

Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico

Jesús Arturo Muñiz-Jauregui^{1,*} y Víctor Manuel Hernández-Madrigal²

¹ Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, 58190 Morelia, Mich., México

² Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio U, Ciudad Universitaria, 58060 Morelia, Mich., México.

* jmuniz@pmip.unam.mx

RESUMEN

La ciudad de Puerto Vallarta, Jal., es afectada de manera frecuente por procesos de remoción en masa (PRM), principalmente del tipo flujo de detritos desencadenados por lluvias intensas asociadas a eventos meteorológicos extraordinarios. Esto ha provocado numerosos desastres con pérdidas humanas y materiales, que hacen imperiosa la necesidad de que en esta ciudad se identifiquen las zonas de mayor susceptibilidad a la inestabilidad de laderas. En este trabajo presentamos un mapa de susceptibilidad a los PRM para Puerto Vallarta, construido con base en la combinación del análisis multicriterio y el método heurístico. En su elaboración se consideraron diez capas temáticas asociadas a factores condicionantes tales como: inestabilidad antecedente (mapa-inventario), litología, pendiente, radiación solar, cortes en talud, zonas inestables por caminos, asentamientos humanos, distancia a morfolineamientos, áreas de desmonte y concentración de escurrimientos superficiales. Este mapa constituye el primer documento cartográfico de gran escala que muestra la susceptibilidad del terreno a los PRM en Puerto Vallarta. En él se distinguen seis grados de susceptibilidad, que varían de muy baja a muy alta. Los resultados para la zona estudiada revelan que el 69% de la superficie se encuentra en terrenos de media a muy alta susceptibilidad. No obstante lo anterior y con base en el plan municipal de desarrollo urbano que contempla la ampliación de la ciudad sobre terreno montañoso, encontramos que en caso de verificarse esto último, la superficie con susceptibilidad alta se incrementaría en un 503%. Lo anterior revela que en la concepción del plan de desarrollo urbano no se consideró la susceptibilidad del terreno a los PRM. Se concluye que la combinación del análisis multicriterio con el método heurístico resulta ser una herramienta óptima para la identificación de las zonas susceptibles a los PRM.

Palabras clave: procesos de remoción en masa, susceptibilidad, método heurístico, análisis multicriterio, desarrollo urbano, Puerto Vallarta, México.

ABSTRACT

The city of Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico is frequently affected by landslides, mainly of the debris flow type, triggered by intense rainfall associated to extraordinary meteorological events. As result numerous disasters involving loss of human lives and material damages have occurred, which make the need for the identification of zones in the city that are most susceptible to slope instability to be an imperative requirement. The present work provides a susceptibility landslide map for the mountainous

sector of Puerto Vallarta based on a combination of a multicriteria analysis and the heuristic method. The map considers ten thematic layers such as: previous instability (inventory map), lithology, slope, solar radiation, cut slopes, unstable zones due to roads, human settlements, morphoalignments distances, cleared areas, and concentration of surface runoff. The map herein presented is the first to show at a large scale the terrain susceptibility to landslides of the city. Six degrees of susceptibility are considered from very low to very high. The results reveal that 69% of the studied zone includes terrains with medium to very high landslide susceptibility. Despite this high risk, if the municipal urban planning program contemplating the expansion of the city on mountainous areas is carried out, the landslide susceptible area would be increased by 503%; this makes evident that the urban planning of Puerto Vallarta overlooked the landslide susceptibility of the terrain. It was concluded that the combination of the multicriteria analysis and the heuristic method turns out to be an optimal tool for identifying landslide susceptible zones.

Key words: landslides, susceptibility, heuristic method, multicriteria analysis, urban planning, Puerto Vallarta, Mexico.

INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Puerto Vallarta, que es la segunda en importancia económica del Estado de Jalisco, cada año y particularmente durante precipitaciones intensas, ocurren de manera frecuente procesos de remoción en masa (PRM) que afectan severamente a la población. Las condiciones fisiográficas y climáticas del lugar, así como su relieve abrupto, litología y régimen climático, hacen que las laderas de la zona sean proclives a estos fenómenos. En los últimos años, la predisposición a los PRM se ha incrementado por factores asociados al crecimiento urbano. Zonas que de forma natural presentaban una susceptibilidad baja y media, ahora son altamente susceptibles debido al cambio de la cobertura vegetal mediante la eliminación de selva, y a sobrecargas y alteraciones geométricas en la ladera, todo esto asociado con la construcción de infraestructura hotelera y de vivienda. Es claro que la combinación de estas características físicas y antrópicas ha sido el factor condicionante principal de desastres por PRM en Puerto Vallarta.

A partir de lo anterior, se realizó el presente estudio para conocer el impacto de la inestabilidad de laderas en la ciudad de Puerto Vallarta, a través de la zonificación de la susceptibilidad. Dicha zonificación es considerada como un instrumento eficaz para detectar posibles zonas de peligro (Süzen y Doyuran, 2004; Santacana *et al.*, 2003; Magliulo *et al.*, 2008; Galli *et al.*, 2008; He y Beighley, 2008; Van Westen *et al.*, 2008; Das, *et al.*, 2010; Regmi *et al.*, 2010), y se espera que ayude a una correcta planeación urbana. En este trabajo entendemos como zonificación de la susceptibilidad la determinación de áreas con diferentes grados de potencialidad para la ocurrencia de PRM

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde a una superficie aproximada de 136 km², localizada en el municipio de Puerto Vallarta, Estado de Jalisco. Es conformada por una porción de la ciudad del mismo nombre y una zona adyacente a las montañas (Figura 1). Sus coordenadas extremas son 20°44'N, 105°19'W y 20°30'N, 105°09'W. Está compuesta

por una zona de serranía con un gradiente altitudinal que va de los 10 msnm hasta los 1,100 msnm; la cobertura vegetal corresponde a una selva mediana sub-caducifolia (INEGI, 1975), y en las partes más altas a comunidades de bosque de encino.

MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se ubica sobre la vertiente poniente de las sierras San Sebastián y de Cuale, que constituyen el extremo occidental de la provincia Sierra Madre del Sur (SMS). Esta zona se caracteriza por un relieve montañoso

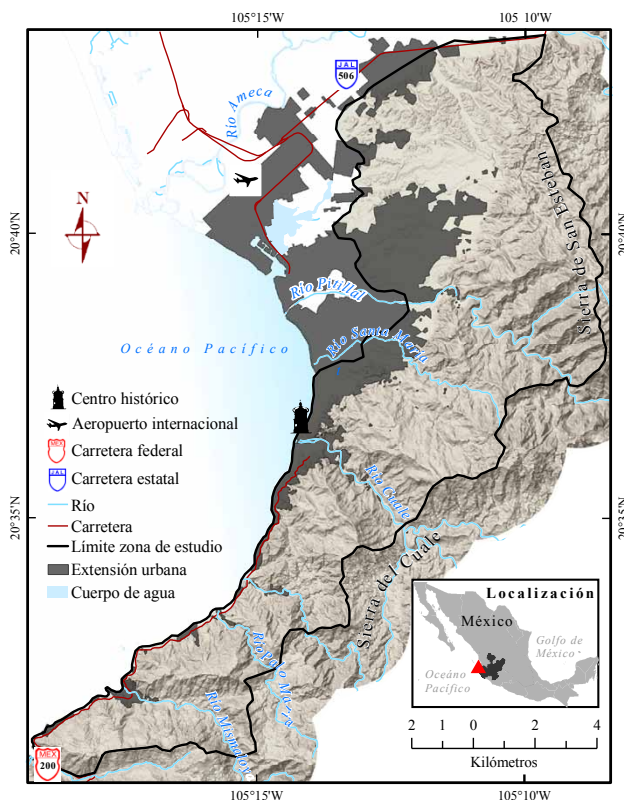


Figura 1. Mapa de localización de zona de estudio en la ciudad de Puerto Vallarta.

conformado por rocas sedimentarias y volcánicas intrusivas por el Batolito de Puerto Vallarta (BPV), cuya extensión aproximada es de 9,000 km² (Schaaf y Martínez-Serrano, 1997). Este cuerpo intrusivo cuenta con las rocas plutónicas más antiguas (106 Ma) de la SMS, consideradas como el basamento del Bloque Jalisco (Ferrari *et al.*, 2000). Con base en recorridos de campo, fotogeología y revisión bibliográfica, en el área de estudio se identificaron las siguientes unidades litológicas que se describen a continuación de la más antigua a la más reciente:

Capas rojas. Se refiere a terrígenos continentales del Jurásico superior (Köhler *et al.*, 1988), que afloran de manera extensa sobre el río Cuale (Figura 2). La compacidad y resistencia de las rocas en el afloramiento disminuyen hacia la cima, por lo que en la base se observan paredes casi verticales de más de 100 m de altura. En la zona intermedia y alta del afloramiento la roca presenta un color de rosa oscuro a rojo (Figura 3a) con textura arcillo-limosa, que le confiere a la unidad comportamientos deleznable y plástico en estados seco y saturado, respectivamente.

Cuerpos intrusivos. Corresponde a cuerpos plutónicos de color rosáceo y blanco lechoso que forman parte del BPV de entre ca. 106 Ma y ca. 55 Ma (Zimmermann *et al.*, 1988; y Köhler *et al.*, 1988). En el área se distinguen afloramientos de esta unidad en el sector centro-sur y noreste (Figura 2). El afloramiento meridional alcanza elevaciones de hasta 600 msnm y se distingue por una variación a granodioritas;

en tanto que el septentrional se eleva hasta los 700 msnm y presenta variaciones de dioritas a tonalitas. El primero se observa con mayor densidad de fracturas (Figura 3b.1) que el segundo (Figura 3b.2).

Andesitas. Unidad conformada por depósitos de lava andesítica de entre 20 y 14 Ma, producidos durante el Mioceno por un periodo volcánico en la región (Ferrari *et al.*, 2000). Los afloramientos principales se encuentran en la parte central de la zona de estudio, (Figura 2), en donde se distinguen macizos muy fracturados con rocas de color gris oscuro que varía a verde según el grado de intemperización (Figura 3c).

Ignimbritas. Corresponden a depósitos piroclásticos bien soldados de color rosa claro (Figura 3d), y edad miocénica (Ferrari *et al.*, 2000), cuya fuente no ha sido identificada y que en la actualidad definen elevaciones topográficas de hasta 450 msnm. Afloran principalmente en la cuenca del Río Pitillal (Figura 2) y en el cerro de las Antenas. En este último, el depósito se observa muy fracturado con grados importantes de intemperización.

Secuencia terrígena cuaternaria. Formada por sedimentos poco consolidados, depositados en un ambiente marino-fluvial, que se distribuyen hacia el extremo noroeste de la zona de estudio (Figura 2). Con un espesor total que varía de 3 a 80 m, es constituida por una alternancia de estratos bien identificables cuya textura varía de limo-arcilloso, arena-limosa a clastos redondeados de tamaño mayor o igual al de las gravas.

Coluviones. Se trata de depósitos holocénicos de espesor y textura variable con bloques esporádicos de hasta 2 m de diámetro dispuestos de forma caótica. Asociados a procesos de remoción en masa que han afectado a las unidades anteriormente descritas, se localizan al pie del terreno montañoso, en contacto con la línea de costa y planicies aluviales, al sur y norte del área de estudio, respectivamente.

Depósitos aluviales. Se localizan principalmente en las zonas de influencia de los ríos Santa María, Pitillal y Cuale, en donde se encuentran formando terrazas aluviales o material del fondo del cauce. Están conformados por limos, arenas y gravas, con algunos bloques esporádicos de roca granítica, andesítica y de capas rojas.

Depósitos fluvio-aluviales. Se localizan en la desembocadura de los ríos y línea de costa (Figura 2). Están formados por arenas y gravas, principalmente, con clastos redondeados de tamaño mayor a los 20 cm. En conjunto forman depósitos sedimentarios no consolidados, producto de procesos marino-costeros.

TIPOS DE MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA RECURRENTE EN LA ZONA DE ESTUDIO

La clasificación y descripción de los PRM que se presenta a continuación, está basada en las clasificaciones de Varnes (1978) y Casale *et al.* (1993).

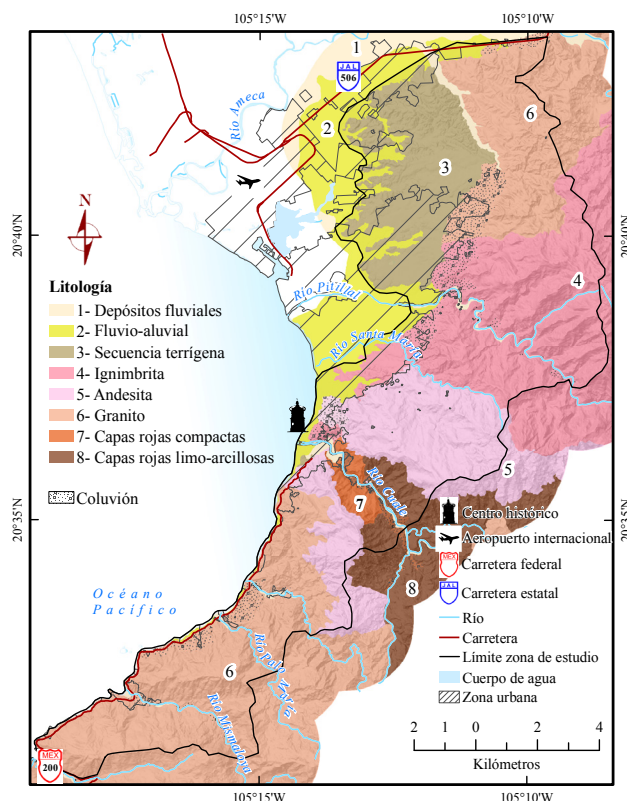


Figura 2. Mapa de unidades litológicas elaborado para la zonificación de la susceptibilidad.

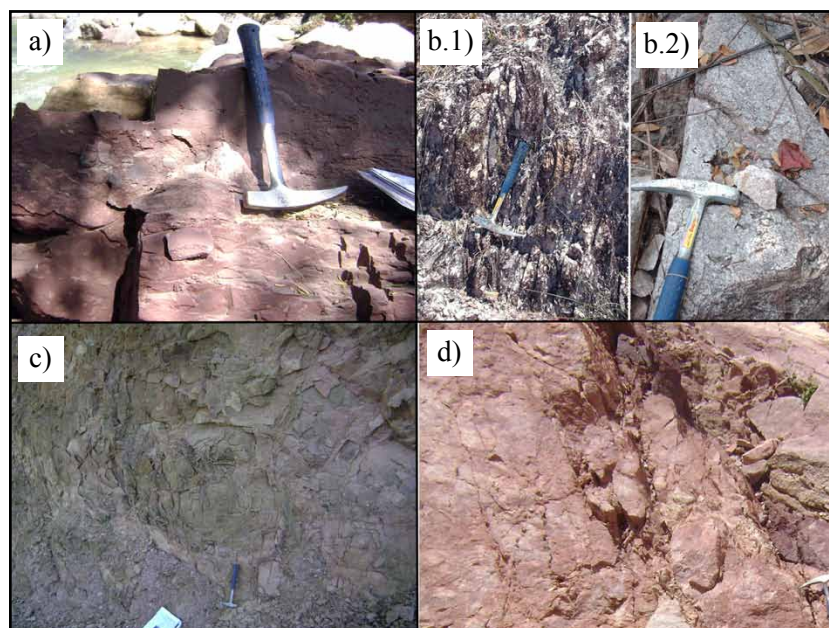


Figura 3. Principales litologías presentes en la zona de estudio. a) Fragmento de las capas rojas del tipo limo-arcillosas, que afloran en las laderas del cañón del Río Cuale. b.1) cuerpo intrusivo profundamente alterado y densamente fracturado. b.2) cuerpo intrusivo poco fracturado. c) Andesita que presenta exfoliación esferoidal, intemperismo característico de esta unidad. d) Ignimbrita en un banco de extracción de material.

Caídas (fall)

Se observaron caída de detritos en bloque, favorecida por la estratificación y falta de confinamiento de la unidad, principalmente en bancos de material localizados en la secuencia terrígena. Por otra parte, en depósitos de ignimbritas se registran caídas de rocas de hasta 1.5 m de diámetro, en escarpes con inclinación mayor a los 70°, producto de excavaciones en carreteras, bancos de material o cualquier otro corte de origen antrópico. Este tipo de inestabilidad se presenta con menor frecuencia y magnitud en afloramientos de andesita.

Deslizamiento rotacional (rotational slide)

Se observaron principalmente sobre la mancha urbana en terraplenes o terrazas formadas con materiales de relleno. El movimiento se hace evidente en superficie a través de grietas y escarpes con proyección horizontal en forma de herradura o media luna. Generalmente, este tipo de inestabilidad es propiciado por obras de contención (muros, anclajes) insuficientes o mal diseñados, con carencias importantes de drenaje superficial e interno.

Deslizamiento traslacional (translational slide)

Esta es la inestabilidad más abundante en el área de estudio y se presenta de forma superficial (profundidad del plano del deslizamiento <1 m). Se desarrolla a partir de

discontinuidades litológicas (suelo-roca) paralelas a la superficie del terreno, y a excavaciones en donde la dirección de las diaclasas es favorable a la pendiente del talud. En los primeros, el suelo y detritos conforman una masa que se desplaza ladera abajo sobre la unidad subyacente con mayor consistencia y menor permeabilidad. En tanto que en los segundos, grandes bloques de roca presentan su superficie de deslizamiento sobre planos de fracturas preexistentes rellenas de arcillas expansivas, posiblemente montmorillonitas, que al expandirse en estado húmedo disminuyen el contacto efectivo de la roca favoreciendo la inestabilidad. El granito y la andesita son litologías con mayor registro de este tipo de inestabilidad, debido a sus altos grados de intemperización y densidad de fracturamiento. La ocurrencia coincide con fuertes precipitaciones o por acumulación de humedad en lluvias de baja intensidad, favorecido por obras antropogénicas que eliminan la cobertura vegetal y alteran la geometría de la ladera.

Deformación gravitacional profunda de ladera (rock flow or Sacking)

Durante el trabajo de fotointerpretación fueron identificados sobre los cañones del río Pitillal y del río Cuale (Figura 1), flujos de roca conocidos también como Deformaciones Gravitacionales Profundas de Ladera (DGPL) (Casale *et al.*, 1993; Bisci *et al.*, 1996). Los rasgos morfológicos que evidenciaron este tipo de fenómeno fueron: contrapendientes que definen depresiones cercanas a la cima o en la cima de la montaña; presencia de múltiples

crestas; combinación de superficies cóncavas y convexas asociadas al desprendimiento y depósito, respectivamente; y desviación de la dirección del río producida por el emplazamiento del depósito en el fondo del valle. Los cuerpos inestables identificados llegan a tener extensiones de 700 m, con desniveles altitudinales de hasta 400 m. Se localizan principalmente en laderas ignimbríticas del río Pitillal y en menor proporción en afloramientos graníticos. De acuerdo con Buma y Van (1996), este tipo de movimiento suele ser producto de debilidades estructurales de la roca y pueden ser desencadenados por sismos.

Flujo de detritos (*debris flow*)

Estos son fenómenos que han ocasionado los mayores desastres registrados en Puerto Vallarta, debido a la rapidez y la energía con la que se desplazan, así como por la extensión que puede alcanzar. Consisten en el movimiento pendiente abajo de una mezcla de materiales de consistencia lodosa con tamaño de fragmentos que van desde arcillas hasta grandes bloques de roca de 5 m de diámetro. La mayoría de los eventos ocurridos coinciden con precipitaciones mayores a 100 mm/día. Por ejemplo, el evento sucedido en septiembre de 1993, que causó la muerte de tres personas, 35 heridos, 60 familias damnificadas, diez calles totalmente destruidas, 40 casas sepultadas parcialmente y diez casas totalmente destruidas (El Informador, 1993), después de una intensa precipitación de 200.5 mm/día. El último desastre que provocó la muerte de una persona ocurrió en julio de 2008, a causa de un flujo de detritos desarrollado a partir materiales depositados en la parte alta de un cerro, como resultado de la construcción de un edificio de departamentos.

Volcamiento

Son inestabilidades de menor frecuencia en el área de estudio, desarrolladas principalmente en bloques columnares de granitos.

METODOLOGÍA

La metodología está basada en el modelo heurístico en conjunto con el análisis multicriterio. Las ventajas del modelo heurístico estriban en ser un método rápido, razonable y consistente con las condiciones físicas de la zona de estudio (Roa, 2006), además permite contemplar los diferentes factores como un conjunto que incide en la inestabilidad de ladera, atributo del cual carecen otros métodos (Ruff y Czurda, 2008). Si bien la debilidad del método heurístico se encuentra en la subjetividad de los criterios considerados, Castellanos y Van Westen (2008) lo entienden como la aproximación más confiable para la elaboración de mapas de susceptibilidad. No obstante lo anterior, en este

trabajo integramos un análisis multicriterio, que permitió obtener una jerarquización de las variables consideradas, a partir de una ponderación con base matemática sólida, y de acuerdo al nivel de influencia en los PRM, lo que otorgó mayor precisión en el modelo de susceptibilidad a PRM. La técnica de análisis multicriterio aplicada fue el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), diseñado por Saaty (1980) a través del uso del software “*Expert Choice 2000*”, que permite jerarquizar las variables a partir de evaluar la importancia de un elemento con respecto al otro, formando una matriz de valores, para posteriormente aplicar un algoritmo que pondera la importancia de cada criterio. Esto bajo cálculos de álgebra matricial que dan como resultado los valores de importancia y el índice de inconsistencia (García, 2006).

Con el objetivo de modelar factores identificados que condicionan y detonan PRM en la zona de estudio, se desarrollaron una serie de procesos y modelos a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Lo que dio como resultado capas temáticas que representan una condición que incide en la inestabilidad de ladera. Las herramientas utilizadas para el procesamiento de información espacial, fueron el software ArcGis 9.3 y Arcview 3.2. Se trabajó tanto con información vectorial como raster a una resolución de 10 m. El modelo digital de elevación del terreno (MDE), insumo base para varias de las capas desarrollada, fue creado a partir de curvas de nivel a cada metro del Instituto de Información Territorial del Estado de Jalisco (IITEJ) del año 2006, producto de procesos fotogramétricos con insumos a escala 1:6,000. Esta información sólo cubre el área urbana y refleja una topografía reciente que ha sido modificada por cortes en laderas. El área faltante de la zona serrana, que corresponde a altas pendientes, se complementó con curvas de nivel a cada 20 m, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Con base en esta información se construyó en ArcGis un modelo TIN (*triangulated irregular network*), que posteriormente fue rasterizado con una resolución de 10 m.

En total se contemplaron diez factores en forma de capas temáticas que integran el modelo para zonificar la susceptibilidad. A continuación se describen el proceso de elaboración de cada una de ellas.

1) Para la capa de litología se usó el mapa de unidades litológicas (Figura 2). A cada unidad se le otorgó un peso (Tabla 1), a partir de la aplicación del PAJ, teniendo como criterio su predisposición a presentar PRM.

2) Las laderas desprovistas de vegetación y con pendiente alta en zonas de desmonte pueden ser más susceptibles a la erosión y a movimientos de remoción en masa (Stokes *et al.*, 2009; Lukose, 2006; Lugo-Hubp *et al.*, 2005; O’Loughlin, 2005; Morgan y Rickson, 1995), en especial a los flujos de detritos. Esta capa fue hecha con base en la interpretación del mosaico de Google Earth que tiene la fecha de enero y febrero del 2006 y enero 2009, identificando áreas en las zonas de montaña desprovistas de una cobertura arbórea o de matorral. La forma de evaluar estas zonas fue otorgándole a la pendiente de mayor grado de inclinación

Tabla 1. Pesos otorgados a las unidades litológicas de acuerdo con el Proceso Analítico Jerárquico.

Unidad litológica	Peso
Coluvial, capas rojas	0.223
Depósitos fluviales	0.176
Fluvial-aluvial	0.14
Capas rojas limo-arcillosas	0.137
Secuencia terrígena	0.091
Coluvial, andesita	0.06
Coluvial, ignimbrita	0.048
Coluvial, granito	0.041
Andesita	0.027
Capas rojas compactas	0.026
Ignimbrita	0.019
Granito	0.012
Total	1

los valores más altos. Esto fue realizado con base en el modelo digital de pendientes elaborado a partir del MDE en ArcGis, del cual se cortaron las áreas interpretadas de desmonte para posteriormente ser estandarizados los valores de pendiente de 0 a 1.

3) Con la capa de zonas inestables por caminos se hace énfasis en taludes y terraplenes inestables. La capa fue construida con base en datos vectoriales del Atlas de Caminos y Carreteras a escala 1:20,000 (ITEJ, 2006), complementada con fotointerpretación de la imagen Google Earth 2006. Se clasificaron los caminos según sus características, estableciendo un ancho promedio, y un área de afectación aproximada con referencia a observaciones de campo (Tabla 2). Con base en estas áreas fueron recortados el modelo digital de pendientes y el mapa de distancias a camino. Previa estandarización de valores de 0 a 1 en ambos recortes, se realizó la multiplicación de éstos para conseguir que el valor de la pendiente aumentara en función de la cercanía al camino. Los valores resultantes se normalizaron de 0 a 1, donde 1 refiere a zonas con grados altos de inclinación de pendientes cercanas a caminos.

4) Los morfolineamientos corresponden a la interpretación de tendencias lineales expresadas en el relieve. La presencia de lineamientos se refiere a la existencia de fallas o fracturas, es decir, zonas de debilidad (Sarkar, 2008; Varnes, 1984). La interpretación fue hecha a partir de fotografías aéreas escala 1:15,000 del año 2006 de la empresa CARTODATA, y del modelo sombreado del terreno, elaborado a partir del MDE. Con base en el mapa de distancia a morfolineamientos se valoró al área más cercana con los valores más altos de susceptibilidad a la inestabilidad de ladera.

5) Se consideró usar la capa de radiación solar con el objetivo de determinar las zonas que pudieran concentrar mayor saturación de humedad al tener menor insolación. La aplicación se hizo en ArcGis. El uso de este modelo tiene mayores ventajas que el típico modelo de orientación de la

Tabla 2. Tipología y características de caminos aplicados al modelo.

Tipología	Descripción	Ancho promedio (m)	Área de afectación (m)
Calles	Vialidades en zonas urbanas	8	10
Carretera	Carretera federal 200 de dos carriles	8	20
Libramiento	Libramiento de la ciudad de cuatro carriles	15	20
Terracería	Caminos no cubiertos por asfalto o concreto	8	30
Vereda	Caminos de un solo paso	5	10

ladera, debido a la posibilidad de determinar la insolación con base en la latitud del lugar, además de considerar que la insolación no es la misma durante el año. Los valores que resultan de la aplicación fueron normalizados de 0 a 1.

6) Inventario de PRM y su zona de influencia es la capa que indica los sitios donde ya ocurrieron estos fenómenos. La elaboración se realizó mediante la identificación de morfologías asociadas a este fenómeno, con base en fotografías áreas escala 1:15,000 del año 2006 y curvas de nivel digitales con equidistancia a cada 20 m de la carta topográfica F13C69, escala 1:50,000 del INEGI. El papel principal de esta fotointerpretación fue delimitar los grandes deslizamientos, que por su dimensión y poca accesibilidad no fueron recorridos en campo. El inventario se complementó con reportes histórico, obtenidos de notas periodísticas; información de la Unidad Municipal de Protección Civil de Puerto Vallarta; población damnificada y evidencias en campo. A partir del trazo del cuerpo del PRM se estableció un área alrededor de éste con el fin de contemplar una posible zona inestable por efectos del mismo proceso que le dio origen. Con base en el mapa de distancia a los cuerpos del PRM, la zona de influencia va perdiendo valor de peso conforme se aleja del cuerpo principal, donde el cuerpo tendrá el valor de 1.

7) Se integró una capa de excavaciones debido a que en campo se apreció en estas una frecuente incidencia de PRM. En esta capa se identificaron las zonas que presentan cualquier tipo de excavación, exceptuando los cortes que son producto de la construcción de caminos. La identificación se hizo con base en el modelo de sombreado con una resolución de 2 m, con base en las curvas de nivel del ITEJ, dando un valor de 1 a estas zonas, dada su alta susceptibilidad a presentar inestabilidad.

8) La elaboración de la capa de inestabilidad de pendientes tiene el propósito de identificar zonas potenciales a deslizamientos superficiales, que es el tipo de inestabilidad más frecuente en la zona. Para ello se decidió hacer uso, de una manera exploratoria, de la extensión SINMAP (*Stability Index Mapping*), para la versión de ArcView 3.x. (Pack *et al.*, 2005). Hacer uso de este programa tiene la ventaja de

analizar la inestabilidad a partir del cálculo del índice de factor de seguridad dado por

$$FS = \frac{c + \cos\theta \left[1 - \min\left(\frac{R}{T} \frac{a}{\sin\theta}, 1\right) \right] \rho \tan\phi}{\sin\theta} \quad (1)$$

donde c es la cohesión del suelo, ρ la densidad relativa del suelo del talud, θ el ángulo de la pendiente, ϕ el ángulo de fricción interna del suelo, R la recarga (m/h), a el área de la cuenca y T la transmisibilidad del suelo (m²/h); basado en el ángulo de un modelo de pendiente infinita, y en el cálculo de un índice de humedad. SINMAP requiere de parámetros geotécnicos cuyos valores estén comprendidos en un intervalo; es decir, no requiere de mediciones o cantidades precisas (Pack *et al.*, 2005), ya que el software trabaja con base en rangos, estableciendo valores máximos y mínimos. Esto es para subsanar el hecho de que la distribución de los parámetros es variable en tiempo y espacio (Zaitchik *et al.*, 2003), por lo que los valores predeterminados fueron calibrados con referencia a la inestabilidad superficial e histórica registrada en el mapa inventario (Tabla 3). Los valores que resultan de la aplicación del software fueron normalizados de 0 a 1.

9) La capa de concentración de flujos busca reconocer de manera automática las áreas dentro de cañadas como un rasgo morfológico donde suelen iniciar los flujos de detritos. Para obtener esta capa se utilizó la extensión HidroTool 1.0 para ArcView 3.x, (Schäuble, 2004). Dicha extensión contiene varias herramientas para calcular funciones hidrológicas a partir de un MDE. La función utilizada fue *Combined Flow* la cual determina la cantidad de agua o partículas desplazadas desde el parteaguas a los valles de una cuenca. De este modelo se recortó el área que corresponde a cañadas sobre laderas, descartando las zonas donde no existe concentración o el flujo es mayormente difuso y donde la función utilizada indica mayores concentraciones, en correspondencia a los talveg de arroyos y ríos. Estos criterios corresponden a lo observado para la zona de estudio.

10) Una parte novedosa del modelo es la forma de integrar a los asentamientos humanos. Esta capa tiene el propósito de añadir al modelo de susceptibilidad las zonas

urbanas y rurales, las cuales corresponden en gran medida a usos habitacionales, turísticos y comerciales. La intención de incluir esta capa estriba en el hecho de que en las zonas escarpadas existen construcciones que modificaron la geometría de la ladera, y en consecuencia favorecen la inestabilidad a través de: remoción de materiales en la base (pérdida de confinamiento), aumento del peso sobre la ladera, pérdida de la cubierta vegetal, recubrimiento de la superficie por capas impermeables, etc. Para realizar esta capa se utilizaron dos fuentes de información; la imagen de Google Earth de enero 2009 para delimitar el área urbana existente y el proyecto de Plan Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU, 2008), que se consideró prudente utilizar, ya que refleja la tendencia de crecimiento de la zona urbana de Puerto Vallarta, además que zonifica las densidades permitidas de construcciones, el uso de suelo y las zonas propuestas para el crecimiento urbano. En el PMDU se indica una intensidad de uso permitida por tipo de uso urbano, basándose en dos criterios (PMDU, 2008). El primero se refiere a la densidad de construcciones, que se categoriza en mínima, baja, media y alta, y el segundo se refiere a la intensidad de uso, distinguiendo las mismas categorías de mínima a alta, esto para los usos urbanos mixtos. Si bien los criterios no son similares, sí lo son las categorías. El criterio para otorgar pesos se basó en el siguiente supuesto: entre mayor densidad, mayor será el grado de alteración de las condiciones naturales, por lo que a partir de las categorías señaladas se establecieron los pesos: mínima 0.25, baja 0.5, media 0.75 y alta 1.

Integración de capas temáticas

Cada una de las capas temáticas contó con valores graduales de inestabilidad que fueron normalizados conforme al método del valor máximo, lo que da un rango de 0 a 1, esto con el propósito de trabajar sobre una misma escala (Castellanos y Van Westen, 2008), independientemente de sus medidas originales, lo que facilitó la comparación entre capas. Dentro de este rango los valores 0 y 1 representan la susceptibilidad nula y más alta, respectivamente.

Posteriormente se integró el análisis multicriterio aplicando el método del Proceso Analítico Jerárquico, dando como resultado la ponderación que se presenta en la Tabla 4. Cabe mencionar que el índice de inconsistencia resultante en la evaluación fue de 0.088, que se considera como aceptable al no ser mayor de 0.1.

Teniendo los valores de ponderación (F), cada capa temática (C) fue multiplicada según el valor que les correspondía y posteriormente fueron sumadas y divididas entre 10 de acuerdo con la ecuación 2.

$$S = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{i=n} (C_i \times F_i) \quad (2)$$

donde S es la susceptibilidad, C_i la capa temática, F_i el factor de ponderación, y n el número de capas. Este procedimiento

Tabla 3. Parámetros usados para correr el modelo de inestabilidad de SINMAP.

Parámetro	Valor	Unidades
Gravedad	9.8	m/s ²
Densidad del agua	1000	kg/m ³
Densidad del suelo	1200	kg/m ³
Cohesión (límite inferior)	0.01	N/m ²
Cohesión (límite máximo)	0.5	N/m ²
Ángulo de fricción del suelo (límite inferior)	20	grados
Ángulo de fricción del suelo (límite máximo)	45	grados
$T_{(transmisividad)} / R_{(recarga)}$ (límite inferior)	2000	metros
$T_{(transmisividad)} / R_{(recarga)}$ (límite máximo)	3000	metros

Tabla 4. Ponderación de valores a partir del análisis de temas con el Proceso Analítico Jerárquico.

Temas	Ponderación
Inventario de deslizamiento y su zona de influencia	0.34
Inestabilidad de pendientes	0.203
Litología	0.123
Cortes en talud	0.092
Zonas inestables por caminos	0.069
Asentamientos humanos	0.053
Distancia a morfolineamientos	0.04
Áreas de desmonte	0.034
Concentración de flujos	0.031
Radiación solar	0.015
Total	1

se aplicó tomando en un primer caso a los asentamientos humanos de 2009, para después realizar el procedimiento con los asentamientos humanos que proyecta el PMDU. Los mapas resultantes fueron categorizados en cinco rangos utilizando una clasificación de *Natural Breaks*, para poder identificar patrones en la distribución de los datos. Estos mismos rangos fueron calibrados con el propósito de tener la mayor coherencia posible, buscando que las zonas de pendientes planas correspondieran a la categoría de

susceptibilidad más baja. Las categorías de susceptibilidad designadas fueron: muy alta, alta, media, baja y muy baja.

Finalmente, los productos obtenidos fueron dos: 1) el mapa de susceptibilidad para las condiciones de la traza urbana de 2009 (Figura 4a); y 2) un mapa de susceptibilidad bajo el escenario hipotético en el que la traza urbana ocupara el espacio proyectado por el Programa Municipal de Desarrollo Urbano (Figura 4b).

RESULTADOS

El modelo de zonificación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa, teniendo como referencia la traza urbana 2009, dio como resultado que, para la zona de estudio, el 68.91 % presenta susceptibilidad de mediana a muy alta, donde el 29.54 % del total del área de estudio corresponde a una superficie con una alta susceptibilidad a la ocurrencia de PRM (Tabla 5).

En el mapa de susceptibilidad resaltan zonas que concentran grados altos y muy altos de susceptibilidad, como es el caso de la cuenca del río Cuale, lo que indica que sus laderas son potencialmente inestables. Este dato se comprobó durante recorridos en campo donde se apreciaron numerosos PRM. Sobresalen otros dos puntos en particu-

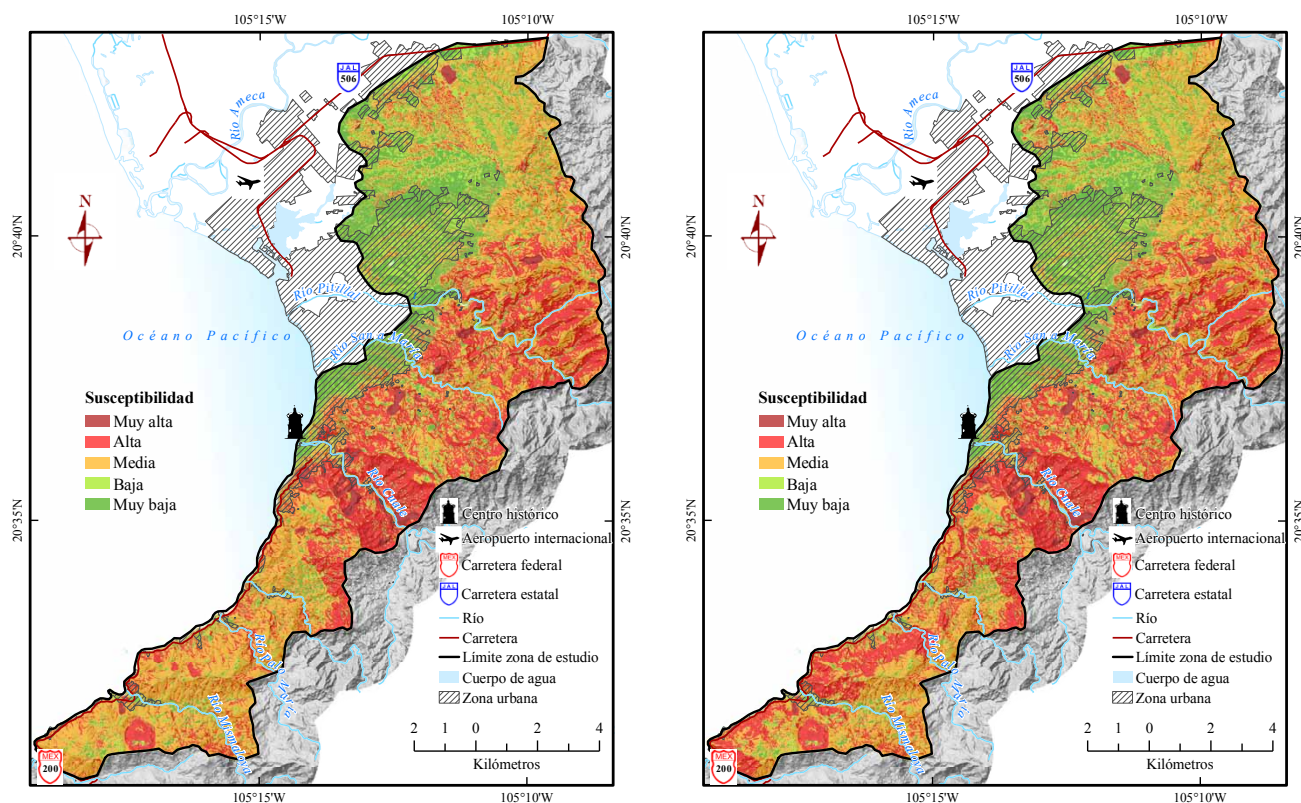


Figura 4. a) Mapa de susceptibilidad para el 2009. b) Mapa de susceptibilidad bajo el escenario hipotético en el que el área urbana ocupara la zona proyectada en el Plan Municipal de Desarrollo Urbano, donde se aprecia el aumento en los grados de susceptibilidad, principalmente en el sur de la zona de estudio.

Tabla 5. Superficies resultantes del modelo de zonificación a la susceptibilidad de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta.

Susceptibilidad	Superficie (km ²)	Superficie total (%)
Muy baja	26.426	19.42
Baja	15.888	11.67
Media	50.292	36.96
Alta	40.2	29.54
Muy alta	3.283	2.41
Total	136.089	100

lar, dada su importancia social y económica (Figura 5). El primer punto corresponde al cerro de la Cruz y al cerro de la Antena de radio, los cuales resultaron con grados de susceptibilidad alta, y cerca de estos se encuentra una importante concentración urbana como es el Pueblo Antiguo, y la zona turística tradicional de Puerto Vallarta. El segundo punto con susceptibilidades altas y muy altas corresponde a Conchas Chinas, zona de condominios verticales de lujo y donde actualmente se sigue promoviendo la construcción de edificaciones similares.

Otras son las proporciones en los grados de susceptibilidad del modelo para toda la zona de estudio cuando se hace uso del PMDU como indicador del crecimiento urbano (Tabla 6). Los resultados indican que habría un aumento de

Tabla 6. Comparación de superficies resultantes del modelo de zonificación a la susceptibilidad de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta para las condiciones del 2009 y las condiciones proyectadas en el Plan Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU).

Susceptibilidad	Superficie condiciones 2009 (km ²)	Superficie con PMDU (km ²)	Diferencia PMDU-2009 (km ²)	Diferencia PMDU-2009 (%)
Muy baja	26.426	25.891	-0.534	-2.02
Baja	15.89	16.164	0.276	1.74
Media	50.292	44.192	-6.1	-12.13
Alta	40.2	46.506	6.305	15.68
Muy alta	3.283	3.335	0.053	1.60
Total	136.089	136.089		

15.68 % en la categoría de susceptibilidad alta y, por otro lado, ocurriría una disminución de 12.19 % en la superficie de susceptibilidad media (Tabla 6, Figura 6a).

Impacto del crecimiento urbano

Para realizar un análisis de la variación en las zonas de distintas susceptibilidad ante el avance urbano proyectado, se contempló en detalle las superficies de extensión urbana de 2009 y la extensión proyectada por el PMDU (Figura 7).

Con este análisis de detalle se muestra que si se cumpliera el PMDU, la extensión urbanizada en el 2009 pasaría de 21.60 km², a 51.97 km², lo que implica un crecimiento de 140.58%. Esto provoca que todos los grados de susceptibilidad aumenten su superficie, pero no de una manera proporcional (Figura 6b).

Si se extiende la mancha urbana como se especifica en el PMDU ocurrirían incrementos por encima del 100 % en los grados de susceptibilidad de media a muy alta, (Tabla 7). El grado de susceptibilidad media se incrementaría un 244 %, susceptibilidad alta en 503 % (categoría con mayor incremento) y finalmente, la susceptibilidad muy alta se incrementaría 132 % (Figura 6c).

En tanto, sólo para la porción de superficie donde se proyecta el crecimiento urbano, que corresponde a 30.37 km², la distribución de los grados de susceptibilidad fueron: 20.07 % para susceptibilidad muy baja, 14.47 % susceptibilidad baja, 23.41 % susceptibilidad media, el 40.14 % para la alta y un 1.9 % para muy alta. Lo que indica que el 42 % de la superficie propuesta para el crecimiento urbano tendría una susceptibilidad alta y muy alta a la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El área analizada presenta un gran potencial a presentar distintos procesos de remoción en masa, debido a sus condiciones físicas y factores sociales que permiten el crecimiento urbano en terrenos de pendientes abruptas, y es a

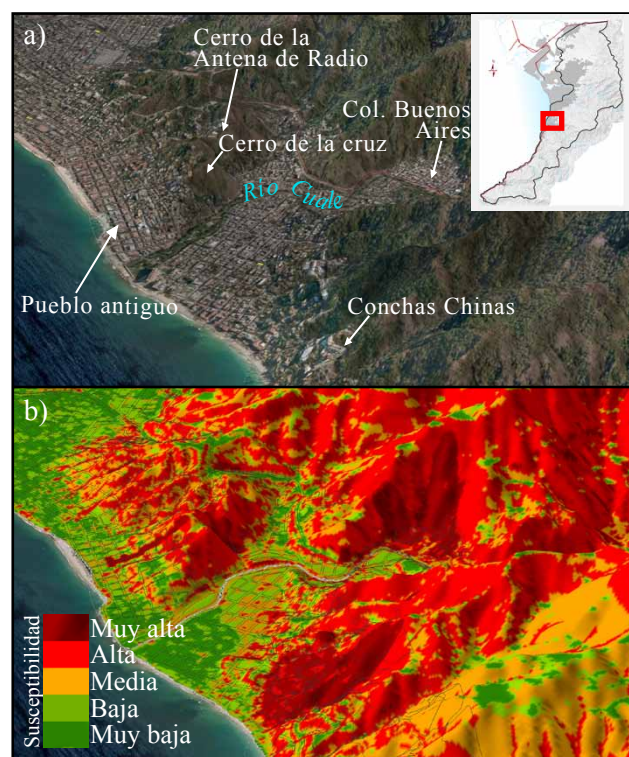


Figura 5. a) Sitios que se destacan por el impacto que representan en lo social y en lo económico. b) Detalle de los grados de susceptibilidad resultante del modelo aplicado para las condiciones de 2009.

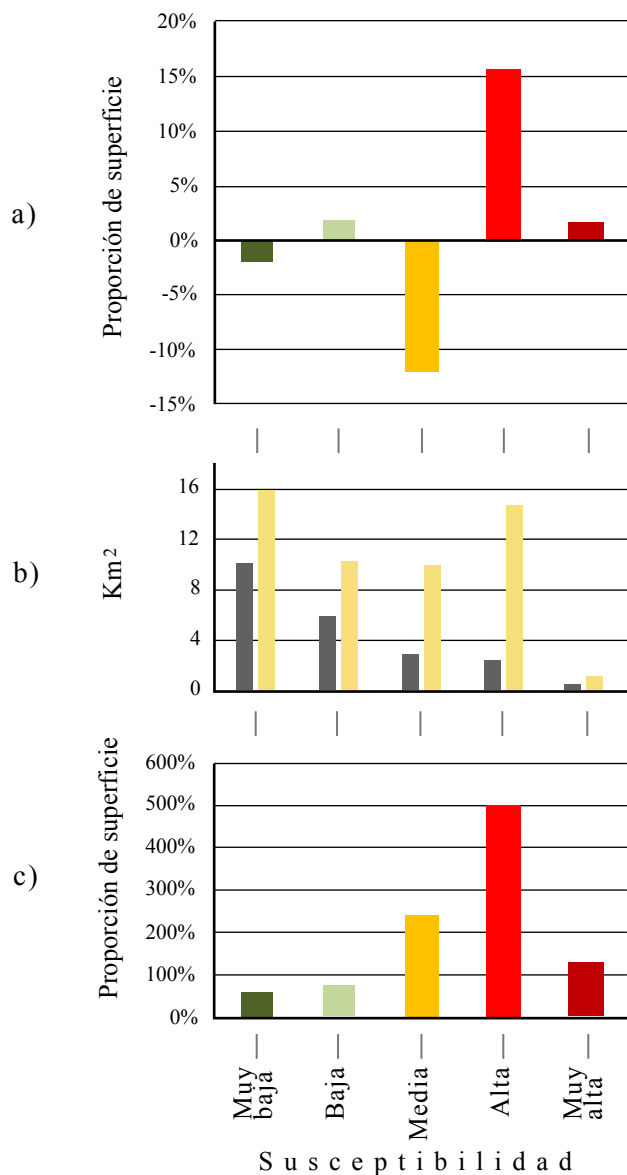


Figura 6. a) Diferencia porcentual de superficie en los grados de susceptibilidad entre el modelo con las condiciones del año 2009 y el modelo que toma en cuenta las proyecciones del crecimiento del Plan Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU). b) Comparación de superficies por grado de susceptibilidad entre los resultados considerando las condiciones del año 2009 (color gris) y lo proyectado por el PMDU (color amarillo). c) Incrementos en los grados de susceptibilidad tomando en cuenta el crecimiento urbano proyectado por el PMDU.

partir de la zonificación que es posible identificar y delimitar las áreas y sus grados a la susceptibilidad a PRM. Con base en el modelo planteado se identificaron zonas críticas para la zona urbana que incrementarían su grado de susceptibilidad si se extiende la mancha urbana como se tiene proyectado. Esto último lo indica la comparación de los resultados entre el modelo con las condiciones para 2009 y las condiciones que proyecta el PMDU, para las cuales disminuye la superficie con susceptibilidad media (12.19 %) pero se incrementa el área con susceptibilidad alta (15.68 %) (Figura 6 y 4).

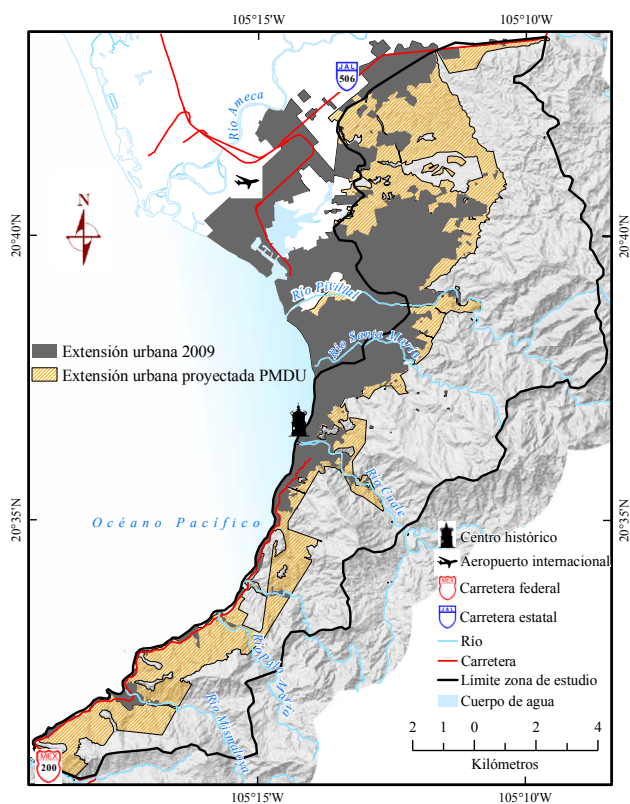


Figura 7. Detalle de las superficies que cubren la extensión urbana de 2009, y la extensión proyecta por el Plan Municipal de Desarrollo Urbano.

Tales resultados también revelan que la planeación hecha no considera el factor de peligro por procesos de remoción en masa, pues se promueve el crecimiento urbano en áreas con fuertes pendientes y con antecedentes de PRM. Por consiguiente al extender la zona urbana como lo proyecta el PMDU podría ocurrir un importante incremento en los desastres por los fenómenos de PRM.

La integración del PMDU en el modelo de susceptibilidad permitió evaluar el factor político-social, en condiciones actuales y proyectadas, que favorece el fenómeno de la inestabilidad de laderas.

La combinación del análisis multicriterio con el método heurístico resulta ser una herramienta óptima para la identificación de las zonas susceptibles a los PRM. La elaboración de este tipo de trabajos, que integran diversos factores locales para la modelización de la susceptibilidad, tienen un importante potencial para la toma de decisiones al proporcionar un producto gráfico que ayuda a su interpretación y fácil análisis.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a las instituciones de la UNAM: CIGA y CEP, por el apoyo, económico y de infraestructura. Al proyecto UMSNH PTC-212, PROMEP-SEP por sus apoyos económicos. A la Unidad

Tabla 7. Comparación de superficies resultantes de susceptibilidad a procesos de remoción en masa para la superficie urbanizada en Puerto Vallarta para condiciones del año 2009 y las condiciones proyectadas en el Plan Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU).

Susceptibilidad	Superficie condiciones 2009 (km ²)	Susceptibilidad con PMDU (km ²)	Diferencia 2009 y PMDU(km ²)	Diferencia y PMDU(%)	Proporciones dentro de la diferencia de área (%)
Muy baja	9.948	16.043	6.095	61.270	20.072
Baja	5.88	10.274	4.394	74.733	14.471
Media	2.912	10.02	7.108	244.141	23.408
Alta	2.424	14.613	12.189	502.909	40.141
Muy alta	0.438	1.017	0.579	132.283	1.908
Total	21.601	51.968	30.367	140.577	100.0

Estatad de Protección Civil y Bomberos Jalisco en las personas del Mayor J. Trinidad López Rivas, y a los comandantes Germán Pinto Aceves y Oswaldo N. Hernández Arvizu, por el apoyo e interés brindado en el trabajo de campo. Al personal de la Unidad Municipal de Protección Civil Puerto Vallarta por su apoyo logístico. Al Ing. Henri Audirac Lass presidente de la empresa CARTODATA S.A. de C.V., por su apoyo desinteresado en la aportación de fotografías aéreas. A IITEJ por su aportación de información base. A Luis Giovanni Ramírez Sánchez, Carlos A. Saracco Álvarez y José Luis Ramírez Ramírez por sus apoyos para el trabajo en campo. Agradecemos a Verónica Ochoa Tejeda y un segundo revisor anónimo por todos sus comentarios y sugerencias a este texto.

REFERENCIAS

- Bisci, C., Dramis, F., Sorriso-Valvo, M., 1996, Rock flow (sackung), *en* Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen, M.L. (eds.), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*: Gran Bretaña, John Wiley and Sons, 150-160.
- Buma, J., Van, T., 1996, Slide (rotational), *en* Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen, M.L. (eds.), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*: Gran Bretaña, John Wiley and Sons, 42-61.
- Casale, R., Fantechi, R., Flageollet J.C. (eds.), *Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community*, Commission of the European Communities, Programme EPOCH Final Report, (Contract No. 90 0025).
- Castellanos, E., Van Westen, C., 2008, Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba: *Geomorphology*, 94, 453-466.
- Das, I., Stein, A., Kerle, N., Dadhwal, V., 2010, Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India): *Geomorphology*, 114, 627-637.
- El Informador, 1993, Tres muertos y 35 heridos por las lluvias en Vallarta: *El Informador*, Diario independiente, Guadalajara, Jal. 21 de septiembre, No. 27244.
- Ferrari, L., Pasquaré, G., Venegas-Salgado, S., Romero-Rios, F., 2000, Geology of the western Mexican Volcanic Belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco Block: *Geological Society of America, Special Paper* 334, 65-83.
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Cardinali, F., Reichenbach, P., 2008, Comparing landslide inventory maps: *Geomorphology*, 94, 268-289.
- García J., 2006, Aplicación del proceso de jerarquía analítica en la selección de tecnología agrícola: *Agronomía Costarricense*, 30, 107-114.
- He, Y., Beighley, R., 2008, GIS-based regional landslide susceptibility mapping: a case study in southern California: *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 380-393.
- Instituto de Información Territorial del Estado de Jalisco (IITEJ), 2006, Atlas de caminos y carreteras del Estado de Jalisco, escala 1:20,000: Guadalajara Jal., Gobierno del Estado de Jalisco, formato digital vectorial.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1975, Carta de Uso del Suelos y Vegetación, Puerto Vallarta E13-D69, escala 1:50,000: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Köhler, H., Schaaf, P., Muller, S. D., Emermann, R., Negendank, J. F. W., Tobschall, H. J., 1988, Geochronological and geochemical investigations on plutonic rocks from the Complex of Puerto Vallarta, Sierra Madre del Sur: *Geofísica Internacional*, 27 (4), 579-592.
- Lugo-Hubp, J., Zamorano-Orozco, J., Capra, L., Inbar, M., Alcántara-Ayala, I., 2005, Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: Causa y efectos: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 212-228.
- Lukose, S., 2006, Effect of Vegetation on Debris Flow Initiation: Conceptualization and Parameterization of a Dynamic Model for Debris Flow Initiation in Tikovil River Basin, Kerala, India, using PCRaster: Holanda, ITC-NRSA, Tesis de maestría, 121 pp.
- Magliulo, P., Di Lisio, A., Russo, F., 2008, Comparison of GIS-based methodologies for the landslide susceptibility assessment: *Geoinformatica* 13(3), 253-265.
- Morgan R., Rickson, R., 1995, Slope Stabilization and Erosion Control: a bioengineering approach: Great Britain, Chapman & Hall, 274 pp.
- O'Loughlin, C., 2005, The protective role of trees in soil conservation: *New Zealand Journal of Forestry*, 49 (4), 9-15.
- Pack, R., Tarboton, D., Goodwin, C., 2005, SINMAP 2, A stability index approach to terrain stability hazard mappin: Utah State University, User's manual, 65pp.
- Plan Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU), 2008, Propuesta de Plan de Desarrollo Urbano de Centro de Población Puerto Vallarta 2008, H. Ayuntamiento Constitucional del Municipio de Puerto Vallarta, Jalisco 2007-2009 (versión para consulta pública).
- Regmi, N; Giardino, J., Vitek, J., 2010, Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach, *Western Colorado, USA: Geomorphology*, 115, 172-187.
- Roa, J., 2006, Aproximación al Mapa de Susceptibilidad y Amenazas por Deslizamientos de la Ciudad de Trujillo, Venezuela: *Ágora Trujillo*, 17, 185-205.
- Ruff, M., Czurda, K., 2008, Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria): *Geomorphology*, 94, 314-324.
- Saaty, T.L., 1980, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation (Decision Making Series)*: New York, McGraw Hill, 287 pp.
- Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., De Paz, A., Marturiá, J., 2003, A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Poble de Lillet Area (Eastern

- Pyrenees, Spain): *Natural Hazards*, 30, 281-295.
- Sarkar S., Kanungo, D. P., Patra, A. K., Kumar P., 2008, Gis based spatial data analysis for landslide susceptibility mapping: *Journal of Mountain Science*, 1, 52-62.
- Schaaf, P., Martínez-Serrano, R., 1997, The Puerto Vallarta batholith, an example for multicomponent parenthood of continental arc magmas: mid-congress field trip guide, in *International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, General Assembly, Mexico 1997*, 1-24
- Schäuble, H., 2004, *HydroTools 1.0 for ArcView 3.x: Germany, User's manual*.
- Stokes, A., Atger, C., Bengough, A., Fourcaud, T., Sidle, R., 2009, Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides: *Plant Soil*, 324, 1-30.
- Süzen, M., Doyuran, V., 2004, A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate: *Environmental Geology*, 45, 665-679.
- Van Westen, C., Castellanos, E., Kuriakose, S., 2008, Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview: *Engineering Geology*, 102, 112-131.
- Varnes, D. 1978, Slope Movement Types and Processes, *en* Schuster, R., Krizek, R. (eds.), *Special report 176: Landslide: Analysis and Control: Washington D.C., National Research Council, Transportation Research Board*, 11-33.
- Varnes, D., 1984, Landslide hazards zonation: a review of principles and practice: Francia, *Commission on Landslides of IAEG. Natural Hazards*, 3, 01-63.
- Zaitchik B. Van Es, H., Sullivan P., 2003, Modeling slope stability in Honduras: Parameter sensitivity and scale of aggregation: *Soil Science Society of America Journal*, 67, 268-278.
- Zimmermann, J., Stussi, J., González-Partida, E., Arnold, M., 1988, K-Ar evidence for age and compositional zoning in the Puerto Vallarta-Río Santiago Batholith (Jalisco, Mexico): *Journal of South American Earth Sciences*, 1(3), 267-274.
- Manuscrito recibido: Junio 17, 2011
 Manuscrito corregido recibido: Septiembre 15, 2011
 Manuscrito aceptado: Septiembre 27, 2011