembre que tienen valores $> 27.8^\circ\text{C}$ (SMN, 2015).

Desde el punto de vista geológico, la edad de la roca comprende del mesozoico y cenozoico, siendo en esta última para el plioceno y cuaternario (SGM, 2015). Las agrupaciones geológicas más representativas son: las rocas ígneas intrusivas del mesozoico (60.78 %), como granitos y granodiorita tonalita; las rocas sedimentarias del cenozoico cuaternario (11.81 %), como los conglomerados que forman abanicos pluviales como depósitos de poca compactación. Finalmente, las areniscas del cenozoico terciario (8.62 %), que se presentan en forma de abanicos o terrazas aluviales (SGM, 2015).

Los tipos de suelos predominantes son los regosoles (49.8%) y leptosoles (37.9%), ambos tienen la principal característica de ser suelos someros y contienen una textura gruesa (INEGI, 2015). La vegetación está dominada por Matorral Sarcocaula (32.8%), vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino (21.5 %), matorral sarco-crasicaule (14.8%) y selva baja caducifolia (14.8%) (INEGI, 2015).

3. Datos utilizados

Para la correcta realización de esta investigación se necesitaron 3 insumos básicos: el inventario de PRM para conocer la distribución y localización de estos eventos, la precipitación para identificar su respectiva distribución espacio-temporal y su relación con los PRM, y los factores condicionantes que pueden propiciar la susceptibilidad de las laderas.

El inventario de PRM fue el resultado de la digitalización de PRM superficiales a partir de imágenes satelitales Digital Globe, con resoluciones menores o iguales a 3.2 m (Figura 1). La elaboración se realizó en tres etapas: la primera etapa tuvo una duración de tres semanas y consistió en la digitalización manual de PRM mediante el uso de puntos y polígonos, interpretando sobre imágenes Digital Globe almacenadas en el software Google Earth Pro, aquellas formas lineales y circulares irregulares, con colores marrones oscuros y claros que sobresalían en la vegetación; las fechas de las imágenes fueron 10/08/2009, 07/07/2010, 08/07/2011, 21/05/2012, 26/01/2014, 15/08/2014, 12/11/2014 y 18/11/2014; la segunda etapa, con duración de 6 días, consistió en recorridos a pie o en vehículo sobre las diferentes unidades de

relieve para verificar y actualizar el inventario de PRM, los recorridos se hicieron del 6 al 12 de Junio de 2016, con la limitante de elegir aquellos lugares que tuviesen acceso por medio de carreteras, caminos de terracerías o rutas de senderismo. Para la localización de los PRM válidos o identificados físicamente se emplearon GPS de marca GARMIN con precisión de 3 metros. La última etapa se realizó durante un mes y consistió en una nueva digitalización con base en los parámetros descriptivos (color, textura, patrón, forma, etc.) que presentaron los PRM cartografiados de manera física sobre las imágenes Digital Globe y que no fueron considerados en la primera digitalización.

Para la precipitación fue necesaria la recolección de datos de 26 estaciones meteorológicas de la base de datos de CLImate COMputing Project (Fig. 1), de las

TABLA 1. Factores condicionantes empleados en la modelación de la susceptibilidad a PRM.

N.º	Factor	Tipo	Fuente de origen	Escala o resolución
1	Ángulo de la pendiente	Geomorfológicos	MDE (INEGI)	15m
2	Orientación de la pendiente	Geomorfológicos	MDE (INEGI)	15m
3	Elevación	Geomorfológicos	MDE (INEGI)	15m
4	Curvatura de la pendiente	Geomorfológicos	MDE (INEGI)	15m
5	Plano de curvatura	Geomorfológicos	MDE (INEGI)	15m
6	Índice de humedad topográfica	Hidrológicos	MDE (INEGI)	15m
7	Perfil de curvatura	Geomorfológicos	MDE (INEGI)	15m
8	Índice de transporte de sedimentos	Hidrológicos	MDE (INEGI)	15m
9	Índice de posición topográfica	Geomorfológicos	MDE (INEGI)	15m
10	Factor LS	Geomorfológicos	MDE (INEGI)	15m
11	Acumulación de flujo	Hidrológicos	MDE (INEGI)	15m
12	Radiación solar	Meteorológicos	MDE (INEGI)	15m
13	Rugosidad del terreno	Geomorfológicos	MDE (INEGI)	15m
14	Longitud de flujo	Hidrológicos	MDE (INEGI)	15m
15	Dirección de flujo	Hidrológicos	MDE (INEGI)	15m
16	Índice de convergencia	Geomorfológicos	MDE (INEGI)	15m
17	Edafología	Edafológicos	Carta Edafológica (INEGI)	1 : 250,000
18	Litología	Geológicos	Carta Geológica (SGM)	1 : 250,000
19	Unidades geomorfológicas	Geomorfológicos	Datos vectoriales de geomorfológicos (Propia)	1 : 25,000
20	Distancia a carreteras	Antrópicos	Datos vectoriales de caminos y carreteras (INEGI)	1: 20,000
21	Densidad de carreteras	Antrópicos	Datos vectoriales de caminos y carreteras (INEGI)	1: 20,000
22	Distancia a lineamientos	Geológicos	Datos vectoriales de lineamientos (Propia)	1: 20,000
23	Densidad de lineamientos	Geológicos	Datos vectoriales de lineamientos (Propia)	1: 20,000
24	Distancia a escurrimientos	Hidrológicos	Datos vectoriales de corrientes de agua (Propia)	1: 20,000
25	Densidad de escurrimientos	Hidrológicos	Datos vectoriales de corrientes de agua y subcuencas hidrológicas (Propia)	1: 20,000
26	NDVI	Vegetación	Landsat OLI 8, 2015	15m
27	Vegetación y uso de suelo	Vegetación	Datos vectoriales de vegetación y uso de suelo (Propia)	1: 50,000

FUENTE: Elaboración propia.

cuales se extrajo el valor de precipitación diaria para los años 2009-2014, posteriormente se realizó un filtro en el cual se seleccionaron únicamente los días en que ocurrieron los siguientes eventos hidrometeorológicos: Huracán Jimena (28/agosto-4/septiembre/2009), Tormenta tropical Georgette (20-23 septiembre/2010), Tormenta tropical Norman (28-29 septiembre/2012), Huracán Paul (13-17 octubre/2012), Tormenta tropical Juliette (28-29 agosto/2013), Tormenta tropical Lorena (5-7 septiembre/2013) y Huracán Odile (10-18 septiembre/ 2014). Estos eventos hidrometeorológicos fueron seleccionados por ser los únicos que ocasionaron precipitación dentro del área de estudio en el periodo analizado. A partir de la información anterior se obtuvo, para cada evento, la precipitación máxima diaria y se generó la precipitación diaria acumulada. Cada grupo de datos fue interpolado empleando la herramienta de distancia inversa ponderada (IDW) del software Arcgis 10.3, como producto final se obtiene para cada evento dos ráster de precipitación con un tamaño de pixel de 10m.

En cuanto a los factores condicionantes se consideraron veintisiete variables, la tabla 1 muestra los factores, el tipo de factor, la fuente de origen y la escala o resolución de la fuente de origen.

Algunas fuentes de origen (como los caminos y carreteras, lineamientos geológicos, corrientes de agua, geomorfología y vegetación y uso de suelo) fueron de creación propia, realizadas a mayor escala en comparación con la información cartográfica que ofrecen instituciones oficiales, esto se realizó con la finalidad de obtener mayor precisión y detalle en los factores condicionantes. Los factores con información tipo categórica fueron transformados a datos de tipo continuo, por ejemplo, la litología, edafología o unidades geomorfológicas que son factores representados mediante clases sufrieron cambios y sus clases fueron representadas por números. El objetivo de la transformación fue facilitar la rasterización de los factores condicionantes para su óptima manipulación en los siguientes procesos. Cada uno de los factores condicionantes fueron rasterizados con un tamaño de pixel de 10m en el software Arcgis 10.3, como resultado obtuvimos 27 capas raster.

4. Procesamiento metodológico

La metodología empleada en esta investigación se detalla en las siguientes secciones, pero es mostrada de manera general en la Figura 2.

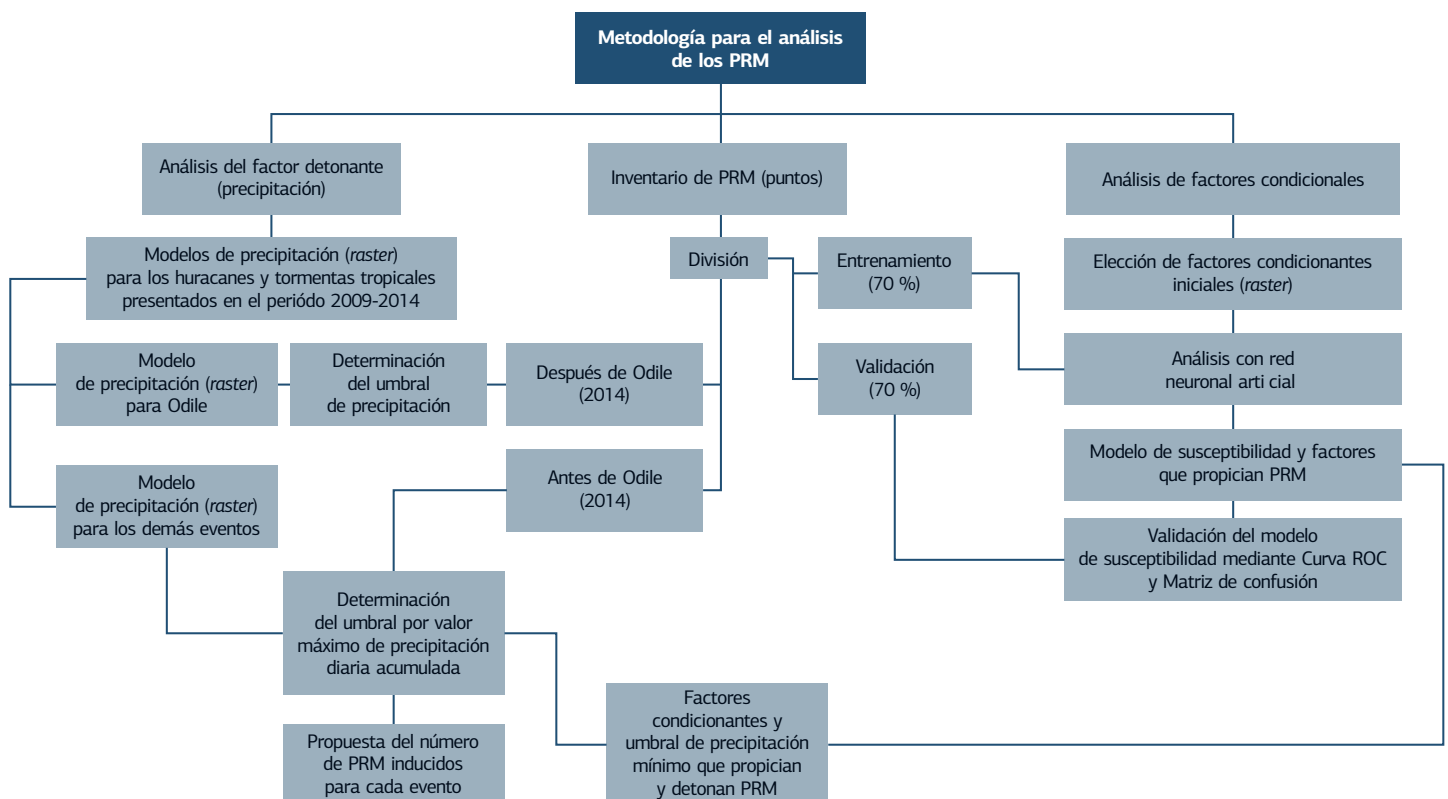


FIGURA 2. Diagrama de flujo de la metodología empleada

4.1 Determinación del umbral de precipitación que detona PRM

Para este análisis se emplearon los archivos ráster de precipitación para cada evento hidrometeorológico y el inventario de puntos de PRM. En primer lugar, se extrajeron los valores de los raster de precipitación diaria máxima y diaria acumulada a los puntos de inicio de PRM, los valores obtenidos de ambas precipitaciones para cada evento fueron evaluados mediante técnicas de correlación de Pearson y regresión lineal con la finalidad de evitar analizar ambas precipitaciones en dado caso que su comportamiento en los PRM fuese similar. Para efectos posteriores se menciona solamente el uso de la precipitación diaria acumulada, esto se justifica más adelante en el apartado de resultados.

Posteriormente, el inventario de PRM fue dividido en dos partes, un grupo antes del Huracán Odile y un grupo después de él; la idea principal de trabajo era asociar los PRM con su respectivo fenómeno hidrometeorológico detonante, algo que fue imposible de realizar debido a que no se contó con imágenes satelitales que cubrieran toda la zona de estudio para un periodo de tiempo antes y después de ocurrido un evento. No así para el huracán Odile en el cual se contó con imágenes de satélite que cubrían toda la zona de estudio antes (26/01/2014 y 15/08/2014) y después de haberse presentado (12/11/2014 y 18/11/2014). Lo que permitió asociar al huracán Odile un número puntos del inventario de PRM y asumir que los puntos de PRM antes del Odile se debían a cualquiera de los otros fenómenos hidrometeorológicos.

Para determinar los umbrales de precipitación que detonaron PRM ante la presencia del huracán Odile únicamente se revisaron los valores de precipitación diaria acumulada, extraídos en uno de los pasos anteriores. El análisis para la determinación de los umbrales de precipitación que detonaron PRM en los otros eventos resultó ser más complejo, para ello, se compararon los valores de la precipitación diaria acumulada obtenidas para todos los eventos y se le asignó a cada uno de los PRM el valor máximo de precipitación de esas comparaciones, por ejemplo, si un PRM obtuvo 81mm, 75mm, 29mm, 82 mm, 10mm y 79mm; el valor asignado al PRM sería 82mm. Por último, para representar los umbrales de precipitación se utilizaron técnicas estadísticas como distribución de frecuencias e histogramas.

4.2 Determinación del número de PRM para cada evento hidrometeorológico

En este apartado se realizó una propuesta sencilla para determinar el posible número de PRM que pueden ocasionar los fenómenos hidrometeorológicos en sus diferentes categorías. Para ello se contabilizaron para cada evento hidrometeorológico todos aquellos PRM ocurridos antes del Huracán Odile que tenían un valor igual o mayor al umbral mínimo de precipitación encontrado en esta investigación.

4.3 Modelación de la susceptibilidad a PRM

Los programas que fueron empleados para la modelación de la susceptibilidad por ANN son el software IBM SPSS Statistics 20 (modelación numérica) y el software Arcmap 10.3 (modelación espacial). En la modelación numérica fue necesario disponer de una variable categórica binaria que definiera dos grupos: zonas no susceptibles (0) y zonas susceptibles (1). Las zonas susceptibles fueron representadas con el inventario puntual de los PRM y las zonas no susceptibles se representan con puntos generados de manera aleatoria sobre aquellas zonas donde no se observó PRM. Para evitar sesgos en la modelación se decidió generar, para las zonas no susceptibles, el mismo número de puntos que contienen las zonas susceptibles. Ambos grupos se dividieron de forma aleatoria en dos partes mediante el software Arcmap 10.3: entrenamiento (70%) y validación (30%).

El siguiente paso consistió en usar los 27 raster de los factores condicionantes y someterlos a un análisis de correlación de Pearson con la finalidad de eliminar las posibles variables redundantes que pueden afectar directamente de forma negativa los resultados de la modelación, cabe recordar que muchos de los factores condicionantes tuvieron la misma fuente de origen (Tabla 1). Posteriormente se utilizaron los puntos de entrenamiento, tanto para zonas susceptibles como para zonas no susceptibles y se extrajo información de los raster de los factores condicionantes que no resultaron redundantes en la prueba de correlación. Esta información fue exportada en formato de texto .txt y modelada con la ANN dentro del software IBM SPSS Statistics 20. La estructura de la ANN fue de tipo perceptrón multicapa con una capa de entrada de 15 neuronas, una capa oculta de 7 neuronas que se activó con una función de tangente hiperbólica y una capa de salida con 2 neuronas que

se activó con una función softmax. Los parámetros de sesgo y pesos calculados por la ANN fueron sustituidos en la fórmula matemática que la define dentro del software ArcGIS 10.3.

El resultado de la modelación generó un archivo raster con probabilidades de 0 a 1, la división de las zonas susceptibles y zonas no susceptibles se definió en el valor de 0.5 con base al tamaño de la proporción de muestras del entrenamiento, que corresponde a la relación de tamaño existente entre el número de celdas con inicios de PRM (654) y el número de celdas totales de muestreo (1308). Los valores de probabilidad de las zonas no susceptibles se han agruparon en una sola clase (no susceptibilidad) y los valores de probabilidad de las zonas susceptibles se agruparon en 5 clases, con base al método de intervalos iguales (Muy baja, baja, media, alta y muy alta).

4.4 Evaluación de la susceptibilidad

El archivo raster resultado de la modelación de la susceptibilidad fue sometido a una evaluación para conocer su grado de confiabilidad y validez. Para ello se empleó la curva ROC (Características Operativas del Receptor) y la matriz de confusión como métricas de validación, ambas métricas son comúnmente empleadas para este tipo de evaluación. El raster de la susceptibilidad fue contrastado con los puntos de validación tanto de zonas susceptibles como de zonas no susceptibles que fueron separados antes del entrenamiento y que no influyeron en él.

5. Resultados

5.1 Cartografía del inventario de PRM

El inventario de PRM consta de 934 PRM, los cuales se agruparon mediante la clasificación de Varnes (1978:11) en las siguientes categorías: 16 movimientos traslacionales de derrubios, 8 flujos de roca y 910 flujos de derrubios. 97% de los PRM son flujos de derrubios que inician cerca de la parte superior del parteaguas y se dirigen hacia el canal de desagüe más cercano, tienen una longitud de 50 a 600 m.

Los flujos de roca poseen una longitud de 200 a 350 m y un ancho variable de 20 a 25 m aproximadamente, las rocas tienen un diámetro aproximado menor o igual a 1.5 m. Los deslizamientos son poco frecuentes y los encontrados en este trabajo estaban en estado inactivo: apagado o abandonado y posiblemente son reactivados durante el periodo de lluvias.

5.2 Umbrales de precipitación que detonan PRM

Los PRM cartografiados antes de Huracán Odile fueron 322 y, después de él, se registraron 612. En la correlación y regresión lineal, la precipitación máxima diaria demostró tener un efecto muy similar a la precipitación diaria acumulada en la mayoría de los eventos (Tabla 2); en otras palabras, los eventos sucedieron en lapsos de tiempo muy cortos, pero con grandes cantidades de precipitación, a excepción de las tormentas tropicales Georgette y Lorena, las cuales tuvieron una duración de mayor número de días, pero sus precipitaciones diarias fueron menores que las de los otros eventos. Es por ello que en este estudio solamente se tomó en cuenta la precipitación diaria acumulada por evento, aunque Georgette y Lorena presentaron otro comportamiento, es probable que las bajas precipitaciones máximas diarias registradas no fuesen un factor detonante a PRM.

Se encontró que el umbral de precipitación detonante de PRM para el huracán Odile fue de 183 a 371 mm (Fig. 3) con una media de 291.75 mm, el resto de los eventos detonaron PRM con un umbral de 74 mm a 166 mm (Fig. 3) y una media de 117.49 mm; en la figura 3 A1, se muestran los umbrales de precipitación que detonaron PRM antes del Huracán Odile y en la figura 3 A2 los umbrales de precipitación que detonaron PRM después del Huracán Odile.

5.3 Número de PRM para cada evento hidrometeorológico

Tomando en cuenta el umbral de precipitación mínima para la generación de PRM (74 mm) se determinó que las tormentas tropicales de corta duración

TABLA 2. Correlación de Pearson y regresión lineal entre la precipitación diaria máxima y diaria acumulada por evento.

	Jimena (2009)	Georgette (2010)	Norman (2012)	Paul (2012)	Juliette (2013)	Lorena (2013)	Odile (2014)
Correlación de Pearson	0.848	-0.98	0.97	0.926	0.969	0.666	0.98
Regresión lineal	0.848	0.1	0.941	0.858	0.94	0.444	0.961

FUENTE: Elaboración propia

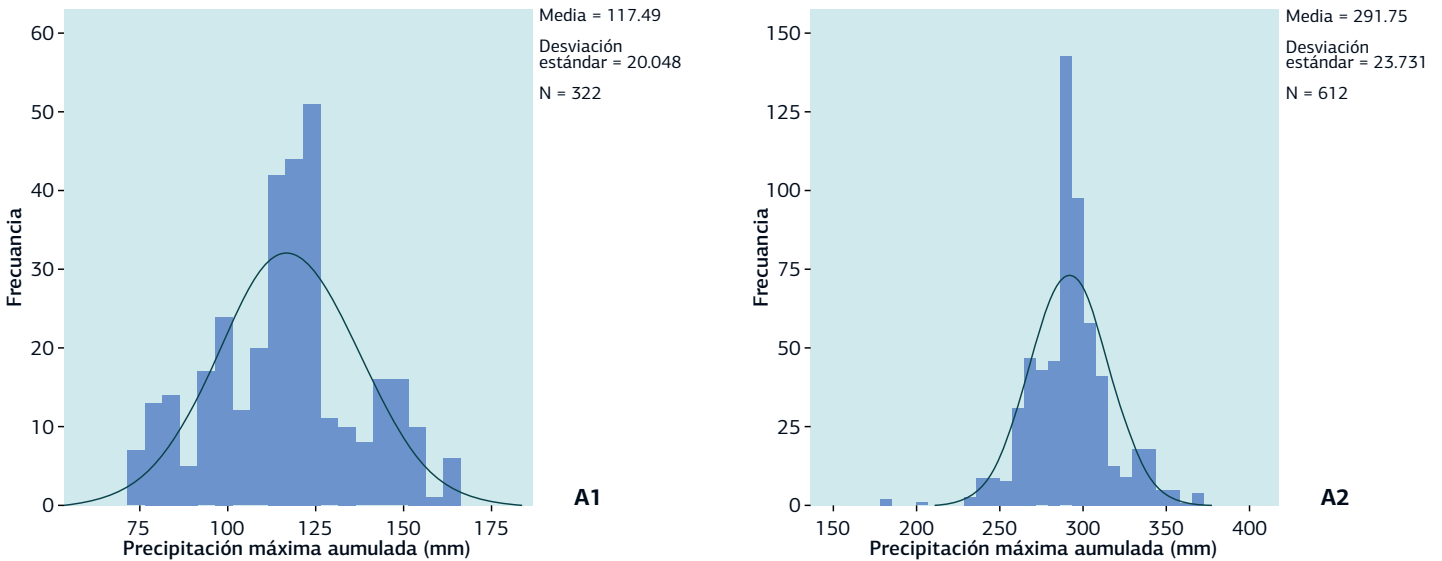


FIGURA 3. Histogramas de la precipitación diaria acumulada y su relación con los PRM.

FUENTE: Elaboración propia

(1-2 días) pueden originar de 0 a 49 PRM, las tormentas tropicales de larga duración (mayor de 3 días) de 124 a 219 PRM, los huracanes de categoría I y categoría II entre 314 y 318 PRM y un huracán de categoría IV 612 PRM (Tabla 3).

TABLA 3. Posible número de ocurrencia de PRM de acuerdo con el umbral mínimo de precipitación.

Evento hidrometeorológico (Categoría)	Número de PRM
Huracán Jimena (II)	318
Tormenta tropical Georgette	124
Tormenta tropical Norman	49
Tormenta tropical Juliette	0
Huracán Paul (I)	314
Tormenta tropical Lorena	219
Huracán Odile (IV)	612

FUENTE: Elaboración propia

5.4 Modelo de susceptibilidad y factores condicionantes

La ANN sugirió que 608.11 km² que representan un 16% del área de estudio son zonas susceptibles a presentar PRM. Sólo 15 de los 27 factores condicionantes fueron considerados por la ANN como variables explicativas ante la ocurrencia de PRM: ángulo de inclinación de la pendiente (26 a 40 grados), índice de convergencia (pendientes intermedias), plano de curvatura (superficies lineales), índice de posición topográfica (pendiente media y superior), NDVI (vegetación ligera), radiación solar (193-219 Kwh/m²,

índice de transporte de sedimentos (alta pérdida de suelo), distancia a lineamientos (0-627 m), acumulación de flujo (baja acumulación), densidad de escurrimientos (0.91-1.03 m/km²), longitud de flujo (0-106 m = Indica cercanía a parteaguas), elevación (727-1141m), perfil de curvatura (superficies lineales), orientación de la pendiente (Sur, sureste y suroeste) y la curvatura general de la pendiente (superficies lineales). Generalmente, la mayor parte de las áreas susceptibles se encuentra en la zona de montaña, pero las principales

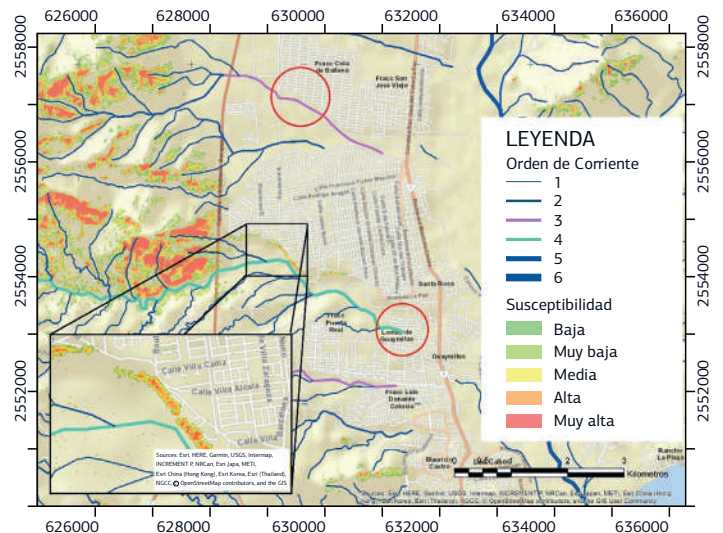


FIGURA 4. Susceptibilidad a PRM en la ciudad de San José del Cabo, muestra: asentamientos humanos sobre terrazas aluviales con alta y muy alta susceptibilidad.

FUENTE: Elaboración propia.

ciudades del lugar no se encuentran exentas a daños por PRM, San José del Cabo puede presentar daños por transporte de materiales en órdenes de corriente categoría 3 y 4, así como también verse afectado directamente por PRM sobre las terrazas aluviales; en donde se concentran asentamientos humanos (Fig. 4).

El modelo también propuso como zonas de alta y muy alta susceptibilidad el campo de Golf de punta palmilla, la zona residencial Querencia y las terrazas de Costa Azul. Por su parte, Cabo San Lucas presentó zonas con alta y muy alta susceptibilidad en la zona residencial de Villas Montecristo States, El Pedregal y Skypool (Fig. 5).

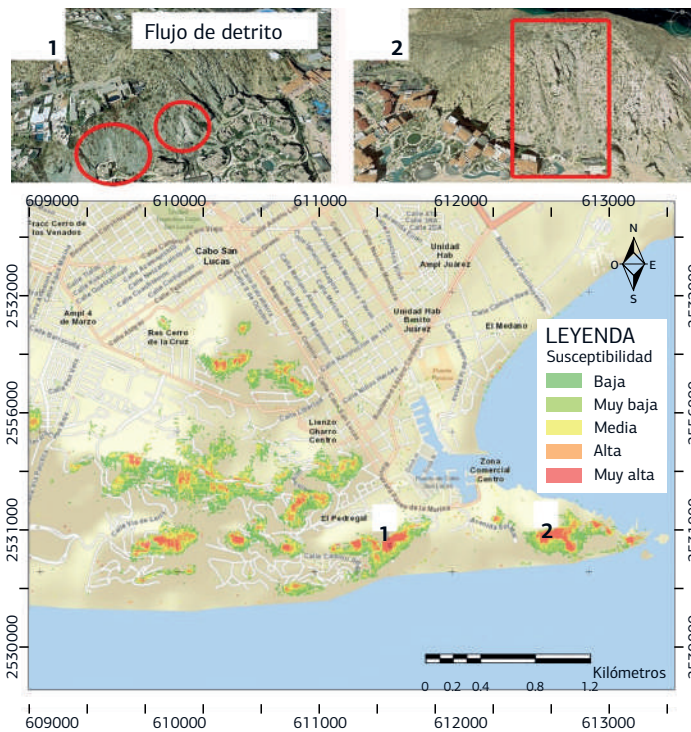


FIGURA 5. Susceptibilidad a PRM en la ciudad de Cabo San Lucas. 1 y 2 representan ubicaciones donde ocurrieron PRM durante el 2015-2018 y que fueron pronosticadas por el modelo como zonas de alta y muy alta susceptibilidad.

FUENTE: Elaboración propia.

5.5 Validación de la susceptibilidad

Los resultados de la curva ROC evaluando el rendimiento global de clasificación es de 95.2 %, con un error estándar estimado de 0.09 y un intervalo de confianza de ± 0.0017 ; los valores de sensibilidad y especificidad alcanzaron 91.07% y 87.14%, respectivamente, lo cual indica que el modelo tiene muy buena capacidad de clasificación de zonas susceptibles (Fig. 6).

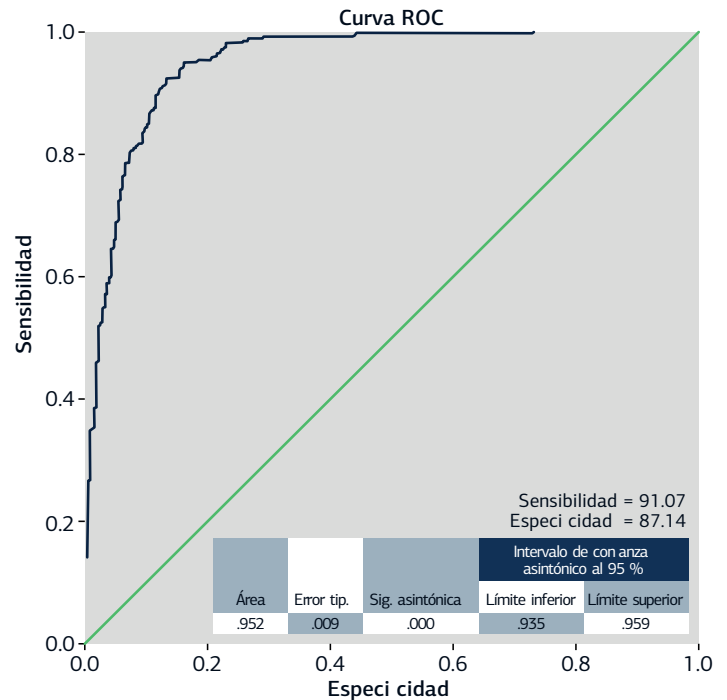


FIGURA 6. Resultados de la validación mediante la Curva ROC.

FUENTE: Elaboración propia

Los resultados de la validación por la matriz de confusión indicaron un excelente rendimiento con un índice de exactitud y precisión igual a 89% y 91%, respectivamente; clasificando correctamente 255 de 280 zonas susceptibles y 244 de 280 de zonas no susceptibles.

6. Discusión

Se puede afirmar que el modelo de ANN produce estimaciones precisas de la distribución espacial de las zonas susceptibles a PRM, esta aseveración concuerda con los resultados presentados por Yilmaz (2010), Pradhan y Lee (2010), Rossi y col. (2010), Melchiorre y col. (2011), Nefeslioglu y col. (2011), Conforti y col. (2014), Tsangaratos y Benardos, (2014) y Tien Bui y col. (2016). La ANN es un mecanismo autónomo de análisis no lineal que además de permitir zonificar con una alta exactitud y precisión las áreas con mayor o menor predisposición a PRM, ayuda a identificar los factores condicionantes que contribuyen a desestabilizar las laderas, es decir, cumple con las funciones de ser descriptivo y explicativo. La única limitación que podemos observar para el uso de las ANN es lenguaje matemático que se tiene que dominar para entender los procesos dentro del modelo.

El hecho de tener un número considerable de factores condicionantes al inicio del modelamiento no influye en que el modelo sea mejor para la clasificación de las zonas estables o inestables, pero si aumenta la posibilidad de encontrar los factores que realmente influyen en la ocurrencia de PRM sobre un área de estudio en particular. Se aconseja utilizar modelos estadísticos que permitan evaluar la significancia estadística o la posible correlación entre los PRM y los factores condicionantes, o en su caso utilizar ANN.

En este trabajo se observó que los factores condicionantes que comúnmente se expresan en categorías como la edafología, litología, unidades geomorfológicas, usos de suelo y vegetación resultaron ser no condicionantes, este problema puede deberse a la escala del origen de los insumos que generalizan grandes cantidades de área y por lo tanto no ayudan identificar las zonas susceptibles, por el contrario, generan ruido a la modelación y afectan la precisión y exactitud de modelo final sobreestimando susceptibilidad. Lo que se sugiere es que utilicen estos insumos con escalas mayores y que se eviten utilizar directamente al modelado de la susceptibilidad sin antes corroborar que realmente sean factores condicionantes explicativos para los PRM.

En cuanto a las zonas susceptibles detectadas por el modelo es muy llamativo el hecho de que las laderas con dirección sur, sureste y suroeste sean las más afectadas por PRM, algo que puede asociarse con la frecuencia de las trayectorias de los vientos y precipitación de los fenómenos hidrometeorológicos que evita la regeneración de vegetación e influye a mayor pérdida de suelo y mayor exposición de las rocas a los fenómenos meteorológicos como la radiación. La alta y muy alta susceptibilidad encontrada para algunas zonas residenciales y habitacionales puede ser discutible para esta región, sobre todo porque los PRM con mayor presencia son flujos de detritos superficiales, por lo tanto, las mismas construcciones pudiesen haber mitigado ya la amenaza latente.

Por último y no menos importante, el umbral de precipitación para la detonación de PRM en este trabajo contiene cierto sesgo debido a la limitante de no poder asociar directamente los PRM a cada uno de los fenómenos hidrometeorológicos estudiados. El umbral de precipitación puede ser más preciso si se analizan los PRM inducidos por su respectivo fenómeno hidrometeorológico. El análisis para determinar el umbral de precipitación que detona PRM en este trabajo no puede ser replicado en otras zonas de

estudio que presenten contantemente actividad sísmica, cabe aclarar que esta metodología se utilizó en esta zona de estudio debido a la baja actividad sísmica presentada en el periodo de estudio. Para esas zonas habrá que plantearse una metodología igual o mejor a la realizada para determinar los umbrales de precipitación que causaron PRM en el huracán Odile.

7. Conclusión

El número de ocurrencia de PRM dependerá mucho de la magnitud y duración de un evento hidrometeorológico. Para el área de estudio se determinó que el umbral mínimo de precipitación para detonar PRM es de 74 mm, la cual puede ser precipitada en un día o acumularse en el transcurso de varios días. La afirmación anterior no indica que por el simple hecho de existir una precipitación igual o mayor a la mencionada se produzcan PRM sobre toda el área de estudio, habrá zonas que presenten mayor o menor resistencia a presentar estos eventos y estarán determinadas por factores condicionantes como son los geomorfológicos (ángulo de inclinación de la pendiente, curvatura de la pendiente, elevación, índice de convergencia, índice de posición topográfica (TPI), orientación de la pendiente, perfil de curvatura, plano de curvatura), geológicos (distancia a lineamientos geológicos), de vegetación (índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)), hidrológicos (acumulación de flujo, densidad de escurrimientos, índice de transporte de sedimentos (STI), longitud de flujo) y meteorológicos (radiación solar). En otras palabras, para que ocurra un PRM en una superficie debe existir una precipitación mayor o igual a 74 mm y presentar las condiciones ya mencionadas. El modelo de susceptibilidad mostró tener un rendimiento global de clasificación del 95.2%, una exactitud de 89% y una precisión de 91%, por lo tanto, la cartografía de susceptibilidad generada en este trabajo puede tomarse por las autoridades correspondientes como una herramienta altamente confiable para la planificación, gestión y manejo del uso del suelo, así como para generar planes de mitigación y monitoreo ante amenazas de tipo natural.

Agradecimientos

Al CONACYT y a la red temática REDESCLIM por proporcionar el recurso para la financiación y divulgación de este trabajo, al Doctorado en Geografía (UQROO) y el programa de becas doctorales del

CONACYT por financiar el desarrollo de este trabajo bajo el acuerdo número: 666639; al Dr. Jesús Arturo Muñiz Jauregui por el apoyo en la recaudación y financiamiento para la adquisición de los datos de campo y a la Dra. Eleonora Romero Vadillo por facilitar información actualizada de CLICOM. Se agradece a los dictaminadores las recomendaciones de mejora para con el escrito.

RESÚMENES CURRICULARES

Elías Gabriel Torres Ruiz. Doctorando en Geografía en el DCI de la Universidad de Quintana Roo. Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio con Mención Honorífica en el INICIT, UMSNH. Ingeniero en Geomática, Medalla Chiapas al mérito académico estudiantil en la UNICACH.

Oscar Frausto Martínez. Doctorado en análisis e investigación espacial en la Universidad Bauhaus Weimar, Alemania. Licenciatura y Maestría en Geografía en la Universidad Nacional Autónoma de México. Profesor- Investigador de la Universidad de Quintana Roo, miembro del SNI nivel I y Miembro de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antinao, J. L., Farfán, L. M., Occurrence of landslides during the approach of tropical cyclone Juliette (2001) to Baja California Sur, Mexico. *Atmósfera* [en línea] 2013, 26 (Sin mes): [Fecha de consulta: 12 de noviembre de 2018] Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56526154005>> ISSN 0187-6236
- Ayala, F., Elizaga, E y González de Vallejo, L. (1987). Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España. *Serie Geológica Ambiental*, IGME. Madrid, 134.
- Cavazos, T., C. Turrent, and D. P. Lettenmaier (2008). Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American monsoon, *Geophys. Res. Lett.*, 35, 1-5.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Análisis de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos y sus posibles aplicaciones en un sistemas de alerta temprana por inestabilidad de laderas. Consultado 22-08-2018 en http://www1.cenapred.unam.mx/COORDINACION_ADMINISTRATIVA/SRM/FRACCION_XLI_A/23.pdf
- Conforti, M., Pascale, S., Robustelli, G. and Sdao, F. (2014). Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy). *Catena*, (113), 236-250.
- Duque, D. (2011). Determinación de áreas de riesgo por deslizamientos en la comuna 20 del municipio de Cali, utilizando sistemas de información geográfica. *Ingeniería y Competitividad*, 3 (2), 38-44.
- Ermini, L., Catani, F. and Casagli, N. (2005). Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66 (1-4), 327-343.
- Galindo, J y Alcántara, I. (2015). Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México. *Investigaciones geográficas*, 2015, 122-145.
- Gobierno Municipal de Los Cabos (2013). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Los Cabos, Baja California Sur 2013. Consultado 22/08/2018 en http://implanloscabos.mx/wp-content/uploads/2018/04/Atlas-de-Riesgos-Naturales-de-Los-Cabos-B.C.S.-ERN_2014_Final1-ilovepdf-compressed-SL.pdf
- Herrera, S. (2002). "Regionalización de los deslizamientos en México". Academia de Ingeniería. Disponible en <http://www.ai.org.mx/presentacion/regionalizaci%C3%B3n-de-los-deslizamientos-en-m%C3%A9xico>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Consultado 11-03-2015 en <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Consultado 11-03-2015 en <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/usosuelo/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Consultado 11-03-2015 en <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/edafologia/>
- Iwan, W.D., Cluff, L.S., Kimpel, J.F., Kunreuther, H., Masaki-Schatz, S.H., Nigg, J.M., Roth Sr., R.S., Ryland, H., Stanley Sr., E., Thomas, F.H. (1999). Mitigation emerges as major strategy for reducing losses caused by natural disasters board on natural disasters. *Science*, 284 (5422), 1943-1947.
- Kanungo, D. P., Arora, M. K., Sarkar, S. and Gupta, R. P (2006). A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. *Engineering Geology*, (85), 347-366.
- Li, Y., Chen, G., Tang, C., Zhou, G. and Zheng, L. (2012). Rainfall and earthquake-induced landslide susceptibility assessment using GIS and Artificial Neural Network. *Natural Hazards Earth System Science*, 12 (8), 2719-2729

- Melchiorre, C., Castellanos, E.A., Van Westen, C.J. and Matteucci, M. (2011). Evaluation of prediction capability, robustness, and sensitivity in non-linear landslide susceptibility models, Guantánamo, Cuba. *Computers & Geosciences*, 37 (4), 410-425
- Ngadisih., Bhandary, N.P., Yatabe, R and Dahal, R.K. (2016). Logistic Regression and Artificial Neural Network Models for Mapping of Regional-scale Landslide Susceptibility in Volcanic Mountains of West Java (Indonesia)” AIP Conference Proceedings, 1730 (1), 060001-1.
- Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., Sonmez, H. and Gorum, T. (2011). Medium-scale hazard mapping for shallow landslide initiation: The Buyukkoy catchment area (Cayeli, Rize, Turkey). *Landslides*, 8 (4), 459–483.
- Pavia, E.G. 2015. Mexico’s rainfall climatology (English version of: Una nueva climatología de la precipitación pluvial en México, by J. Reyes, E.G. Pavia, and F. Graef. 2000. Comunicaciones Académicas. Serie Oceanografía Física CTOFT20001). CICESE, Ensenada, México, XVIII + 15pp (16) (PDF) *Mexico’s Rainfall Climatology*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/272743917_Mexico’s_Rainfall_Climatology [accessed Nov 12 2018].
- Pradhan, B. and Lee, S. (2010). Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: back propagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling and Software*, 25 (6), 747–759.
- Romero-Vadillo, E. y Romero-Vadillo, I. (2016). Estimación del riesgo en las viviendas de Baja California Sur ante el impacto de ciclones tropicales. *Teoría y Praxis*, (2016), 50-73.
- Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A. C. and Peruccacci, S. (2010). Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts. *Geomorphology*, 114 (3), 129–142.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). Consultado 11-03-2015 https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/24_F12-2-3-5-6_GM.pdf
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Consultado 11-03-2015 en <http://smn.cna.gob.mx/es/emas>
- Tsangaratos, P. and Benardos, A. (2014). Estimating landslide susceptibility through a artificial neural network classifier, *Natural Hazards*, 74 (3), 1489–1516.
- Tien Bui, D., Tuan, T., Klempe, H., Pradhan, B. and Revhaug, I. (2016). Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. *Landslides*, 13 (2), 361.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. In R.L. Schuster y R. J. Krizek (Eds.). Landslides: analysis and control. Transportation Research Board. *Special report*, 176, 11-33.
- Yilmaz, I. (2009). The effect of the sampling strategies on the landslide susceptibility mapping by conditional probability and artificial neural networks (2009b). *Environmental Earth Sciences*, 60 (3), 505–519.

