



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estimación de zonas potenciales de deslizamiento debido a la
ocurrencia de un evento natural a través de procesamiento de
imágenes satelitales**

T E S I S

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOMÁTICO

PRESENTA:

Aranza Rodríguez San Juan

Tutor:

Dr. Eduardo Reinoso Angulo

Septiembre 2014





UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/126/2014

Señorita
ARANZA RODRÍGUEZ SAN JUAN
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. EDUARDO REINOSO ANGULO que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted conforme a la opción I. "Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional", para obtener su título en INGENIERIA GEOMATICA

"ESTIMACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE DESLIZAMIENTO DEBIDO A LA OCURRENCIA DE UN EVENTO NATURAL A TRAVÉS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES"

INTRODUCCIÓN

- I. MÉTODOS EXISTENTES PARA LA ESTIMACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE DESLIZAMIENTO A TRAVÉS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES**
- II. METODOLOGÍA PROPUESTA**
- III. APLICACIÓN**
- IV. DISCUSIÓN**
- V. CONCLUSIÓN**
- BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 25 de Agosto de 2014
EL PRESIDENTE DEL COMITÉ

M. EN I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH

Dedicada a:

Mi madre, por tus inmensos sacrificios para que yo pudiera cumplir mis metas, por tu amor y perseverancia, por siempre alentarme a ser mejor persona. Gracias.

A mi abuelita, por tu cariño y apoyo incondicional. A mis hermanas Kenya y Samie, mis tíos, Paty e Isaac por su compañía a lo largo de esta etapa.

A mis amigos que llenaron de risas cada día: Andy, Lili, Richie, Angel, Zay, Agustín, Miriam, Lupita, Angelo, Edgar e Ivan. En especial a Christopher por tus inagotables palabras de aliento y ánimos.

Atte:

Aranza Rodríguez San Juan

Índice General

	<i>Página</i>
Índice de figuras	3
Índice de tablas	5
Resumen	6
Introducción	7
Capítulo 1. Métodos existentes para la estimación de zonas potenciales de deslizamiento a través de procesamiento de imágenes satelitales	9
1.1 Antecedentes	9
1.2 Estado de arte	9
Capítulo 2. Metodología propuesta	12
2.1 Correcciones de imágenes	14
2.2 Homogenización de imágenes	14
2.3 Realce textural	17
2.4 Segmentación por color	19
2.5 Análisis de la topografía de la zona	22
2.6 Eliminación de materiales asentados	24
2.7 Eliminación de ruido	25
Capítulo 3. Aplicación	26
3.1 Fenómeno hidrometeorológico Manuel	26
3.2 Descripción de la zona de estudio	27
3.3 Resultados obtenidos	28
3.4 Comparación cualitativa entre resultados obtenidos y métodos de estimación	29
3.4.1 Método analítico jerárquico	30
3.4.2 Método Mora-Vahrson	32
3.4.3 Análisis de Montgomery para deslizamientos inducidos por lluvia	33

3.5 Comparación cuantitativa entre los resultados obtenidos y métodos de estimación	35
3.5.1 Método Jerárquico Analítico	35
3.5.2 Método Mora-Vahrson	36
3.5.3 Análisis de Montgomery para deslizamientos inducidos por lluvia	37
Capítulo 4. Discusión	39
4.1 Dificultades en la elaboración de la metodología	39
4.2 Recomendaciones	40
4.3 Discusión de la comparación entre métodos de estimación y resultados obtenidos	40
Capítulo 5. Conclusiones	42
Referencias	44

Índice de figuras

	<i>Página</i>	
Figura 1	Vista aérea del deslizamiento y la comunidad la Pintada sepultada	8
Figura 2	Diagrama de la metodología estimación de zonas potenciales de deslizamiento después de la ocurrencia de un evento natural a través de procesamiento de imágenes satelitales	13
Figura 3	Área ocupada por cada imagen SPOT y la zona de traslape entre ellas	15
Figura 4	Mosaico entre las imágenes antes y después de homogenizar	16
Figura 5	Filtro gradiente noroeste y filtro gradiente noreste delineando al deslizamiento de la comunidad La Pintada, Gro.	18
Figura 6	Unión de filtros gradiente noroeste y noroeste	18
Figura 7	Relación de los valores de reflectancia y su frecuencia para cada banda, se acota los intervalos con mayor frecuencia	19
Figura 8	Ejemplo de la segmentación de color en diferentes temporalidades	21
Figura 9	Mapa de pendientes de la zona	23
Figura 10	Representación 3D del relieve de la zona	23
Figura 11	Comparación entre la imagen con temporalidad antes del evento y posterior a el	24
Figura 12	Zona de estudio para la identificación de deslizamientos en el estado de Guerrero	27
Figura 13	Ejemplos de deslizamientos identificados, en el municipio de Leonardo Bravo, en el límite de Atoyac de Álvarez y San Miguel Totolapan	28
Figura 14	Distribución de deslizamientos identificados con técnicas de percepción remota	29

Figura 15	Comparación entre los resultados obtenidos y las zonas más propensas a sufrir deslizamientos, según el método analítico jerárquico	31
Figura 16	Comparación entre los resultados obtenidos y las zonas más propensas a sufrir deslizamientos, según el método Mora-Vahrson	33
Figura 17	Ilustración de los parámetros utilizados en el análisis de Montgomery	34
Figura 18	Comparación entre los resultados obtenidos y las zonas más propensas a sufrir deslizamientos, según el método Montgomery	34
Figura 19	Histograma y curva de la frecuencia acumulada, según los valores de las celdas extraídas del método por jerarquías analíticas	36
Figura 20	Histograma y curva de la frecuencia acumulada, según los valores de las celdas extraídas del método Mora-Vahrson	37
Figura 21	Histograma y curva de la frecuencia acumulada, según los valores de las celdas extraídas del análisis Montgomery	38

Índice de tablas

		<i>Página</i>
Tabla 1	Valores de reflectancia registrados de los deslizamientos reconocidos para cada banda	20
Tabla 2	Factores característicos para la identificación de los procesos de remoción en masa	22
Tabla 3	Descripción de los pesos asignados a los elementos de decisión	30
Tabla 4	Matriz de jerarquía analítica para identificar zonas susceptibles a deslizamientos en Guerrero	31
Tabla 5	Clasificación de susceptibilidad de deslizamiento Mora-Varhson	32
Tabla 6	Relación de los valores de susceptibilidad del método jerárquico analítico y su frecuencia	35
Tabla 7	Relación de los valores de susceptibilidad del método Mora-Vahrson y su frecuencia	36
Tabla 8	Relación de los valores de susceptibilidad del análisis de Montgomery y su frecuencia	37

Resumen

Se presenta una metodología para identificar deslizamientos causados por un evento natural, sismo o lluvia, a través del procesamiento de imágenes satelitales. Esto se logró a partir de métodos de realce textural por medio de la aplicación de filtros direccionales y la segmentación por color a partir de la definición de umbrales según sus valores de reflectancia, correlacionando estos factores con la topografía del terreno. Como ejemplo de aplicación se emplea para la identificación de los procesos de remoción en masa provocados por el huracán Manuel, ocurrido en el mes de septiembre de 2013, el cual afectó principalmente al estado de Guerrero. Los resultados obtenidos se compararon con tres métodos de estimación de zonas potenciales de deslizamiento: método Jerárquico Analítico, método Mora-Varhson y el análisis de Montgomery para deslizamientos inducidos por lluvia. Esta metodología permite identificar la ubicación geo-espacial y los principales rasgos superficiales de cada deslizamiento encontrado con el fin de generar una base de datos completa y actualizada de las zonas que sufrieron dichos daños, lo cual puede ser útil para tomar acciones de mitigación por parte de autoridades y demás interesados.

Abstract

This work presents method to observe, identify and monitor, landslides caused by a natural phenomenon such as earthquakes and heavy rains thru satellite image processing. This method was achieved by texture enhancement methods by applying different directional image filters, segmentation assigned by color using different value borders; this value borders were obtained with the reflectance values. This values were correlated with the topography of the study area. This method can be used to identify the natural process of mass remotion caused by hurricane Manuel (september 2013), affecting mainly the state of Guerrero. The obtained results, are compared with three different estimation methods for potential landslides areas: Analitic – Hierarchical Method, Mora – Varhson Method and Montgomery Analysis for landslides caused by rain. This methodology recognizes the geo-spatial location and the main superficial features of each landslide that is found. The data will help to the creation of an updated database. This new and complete database will be useful to take actions to mitigate the different hazards that this natural phenomena cause.

Introducción

Un deslizamiento se define como la caída perceptible o movimiento descendente de una masa de tierra, roca o ambas (Sharpe, 1938). Actualmente los deslizamientos pueden llegar a ser catastróficos debido a lo cercano que se encuentran comunidades y construcciones de carácter civil a zonas que presentan un relieve inestable, por factores de topografía, geología, geomorfología, etc.

Se han registrado a través de la historia, los desastres ocurridos pasado un evento hidrometeorológico y/o sísmico, entre ellos los procesos de remoción en masa (PRM). Noticias, periódicos, informes de diferentes dependencias de gobierno, etc., han detallado los daños a viviendas, edificios, puentes, caminos, pérdidas humanas y económicas que ha ocasionado un determinado deslizamiento. Si bien hay una gran cantidad de información documentada, resulta incompleta e insuficiente, ya que gran parte de los PRM no han podido ser identificados; por ende, no son registrados y mucho menos se han tomado medidas de mitigación en esas zonas, esto se debe, a que muchos de los deslizamientos ocurren en zonas alejadas de comunidades y de difícil acceso, es por ello que el uso de la percepción remota es ideal para la identificación de deslizamientos. Entendiéndose por percepción remota la ciencia y el arte de obtener información, sin contacto físico, del objeto que se examina (Lillesand y Kiefer, 1987).

Hoy en día el uso de imágenes satelitales para la evaluación y el análisis de diferentes eventos naturales es de gran ayuda. En el caso del monitoreo de deslizamientos permite tener información de toda la zona de estudio, con limitantes como la nubosidad, antes y después del evento, lo que permite visualizar y analizar el cambio y daño ocurrido. Gracias a esta técnica fue posible lograr el objetivo de esta tesis, que es generar un inventario con la ubicación geoespacial de deslizamientos de forma semiautomática, que esté actualizado y lo más completo posible. Estos datos, pueden mostrar una visión rápida de la destrucción causada por un deslizamiento, y tener conocimiento sobre el riesgo que conlleva construir obras de carácter civil en estas zonas, en caso de hacerlo, tomar las medidas pertinentes en el diseño de esta infraestructura.

Omitir esta información puede tener consecuencias desastrosas, tal es el caso de la comunidad La Pintada, ubicada en la sierra cafetalera del municipio de Atoyac de Álvarez, Guerrero, que sufrió un deslizamiento en el año 1964 (El Universal, 2013) y sobre este material asentado se reconstruyó esta comunidad, misma que nuevamente quedó sepultada por otro deslizamiento tras el paso del huracán Manuel en septiembre de 2013, esta población desapareció en un 85% ocurrido el PRM. Esta pequeña localidad cuenta con una población de 500 habitantes, se tiene registro aproximadamente entre muertos y desaparecidos de un poco más de 70 personas. Las afectaciones de este desastre se muestran en la figura 1.



Figura 1: Vista aérea del deslizamiento y la comunidad la Pintada sepultada (inferior), trabajos de rescate de protección civil unos días después del PRM (superior). Fuente periódico el Milenio

Son muchas más las comunidades y zonas que han sido perjudicadas por deslizamientos detonados por sismos y lluvias, éstas están expuestas en cualquier época del año a la ocurrencia de un PRM. Por esta razón es importante tener un conocimiento sólido sobre las áreas que han sido afectadas por los deslizamientos, lo que ayudará a relacionar y analizar diferentes factores que pudieron intervenir en la estabilidad de la ladera.

En esta tesis, se hace una recopilación de los estudios que han utilizado imágenes satelitales en el análisis de zonas susceptibles a deslizamientos. A partir de esta investigación, se propone una metodología para identificar deslizamientos, pasado un evento natural. La metodología, relaciona los principales rasgos superficiales de un deslizamiento como, el color, la textura y pendiente. Los resultados obtenidos se comparan con tres métodos de estimación de zonas potenciales de deslizamiento a gran escala: método Jerárquico Analítico, método Mora-Varhson (1994) y el análisis de Montgomery *et al.* (1998). Al realizar estas comparaciones, se pretende analizar las ventajas y desventajas que cada método ofrece.

Capítulo 1

Métodos existentes para la estimación de zonas potenciales de deslizamiento a través de procesamiento de imágenes satelitales

1.1 Antecedentes

Podemos catalogar en dos tipos los factores que propician la inestabilidad de laderas: internos y externos.

Entendemos por factores internos, aquellos directamente relacionados con el origen y las propiedades de los suelos; distribución espacial, estratigrafía, la presión que ejerce el agua dentro de la masa de suelo provocando la disminución de su resistencia al esfuerzo cortante. También las heladas y bajas temperaturas contribuyen a la degradación y alteración de los suelos y rocas.

Los factores externos, son aquellos sistemas ajenos a la ladera que perturban su estabilidad, estos pueden ser; lluvias intensas, sismos, actividad volcánica o actividades humanas. Diferentes estudios han intentado conocer y analizar las características, topográficas, geológicas, climatológicas, de una determinada zona, así como su comportamiento ante la ocurrencia de un evento natural (factor externo).

Dependiendo de la escala del estudio, se pueden nombrar diferentes técnicas de trabajo, por ejemplo, estudios geotécnicos, sondeos y muestreos. Este trabajo de campo en conjunto con un trabajo de laboratorio, ofrece la información más precisa y detallada, aunque sus costos son muchos más elevados que un análisis basado en una modelación matemática, estos son más convenientes para trabajos a gran escala, algunos son: el análisis estabilidad de talud infinito Jibson *et al.* (2000), análisis de Newmark (1965), análisis de Montgomery *et al.* (1998), entre otros. Por otra parte, son muy utilizadas las técnicas de fotointerpretación para el reconocimiento de deslizamientos, y recientemente el uso de imágenes satelitales. Nuevas propuestas e investigaciones para la detección y estimación de áreas susceptibles a deslizamientos utilizando datos provenientes de imágenes satelitales, han surgido en las últimas décadas, algunos de estos trabajos se detallaran a continuación.

1.2 Estado de arte

Existen diferentes estudios que utilizan la teledetección para la estimación de zonas potenciales de deslizamiento, algunos de éstos se enfocan en la predicción de dichas zonas, otros a la identificación de éstas, pasado un evento natural.

Algunos estudios realizados en este tema, (Chacón *et al.*, 2002), (Suarez *et al.*, 2009), (Roa, 2006), (Hervas *et al.*, 2002) se centran en evaluar una zona de interés y según sus características estimar posibles áreas susceptibles a la ocurrencia de un deslizamiento; esto a través de una Evaluación Espacial Multicriterio (EMC) o también conocido como Método Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés). Este método consiste en un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones (Gómez y Barredo, 2004), con base en puntuar y jerarquizar una serie de criterios presentados en una matriz.

Los parámetros utilizados para este fin son principalmente: pendiente, cobertura vegetal (uso de índices de vegetación), litología, intensidad de lluvia, distancia a cauces, actividad de movimientos, cambio de uso de suelos, etc. Si bien estos estudios comparten el uso del AHP, difieren en la elección de algunos criterios, también en la asignación de sus pesos. La pendiente es un factor que están de acuerdo los autores en tomar en cuenta, aunque no en su grado de importancia y/o peso que debe tener, por lo que se presenta una subjetividad en los resultados y una discusión sobre los mejores criterios que se deben utilizar y, aún más importante, qué peso debe tener cada parámetro. Aún con esta debilidad, el método ofrece resultados rápidos y favorables de gran ayuda para obtener una cartografía que refleje las zonas susceptibles por deslizamiento. Por otra parte, el tipo de imágenes satelitales y procesos de teledetección que utilizan, difieren según el autor que los emplee. En la identificación de diversos patrones y coberturas; algunos investigadores recurren al uso de clasificación digital de tipo supervisada, aunque difieren en el algoritmo de clasificación (mínima distancia, paralelepípedos, máxima probabilidad). Otra técnica muy utilizada es el índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI).

Otro estudio con el mismo enfoque, pero dejando atrás el AHP, es el propuesto por Recondo *et al.* (2000) para los Concejos de Oviedo y Mieres en Asturias, quienes utilizan un modelo digital de elevación (DEM) e imágenes satelitales Landsat TM. Del primer insumo elaboran mapas base de pendientes, flujo acumulado y de curvatura, del segundo obtienen mapas de vegetación y de lineamientos. Recondo *et al.* (2000) definen los lineamientos como hechos lineales cartografiados; estos los generaron a través de filtros de realce de bordes en matrices de 5×5, en cuatro direcciones N-S, NW-SE, W-E y SW-NE sobre la banda roja del sensor TM. Estos lineamientos siguen la dirección de contactos geológicos y son validados con mapas de campo existentes.

El mapa de lineamientos fue reclasificado en cinco clases, desde muy bajo a muy alto, según la frecuencia en que los lineamientos en distintas direcciones aparezcan. Para obtener un mapa de la vegetación en la zona, optaron por realizar diferentes métodos de clasificación supervisada, y elegir para cada una de las cinco clases, el método que ofreciera más confiabilidad global. Los datos que obtuvieron de los mapas de pendientes, flujo acumulado y curvatura, también los agruparon en las mismas cinco clases (muy bajo a muy alto). Una vez que se obtuvieron los cinco mapas bases, se hace una adición de ellos, dando como resultado cartografía que muestra zonas de susceptibilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta de deslizamiento. Utilizando el mismo método se estudió la zona en la subcuenca baja de la Quebrada Perdices en Guayabetal, Colombia (Sierra C, 2009).

Otra propuesta hecha por Fernández *et al.* (2010), para la identificación de movimientos de ladera mediante técnicas de teledetección, es el uso de composiciones en color, tanto en real como en falso, filtros de realce de bordes (laplaciano y sobel), filtros texturales como el de varianza y entropía, éste último para calcular la variabilidad de un pixel respecto a sus pixeles vecinos, índices de vegetación y clasificación de tipo supervisada, para distinguir cuatro tipos de cobertura principales, zonas urbanas, zonas de vegetación, zonas de suelo y zonas de afloramiento del macizo rocoso. Posteriormente aplican un análisis de separabilidad entre filtros de realce de bordes y texturales en una imagen pancromática y también se aplica el análisis de separabilidad a las coberturas identificadas en clasificación digital y el NDVI en las bandas de la imagen multispectral. A partir de los resultados obtenidos calculan estadísticas para determinar el coeficiente Kolmogorov-Smirnov, este coeficiente muestra las diferencias entre el histograma (frecuencia de los niveles digitales) de la imagen satelital completa y los histogramas de las muestras de los deslizamientos visualmente seleccionados (Fernández *et al.*, 2010). Para este estudio utilizaron imágenes Ikonos, SPOT 5 y Landsat ETM+.

De los investigadores que más han profundizado en el tema son Hervás y Rosin (2001), quienes proponen varios métodos para el reconocimiento y control de deslizamientos por medio del uso de percepción remota. Entre los métodos más innovadores que manejan los autores, está la segmentación textural supervisada, que consiste en extraer el espectro textural de un área previamente identificada como un deslizamiento y el de una ventana de la imagen; en ellas, se calcula la semejanza entre ambos espectros para cada pixel y se dividen en intervalos que representan el grado de probabilidad de pertenencia al tipo de deslizamiento de referencia (Hervas y Rosin, 2001). En este método utilizan imágenes Daedalus ATM de 3 m de resolución e imágenes pancromáticas IRS-1C PAN y SPOT, de 5 y 10 m de resolución. También Hervas y Rosin (2001) proponen técnicas por realce textural y espectral de imágenes por medio de filtros laplacianos de 3×3 con kernel central de 17. Otro método propuesto por los investigadores Hervas y Rosin (2001) es la simulación tridimensional de imágenes, donde superpone imágenes multispectrales en MDE de alta resolución, lo que permite crear imágenes tridimensionales para delinear escarpes y bordes de grandes deslizamientos; esta técnica fue usada para la gran depresión en Tirajana Gran Canaria, España.

Hervas y Rosin (2001) proponen el control de deslizamientos analizando los cambios producidos en la superficie del terreno mediante la clasificación de las imágenes: con cambio y sin cambio; esto a partir de analizar su histograma. En cada imagen segmentada se separan por la intensidad de pixel, desde los suelos y sustrato rocoso más frescos hasta las áreas cuya radiancia ha disminuido por un crecimiento de vegetación. Este método fue aplicado al gran deslizamiento de Tessina, en los Alpes orientales italianos.

Capítulo 2

Metodología propuesta

Los estudios consultados y descritos brevemente en el capítulo uno representan la base para la construcción de esta metodología. En particular, se toma de guía el estudio propuesto por Hervas y Rosin (2001).

Además de la influencia de las teorías y metodologías documentadas en el capítulo anterior, se optó por estudiar y examinar las características superficiales más representativas de un deslizamiento. En resumen la metodología propuesta en esta tesis, consta de siete actividades:

1. Correcciones de imágenes
2. Homogenización de imágenes
3. Realce textural
4. Segmentación por color
5. Análisis de la topografía de la zona
6. Eliminación de material asentado
7. Eliminación de ruido

Las actividades 1 y 2 consisten en el pre-procesamiento de las imágenes satelitales, las demás son un conjunto de técnicas correlacionadas entre sí, para identificar los rasgos más característicos de los procesos de remoción en masa. De manera ilustrativa, en la figura 2 se presenta un diagrama que describe la metodología propuesta en esta tesis.

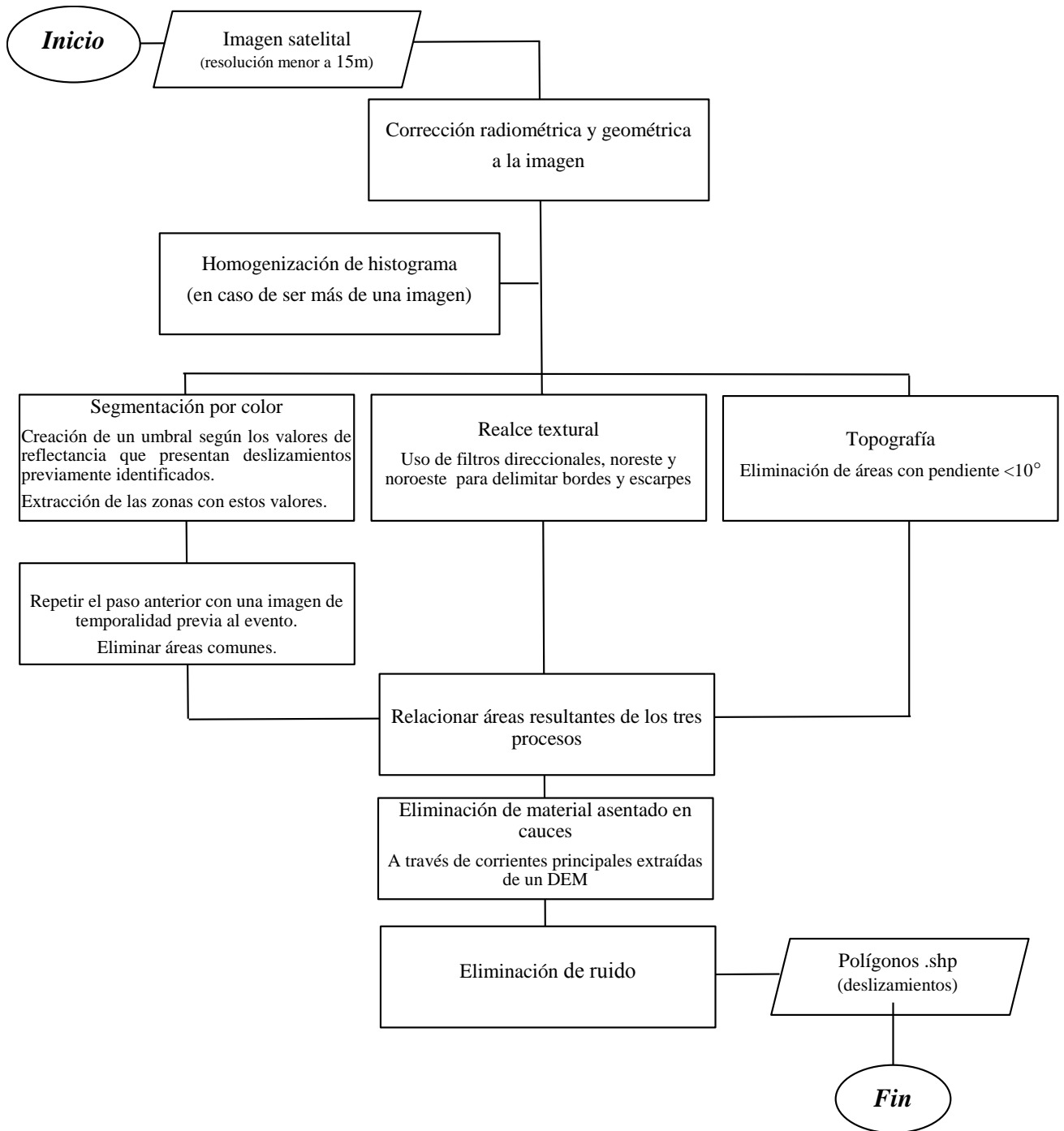


Figura 2. Diagrama de la metodología estimación de zonas potenciales de deslizamiento después de la ocurrencia de un evento natural a través del procesamiento de imágenes satelitales

A continuación, se describe cada parte de la metodología.

2.1 Correcciones en la imagen

Son aquellos procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen satelital, ya sea en su localización y en la radiometría de los píxeles que la componen (Chuvienco, 2002).

Son dos las correcciones fundamentales que se deben hacer a una imagen satelital: la radiométrica y la geométrica. La primera se refiere al proceso de restaurar los niveles digitales (ND) de una imagen satelital en un intento por estimar su valor real (Martínez *et al.*, 1998) es decir, convertir los ND a valores de radiancia o reflectancia. La segunda corrección consiste en cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles que la forman, esta no pretende modificar los ND de los píxeles, sino solo su posición y sus coordenadas (Chuvienco, 2002).

En esta tesis los procesos antes mencionados no se realizan de forma manual, ya que las imágenes se adquirieron con un nivel de procesamiento 3A, esto significa que las escenas cuentan ya con la corrección radiométrica y corrección geométrica llamada orto-rectificación, con una precisión de diez metros y con la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), ya que estas imágenes se obtuvieron de la Estación de Recepción México Nueva Generación (ERMEX NG) a través del acuerdo entre el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) y el Instituto de Ingeniería, UNAM.

Existen otros tipos de correcciones como la topográfica y atmosférica, realizarlas quedará a decisión del usuario, dependiendo de las condiciones de la escena.

2.2 Homogenización de las imágenes

Las imágenes seleccionadas para la implementación de la metodología propuesta presentan una diversidad en su fecha de toma, como se muestra en la figura 3, debido al elevado porcentaje de nubosidad o a la falta de disponibilidad de las mismas, esto provoca diferencias en la geometría del sol, condiciones atmosféricas, calibración del sensor, humedad del suelo, vegetación, fenología, etc. En consecuencia la variación de estos parámetros modifica la signatura espectral de un píxel aunque se mantenga constante la cubierta (Chuvienco, 2002). Por lo que es necesario homogenizar los ND de las escenas seleccionadas.

Existen diferentes técnicas para hacerlo, una puede ser calibrar los ND de modo absoluto (conversiones a medidas de reflectividad o temperatura de suelo), otra opción es equiparar los ND entre imágenes, es decir, bastará una corrección relativa entre fechas (Chuvienco, 2002).

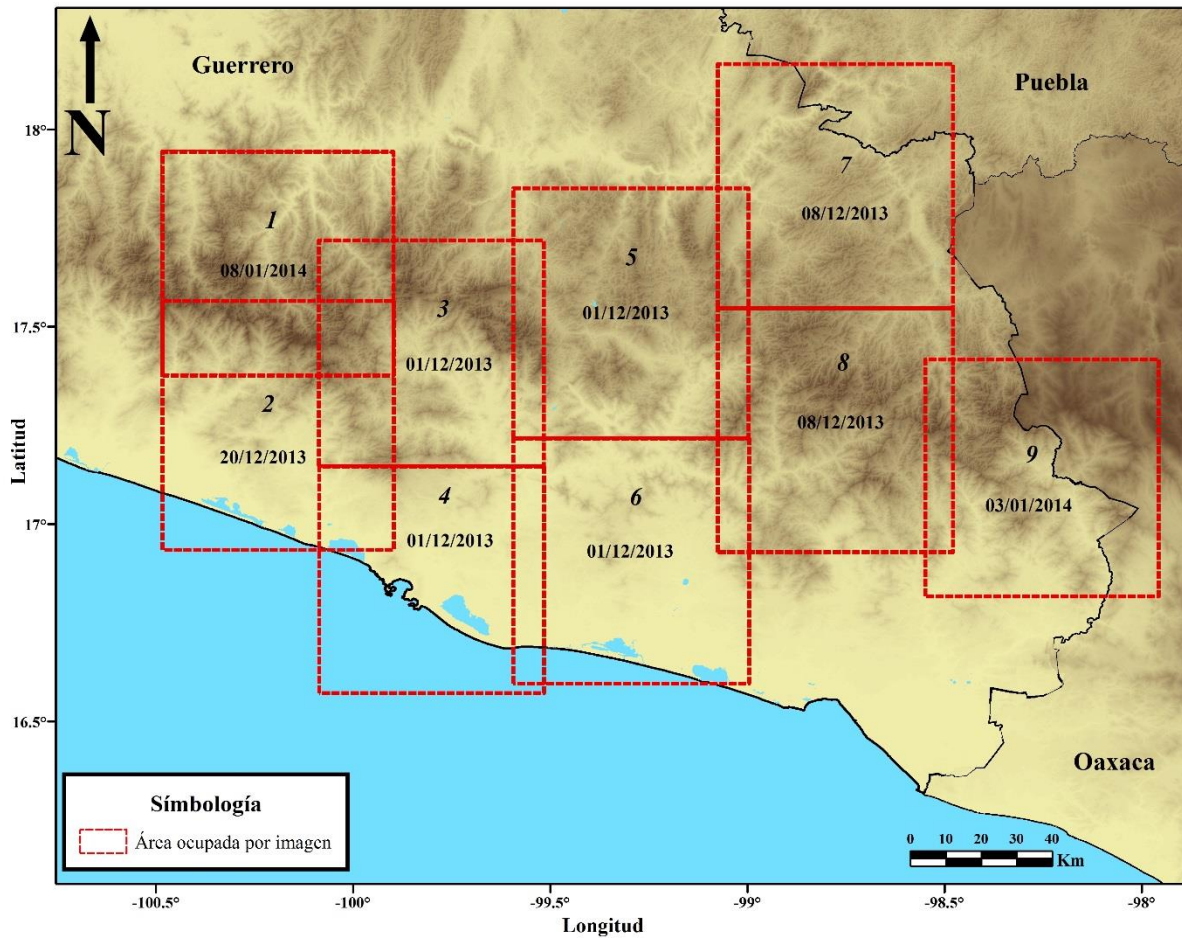


Figura 3. Área ocupada por cada imagen SPOT y la zona de traslape entre ellas, se indica un número a cada imagen para un fácil reconocimiento y la fecha de toma de cada una

Como ya se mencionó, el nivel de procesamiento de las imágenes es 3A, es por esto que la primera técnica, que incorpora parámetros de corrección atmosférica fue descartada, ya que está se realiza en valores de radiancia, por otro lado, la falta de una banda térmica en el sensor de SPOT imposibilita la conversión a temperatura de suelo. Debido a esta situación, se trabajó en el balance de histogramas, esto consiste en una transformación que pretende obtener para una imagen un histograma con una distribución uniforme. Se optó por aplicar esta transformación por medio de la “*histogram matching*” disponible en el software Arc Gis (ESRI) versión 10.0, con la creación de mosaicos, ésta cambia los valores de cada píxel según el histograma de un *raster* específico (Ayuda Arc Gis 10.1, 2013). El balance de histograma funciona bien cuando todos los *raster* tienen una forma de histograma similar, esto facilitará la asignación de los parámetros que se explicarán más adelante. Como ejemplo ilustrativo, el proceso se aplica a las imágenes tres y cuatro, y los resultados se presentan en la figura 4.

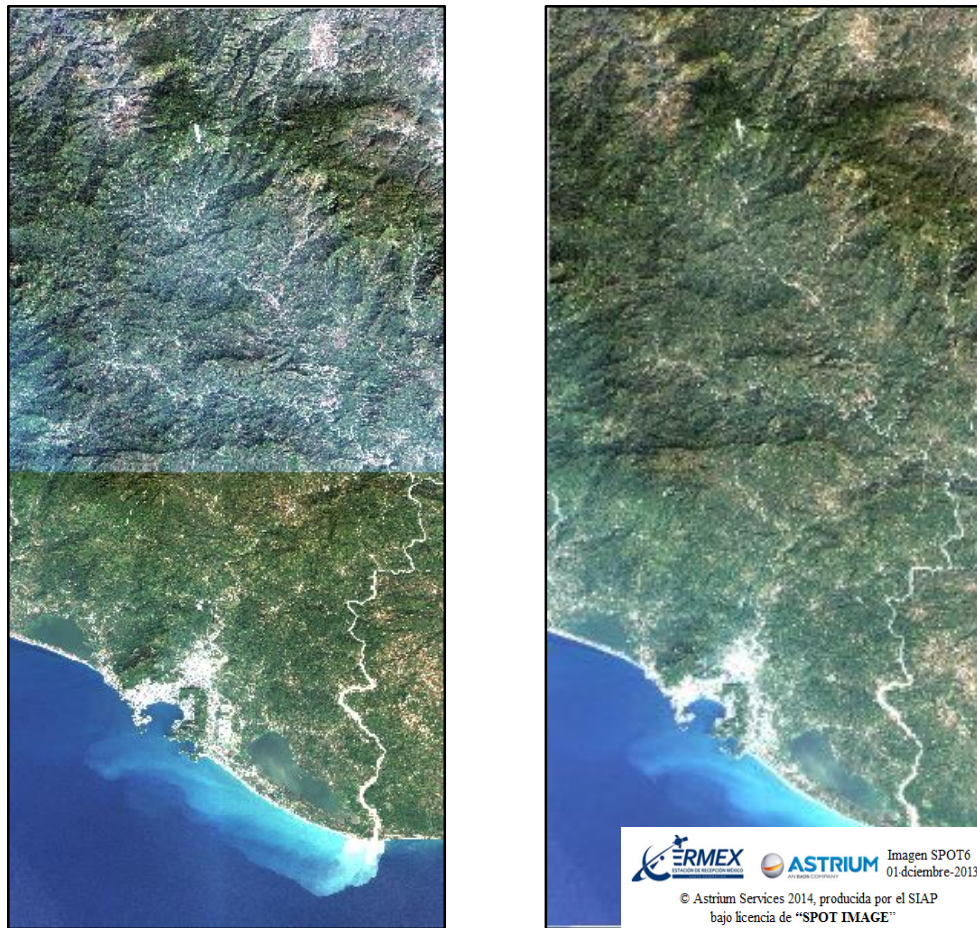


Figura 4. Mosaico entre las imágenes 3 y 4, se observa la diferencia en brillo y tonalidad, sin homogeneizar (izquierda), y mosaico homogeneizado (derecha) entre las mismas imágenes

Por cuestiones de optimización en tiempo de cómputo y recursos, se decidió dividir las imágenes a trabajar en mosaicos, esto facilitó la ejecución de los procesos que se describirán más adelante. La imagen número dos fue trabajada sola, en consecuencia de su alto porcentaje de nubosidad, lo cual alteraba el balance al momento de formar un mosaico.

Aunque se contó con imágenes pancromáticas con resolución de 1.5 metros, se trabajó solo con las imágenes multispectrales con resolución de seis metros, esto con base en que se realizó el método de fusión *Pan Sharpening* disponible en el programa ENVI (ESRI) versión 5.0, con el fin de aumentar la resolución espacial a 1.5 metros sin modificar o dañar su resolución espectral, al trabajar con estos resultados se consideró innecesario realizar esta fusión, ya que aumentar la resolución provocó mayor ruido al fin perseguido, en conclusión, una resolución de seis metros es excelente para identificar deslizamientos y hasta una de resolución de diez metros sería adecuada. Sin embargo, una resolución menor, por ejemplo de quince metros funcionaría solo para identificar PRM de gran extensión, utilizar imágenes con resolución mucho menor complicaría realizar este tipo de análisis.

2.3 Realce textural

El realce textural de la imagen se hace mediante la aplicación de filtros, estos se aplican para aislar componentes de interés (Chuvieco, 2002). La técnica de filtraje considerada es el gradiente de Prewitt, los cuales permiten resaltar solamente las transiciones abruptas en la imagen, tales como bordes de objetos (Aldalur y Santamaría, 2002).

Los filtros de gradiente se pueden utilizar en la detección de aristas en incrementos de 45 grados. Con el fin de delinear a lo que en esta tesis se consideran posibles deslizamientos, se aplicará el filtro gradiente en dirección noreste y dirección noroeste, cada uno representado por una matriz de 3×3.

Matriz gradiente noreste

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz gradiente noroeste

$$\begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

Cada matriz se aplica sucesivamente a cada uno de los pixeles de la imagen en estudio, desplazándose hacia la derecha tras calcular el nuevo valor del pixel central, que es el único que se modifica (Chuvieco, 2002). El cálculo se lleva a cabo empleando la siguiente expresión:

$$ND'_{i,j} = \frac{\sum_{p=-1,1} \sum_{q=-1,1} ND_{i+j,p,j+q} CF_{f+q,c+q}}{\sum_{p=-1,1} \sum_{q=-1,1} CF_{f+q,c+q}} \quad (1)$$

donde $ND'_{i,j}$ es el ND de salida para ese mismo pixel; $ND_{i,j}$ indica el ND original del pixel i,j ; CF , el coeficiente de filtraje correspondiente, y f y c la fila y columna central de la matriz de filtraje.

El filtro funciona de esta forma; si dos pixeles adyacentes presentan brillos muy diferentes, el filtro indicará la existencia de un borde, por el contrario si dos pixeles adyacentes tienen valores similares de brillo, no existirá borde alguno (Aldalur y Santamaría, 2002). En las regiones donde no hay cambio de brillo el gradiente genera valores cero, y valores más altos en la existencia de bordes, los cuales son de interés. En la figura 5 se muestra los filtros aplicados a la zona del deslizamiento la Pintada, Guerrero, ocurrido en septiembre de 2013, nótese que se realzan las orillas del deslizamiento dependiendo de la dirección del filtro, aunque ninguno de los dos logra delinearlos en su totalidad.

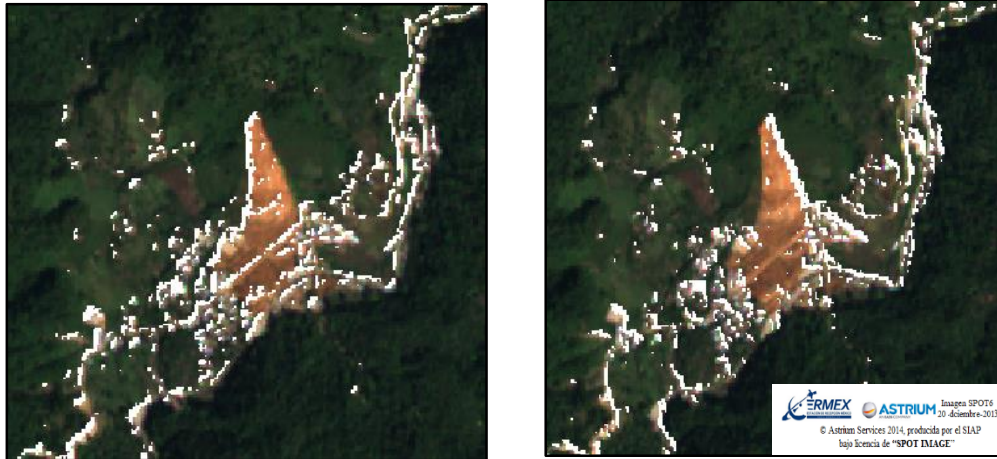


Figura 5. Filtro gradiente noroeste (izquierda) resalta la orilla del deslizamiento del lado izquierdo y filtro gradiente noreste (derecho) resalta la orilla del lado derecho en la comunidad La Pintada, Gro.

Al aplicar los filtros en las dos direcciones y unirlos se intenta delinear los posibles deslizamientos en su totalidad, como se observa en la figura 6.

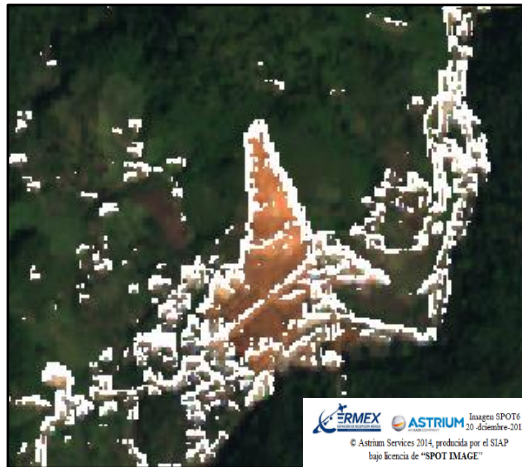


Figura 6. Unión de filtros gradiente noroeste y noreste

De los resultados obtenidos, se tendrán que suprimir gran parte de los bordes generados por los filtros, ya que la mayoría corresponden a carreteras, caminos, casas, parcelas de cultivo, nubes, etc. Todos estos ajenos a los PRM de interés, en cambio se seleccionan aquellos que cumplan con características específicas como color, topografía, pérdida repentina de cubierta vegetal y un cambio en la uniformidad de la misma. Esto se detallará más adelante.

2.4 Segmentación por color

En percepción remota se puede medir cuantitativamente el color visible de un objeto y también la interacción de energía electromagnética más allá de esta región (Jensen, 1983). Las condiciones del terreno cambian ocurrida la remoción de material, dejando así un área sin su antigua cobertura, en consecuencia, la nueva superficie afectada presentará a la vista un color diferente, muy parecido al de un suelo desnudo.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), proporcionó información a nivel nacional sobre los PRM reportados. Esta base de datos, no siempre, señala la ubicación exacta del PRM, si no, el poblado más cercano. Tomando en cuenta, solo los deslizamientos perfectamente identificados, se seleccionó una muestra de ocho de ellos, para analizar sus niveles de reflectancia. Por lo que, se extrajeron un total de 2,216 celdas correspondientes a dichos deslizamientos. Se presentan los histogramas de las celdas seleccionadas para cada banda, figura 7.

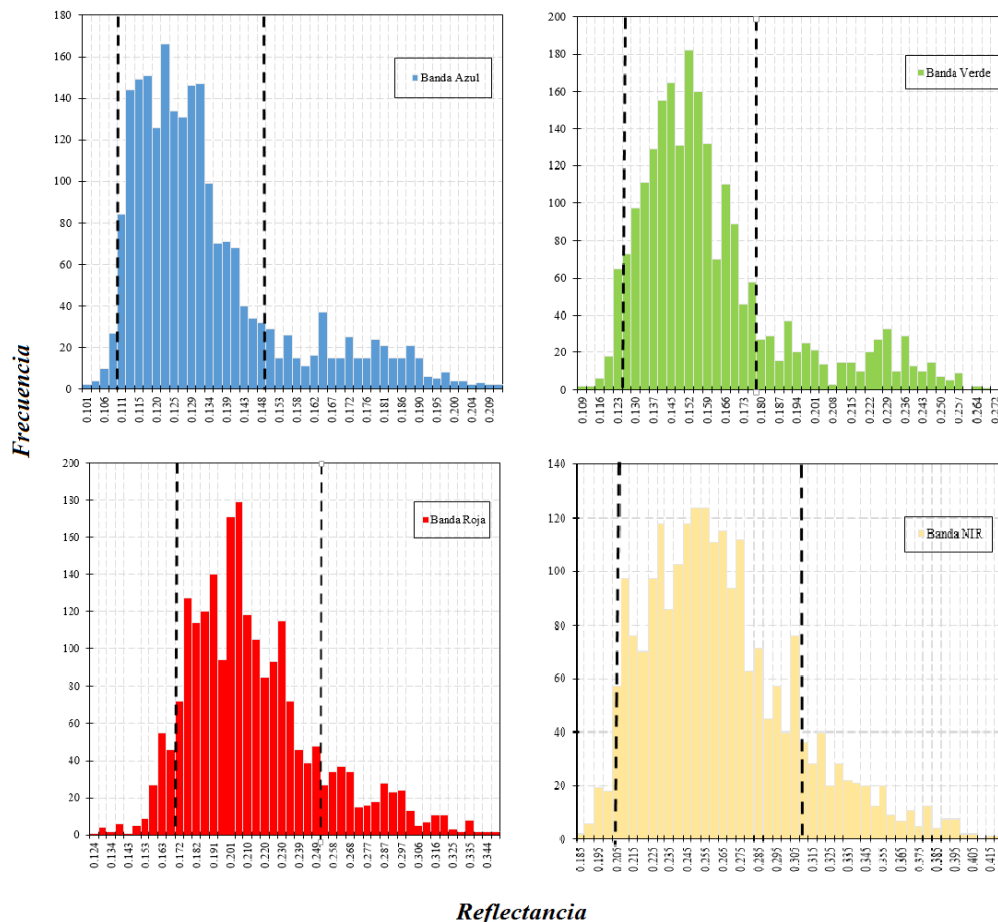


Figura 7. Relación de los valores de reflectancia y su frecuencia para cada banda, se acota los intervalos con mayor frecuencia

Analizando la distribución de los valores obtenidos, se acotaron los rangos donde se presentó mayor frecuencia, para cada banda. Con esto, se pretende tener la mayor probabilidad de encontrar elementos del paisaje con valores similares de reflectancia a la muestra de deslizamientos tomada. Los rangos elegidos para cada banda se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de reflectancia registrados de los deslizamientos reconocidos para cada banda

Banda	Rango	
	Mínimo	Máximo
Azul	0.111	0.148
Verde	0.123	0.170
Rojo	0.165	0.230
NIR	0.205	0.305

**Nota: La reflectancia es una magnitud adimensional.*

En base a estos intervalos (tabla 1), se crearon reglas de la segmentación. Al aplicar las reglas, se obtuvo mejores resultados en una combinación en color real (rojo, verde, azul) que en una combinación en falso color (NIR, rojo, verde), ya que, el intervalo definido para la banda cuatro, reconoció zonas diferentes a las de interés.

Al aplicar los intervalos, se reconocen zonas urbanas y áreas con escasa o nula vegetación, las cuales ya existían antes del evento, como éstas son indeseables para este análisis, se optó por utilizar imágenes con una temporalidad previa al evento, el intervalo definido anteriormente se aplicó a estas imágenes. Al hacer la comparación entre las áreas extraídas de cada temporalidad, se eliminan las superficies comunes correspondientes a zonas urbanas, caminos, zonas áridas, esto con el propósito de eliminar todo elemento que pueda causar confusión en los resultados finales, aún más importante, con este proceso se pretende detectar cambios en el paisaje, es decir, las áreas restantes representarán aquellas zonas que cambiaron considerablemente sus valores de reflectancia en un periodo muy corto de tiempo.

Cabe resaltar que es necesario equilibrar los histogramas entre las escenas de cada fecha para aplicar el intervalo obtenido, evitando tener gran variación en los valores. En un escenario que presenta vegetación vigorosa se puede omitir este paso.

Un ejemplo de lo anterior se muestra en la figura 8. En color amarillo se presentan las zonas extraídas con una temporalidad previa al evento, nótese que se reconoce el poblado. De color coral se muestran las zonas extraídas después del evento: el poblado, un cauce posiblemente originado por material asentado de un deslizamiento que ocurrió más al norte y del lado derecho aparece un posible deslizamiento. El área común entre las dos imágenes, que es el poblado, se eliminan. Dejando el cauce y el deslizamiento para el estudio.

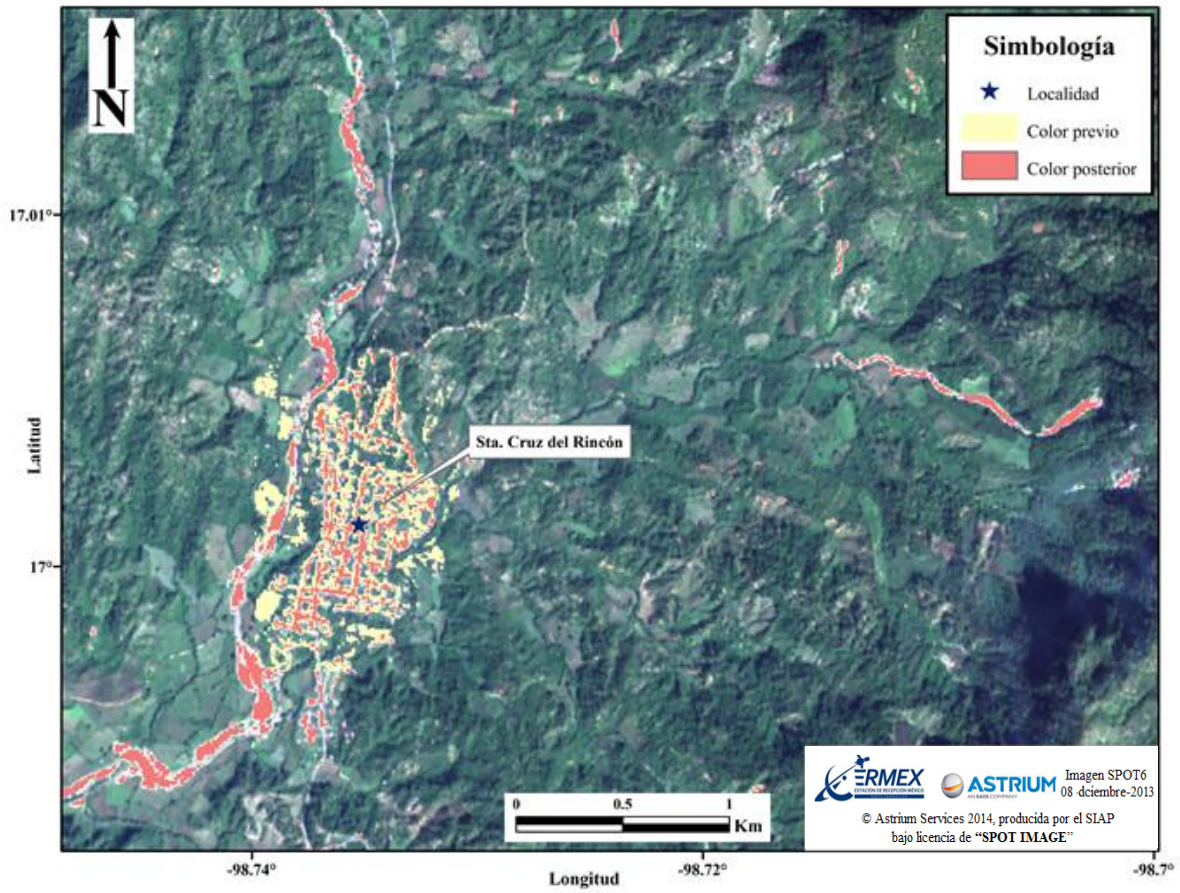


Figura 8. Ejemplo en la comunidad Sta. Cruz del Rincón, Guerrero.

2.5 Análisis de la topografía de la zona

Un deslizamiento se caracteriza por un movimiento de materiales pendiente abajo, es por esto, que el ángulo de inclinación del relieve es un factor importante para categorizar un deslizamiento, este trabajo, no pretende identificar a que clase pertenece cada uno de ellos, según su tipo de movimiento, pero sí se pretende reconocer cada PRM ocurrido.

El tipo de movimiento de un deslizamiento estará definido por su geometría y pendiente. La profundidad, masa desplazada y rangos de pendiente que determinan la clase a la que pertenece un deslizamiento se muestra en la tabla 2.

**Nota: D/L Profundidad / Longitud de la masa desplazada*

Tabla 2. Factores característicos para la identificación de los procesos de deslizamientos (Adaptado de Gonzalez et al., 2002, Niño et al., 2014)

Tipo de movimiento	Geometría y pendiente
Caída y desprendimiento	Pendientes mayor a 50°
Rotacional	Rango de pendientes 20°-40° $D/L < 0.3$ a 0.1
Translacional	Pendientes uniformes 15°-50° $D/L > 0.1$
Flujos de lodo	Rango de pendientes 10°-25° $D/L > 0.05$ a 0.01
Flujos de escombros	Pendiente mayor a 25° D/L insignificante

Se analizaron todas las áreas con pendientes mayores a diez grados, este valor corresponde al valor mínimo donde puede ocurrir un deslizamiento.

Empleando un DEM (INEGI, 2014), con una resolución de quince metros, se genera un mapa de pendientes por cada mosaico, para esto se calcula la tasa máxima de cambio en el valor de cada celda con sus ocho vecinos más próximos, es así como se identifican los cambios en el factor “Z” (cota de elevación) más pronunciados del relieve. En la figura 9 se presentan las zonas que se descartaron, considerando que no es posible que ocurra un deslizamiento, esta condición elimina los resultados de filtros direccionales y segmentos de color que existan en zonas con pendientes no deseadas.

En la figura 10 se representa un fragmento del escarpado relieve del estado de Guerrero, donde existen comunidades, obras de infraestructura como caminos y puentes, cerca de cambios abruptos en el terreno o zonas inestabilidad, expuestos a la ocurrencia de un deslizamiento.

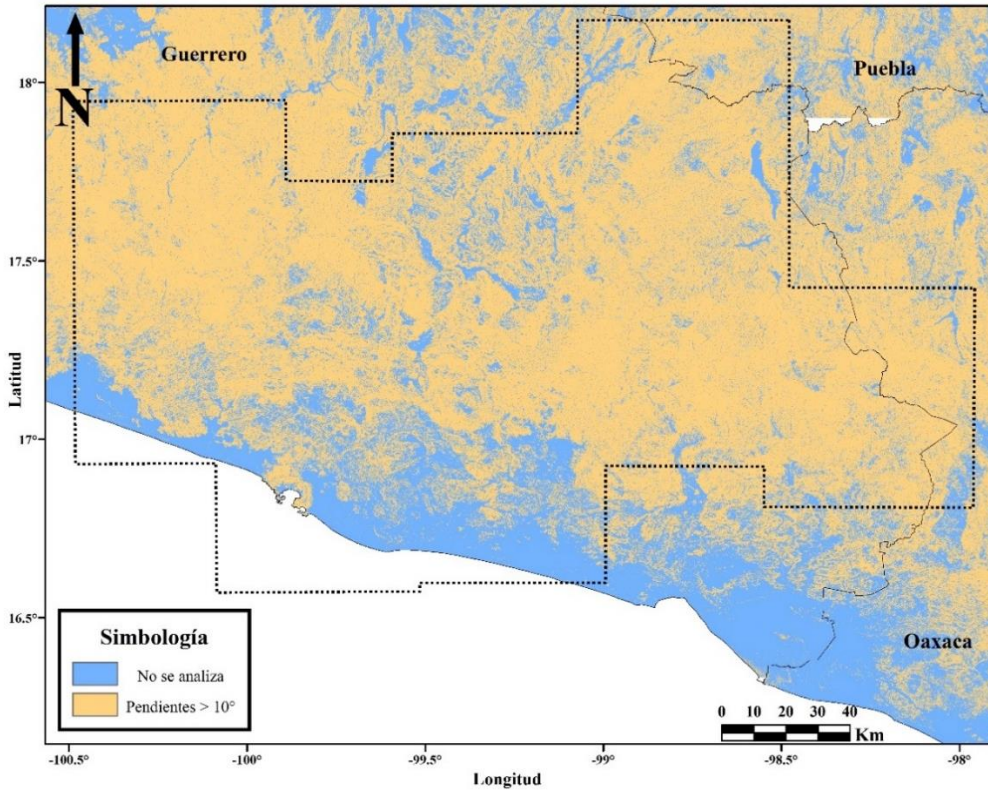


Figura 9. Mapa de pendientes, se muestra en azul las zonas con pendiente menor a diez grados, las cuales quedan fuera del análisis

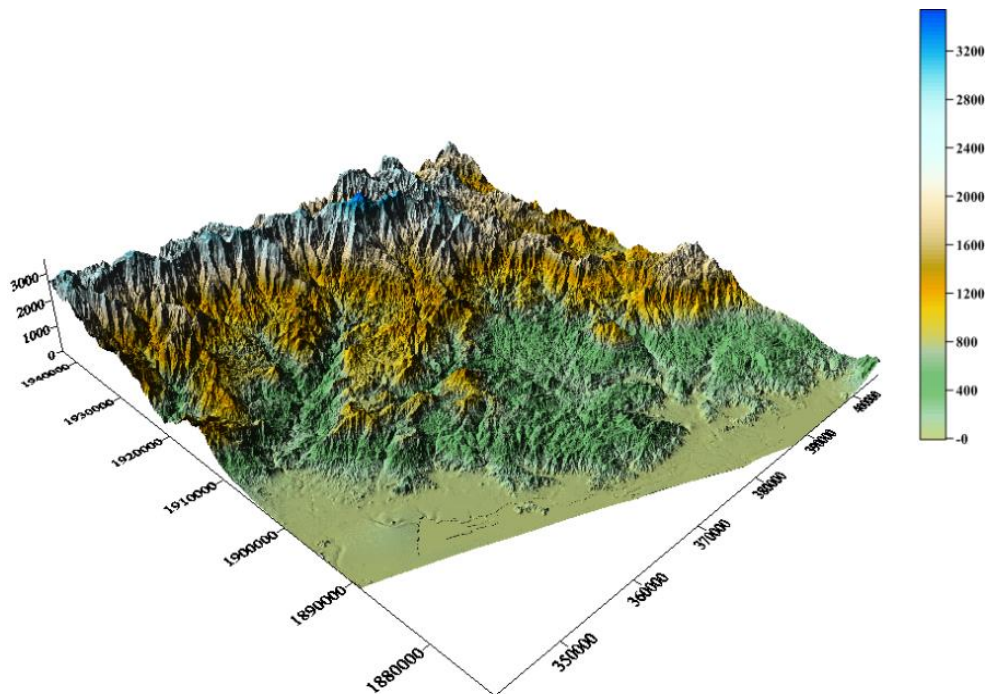


Figura 10. Representación 3D del relieve de la zona que abarca la imagen número dos, en esta área ocurrió el deslizamiento la Pintada. Notese que el relieve es muy irregular y con cambios muy bruscos en sus pendientes

2.6 Eliminación de materiales asentados

Es importante, mencionar que otros elementos del paisaje pueden ser identificados, como deslizamientos, según los criterios utilizados. Un caso es la cantidad de material asentado, provocando pérdida de vegetación en los caminos o viejos cauces. La figura 11 presenta un claro ejemplo de ello, al ocurrir el deslizamiento grandes cantidades de material se asientan, en partes más bajas y planas. A través de imágenes con distinta temporalidad se puede apreciar el cambio del paisaje después de evento.

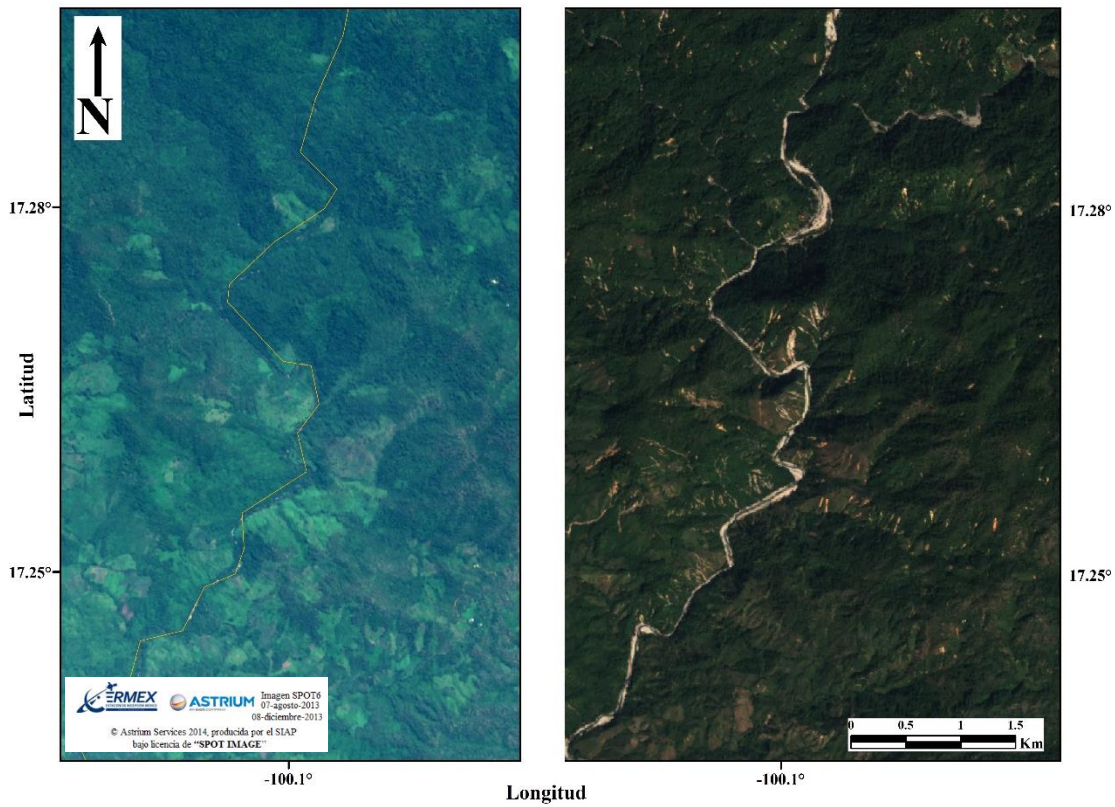


Figura 11. Comparación entre la imagen del mes de agosto (izquierda) e imagen del mes de diciembre (derecha) a ocho kilómetros al norte de la comunidad Tepetitla, Gro.

Estas áreas responden a los criterios antes evaluados, pendiente elevada, color y cambio significativo de brillo en pixeles adyacentes (existencia de bordes) sin embargo, no se deben conservar. Si bien la reaparición del cauce se debe a un proceso de remoción de masa, solo representa el material desplazado siguiendo un patrón, como es el cauce, por lo que estos, no son considerados. El procedimiento para eliminar estas zonas consiste en generar corrientes principales a partir del DEM, según la clasificación de Strahler, una vez obtenidas, se eliminan las áreas coincidentes.

2.7 Eliminación de ruido

Consiste en eliminar residuos, los cuales no pudieron ser desechados en los procesos anteriores, por ejemplo, polígonos en; carreteras o zonas urbanas, entre otros. Todos estos de fácil interpretación visual.

De los polígonos resultantes, se descartaron los de menor área, esto para eliminar y evitar zonas que solamente perdieron una porción de vegetación, con esto se pretende tener mayor certeza de identificar deslizamientos.

Capítulo 3

Aplicación

La metodología antes descrita, sirvió para identificar los deslizamientos provocados por el huracán Manuel en el estado de Guerrero.

3.1 Fenómeno hidrometeorológico Manuel

La depresión tropical 13-E se intensifica a tormenta tropical y se le da el nombre de “Manuel” el 13 de septiembre del 2013 (comunicado de prensa CONAGUA, 2013).

Manuel comienza con una peligrosidad moderada, las zonas de alerta se ubicaban desde Acapulco, Gro. hasta Punta San Telmo, Mich. Para el día 15 de septiembre se presenta con vientos máximos de 110 km/h y rachas de 140 km/h al sureste del municipio de Aquila Mich. y a 60 km al sureste de Cuyutlán, Col. manteniendo lluvias de muy fuertes a torrenciales. En la madrugada del día 18, Manuel llegó a la zona costera de Mazatlán, provocando inundaciones en más de 25 colonias, donde fueron evacuadas alrededor de 50 familias; así como el desgajamiento de un cerro en el kilómetro 40 de la Maxipista Mazatlán. En la noche de este mismo día, Manuel se intensifica a huracán categoría uno en la escala Saffir-Simpson, mantiene lluvias muy intensas en el centro-occidente del país y olas de hasta 4m de altura en la costa centro y norte de Sinaloa.

Los valores de lluvia previstos (boletines meteorológicos CENAPRED, 2013) fueron de 250 mm y de 375 mm en la zona montañosa de Sinaloa, de 150 mm en Nayarit y el sur de la península de Baja California y de hasta 70 mm en el sur de Sonora, Chihuahua y Durango. Aproximadamente a las 13:00 hrs del día 19 se degradó a tormenta tropical con trayectoria noreste de Altata, Sin., con vientos máximos de 100km/h, con una fuerte nubosidad en un radio de 100 km. Para la noche, Manuel entra en etapa de disipación a 235 km al este de los Mochis, Sin. con vientos máximos de 45km/h y rachas de 65 km/h

Los daños que dejó Manuel, según la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros (AMIA) ascienden a los 75 mil millones de pesos (revista el Proceso, 2013). La última reunión de evaluación del Gobierno Federal informa que los estados dañados son: Aguascalientes, Campeche, Coahuila, Colima, Chiapas, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Veracruz y Zacatecas (canal de noticias CNN, 2013).

Son 157 muertes registradas, de las cuales, 101 ocurrieron en Guerrero, 14 en Veracruz, 10 en Oaxaca y el resto de los estados. 70% de quienes perdieron la vida fue en zonas de deslave y derrumbe en comunidades lejanas de las cabeceras municipales (canal de noticias CNN, 2013).

3.2 Descripción de la zona de estudio

El Centro Nacional de Prevención de Desastres, proporcionó una base de datos, la cual especifica los deslizamientos provocados por algunos fenómenos naturales como las tormentas Dora, Arlene y los huracanes Karl y Manuel, entre otros, a nivel Nacional. El 70% de estos registros corresponden al evento Manuel. Con un total de 153 deslizamientos registrados en la República Mexicana, 119 ocurren en el estado de Guerrero, seguido por los estados de Querétaro e Hidalgo, con siete y seis reportes respectivamente.

Ante estas cifras, se eligió a Guerrero como la zona de estudio para este trabajo. También es conocido que en esta zona ocurren una gran cantidad de sismos, que al igual que los fenómenos hidrometeorológicos, causan deslizamientos; por lo tanto, este estado ofrece una monumental cantidad de información de interés.

En la figura 12 se presenta la zona de estudio que abarca un área de 32,400 km², dividida en 9 imágenes SPOT 6, con una dimensión de 60×60 km cada una.

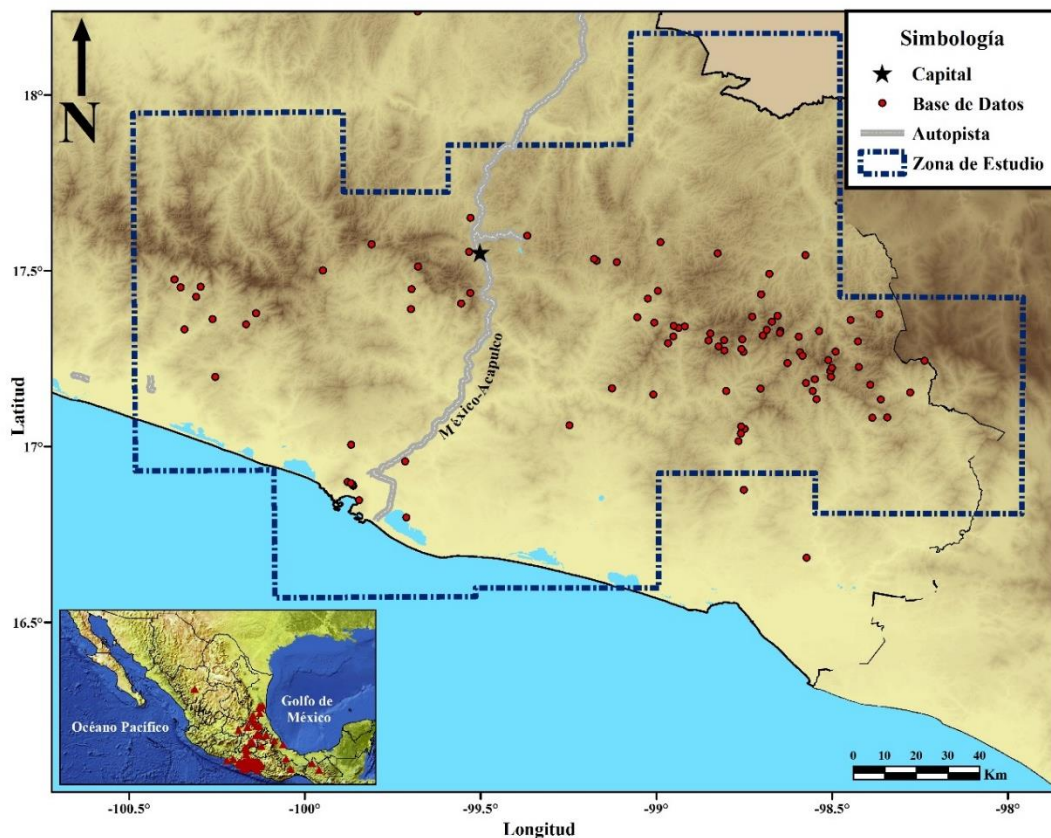


Figura 12. Zona de estudio para la identificación de deslizamientos en el estado de Guerrero

En la parte inferior izquierda del mapa (figura 12), se observa la República Mexicana asociada con los deslizamientos recopilados por el CENAPRED, lo cual puede dar una clara visión del por qué enfocar este estudio en el estado de Guerrero. El conjunto de imágenes seleccionadas, trata de abarcar todos los registros presentados por la dependencia de prevención de desastres, tal como se mostró en la figura 12.

3.3 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos son archivos vectoriales, en forma de polígonos que delimitan los deslizamientos ocurridos en septiembre de 2013 debido al fenómeno hidrometeorológico Manuel. Se presentan algunos ejemplos en la figura 13.

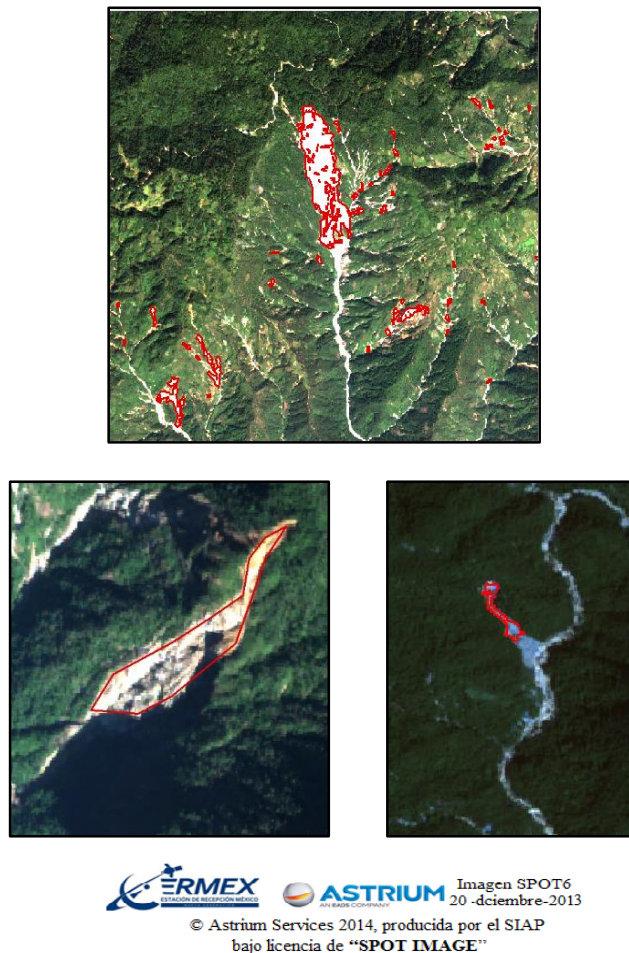


Figura 13. Deslizamiento a once km aprox. de la localidad Yextla en el municipio de Leonardo Bravo (centro superior), deslizamiento en el límite de Atoyac de Álvarez y San Miguel Totolapan (izquierda), deslizamiento a cinco km de la localidad el Paraiso, Atoyac de Álvarez (derecha)

A través de la metodología se identificaron un total de 1548 deslizamientos dispersos en toda la zona. De cada uno se conocen sus coordenadas (x, y) y su superficie en metros. En la figura 14 se muestra su distribución.

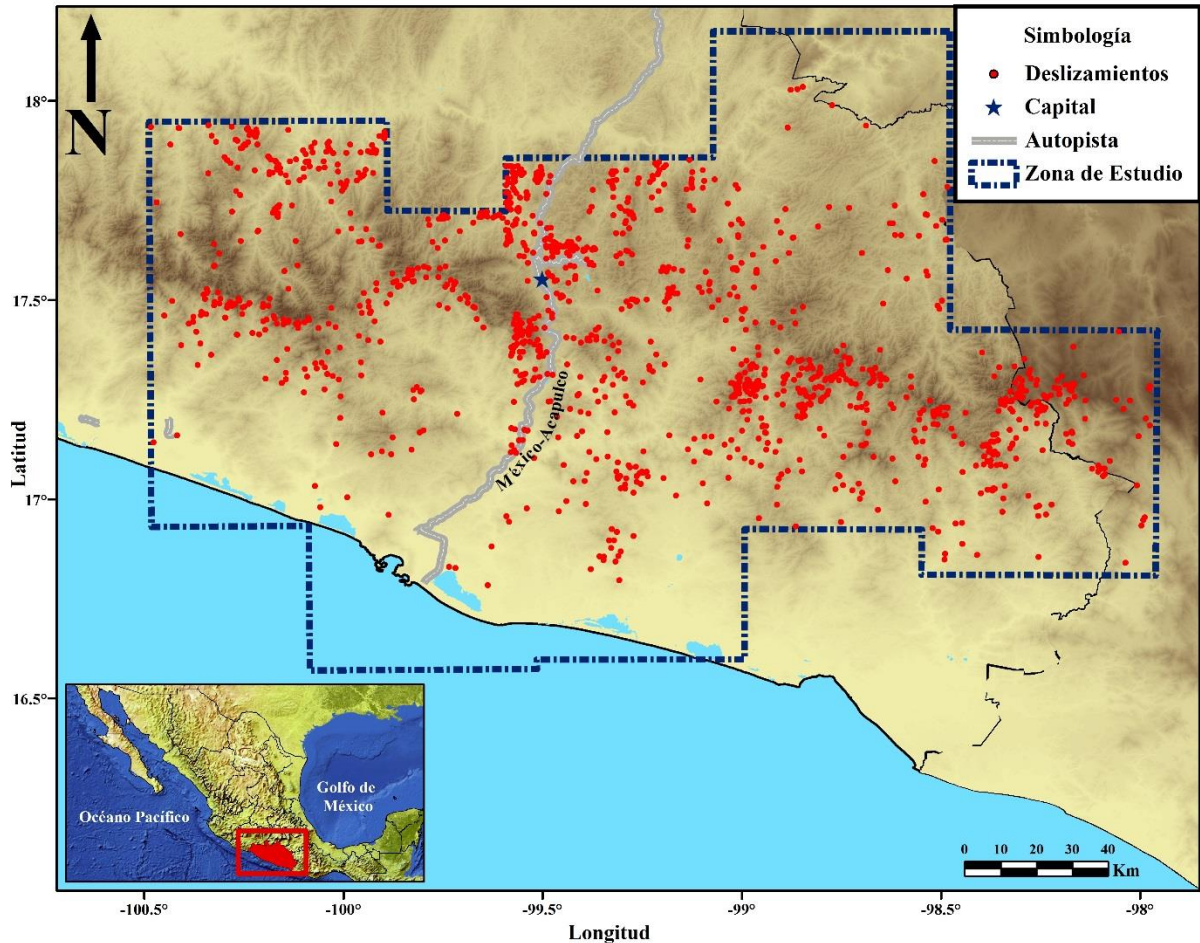


Figura 14. Deslizamientos identificados con técnicas de percepción remota

3.4 Comparación cualitativa entre resultados obtenidos y métodos de estimación

A continuación, se comparan los resultados obtenidos, con tres métodos, dos de carácter cualitativo y uno cuantitativo, los cuales identifican aquellas áreas que son susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos, los métodos son: el método analítico jerárquico, método Mora-Vahrson (1994) y el análisis de Montgomery *et al.* (1998) para deslizamientos inducidos por lluvia. Si bien existen métodos más confiables, los tres métodos mencionados anteriormente son los que presentan mejores resultados en estudios a gran escala.

El primer método, analítico jerárquico, es el más sencillo, rápido y conocido en el mundo, el análisis propuesto por Mora-Vahrson (1994), hoy en día es el más usado en América Latina. El análisis de

Montgomery *et al.* (1998) es el más complejo por ser un método cuantitativo y aunque no es tan conocido y usado como los anteriores, presenta mejores resultados.

Cabe resaltar que ninguno de los tres análisis utiliza como insumo imágenes satelitales, esto significa que los resultados obtenidos son totalmente independientes y su comparación mostrará la eficacia o deficiencia de estos métodos. Los mismos Mora- Vahrson, exponen que el trabajo de campo, análisis con fotografías aéreas o imágenes satelitales, puede ayudar de manera significativa a mejorar el estudio.

Los tres métodos fueron empleados para analizar las zonas susceptibles a deslizamientos del estado de Guerrero, éstos fueron realizados por el grupo de trabajo de la Coordinación de Ingeniería Sismología del Instituto de Ingeniería, UNAM, los resultados se facilitaron para este análisis.

Enseguida se describe de manera concisa cada método; también se muestra la cartografía de comparación con la metodología propuesta en este trabajo.

3.4.1 Método analítico jerárquico

El proceso analítico de jerarquía, consiste en construir una jerarquía de elementos de decisión (factores como la topografía, condiciones litológicas, humedad del suelo, intensidad sísmica, lluvia) para posteriormente, hacer comparaciones entre pares posibles en una matriz y dar un peso a cada elemento y también una relación de coherencia.

Para evaluar la susceptibilidad en la zona de Guerrero se utilizaron cuatro criterios generales: geología, pendiente, precipitación e hidrografía; y se jerarquizaron en tres niveles: igual, moderada y absoluta importancia, véase en tabla 3.

Tabla 3. Descripción de los pesos asignados a los elementos de decisión

Nivel de importancia	Definición
1	Igual preferencia
2	Moderada preferencia
3	Absoluta preferencia

En el rubro de geología se consideraron catorce tipos de roca, por ejemplo, las areniscas, lutita, acidas, volcanoclástica, conglomerado, esquisto, caliza, meta-sedimentaria, arenisca-conglomerado, etc. A las tres primeras mencionadas, se les otorgó mayor peso sobre las otras, ya que su composición y propiedades facilitan la ocurrencia de un deslizamiento.

En la hidrografía, la jerarquía se asignó según el orden de corrientes en los cuerpos de agua, en este caso el orden más alto de corrientes fue de seis, a cada corriente se le aplicó un *buffer* a 20m, 50m, y

100m. También se consideró el promedio de precipitación registrado en cada mes, estos se clasificaron en cuatro: 0, 75, 125, 250 mm/mes, siendo los últimos dos los de mayor peso. En el rubro de pendientes se clasificaron zonas desde cero grados hasta más de 70° de inclinación, dejando con un mínimo peso las pendientes por debajo de los cinco grados.

La construcción de la matriz de jerarquía analítica se presenta en la tabla 4:

Tabla 4. Matriz de jerarquía analítica para identificar zonas susceptibles a deslizamientos en Guerrero

Matriz General						
Crterios	Geología	Pendientes	Precipitaciones	Hidrografía	Suma	Factor
Geología	1	0.33	2	2	1.33	0.25
Pendientes	3	1	3	3	2.5	0.46
Precipitaciones	0.5	0.33	1	2	0.96	0.18
Hidrografía	0.5	0.33	0.5	1	0.59	0.11
Suma	-	-	-	-	5.37	1

La cartografía resultante y los deslizamientos identificados se muestran en la figura 15. Obsérvese las similitudes y diferencias entre ambos resultados.

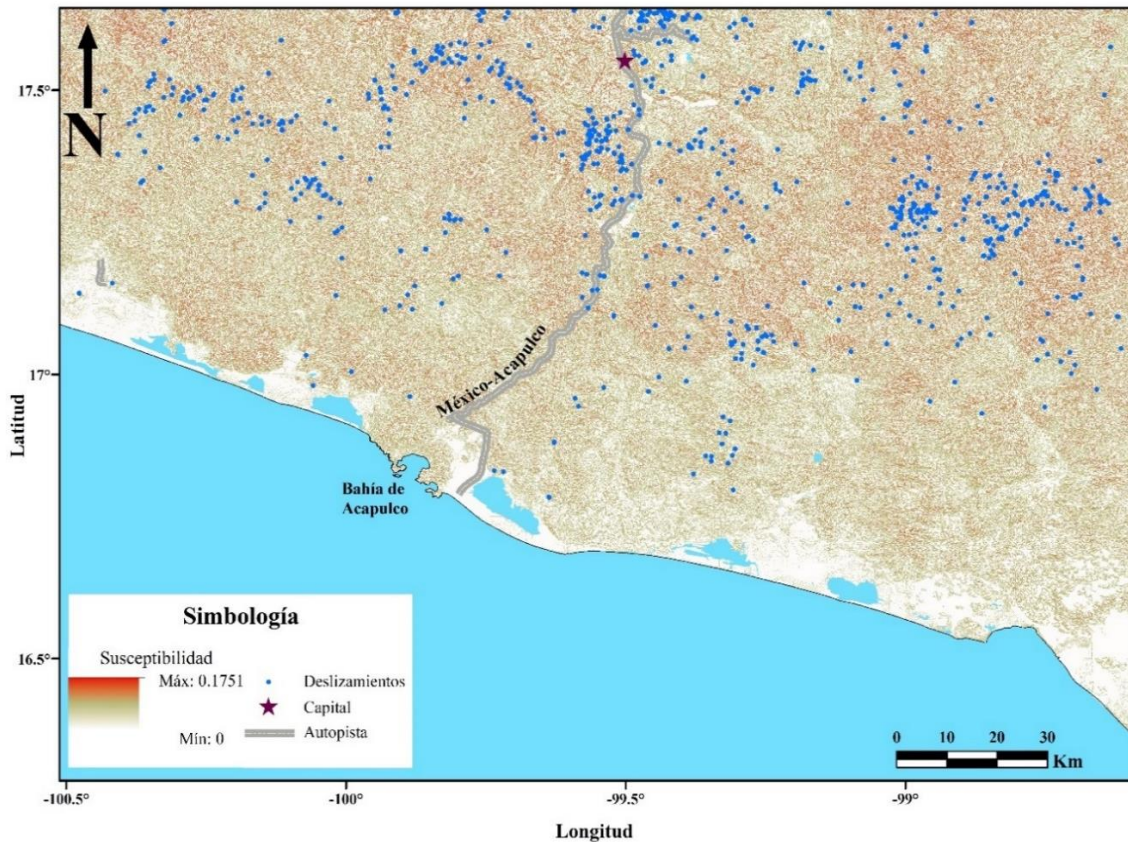


Figura 15. Se presentan las zonas más propensas a sufrir deslizamientos, según el método analítico jerárquico (color rojo) y los deslizamientos ocurridos detectados en este trabajo con técnicas de percepción remota (puntos azules)

3.4.2 Método Mora-Vahrson

Este método es especialmente adecuado para aplicaciones en áreas tropicales con importante actividad sísmica. Consiste en definir, en términos de factores de susceptibilidad, la ocurrencia de un deslizamiento de tierra (Mora y Vahrson, 1994).

Los factores que intervienen definen la susceptibilidad (SUSC) y el indicador desencadenante (TRIG). Los factores para calcular la SUSC son: (1) La litología (Sl), ésta se obtiene tomando en cuenta elementos como peso volumétrico, grado de meteorización, relación con la pendiente, drenajes y presión de poro, entre otros. (2) La humedad del suelo (Sh), ésta se calcula con base en el promedio mensual de la evapotranspiración potencial (PET) y elevación; por último, se obtiene (3) la pendiente (Sr).

El indicador TRIG representa las fuerzas externas, como desencadenantes de deslizamientos, combina dos factores: los eventos sísmicos presentados en cien años y la intensidad de lluvia (Mora y Vahrson, 1994). Se define con la siguiente expresión:

$$Hl = SUSC * TRIG \quad (2)$$

$$Hl = (Sr * Sl * Sh) * (Ts + Tp) \quad (3)$$

donde Hl , indica el peligro total por deslizamiento. El intervalo en el que varía, es de 0 a 1875 unidades. En el caso, que solo se involucre un factor detonante en el análisis, bastara con reacomodar la ecuación.

$$Hsl = Sr * Sl * Sh * Ts \quad (4)$$

$$Hpl = Sr * Sl * Sh * Tp \quad (5)$$

donde Hsl , representa el peligro derivado por actividad sísmica y Hpl el peligro por lluvia. Esto se debe tener presente, ya que el intervalo de peligro cambiará, según el evento detonante. Para el primero, el rango será de 0 a 1,250 y para el segundo, variara de 0 a 625 unidades. En la tabla 5, se muestra la clasificación del intervalo total.

Tabla 5. Clasificación de susceptibilidad de deslizamiento Mora-Vahrson

Valor Hl	Clasificación
<6	Despreciable
6-32	Bajo
33-162	Moderado
163-512	Medio
513-1250	Alto
>1250	Muy alto

En la figura 16, se muestra los resultados obtenidos al aplicar este método en el estado de Guerrero.

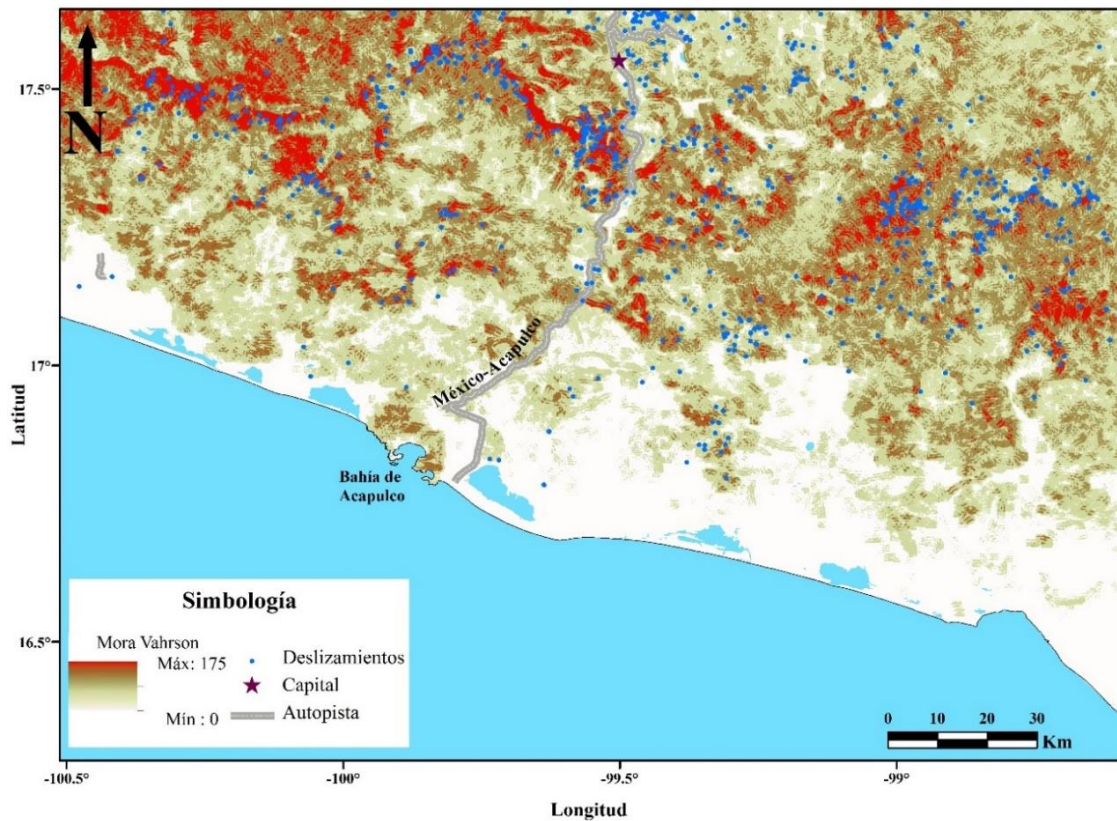


Figura 16. Zonas más propensas a sufrir deslizamientos, según el método Mora-Vahrson (color rojo) y deslizamientos ocurridos, detectados en este trabajo con técnicas de percepción remota (puntos azules)

3.4.3 Análisis de Montgomery para deslizamientos inducidos por lluvia

A grandes rasgos este método consiste en evaluar las condiciones del terreno bajo las cuales tenderá a moverse (Jaimes *et al.*, 2010), es decir, se basa en el acoplamiento de un modelo hidrológico con un modelo de estabilidad de taludes para calcular la precipitación crítica necesaria para desencadenar la inestabilidad de laderas en cualquier punto de un paisaje (Montgomery *et al.*, 1998). La precipitación crítica se calcula con la siguiente expresión:

$$Q_c = \frac{T \sin \theta}{(a/b)} \left[\frac{C'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right] \quad (6)$$

donde Q_c es la precipitación necesaria para desencadenar la inestabilidad de laderas, T es la transmisibilidad del suelo a lo largo de su espesor, a es el área tributaria pendiente arriba, b es el ancho del terreno que se desliza, C' es la cohesión del suelo, ρ_w es la densidad de agua, g es la aceleración gravitacional, z es el espesor del suelo, θ es la pendiente del terreno, ϕ el ángulo de

fricción y ρ_s indica la densidad del suelo. Las características geométricas se representan en la figura 17.

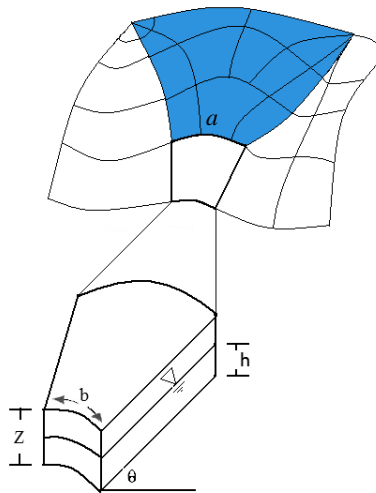


Figura 17. Ilustración de los parámetros utilizados en el análisis. (Tomado de Jaimes et al., 2010)

En la figura 18, se muestra los resultados obtenidos.

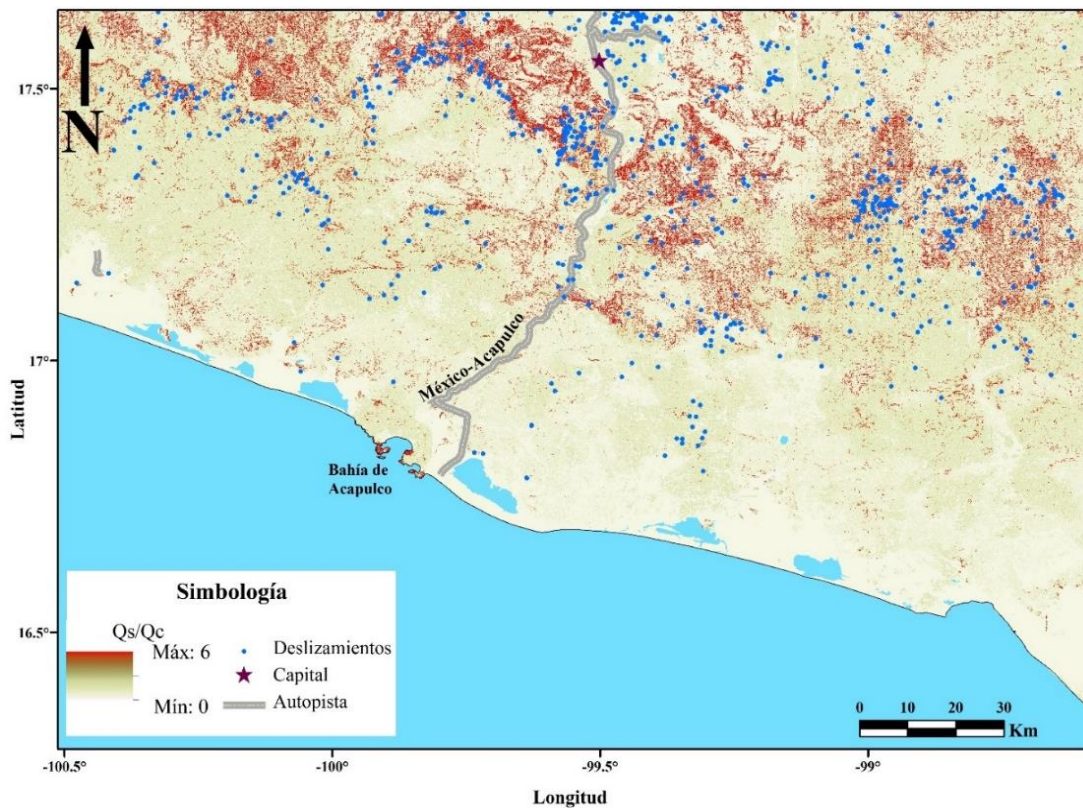


Figura 18. Se muestran las zonas más propensas a sufrir deslizamientos, según el método Montgomery (color rojo) y se representan los deslizamientos detectados en este trabajo con técnicas de percepción remota (puntos azules)

3.5 Comparación cuantitativa entre los resultados obtenidos y métodos de estimación

Si bien la cartografía antes presentada en las figuras 15, 16 y 18 permite visualmente valorar la coincidencia, entre cada método y los deslizamientos identificados, es necesario cuantificar el grado de coexistencia entre estos.

Para ello se sobrepusieron más de 1,500 polígonos, que representan los PRM de septiembre 2013 en cada una de las mallas de los tres métodos de estimación. Posteriormente, se extrajeron las áreas coincidentes para conocer el valor de cada pixel. De este análisis se obtuvo un total aproximado de 20,000 valores por cada metodología. A continuación se muestra los resultados.

3.5.1 Método Jerárquico Analítico

Debe recordarse que el intervalo de susceptibilidad de este método varía entre 0 y 0.1751, véase en la figura 15, conforme aumentan los valores, aumenta la probabilidad de la ocurrencia de un deslizamiento. En la tabla 6, se presenta el intervalo segmentado cada 0.02 unidades, así como la frecuencia y el porcentaje de la frecuencia acumulada.

Tabla 6. Relación de los valores de susceptibilidad del método jerárquico analítico y su frecuencia

Rango	Frecuencia	% acumulado
0	106	0.60%
0.02	2412	14.18%
0.04	2079	25.89%
0.06	2156	38.04%
0.08	2133	50.05%
0.1	2738	65.47%
0.12	3380	84.51%
0.14	2515	98.68%
0.16	233	99.99%
0.18	2	100.00%

En teoría, los PRM identificados deberían caer en zonas de alta susceptibilidad para cada método. En el caso de AHP, en los menores rangos, que van de 0 a 0.04 unidades, tienen una frecuencia de 4,597 es decir, más del 25% de la zona fue erróneamente clasificada como segura. En los siguientes intervalos, se muestra una tendencia casi constante, incrementa en el séptimo rango y vuelve a decrecer, como se aprecia en la figura 19. Si se compara la cartografía de la figura 15 y el histograma de la figura 19, se puede apreciar cierta uniformidad en ambos. En la primera, no se logra distinguir zonas coincidentes, con susceptibilidad pronunciada. En el histograma, se observa que predomina la identificación de áreas de baja susceptibilidad.

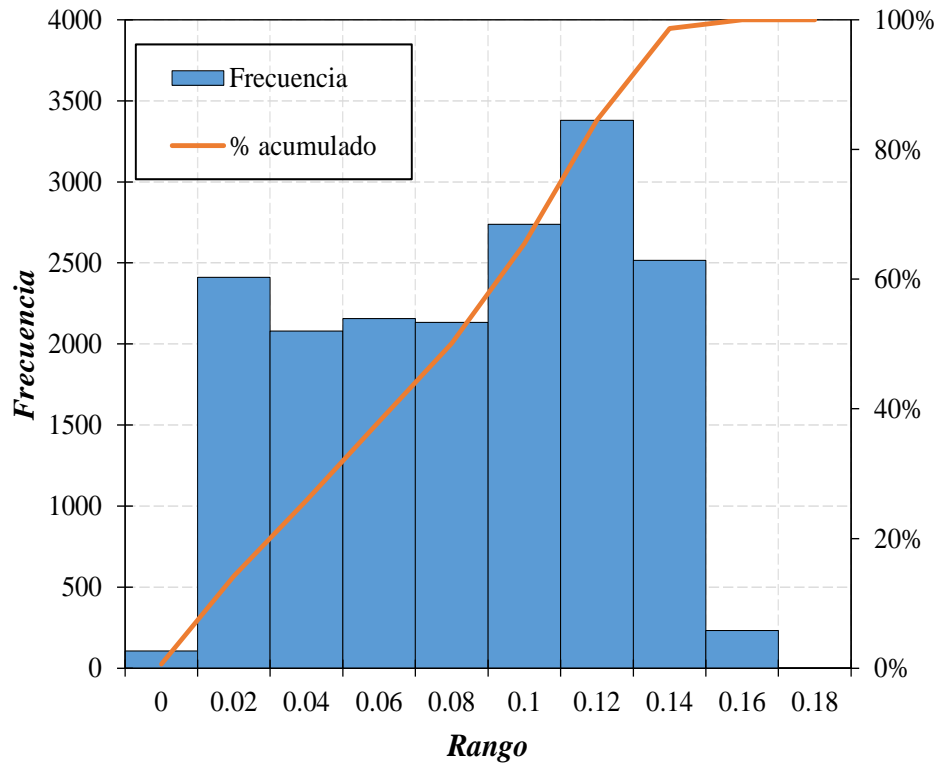


Figura 19. Histograma y curva de la frecuencia acumulada, respecto a los valores de las celdas extraídas del método por jerarquías analíticas

3.5.2 Método Mora-Vahrson

Se reconoció 0.84% de áreas con despreciable peligro, véase en la tabla 7. Aproximadamente un 18% marca bajo peligro y se muestra un pico máximo de valores en el cuarto rango, esto representa un nivel moderado de peligro. Cabe resaltar que ninguna celda con un valor mayor de 122.89 unidades fue identificada, siendo que el límite del intervalo reconocido en toda el área de estudio fue de 175, y en general el máximo valor, de este método, es de 625. Esta información se representa en la figura 20.

Tabla 7. Relación de los valores de susceptibilidad del método Mora-Vahrson y su frecuencia

Clase	Frecuencia	% acumulado
6	167	0.84%
32	3608	19.06%
162	16034	100.00%
512	0	100.00%
625	0	100.00%

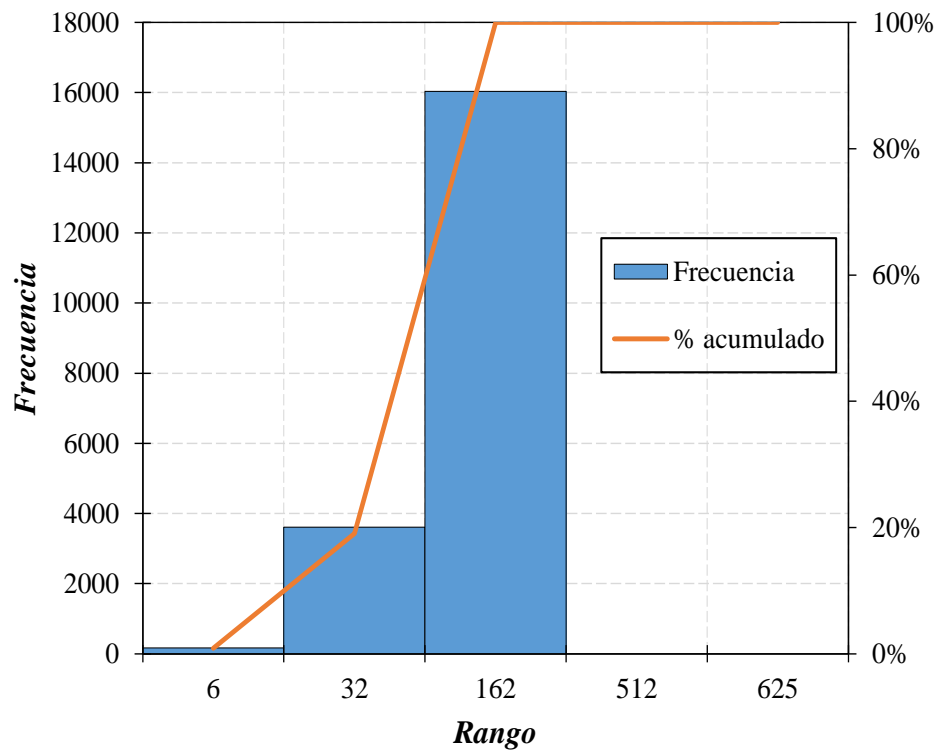


Figura 20. Histograma y curva de la frecuencia acumulada, según los valores de las celdas extraídas del método Mora Vahrson

3.5.3 Análisis de Montgomery para deslizamientos inducidos por lluvia

El intervalo en el que trabaja este método, tiene como mínimo cero y máximo seis unidades. Valores a partir de 0.9 hasta 3 representan ya, una probabilidad importante de deslizamiento, véase las relaciones en la tabla 8 y una mejor representación de los datos en la figura 21.

Tabla 8. Relación de los valores de susceptibilidad del análisis de Montgomery y su frecuencia

Clase	Frecuencia	% acumulado
0.1	105	0.59%
0.2	163	1.51%
0.3	258	2.96%
0.4	630	6.51%
0.5	802	11.03%
0.6	979	16.54%
0.7	1229	23.47%
0.8	1284	30.70%
0.9	986	36.25%
3	7550	78.78%
6	3768	100.00%

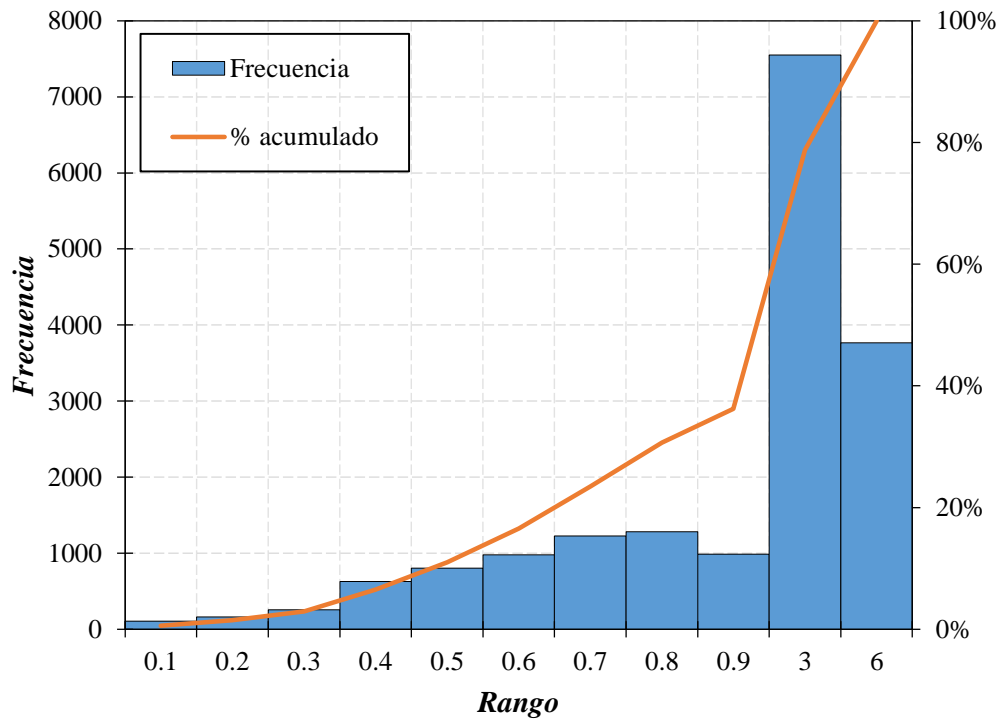


Figura 21. Histograma y curva de la frecuencia acumulada, según los valores de las celdas extraídas del analisis Montgomery

Capítulo 4

Discusión

4.1 Dificultades en la elaboración de la metodología

1. La principal dificultad es la presencia de nubes; en primera instancia, esta condición impide obtener cualquier información de la zona y en segundo, al aplicar la metodología las nubes provocan ruido y confusión en los resultados. Obtener una imagen libre de nubes es complicado, por lo tanto, es probable que se tenga que trabajar con imágenes que presenten estos elementos, un porcentaje de nubosidad menor de 15% es apropiado.
2. Otro inconveniente sería obtener imágenes con temporalidades muy lejanas del evento, tanto previas o posteriores, estas podrían mostrar cambios en el paisaje ajenos al evento, los cuales podrían causar desconcierto. Esto se puede atribuir a desfavorables condiciones meteorológicas, de lo contrario, se puede asegurar la toma de la imagen en condiciones óptimas, por ejemplo, el satélite SPOT 6, cuenta con una resolución espacial de 26 días. Por el tipo de órbita que utiliza (casi polar, circular y heliosincrónica) es posible hacer estudios comparativos con distintas temporalidades, considerando aspectos atmosféricos, temporales y geométricos similares, por ejemplo, la Bahía de Acapulco siempre es tomada en una imagen a las 5:40±1, hora local (*Imaginary User Guide SPOT6 & SPOT7*, 2012)
3. La metodología no es infalible, puede identificar otros rasgos que no correspondan a deslizamientos u omitir deslizamientos, es por ello que el paso número siete “post-proceso” es importante, ya que la interpretación visual ayudará a corregir esos errores.

4.2 Recomendaciones

Se presentan las siguientes recomendaciones:

- Procurar no utilizar imágenes con elevado porcentaje de nubosidad.
- Realizar la corrección geométrica de forma manual para lograr una mayor precisión de localización (ortorectificación).
- En caso de armar mosaicos, no elegir una imagen con alta nubosidad como histograma base del mosaico.
- Un mosaico muy grande puede ser difícil de trabajar, según las condiciones de cómputo con las que se cuenten, se recomienda no hacer mosaicos muy extensos.

- Obtener un resultado exitoso dependerá en gran parte de la segmentación por color, por lo tanto, entre mayor sea la información de los valores de reflectancia correspondiente a un deslizamiento, se podrá definir un umbral más adecuado y preciso, esto disminuirá considerablemente errores indeseables.
- Para la segmentación de color de la imagen con temporalidad previa al evento se debe homogenizar el histograma respecto a su imagen correspondiente a la temporalidad posterior.
- Por otra parte, en el paso seis, se deberá ser cuidadoso de solo eliminar el material asentado en cauces y no sobrepasar a zonas de deslizamiento, es por ello que solo las corrientes principales (de mayor orden) deben tomarse en cuenta en este análisis.

4.3 Discusión de la comparación entre métodos de estimación y resultados obtenidos

Es importante resaltar, que no existe un método perfecto a gran escala para la estimación de zonas susceptibles de deslizamiento, principalmente por dos razones, que se deben tener muy presentes.

La primera es el error mismo del método y la segunda, la falta de información detallada y precisa. Al intentar obtener las características, geológicas, geotécnicas, hidrológicas, topográficas, climáticas, etc. de la región, prevalece la necesidad de estimar dicha información, a partir de datos interpolados, ajustados o deducidos. Por ejemplo, sería muy difícil y costoso conocer la estabilidad de cada talud, la presión del poro o la humedad del suelo a cada veinte o cincuenta metros.

Se asume que los resultados obtenidos a través de imágenes satelitales son correctos, y por ello se hizo la comparación en el capítulo tres. Basado en el análisis anterior, se puede apreciar que ningún método fue satisfactorio al 100%, pero si hay una mayor compatibilidad con los resultados de algunos.

Para el caso de AHP, anteriormente se había comentado, que el método presenta cierta subjetividad en sus resultados. De los métodos evaluados, AHP, fue el más ambiguo. En la cartografía, no fue posible distinguir notables áreas compatibles con los deslizamientos identificados. Y esto, se refleja en la cuantificación de los pixeles extraídos representados en el histograma, figura 15. Valores de insignificante a muy alta susceptibilidad, se reconocieron casi en igual proporción. Si la cartografía del AHP, fuera tomada como buena y se presentará a la población, esta podría interpretar que el peligro por deslizamiento es muy bajo y no es necesario preocuparse o tomar medidas preventivas, según los resultados obtenidos en este trabajo y la catástrofe registrada por diferentes medios, pasado Manuel, se sabe que los resultados obtenidos por medio de AHP, no son cercanos a la realidad.

Bien, se puede discutir que los pesos utilizados no fueron los adecuados o era necesario emplear más o menos criterios, y es posible, ya que, al cambiar pesos y/o criterios puede que se modifiquen radicalmente los resultados. Esto provoca una gran ambigüedad, por lo que, no se recomienda utilizar

este método, solo en el caso que se necesite obtener cartografía rápida y sencilla. No para representar el peligro, ni basar en ello la toma de decisiones.

A diferencia de AHP, el segundo método analizado: Mora-Varshon (1994), muestra bastante coincidencia con los puntos identificados, a simple vista, es muy notable la diferencia de los resultados presentados en la cartografía, del primer y segundo método.

El porcentaje de celdas que presentaron bajo peligro, fue mínimo. Lo que a primera vista resulta muy satisfactorio, el inconveniente que se encontró, fue que los valores recolectados, representan la clase de peligro moderado, siendo que debería acercarse a peligro alto o muy alto. En consecuencia, estos datos minimizan la dimensión del posible peligro al que pueda estar expuesta la región, dando un mensaje erróneo a la población.

El análisis de Montgomery *et al.* (1998) fue el único del que se extrajeron zonas con el valor máximo, en este caso seis, representando alta probabilidad de deslizamiento. Como ya se había mencionado, zonas identificadas desde el intervalo de 0.9 a 3, ya representan las zonas con una considerable inestabilidad de laderas.

Conclusiones

Como se observó en este trabajo de tesis, fue posible identificar en su mayoría los deslizamientos desencadenados por el fenómeno hidrometeorológico Manuel. Principalmente, aquellas zonas afectadas alejadas de comunidades, donde ocurrieron algunos de los deslizamientos más grandes, de las cuales no existía registro.

Es conocido que Manuel provocó grandes daños al estado de Guerrero, pero la cantidad de PRM identificados confirma y supera la idea que se tenía de la destrucción causada. Si se compara el mapa de la figura 12, en donde se muestra los PRM registrados por CENAPRED y los reconocidos en la figura 14, resultados de esta tesis, se puede apreciar una gran diferencia. Del primero, la base de datos cuenta con un total de 119 deslizamientos, en cambio, en el segundo se presenta 1548. Las cifras son totalmente contrastantes.

Estos datos sustentan la idoneidad y la efectividad del uso de imágenes satelitales como principal insumo para el reconocimiento de cambios en el paisaje provocados por un evento natural, por mencionar alguna de sus aplicaciones.

Sin duda, esta metodología puede utilizarse para cualquier zona y evento, hidrometeorológico o sísmico, a futuro, teniendo en cuenta las debilidades y recomendaciones citadas en el capítulo 4. Aunque se observó mejores resultados en zonas con vegetación vigorosa, para las zonas con características diferentes, es decir, pobladas o con limitada vegetación, es igualmente factible obtener resultados satisfactorios, solo se deberá tener mayor cuidado y precisión en los procesos. Cabe mencionar que aun con las debilidades mencionadas, la metodología proporciona resultados buenos, ya que el ruido que pudiera producir es mínimo en comparación de las áreas correctamente clasificadas. Es por ello que se propone hacer uso de ésta y se considera una excelente opción para conocer la cantidad y ubicación de deslizamientos ocurridos por una amenaza natural.

Como ya se mencionó, este estudio se realizó con imágenes de resolución igual a seis metros provenientes del satélite francés SPOT 6, sin embargo, puede realizarse con otro sensor, que entre sus características, cuente con las bandas del visible y el infrarrojo cercano, con una resolución espacial de preferencia menor a diez metros o en su defecto no supere los quince metros.

Por otra parte, los resultados de las comparaciones entre los deslizamientos identificados y los tres métodos: AHP, Mora-Varhson (1994) y el análisis propuesto por Montgomery *et al.* (1998), muestra las ventajas y desventajas que puede tener cada uno. Particularmente, en este trabajo, contemplando que el principal objetivo de este tipo de estudios es estimar y/o deducir las zonas susceptibles a un deslizamiento según las características del terreno, se considera que el tercer método expuesto (Montgomery *et al.* 1998) cumple con ello, por esto, se recomienda el uso de éste sobre los demás

descritos. Si bien, su proceso es más complicado y tardado, se demostró que las zonas que detecto como inestables, coinciden con la realidad presentada.

Sirva esta metodología, en primera, para crear una base de datos actualizada y completa que contenga la ubicación geoespacial de cada PRM, que ayude a tener un control y conocimiento sobre las zonas afectadas. También para establecer un antecedente de la inestabilidad que presenta el terreno, con el fin que se tome las medidas y precauciones necesarias, en caso de que se planee realizar a futuro obras de infraestructura de carácter civil.

Es segunda, para que las diferentes instituciones e investigadores, que pretendan estimar las zonas potenciales de deslizamiento a gran escala, consideren utilizar el análisis de Montgomery *et al.* 1998, dejando asentado la superioridad de sus resultados en comparación de otros. O en su defecto se pueda calibrar y mejorar dichos métodos, o buscar algún otro que los supere.

Referencias

Bibliográficas

Aldalur, B. y Santamaría, M. (2002), **“Realce de imágenes filtrado espacial”**, Revista de teledetección, pp. 32-34.

Chacón, J., Irigaray, C., Fernández del Castillo, T., y El Hamdouni, R. (2002), **“Susceptibilidad a los movimientos de ladera del sector central de la cordillera bética”**, Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España, Instituto Geológico y Minero de España, pp.83-96.

Chuvieco, E. (2002), **“Teledetección Ambiental”**, Ariel Ciencia.

Fernández, T., Jiménez, J., Pérez, J.L., Delgado, J., Cardenal, F.J., Irigaray, C. y Chacón, J. (2010), **“ Identificación de movimientos de ladera mediante técnicas de teledetección”**, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.

Gómez, M. y Barredo, J. (2004), **“Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio”**, Ra Ma, pp. 43-46

Hervas, J. y Rosin, P. (2001), **“Tratamiento digital de imágenes de teledetección en el espectro óptico para el reconocimiento y control de deslizamientos”**, Institute for the Protection and Security of the Citizen, Directorate General Joint Research Centre, European Commission

Hervás, J., Barredo, J., Lomoschitz, A. (2002), **“Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante SIG, Teledetección y Métodos de evaluación multicriterio. Aplicación a la depresión de Tirajana (Gran Canaria)”**, Instituto Geológico y Minero de España.

Jaimés, A., Niño, M., Reinoso, E., Carlos, R. (2010) **“Base de datos de deslizamientos inducidos por sismo y lluvia en México para calibrar un modelo de análisis de talud infinito”**, XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Geotécnia.

Jaimés, A., Niño, M., Reinoso, E., en prep. (2014), **“Hurricane-event-based methodology to obtain steady rainfall-induced translational landslide regional hazard maps”**, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Jensen, J. (1983), **“Biophysical Remote Sensing”**, Department of Geography, University of South Carolina, pp.16-19.

Jibson, R.W., Harp, E. L. y Michael, J.A. (2000), **“A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps”**, Engineering Geology, Vol. 58, pp. 271-289

Lillesand, T. y Kiefer, R. (1987), **“Remote Sensing and Image Interpretation”** 2ed. Wiley, New York

Martínez, A., Gallud, J. y Abad, F. (1998), **“Distorsiones en la adquisición de imágenes de teledetección y su corrección”**, Instituto de desarrollo regional de la Universidad de Castilla-La Mancha, pp. 353.

Montgomery, D., Sullivan, K., Greenberg, H., (1998), **“Regional test of a model for shallow landsliding”**, Hidrological Processes.

Mora, S., Vahrson, W. (1994), **“Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination”**, bulletin of the Association of Engineering Geologist Vol. XXX1, No. 1, pp. 49-58.

Newmark, N., (1965), **“Effects of earthquakes on dams and embankments”**, Geotechnique, Vol. 15, pp. 137-160.

Niño, M., Jaimes, M. y Reinoso, E. (2014), **“Seismic-event-based methodology to obtaine earthquake-induced translational landslide regional hazard maps”**, Instituto de Ingeniería UNAM.

Recondo, C., Menéndez, C., Garcia, P., González, R. y Sáez, E. (2000), **“Estudio de las zonas propensas a sufrir deslizamientos en los Concejos de Oviedo y Mieres (Asturias) a partir de una imagen Landsat TM y de un Modelo Digital de Elevaciones”**, Revista de Teledetección.

Roa, J. (2006), **“Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: Cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela”**, Universidad de Los Andes, Área de Geografía, Grupo GEOCIENCIA.

Sierra, C., (2009), **“Estudio para la determinación de la susceptibilidad por deslizamientos en la sub-cuenca baja de la quebrada perdices (Guayabetal, Cund.) a partir de DEM y de imágenes satelitales Landsat”**, Tesis de especialización en Geomática.

Páginas de internet

Descarga DEM INEGI disponible en <http://www.inegi.org.mx/>(consultada el 18 de abril de 2014)

Imaginary User Guide SPOT6 & SPOT7 disponible en <http://docs.astrium-geo.com> (consultada el 19 de mayo de 2014)

Ayuda de Arc Gis 10 disponible en <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html> (consultada el 19 de mayo de 2014)

Niveles de pre procesamiento y precisión de localización SPOT IMAGE disponible en http://www2.astriumgeo.com/files/pmedia/public/r2006_9_spot (consultada el 19 de junio)

Periódico el Universal disponible en <http://www.eluniversal.com.mx/nacion-mexico/2013/impreso/en-zona-de-riesgo-se-edificio-la-pintada-209720.html> (consultada el 03 de junio del 2014)

Periódico el Universal disponible en <http://www.eluniversal.com.mx/nacion-mexico/2013/impreso/la-pintada-esta-de-luto-ya-solo-buscan-cuerpos-209260.html> (consultada el 03 de junio del 2014)

Periódico Milenio disponible en http://www.milenio.com/politica/Encuentran-Pintada-reporta-Segob_0_159584124.html (consultada el 03 de junio del 2014)

Periódico Milenio disponible en http://www.milenio.com/estados/Pintada-meses-alud_5_214228584.html (consultada el 03 de junio del 2014)

Boletines meteorológicos disponible en http://geografica.cenapred.unam.mx/Boletin_Sig/Consultas/consulta (consultada el 07 de junio del 2014)

Comunicado de prensa Conagua disponible en <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/NotaP/Comunicado%20de%20Prensa%20No%2020642-13.pdf> (consultada el 07 de junio del 2014)

Canal de noticias CNN disponible en <http://mexico.cnn.com/nacional/2013/09/24/las-cifras-del-desastre-por-manuel-e-ingrid> (consultada el 07 de junio del 2014)

Revista el Proceso disponible <http://www.proceso.com.mx/?p=353935> (consultada el 07 de junio del 2014)