

APROXIMACION AL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZAS POR DESLIZAMIENTOS DE LA CIUDAD DE TRUJILLO, VENEZUELA.

AN INTRODUCTION TO THE MAPPING OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY AND HAZARD AREAS IN TRUJILLO CITY, VENEZUELA.

José Gregorio Roa*

Resumen

Todo proceso relativo a prevención y manejo de desastres naturales demanda la elaboración de una cartografía acorde. En este análisis se detalla el proceso de producción de mapas de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos, calculados a través de la Evaluación Multicriterio (EMC) y bajo un ambiente de SIG. El Área Metropolitana de Trujillo en los Andes Venezolanos, y anualmente afectada por movimientos en masa es tomada como caso de estudio.

Palabras clave: deslizamientos, susceptibilidad a deslizamientos, amenazas por deslizamientos, evaluación multicriterio, sistemas de información geográfica, Andes Venezolanos.

Abstract

The use of specialized cartography related to natural risks is an absolutely need for the management of a natural disaster event. This article deals with the description of all the procedures carried out in order to produce landslide susceptibility and hazard maps. These maps were elaborated by the Multicriterio Analysis using the Analytic Hierarchy Process, and computed under a GIS environment. The urban area of Trujillo, a medium size city located in the Venezuelan Andes and annually affected by landsliding processes, was taken as the case of study.

Key words: landslide susceptibility, landslide hazard, landslide, multicriterio analysis, geographical information system, Venezuelan Andes.

* Universidad de Los Andes – Trujillo, Área de Geografía, Grupo GEOCIENCIA. Trujillo, Venezuela.
Email: jose_roa@yahoo.com

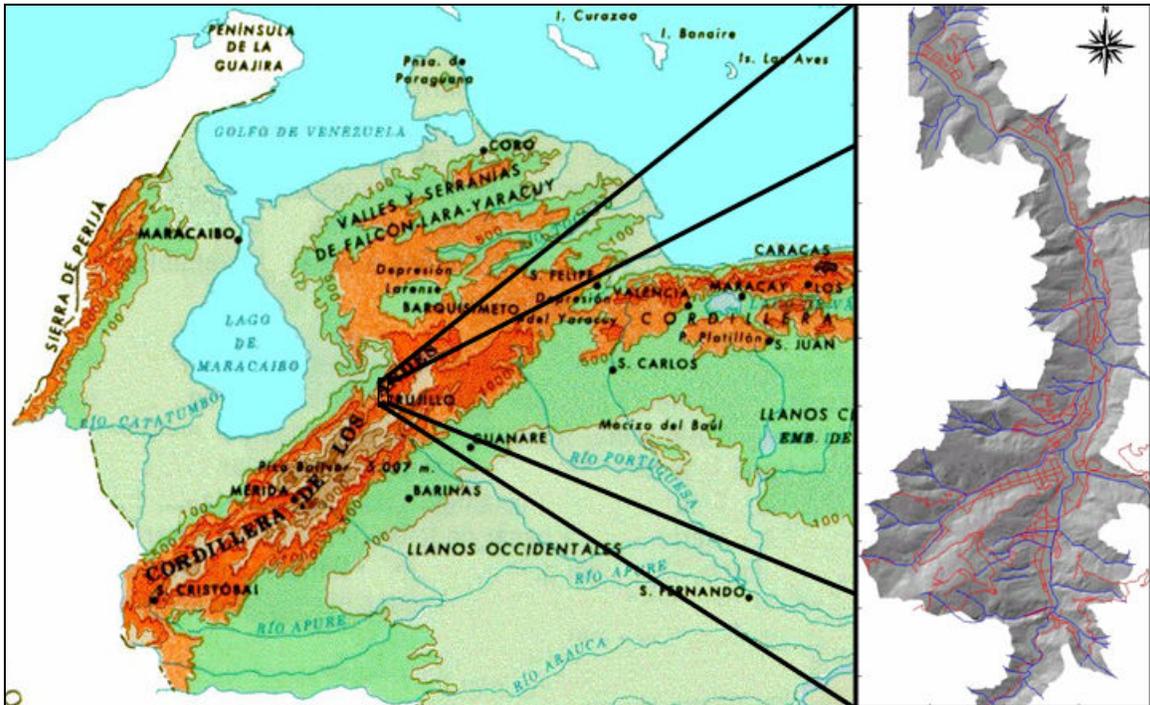
1.- INTRODUCCION

Los modelos predictivos de amenaza por deslizamientos es una importante área de investigación, la cual ha sido potenciada por el uso de tecnologías tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), datos e imágenes satelitales y la subsecuente incorporación de procedimientos estadísticos aplicados a datos espaciales. Sin embargo la creciente complejidad de técnicas en SIGs, demanda investigadores capacitados tanto en la utilización de este tipo de plataformas como en el análisis de los procesos geomórficos, bajo estudio (Fabbri et al, 2003). Desafortunadamente, esta última aseveración representa un obstáculo emergente entre investigadores de deslizamientos, particularmente en la comunidad geomorfológica.

Debido a este obstáculo, actualmente se reconocen dos enfoques principales para el mapeo de la susceptibilidad y amenaza por deslizamientos: El Directo o geomorfológico, basado en el levantamiento geomorfológico y posterior interpretación en términos de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos; y el Indirecto, basado en la selección, jerarquización, asignación de pesos y final combinación de factores geográficos asociados a la inestabilidad del área analizada (Hansen, 1984; Hansen and Frank, 1991). Debido a la cantidad de datos, mapas e información espacial que se maneja, en este segundo enfoque el uso de un SIG es casi obligatorio.

No existe un acuerdo específico sobre cual enfoque y métodos relativos son los mas adecuados para la zonificación cartográfica de susceptibilidad y amenazas a deslizamientos (Brabb, 1984; Carrara, 1989), pero si existe una urgencia en el desarrollo de mapas de identificación de riesgos naturales tales como deslizamientos, que apoyen la determinación de áreas vulnerables para la población, logrando con esto una efectiva función social de este tipo de practica académica.

En este trabajo se propone la aplicación de un método indirecto rápido, razonable y consistente que permita una pronta respuesta a requerimientos propios de todo mapeo de susceptibilidad y vulnerabilidad de un área a deslizamientos. La técnica aplicada fue la Evaluación MultiCriterio (EMC), basada en el Método de las Jerarquías Analíticas (MJA) propuesto por Saaty (1990). Como caso de estudio se seleccionó un área montañosa urbana en los Andes Venezolanos: El Área Metropolitana de Trujillo, la cual se localiza en la parte media de la Cuenca del Río Castán, afluente del Río Motatán y ambos pertenecientes al sistema hidrológico de la cuenca del Lago de Maracaibo. Los límites de esta área son los considerados por la Alcaldía del Municipio Trujillo y corresponden al territorio a ser estimado como zona de desarrollo urbano de la Ciudad de Trujillo. Esta área posee una extensión de 19 Km², de relieve montañoso-accidentado, con un rango altitudinal entre 475 y 1225 msnm y esta definida por dos vertientes asimétricas separadas por el valle del Río Castán que fluye en dirección S-N. Este valle aluvial tiene su mayor expresión en la parte centro-sur del área, donde convergen al Río Castán, las Quebradas Los Cedros (SW-NE) y Bellamira (SE-NW). El casco histórico de la Ciudad de Trujillo se desarrolló en el angosto valle de la Quebrada Los Cedros. La figura 1 muestra la localización relativa y la disposición del relieve en el Área Metropolitana de Trujillo.



VISTA 3D ÁREA METROPOLITANA DE TRUJILLO



Figura 1. Localizaron relativa, orientación y vista 3D obtenida a partir de un Modelo de Elevación Digital (MED), del Área Metropolitana de Trujillo.

1.1.- JUSTIFICACION

La elaboración de mapas de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos no da respuesta a como resolver los riesgos ambientales relativos, pero respalda y estimula las decisiones de las autoridades y organizaciones civiles sobre la planificación y uso del espacio, la formulación de escenarios pre-desastre y la elaboración de estrategias post desastre. Como ejemplo tenemos que un grave impedimento en el proceso de recuperación post desastre del tsunami del 26 de diciembre del 2004 en el Sudoeste Asiático, fue la falta de mapas de vulnerabilidad y riesgos ambientales así como de información ambiental básica (UNEP, 2005), de allí que en el informe final elaborado para la ONU, se recomienda una detallada evaluación ambiental y de vulnerabilidad, la cual se considera un punto crítico dentro de los planes de reconstrucción y rehabilitación.

En nuestro caso, la Ciudad de Trujillo es anualmente afectada por movimientos en masa que si bien no llegan a clasificarse como desastres, sugieren la potencialidad de ocurrencia de uno, dadas las condiciones geográficas de su entorno y el incremento poblacional en construcciones indebidas en pendientes, etc. La ocurrencia de movimientos en masa generalmente se asocia al periodo de lluvias. Mendoza (1999), advierte las desventajas existentes en varios sectores de la ciudad de Trujillo como consecuencia de estar emplazados a lo largo de drenajes hidrológicamente torrenciales. Sin embargo, son los factores pasivos tales como la pendiente, litología, cobertura vegetal, etc; los que juegan un rol fundamental en el desarrollo y magnitud de los deslizamientos, siendo estos, de mejor comprensión y modelamiento que la predicción de eventos hidrometeorológicos (Nettleton et al, 2005). Por lo tanto la zonificación del Área Metropolitana de Trujillo en áreas de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos es un paso fundamental para la comprensión de este tipo de fenómenos y formulación de futuras estrategias para la reducción de la vulnerabilidad y por ende del riesgo natural.

La susceptibilidad describe donde podría generarse un deslizamiento, tomando en cuenta el potencial de inestabilidad que presenten las variables geográficas asociadas a este tipo de eventos (Ej.: pendientes, distancia a ríos o carreteras, cobertura vegetal, etc.) (Cruden, 1991), mientras que la amenaza se define como la probabilidad de ocurrencia de

un evento potencialmente dañino (deslizamientos), en un periodo específico para un área determinada (Varnes, 1984). El impacto negativo de este evento natural en el Área Metropolitana de Trujillo, esta asociado directamente a la vulnerabilidad de ciertas áreas a este tipo de fenómenos, siendo esta vulnerabilidad una funesta combinación de áreas susceptibles a deslizamientos y una arbitraria ocupación / uso antrópico de estas (Crozier, 1986).

1.2.- OBJETIVO

El objetivo general de este trabajo fue la elaboración de los mapas de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos para el Área Metropolitana de la Ciudad de Trujillo, a través de la manipulación de mapas y otros datos espaciales en un SIG, ilustrando con esto la conveniencia de esta herramienta para el análisis consistente y expedito de los procesos de deslizamientos y su posible anticipación. Específicamente se elaboró: un mapa de susceptibilidad a deslizamientos y tres mapas de amenazas por deslizamientos, estos últimos según la variación estacional de las lluvias.

1.3.- DATOS Y FUENTES

Para la producción final del Mapa Susceptibilidad a Deslizamientos se utilizaron mapas de inclinación de las pendientes (en grados), de forma de las pendientes (en clases: cóncavas, convexas y planas), disección del relieve (rugosidad o relieve interno), y distancias a drenajes (distancias a cursos de agua o cinturones de resguardo); todos estos extraídos a partir de un Modelo de Elevación Digital (MED) de 25 m de resolución horizontal, construido a partir de la digitalización del mapa topográfico del Área Metropolitana de Trujillo, facilitado por la Oficina de Ingeniería Municipal de la ciudad. Igualmente fue necesario estimar la distribución y contextura de la cobertura vegetal de la cuenca a través del calculo del NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), de una imagen LANDSAT ETM+ de Junio, 2003 con 28.5 m de resolución, adquirida libremente a través de la oficina Global Land Cover Facility – GLCF - (www.landcover.org). Finalmente el mapa de unidades geomorfológicas esta basado en el

exhaustivo levantamiento geomorfológico realizado por Ferrer (1984), para el área interurbana Valera-Trujillo..

Posteriormente este mapa de susceptibilidad resultante se utilizó para elaborar los mapas de Amenazas por Deslizamientos, para lo cual se le adicionaron los mapas de distribución de la precipitación en el Área Metropolitana de Trujillo, estos últimos se generaron empleando una interpolación tipo kriging a los datos puntuales de registros mensuales de precipitación (por estación meteorológica o climatológica) ofrecidos por la Dirección de Climatología del Ministerio del Ambiente – Oficina Trujillo (MARNR, 2004). Los registros de precipitación muestran el comportamiento promedio de las precipitaciones en el área metropolitana de Trujillo, de tal manera que en base a las tendencias descritas en la figura 2, se producen tres mapas cada uno representando un periodo de cuatro meses: Sequía (Diciembre a Marzo), comienzo del periodo lluvioso (Abril – Julio), y final del periodo lluvioso (Agosto – Noviembre).

Los mapas, imágenes y datos originales empleados en este análisis, fueron procesados, clasificados, estandarizados, compensados y finalmente combinados, mediante las capacidades de ENVI 4.0 (Research Systems Inc., 2004) e ILWIS 3.2 (ITC, 2003), los cuales son soportes lógicos orientados a formato de celdas (raster).

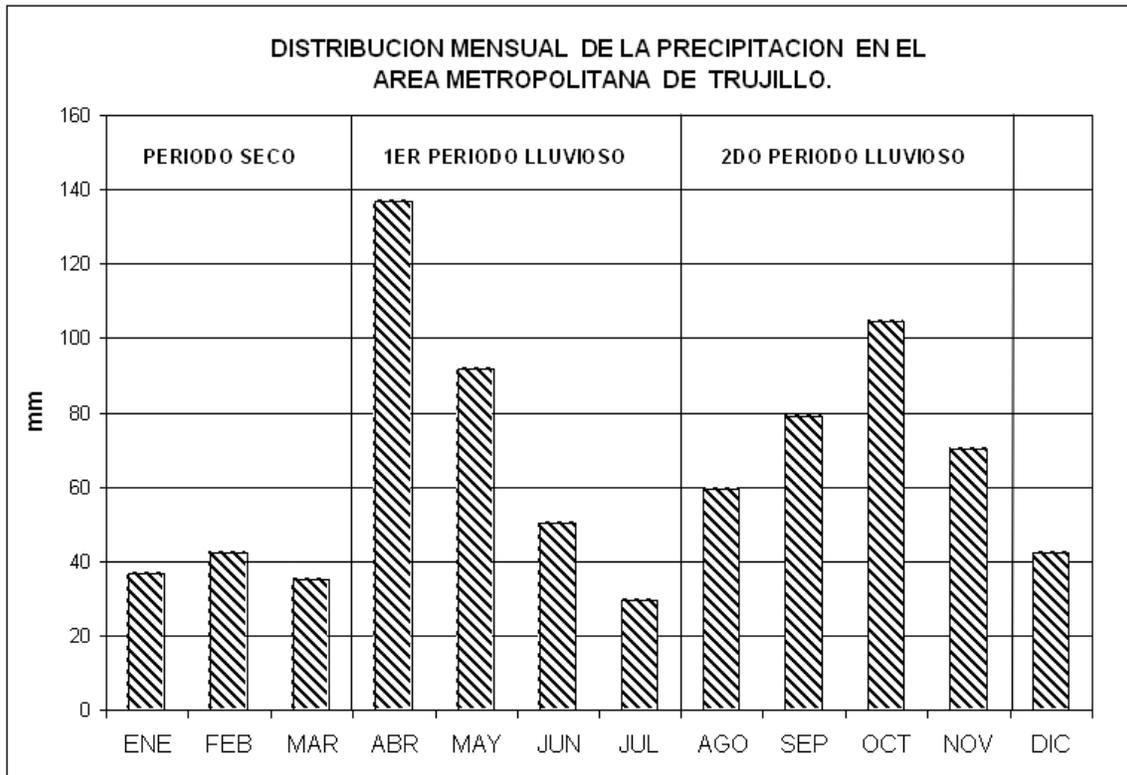


Figura 2. Distribución mensual de las precipitaciones en el Área Metropolitana de Trujillo. Basado en datos del MARNR (2004).

2.- METODO

La evaluación de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos ejecutada en este análisis, se realizó bajo los procedimientos requeridos a toda Evaluación MultiCriterio (EMC) y señalados por Saaty (1990). En este análisis la EMC consistió en dos partes básicas: La descripción general de los procesos de deslizamientos en el área de estudio y el posterior modelamiento de la sensibilidad y amenaza por deslizamientos.

2.1.- La descripción general de los procesos de deslizamientos

Un deslizamiento es básicamente el movimiento pendiente abajo, de una masa rocosa, detritos o tierra (Cruden, 1991), y puede tener diferentes causas, tales como geológicas, geomorfológicas, físicas y humanas; pero solo un agente detonante (Wieczorek, 1996). Las lluvias intensas, movimientos sísmicos, erupciones volcánicas, o rápido socavamiento basal; son considerados agentes detonantes y su ocurrencia en

determinadas áreas conduce a un aumento de la presión vertical (peso) o reducción de la cohesión de los materiales que conforman la vertiente, acelerando su colapso.

Ferrer (1984), considera que en la ciudad de Trujillo, las causas o factores pasivos responsables de la susceptibilidad a deslizamientos son los agentes geológicos/litológicos y la pendiente. Dada la esquistosidad y buzamiento de las unidades litológicas, favorables a la meteorización química y mecánica, se determina en gran medida la existencia de un saprolito propenso a inestabilidad en gran parte de la ciudad. Igualmente basado en las pendientes, Ferrer (ídem), mapeó escarpes y cuerpos de deslizamientos activos e inactivos, clasifica el Área Metropolitana de Trujillo en diferentes niveles de escurrimiento/erosión potencial e igualmente señala la existencia de áreas de recarga e infiltración del agua de lluvia en las zonas altas de la ciudad que posteriormente fomentarían la pérdida de cohesión de los saprolitos aguas abajo. De aquí se asume que el factor activo o detonante principal advertido por este autor en el proceso de deslizamientos de la ciudad de Trujillo es indudablemente la precipitación.

Las precipitaciones en el Área Metropolitana de Trujillo están concentradas en dos periodos anuales (figura 2), y son el resultado de la zona de convergencia intertropical, de aquí que estas precipitaciones son por lo general intensas y generadoras de considerable escurrimiento e infiltración. Estos dos últimos procesos toman lugar en un terreno con presencia de saprolitos y predominantemente fuertes pendientes además del carácter urbano – semiurbano del área lo que se expresa en una cobertura vegetal muy rala y una fuerte canalización del escurrimiento.

Como resultado en el área de estudio tenemos cuatro tipos principales de deslizamientos:

- La caída/volcamiento de rocas o derrumbes, proceso que se presenta en áreas de pendientes cercanas a 90° y corresponden litológicamente a afloramientos rocosos ya alterados (figura 3). Un ejemplo lo encontramos en la vertiente izquierda del Río Castán entre La Plazuela y Tucutucu. Son movimientos muy rápidos.

- Los flujos de detritos, muy comunes en terrenos drenados por torrentes o de fuerte canalización antrópica del escurrimiento (figura 4). Estos procesos son frecuentes y/o potenciales en el área de las Araujas, Tamborón, La Raya y La Guaira parte alta. Los flujos de detritos en el área de estudio son movimientos rápidos y asociados a cárcavamientos y/o surcos.
- Los deslizamientos trasnacionales y/o superficiales, los cuales son comunes en el cerro San Isidro, sector Santa Rosa, La Guaira parte baja y Carmona. Este tipo de deslizamiento ocurre en áreas de pendiente abrupta y por lo general en el área de Trujillo esta relacionado con el incremento del peso y escurrimiento en la parte alta de la vertiente inestable, así como también con el socavamiento basal por extracción de material o sufusión por aguas infiltradas en la parte inferior. Por lo general son movimientos rápidos (figura 5).
- Los deslizamientos rotacionales y/o profundos. La ocurrencia de este tipo de deslizamiento obedece a la presencia de material arcilloso y pendientes menos abruptas, así como una consistente fuente de humedad en la corona del deslizamiento (figura 6). En el área de estudio son movimientos lentos y localizados en sectores aledaños a Los Haticos.

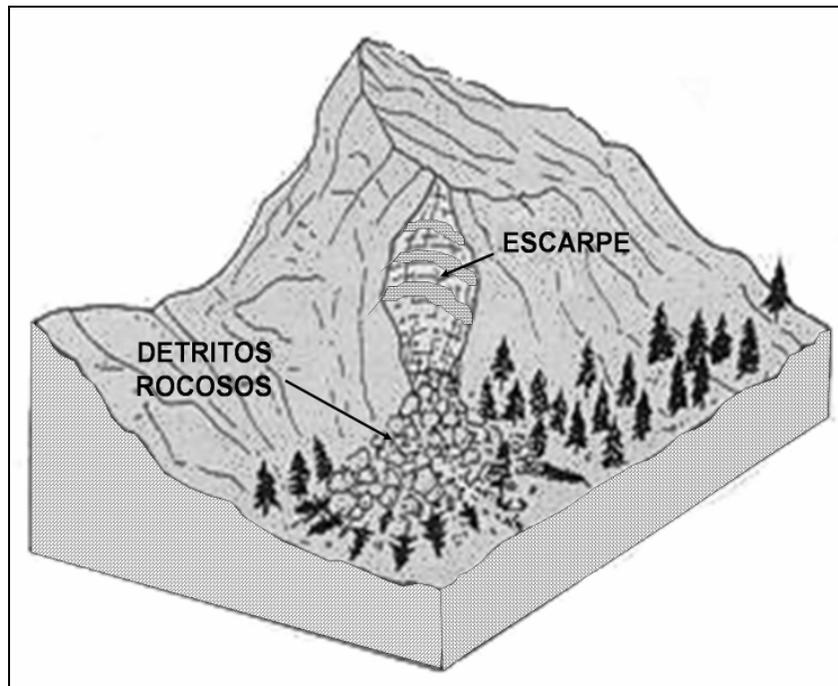


Figura 3. Esquema de una caída/volcamiento (derrumbe) de rocas ideal

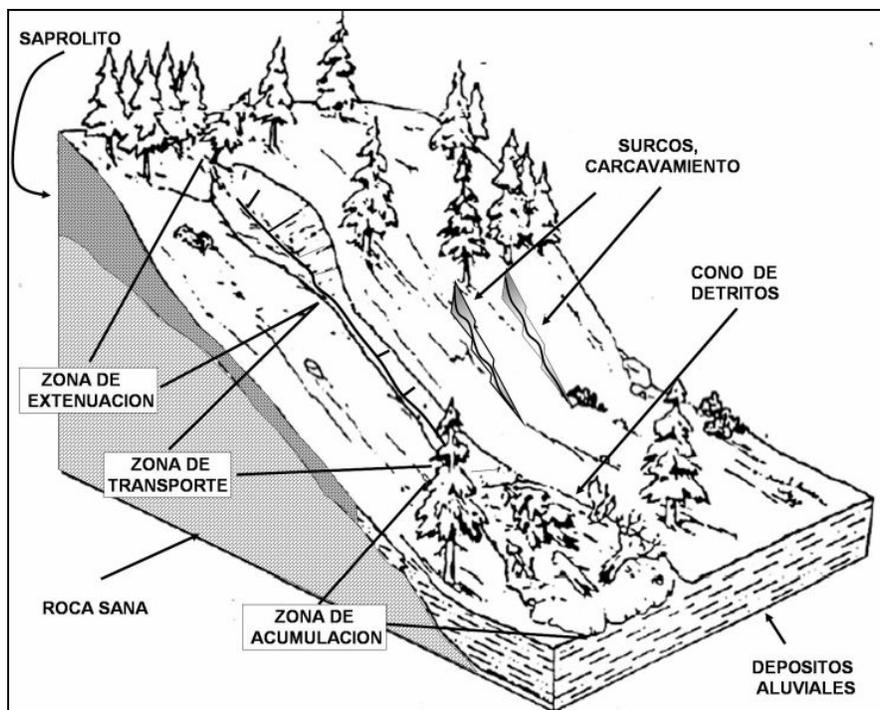


Figura 4. Esquema de un flujo de detritos ideal

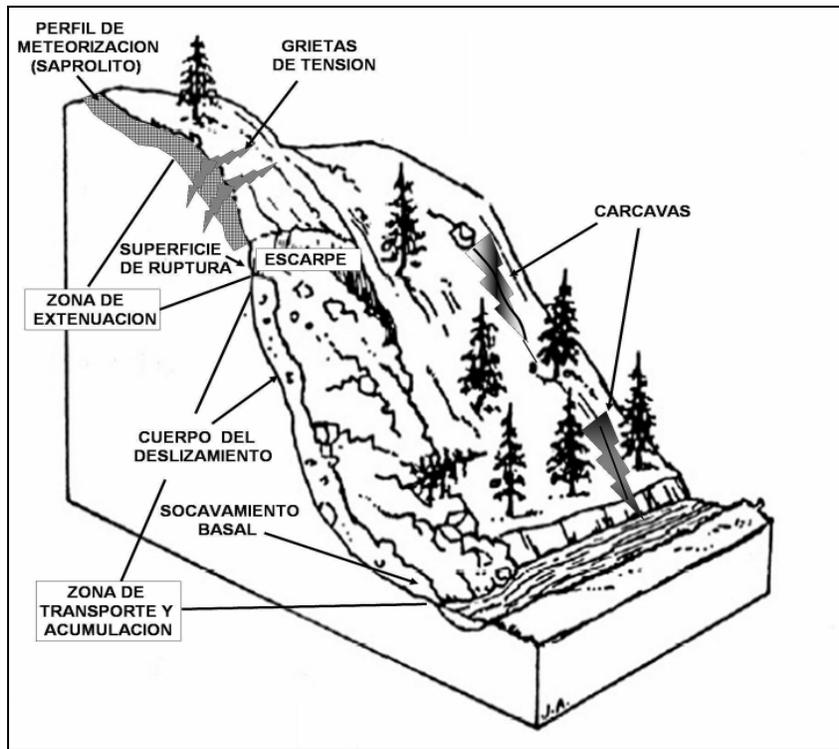


Figura 5. Esquema de un deslizamiento trasnacional ideal

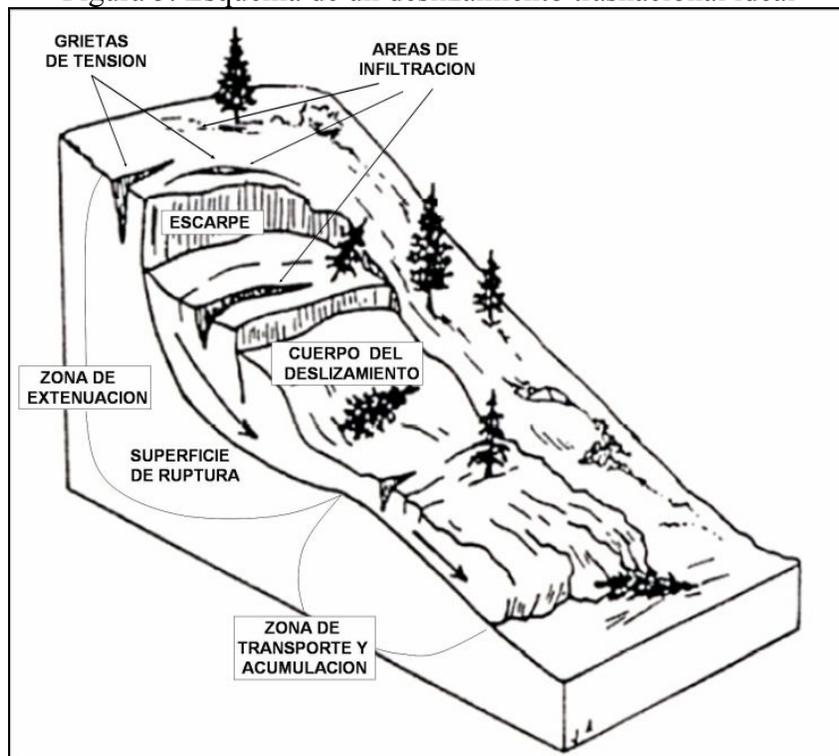


Figura 6. Esquema de un deslizamiento rotacional ideal

En el objetivo de producir el mapa de susceptibilidad y los mapas de amenazas por deslizamientos, el fenómeno de deslizamiento en el área de estudio debe ser analizado en factores, procesos y criterios. Los factores caracterizan los parámetros, propiedades y agentes que contribuyen al proceso, mientras que los procesos describen los diferentes fases/formas del movimiento de masas. Los procesos vienen a ser el marco de acción e interacción de los conceptos descritos en los factores mientras que los criterios son la unidad pragmática de evaluación indirecta de la magnitud de los procesos ya sea directa o indirectamente. Un criterio es la base de una decisión que puede ser medida y evaluada (Eastman et al., 1995), y en un análisis geográfico como en este caso, cartografiada.

Cuadro 1. Factores, procesos y criterios involucrados en los procesos de deslizamientos frecuentes en la ciudad de Trujillo. El orden y distribución de estos parámetros en el cuadro sugiere una relación de causa, efecto y lugar, pero solo de tipo ilustrativo y no absoluto.

		FACTORES		PROCESOS	CRITERIOS	
ZONA DE EXTENUACION		PRECIPITACIONES	Intensidad, Duración, Frecuencia.	ESCURRIMIENTO	INCLINACION DE LAS PENDIENTES	
			Estacionalidad			
	ZONA DE TRANSPORTE	CARACTERISTICAS HIDROLOGICAS DE LA CUENCA	Área		REPTACION	FORMA DE LAS PENDIENTES
			Infiltración		CARCAVAMIENTO	
	ZONA DE ACUMULACION	SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS / EROSION	Pendientes		DERRUMBES	DISECCION DEL RELIEVE
			Morfología		FLUJO DE DETRITOS	
			Litología		DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES	COBERTURA VEGETAL
			Perfil de alteración		DESLIZAMIENTOS ROTACIONALES	
			Uso de la tierra		SUFUSION, SOCAVAMIENTO	DISTANCIA A DRENAJES
			Diaclasamiento		DEPOSICION	UNIDADES GEOMORFICAS
ACUMULACIONES FINALES	Cono de detritos					
		Paquetes de detritos				

El cuadro 1, describe los factores – conceptualmente señalados - , los procesos observados en el evento analizado y los criterios considerados. La definición de criterios guarda estrecha relación con la esencia y disponibilidad de los datos, por ejemplo este

análisis es fundamentalmente espacial y orientado al uso de mapas, de allí que los criterios considerados son factibles de obtener a partir de este tipo de fuentes.

2.2- El modelamiento de sensibilidad y amenaza. En esta fase, los mapas ya seleccionados deben ser tratados para incorporarlos a la EMC, mediante:

2.2.1.- La Normalización de los mapas originales.

Los valores contenidos en los mapas originales tienen diferentes significados y unidades de medida, por esta razón y para poder compararlos se requiere normalizar sus valores a una misma unidad de medida, por ejemplo a una escala de 0 a 1 (0 representa la mas baja potencialidad del criterio a desarrollar deslizamientos, mientras que 1 representa la mas alta potencialidad a encontrar en el criterio para desarrollar deslizamientos). En nuestro caso los mapas fueron normalizados por el método del 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).

Cuando los mapas vienen dados en valores numéricos racionales tales como los mapas de pendientes, disección del relieve y distancia a drenajes, este procedimiento es sencillo. Mapas como el NDVI (el cual es indicativo de la cobertura vegetal), cuyos valores fluctúan entre -1 y 1, debe ser llevado a una escala de valores positivos para luego normalizarlo. Es de hacer notar que en este análisis se trabajo con el NDVI inverso el cual es meramente la inversión de los valores del índice original, de esta manera los valores bajos representaran alta cobertura vegetal mientras que los valores altos una baja cobertura, adecuándose de esta manera su combinación con las demás coberturas de criterios, donde altos valores representan mayor susceptibilidad a deslizamientos y viceversa.

En cuanto a los mapas de distribución de la precipitación, para este análisis se produjeron tres mapas representativos de periodos tetramensuales, para su normalización el valor máximo denominador debe ser el valor máximo mensual de precipitación ocurrido durante el año. El mapa de unidades geomorfológicas esta dado en clases y no valores numéricos, se debe entonces ordenar estas clases geomórficas de acuerdo a su

predisposición a la erosión y procesos de deslizamientos, asignando luego valores entre 0 (menor predisposición) y 1 (mayor predisposición).

De esta manera los mapas originales son convertidos en coberturas de criterios. Posteriormente para poder combinar estas coberturas de criterios en un mapa final, se debe asignar pesos que compensen la participación de cada uno de estas coberturas en el proceso de flujo de detritos/deslizamientos. Obviamente, coberturas de criterios que tengan mayor participación en el proceso demandaran una mayor ponderación.

2.2.2.- La determinación de los pesos

Para la determinación de los pesos dados a los criterios, en este trabajo se empleo el Método de las Jerarquías Analíticas (MJA) o Analytic Hierarchy Process (AHP). Este método desarrollado por Saaty (1990) se basa en el desarrollo de prioridades (en este caso, la importancia del criterio para la generación de un proceso de deslizamiento), que a su vez son derivadas a partir de una evaluación de concordancia o Pairwise, llamados así debido a que solo se permite el análisis de relación de un par de criterios a la vez.

Luego de identificar los pares de criterios, estos son cualificados y cuantificados mediante ciertos parámetros (Huang et al, 2003). En este análisis cada parámetro asigna un puntaje entre 1 y 4 de acuerdo al nivel de importancia de la relación de pares analizados (cuadro 2). Estos valores de concordancia son luego ingresados al MJA (cuadro 3), convirtiendo esta evaluación subjetiva en un conjunto de pesos lineares (Malczewski, 1996).

Cuadro 2. Parámetros usados para la calificación / cuantificación de la concordancia o Pairwise de los criterios involucrados en los procesos de deslizamiento en el Área Metropolitana de Trujillo.

NIVEL DE IMPORTANCIA	DEFINICION	DESCRIPCION
1	Igual Preferencia	Los dos criterios (x, j) contribuyen de igual manera al proceso de deslizamiento
2	Moderada Preferencia	Pasadas experiencias favorecen ligeramente al criterio (x) sobre el otro (j)
3	Fuerte Preferencia	Prácticamente la dominancia del criterio (x) sobre el otro (j) esta demostrada
4	Absoluta Preferencia	Existe evidencia que determina la supremacía del criterio (x)

Cuadro 3. Determinación de los pesos de los criterios mediante el Método de las Jerarquías Analíticas (MJA).

METODO DE LAS JERARQUIAS ANALITICAS (MJA) (j)	(x)	INCLINACION DE LAS PENDIENTES	DISECCION DEL RELIEVE	COBERTURA VEGETAL	UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	DISTANCIA A DRENAJES	FORMA DE LAS PENDIENTES	$\Sigma x_{ij}/n$	PESO RELATIVO $(\Sigma x_{ij} / n) / (\Sigma x_j)$
INCLINACION DE LAS PENDIENTES	1	2	3	4	3	4	2,83	0,30	
DISECCION DEL RELIEVE	0,5	1	2	3	2	4	2,08	0,22	
COBERTURA VEGETAL	0,33	0,5	1	4	3	4	2,14	0,23	
DISTANCIA A DRENAJES	0,25	0,33	0,25	1	3	2	1,14	0,12	
UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	0,33	0,5	0,33	0,33	1	2	0,75	0,08	
FORMA DE LAS PENDIENTES	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	1	0,5	0,05	
						Σx_j	9,44	1	

2.2.3.- La construcción del mapa de susceptibilidad y de los mapas de amenazas por deslizamientos.

Una vez procesados y normalizados los mapas originales a coberturas de criterios estos son combinados tomando en cuenta los pesos relativos calculados según el MJA tal como se ilustra en la figura 7. Para la construcción del mapa de susceptibilidad a deslizamientos se combinaron solo las coberturas que representaban los factores pasivos o intrínsecos al este proceso. De esta manera el álgebra para el mapa de susceptibilidad sería:

$$\begin{aligned} \text{SUSCEPTIBILIDAD} = & 0,30 (\text{INCLINACION DE LAS PENDIENTES}) + 0,22 (\text{DISECCION DEL RELIEVE}) \\ & + 0,23 (\text{COBERTURA VEGETAL}) + 0,12 (\text{DISTANCIA A DRENAJES}) \\ & + 0,08 (\text{UNIDADES GEOMORFOLOGICAS}) + 0,05 (\text{FORMA DE LAS PENDIENTES}). \quad (1) \end{aligned}$$

Debido a que la amenaza es el resultado de la susceptibilidad anteriormente calculada, más el efecto de un agente externo catalizador de la inestabilidad, en este análisis utilizaremos los mapas de distribución mensual de la precipitación del Área Metropolitana de Trujillo como el agente detonante. Para esta adición se consideró nuevamente la asignación de pesos, de una manera similar al anterior proceso pero que dada su simplicidad (al ser solo dos criterios a combinar), este no es ilustrado aquí. Se consideró que la susceptibilidad intrínseca de la cuenca tiene mayor responsabilidad en

los procesos de deslizamientos que la ocurrencia de precipitaciones, de aquí que los mapas de amenazas fueron calculados por las formulas:

$$\text{AMENAZAS POR DESLIZAMIENTOS (DIC-MAR)} = 0,7(\text{SUSCEPTIBILIDAD}) + 0,3(\text{PRECIP. DICIEMBRE-MARZO})$$

$$\text{AMENAZAS POR DESLIZAMIENTOS (ABR - JUL)} = 0,7(\text{SUSCEPTIBILIDAD}) + 0,3(\text{PRECIP. ABRIL - JULIO})$$

$$\text{AMENAZAS POR DESLIZAMIENTOS (AGO - NOV)} = 0,7(\text{SUSCEPTIBILIDAD}) + 0,3(\text{PRECIP. AGOSTO-NOVIEMBRE})$$

(2)

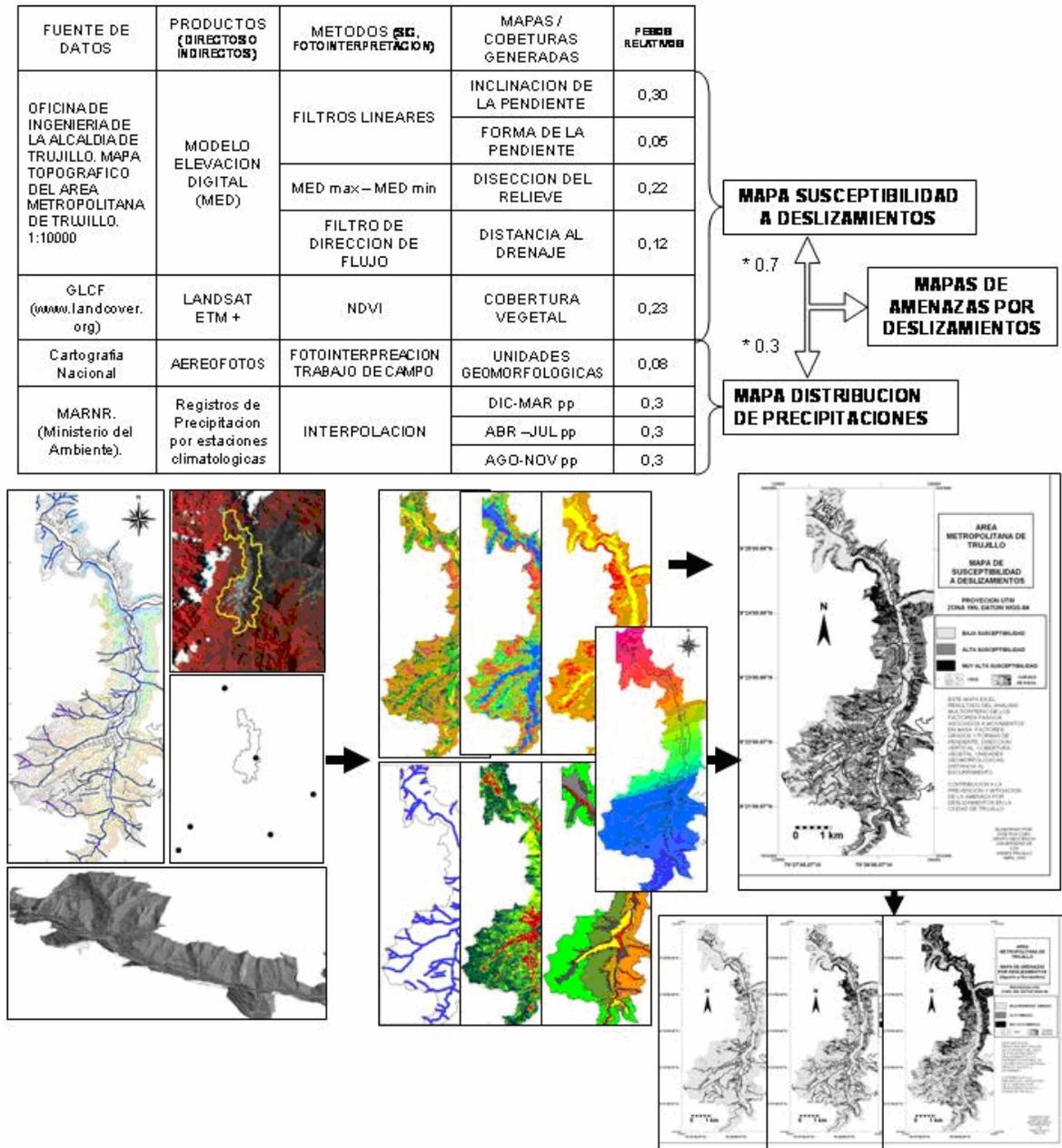


Figura 7. Datos, mapas generados o de criterios y pesos asignados para la producción de los mapas de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos en la Cuenca del Mocotíes.

Los valores finales que conforman tanto el mapa de susceptibilidad como los de amenazas pueden ser editados en una escala de 0 (menor susceptibilidad o amenaza) a 1 (mayor susceptibilidad o amenaza), por lo que la leyenda de estos pudiera estar basada en esta progresión de valores, sin embargo considerando que el usuario final demanda una mayor simplicidad en la lectura de estos mapas, se procedió entonces a clasificarlos en una escala de tres niveles: Bajo-Moderado, Alto y Muy Alto. Para ello es necesario calcular el diagrama de frecuencias o histograma del mapa y la curva de acumulados, definiendo entonces los valores límites entre las clases en las inflexiones de la curva. Igual tratamiento se hace con los mapas de amenazas, solo que los valores límites entre las clases han de ser iguales para los tres mapas, en este caso se utilizó el histograma de valores medios (el mapa de amenazas para el primer periodo lluvioso, Abril – Julio), para definir los valores límites a aplicar en el conjunto de mapas.

3.- SIGNIFICACION DE LOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZAS POR DESLIZAMIENTOS

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos (anexo 1), clasifica el Área Metropolitana de Trujillo en áreas categorizadas según su potencial latente de inestabilidad, mientras que en los mapas amenazas (anexos 2, 3 y 4), las áreas están categorizadas de acuerdo a una probable ocurrencia de deslizamientos al cumplirse dos condiciones: la existencia de una susceptibilidad (factor pasivo), frente a un agente detonante (factor activo), como en este caso son consideradas las lluvias. Por esta razón en los mapas de amenazas la intensidad de la susceptibilidad es incrementada o disminuida de acuerdo a la magnitud de las lluvias, por ejemplo la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos durante el periodo seco (anexo 2), es menor que durante el segundo periodo lluvioso (anexo 4), siendo sin embargo la susceptibilidad a deslizamientos teóricamente la misma en ambos periodos (anexo 1). Las áreas clasificadas como susceptibles y de amenaza a deslizamientos en estos mapas, reflejan la potencialidad de iniciarse un proceso de deslizamiento en sectores así evaluados, pero no necesariamente indican la distancia que puede recorrer el

material deslizado o donde éste será depositado. Por lo tanto se supone existe una amenaza adicional aguas abajo de las áreas clasificadas como de muy alta susceptibilidad y/o amenaza en los mapas ofrecidos, y en los trayectos y desembocaduras de los drenajes de estas áreas, particularmente si los cauces no son encajonados y atraviesan áreas de baja pendiente.

A grandes rasgos tenemos que las áreas menos susceptibles a deslizamientos son los fondos de valle del Río Castán, La Quebrada Los Cedros y Río Mocoy, (anexo 1); sin embargo tal como se explicaba anteriormente estas áreas son vulnerables a los deslizamientos provenientes de la parte superior de sus vertientes. Las áreas consideradas consistentemente mas susceptible y amenazadas por deslizamientos en la ciudad y durante todo el año (anexos 2, 3, y 4), son la vertiente izquierda del Río Castán, entre la Curva de Tucutucu y el encuentro Castán-Mocoy, y los torrentes encontrados en el cerro La Guaira – Santa Maria y en la vertiente inmediata a las avenidas Cuatricentenaria y la La Paz, las vertientes altas de Santa Rosa, algunos torrentes en Las Araujas y El Tamborón y la margen derecha el Río Castán entre San Jacinto y el Puente de La Avenida Cuatricentenaria.

El uso franco del MED construido para este análisis añade otra ventaja como lo es la visualización tridimensional (3D) de los mapas producidos, lo cual facilita tanto la interpretación como la familiarización del usuario con este tipo de producto cartográfico (figuras 8, 9, 10 y 11).

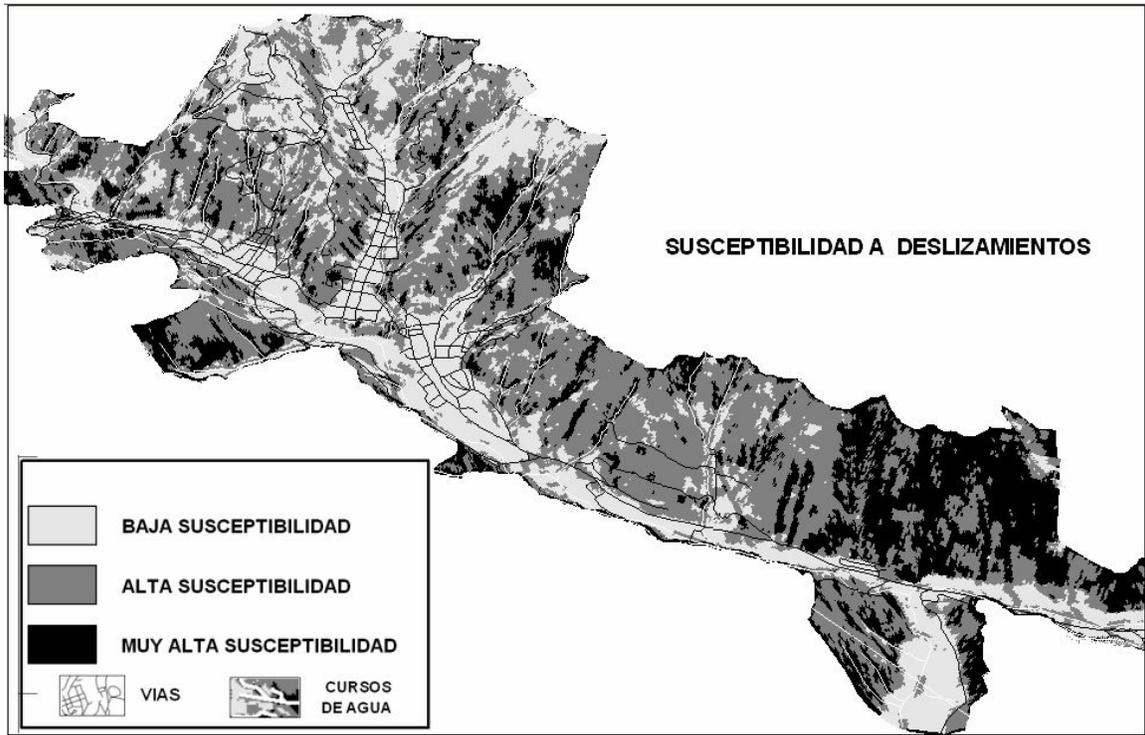


Figura 8. Vista 3D del mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

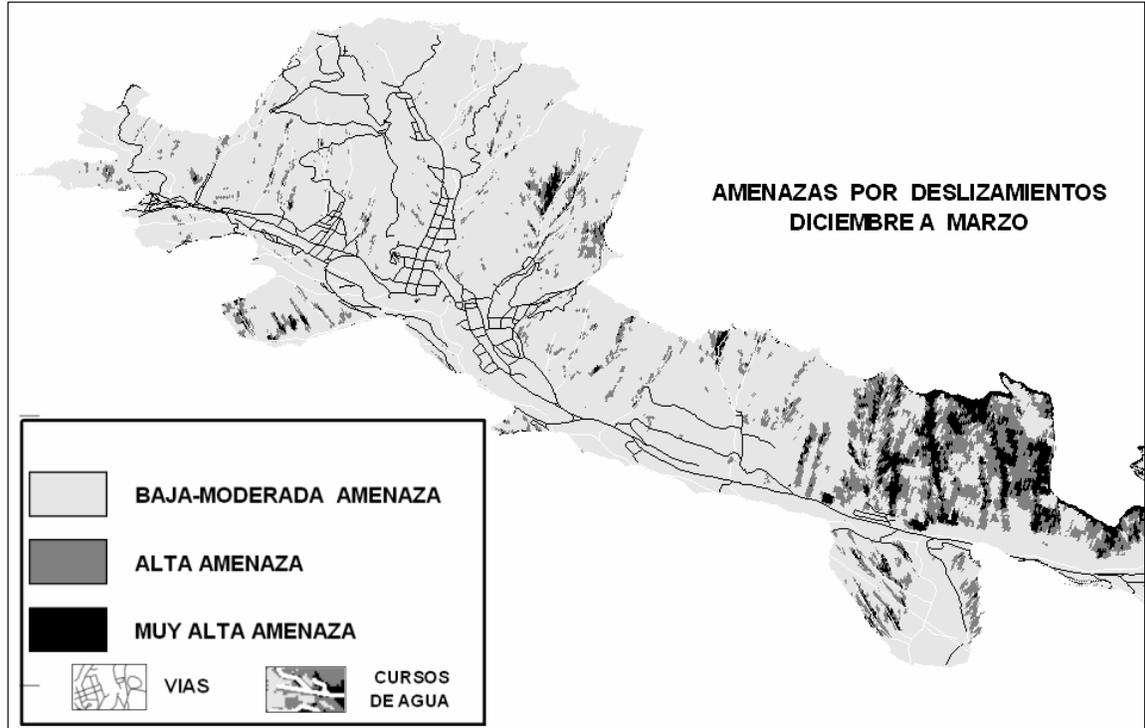


Figura 9. Vista 3D del mapa de amenazas por deslizamientos (Diciembre – Marzo).



Figura 10. Vista 3D del mapa de amenazas por deslizamientos (Abril – Julio).



Figura 11. Vista 3D del mapa de amenazas por deslizamientos (Agosto – Noviembre).

4.- CONCLUSIONES

Este análisis se orientó principalmente evaluar la susceptibilidad del Área Metropolitana de Trujillo a deslizamientos, por esta razón se enfoca principalmente al tratamiento de los factores pasivos contribuyentes en los procesos de deslizamientos.

El delimitación del Área Metropolitana de Trujillo responde solo a criterios técnicos relativos al área urbana y no a criterios físico-naturales, tales como cuencas, unidades vegetales, unidades morfológicas, etc., los cuales son más afines al marco natural de los factores y agentes que definen un escenario de inestabilidad de vertientes; en este sentido se recomienda utilizar el territorio del Área Metropolitana para análisis de tipo puntual y determinístico, mientras que para análisis de tipo mas regional que ayuden a definir potencial ocurrencias de flujo de detritos, inundaciones, etc.; debe ampliarse el alcance espacial a nivel de cuenca.

Las coberturas de criterios computadas (representantes de los factores y procesos ambientales), dependen en gran medida de la disponibilidad y de las posibilidades técnicas dadas por la información y su procesamiento.

La Evaluación MultiCriterio (EMC), es una metodología recomendable para este tipo de análisis debido a que permite al usuario la manipulación de distintas coberturas cartográficas relativas al problema planteado y finalmente la obtención de un resultado satisfactorio en corto tiempo. La normalización inicial de los mapas criterios a través del método del valor máximo es una técnica difundida y funcional, mientras que la evaluación de concordancia (pairwise) y su ingesta al Método de las Jerarquías Analítica (MJA), permite la síntesis lineal de criterios cuya fuente de origen es múltiple (experiencia, panel de expertos, literatura especializada, etc.).

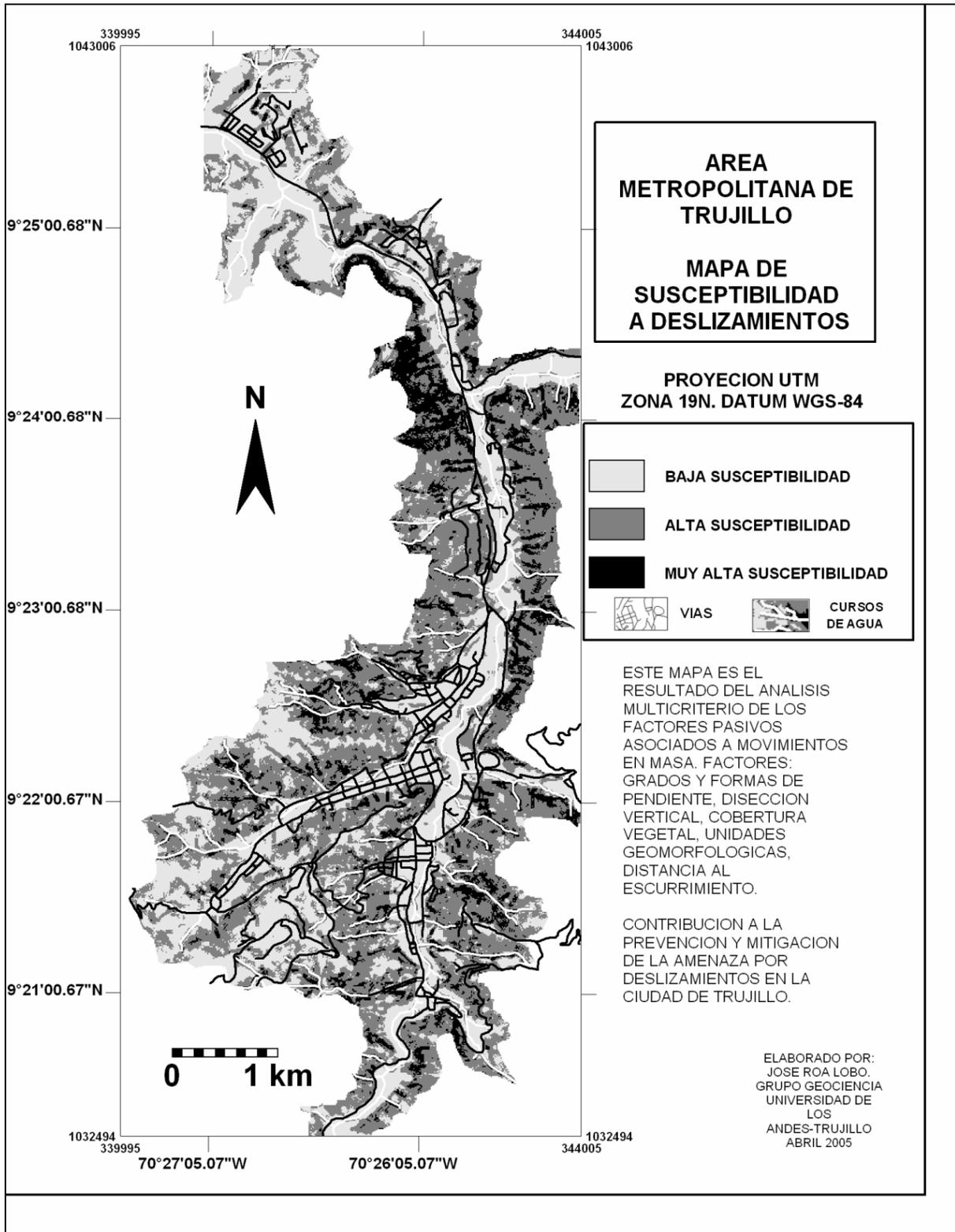
Los mapas de amenazas aquí presentados (Anexos 2, 3 y 4), podrían ser mejorados si la información referente a las precipitaciones es refinada en términos de intensidad, duración y frecuencia y espacializada para su debido tratamiento bajo la EMC. Es altamente recomendable validar estos resultados en campo.

5.- BIBLIOGRAFIA

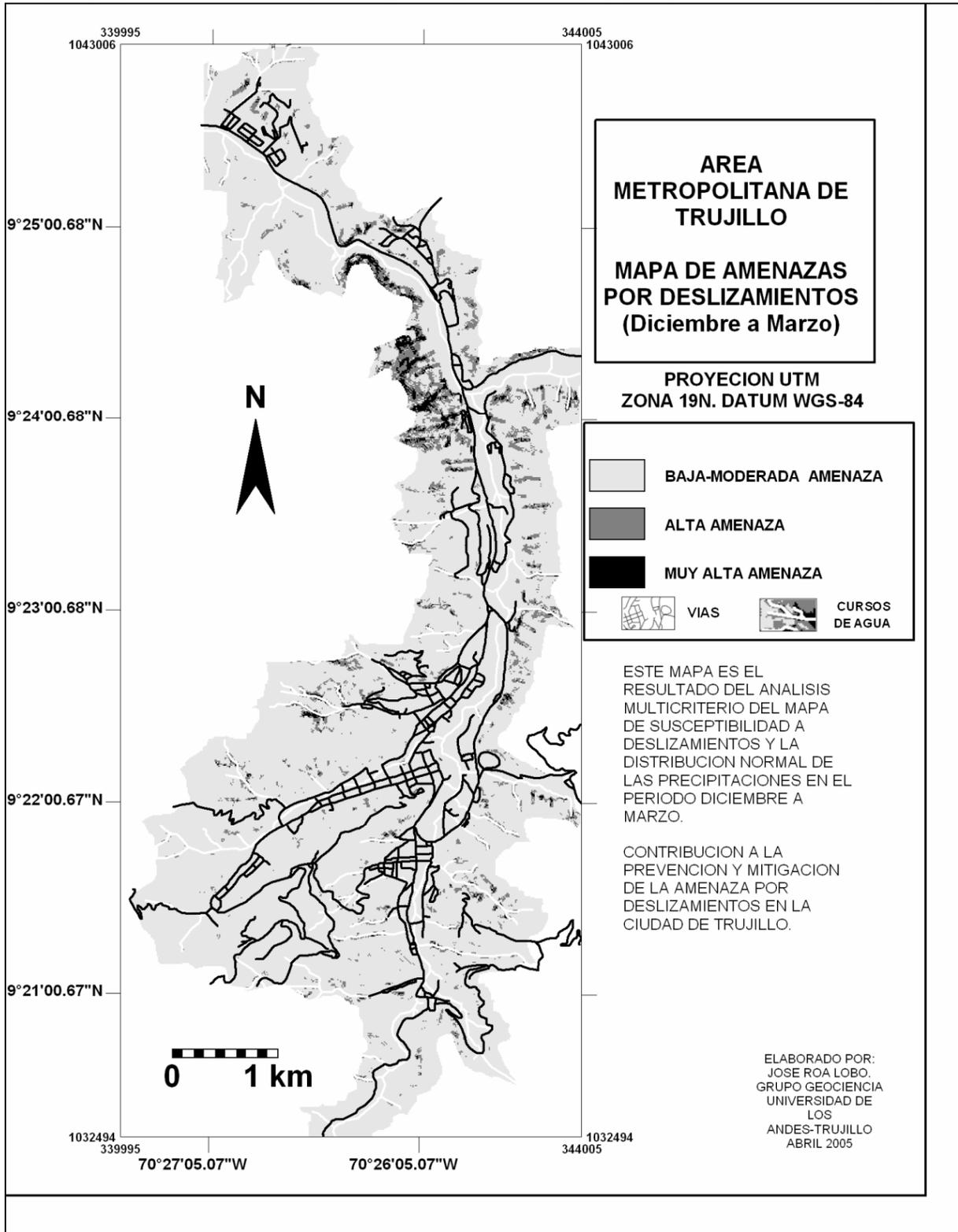
- Castellanos Abella, E.A. and van Westen, C.J. 2005. Development of a system for landslide risk assessment for Cuba. In: Proceedings of the international conference on landslide risk management, 31 May - 3 June, 2005 Vancouver. / ed. by O. Hungr, R. Fell, R. Couture and E. Eberhardt. London: Balkema, 2005. pp. 1-10.
- Crozier, M. J. 1986. Landslides: Causes, Consequences and Environment, Croom Helm, London.
- Cruden, D.M. 1991. A Simple Definition of a Landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 43, pp. 27-29.
- Eastman, J. R., Jin, W., Kyem, P. A. K. and Toledano, J. 1995. Raster procedures for multi-criteria/multiobjective decisions. Photogrammetry and Remote Sensing. 61(5); 539- 547.
- Ferrer, O., C. 1984. Un enfoque metodológico para la evaluación de la estabilidad relativa de los terrenos en la conurbación Valera - Trujillo /Andes Venezolanos): la ciudad de Trujillo y sus alrededores como caso especial de estudio. ULA. Instituto de Geografía . Mérida.
- Huang, B., Cheu, R., and Liew, Y. 2003. GIS-AHP Model for HAZMAT Routing with security Considerations. In: IEEE 6th International Conference of Intelligent Transportation Systems, 10-12 Oct. 2003. Shanghai, China.
- ITC. 2003. ILWIS 3.2 Academic – User’s Guide. ITC, Enschede, The Netherlands.
- Jiang, H. and Eastman, J. R. 2000. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. International Journal of Geographical Information Systems 14(2), 173-184.
- Malczewski, J. 1999. GIS and Multiple-criteria Decision Analysis. New York: John Wiley & Sons.
- Malczewski, J. 1996. A GIS-based approach to multiple criteria group decision making. International Journal of Geographical Information Systems 10(8), 955-971.
- MARNR. Division de Meteorologia y Climatologia. 2004. Datos de precipitación de las estaciones ubicadas en el Estado Trujillo (Archivos internos). Trujillo.
- Mendoza de Rosas, Ana Beatriz. 1999. Desigualdades Socioespaciales de la calidad de vida en el área metropolitana de la ciudad de Trujillo, Estado Trujillo. En: Talleres Leishmaniasis en Trujillo - Venezuela N° 6 Noviembre 1999.
http://www.saber.ula.ve/cgi-win/be_alex.exe?Acceso=T016300000241/3&Nombrebd=ssaber&Encab=0
- Nettleton, I., Martin, S., Hencher, S., and R Moore. 2005. Debris Flow Types and Mechanisms. From: SCOTTISH ROAD NETWORK LANDSLIDES STUDY. SCOTTISH EXECUTIVE PUBLICATIONS. In: <http://www.scotland.gov.uk/Publications/2005/07/08131738/17492>
- Research Systems Inc. 2004. ENVI 4.0 v.
- Saaty, T.L. 1990. Multicriteria Decision Making - The Analytic Hierarchy Process, Volume I, AHP Series, McGrawHill, New York, NY.

- The Global Land Cover Facility-GLCF. Universidad de Maryland. 2005. LANDSAT ETM+ and SRTM data. In: www.landcover.org (ultima visita 25 de Agosto del 2005).
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP. 2005. After the Tsunami, Rapid Environmental Assessment. In: http://www.unep.org/tsunami/reports/Tsunami_report_complete.pdf (Ultima visita 25 de Agosto, 2005)
- Varnes, D.J. 1984. Landslide Hazard Zonation. A Review of Principles and Practice. UNESCO press, Paris, 63pp.
- Wieczorek, G..1996. Landslide Triggering Mechanisms. Chapter 4. in: A.K. Turner and R.L. Schuster (eds.), Landslides—Investigation and Mitigation. Transportation Research Board Special Report 247:36-75. Washington, D.C.: National Academy of Sciences.

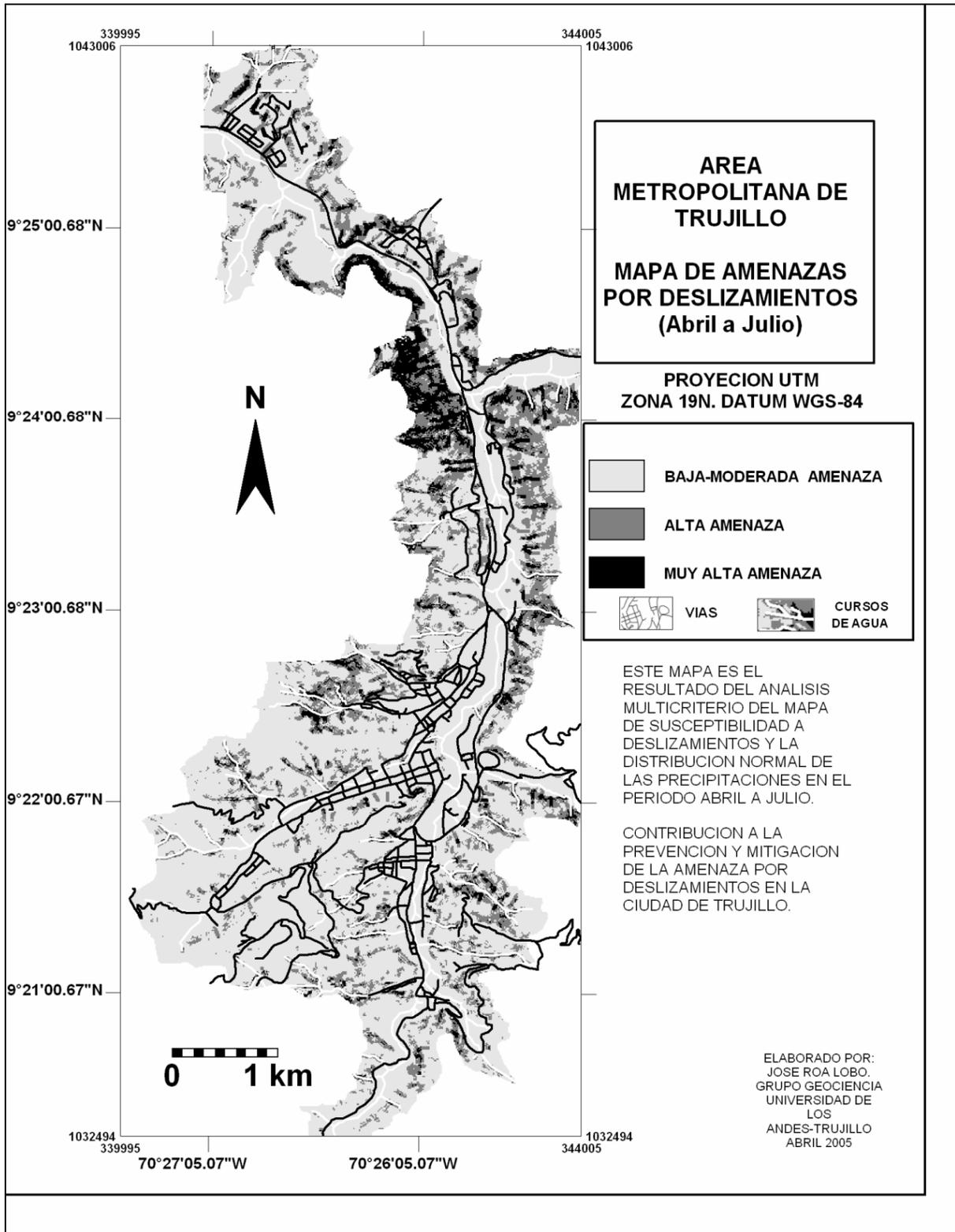
ANEXO 1. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS



ANEXO 2. MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS DICIEMBRE - MARZO.



ANEXO 3. MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS ABRIL – JULIO



ANEXO 4. MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS AGOSTO – NOVIEMBRE

