MAPA TEMPORAL DEL RIESGO DE DESLIZAMIENTOS MUNICIPIO DE ACHOCALLA, PROVINCIA MURILLO, DEPARTAMENTO DE LA PAZ

Aplicación combinada: Sistema de Información Geográfica (SIG) y Evaluación Espacial Multicriterio (EEM)

TEMPORARY MAP OF THE LANDSLIDE RISK (MUNICIPIO ACHOCALLA, PROVINCIA MURILLO, DEPARTAMENTO DE LA PAZ)
Combined aplication: Geografic Information System (GIS) and Multicriterial Spatial Evaluation (MSE)

Huber Augusto Mamani Gutiérrez*

RESUMEN

Se aplicó un procedimiento combinado de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y Evaluación Espacial Multicriterio (EEM), para la determinación de los niveles de riesgo a deslizamientos en el municipio de Achocalla, utilizando información disponible de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación e información geográfica espacial conseguida de instituciones estatales.

Representando la información a través de una escala de gravedad del riesgo de deslizamiento (mapa cromático), a partir de la evaluación de las amenazas y criterios de vulnerabilidad del lugar.

PALABRAS CLAVE: Sistemas de Información Geográfica, Evaluación Espacial Multicriterio, riesgo a deslizamientos.

ABSTRACT

A combined procedure of the Geographic Information Systems (GIS), and Multicriterial Spatial Evaluation (MSE), was applied to determine the risk levels of landslides in the municipio de Achocalla, using information available from satellite images, digital models of elevation and geographical spatial information obtained from state institutions.

Representing the information through a scale of severity of the risk of landslide (chromatic map), from the evaluation of the threats and criteria of vulnerability of the place.

KEYWORDS: Geographic Information Systems, Multicriterial Spatial Evaluation, risk of landslides.

RESUMO

Um procedimento combinado dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), e Avaliação Espacial Multicriterial (AEM), foi aplicado para determinar os níveis de risco de deslizamentos de terra no município de Achocalla, usando informações disponíveis a partir de imagens de satélite, modelos digitais de elevação e informação espacial geográfica obtida de instituições estatais.

Representando a informação através de uma escala de severidade do risco escorregamento (mapa cromático), a partir da avaliação das ameaças e critérios de vulnerabilidade do local.

PALAVRAS–CHAVE: Sistemas de Informação Geográfica, Avaliação Espacial Multicriterial, risco de deslizamentos.

History of the article: Received 10/11/2018. Style review 15/11/2018. Accepted 28/01/2019.

INTRODUCCIÓN

En Bolivia, se registra aproximadamente un 80 porciento en pérdidas materiales y cultivos por efecto de diferentes fenómenos naturales que actúan sobre zonas geográficas urbanas y rurales [1], provocando importantes grados de destrucción (desastres).

Entre los desastres por fenómenos naturales ocasionados por el movimiento de grandes masa de tierra, están los corrimientos de tierra o deslizamientos[1] causados por la inestabilidad de la zona circundante.

Según la Oficina de las Naciones Unidas Para Reducción del Riesgo de Desastres, (United Nations Office for Disaster Risk Reduction UNISDR), los desastres son el resultado de los descuidos y la escasa planificación frente a la eventualidad de los fenómenos naturales.

En consecuencia, los efectos de un desastre[2] pueden aumentar principalmente por un deficiente ordenamiento territorial de los asentamientos humanos con precariedad en medidas de seguridad, planes de emergencia y sistemas de alerta.

Por lo tanto una alternativa de solución o reducción de esta problemática, debería consistir en obtener una mayor información de estas zonas susceptibles a deslizamientos, recurriendo a Sistemas de Información Geográfica SIG, y la producción de mapas temporales de disponibilidad inmediata para los municipios y su inclusión en los planes de desarrollo municipal (PDM) y en el ordenamiento territorial de cada región.

Bajo esta perspectiva y con carácter experimental, es que se dispuso elaborar un mapa temático relacionado con el riesgo de deslizamientos de tierra en el municipio de Achocalla, demarcación vecina de la ciudad de La Paz, aplicando el Sistemas de Información Geográfica ArcGIS y la Evaluación Espacial Multicriterio, relacionado con la vulnerabilidad del terreno a través de los criterios: pendiente del terreno, cobertura vegetal, geomorfología y suelos, drenaje superficial. Frente, a la amenaza natural (precipitaciones pluviales) y amenaza antrópica (influencia de la población).

DESARROLLO

Imágenes de satélite de adquisición libre y gratuita:

	Imagen		
	Landsat 5 TM	**Landsat OLI 8**	**SRTM**
Resol. Espectral	7 Bandas	7 Bandas	Pancrómica
Resol. Espacial	30 m	30 m	30 m
Escena	001/072	001/072	DEM_UTM_Z19
Fecha	16/06/05	24/07/13	2010
Fuente	INPE	USCS	INRA

Coberturas:

- Mapa de cobertura y uso actual de la tierra de Bolivia, 2010, Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras – Vice ministerio de Tierras.
- Plan de uso de suelos Departamento de La Paz – cobertura de geomorfología y suelos.
- Precipitaciones anuales promedio Departamento de La Paz, Plan estratégico de manejo de cuencas de La Paz (Gobernación de La Paz-2014).
- Centros poblados y comunidades Departamento de La Paz, Instituto Nacional de Reforma Agraria, versión 2013.

[1] Así por ejemplo, en la ciudad de La Paz han ocurrido cerca a los 49 deslizamientos en diferentes zonas, entre los más importantes se tiene. el deslizamiento ocurrido en el sector de Cotahuma de la ciudad de La Paz en 1997. Otro relativamente reciente (febrero de 2011) corresponde al deslizamiento de gran magnitud ocurrido en las zonas de: Pampahasi Central Bajo, 23 de Marzo, Metropolitana, Cervecería, Valles de las Flores, Kallapa y Kupini II, ocasionando la pérdida de al menos 400 casas y unas 5000 personas afectadas..

[2] Influye también la actividad antrópica en los desastres a través de la contaminación ambiental, explotaciones irracionales de los recursos naturales renovables y no renovables, construcción de viviendas y edificaciones en zonas de alto riesgo.

- Información cartográfica del municipio correspondiente a hojas escala 1:50000 del Instituto Geográfico Militar (IGM).

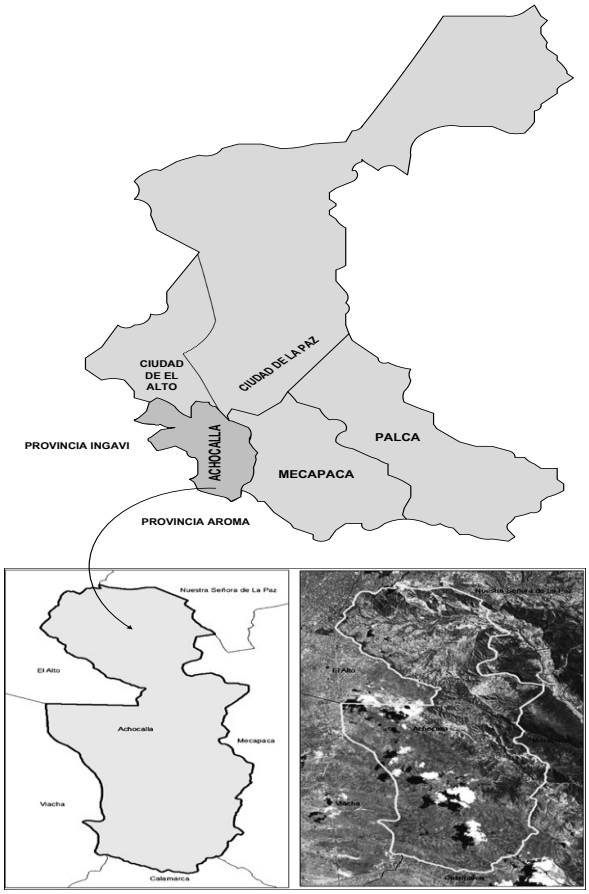
Programas utilizados:

- ArcGIS 10.0[3] versión español (análisis espacial multicriterio, algebra de mapas, edición de mapas).
- ERDAS IMAGINE 2011[4] (pre proceso de imágenes, clasificación supervisada).

Equipo computacional: Procesador Intel Core (TM) i5. Memoria RAM de 8 GB. Tarjeta de video de 2 GB. Sistema operativo de 64 bits.

Objeto de estudio

Delimitación geográfica de la topografía del municipio de Achocalla[5], provincia Murillo del Departamento de la Paz. Ver figura 1.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1: Delimitación espacial del área de estudio

La delimitación se enmarcó en la cobertura establecida por el Ministerio de Autonomías, según división política administrativa y Ley Nº. 339 referida con la delimitación de unidades territoriales, permitiendo así, efectuar el recorte respectivo de imágenes satelitales (Landsat y SRTM), además de otras coberturas espaciales, para su posterior procesamiento y análisis.

En la identificación de factores, es importante separar aquellos, que contribuyen con la vulnerabilidad[6] del lugar y los que significan ser una amenaza[7] natural o antrópica permanente, (por definición componentes fundamentales para evaluar el riesgo).

Factores de vulnerabilidad: Limitaciones del terreno paras enfrentar la amenaza. Ventajas y desventajas

1) Pendiente del terreno
2) Cobertura vegetal (COBUSO)
3) Cobertura vegetal (NDVI)
4) Geomorfología y vuelos
5) Influencia del drenaje superficial

Factores de amenazas:

1) Precipitaciones pluviales
2) Influencia de la población

Para determinar el peso relativo de cada factor, se empleó la Matriz de Jerarquización Analítica (MJA), desarrollada por (Saaty, 1990). Método que determina prioridades, (en este caso, la importancia del factor para la generación de un deslizamiento), evaluando pares de concordancia o Pairwise[8].

Los pares evaluados son ingresados a la matriz de jerarquización analítica, convirtiendo esta evaluación subjetiva en un conjunto de pesos lineares (Malczewski, 1996), para nuestro caso se consultó documentación sobre la construcción, funcionamiento y uso de la matriz en bibliografía de (Gómez y Barredo, 2005).

Esta metodología establece que es necesario verificar si los pesos son consistentes, para lo cual se realizó el cálculo de la Razón de Consistencia (CR), cuyo valor debe ser menor a 0,10.

Para un mejor ajuste del conjunto de pesos, se realizó el cálculo del eigenvector principal $\lambda max = 5,2226$. Según el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, EUA (Saaty, 1990), los valores de índice RI, para matrices cuadradas de orden n, son establecidos en la tabla: (n ; RI) = (2 ; 0,00), (3 ; 0,58), (4 ; 0,90), (5 ; 1,12), (6 ; 1,24), (7 ; 1,32).

Por lo tanto; para la matriz de 5 x 5, el valor RI es igual a 1,12. Como el valor obtenido RI es 0,0497 (menor al valor por definición 0,1), la ponderación de factores referidos con la vulnerabilidad es satisfactoria. Para evaluar los factores de amenazas, se procedió de la misma forma.

[3] Versión de software gestor que permite recopilar, organizar, administrar, analizar y distribuir la información geográfica.

[4] Software especializado para obtener imágenes sectorializadas de la Tierra a través de percepción remota y comunicación satelital.

[5] Tercera sección municipal de la provincia Pedro Domingo Murillo Departamento de La Paz. Topográficamente se divide en dos regiones: la planicie altiplánica al norte limítrofe con el municipio de El Alto, y provincia Ingavi y la cuenca o cabecera de valle al sur colindante con el municipio de Mecapaca y la provincia Aroma Extensión 194,75 km^2. Altura promedio 3750 msnm. Coordenadas 16º 36´S, 68º 09´O.

[6] Probabilidad de que, debido a la intensidad de un evento, por la fragilidad de los elementos expuestos (condiciones naturales límite, escasa respuesta de infraestructuras y, superación de las medidas de seguridad del lugar), puedan presentarse pérdidas humanas, ambientales y/o económicas.[2]

[7] "Corresponde a un fenómeno de origen natural, socio-natural, tecnológico o antrópico en general, definido por su naturaleza, ubicación, recurrencia, probabilidad de ocurrencia, magnitud e intensidad (capacidad destructora)".[2]

[8] Sólo permite el análisis de relación de un par de criterios a la vez. NIVEL DE IMPORTANCIA: Los dos criterios (x, j) contribuyen de igual manera al proceso de deslizamiento. **1 = Igual preferencia**. Pasadas experiencias favorecen ligeramente al criterio (x) sobre el otro (j). **2 = Moderada preferencia.** Prácticamente la dominancia del criterio (x) sobre el otro (j) está demostrada. **3 = Fuerte preferencia**. Existe evidencia que determina la supremacía del criterio (X). **4 = Absoluta preferencia**. En este análisis, cada parámetro asigna un puntaje entre 1 y 4 de acuerdo al nivel de importancia de los pares analizados.

Mapas temáticos

Fueron elaborados a partir de imágenes satelitales de mediana resolución espacial (Landsat y SRTM (MDE), y la información geoespacial en formato raster y vectorial obtenidas de diferentes instituciones estatales.

A) Mapa de pendientes: Este factor considera que la inclinación del terreno expresado en grados, el criterio de clasificación es que mayor grado de elevación, mayor será la probabilidad de deslizamientos y viceversa y se obtiene mediante el modelo digital de elevación (SRTM).

B) Mapa de cobertura vegetal: En este caso, se procedió a determinar la cobertura vegetal desde dos puntos de vista y dos fuentes de información:

Mapa de Cobertura y Uso Actual de la Tierra (COBUSO) La importancia del factor de cobertura y uso de suelos, radica en la capacidad de interceptación de humedad que tiene la vegetación en función de su tipo, densidad, área de cobertura, etc.; constituyéndose en un factor de resistencia o favorecimiento a los procesos morfodinámicos, como la erosión y los movimientos en masa. Asimismo, diversas actividades tales como son los cortes y rellenos a lo largo de las carreteras, deforestación o cortes al pie de una ladera, comúnmente generan alteraciones en las pendientes y cambios en las condiciones del nivel freático, incrementando la susceptibilidad a los deslizamientos. Para la investigación se consideró el COBUSO del año 2010, que ya tiene establecidas sus diferentes clases.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) Para obtener el mapa de NDVI, se utilizó la imagen satelital Landsat 8 de fecha 24 de julio de 2013. Este índice se basa en que la vegetación tiene una reflectividad muy alta en la banda 5 y muy baja en la banda 4 de Landsat 8, por tanto cuanto mayor sea la diferencia entre ambas bandas, mayor es el porcentaje de cobertura vegetal y más sana es esta. El NDVI nos permitirá tener un indicativo de la densidad de la cobertura vegetal, cuyos valores fluctúan entre -1 a 1, luego estos valores son llevados a una escala de valores positivos para luego ser normalizados como se verá más adelante.

C) Mapa de Geomorfología y Suelos: Para este mapa se utilizó la memoria de la propuesta del Plan de Uso del Suelo (PLUS) del Departamento de La Paz. Delimita espacios geográficos y asigna usos al suelo, tendientes a lograr el mejor beneficio de este recurso, a la vez de alcanzar el uso y manejo sostenible de los recursos renovables.

D) Mapa de influencia del drenaje superficial: Para determinar el nivel de influencia del drenaje superficial dentro del Municipio de Achocalla, se realizó un análisis hidrológico, utilizando como fuente de información primaria el modelo digital de elevación (SRTM). Se obtuvo el drenaje principal, considerando en especificó un umbral para la cantidad de píxeles adyacentes que constituyen una corriente, resultado que fue contrastado con la imagen satelital Landsat. Posteriormente se determinó las distancias respecto al drenaje principal, que en la investigación representan “zonas de influencia” del drenaje superficial.

E) Precipitaciones: A partir de la cobertura de precipitaciones anuales promedio del departamento de La Paz, se procedió a realizar el recorte con la cobertura del municipio de Achocalla obteniendo una cobertura de precipitaciones anuales con valores máximos de 582 mm/año y como mínimo 424 mm/año (Plan estratégico de manejo de cuencas de La Paz, Gobernación de La Paz 2014).

Los registros de precipitación en sus valores máximos y mínimos, muestran el comportamiento promedio de las precipitaciones en las cuencas del municipio de Achocalla, donde se puede considerar que las intensas precipitaciones generan un vertiginoso escurrimiento que participa activamente en la conformación de caudales y fuerte erosión hídrica, igualmente, la infiltración de este escurrimiento sobresatura el terreno propiciando los deslizamientos (movimientos de masa).

F) Influencia de la población: Las actividades realizadas por el ser humano en el proceso de asentamientos, construcción de viviendas, construcción de vías de comunicación como caminos, establecimiento de urbanizaciones donde es necesario la implementación de los servicios básicos de luz, agua y alcantarillado, así también en la preparación del campo para la producción agrícola y el uso destinado a la ganadería. Generan modificaciones en la topografía y en el cambio del uso del suelo, actividades antrópicas que contribuyen directamente en la generación de deslizamientos en las zonas afectadas por el hombre. Es importante considerar y establecer las distancias a los centros poblados (influencia de la población), que representa un factor de amenaza al riesgo de deslizamientos, dependiendo de la proximidad o alejamiento de un espacio geográfico, para lo cual se utilizo la cobertura de poblaciones (que contemplan áreas urbanas y comunidades), proporcionada por el Instituto Nacional de Reforma Agraria INRA.

Normalización de los mapas generados

Los valores contenidos en los mapas generados, tienen diferentes significados y unidades de medida, por esta razón y para poder compararlos, se requiere estandarizar o normalizar sus valores en una escala única. Transformando todos los valores de evaluación a una misma escala, proceso que viabiliza la agregación de los factores y posteriormente, la respectiva combinación (Ramos, 2000).

Métodos de normalización:

Valor máximo el cual consiste en dividir los valores de cada mapa por su máximo valor a encontrar (Castellanos et al., 2005; Jiang and Eastman, 2000; Malczewski, 1999), generando un mapa de datos lineales con valores que van de 0 a 1, donde 0 representa la más baja potencialidad del factor a desarrollar deslizamientos, mientras que 1 representa la más alta potencialidad a encontrar en el factor para generar deslizamientos.

Lógica fuzzy de ArcGIS normalización de factores en la evaluación multicriterio, escala de valores convertida en otra comparable, (escala normalizada por ejemplo 0 - 1). El resultado expresa un grado relativo de pertenencia a un conjunto que varía entre 0 y 1, indicando un crecimiento continuo, desde la no pertenencia hasta la pertenencia total, en base del criterio sometido al proceso de fuzzyficación (Ramos, 2000).

Método de reclasificación cuando existen coberturas con clases ya definidas teniéndose descripciones o cualidades de cada clase, por lo cual este método permite llevar cada clase a valores numéricos.

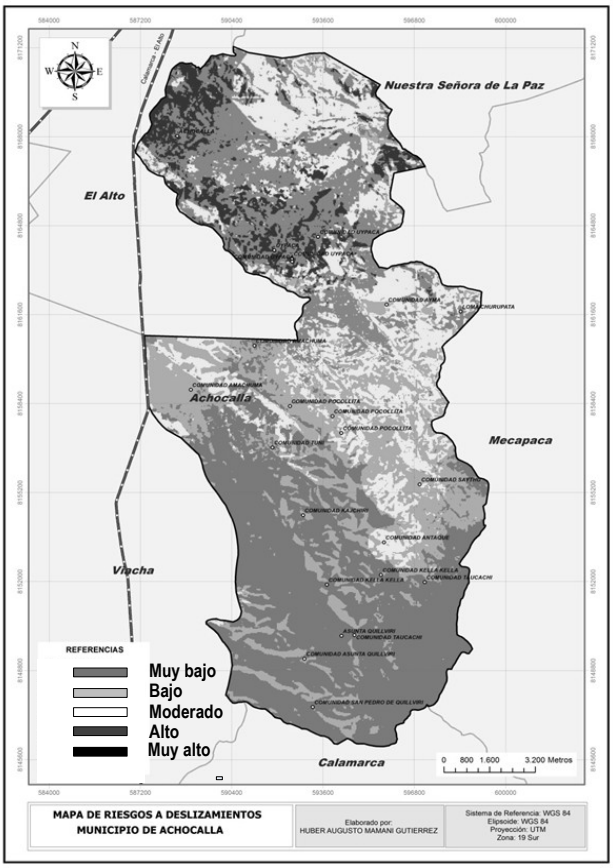
Elaboración del mapa final

Una vez procesados y normalizados los mapas temáticos se combinaron tomando en cuenta los pesos relativos calculados en la Matriz de Jerarquización Analítica (MJA), determinándose los mapas de vulnerabilidad y amenaza para obtener el mapa final de riesgo de deslizamientos[9].

El mapa final de riesgos se encuentra expresado en valores de escala continua que van de 0 (menor riesgo a deslizamiento) a 1 (mayor riesgo de deslizamiento). Finalmente se aplicó el método de cortes naturales o (Jenks). Para diferenciar la superficie del municipio en

[9] En el proceso de fuzzificación, se define la pertenencia ideal al conjunto. Así, a cada valor del fenómeno más cercano al concepto de la definición del conjunto se le asigna 1, y a los valores que definitivamente no forman parte del conjunto se les asigna 0. Los valores que se encuentran entre los dos extremos, caen en la zona de transición del conjunto, el límite. A medida que los valores se alejan del valor ideal o del centro del conjunto, se les asigna un valor decreciente en la escala continua de 1 a 0. A media que los valores asignados disminuyen, el valor original del fenómeno tiene menos posibilidad de pertenecer a ese conjunto (en este caso el riesgo a deslizamiento).

cinco niveles de riesgo: muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto, ver figura 2.



Fuente: Elaboración propia, modificado para impresión en escala de grises RT

Figura 2: Mapa temporal riesgo a deslizamientos municipio de Achocalla

Estratificación y discusión de resultados

La tabla 1, muestra el riesgo de deslizamientos del municipio de Achocalla por severidad y superficie.

Tabla 1
Riesgo de deslizamientos del municipio de Achocalla por criterio de severidad y superficie afectada

Riesgo de deslizamiento	Superficie determinada en (ha)
Muy baja	6368,1473
Baja	4319,4600
Moderada	4036,7700
Alta	**3598,2900**
Muy alta	**1151,9100**
Área total municipio de Achocalla	**19474,5773**

Fuente: Elaboración propia

Esta identificación temporal del riesgo de deslizamientos para el municipio de Achocalla, considerando los factores; pendiente del terreno, cobertura vegetal, geomorfología - suelos e influencia del drenaje superficial; en el caso de las vulnerabilidades, y los factores de precipitación e influencia de la población relacionados con amenazas. Devuelve información preliminar para la implementación de medidas de alerta y seguridad, que también puede aplicarse en un proyecto de topografía y geodesia más exhaustivo que verifique las zonas identificadas. Donde se incluyan otros factores, como: humedad del terreno, estudios de sismicidad, degradación de suelos, etc.

CONCLUSIONES

A partir de la delimitación del área de estudio (municipio de Achocalla), por medio de imágenes satelitales y la posterior identificación de factores referidos con la vulnerabilidad y las amenazas, el cálculo de la Matriz de Jerarquización Analítica (MJA) y la determinación de la razón de consistencia, la normalización de escalas y su combinación en la elaboración de los mapas temáticos de coberturas (21 mapas en total). Se estableció el mapa temporal de riesgos de deslizamiento del municipio de Achocalla incorporando criterios de severidad (gradación de color para cinco niveles figura 2).

Recomendaciones

- La Evaluación Espacial Multicriterio (EEM) asistida con imágenes satelitales, modelos digitales de elevación e información geoespacial disponibles, combinada con un sistema de información geográfica (SIG), ha permitido desarrollar una aplicación rápida y de fácil implementación para el mapeo de zonas de riesgo. No obstante, los mapas al mostrar información temporal de los factores que involucra, para mayor seguridad, necesitan actualización periódica y permanente.

Referencias Bibliográficas:

[1] (PRDD) - COSUDE, 2014, Programa de reducción del riesgo de desastre, Experiencia para construir mapas de riesgos, La Paz – Bolivia,

[2] Chardon, A.C., González, J.L., 2002, Indicadores para la gestión de riesgos: amenaza, vulnerabilidad, riesgo, desastre, mitigación, prevención, BID,CEPAL, IDEA, Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, Instituto de Estudios Ambientales, Manizales – Colombia,

BIBLIOGRAFÍA

Centro Integral de Desarrollo Socioeconómico y Agroecológico, Chakana, 2007, Diagnóstico Achocalla. La Paz – Bolivia,

Cuadros, B. A.,1982, Plan de ocupación del suelo – Alcaldía Municipal de la Ciudad de La Paz, La Paz – Bolivia,

Chuvieco, E.,1996, Fundamentos de Teledetección espacial, Rialp, tercera edición Madrid – España,

Estrategia internacional para la reducción de desastres, ISDR, 2009, UNISDR Terminología sobre reducción del riesgo de desastres, ONU, Ginebra – Suiza,

Van Westen, C. J, 1993, Application of geographic information system to landslide hazard zonation.

Lomoschitz, A., 2002, Mapas de susceptibilidad del deslizamientos mediante SIG, teledetección y métodos de evaluación multicriterio, aplicación a la depresión de Tirajana (Gran Canaria), La Palmas G.C., España,

Maune, D. F., 2001, Las tecnologías digitales modelo de elevación y aplicaciones: manual del usuario DEM, Maryland – USA,

Pantigoso, H., 2009, ArcGis el mejor sistema de información geográfico, Megabyte Lima – Perú,

Saaty, T. L., 2008, Decision making with the analytic hierarchy process, Int. J. Services Sciences, USA,

Universidad de Los Andes, Área Geografía, 2007, Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos de imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, Mérida – Venezuela,

Zibert, L., (1998), Módulos para la capacitación. Red de Estudios Sociales de Prevención de Desastres en América Latina, Group – ITDG. Lima Perú.

(*), Licenciado en Topografía y Geodesia,
MSc. Ciencias Geomáticas Aplicadas a la Gestión Territorial, Recursos Naturales y Medio Ambiente.
Docente investigador Centro de Investigaciones y Aplicaciones Geomáticas CIAG – Carrera de Topografía y Geodesia,
Facultad de Tecnología – UMSA.