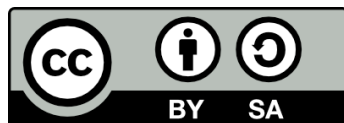




UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Metodologías para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos basadas en el análisis SIG. Aplicación en el NW de Nicaragua

Marta Guinau Sellés



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- Compartigual 4.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - Compartigual 4.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0. Spain License.**

**METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA
SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS
BASADAS EN EL ANÁLISIS SIG.
APLICACIÓN EN EL NW DE NICARAGUA**

Marta Guinau Sellés

Tesis doctoral

2007

RISKNAT
RISCOS NATURALS

DEPARTAMENT DE GEODINÀMICA I GEOFÍSICA
FACULTAT DE GEOLOGIA



UNIVERSITAT DE BARCELONA



Grup de recerca en Riscos Naturals – RISKNAT –
Departament de Geodinàmica i Geofísica
Facultat de Geologia
UNIVERSITAT DE BARCELONA

**METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD
A LOS DESLIZAMIENTOS BASADAS EN EL ANÁLISIS SIG.
APLICACIÓN EN EL NW DE NICARAGUA**

Tesis doctoral elaborada por

Marta Guinau Sellés

Para optar al título de Doctora en Ciencias de la Tierra

El presente estudio ha sido realizado por Marta Guinau Sellés aprobada por el programa de doctorado en “Ciències de la Terra” (Departament de Geodinàmica i Geofísica), bienio 2002 – 2004, bajo la dirección del Dr. Joan Manuel Vilaplana Fernández, del Departamento de Geodinàmica i Geofísica de la Universitat de Barcelona.

Barcelona, Septiembre 2007

Dr. Joan Manuel Vilaplana Fernández
Director

Marta Guinau Sellés
Doctoranda

Esta tesis se ha realizado en el marco del proyecto Consolider Ingenio 2010 – CSD 2006-0004 “Topo-Iberia”, dentro del grupo de investigación de riesgos naturales RISKNAT, financiado por la Generalitat de Catalunya en el proyecto SGR 2001 – 0081.

AGRADECIMIENTOS

Nunca pensé que este día podía llegar, finalmente se hizo realidad y aquí estoy, escribiendo estas líneas para agradecer a todas aquellas personas que de alguna manera han contribuido a hacer realidad este trabajo.

En primer lugar, agradecer al director de este estudio Joan Manuel Vilaplana su interés y apoyo en las primeras ideas de trabajar en Nicaragua. Gracias por confiar en mí e integrarme en el grupo RISKNAT. Gracias por sus consejos y recomendaciones que durante este tiempo han contribuido en mi formación como geóloga y como investigadora.

A Raimón Pallàs por sus aportes durante las primeras campañas de campo, y por su interés, esfuerzo y hojo crítico en la redacción y revisión de las publicaciones. Gracias por haberme enseñado a analizar críticamente los resultados de un trabajo que siempre se puede mejorar. A Glòria Furdada, Ma Angels Marquès, y Jaume Calvet por sus contribuciones y apoyo durante los viajes a Nicaragua.

Gràcias a todos los compañeros del grupo de geodinámica externa del Departamento de Geodinámica y Geofísica y especialmente a Jaume Bordonau y a Francesc Sàbat, por su confianza y por haberme facilitado la organización del trabajo y así poder compaginar cómodamente mi labor como doctoranda y docente.

También quiero agradecer a Juan Remondo, Jaime Bonachea y demás compañeros de la Universidad de Cantabria su hospitalidad, amabilidad y consejos que hicieron de mi estadía en Santander un punto de inflexión en la tesis, abriendome una puerta a partir de la cual pude llegar a este final.

A los compañeros del Centro de Investigaciones Geocientíficas (CIGEO) de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN), especialmente a Dionisio Rodriguez y Marvin Valle, por haberme acogido y por brindarme todas las facilidades para desarrollar mi trabajo, especialmente por su apoyo logístico durante las campañas de campo. También agradezco a los conductores de los vehículos, Santiago, Roger, Marvin y Diego, que me acompañaron al campo y me facilitaron el acceso a las regiones rurales del norte de Nicaragua.

A los compañeros del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), Wilfried Strauch, Guillermo Chavez, Antonio Álvarez y Josué Donado por su apoyo y aportación de material e ideas. A Miriam Downs y los miembros del grupo de trabajo de deslizamientos del proyecto MET-ALARN (INETER-COSUDE), por su interés en el análisis de deslizamientos en Nicaragua y por las discusiones en las sesiones de trabajo que siempre ayudan a mejorar el trabajo. Especialmente quiero agradecer a Angélica Muñoz su apoyo y su ayuda en la organización del trabajo y la recopilación de material.

A los compañeros de Solidaridad Internacional y de la oficina de Masatepe, especialmente a Jaap van der Zee y Heike Holink con quienes empecé la aventura por las comunidades rurales más remotas de Nicaragua y quienes me enseñaron a desenvolver mi trabajo en el campo y a manejar los Sistemas de Información Geográfica.

A Ester Falgàs y Xavi Alemany con quienes empezó la aventura en Nicaragua que ha llegado hasta la realización de esta tesis. Gracias por su amistad compañerismo y apoyo. Y a Ignasi Vilajosana por su interés y apoyo con la programación.

A los alumnos de la UNAN, Harold, Martha, Lareska, Denis, Isaac, Ligia Esther, Jean Carlos y Bismark que me ayudaron con el trabajo de campo. Y muy especialmente a Ligia Esther y su familia que me brindaron su casa de Estelí para hacer más cómodas mis estadias en la zona de estudio. Gracias a todos ellos por su simpatía, amabilidad y apoyo que hicieron muy agradable y llevadero el duro trabajo de campo.

A los miembros de la Union Nacional de Agricultores y Ganaderos y a los miembros de los Comités Locales de Emergencia, quienes me apoyaron personalmente y logísticamente durante las campañas de campo. Gracias por su hospitalidad, amabilidad y apoyo.

A todos los compañeros del Departamento que hacen tan agradable el ambiente de trabajo. Sobre todo a la “Junta de Festes i Xerinoles Varies” que siempre está al pié del cañón para organizar cualquier evento que amenice la jornada. A la Teresa, a la Aída y a l’Anna que con la alegría que las caracteriza siempre intentan resolver cualquier problema burocrático o logístico. Y muy especialmente a los compañeros de despacho, Blanca, David, Antonio, Lau y temporalmente Jesu, que han aguantado mis estados de euforia y desespero y me han apoyado en todo momento.

A todos los amigos y compañeros de la facultad, “els Tragapans” y “las Amapolas” y a “la colla de Falset”, que siempre me han dado ánimos para seguir adelante y poder finalizar esta tesis.

A toda mi familia y especialmente a Oliver que me han apoyado en todo momento y me han animado a culminar este camino. Gracias también a Aina que sin saberlo, me ha dado ánimo y fuerza para terminar esta tesis y empezar otra, sin duda la más importante de mi vida, la de ser madre.

MUCHAS GRACIAS a todas aquellas personas que de una forma u otra han contribuido a que este trabajo se pudiera realizar.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Estructura de la memoria	3
1.2. Introducción a los análisis de Peligrosidad y Susceptibilidad	5
1.3. Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera	7
1.4. Descripción de la zona de estudio	12
1.5. Descripción de los movimientos de ladera en la zona de estudio	22
1.6. Presentación de las publicaciones	32
 2. OBJETIVOS	 37
 3. PUBLICACIONES	 41
3.1. Bloque I: A pragmatic approach to debris flow hazard mapping	45
in areas affected by hurricane Mitch: Example from NW Nicaragua.	
3.2. Bloque II: A feasible methodology for landslide susceptibility	65
assessment in developing countries: a case-study of NW Nicaragua after Hurricane Mitch.	
3.3. Bloque III: GIS-based debris flow source and runout susceptibility	83
assessment from DEM data. A case study in NW Nicaragua.	
 4. RESUMEN DE LOS RESULTADOS	 109
4.1. Resultados del Bloque I: Zonas Piloto de Cinco Pinos y San Francisco del Norte	112
4.1.1. Mapa e inventario de movimientos de ladera	112
4.1.2. Resultado del análisis comparativo entre movimientos de ladera	124
y propiedades del terreno	
4.1.3. Mapa de susceptibilidad	125
4.1.4. Mapa de peligrosidad	127
4.2. Resultados del Bloque II: Zona del norte del Departamento de Chinandega	129
4.2.1. Mapa e inventario de movimientos de ladera	129
4.2.2. Resultado del análisis comparativo entre movimientos de ladera	131
y propiedades del terreno	

	Pág.
4.2.3. Mapa de susceptibilidad	137
4.3. Resultados del Bloque III: Zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón	141
4.3.1. Mapa e inventario de movimientos de ladera	141
4.3.2. Resultado del análisis comparativo entre movimientos de ladera	145
y propiedades del terreno	
4.3.3. Mapa de susceptibilidad	152
5. RESUMEN DE LA DISCUSIÓN	159
6. RESUMEN DE LAS CONCLUSIONES	169
7. BIBLIOGRAFÍA	175
 ANEXO	
I- Resumen de las publicaciones	i
A. Resumen de la publicación: Pallàs et al. 2004	
B. Resumen de la publicación: Guinau et al. 2005	
B. Resumen de la publicación: Guinau et al. 2007	
II- Original de las publicaciones	xxix
III- Mapas temáticos Bloque- II	xxxii
IV- Mapas temáticos Bloque- III	xliii

LISTADO DE TABLAS**Tabla del Bloque II**

Table 1; (Pg. 73) Example of the Terrain Units and the weights associated to their classes.

Tabla del Bloque III

Table 1; (Pg. 91) Percentage of the total study area covered by each parameter class

Tabla 4.1.; (Pgs. 118 -123) Datos de campo de los movimientos de ladera inventariados en las zonas de Cinco Pinos y San Francisco del Norte.

Tabla- 4.2; (Pg. 131) tabla de datos correspondiente al factor pendiente

Tabla- 4.3; (Pg. 132) tabla de datos correspondiente al factor litología

Tabla- 4.4; (Pg. 134) tabla de datos correspondiente al factor profundidad de suelo

Tabla- 4.5; (Pg. 135) tabla de datos correspondiente al factor textura del suelo

Tabla- 4.6; (Pg. 136) tabla de datos correspondiente al factor uso del suelo

Tabla- 4.7; (Pg. 146) tabla de datos correspondiente al factor pendiente

Tabla- 4.8; (Pg. 148) tabla de datos correspondiente al factor orientación de las laderas

Tabla- 4.9; (Pg. 149) tabla de datos correspondiente al factor curvatura planar

Tabla- 4.10; (Pg. 150) tabla de datos correspondiente al factor curvatura en perfil

LISTADO DE FIGURAS

- Fig. 1.1. (Pg. 12) Mapa de situación de Nicaragua – América Central. Sobre Honduras, se puede observar la traza del huracán Mitch (zona oscurecida).
- Fig. 1.2. (Pg. 13) Localización de las zonas de trabajo (en negro). La Zona-A en el N del Departamento de Chinandega y la Zona-B entre los Departamentos de Estelí y León. Ambas situadas en el NW de Nicaragua.
- Fig. 1.3. (Pg. 15) Mapa Geológico de Nicaragua con la localización de las zonas de estudio A y B.
- Fig. 1.4. (Pg. 19) Mapa de Isoyetas durante la afectación del Huracán Mitch (21-31 de Octubre de 1998). Acumulados de Precipitación en mm.
- Fig. 1.5. (Pg. 19) Imagen de zonas de cultivo e infraestructuras afectadas por deslizamientos después del paso del huracán Mitch entre los municipios de Cinco Pinos y San Francisco del Norte.
- Fig. 1.6. (Pg. 22) A la izquierda imagen de la comunidad de Los Limones en el municipio de San Nicolás, Departamento de Estelí. A la derecha, camino a uno de los deslizamientos inventariados en San Francisco del Norte, Departamento de Chinandega, con uno de los guías locales.
- Fig. 1.7. (Pg. 26) Imagen de una de las corrientes de derrubios inventariadas en la zona de San Nicolás, Departamento de Estelí. En la zona de rotura el movimiento se inicia como un deslizamiento superficial y rápidamente evoluciona a un flujo de detritos.
- Fig. 1.8. (Pg. 27) Ejemplo de una antigua colada de tierra identificada en la zona del municipio de Cinco Pinos (límites de movimiento en rojo), con indicios de removilización (a la Izquierda). A la derecha, detalle de apertura de grietas en el terreno.
- Fig. 1.9. (Pg. 28) Gráfico de porcentajes de los mecanismos de movilización observados en campo en la zona de estudio (A) Norte del Departamento de Chinandega.
- Fig. 1.10. (Pg. 29) Gráfico de porcentajes de los mecanismos de movilización observados en campo en la zona de estudio (B), entre San Nicolás y Sta. Rosa del Peñón.
- Fig. 1.11. (Pg. 29) A la izquierda, conjunto de la formación superficial observada en la cicatriz de un movimiento de ladera en la zona de San Nicolás, con dos capas de material diferenciado. La foto derecha superior muestra un detalle de la formación detrítica formada por bloques angulosos a subredondeados de granulometrías diferentes, envueltos de una matriz fina. En la foto derecha inferior detalle del material de alteración de la roca del sustrato formado por materiales finos de granulometría más homogénea.
- Fig. 1.12. (Pg. 30) Perfil sintético de una ladera mostrando un sustrato rocoso con capacidad de infiltración muy baja, cubierto de una formación superficial con permeabilidad más elevada. Formación de un acuífero subsuperficial con importante recarga en zonas de pendiente suave.
- Fig. 1.13. (Pg. 31) Ejemplos de surgencias de agua observadas en zonas afectadas por movimientos de ladera. En la izquierda, zona de rotura observada en el municipio de San Pedro del Norte (Departamento de Chinandega). En la derecha, surgencia de agua entre la formación superficial y la roca del sustrato, observada en un movimiento reciente, correspondiente al evento de junio del 2004 en Río Blanco (fotografía cedida por Victor Casado – Farmacéuticos Mundi).
- Fig. 1.14. (Pg. 31) Perfil sintético de una ladera de la zona de estudio mostrando las posibles ubicaciones de la superficie de rotura respecto a la formación superficial y al sustrato rocoso (Vilaplana et al., 2002).

Figuras del Bloque I

- Fig. 1; (Pg. 45) Location of the study area and localities referred to in the text. The path of Hurricane Mitch is shown in grey, based on USGS (1999) data.
- Fig. 2; (Pg. 46) General aspect of the study area. View looking west from Cerro Chávez (Fig. 4C). Cerro Morroñoso is on the left and Cerro Nancital on the background. White patches correspond to large debris flows and areas affected by rock-falls, which were triggered by Hurricane Mitch.
- Fig. 3; (Pg. 47) Cropped and enlarged aerial photographs corresponding to the San Francisco del Norte area (Fig. 4C). Compare photograph (a), taken prior to Hurricane Mitch, from (b) taken after Hurricane Mitch. White patches on (b) correspond to large debris flows and areas affected by rock-falls triggered by Hurricane Mitch. Graphic scale is approximate. The area is illuminated from the south; rotate 180° for easier relief appreciation.
- Fig. 4 (Pgs. 50 - 52) (A) Landslide Inventory Map of the Cinco Pinos area. (B) Landslide Inventory Map of the Cerro San Diego and El Nancital areas. (C) Landslide Inventory Map of the San Francisco del Norte area. Elevations are in m, and coordinates are Transverse Mercator.
- Fig. 5: (Pg. 53) Frequency distribution of debris flows failure angles measured in the field. The histogram in blue corresponds to angles measured both in volcanic and plutonic areas. The superimposed histogram in dark blue corresponds to angles measured in plutonic bedrock areas.
- Fig. 6; (Pg. 57) Example of the Susceptibility Map corresponding to the Cinco Pinos area (locality in Fig. 4A). Areas highlighted in deep red correspond to the ones sloping equal to or higher than 20°, and are the ones considered susceptible to failure. Flow lines correspond to possible debris-flows paths, taking the areas highlighted in deep red and mapped scars as possible source areas. See text for detailed discussion.
- Fig. 7: (Pg. 58) Range of possible cases from higher to lower hazard. The symbols at the right hand side are in correspondence with the legend in Fig. 4. Different cases 1 to 7 correspond to the seven degrees of hazard distinguished in the Hazard Map (Fig. 8). See detailed discussion in text.
- Fig. 8: (Pg. 59) Example of the Landslide Hazard Map corresponding to the Cinco Pinos area (locality in Fig. 4A). See detailed discussion in text.

Figuras Bloque II

- Fig. 1: (Pg. 68) Study area location (in black), and place names referred to in the text. The grey band shows Hurricane Mitch path, based on USGS (1999) data.
- Fig. 2: (Pg. 69) (A) Landslide map. (B) Enlarged portion of the landslide map showing failure-zones (in red) and the areas affected by the path or the deposition of mobilized material (in brown). Coordinates are Universal Transverse Mercator.
- Fig. 3: (Pg. 71) (A) Terrain units map (different colours corresponding to terrain units 1 to 491) and a portion of the associated data table showing the first twenty Terrain Units and six terrain factors. The values in the second column in the table correspond to terrain unit codes. Columns three to eight show an example of the classes of each terrain factor which characterize Terrain Units. (B) Example of thematic maps obtained from the terrain units map. Each one shows a terrain factor defined by a given number of classes.
- Fig. 4: (Pg. 72) Division of the study area into Training Zone (in dark grey) and Test Zone (in light grey).
- Fig. 5: (Pg. 74) Landslide susceptibility map obtained in Training Zone.
- Fig. 6: (Pg. 75) Landslide susceptibility map obtained in Test Zone.
- Fig. 7: (Pg. 76) Graph showing the percentage of area affected by failures on each Susceptibility Class.

Figuras Bloque III

- Figure 1. (Pg. 86) Location of the Departamento de Estelí and Departamento de Leon in NW Nicaragua. In the enlarged zone, the study area (in black) and localities referred to in the text.
- Figure 2. (Pg. 88) Landslide map and an enlarged portion showing failure-zones (in brown) and the areas affected by the path or the deposition of mobilized material (in red).
- Figure 3. (Pg. 89) Division of the study area into training zone (in dark grey) and test zone (in light grey).
- Figure 4. (Pg. 90) Thematic maps obtained from the DEM. Each one shows a terrain factor defined by a given number of classes; (from left up to right down) Aspect, Slope, Planar Curvature and Profile Curvature.
- Figure 5. (Pg. 92) Graphic showing the cumulative percentage of failures versus the terrain failure susceptibility index (TFSI). The intervals used to define the susceptibility classes are marked in different grey tones: In white the range containing 0% of failures, in yellow the range containing 10% of failures, in orange the range containing 30% of failures and in red the range containing 60% of failures.
- Figure 6. (Pg. 93) Graphic showing the relative failure density (RFD) for each terrain failure susceptibility class.
- Figure 7. (Pg. 94) Terrain failure susceptibility map obtained for the whole study area.
- Figure 8. (Pg. 96) A: Map showing the downslope influence obtained from the terrain failures triggered by Hurricane Mitch in yellow and the Hurricane Mitch runout areas in deep red. B: An enlarged area of this map showing the overestimation of the model.
- Figure 9. (Pg. 96) Graphic showing the accumulated relative runout density (RRD) in % versus the Downslope Influence (DI) values.
- Figure 10. (Pg. 97) The same enlarged area of figure 8 where the DI values are showed in 3 classes; $DI = 0$ in grey, $0 < DI < 0.05$ in yellow and $DI \geq 0.05$ in orange. Note that Hurricane Mitch affected areas (in red) are concentrated inside the area with $DI \geq 0.05$.
- Figure 11. (Pg. 98) A graphic example of the four raster files obtained after modelling the flow paths from each terrain failure susceptibility map. In each file the pixels that are non susceptible to debris flow were identified with zero and the pixels that are susceptible with a different value (1 to 4). The combination of these files enables to obtain the runout susceptibility map where the pixels were reclassified in four susceptibility classes.
- Figure 12. (Pg. 99) Runout susceptibility map obtained in the whole study area.
- Figure 13. (Pg. 99) Graphic showing the relative runout density (RRD) in % for each runout susceptibility class obtained from the combination of the Hurricane Mitch runout areas and the runout susceptibility map.
- Figure 14. (Pg. 100) Matrix where the terrain failure susceptibility class on the columns and the runout susceptibility class on the rows were combined in order to define four susceptibility classes for the final susceptibility zonation; susceptibility high in deep red, medium in orange, low in yellow and very low in green.
- Figure 15. (Pg. 101) Landslide susceptibility map obtained after terrain failure susceptibility and runout susceptibility integration.
- Figure 16. (Pg. 101) Graphic showing the relative landslide density (in %) for each susceptibility class obtained from the combination of landslides triggered by Hurricane Mitch, and the final susceptibility map.
- Fig. 4.1. (Pg. 113) Mapa de movimientos de ladera de la zona piloto de Cinco Pinos. Cotas topográficas en m. Sistema de coordenadas UTM.
- Fig. 4.2. (Pg. 114) Mapa de movimientos de ladera de la zona piloto entre Cinco Pinos y San Francisco del Norte. Cotas topográficas en m. Sistema de coordenadas UTM.
- Fig. 4.3. (Pg. 115) Mapa de movimientos de ladera de la zona piloto de San Francisco del Norte. Cotas topográficas en m. Sistema de coordenadas UTM.

- Fig. 4.4. (Pg. 125) Distribución de pendientes en la zona de salida de flujos de detritos medidas en campo. El histograma en azul muestra las pendientes medidas en rocas volcánicas y rocas plutónicas. El histograma en azul oscuro muestra las pendientes medidas en zonas de rocas plutónicas.
- Fig. 4.5. (Pg. 126) Mapa de susceptibilidad correspondiente a la zona piloto de Cinco Pinos (localización en Fig. 4.1). Las áreas en violeta corresponden a zonas con pendiente igual o superior a 20°, consideradas zonas susceptibles a la rotura. Las líneas de flujo corresponden a posibles trayectorias de flujos de detritos teniendo en cuenta las zonas susceptibles a la rotura.
- Fig. 4.6. (Pg. 128) Mapa de peligrosidad correspondiente a la zona piloto de Cinco Pinos (localización en Fig. 4.1).
- Fig. 4.7. (Pg. 130) Mapa de movimientos de ladera correspondiente a la zona del norte del Departamento de Chinandega.
- Fig. 4.8. (Pg. 132) Gráfico de distribución de la densidad de área afectada en cada clase de pendiente, mostrando el Grado de Influencia (GI) de cada clase.
- Fig. 4.9. (Pg. 133) Gráfico de distribución de la densidad de área afectada en cada clase de litología, mostrando el Grado de Influencia (GI) de cada clase.
- Fig. 4.10. (Pg. 135) Gráfico de distribución de la densidad de área afectada en cada clase de profundidad del suelo, mostrando el Grado de Influencia (GI) de cada clase.
- Fig. 4.11. (Pg. 136) Gráfico de distribución de la densidad de área afectada en cada clase de textura del suelo, mostrando el Grado de Influencia (GI) de cada clase.
- Fig. 4.12. (Pg. 137) Gráfico de distribución de la densidad de área afectada en cada clase de uso del suelo, mostrando el Grado de Influencia (GI) de cada clase.
- Fig. 4.13. (Pg. 139) Mapa de susceptibilidad correspondiente al área del norte del Departamento de Chinandega.
- Fig. 4.14: (Pg. 140) Gráfico del porcentaje de área de estudio ocupado por cada una de las clases de susceptibilidad a la rotura.
- Fig. 4.15. (Pg. 142) Mapa de movimientos de ladera correspondiente a la zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón.
- Fig. 4.16. (Pg. 143) Ejemplo de consulta de la base de datos asociada al mapa de movimientos de ladera correspondiente a la zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón. A través del SIG y clicando encima de los puntos inventariados se obtiene la ficha con la información recopilada en el campo en este punto.
- Fig. 4.17. (Pg. 147) Comparación de los gráficos de densidad de roturas (gráfico superior) y de Info_Val (gráfico inferior) para cada clase de pendiente.
- Fig. 4.18. (Pg. 148) Comparación de los gráficos de densidad de roturas (gráfico superior) y de Info_Val (gráfico inferior) para cada clase de orientación.
- Fig. 4.19. (Pg. 150) Comparación de los gráficos de densidad de roturas (gráfico superior) y de Info_Val (gráfico inferior) para cada clase de curvatura planar.
- Fig. 4.20. (Pg. 151) Comparación de los gráficos de densidad de roturas (gráfico superior) y de Info_Val (gráfico inferior) para cada clase de curvatura en perfil.
- Fig. 4.21: (Pg. 153) Mapa de susceptibilidad a la rotura de los materiales correspondiente e la zona de San Nicolás, Departamento de Estelí y Santa Rosa del Peñón, Departamento de León.
- Fig. 4.22: (Pg. 154) Gráfico del porcentaje de área de estudio ocupado por cada una de las clases de susceptibilidad a la rotura.
- Fig. 4.23: (Pg. 155) Mapa de susceptibilidad al alcance de los flujos de detritos correspondiente a la zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón.

Fig. 4.24: (Pg. 156) Gráfico del porcentaje de área ocupada por cada clase de susceptibilidad al alcance de los flujos de detritos.

Fig. 4.25: (Pg. 157) Mapa de susceptibilidad a los flujos de detritos correspondiente a la zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón.

Fig. 4.26: (Pg. 158) Gráfico del porcentaje de área ocupada por cada clase de susceptibilidad a los flujos de detritos

1- INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Estructura de la memoria

Esta memoria se ha estructurado siguiendo la normativa de la Universidad de Barcelona para la presentación de tesis como compendio de publicaciones. A continuación se presentan los diferentes apartados que forman la memoria.

1. Introducción:

En este primer apartado se presenta y justifica la temática del estudio. Se definen y describen los términos específicos utilizados y se introducen las publicaciones que forman el cuerpo central de la memoria. Así mismo, se presenta la relación temática que existe entre las diferentes publicaciones.

2. Objetivos:

En este apartado se citan los objetivos específicos de cada una de las publicaciones y el objetivo general de la tesis.

3. Publicaciones:

Después de la introducción y los objetivos se presentan las tres publicaciones que se estructuran como tres bloques temáticos. En estos tres apartados, se han transcrito las publicaciones en texto continuo y con las figuras en color para unificar el formato y hacer más amena la lectura de las mismas. Las publicaciones en el formato original de la revista correspondiente se han adjuntado en el Anexo.

3.1. Bloque I: A pragmatic approach to debris flow hazard mapping in areas affected by hurricane Mitch: Example from NW Nicaragua.

3.2. Bloque II: A feasible methodology for landslide susceptibility assessment in developing countries: a case-study of NW Nicaragua after Hurricane Mitch.

3.3. Bloque III: GIS-based debris flow source and runout susceptibility assessment from DEM data. A case study in NW Nicaragua.

4. Resumen de los resultados

En este resumen se presentan las cartografías obtenidas en cada uno de los bloques temáticos de este trabajo. Además, para complementar la información presentada a través de las publicaciones, también se recogen y describen los resultados obtenidos en el análisis comparativo entre características del terreno y movimientos de ladera, desarrollado en cada uno de los bloques.

5. Resumen de la discusión

En este apartado se realiza una discusión global resumida del conjunto del trabajo.

6. Resumen de las conclusiones

En este apartado se presenta un resumen las conclusiones globales del trabajo, ya que las conclusiones específicas de los artículos se presentan con los mismos en el apartado 3.

7. Bibliografía

En este apartado se recogen las referencias bibliográficas de las citas que aparecen tanto en las publicaciones como en el resto de la memoria.

Finalmente se presenta un Anexo con la documentación adjunta complementaria, que se especifica a continuación:

I- Resumen de las publicaciones

En este primer apartado del Anexo se presentan, siguiendo la normativa, un resumen de cada una de las publicaciones en una de las lenguas oficiales de la Universidad de Barcelona (en este caso en castellano).

II- Original de las publicaciones

Se adjuntan las publicaciones en el formato original de la revista, texto en doble columna y figuras en blanco y negro.

III- Mapas temáticos Bloque II

En este apartado se adjuntan los mapas temáticos presentados en el Bloque II, en un formato mayor que el de las publicaciones para facilitar su consulta.

IV- Mapas temáticos Bloque III

En este apartado se adjuntan los mapas temáticos presentados en el Bloque III, en un formato mayor que el de las publicaciones para facilitar su consulta.

Con esta memoria se adjunta un CD-Rom en el cual se recogen en formato pdf tanto la memoria de este trabajo como las cartografías presentadas. El CD-Rom también incluye una base de datos Access correspondiente al inventario de movimientos de ladera del Bloque III, Zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón.

1.2. Introducción a los análisis de peligrosidad y susceptibilidad

Los fenómenos naturales catastróficos influyen severamente en el desarrollo humano y económico de las zonas afectadas. A pesar de que las pérdidas económicas generadas por estos fenómenos son más importantes en países desarrollados, los países en vías de desarrollo sufren las mayores pérdidas en términos sociales y de vidas humanas, ya que sus recursos, infraestructuras y sistemas de prevención están poco desarrollados y, sobretodo porque tienen una vulnerabilidad muy elevada.

El impacto económico y social que la ocurrencia de fenómenos de origen natural puede producir en un territorio está controlado por tres factores; la Peligrosidad, la Exposición y la Vulnerabilidad. La peligrosidad es un término probabilístico que indica donde, cuando y con que intensidad se producirá un fenómeno. La exposición permite determinar el número de personas y bienes que pueden estar sometidos a un fenómeno. Y la vulnerabilidad cuantifica el nivel de daños esperados en los elementos expuestos dada la intensidad del fenómeno. Estos tres conceptos permiten determinar el Riesgo, que es la probabilidad de daños personales, materiales, económicos, sociales, y medioambientales en un determinado lugar y en un periodo de tiempo determinado, debidos a un fenómeno natural concreto.

Los movimientos de ladera son uno de los fenómenos más peligrosos en zonas de montaña. El análisis de la peligrosidad por movimientos de ladera permite desarrollar medidas para la mitigación de los efectos de estos fenómenos, como el ordenamiento

territorial, la implementación de sistemas de alerta temprana o la implantación de obras de defensa.

Hasta finales de los años 70, los análisis de peligrosidad se basaban en métodos empíricos en los cuales el experto, en base a su experiencia, determinaba el grado de peligrosidad del terreno a los movimientos de ladera. A partir de finales de los 70, la implementación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) supone un avance para las metodologías de análisis de la peligrosidad a los movimientos de ladera. Estos sistemas facilitan el manejo de grandes cantidades de datos y la introducción de procesos estadísticos que permiten determinar donde, cuando y como se va a producir un movimiento de ladera.

Para realizar una predicción espacial de los movimientos de ladera se utiliza el análisis de la Susceptibilidad. Este concepto, que determina la propensión del terreno a generar inestabilidad, se basa en el Principio del Actualismo, el cual considera que los fenómenos físicos que rigen el comportamiento del terreno en el pasado, serán los mismos en el presente y futuro bajo las mismas condiciones. De esta manera, el análisis de las características del terreno en zonas que han sido afectadas por movimientos de ladera, ayuda a determinar zonas que, sin haber sido afectadas, presentan las mismas características y en consecuencia, son zonas potenciales de ser afectadas por este fenómeno.

Para hacer una predicción temporal o bien se datan los movimientos de distintos episodios, o bien se utiliza el periodo de recurrencia de los factores que desencadenan los movimientos de ladera. Para este análisis son necesarias series temporales de datos o registros históricos que permitan asociar el desarrollo de los movimientos pasados con algún factor que los desencadene (precipitaciones intensas, movimientos sísmicos, erosión al pie de laderas, excavaciones). Con el periodo de recurrencia del factor desencadenante de movimientos de ladera en el pasado, se podrá determinar cuando es posible que se repita el evento y por tanto, determinar cuando se desarrollarán nuevos movimientos de ladera en el futuro.

Para un análisis completo de la peligrosidad, a parte de determinar la susceptibilidad (predicción espacial) y la frecuencia (predicción temporal), hace falta determinar la

intensidad del fenómeno. El análisis del volumen de material movilizado y su velocidad, permite conocer la energía de impacto de los movimientos de ladera. Dada la complejidad del funcionamiento de los movimientos de ladera, determinar el volumen y la velocidad para los movimientos futuros es el punto más complicado de los análisis de peligrosidad. En muchas ocasiones la escasez de series de datos históricos y de datos cuantitativos que permitan una estimación del volumen y la velocidad, dificulta el análisis de la peligrosidad. En estos casos, se suele utilizar la susceptibilidad para obtener una zonificación del terreno según su propensión a generar movimientos de ladera que, si bien no aportará suficiente información para proyectar obras de defensa, permitirá detectar zonas seguras para la implementación de planes de ordenamiento territorial y de sistemas de alerta temprana, con el objetivo de mitigar los efectos de los movimientos de ladera.

1.3. Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera

Des de los años 70 se han desarrollado gran cantidad de metodologías de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera, la mayoría de ellas basadas en la predicción espacial de la inestabilidad del terreno. No obstante, hay que tener en cuenta que algunos tipos de movimientos de ladera pueden afectar grandes extensiones de terreno desde la zona donde se inicia el movimiento hasta la zona donde se deposita el material movilizado. Determinar la extensión de las zonas afectadas, ya sea por la inestabilidad del terreno, o bien el trayecto o depósito de material movilizado, es fundamental para la reducción de los efectos de los movimientos de ladera. Es por esto que hay que diferenciar dos tipos de susceptibilidad, la susceptibilidad a la rotura (predicción espacial del inicio de movimientos de ladera) y la susceptibilidad al alcance (predicción espacial del alcance de los materiales movilizados).

A continuación se presentan algunas metodologías de análisis de la susceptibilidad a la inestabilidad del terreno y al alcance de los materiales, referidas a distintos tipos de deslizamientos, sin entrar en los métodos específicos de análisis de susceptibilidad para los desprendimientos de rocas.

1.3.1. Metodologías de análisis de la susceptibilidad a la inestabilidad del terreno

Las metodologías para la evaluación de la susceptibilidad a la inestabilidad del terreno se basan en el análisis comparativo entre las zonas afectadas por inestabilidad del terreno y las características de este. Este análisis permite conocer las características del terreno en las zonas afectadas en el pasado por inestabilidad y determinar zonas que, si bien no han sido afectadas, presentan las mismas características y en consecuencia, son zonas potencialmente inestables. Existen numerosas metodologías para la evaluación de la susceptibilidad a la inestabilidad del terreno, las cuales pueden clasificarse en análisis heurísticos, estadísticos y determinísticos.

- **Métodos heurísticos:**

Los análisis heurísticos se basan en el uso de la opinión del experto para determinar cuales son los factores del terreno que condicionan la estabilidad de estos y cual es el grado de influencia de cada uno de estos factores en la inestabilidad del terreno. El experto, en base a sus conocimientos adquiridos durante largos periodos de tiempo analizando los movimientos de ladera de una zona, determina cuales son las zonas que presentan las mismas características del terreno que las encontradas en zonas afectadas por inestabilidad y que en consecuencia son zonas susceptibles a generar movimientos de ladera (Anbalagan, 1992; van Westen et al., 1999). Estos métodos se consideran cualitativos ya que la determinación de zonas potenciales a la inestabilidad se realiza cualitativamente. Un problema que presentan estos métodos es que requieren de información sobre los deslizamientos y los factores que condicionan su formación recogida durante un largo periodo de tiempo, característica que en muchos estudios es difícil de obtener debido a las limitaciones de tiempo y presupuesto disponibles para realizarlos. Otras limitaciones de estos métodos son la reproducción de los resultados obtenidos por parte de otros expertos y la subjetividad que implica la decisión personal del experto a la hora de seleccionar los factores condicionantes y su influencia.

- **Métodos estadísticos:**

Estos análisis se basan en la determinación estadística de los factores que condicionan la inestabilidad del terreno y su grado de influencia. A diferencia de los

métodos heurísticos, los estadísticos se consideran métodos cuantitativos ya que utilizan procesos numéricos para cuantificar la propensión del terreno a la inestabilidad. Los métodos estadísticos se pueden clasificar en dos grandes grupos, los análisis bivariantes y los multivariantes.

Los métodos estadísticos bivariantes se caracterizan por analizar cada uno de los factores condicionantes de forma independiente. La combinación de cada característica del terreno con la distribución de movimientos de ladera identificados en la zona de estudio permite determinar cual es su contribución a la inestabilidad del terreno. En algunas ocasiones se aplican procesos estadísticos para determinar la influencia relativa entre los diferentes factores condicionantes considerados en el estudio. Algunos ejemplos de análisis bivalente son las Funciones de Favorabilidad (Chung and Fabbri, 1993; Remondo et al, 2003a), o el método InfoVal (Information Value) aplicado por Yin and Yan (1988), van Westen (1993) y Saha et al. (2005).

Los métodos multivariantes, en cambio, analizan diversos factores condicionantes a la vez y determinan, mediante procedimientos estadísticos, el grado de influencia de cada uno de los factores condicionantes. Estos métodos, además, determinan cuales de los factores condicionantes son relevantes para el análisis y discriminan aquellos que no lo son. Algunos ejemplos de métodos multivariantes son la Regresión Logística (Carrara et al. 1991; Ayalew et al., 2005), la Regresión Múltiple (Dai and Lee, 2002), y las Funciones Discriminantes (Baeza & Corominas, 2001; Santacana, et al., 2003; Guzzetti et al., 2005). Una limitación importante de estos métodos es que requieren de grandes cantidades de datos para producir resultados consistentes. Además, utilizan procesos estadísticos complejos que si se aplican sin tener en cuenta la mecánica de los procesos involucrados en la inestabilidad del terreno, pueden resultar poco consistentes.

- **Métodos determinísticos:**

Estos métodos se basan en el análisis de las leyes físicas y mecánicas universales de conservación de masa, energía y equilibrio de fuerzas de movilización y de resistencia (Gökceoglu and Aksoy, 1996; Crosta et al., 2005). Este tipo de análisis únicamente se aplica para determinar la estabilidad de taludes o laderas de reducidas dimensiones.

Debido a que requieren la aplicación de técnicas lentas y económicamente costosas, no son adecuadas e incluso resultan prohibitivas cuando se trata de evaluar la susceptibilidad en regiones relativamente amplias.

1.3.2. Metodologías de análisis de la susceptibilidad al alcance de movimientos de ladera

Los métodos de análisis del alcance de los movimientos de ladera, desarrollados hasta la actualidad se pueden agrupar en tres categorías; modelos empíricos, modelos analíticos y modelos numéricos (Dai et al., 2002).

- Modelos empíricos:

Se basan en la utilización de herramientas prácticas para la determinación del alcance de los movimientos de ladera. Son modelos sencillos, relativamente fáciles de usar y no requieren de información demasiado específica. Con una base de datos históricos sobre deslizamientos se pueden desarrollar estos modelos. No obstante, estos métodos únicamente aportan una aproximación preliminar de la trayectoria de los materiales (Dai et al., 2002). Un ejemplo de este tipo de análisis es el método de Intercambio de Masa (mass-change), el cual se basa en la consideración de que a medida que el material se desplaza ladera abajo, el volumen o masa inicial de material es modificado por la pérdida o deposición de material y que la masa desplazada se para cuando el volumen de material se vuelve insignificante (Cannon and Savage, 1988). Otro ejemplo de modelo empírico es el Ángulo de Alcance, definido como el ángulo de la línea que une la cicatriz de inicio del movimiento con el margen más distal de la masa desplazada. Corominas (1996) realizó un estudio detallado de la influencia de diversos factores sobre el ángulo de alcance, y mostró una correlación entre el volumen de material movilizado y el ángulo de alcance. Para todos los tipos de movimientos analizados se encontró una disminución del ángulo de alcance con el incremento del volumen de material.

- Modelos analíticos:

Describen el comportamiento físico de los materiales movilizados mediante formulaciones que consideran la masa desplazada como un punto singular. El ejemplo más simple de estos métodos es el llamado *Sled Model* (Sassa, 1988), el cual asume que la pérdida de energía durante el movimiento del material es debido a la fricción y

describe el deslizamiento como un cuerpo adimensional que se desplaza por una trayectoria descendiente. Aunque este modelo puede aportar información para el cálculo del alcance, la velocidad y la aceleración del material movilizado, únicamente es aplicable para deslizamientos de roca de pequeña escala con un desplazamiento limitado, y que no se desintegren durante el movimiento. Hutchinson (1986) desarrolló otro tipo de modelo analítico para la predicción del alcance de movimientos de material sin cohesión. Para la aplicación de estos métodos son necesarios algunos parámetros específicos como la presión de poro, el grosor de material movilizado y la relación de esfuerzos en el plano de deslizamiento.

- Modelos numéricos:

Incluyen simulaciones numéricas de la conservación de la masa y la energía, que describen la dinámica de los materiales y/o modelos reológicos para describir el comportamiento del material. Dejando a parte el caso específico de los desprendimientos de rocas, estos modelos generalmente se utilizan para el análisis del alcance de movimientos fluidales. Con la aplicación de un conjunto de ecuaciones que describen las propiedades de los flujos, pueden predecir la velocidad, aceleración y el alcance de los flujos. Algunos ejemplos de este tipo de modelos para la predicción del alcance de los movimientos de ladera son los desarrollados por Hungr (1995), Costa (1997), Hürlimann et al. (2003), Crosta et al. (2005) y Rickenmann et al. (2006). Este tipo de modelos generalmente se aplican en zonas pequeñas o en estudios de detalle, incorporan técnicas muy sofisticadas y las propiedades reológicas que requieren son difíciles de determinar.

En este trabajo se presentan diferentes metodologías de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera. En primer lugar, se propone un análisis de la susceptibilidad al inicio y al alcance de los movimientos de ladera basado en un método heurístico. Posteriormente se propone una metodología para la evaluación de la susceptibilidad a la inestabilidad del terreno basada en un análisis estadístico bivariante. Y finalmente, en el tercer bloque temático de este estudio, se propone una nueva metodología para evaluar la susceptibilidad a la inestabilidad del terreno, basada en el análisis estadístico bivariante y complementada con una metodología para evaluar la susceptibilidad al alcance de los flujos de detritos basada en un modelo empírico.

1.4. Descripción de la zona de estudio

1.4.1. Localización geográfica

Nicaragua se encuentra entre las coordenadas geográficas 10°45' – 15°05' de Latitud Norte y entre 83°15' – 87°40' de Longitud Oeste. Tiene una extensión de 128.000 Km². Limita al norte con Honduras, al este con el Océano Atlántico, al sur con Costa Rica y al oeste con el Océano Pacífico (figura 1.1).



Fig. 1.1. Mapa de situación de Nicaragua – América Central. Sobre Honduras, se puede observar la traza del huracán Mitch (zona oscurecida).

Este trabajo se desarrolla en dos áreas de estudio. La primera de ellas (Zona-A) se encuentra en el norte del Departamento de Chinandega, junto a la frontera con Honduras, y comprende los municipios de San Pedro del Norte, Cinco Pinos, San Francisco del Norte, Santo Tomás del Norte y la parte más septentrional del municipio de Somotillo (figura 1.2). La segunda zona de estudio (Zona-B) se encuentra entre los municipios de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón, en los Departamentos de Estelí y León respectivamente (figura 1.2).

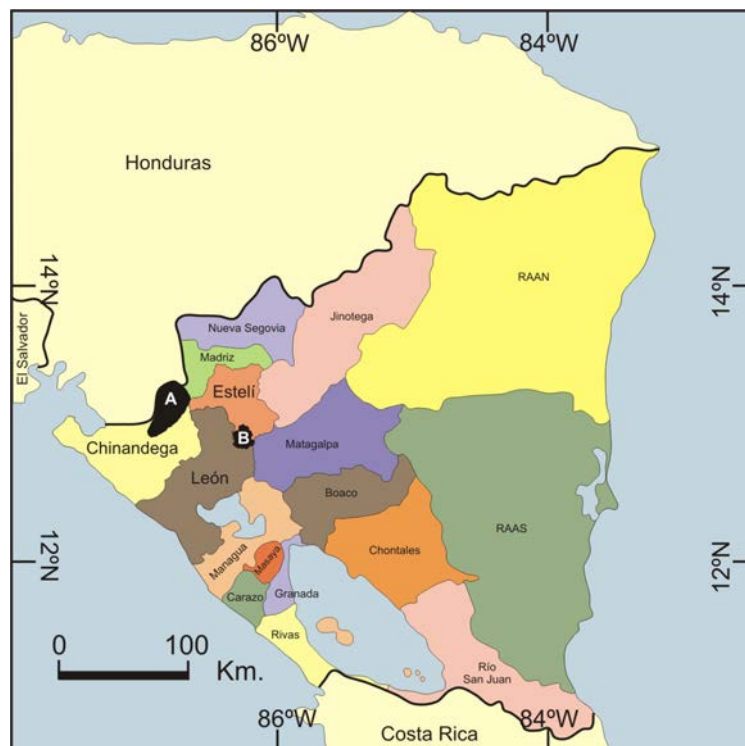


Fig. 1.2. Localización de las zonas de trabajo (en negro). La Zona-A en el N del Departamento de Chinandega y la Zona-B entre los Departamentos de Estelí y León. Ambas situadas en el NW de Nicaragua.

Geográficamente, las zonas de estudio se encuentran en el extremo noroeste de la región denominada *Región de Tierras Altas del Interior* (Fenzl, 1988). Región que se extiende desde el borde noroccidental de la Depresión Nicaragüense hasta la Llanura Atlántica. Topográficamente es la región más elevada, con un relieve fuertemente accidentado, especialmente en el extremo norte, donde se encuentran las elevaciones más importantes, con altitudes entre 1.500 y 2.000 m_{sndm}. Esta región está constituida por una meseta volcánica modelada por ríos caudalosos que se extienden de norte a sur, formando un sistema de drenaje con redes principalmente angulares y en menor cantidad dendríticas.

1.4.2. Contexto geológico

Geológicamente, América Central está formada por dos grandes provincias geológicas; la Provincia Geológica Septentrional, y la Provincia Geológica Meridional. Nicaragua, se encuentra en el límite entre estas dos provincias, de forma que su geología se puede estructurar en dos bloques: la zona norte del país, que pertenece a la Provincia Geológica Septentrional, y la zona sur que pertenece a la Provincia Geológica Meridional.

La zona estudiada, pertenece a la Provincia Geológica Septentrional, la cual representa una corteza continental constituida por un basamento de rocas metamórficas paleozoicas y una cobertera formada por rocas sedimentarias del Mesozoico y Terciario, y rocas volcánicas y plutónicas terciarias (figura 1.3).

A final de Mesozoico, la subducción de la placa de Cocos con la placa del Caribe causó compresiones regionales, originando la formación de un anticlinal y un sistema de fallas o fisuras asociado, a través de las cuales se desarrollaron erupciones de Ignimbritas y Piroclastos, ocupando gran parte del Área del Pacífico de Nicaragua.

Durante el Terciario se desarrolló una intensa actividad volcánica continental que cubrió gran parte de la provincia con extensos depósitos de rocas volcánicas. Estos materiales volcánicos se agrupan en tres formaciones; Coyol (Mioceno Superior / Plioceno), Matagalpa (Oligoceno / Mioceno Inferior) y Pre-Matagalpa (Oligoceno Inferior) (Fenzl, 1988).

En las zonas de estudio, afloran los materiales volcánicos de las formaciones Coyol y Matagalpa (figura 1.3). Estos materiales corresponden a Tobas riolíticas a dacíticas, lavas andesíticas a basálticas e ignimbritas, en el caso de la Formación Matagalpa. Y en el caso del Grupo Coyol, corresponden a lavas basálticas, andesíticas, riolíticas o dacíticas.

A final del Mioceno e inicio del Pleistoceno, continuaron activas las tensiones tectónicas que dieron origen a las fracturas de la Depresión Nicaragüense. El magma originado en la zona de subducción, ascendió a través de este sistema de fracturas, formando los conos volcánicos de la cordillera de “Los Maribios”, algunos de los cuales permanecen aún activos. Además, esta actividad magmática originó intrusiones graníticas que en la zona de estudio, quedan intruidas en los materiales volcánicos del Grupo Coyol y la Formación Matagalpa.

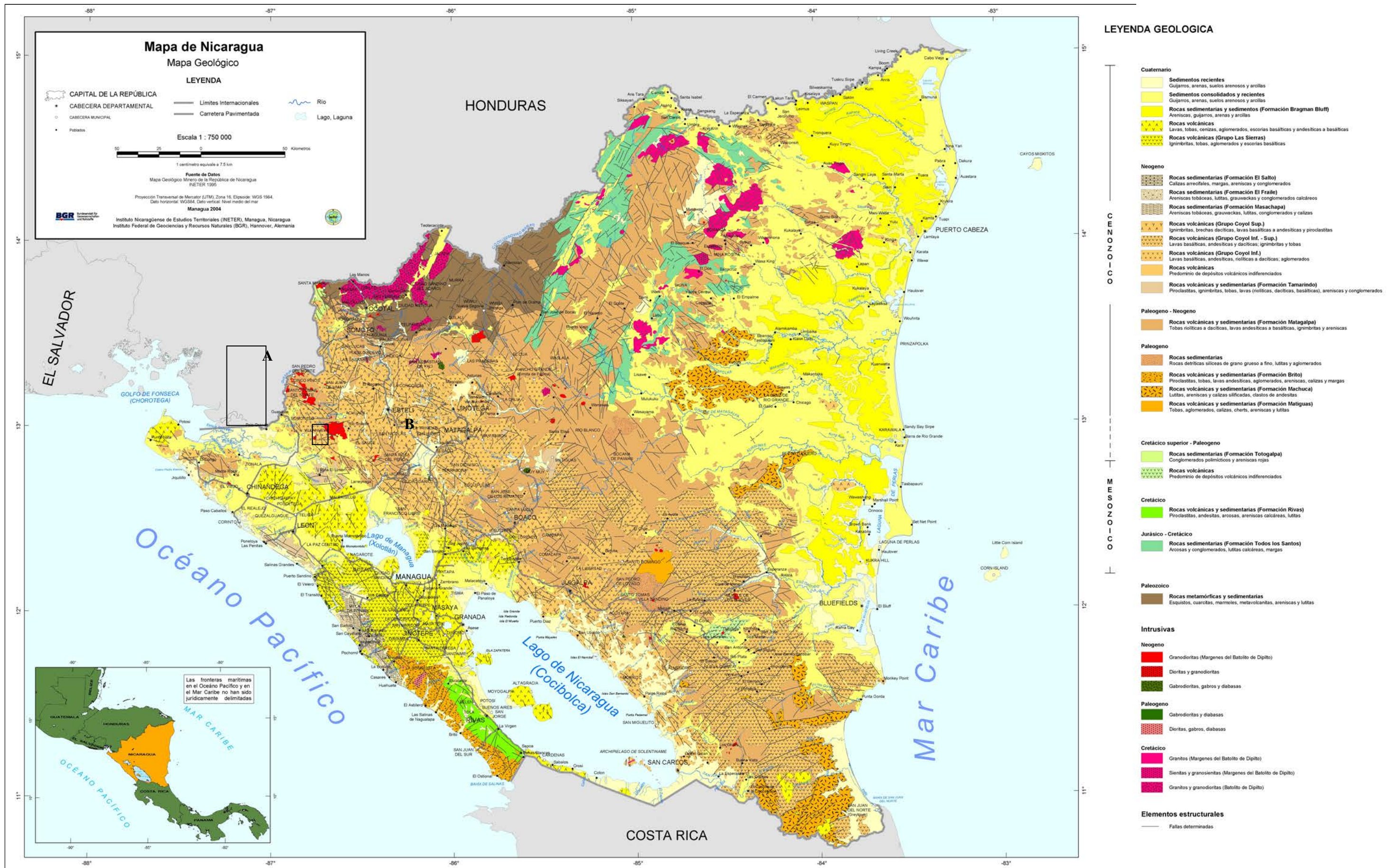


Fig. 1.3. Mapa Geológico de Nicaragua con la localización de las zonas de estudio A y B.
Fuente: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), Nicaragua e Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR), Alemania.

1.4.3. Contexto socioeconómico

Las zonas en las que se centra este trabajo se empezaron a poblar hace poco más de un siglo. Según datos recogidos en el proyecto “*Transmisión de Gobiernos Locales 2000*” (Caracterizaciones Municipales, 2000), los municipios de esta región pertenecen a los más pobres de Nicaragua, lo que significa una pobreza promedio por encima del 96,4%, con un 26% de desnutrición entre niños menores de 5 años. Esto, en términos de vulnerabilidad, representa una muy baja capacidad de recuperación (resiliencia) frente a los efectos de posibles fenómenos naturales catastróficos.

La población total del área estudiada, suma unos 35.000 habitantes, de los cuales el 45% son niños menores de 15 años. El 80% de la población vive en comunidades, en ocasiones alejadas de la cabecera municipal, donde se encuentran generalmente los servicios básicos (centros de salud, escuelas, comercios,...). Las infraestructuras, como vías de comunicación (carreteras, caminos, senderos, etc.) presentan un deplorable estado de conservación. Es frecuente que numerosas comunidades queden aisladas en cuanto empieza el periodo de lluvias (de mayo a octubre).

A todos estos problemas se les añade el crecimiento de la frontera agrícola. El cual comporta un aumento de la utilización de zonas con pendiente importante (entre 30 y 50%) para agricultura y ganadería extensiva, provocando un incremento importante de la erosión del terreno. La utilización de la quema para la limpieza de zonas de pasto y cultivo, y la tala de árboles para leña, aserrío y construcción, han provocado un incremento importante de la deforestación en los últimos años, que actualmente se encuentra en un 80% del área estudiada. Esto, también ha comportado un incremento de los procesos erosivos y empobrecimiento de la tierra.

La actividad económica de la región se basa en el cultivo de subsistencia de maíz, frijol y cereal. Pocas familias disponen de algunas cabezas de ganado para la producción de carne y leche para el consumo local y la comercialización en zonas vecinas.

1.4.4. Efectos del huracán Mitch

Nicaragua se encuentra en una zona de clima tropical caracterizado por una estación seca desde noviembre a abril, durante la cual se registra el 10% de la precipitación anual, y una estación húmeda, de mayo a octubre, con una pluviometría que va de 800mm a 1.200mm dependiendo de la región del país. La temperatura suele ser bastante homogénea durante el año, variando entre 15°C y 30°C de promedio, dependiendo de la región del país.

El huracán Mitch afectó Nicaragua des del 21 al 31 de octubre de 1998. Fue considerado uno de los cinco huracanes de mayor intensidad del Siglo XX adquiriendo el grado V en la escala de Saffir/Simpson. La confluencia de una cuña marítima y continental de altas presiones desde el este y el norte, el ascenso de la Zona de Convergencia Intertropical desde el sur, y el empuje de un núcleo de bajas presiones que avanzó desde el Pacífico, provocaron que el huracán tuviese una trayectoria lenta y errática, haciendo muy particulares sus efectos sobretodo en territorio Hondureño y Nicaragüense.

En el mapa de isoyetas presentado a continuación (figura 1.4), se puede observar la inversión del patrón normal de precipitaciones en el país. Normalmente, las precipitaciones descienden de este a oeste, sin embargo, durante el Mitch, en la costa este se registran valores de 50 – 250 mm. acumulados de precipitación, durante los días de afectación del huracán Mitch, mientras que hacia la costa Pacífica, y atravesando el sistema montañoso central, las precipitaciones van incrementando. Igualmente, las precipitaciones van incrementando hacia el norte alcanzando en solo diez días los 1.597mm en la ciudad de Chinandega (a 100 km de la zona de estudio A) y los 784mm en la ciudad de San Isidro (a unos 20Km de la zona de estudio B) (INETER, 1998).

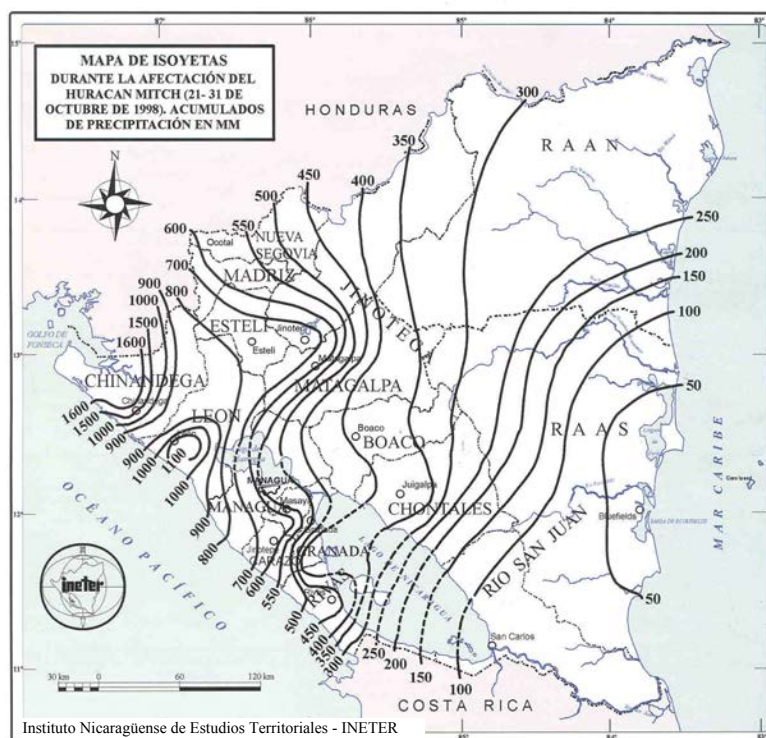


Fig. 1.4. Mapa de Isoyetas durante la afectación del Huracán Mitch (21-31 de Octubre de 1998). Acumulados de Precipitación en mm.

Las intensas precipitaciones del Huracán Mitch generaron un importante impacto en los municipios estudiados, afectando principalmente las áreas agrícolas y ganaderas. La importante erosión hídrica, el crecimiento de la red de drenaje y los movimientos de ladera, generados por el huracán, conllevaron la pérdida de entre el 4 y el 7% de área utilizable y un 60% de tierras con usos reducidos, lo cual implica una gran pérdida socio-económica, y un incremento importante de la vulnerabilidad alimentaria (figura 1.5).



Fig. 1.5. Imagen de zonas de cultivo e infraestructuras afectadas por deslizamientos después del paso del huracán Mitch entre los municipios de Cinco Pinos y San Francisco del Norte.

1.5. Descripción de los movimientos de ladera en la zona de estudio

Uno de los puntos importantes de este estudio es la identificación y el análisis (in situ) de los puntos afectados por movimientos del terreno, poco tiempo después del evento que los originó, el huracán Mitch. A continuación se describe el proceso de recogida de información y el análisis de esta, para determinar la tipología y el funcionamiento de los movimientos de ladera, así como identificar las características del terreno que condicionan el desarrollo de estos fenómenos.

1.5.1. Recogida de datos, organización y realización de las campañas de campo

El desarrollo de los movimientos de ladera genera una serie de cambios en el terreno, cambios geomorfológicos, cambios en la cobertura vegetal, cambios en la coloración de los materiales en superficie, etc. Estos cambios permiten identificar las zonas afectadas durante un tiempo limitado después del evento. Con el paso del tiempo, y especialmente en zonas de clima tropical, la mayoría de estas evidencias son eliminadas por los efectos de la erosión del suelo, el crecimiento de la vegetación y la alteración de los materiales en superficie. Por esta razón, la identificación de los movimientos de ladera al poco tiempo del evento que los originó, aporta gran cantidad de información que con el tiempo será muy difícil o imposible de conseguir. Información, que será imprescindible para los análisis de susceptibilidad y/o peligrosidad, necesarios para la mitigación de los efectos de estos fenómenos.

En este trabajo, la información necesaria para la identificación y el análisis de las zonas afectadas por movimientos de ladera se ha obtenido a partir de la observación de diversos indicadores que se pueden clasificar en tres grupos:

- Indicadores de fotointerpretación
- Indicadores de campo
- Registros escritos y orales (cartografías, informes y estudios anteriores, testimonios presenciales)

- Indicadores de fotointerpretación

La interpretación de fotografías aéreas es una herramienta muy útil, ya que además de permitir la observación global de la superficie de la zona de estudio, permite realizar observaciones muy detalladas de la morfología del terreno. Esto, facilita la identificación de zonas afectadas por inestabilidad del terreno debido, no solamente a eventos recientes (transcurridos poco tiempo antes de realizar las fotos) sino también a eventos antiguos. Hay que tener en cuenta, pero, que esta técnica puede presentar restricciones importantes en función de la calidad y la escala de las fotografías disponibles.

En la zona estudiada se dispone de dos series de fotografías aéreas en blanco y negro. Una de estas series corresponde a un vuelo realizado en noviembre de 1996 (anterior al huracán Mitch) a escala 1:40.000. Y la otra serie corresponde a un vuelo especial realizado por el USGS (United States Geological Survey), justo después del huracán Mitch, en diciembre de 1998. Ambas series de fotos fueron ampliadas a escala 1:20.000 y 1:30.000 respectivamente para una interpretación detallada de los indicadores de inestabilidad del terreno.

Además, en la zona de estudio se dispone de ortofotos a escala 1:10.000, correspondientes a la corrección de las fotos aéreas de la serie de 1996 y de otra posterior realizada en el 2000. Este material permitió representar los elementos interpretados en las fotos aéreas sobre una base cartográfica, material que resultó muy útil tanto para la planificación de las campañas de campo, como para la verificación y corrección de la fotointerpretación sobre el terreno.

- Indicadores de campo

Los indicadores de campo permiten verificar y corregir la fotointerpretación y aportan información sobre los mecanismos de movilización de los materiales y las características del terreno que contribuyen en la formación de los movimientos de ladera.

Los municipios estudiados se encuentran en la zona rural de Nicaragua y están formados por un núcleo urbano, al cual se puede acceder en vehículo de doble tracción y una serie de comunidades a las cuales el acceso, en muchos casos, se ve restringido únicamente al paso de animales montados (mulas, caballos, burros, etc.) o bien a pie (figura 1.6). La coordinación con la UNAG (Unión Nacional de Agricultores y Ganaderos) y los Comités de Emergencia de cada una de las comunidades, facilitó el desarrollo de las campañas de campo y el acceso a las zonas más remotas del área de estudio, a menudo donde se encuentra la mayor densidad de movimientos de ladera.



Fig. 1.6. A la izquierda imagen de la comunidad de Los Limones en el municipio de San Nicolás, Departamento de Estelí. A la derecha, camino a uno de los deslizamientos inventarioados en San Francisco del Norte, Departamento de Chinandega, con uno de los guías locales.

El trabajo conjunto con los pobladores de las comunidades permitió establecer una relación de intercambio de información, de manera que se les daba a conocer el trabajo que se estaba realizando en sus comunidades y ellos aportaban información sobre las zonas afectadas como testimonios presenciales. Además, los coordinadores locales facilitaron los medios logísticos necesarios para el acceso a las localidades afectadas más remotas (disponibilidad de guías lugareños, caballos, machetes, etc.)

Los datos recopilados en las campañas de campo se representan en las cartografías e inventarios de movimientos de ladera, los cuales se presentan y se describen en el apartado 4- Resumen de los resultados.

- Registros escritos y orales (cartografías, informes y estudios anteriores, testimonios presenciales)

Después del paso del huracán Mitch por Nicaragua en 1998, se empezaron a desarrollar gran cantidad de estudios y cartografías sobre movimientos de ladera para la mitigación de los efectos de estos fenómenos (Alemany, 2001; Caracterizaciones Municipales, 2000; Falgàs, 2001; Guinau, 2001; Incer et al., 2000; INETER, 1998; INETER, 2001; INETER-COSUDE, 2005; PROCHILEON, 2000). La consulta de estos estudios, cartografías e informes, han proporcionado información importante para la realización de este trabajo. Además, la consulta de algunos documentos anteriores al 1998, también ha aportado datos interesantes para conocer la incidencia de este fenómeno en el país (Darce et al., 1989; Fenzl, 1988).

El hecho de haber trabajado conjuntamente con los miembros de la UNAG y de los Comités de Emergencia durante las campañas de campo, permitió obtener información oral de los pobladores de la zona que vivieron los efectos del huracán Mitch. Estas personas, aportaron información importante en cuanto al desarrollo del evento y a la formación y el funcionamiento de los movimientos de ladera.

1.5.2. Tipología y funcionamiento de los movimientos de ladera

Sharpe (1938) definió los movimientos de ladera, como la perceptible caída o deslizamiento descendiente de una masa relativamente seca de tierra, roca o mezcla de ambas. Más recientemente, Selby M.J. (1993), define los movimientos de ladera como movimientos descendientes de suelo o roca bajo la influencia de la gravedad, y sin influencia directa de otros medios como agua, aire o hielo. No obstante, el agua y el hielo están frecuentemente involucrados en los movimientos de ladera, provocando una disminución de la estabilidad de los materiales y el comportamiento plástico y fluidal de los suelos.

Existe gran variedad de criterios para la clasificación de los movimientos de ladera. En este estudio se ha utilizado la clasificación propuesta por Varnes (1978), basada en los mecanismos de rotura de la ladera o el talud. No obstante, también se tienen en cuenta la

naturaleza del material desplazado, la velocidad del movimiento y las características de la trayectoria descrita por el material movilizado.

La nomenclatura en castellano, utilizada en este trabajo para los diferentes tipos de movimientos, se basa en la propuesta por Corominas, J. (1989). Para algunas tipologías, además del término propuesto en dicha nomenclatura, también se especifica el término utilizado más frecuentemente en Latinoamérica. Así podemos diferenciar los siguientes tipos de movimiento de ladera:

- Desprendimientos o caídas de rocas o bloques (*falls*)
- Deslizamientos (*slides*)
- Corrientes de derrubios o Flujos de detritos (*debris flows*)
- Coladas o Flujos de tierra (*earth flows*)
- Movimientos complejos (*complex movements*)

- Desprendimientos o caídas de rocas o bloques

Son movimientos que se originan por la rotura a tracción de la roca o suelo, debido al vuelco sobre la base del bloque inestable o a un deslizamiento inicial del bloque. Implican el movimiento de una porción de suelo o roca en forma de bloques aislados o masivamente, que se desplaza por el aire en caída libre hasta entrar en contacto nuevamente con el terreno, donde se producen saltos, rebotes, rodaduras y fragmentación del material. La velocidad de estos movimientos es rápida o extremadamente rápida.

Este tipo de movimientos se desarrolla en laderas y taludes con fuerte inclinación, tanto de tipo natural como artificial, y generalmente en zonas de afloramiento del macizo rocoso. Otros factores importantes que influyen en el desarrollo de desprendimientos, son; la estructura interna del material (presencia de discontinuidades que facilitan el aislamiento de bloques), el grado de meteorización que degrada la resistencia de los materiales y la acción de fenómenos de erosión hídrica superficial.

- Deslizamientos:

Son movimientos de una porción de suelo o roca originados por una rotura en cizalla que se produce a lo largo de una o varias superficies. El material se desplaza rígidamente, como un bloque único, aunque puede llegar a fragmentarse. La velocidad de estos movimientos es generalmente rápida. Según la morfología de las superficies de rotura, se pueden distinguir:

- *Deslizamientos traslacionales*: la superficie de rotura es plana o suavemente ondulada y el movimiento es rectilíneo, paralelo a las superficies de rotura.
- *Deslizamientos rotacionales*: la superficie de rotura es curva, con la concavidad hacia arriba. Esta curvatura provoca una inclinación a contrapendiente de los bloques en la parte superior, y la masa desplazada se acumula ladera abajo con deformación interna de bajo grado.

- Corrientes de derrubios o Flujos de detritos:

Se caracterizan por la movilización de material detrítico de granulometría generalmente gruesa (arenas, gravas y bloques). Son movimientos generalmente rápidos, aunque no todas las partículas se desplazan a la misma velocidad, ni sus trayectorias tienen que ser paralelas, de forma que la masa movida no conserva su forma durante el desplazamiento, adoptando a menudo morfologías lobulares. Se trata de un flujo de tipo granular. Estos movimientos se inician a partir de una zona de rotura que se suele originar por un deslizamiento superficial.

La mayoría de los movimientos generados por el Mitch en la zona estudiada, muestran claramente un mecanismo de tipo flujo de detritos. En algunos casos, este flujo queda encajado en vaguadas u hondonadas del terreno, por donde desciende como un flujo confinado, hasta las quebradas principales, donde generalmente es incorporado como carga de fondo. En otros casos, el flujo desciende por las laderas sin canalizarse, como un flujo no confinado, quedando el material depositado en la ladera, formando un cono de deyección, si existe una disminución importante de la pendiente en su recorrido (figura 1.7).



Fig. 1.7. Imagen de una de las corrientes de derrubios inventariadas en la zona de San Nicolás, Departamento de Estelí. En la zona de rotura el movimiento se inicia como un deslizamiento superficial y rápidamente evoluciona a un flujo de detritos.

- Coladas o Flujos de tierra

Son movimientos que implican un gran volumen de material que se desplaza ladera abajo a velocidades generalmente lentas. Los cuerpos de acumulación del material movilizado por este mecanismo presentan formas lobulares en superficie. En su interior se puede observar una matriz generalmente fina, que envuelve gran cantidad de bloques angulosos, de diversas dimensiones y litologías.

En la zona estudiada únicamente se han observado algunos movimientos antiguos (funcionaron con anterioridad a los efectos del Huracán Mitch), que posiblemente se movilizaron con las características propias de una colada de tierra. A parte de la observación de la morfología lobular de algunos cuerpos de acumulación de material, otro aspecto que permite afirmar la presencia de este tipo de movilizaciones, es la observación, en algunas zonas, de una formación superficial detrítica (formada de bloques angulosos envueltos de material más fino), la cual se puede interpretar como el depósito de antiguas coladas de tierra.

En algunas ocasiones, las zonas afectadas por antiguos movimientos se removilizan. Entonces, se puede observar el desarrollo de flujos de detritos o deslizamientos en la

antigua zona de rotura, o la apertura de grietas en el cuerpo de material acumulado por el antiguo movimiento (figura 1.8).



Fig. 1.8. Ejemplo de una antigua colada de tierra identificada en la zona del municipio de Cinco Pinos (límites de movimiento en rojo), con indicios de removilización (a la Izquierda). A la derecha, detalle de apertura de grietas en el terreno.

- Movimientos complejos:

Estos movimientos ocurren cuando el mecanismo de rotura inicial, se transforma en otro mecanismo de movilización al ir desplazándose el material ladera abajo. Gran parte de los movimientos generados por el huracán Mitch presentan un mecanismo inicial de tipo deslizamiento traslacional o rotacional, que posteriormente evoluciona a un flujo de detritos.

Durante las campañas de campo se observaron los rasgos geomorfológicos y las características de los materiales en las zonas afectadas, indicadores que permiten determinar los mecanismos de rotura y movilización de los movimientos observados. A continuación se presentan gráficamente las diferentes tipologías de movimientos identificadas en las zonas de estudio a partir de los datos de campo, los cuales se pueden consultar en el apartado 4- Resumen de los resultados.

En el gráfico de la figura 1.9 se muestran las tipologías de movimientos de ladera identificados en la zona norte del Departamento de Chinandega (municipios de San Pedro del Norte, Cinco Pinos, San Francisco del Norte, Santo Tomás del Norte y

Somotillo). En esta zona, la tipología de movimientos de ladera más abundante son los flujos de detritos con un 64% del total de movimientos observados. Teniendo en cuenta las características del terreno en esta zona, se puede pensar que algunos de estos flujos en realidad son movimientos complejos iniciados por un deslizamiento que evolucionó a un flujo de detritos, no obstante se han clasificado como flujos puros debido a la ausencia de indicadores que permiten identificar un posible deslizamiento en cabecera. Esta ausencia se debe a la gran cantidad de agua involucrada en la movilización de los materiales y a las características geomecánicas del material. En el 19% de los casos observados, en cambio, se pudieron identificar indicios de un deslizamiento en cabecera que posteriormente evolucionó a un flujo de detritos. Los deslizamientos puros corresponden al 11% de los casos observados y en menor representación se encuentran los desprendimientos y las coladas de tierra con un 3% cada uno.

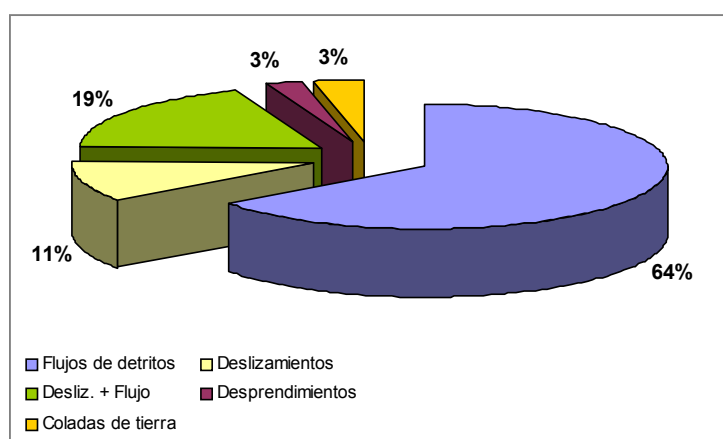


Fig. 1.9. Gráfico de porcentajes de los mecanismos de movilización observados en campo en la zona de estudio (A) Norte del Departamento de Chinandega.

En la zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón, en el 73% de los movimientos observados se pudieron identificar indicios de un inicio de inestabilidad por deslizamiento que posteriormente evolucionó a un flujo de detritos (figura 1.10). En cambio, en el 17% de los movimientos observados únicamente se observaron indicadores de movilización tipo flujo de detritos. Esta diferencia respecto a la zona anterior posiblemente de debe a diferencias en la incidencia de las lluvias del Mitch entre ambas zonas o bien a diferencias en las características geomecánicas de los materiales. En menor proporción se observaron deslizamientos, un 6%, y desprendimientos, un 4%.

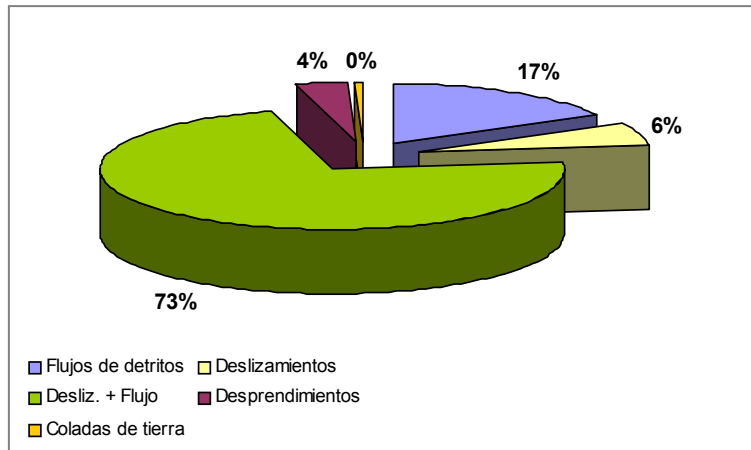


Fig. 1.10. Gráfico de porcentajes de los mecanismos de movilización observados en campo en la zona de estudio (B), entre San Nicolás y Sta. Rosa del Peñón.

Además de poder identificar las tipologías de los movimientos, los datos de campo permiten determinar cuales son los factores del terreno que condicionan la formación de los movimientos de ladera y como se generan estos.

En el caso de las zonas estudiadas en este estudio la distribución de los materiales tiene una importancia relevante en el desarrollo de los movimientos de ladera. En gran parte del área estudiada, las rocas del sustrato se encuentran cubiertas por una formación superficial formada por material de alteración meteórica de la propia roca y en algunas ocasiones, por una capa de material detrítico compuesto por bloques poligénicos de diferentes dimensiones y una matriz fina, correspondiente a depósitos de antiguos movimientos de ladera (figura 1.11).



Fig. 1.11. A la izquierda, conjunto de la formación superficial observada en la cicatriz de un movimiento de ladera en la zona de San Nicolás, con dos capas de material diferenciado. La foto derecha superior muestra un detalle de la formación detrítica formada por bloques angulosos a subredondeados de granulometrías diferentes, envueltos de una matriz fina. En la foto derecha inferior detalle del material de alteración de la roca del sustrato formado por materiales finos de granulometría más homogénea.

Esta formación superficial, generalmente presenta una capacidad de infiltración mayor que la roca del sustrato. Esta distribución de los materiales y esta diferencia en la capacidad de infiltración implican la formación de un acuífero subsuperficial, que en periodos de grandes lluvias puede experimentar una sobrecarga de agua. Esta sobrecarga comporta un incremento en la presión de poro sobre los materiales pudiendo provocar la inestabilidad de estos (figura 1.12).

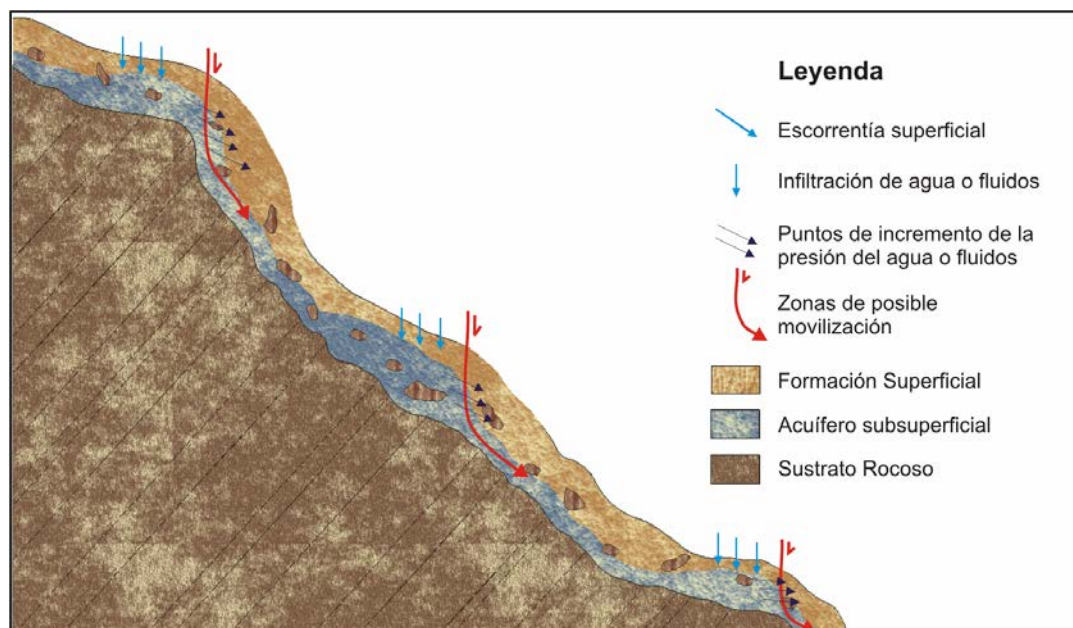


Fig. 1.12. Perfil sintético de una ladera mostrando un sustrato rocoso con capacidad de infiltración muy baja, cubierto de una formación superficial con permeabilidad más elevada. Formación de un acuífero subsuperficial con importante recarga en zonas de pendiente suave.

La observación en el campo de puntos de surgencia (figura 1.13) y la información aportada por la población corroboran la presencia de “surtidores” de agua en las zonas donde se generaron movimientos de ladera. Estas observaciones reafirman la existencia de un acuífero subsuperficial. La capacidad de infiltración de los materiales y el espesor de formación superficial controlan las variaciones del contenido de agua en los materiales, responsables de las inestabilidades del terreno.

En este trabajo se ha optado por analizar los factores que de forma directa o indirecta controlan la infiltración y acumulación de agua en el terreno como la pendiente, la litología, la textura del suelo, el uso del suelo, la curvatura del terreno y la orientación de las laderas.



Fig. 1.13. Ejemplos de surgencias de agua observadas en zonas afectadas por movimientos de ladera. En la izquierda, zona de rotura observada en el municipio de San Pedro del Norte (Departamento de Chinandega). En la derecha, surgencia de agua entre la formación superficial y la roca del sustrato, observada en un movimiento reciente, correspondiente al evento de junio del 2004 en Río Blanco (fotografía cedida por Victor Casado – Farmacéuticos Mundi).

Otra observación de campo importante en cuanto al funcionamiento de los movimientos de ladera en la zona estudiada, es que el nivel de rotura de los materiales se encuentra en el contacto entre la formación superficial y el sustrato rocoso, o bien en el interior de la formación superficial (figura 1.14). Esta observación permite determinar que la potencia de la formación superficial condiciona no solo el desarrollo de los movimientos de ladera sino también la profundidad de la rotura de los materiales, y por tanto el volumen de material movilizado. De manera que el conocimiento de la potencia de la formación superficial permitiría determinar el volumen potencial de futuros movimientos de ladera, dato necesario para la evaluación de la peligrosidad. No obstante, la potencia de la formación superficial en la zona de estudio es muy variable, hecho que dificulta su cartografía y por tanto la determinación del volumen movilizado en futuros deslizamientos.

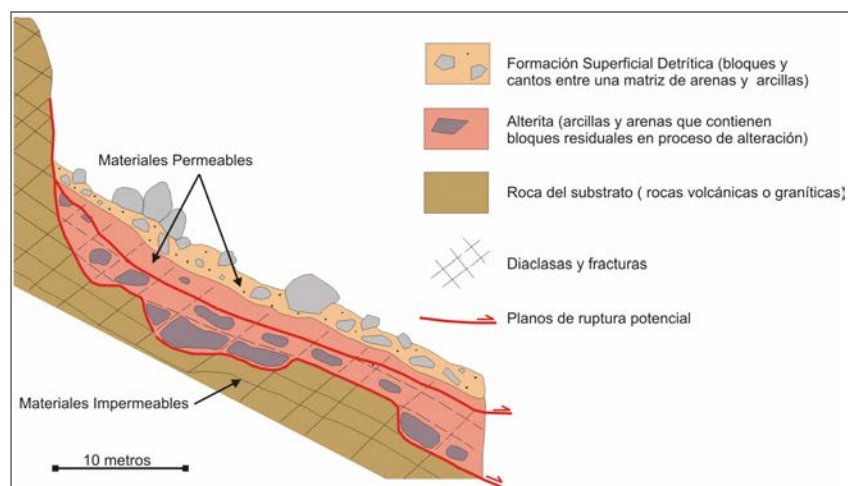


Fig. 1.14. Perfil sintético de una ladera de la zona de estudio mostrando las posibles ubicaciones de la superficie de rotura respecto a la formación superficial y al sustrato rocoso (Vilaplana et al., 2002).

1.6. Presentación de las publicaciones

El cuerpo central de este trabajo, presentado como compendio de publicaciones, se ha estructurado en tres bloques temáticos, cada uno de ellos correspondiente a una publicación.

- Bloque I: A pragmatic approach to debris flow hazard mapping in areas affected by hurricane Mitch: example from NW Nicaragua. Pallàs, R., Vilaplana, J.M., Guinau, M., Falgàs, E., Alemany, X., Muñoz, A. Published in *Engineering Geology*, vol. 72 (1-2): 57 – 72 (2004).
- Bloque II: A feasible methodology for landslide susceptibility assessment in developing countries: A case study of NW Nicaragua after hurricane Mitch. Guinau, M., Pallàs, R., Vilaplana, J.M.. Published in *Engineering Geology*, vol. 80 (3-4): 316 – 327 (2005).
- Bloque III: GIS-based debris flow source and runout susceptibility assessment from DEM data. A case study in NW Nicaragua. Guinau, M., Vilajosana, I., Vilaplana, J.M. Submitted to *Natural Hazards and Earth System Sciences – NHESS*.

- Boque I:

En este primer bloque se presenta una propuesta para la cartografía de la peligrosidad por corrientes de derrubios. En este trabajo, realizado en tres zonas piloto del norte del Departamento de Chinandega, se realiza un exhaustivo trabajo de campo que permite analizar las tipologías y el funcionamiento de los movimientos de ladera en la zona. A partir de la información de campo se pudo determinar la frecuencia y predictabilidad de los movimientos.

Además de la frecuencia y la predictabilidad de los movimientos registrados, se analiza la susceptibilidad. Este análisis permite, a partir de las características del terreno, determinar aquellas zonas que si bien no han sido afectadas por movimientos de ladera podrían serlo en el futuro. A partir del análisis de la pendiente en las zonas

de inicio de los flujos de detritos identificados en la zona, se pueden determinar aquellas zonas con pendientes potencialmente inestables, las cuales se identifican como zonas susceptibles al inicio de movimientos de ladera. Teniendo en cuenta que los flujos de detritos se desplazan ladera abajo siguiendo la máxima pendiente hasta alcanzar la red de drenaje, a partir de la topografía digital de la zona y del módulo Geopack de MicroStation® se trazan las posibles trayectorias de flujo a partir de las zonas susceptibles al inicio de flujos de detritos, obteniendo así, una zonificación de las áreas susceptibles a ser afectadas por flujos de detritos.

A partir de estos tres conceptos, frecuencia y predictabilidad de los movimientos y susceptibilidad, se propone una aproximación a la peligrosidad. No obstante, debido a la escasez de series de datos históricos y de datos numéricos que permitan predecir la frecuencia y magnitud de posibles movimientos de ladera, la peligrosidad (sensu stricto) únicamente se puede determinar en aquellas zonas donde se ha identificado algún movimiento de ladera. En cambio, el análisis de la susceptibilidad permite detectar zonas seguras y zonas que podrían ser afectadas por movimientos de ladera, información que puede ser de gran utilidad para la confección de planes de ordenamiento territorial y planes de emergencia a escala local. Es por esto que, a partir del trabajo presentado en este bloque, se plantea la necesidad de mejorar el análisis de susceptibilidad propuesto.

- Bloque II:

Dado que en el norte del Departamento de Chinandega se disponía de cartografías temáticas a escala 1:10.000, elaboradas en el marco de un proyecto de cooperación dirigido por la ONG española Solidaridad Internacional, se propone utilizar estas cartografías para la mejora del análisis de la susceptibilidad al inicio de los movimientos de ladera.

Las cartografías temáticas aportan información detallada de algunas características del terreno que pueden actuar como factores condicionantes de la inestabilidad del terreno. Esto permite incorporar, además de la pendiente, otros factores condicionantes al análisis de la susceptibilidad. El análisis comparativo entre las zonas afectadas por rotura de los materiales y los factores condicionantes seleccionados

(pendiente, litología, textura y profundidad del suelo y uso del suelo), permite determinar el grado de influencia de cada factor en la inestabilidad del terreno. Este grado de influencia se determina mediante un simple cálculo de densidad de área afectada, proceso realizado mediante el SIG ArcGIS 9.0®. Una vez calculados los grados de influencia para cada factor condicionante, se puede zonificar el terreno en función del grado de susceptibilidad o propensión, que por sus características tiene a la inestabilidad del terreno.

Además, a diferencia del bloque anterior, en este bloque se aplica un proceso de validación de la cartografía de susceptibilidad obtenida, basado en la división del área de estudio en una zona de desarrollo, donde se realiza el análisis y una zona de validación, donde se comprueba el ajuste del mapa obtenido con la distribución de las zonas afectadas por rotura de los materiales.

Dado que en esta zona no se dispone de un modelo digital del terreno suficientemente detallado, para poder mejorar el análisis de susceptibilidad propuesto en el bloque I, se propone desarrollar esta parte del estudio en la zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón (Departamentos de Estelí y León respectivamente), en la cual se dispone de un modelo digital del terreno con una resolución de 20m x 20m.

- Bloque III:

En este bloque se propone un análisis de susceptibilidad a la rotura basado en el análisis de factores condicionantes geométricos obtenidos a partir del modelo digital del terreno, mediante el SIG ArcGIS 9.0®. En este caso, el índice de influencia de cada uno de los factores condicionantes se establece a partir de una fórmula logarítmica que mejora los resultados obtenidos con el cálculo de densidad de área afectada por rotura de los materiales, aplicado en el bloque anterior. A partir de los índices de influencia obtenidos se realiza la zonificación del terreno en función del grado de susceptibilidad o propensión a la rotura de los materiales. En este caso, también se aplica el proceso de validación de la cartografía de susceptibilidad propuesto en el bloque anterior.

Una vez determinada la susceptibilidad a la rotura de los materiales se propone desarrollar un proceso automático que mejore la obtención de las trayectorias potenciales de los flujos de detritos a partir de las zonas susceptibles a la rotura. En un primer lugar se intentó desarrollar un algoritmo mediante el programa MATLAB® que permitiera trazar las trayectorias de máxima pendiente desde los puntos potenciales de salida de flujos de detritos hasta la red de drenaje principal. Posteriormente, se aplicó la herramienta TauDEM que, ejecutada como una extensión del SIG ArcGIS 9.0®, permite obtener de forma automática las trayectorias de máxima pendiente desde las zonas potenciales a la rotura de los materiales. El hecho de utilizar un modelo digital más detallado que la topografía digital disponible en las zonas piloto del norte de Chinandega, y la aplicación de la herramienta TauDEM que permite automatizar el proceso de obtención de trayectorias de flujo, permiten una mejora considerable de la zonificación de la susceptibilidad al alcance de los flujos de detritos. Además, la aplicación de un proceso de calibrado del modelo propuesto en este bloque, permite un ajuste de la respuesta del modelo al funcionamiento real de los flujos de detritos en la zona de estudio, proceso que también contribuye en la mejora de los resultados.

2- OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos específicos

- Objetivo del Bloque I: presentar una propuesta de aproximación a la cartografía de peligrosidad por movimientos de ladera, fácil de aplicar y de bajo coste, centrada en una zona piloto en el Departamento de Chinandega, NW de Nicaragua.

- Objetivos del Bloque II: en este bloque temático se proponen dos objetivos específicos.
 - 1) Explorar el potencial de combinar datos detallados de campo y datos preexistentes no específicos para el análisis de movimientos de ladera, para desarrollar una metodología de zonificación de la susceptibilidad a las inestabilidades del terreno.
 - 2) Proponer una metodología para la evaluación de la susceptibilidad de fácil aplicación y de bajo coste, adaptada a las limitaciones encontradas en países en vías de desarrollo, los resultados de la cual puedan ser utilizados para implementar medidas no estructurales para la mitigación del riesgo por deslizamientos.

- Objetivos del Bloque III: para este bloque temático también se proponen dos objetivos específicos.
 - 1) Desarrollar una metodología para la zonificación de la susceptibilidad a los flujos de detritos considerando la zona de salida y el alcance de los materiales movilizados, basada en el análisis SIG a partir de un MDT.
 - 2) Proporcionar una metodología práctica y de bajo coste adaptada a las condiciones encontradas en países en vías de desarrollo, y que pueda ser implementada para la prevención y mitigación de los efectos de los flujos de detritos.

2.2. Objetivo general de la tesis

Desarrollar y aplicar metodologías para la evaluación y la zonificación de la susceptibilidad a los deslizamientos (específicamente corrientes de derrubios), a escala de detalle, adaptadas a las limitaciones encontradas en países en vías de desarrollo, que permitan obtener información necesaria para el posterior diseño e implementación de medidas no estructurales para la mitigación del riesgo por deslizamientos.

3- PUBLICACIONES

3. PUBLICACIONES

3.1. Bloque I:

A Pragmatic Approach to Debris Flow Hazard Mapping in Areas Affected by Hurricane Mitch: Example from NW Nicaragua

Raimon Pallàs¹, Joan Manuel Vilaplana¹, Marta Guinau¹, Ester Falgàs¹,
Xavier Alemany¹, Angélica Muñoz²

1. RISKMAT Research Group, Dpt. Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona, Facultat de Geologia, 08028 Barcelona (Spain)
2. Centro de Investigaciones Geocientíficas, CIGEO, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (Nicaragua)

Published in; Engineering Geology, vol. 72 Nos. 1-2 (2004) pp. 57-72. ISSN 0013-7952

©Elsevier B.V. all rights reserved. SCI – IF (2004): 0.731

ABSTRACT

Although developing countries are vulnerable to landslide hazard, they generally lack policies for hazard assessment and mitigation. This may be attributed to the scarcity of good quality data on which to base any sound hazard assessment in addition to insufficient funds and lack of political will. Thus, there is an urgent need for developing feasible methodologies of landslide hazard assessment and mitigation, which can be readily tested and implemented under the conditions found in these countries. To this end, we selected an area of about 20 km² badly affected by Hurricane Mitch in October 1998, in the *Departamento de Chinandega* (NW Nicaragua). Mass movements (mainly debris flows) produced during the Hurricane Mitch rainfall event were investigated using two sets of aerial photographs at 1:60,000 and 1:40,000 scales. Data concerning regolith composition and thickness, landslide dimensions, failure slope angle and land use were obtained for 150 mass movements, and over 450 landslides were mapped at 1:10,000 scale in the field. A pragmatic approach was used to produce a qualitative hazard (*sensu lato*) assessment, based on the concepts of *number of events recorded*, *predictability* and *susceptibility*. This case study shows that a hazard assessment that is useful for management may be possible even where data are limited. Despite its inherent limitations, similar pragmatic approaches could help the sustainable development of other rural and sparsely populated areas of Central America.

Keywords: landslide mapping, landslide hazard mapping, debris flows, developing countries, Nicaragua

1. Introduction

Developing countries are prone to natural disasters. Not only are these countries situated in areas exposed to geological and climatic hazards, but they are also, and most importantly, vulnerable to socio-economic factors (Alcántara-Ayala, 2002). These countries pay a high price in human life, loss of fertile soils and pasture land as well as destruction of property and infrastructure. Given that the infrastructure is generally basic and relatively inexpensive, economic loss due to natural hazards in developing countries is smaller than in industrialised ones (Alexander, 1995, McGuire et al., 2002). Nevertheless, these comparatively small losses still correspond to a large proportion of their GDP (Alexander, 1995, Alcántara-Ayala, 2002), resulting in long periods of recovery, which severely slow down or prevent growth in the long term. Although natural disasters are clearly a limiting factor for societal and economic growth, developing countries often lack policies for disaster prevention and mitigation.

Landslides cause loss of life and much devastation. They are widespread in areas prone to extreme rainfall and/or areas susceptible to seismic shaking, commonplace conditions in many developing countries. Loss of life attributed to earthquakes is, in many cases, caused by the devastating effect of seismically-triggered landslides (Carrara et al. 1999, Guzzetti, 2000, Bommer and Rodríguez, 2002). This implies that mass movements are probably responsible for many more casualties than is generally recognised.

Developing countries are in urgent need of feasible methodologies of landslide hazard assessment and mitigation. Feasibility means that the methodologies should be simple and inexpensive, so that they can be learned and readily applied to large territories by governmental or non-governmental agencies. The aim of the present paper is to provide a feasible approach to hazard mapping centred in a test area in the Departamento de Chinandega, NW Nicaragua.

1.1. Study Area

The study area is located in the Interior Highlands of Nicaragua (Fig. 1), an extensive and heavily dissected volcanic plateau (McBirney and Williams, 1965, Fenzl, 1988). This

region is mainly formed of Tertiary volcanic rocks of the Matagalpa and Coyoil groups (Weyl, 1980), and sparse Tertiary plutonic intrusions (unpublished maps). The Oligocene Matagalpa Group is mainly characterised by rhyolitic to dacitic pyroclastic flows and falls, and rare epiclastic deposits, whereas the Miocene-Pliocene Coyoil Group is dominated by basaltic to rhyolitic lavas, breccias, lahars and pyroclastic flows (Ehrenborg 1996). The volcanic succession is cut by extensional faults and basaltic to rhyolitic dikes, and is affected by low-grade burial metamorphism and, locally, by strong hydrothermal alteration (Darce et al. 1989, Ehrenborg 1996). Due to the relatively complex geology, and the fact that bedrock exposures are scarce due to thick regolith and vegetation cover, geological mapping is poor in most areas, including the one under study.

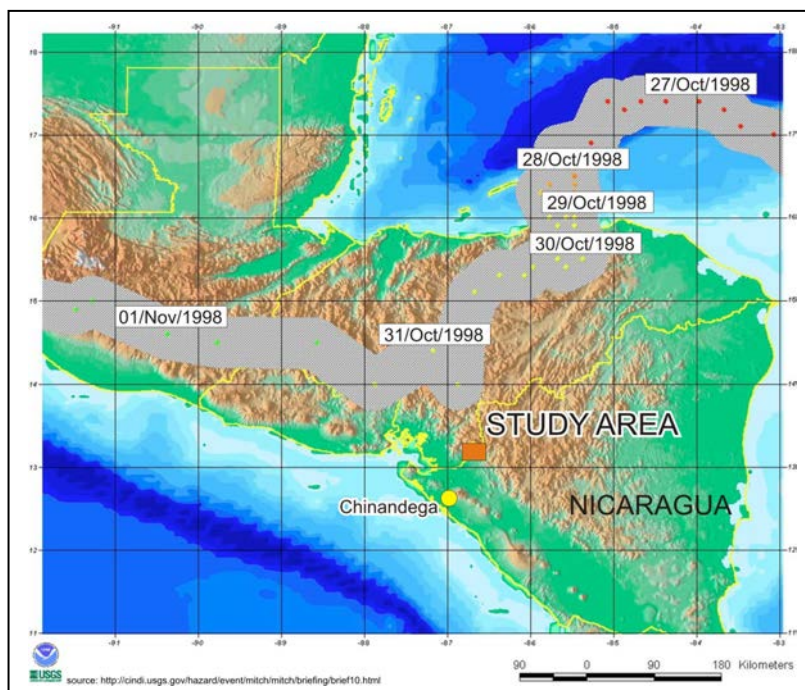


Fig. 1; Location of the study area and localities referred to in the text. The path of Hurricane Mitch is shown in grey, based on USGS (1999) data.

Source: <http://cindi.usgs.gov/hazard/event/mitch/mitch/briefing/brief10.html>

Our pilot study is focused on the Cinco Pinos and San Francisco del Norte municipalities (*Departamento de Chinandega*). The area displays a hilly landscape and is 300 to 700 m in altitude (Fig. 2). It began to be settled approximately one century ago, and since then most of what used to be thickly forested land has been converted into bush land (about 50% of the area), degraded pastures (about 30%), agricultural fields (15%) and open forest (3%) (Consortio-BIT, 1999b). The economy, which is among the poorest in the country, is based on subsistence corn, bean and cereal agriculture, and, to a lesser extent, on cattle (Consortio-BIT, 1999b). The two municipalities number over 14,800 inhabitants (Consortio-BIT, 1999a, 1999b). The environment is being subjected to increasing

pressure given the considerable demographic growth of the last decades. Traditionally, settlements were sparse, and construction materials consisted of locally available adobe and wood. Present demographic pressure is producing a rapid shift towards small and denser concentrations of housing promoted by international non-governmental organisations.



Fig. 2; General aspect of the study area. View looking west from Cerro Chávez (Fig. 4C). Cerro Morroñoso is on the left and Cerro Nancital on the background. White patches correspond to large debris flows and areas affected by rock-falls, which were triggered by Hurricane Mitch.

At about 13°N latitude, the region is affected by a savannah climate, with a marked dry season (November to April), which accounts for only about 10% of the annual rainfall (Fenzl, 1988). Like many regions in Nicaragua, Honduras and in El Salvador, the area under study was severely affected by Hurricane Mitch between 28 and 31 October 1998 (USGS, 1999, Fig. 1). In ten days, 1597 mm were registered in Chinandega, corresponding to 86% of the local mean annual rainfall (INETER, 1998). Based on rainfall data from 1966 to 1998, the return period of the Hurricane Mitch rainfall event was calculated as greater than 100 years for Chinandega (INETER, 1998). The exceptional rainfall event associated with Hurricane Mitch caused extensive damage in the *Departamento de Chinandega* because of flooding and landsliding. In the Cinco Pinos and San Francisco area, landsliding was the main destructive process experienced, with an estimated 32% of the total population affected by property loss or damage (Solidaridad Internacional, unpublished data).

2. Data and methods

The 1:50,000 topographic base (INETER, 1990) was enlarged by a conventional large-format copier to 1:20,000 scale and was digitised. Printouts of the resulting digital base were plotted at 1:10,000 scale to facilitate mapping tasks in the field. Two black and white aerial photographs sets were available: (1) a 1:40,000 flight from 11 January 1996 (prior to Hurricane Mitch, hereafter referred to as *pre-Mitch*) and (2) a 1:60,000 flight from 4 December 1998 (one month after Hurricane Mitch, hereafter referred to as *post-Mitch*) (Fig. 3). A detailed study of these two sets of photographs allowed a pre-selection of interesting localities.

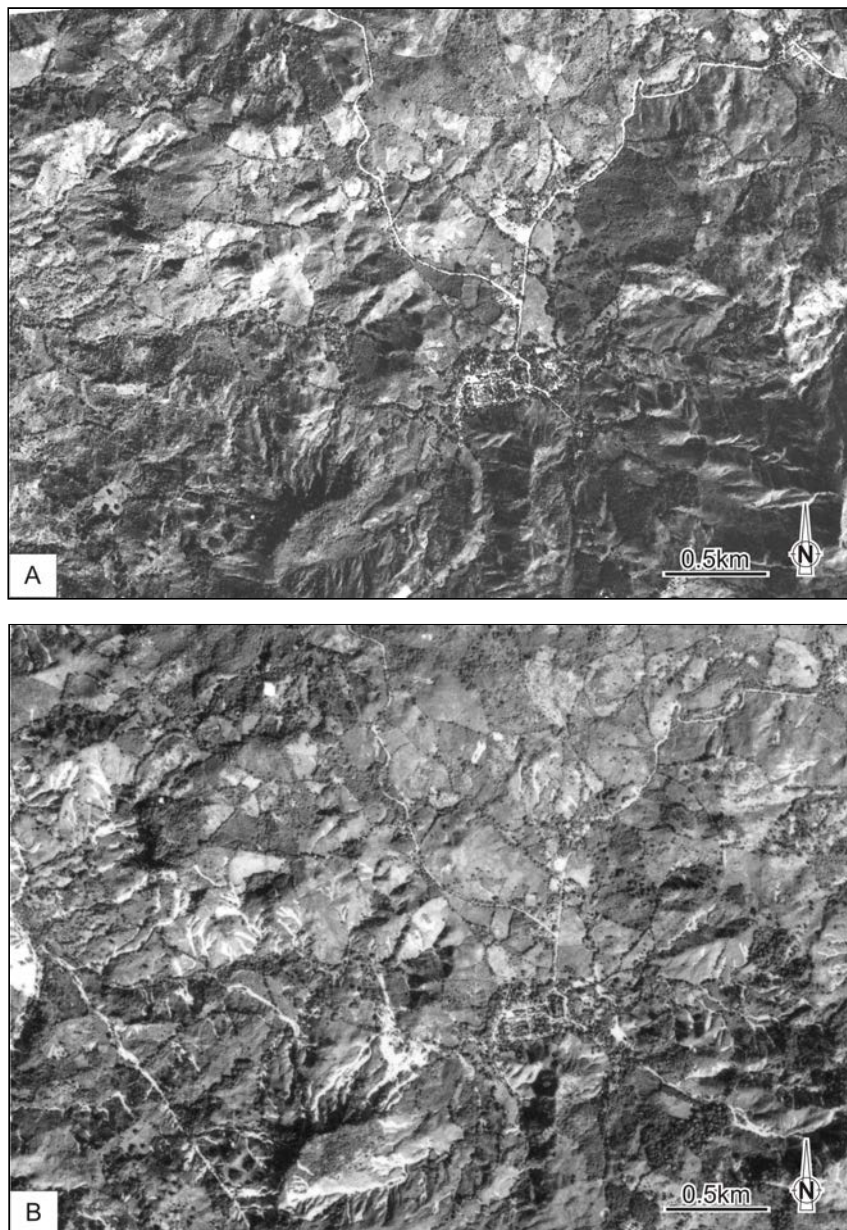


Fig. 3; Cropped and enlarged aerial photographs corresponding to the San Francisco del Norte area (Fig. 4C). Compare photograph (a), taken prior to Hurricane Mitch, from (b) taken after Hurricane Mitch. White patches on (b) correspond to large debris flows and areas affected by rock-falls triggered by Hurricane Mitch. Graphic scale is approximate. The area is illuminated from the south; rotate 180° for easier relief appreciation.

Landslide mapping was restricted to three areas (Fig. 4A, 4B and 4C), covering a total area of 19.9 km². These target localities were selected on the basis of (1) high landslide density, (2) varied bedrock, (3) presence of vulnerable elements such as settlements and roads, (4) wide range in landslide typology and size, and (5) relatively good accessibility.

Bedrock is generally covered by in situ regolith and/or colluvial soil. Regolith in plutonic areas was sandy, highly porous, commonly including granite corestones, and had a yellowish colour. This was clearly distinguishable from regolith in volcanic areas, which had a finer texture and was dark brown to reddish in colour. Volcanic regolith displayed homogeneous features regardless of specific lithologies. Superimposed on the regolith, most outcrops showed a widespread pervasive colluvium, consisting of massive diamicton, which included angular to subangular rock fragments of local lithologies, ranging up to block size, in a sandy to lutitic matrix.

Two years after Hurricane Mitch, most large to medium mass movement scars were still clearly visible on the landscape and were easily mapped in the field. In contrast, most accumulation areas and small landslides were already overgrown with vegetation, and could only be detected as highly reflective areas in the post-Mitch aerial photographs (Fig. 3B). Moreover, the pre-Mitch aerial photographs, despite the vegetation cover, showed scars, gullies and irregular lobated slopes, revealing extensive slope instability older than 1998. Systematic enquiries to locals about pre-Mitch instability events yielded little information, probably because of the relatively recent settlement in most areas, and because of the overwhelming memory of the Hurricane Mitch event. Qualitative temporal information on landslide activity was reflected in the Landslide Inventory Map (Fig. 4A, 4B and 4C) to show which mass movements corresponded to instability prior to Hurricane Mitch, which ones were associated with Hurricane Mitch, and which were active in both periods (i.e. reactivated).

A range of landslide typologies was observed, including debris flows, earth flows, and rock falls (classification based on Varnes, 1978). Debris flows were characterised by curved crown scarps (sometimes showing some translational slide blocks at the crown), a large length-to-width ratio and, a lack of clear morphology in the accumulation areas. Earth flows were large mass movements ($>60 \times 10^3$ m²) with small length-to-width ratios characterised by lobated accumulation areas, and showing, in some cases, a rotational slide component at the head. Areas affected by rock fall were restricted to steep sloping bedrock outcrops, locally

involving accumulation of large volumes of fresh angular bedrock fragments. Debris flows were the most abundant type of mass movement, accounting for 98% of the 458 landslides mapped and affecting 1.54×10^6 m². Earth flows and areas affected by rock-falls shared the remaining 2% of the total landslides mapped, affecting 0.65×10^6 and 0.73×10^6 m², respectively.

Apart from mapping the type, extent and timing of landslides, field work was aimed at obtaining a large number of in situ observations and measurements in the source area. Slope angles at debris flow scars were measured with the aim of establishing the original topographic gradient where failures occurred. Measurements were taken visually by a clinometer along the escarpment flank, as observed from the opposite flank, with an accuracy of ± 2 degrees. Slope angles at 130 debris flow scars were measured, 97 corresponding to areas with volcanic bedrock and 33 corresponding to areas with plutonic bedrock. Debris flows volumes were deduced by estimating scar length, width, and depth, and ranged from several tens of cubic metres to 10^5 m³.

3. Data analysis and interpretation

3.1. *Materials affected by instability*

The homogeneity of regolith in volcanic areas suggests that the weathering patterns of the volcanic rock types found in this area may yield relatively homogeneous results, probably resulting in similar behaviour with regard to slope instability. This justifies a distinction of bedrock lithologies limited to two generic types: volcanic and plutonic.

The regolith has a maximum measured thickness of 2.5 m, and is commonly covered by a widespread sheet of colluvium, with a measured thickness ranging between 0.1 and 2.5 m. The fact that it supports a well developed organic soil and is often present under thickly forested areas is indicative of former long-term (Pleistocene? or Holocene?) slope activity.

Landslides in the area generally affect colluvium (where present), and part or all of the regolith. The accumulation areas of large debris flows often show large blocks (up to several metres in diameter) derived from corestones included in the original regolith. Bedrock is rarely entrained, and only in the areas affected by rock-falls.

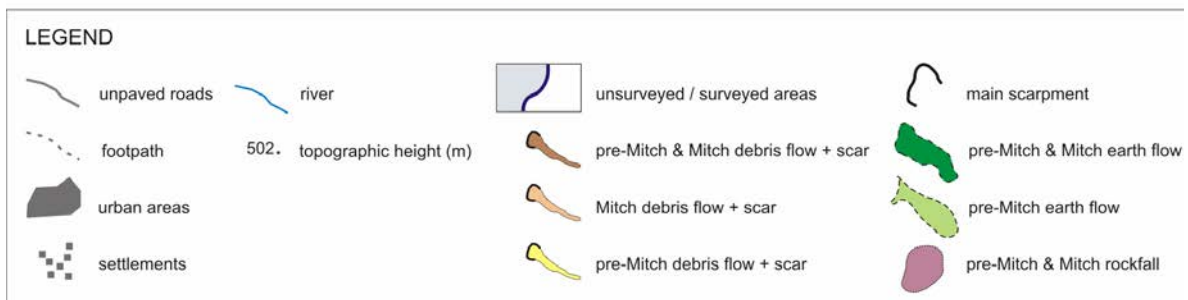
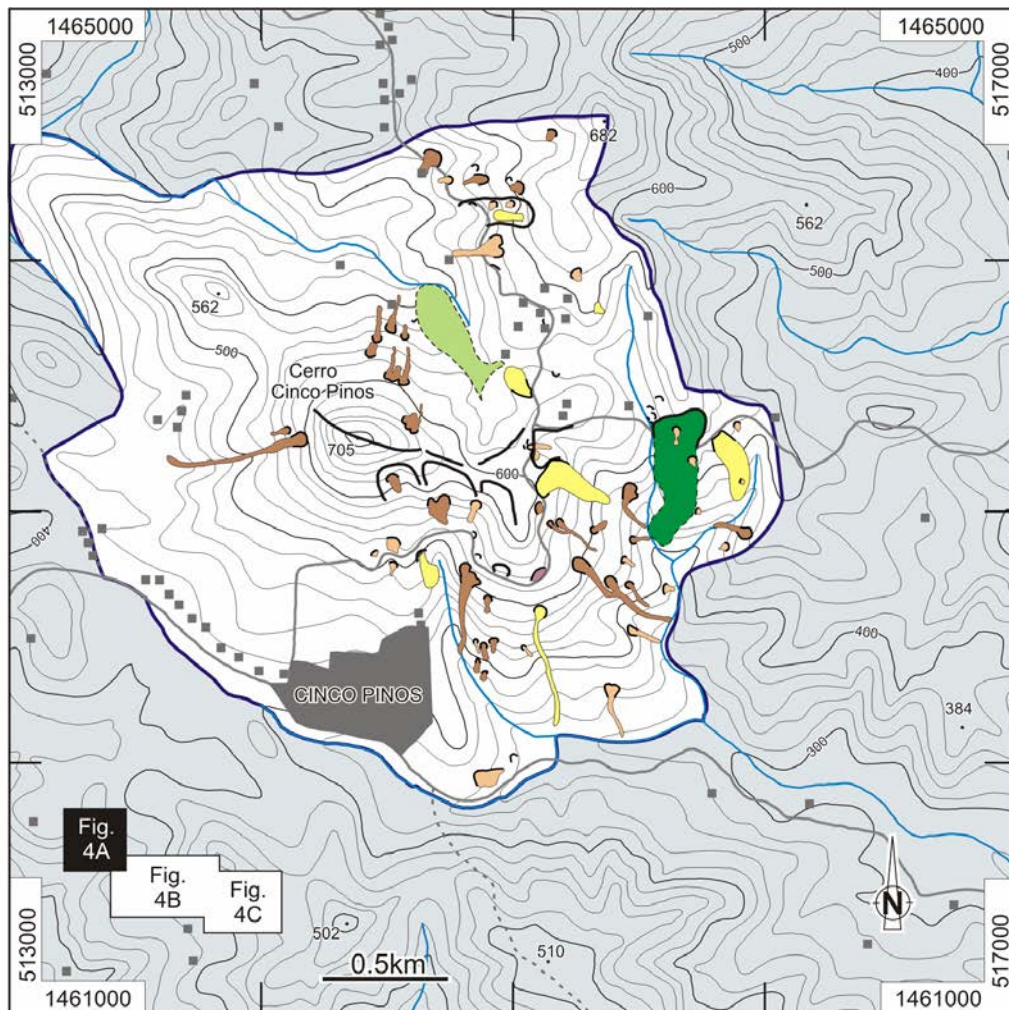
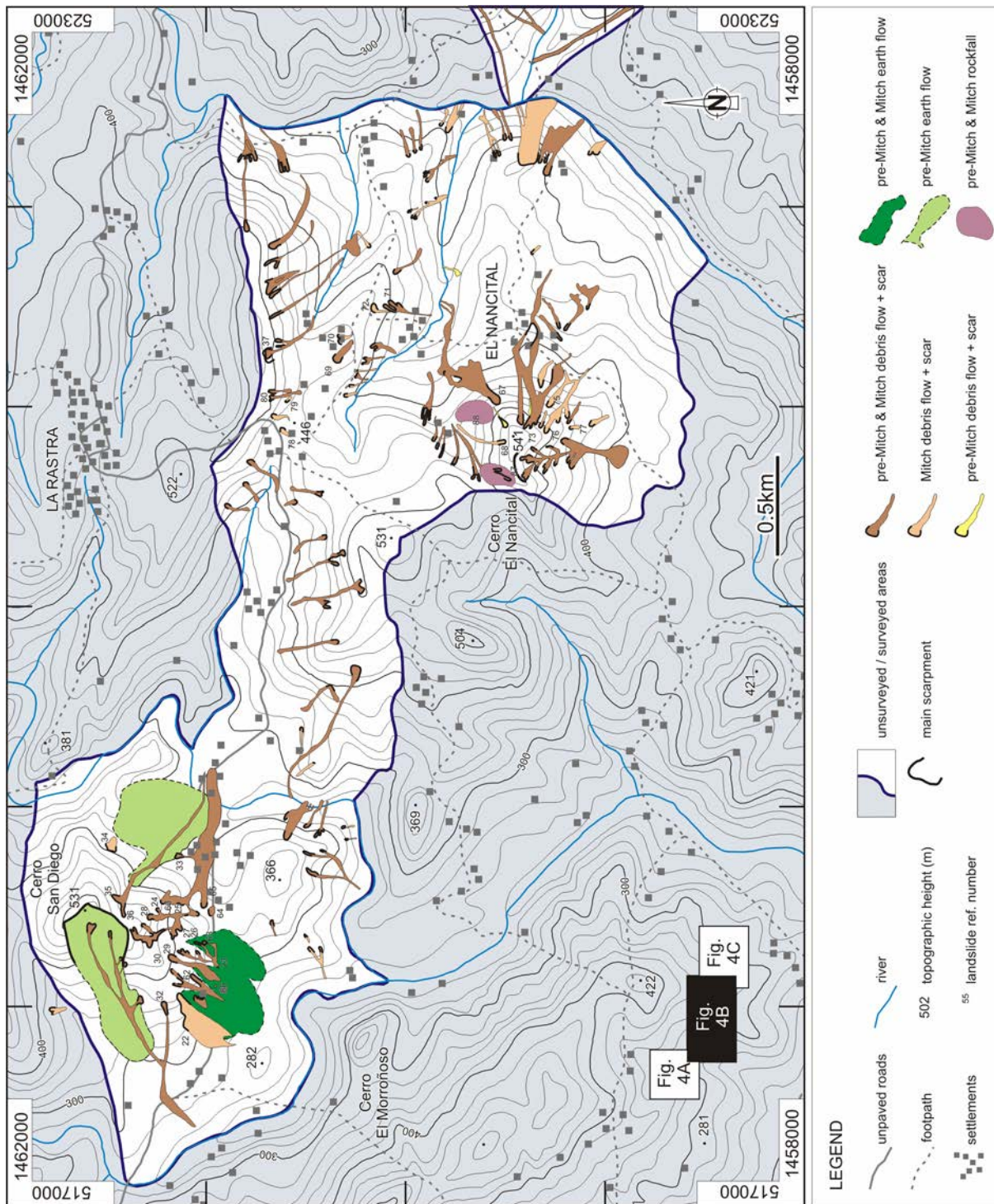
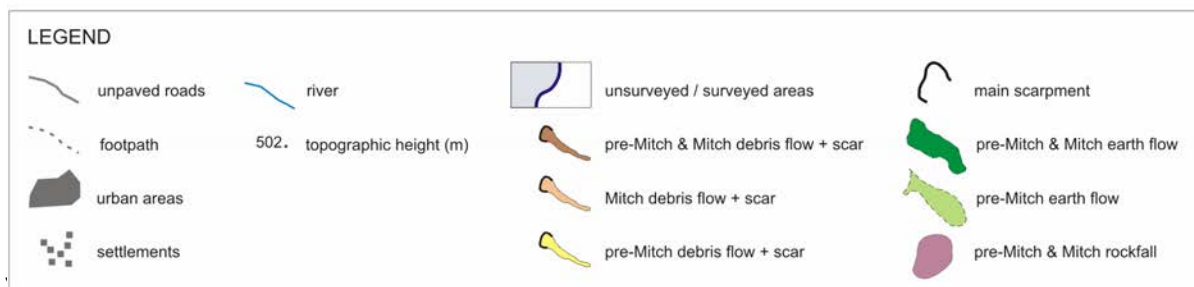
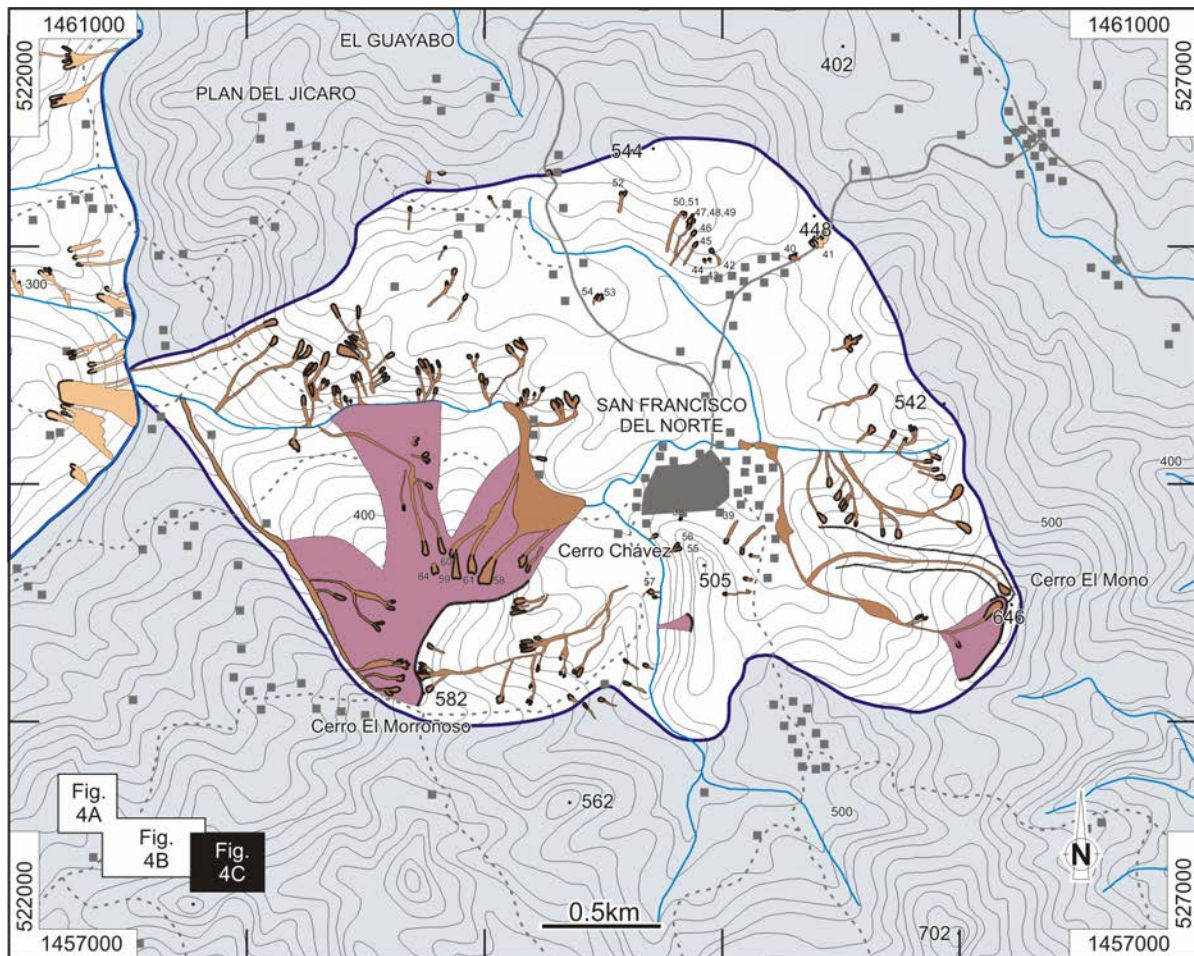


Fig. 4 (A) Landslide Inventory Map of the Cinco Pinos area. (B) Landslide Inventory Map of the Cerro San Diego and El Nancital areas. (C) Landslide Inventory Map of the San Francisco del Norte area. Elevations are in m, and coordinates are Transverse Mercator.





Single debris flows were smaller than single earth flows and than the areas affected by rock falls, but debris flows were the most widespread and most common landslide typology (98% of mapped landslides). The abundance of debris flows observed during Hurricane Mitch is evidence that this must be the favoured rainfall-induced landslide type in this region. According to the post-Mitch aerial photographs and to information obtained through enquiries with locals, most debris flows active during Hurricane Mitch travelled long distances, merging into the drainage network. Thus, there must have been a gradual transition between debris flows, hyperconcentrated flow, and fluvial bedload. Although landslide types other than debris flows are extensive, they are of local occurrence.

3.3. Failure angle of debris flows

When considering both volcanic and plutonic bedrock areas, the sample of 130 measured debris flows failure angles ranged from 20° to 49°. To detect any difference in behaviour between volcanic and plutonic bedrock areas, both sub-samples were plotted separately (Fig. 5). To determine the areas with slope angles susceptible to failure, we must focus on the lowest angles of the total range rather than on the central values of the population. The plutonic sub-sample is close to a normal distribution, with the exception of a sharp drop in frequency at angles lower than 25°, with no angles measured in the 20° to 24° range. This may be due to undersampling, or to the fact that slopes below 25° may be underrepresented in plutonic areas. This suggests that the lower values of the population may be around 20° not only for volcanic bedrock but also for plutonic bedrock areas. Thus, 20° may be taken as the threshold stability angle of debris flows triggered by the rainfall conditions experienced during the Hurricane Mitch event.

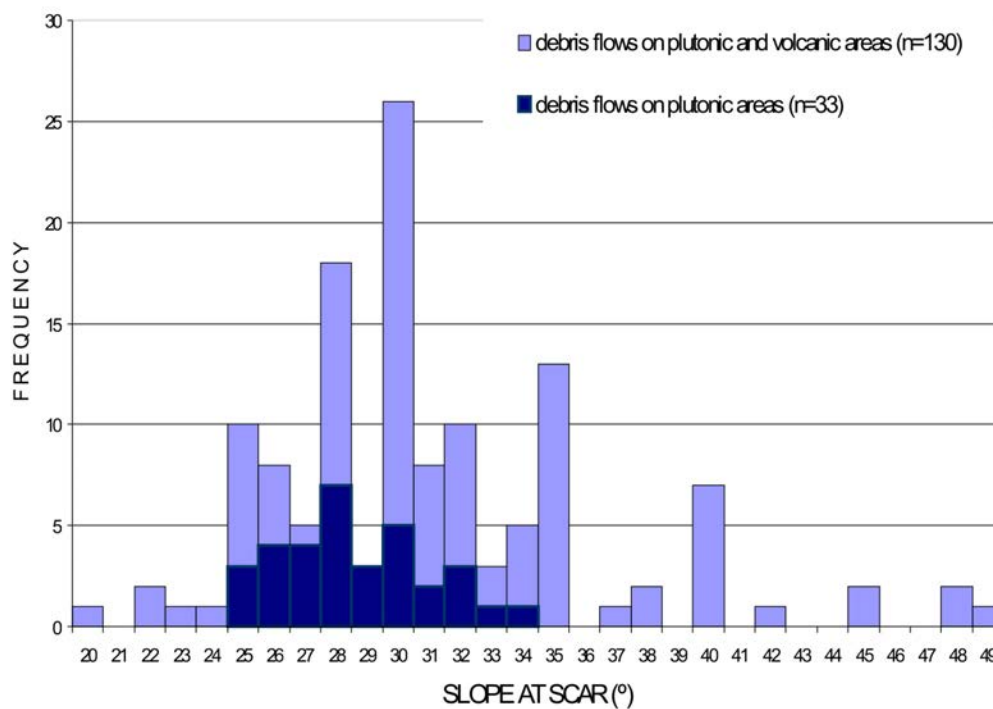


Fig. 5: Frequency distribution of debris flows failure angles measured in the field. The histogram in blue corresponds to angles measured both in volcanic and plutonic areas. The superimposed histogram in dark blue corresponds to angles measured in plutonic bedrock areas.

4. Approach to hazard (*sensu lato*) analysis

The concept of natural hazard, as defined by Varnes (1984), refers to the probability of occurrence of a potentially damaging phenomenon within a given area and within a given period of time. It is generally acknowledged that this definition involves the concepts of *geographical location*, *magnitude* and *frequency* of events (e.g. Guzzetti et al., 1999). In the study area, quantitative information is not available to establish the magnitude or frequency of landslides and, hence, hazard cannot be quantified. To map areas with different degrees of exposure to potentially hazardous phenomena, we adopt a pragmatic approach based on a combination of concepts which are related to hazard and to some extent to vulnerability. While acknowledging that the concepts included in our analysis do not conform with the strict definition of *hazard*, we use, in the present paper, the term *hazard (sensu lato)* to refer to exposure to potentially damaging mass movements once preventive action (such as regular inspection of unstable areas and implementation of a warning system) has been taken. The term *risk* is not used in the absence of a comprehensive vulnerability assessment. In this section, the main ideas and limitations underlying our hazard (*sensu lato*) analysis are discussed, including the concepts of magnitude, frequency, number of events recorded, predictability and susceptibility.

4.1. Ruling out the application of magnitude

In principle, large magnitude landslides will be more hazardous than smaller ones. Nevertheless, the extreme fragility of all man-made structures found in the area implies that total destruction can occur whatever the magnitude of a destructive phenomenon; even the smallest magnitude phenomenon observed has the potential for causing extensive damage and loss of life. This means that in this specific case the concept of magnitude is not of practical use for differentiating between degrees of hazard.

4.2. Number of events recorded as an approach to frequency

Quantification of landslide hazard implies determining the frequency of instability phenomena. If several sets of aerial photographs are used, the frequency of slope failures can be determined (e.g. Guzzetti et al., 1994, Ibsen and Brundsen, 1996). Given the fact that only two sets of photographs are available in the study area, only a qualitative and imprecise approach to the temporal behaviour of mass movements can be attempted. The concept closest to frequency that can be estimated in this case is the *number of events recorded*; slopes which failed several times in the past may be considered more hazardous than slopes which failed only once. Thus, in descending order of a hazard

scale, slopes can be classified as (1) *Two events recorded* (i.e. pre-Mitch + Mitch), (2) *One event recorded* (i.e. pre-Mitch or Mitch), and (3) *No event recorded*.

4.3. *Predictability*

Providing that the areas prone to landsliding are monitored (e.g. inspection by trained locals) and that some kind of warning system is implemented, the most hazardous mass movements are the ones which activate rapidly, without giving any external warning signs. Mass movements which start slowly and provide some warning indicators (e.g. slow movement, tilting of trees or houses, opening of cracks) may be considered less hazardous since they allow sufficient time for evacuation. This concept will be referred to here as *predictability*. In descending order of a hazard scale, slopes can be classified in the study area as (1) *Non Warning*: including debris flows and rock falls, and (2) *Warning*: including earth flows.

4.4. *Susceptibility*

The concepts of *number of recorded events* and *predictability* introduced above may be useful for a qualitative hazard assessment of areas where past mass movements had been detected. Nevertheless, areas where no activity has been previously detected may also be prone to instability and should be considered in the hazard analysis. We include these areas in the analysis using the concept of *susceptibility*, defined as the probability of occurrence of a landslide event (Dai et al., 2002). The susceptibility of a slope to failure will be high if it has the same combination of instability factors as the areas that failed several times in the past. Rainfall-triggered debris flows may be affected by a complex combination of topographic, lithologic, and land use factors (Dai et al., 1999, Zhou et al. 2002, Lorente et al. 2002). Thus, the relationship between these factors would need to be addressed to establish the susceptibility of a slope to debris flows. Such a quantitative susceptibility analysis falls outside the scope of the present study given the lack of data. Nevertheless, a simplified qualitative approach to susceptibility is still possible. Based on the range of slope gradients measured in the field, we can assume that debris flows are more likely to occur on slopes above a certain gradient threshold. This is the case, at least, when an extremely intense trigger (such as Hurricane Mitch) is used as the reference event. Although this might also be true for other factors, such as distance to divide, or contributing area (Baeza and Corominas 1996), we focused our attention on the topographic gradient because it is simple to measure and readily available in the field and from a DTM. According to the sample of debris flow failure angles, the threshold above which debris flows may occur during extreme rainfall events in the study area can be

established at around 20°. Thus, as a first approach, slopes with gradients equal to or greater than 20° can be considered as susceptible to failure, and could act as source areas for debris flows. The areas susceptible to debris flows include these source areas together with the runout zone. Accordingly, in descending order of the hazard scale, we are able to differentiate between the areas that are (1) *Susceptible*, and those that are (2) *Non-susceptible* to debris flows.

5. Approach to hazard mapping

5.1. Determining the areas potentially prone to debris flows

A Digital Terrain Model (DTM) was obtained from the digitised 1:50,000 topographic map (contour spacing of 20 m), and a Triangle Irregular Network (TIN) was generated. The TIN model included all the original data points digitised from contour lines, talveg break lines and single elevation points, with no filtering. Based on the TIN model, a slope map was constructed to highlight areas with topographic gradients equal to or higher than 20°. These are the areas considered to be susceptible to debris flows failure. The problem of estimating the runout distance of landslides can be simplified by considering the fact that, in these areas and under intense rainfall events, debris flows tend to travel long distances merging with the drainage network. Debris flows follow the maximum slope and often grade to hyperconcentrated flows and to fluvial bedload, whilst maintaining or increasing most of their destructive power. Flow lines were generated automatically following the maximum slope of the TIN facets, starting from the areas highlighted in the slope map (those considered susceptible to failure, Fig. 6). The starting points were selected by hand to obtain the widest possible assemblage of flow lines for each slope. The resulting flow lines merged together along the drainage network and their downslope length was only limited by the extent of the DTM (Fig. 6). The areas potentially affected by debris flows correspond to the union of areas sloping $\geq 20^\circ$ and the areas crossed by the flow lines.

In principle, an accurate DTM should produce a slope map in which the debris flow scars measured in the field should always coincide with the highlighted $\geq 20^\circ$ range. Comparison of the mapped scars and the highlighted areas in the slope map (Fig. 6) reveals that 28% of the scars do not match the slope areas in the model. This indicates that the DTM does not describe all the relevant topographic variations in sufficient detail for an accurate slope map to be constructed. A second set of flow lines were generated using the mapped scars as possible source areas in order to minimise the effect of the low resolution of the DTM (Fig. 6).

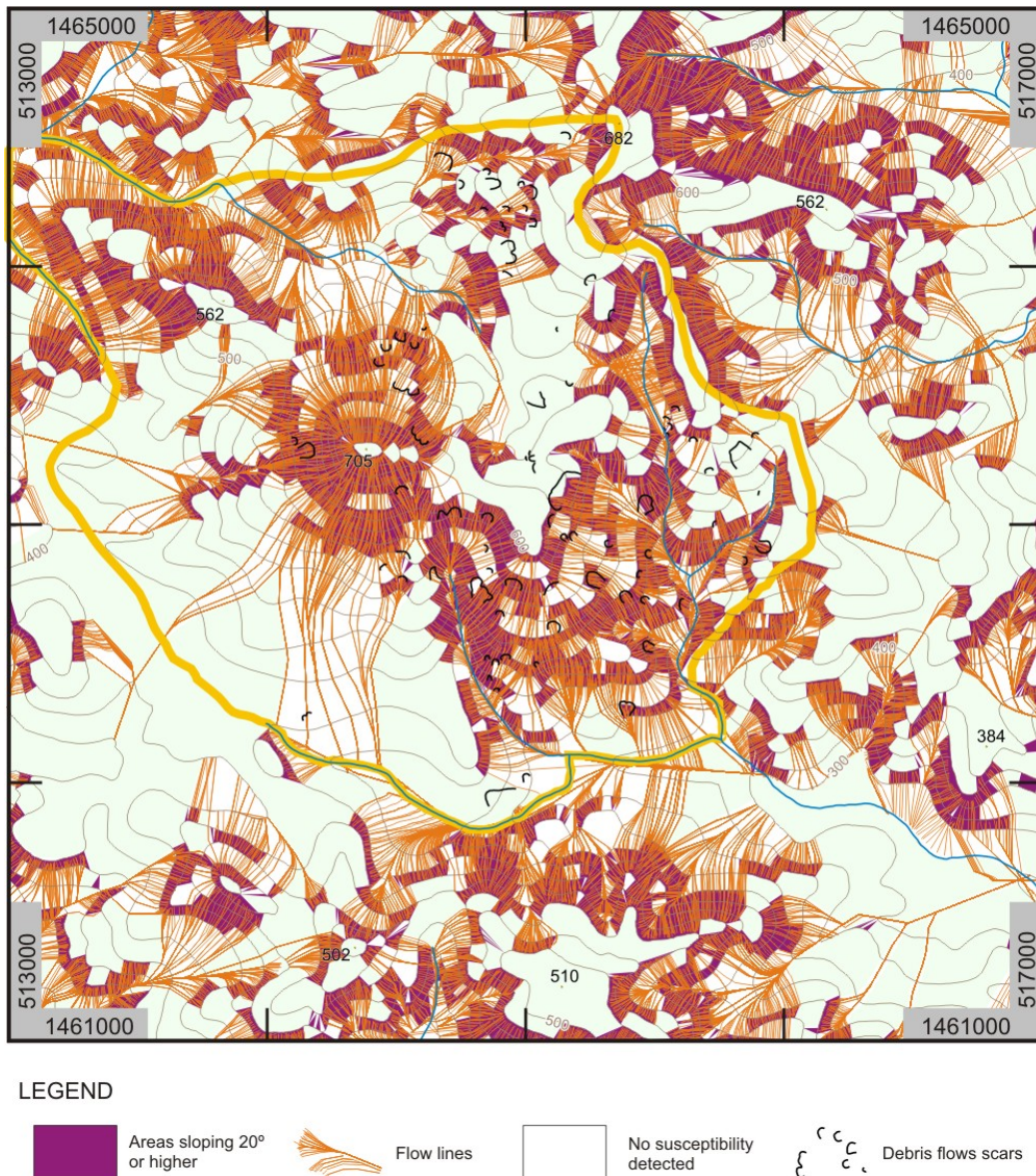


Fig. 6; Example of the Susceptibility Map corresponding to the Cinco Pinos area (locality in Fig. 4A). Areas highlighted in deep red correspond to the ones sloping equal to or higher than 20°, and are the ones considered susceptible to failure. Flow lines correspond to possible debris-flows paths, taking the areas highlighted in deep red and mapped scars as possible source areas. See text for detailed discussion.

5.2. Constructing the landslide hazard map

In the study area there are three concepts which can be used to qualitatively establish different degrees of hazard: *number of events recorded*, *predictability* and *susceptibility*. Each of these concepts allows us to differentiate between a number of situations, and their combination yields seven cases which can be ranked on a hazard scale (summarised in Fig. 7). Cases 1 and 2 correspond to areas with no recorded activity, whereas Cases 3 to

7 correspond to areas where past mass movements had been detected. Note that areas classed as *one event recorded* but showing some *non warning* phenomena (Case 3) were considered more hazardous than areas classed as *two events recorded* but showing only *warning* landslides (Case 4). The order of the seven cases forms the basis for the construction of the Hazard Map (Fig. 8).

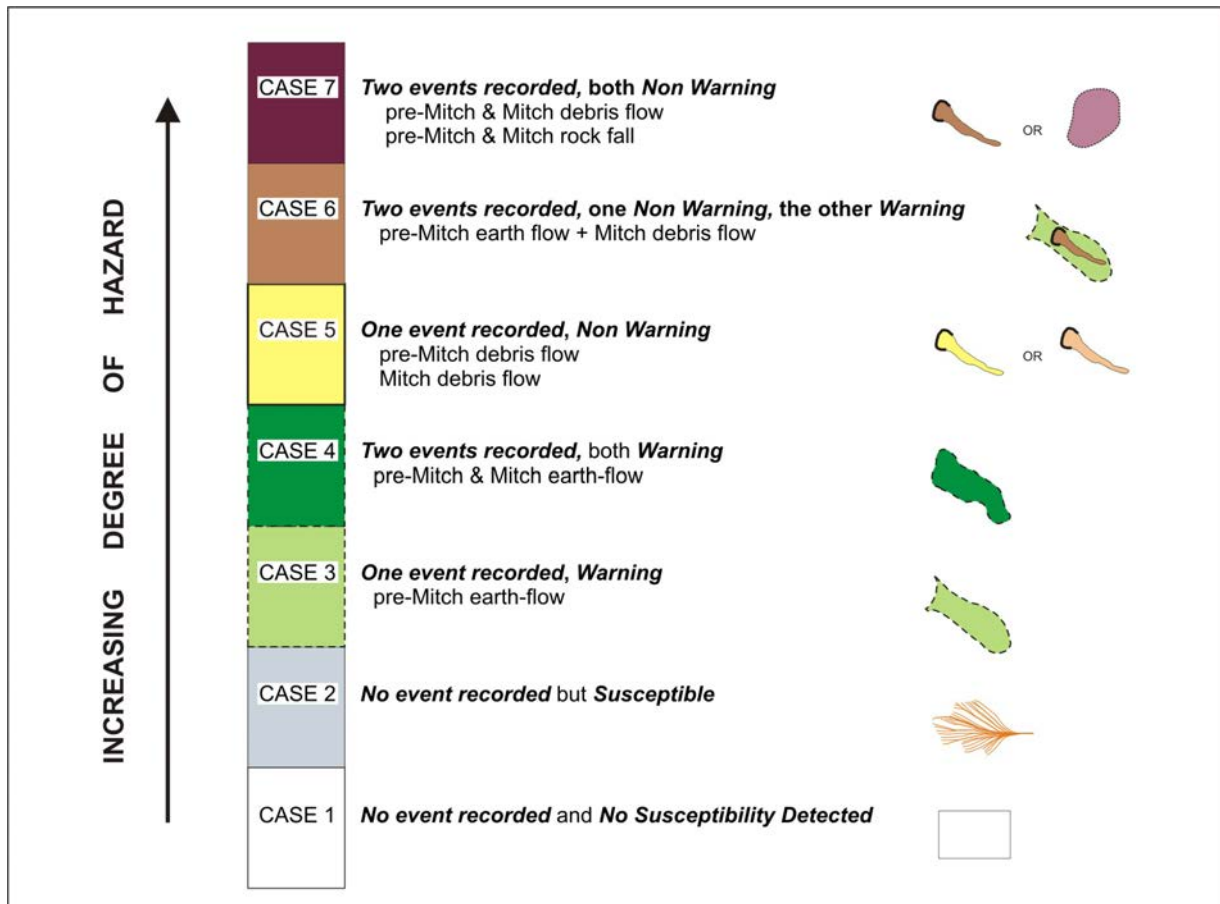


Fig. 7: Range of possible cases from higher to lower hazard. The symbols at the right hand side are in correspondence with the legend in Fig. 4. Different cases 1 to 7 correspond to the seven degrees of hazard distinguished in the Hazard Map (Fig. 8). See detailed discussion in text.

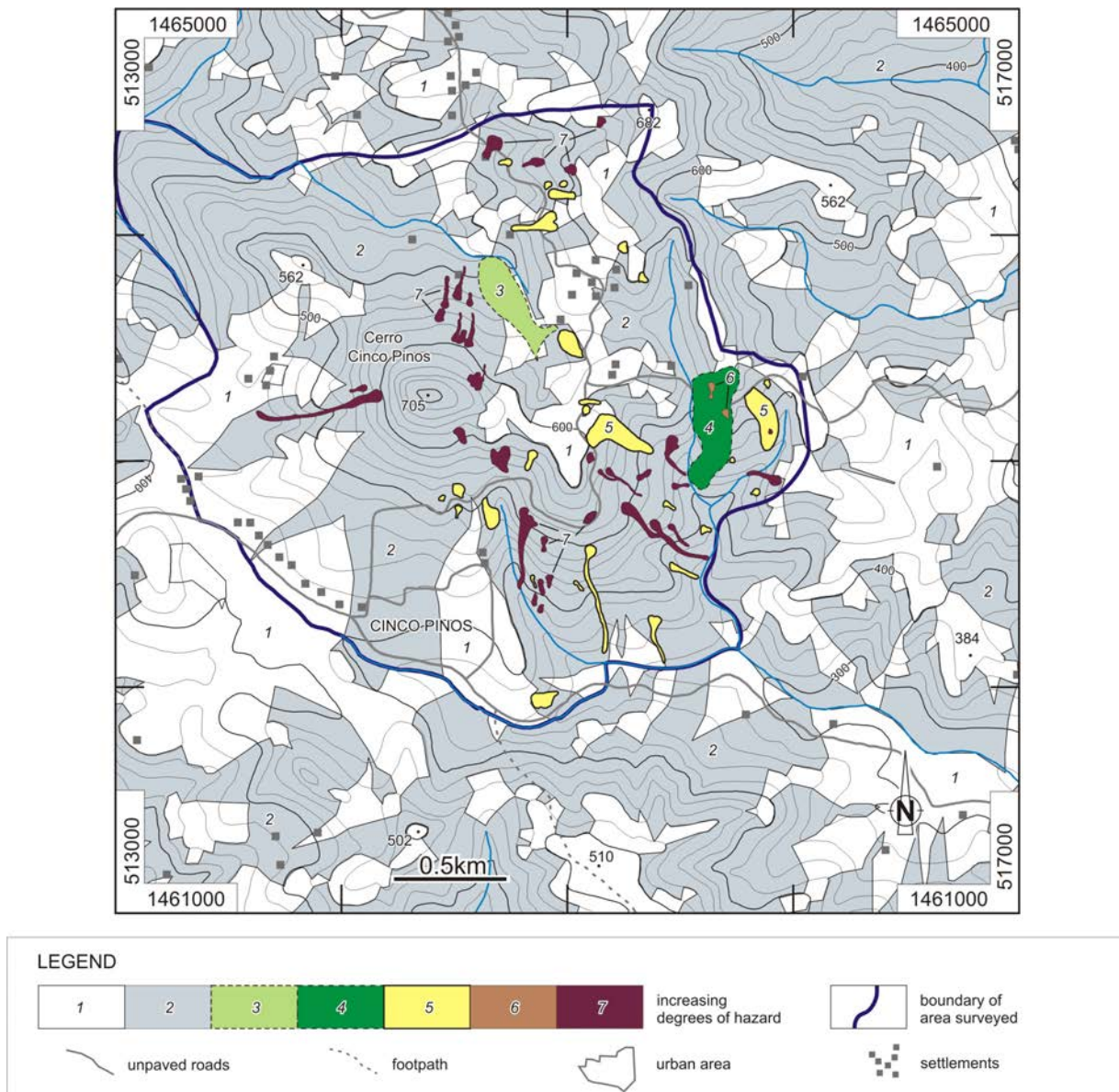


Fig. 8: Example of the Landslide Hazard Map corresponding to the Cinco Pinos area (locality in Fig. 4A). See detailed discussion in text.

6. Discussion

Throughout the process of the Hazard Map generation, there were a number of key steps in which errors were inevitably introduced. Despite the care taken throughout the generation of the DTM, subsequent checking showed maximum horizontal discrepancies of about 15 m between the original and the digitised contours. These inaccuracies, introduced in the copying and digitising stages, may have produced errors as large as $\pm 5^\circ$ for slopes around 20° in the angles calculated from the DTM. Although substantial, these errors occurred only

locally. The mismatch between mapped scars and the slope map discussed in Section 5.1 is mainly due to a much more important limitation: the low resolution of the 1:50,000 topographic base. This is the source of the low resolution of the DTM and the source of the low resolution of the Susceptibility Map (Fig. 6). As a result, the boundaries between *susceptible* and *non-susceptible* areas in the hazard map can only be seen as approximate.

The final hazard assessment is mainly based on the occurrence of and susceptibility to debris flows. This is in accordance with the (1) much larger proportion of debris flows (98%) triggered by rainfall events, (2) their large extent (affecting the 7.7% of the area surveyed) and (3) their low predictability. Of less relevance are rock-falls, which may be extensive and also difficult to predict, but which are restricted to the few areas where steep bedrock crops out. Earth flows also affect relatively large areas, but their contribution to hazard is relatively small because they occur only locally, and because their reactivation can be predicted if a simple warning system is implemented.

The present study implicitly uses the Hurricane Mitch rainfall event as a reference. Both the landslide map and the susceptibility map (Figs. 4 and 6) are based on data taken from landslides triggered during Hurricane Mitch. For example, all the measurements on slope angles have been taken from debris flows triggered by this extreme rainfall event. Slopes with gradients exceeding 20° could be more than sufficiently stable under most rainfall events and could be triggered only during extreme events such as Hurricane Mitch. Thus, the resulting Hazard Map (Fig. 8) should be seen as covering worst-scenario cases, involving rainfall intensities similar to the reference event. Obviously, if the recurrence interval of the reference event was very large, the resulting Hazard Map would be excessively pessimistic, would impose unnecessary constraints on management decisions, and would have the drawback of becoming costly. Nevertheless, the return period of around one hundred years estimated for Hurricane Mitch rainfall at meteorological stations in the proximity can be considered suitable for the present assessment. In addition, the worst-scenario approach adopted has the advantage of providing a reassuring safety factor.

Despite the fact that Nicaragua is an area prone to seismicity, the mapping presented in this paper is only based on rainfall-triggered landslides. The possibility of earthquake-induced landsliding was not taken into account, which limits the validity of the resulting hazard assessment. In principle, there is a greater likelihood of seismic triggering of landslides during the wet season in the study area, when hydrologic conditions are more suitable. The preferred mass movement typologies triggered by earthquakes could differ considerably from

those produced during rainfall events (Jibson, 1996). Some old (prior to Hurricane Mitch) and large landslides observed in the study area could have been triggered by seismic events rather than by rainfall. This could be the case of those mass movements not necessarily involving large amounts of water, such as earth flows and rock-falls. Nevertheless, according to Bommer and Rodriguez (2002), earthquakes in Nicaragua tend to trigger landslides over very small areas, suggesting that seismic triggering may be less relevant than in other areas of Central America.

It is commonly acknowledged that loss due to landslides can be considerably reduced by effective planning and management, which includes (1) restriction of development in susceptible areas, (2) development of warning systems, and (3) stabilisation of landslide areas by engineering works (Dai et al. 2002). The last line of action is not realistic in the study area given the large areas susceptible to landsliding, and the lack of funds. The approach and mapping presented in this paper could be implemented in management decisions and emergency planning in accordance with local needs. For example, new buildings and services could be restricted to areas where susceptibility has not been detected, while a local warning system and evacuation strategy could be developed for areas susceptible to landslides.

7. Conclusion

The most limiting aspect of the methodology suggested here is the low resolution of the DTM used to deduce the areas susceptible to debris flows. The same methodology could produce more reliable results if topographic maps at a resolution higher than 1:50,000 were available. A higher resolution DTM would permit further improvements by introducing into the analysis other morphological factors, such as the contributing areas to debris flows scars.

The most hazardous landslides in the study area are debris flows because they are the most widespread type of mass movement and because they are difficult to predict. The fact that landslide hazard is largely based on the occurrence of a single type of mass movement allows us to make a relatively simple approach to hazard assessment.

Landslide assessment is highly improved if an extreme event such as Hurricane Mitch can be used as a reference. Using extreme events has the advantage of providing a safety factor in hazard estimation. It is highly advisable to take full advantage of extreme events in order to produce consistent and complete landslide inventory maps. It is of paramount importance

to undertake aerial photograph coverages immediately after any significant landslide-triggering event. If the effects of such extreme events are recorded and studied in detail immediately after their occurrence, a great deal of information and the opportunity of providing future hazard assessments with good quality data will not be lost.

The hazard map provided should reflect the hazard associated with landslides triggered only by rainfall. Although probably small, the seismic contribution to landslide hazard was not assessed.

On the basis of a pragmatic approach a qualitative hazard assessment is still possible in some cases even though the amount and type of data available is rather limited. Our approach has the advantage of being cost-effective and, although the resolution of the Hazard Map is low, the methodology is most helpful in highlighting the areas that are likely to be safe. This provides the local decision makers with guidelines on the areas to be settled, and on the most suitable land uses. Moreover, the information provided is useful for planning emergency strategies, and for raising the population's awareness of landslide hazard. We believe that a pragmatic and simplified approach similar to the one presented in this study could be helpful in reducing human and material loss in other rural areas of Nicaragua, Honduras and el Salvador.

Acknowledgements

Funding was provided by Fundació Solidaritat UB, the Departament de Geologia Dinàmica i Geofísica (Universitat de Barcelona), and Generalitat de Catalunya (research group SGR2001-0081). Field work would not have been possible without the logistic support given by the Centro de Investigaciones Geocientíficas, CIGEO (Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua). We warmly thank the municipalities and people of Cinco Pinos and San Francisco del Norte for providing accommodation and support during the field work. The manuscript was significantly improved thanks to the reviews by F. Guzzetti and J. Bommer.

References

- Alcántara-Ayala, I., 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology* 47, 107-124
- Alexander, D., 1995. A survey of the Field of Natural Hazards and Disaster Studies. In: *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publishers, 1-19.
- Baeza, C., Corominas, J., 1996. Assessment of shallow landslides susceptibility by means of statistical techniques. In: Senneset, K. (ed): *Landslides / Glissements de terrain - Proceedings of the 7th international symposium on landslides*, Trondheim, Norway, 17-21 June 1996. Balkema. Rotterdam A.A., 7, 196 pp.
- Bommer, J.J., Rodríguez, C.E., 2002. Earthquake-induced landslides in Central America. *Engineering Geology* 63, 189-220.
- Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1999. Use of GIS Technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural Hazards* 20, 117-135.
- Consorcio BIT, 1999a. Plan de Desarrollo Municipal de San Francisco del Norte, Departamento de Chinandega, 47 pp. Unpublished Report.
- Consorcio BIT, 1999b. Plan de Desarrollo Municipal de San Juan de Cinco Pinos 200-2004, 71 pp. Unpublished Report.
- Dai F.C., Lee, C.F., Wang-Sijing, 1999. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Engineering Geology* 51, 279-290.
- Dai, F.C., Lee, C.F. & Ngai, Y.Y., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology* 64, 65-87.
- Darce, M., Levi, B., Nyström, J.O., Troëng, B., 1989. Alteration patterns in volcanic rocks within an east-west traverse through central Nicaragua. *Journal of South American Earth Sciences*, 2, 155-161.
- Ehrenborg, J., 1996. A new stratigraphy for the Tertiary volcanic rocks of the Nicaraguan Highland. *GSA Bulletin*, 108, 830-842.
- Fenzl, N., 1988. Nicaragua: Geografía, Clima, Geología y Hidrogeología. Belém, UFPA/INETER/INAN, 62 pp.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1994. The AVI Project: A bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy. *Environmental Management* 18, 623-633.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31, 181-216.

- Guzzetti, F., 2000. Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy. *Engineering Geology* 58, 89-107.
- Jibson, R.W., 1996. Use of landslides for paleoseismic analysis. *Engineering Geology* 43, 291-323.
- Ibsen, M.-L., Brunsden, D., 1996. The nature, use and problems of historical archives for temporal occurrence of landslides, with specific reference to south coast of Britain, Ventnor, Isle of Wight. *Geomorphology* 15, 241-258.
- INETER, 1990. Nicaragua, Regiones I y II, Departamentos de Madriz y Chinandega, Cinco Pinos 2855-IV, 1:50.000.
- INETER, 1998. Las lluvias del Siglo en Nicaragua. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Managua, Nicaragua, 159 pp.
- Lorente, A., García-Ruiz, J.M., Beguería, S., Arnáez, J., 2002. Factors Explaining the Spatial Distribution of Hillslope Debris Flows. *Mountain Research and Development*, 22, 32-39.
- McGuire, B., Mason, I., Kilburn, C., 2002. Natural Hazards and Environmental Change, Key Issues in Environmental Change, Arnold, 187 pp.
- Mc Birney, A.R., Williams, H., 1965. Volcanic history of Nicaragua. *Univ. Calif. Publi. Geol. Sci*, 55, 1-65.
- USGS, 1999. Digital Atlas of Central America: Prepared in Response to Hurricane Mitch, Version 2, Vols. 1-2. <<http://130.11.52.118/mitch/views/eventimpact.html>>
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.I. (eds.) *Landslides analysis and control*. TRB Special Report 176, Washington, 11-33.
- Varnes, D.J., 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements, UNESCO Press, Paris, 63 pp.
- Weyl, R., 1980. *Geology of Central America*. Gebrüder. Borntraeger, Berlin, 371 pp.
- Zhou, C.H., Lee, C.F., Li, J., Xu, Z.W., 2002. On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 43, 197-207.

3.2. Bloque II:

A Feasible Methodology for Landslide Susceptibility Assessment in Developing Countries: A case-study of NW Nicaragua after Hurricane Mitch.

Marta Guinau, Raimon Pallàs and Joan Manuel Vilaplana

RISKMAT Research Group, Departament de Geodinàmica i Geofísica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Zona Universitària de Pedralbes, 08028, Barcelona, Spain

Published in; Engineering Geology, vol. 80 Nos. 3-4 (2005) pp. 316-327. ISSN 0013-7952

©Elsevier B.V. all rights reserved. SCI – IF (2005): 1.040

ABSTRACT

In October 1998, Hurricane Mitch triggered a large number of landslides (mainly debris flows) in Honduras and Nicaragua, resulting in a high death toll and in considerable damage to property. In recent years, a number of risk assessment methodologies have been devised to mitigate natural disasters. However, due to scarcity of funds and lack of specialised personnel few of these methodologies are accessible to developing countries. To explore the potential application of relatively simple and affordable landslide susceptibility methodologies in such countries, we focused on a region in NW Nicaragua which was among the most severely hit during the Mitch event. Our study included (1) detailed field work to produce a high-resolution inventory landslide map at 1:10.000 scale, and (2) a selection of the relevant instability factors from a Terrain Units Map which had previously been generated in a project for rural development. Based on the combination of these two datasets and using GIS tools we developed a comparative analysis of failure-zones and terrain factors in an attempt to classify the land into zones according to the propensity to landslides triggered by heavy rainfalls. The resulting susceptibility map was validated by using a training and a test zone, providing results comparable to those reached in studies based in more sophisticated methodologies. Thus, we provide an example of a methodology which is simple enough to be fully comprehended by non-specialised technicians and which could be of help in landslide risk mitigation through implementation of non structural measures, such as land planning or emergency measures.

Keywords: landslide susceptibility, debris flows, Geographic Information System, developing countries, Nicaragua, Hurricane Mitch.

1. Introduction

Although natural hazards may occur in many parts of the world, their consequences depend on the relationship between the magnitude of natural phenomena and the vulnerability of human settlements to such an event (Alcántara-Ayala, 2002). Consequently, natural phenomena are more destructive in developing countries because of economic, political, social and cultural factors, which increase the vulnerability of these countries to natural hazards.

In recent years, a number of methodologies concerning natural hazard assessment and mapping have been devised in an attempt to determine suitable strategies to prevent and mitigate natural disasters (Brabb, 1984; Carrara et al., 1995; Soeters and van Westen, 1996). However, in developing countries insufficient funds, the absence of laws and the shortage of trained experts increase the difficulty in coping with natural disasters, which represents a considerable drawback to the socio-economic development. Moreover, many studies on the mitigation of natural hazards entail complex statistical techniques that provide results, which are often difficult to comprehend and, hence, implement by non-specialists in statistics such as planners or policy makers (Clerici, et al. 2002). There is a pressing need to test simple and low cost methodologies, which can be adapted to and used by national organisations with a low level of specialisation.

In 1998 more than 9000 people lost their lives and about 11% (3.2 million people) of the total population in Central America was affected by Hurricane Mitch. Most damage due to this event in NW Nicaragua was caused by landslides, mainly fast-moving debris flows (Pallàs, et al., 2004). These debris flows constituted the most destructive process, resulting in considerable human loss and damage to property in terms of both direct and indirect costs.

Following Hurricane Mitch, several national and international organisations carried out development projects in NW Nicaragua, the area most badly affected in this country (Solidaridad Internacional, 2001; Vilaplana et al., 2002; Pallàs et al., 2004; Guinau, et al., in press). These projects involved the systematic collection of data considered to have some bearing on rural development and potential land use. Although these datasets were not directly developed for landslide hazard assessment we were interested in testing if they could be used to implement a methodology to assess and map landslide susceptibility.

The aims of the present study are (1) to explore the potential of combining new field data with a pre-existing non-specific dataset to develop a methodology for landslide susceptibility zoning, and (2) to show an example of a simple and low cost methodology adapted to the limitations found in most developing countries, which could be used to implement non-structural strategies to mitigate landslide risk.

1.1. Study Area

Nicaragua, which occupies an area of 118.358 km², is located at the Isthmus of Central America, between 10°45' and 15°05' of north latitude and 83°15' and 87°40' of west longitude (Fig. 1). This location exposes Nicaragua to tropical rainfalls and cyclones that originate between the Caribbean Sea and the African Coast (INETER, 1998).

The study area (Fig. 1) extends over 473 km² and includes the municipalities of San Pedro del Norte, San Francisco del Norte, San Juan de Cinco Pinos, Santo Tomás del Norte and part of Somotillo, all of them in the Departamento de Chinandega, in NW Nicaragua. Located in the Interior Highland of Nicaragua, this area has a hilly landscape and an altitude between 300 and 1200 m. The area is largely constituted by Tertiary volcanic rocks of the Coyol and Matagalpa groups and Tertiary plutonic intrusions (Weyl, 1980; Fenzl, 1988). The Oligocenic Matagalpa Group is composed of rhyolitic to dacitic pyroclastic rocks, whereas the Coyol Group emplaced during Miocene-Pliocene period is made up of basaltic rocks, rhyolitic lavas, breccias, lahars and pyroclastic flows (Darce, et al., 1989; Ehrenborg, 1996). Most of these rocks are covered by an uneven layer of soil, which is composed of regolith and bedrock residual blocks.

The study area has a tropical climate with a marked dry season from November to April, during which only 10% of the annual rainfall is recorded, and a wet season from May to October with an average rainfall of 1200 mm (accounting for 90% of the annual rainfall). However, there is a marked decrease in rainfall from mid July to mid August. The temperature in the study area can fluctuate between 15 and 25°C (INETER, 1998).

The Hurricane Mitch rainfalls affected Nicaragua from 21 to 31 October 1998. The total rainfall recorded in this period in Chinandega, about 100 km from the study area (Fig. 1), was 1597mm, more than the mean annual-rainfall, which in this region is 1420mm. Only on one day - 30 October - 485 mm were recorded in this zone (INETER, 1998). The effects of these torrential rains in the study area, i.e. mainly debris flows, affected 32% of

the population, resulting in considerable damage to property and human life (Solidaridad Internacional, 2001).

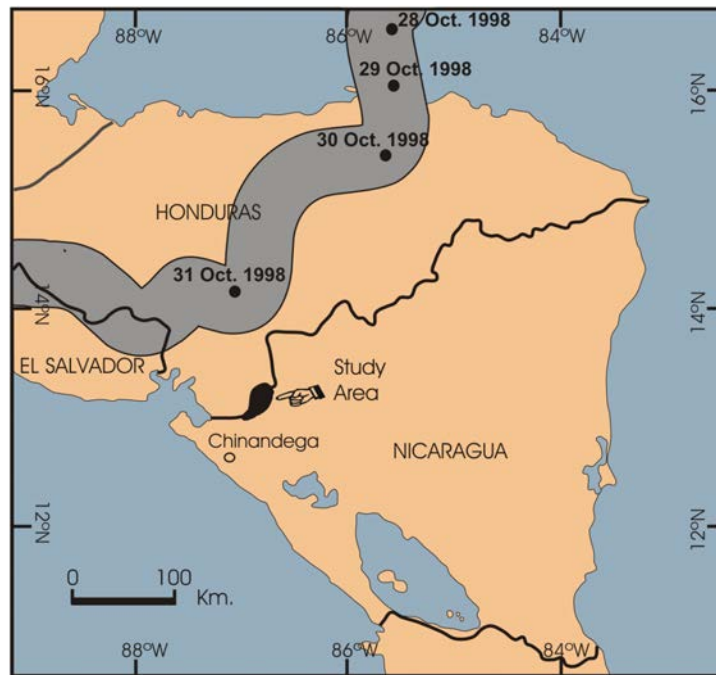


Fig. 1: Study area location (in black), and place names referred to in the text. The grey band shows Hurricane Mitch path, based on USGS (1999) data.

2. Data available

Two types of information enabled us to develop and validate a methodology to produce a *landslide susceptibility map* in the study area: (1) a *landslide inventory* and map prepared by a member of RISKNAT and (2) a *terrain units map* obtained in the frame of a Solidaridad Internacional (Spanish non governmental organisation) and UPOLI (Polytechnic University of Nicaragua) project (Solidaridad Internacional, 2001).

2.1. Landslide Map

Landslide inventory and mapping is aimed at determining the processes concerning landslide development in the study area and the terrain instability factors involved.

To obtain the landslide inventory and map the procedure was as follow; (a) Aerial photographs interpretation: the aerial photographs taken in 2000 at 1:40.000 scale, were enlarged at 1:20.000 scale yielding an acceptable resolution and allowing a more detailed interpretation. The landslides caused by Hurricane Mitch were mapped; (b) Compilation

over orthophotos: the compilation of these affected areas over orthophotos at 1:10.000 scale allowed us to obtain a preliminary landslide map; (c) Field work: the landslide map was checked and corrected to obtain the definitive landslide map at 1:10.000 scale, and field observations were made in areas with the highest density of landslides to obtain information on the mechanisms and the instability factors involved in terrain failures; (d) Digitising of the landslide map: the resulting digital landslide map included the areas affected by landslides (Fig. 2A), making the distinction between the areas affected by terrain-failure, where landslides start, and the areas affected by the path and the accumulation of the mobilised material (Fig. 2B).

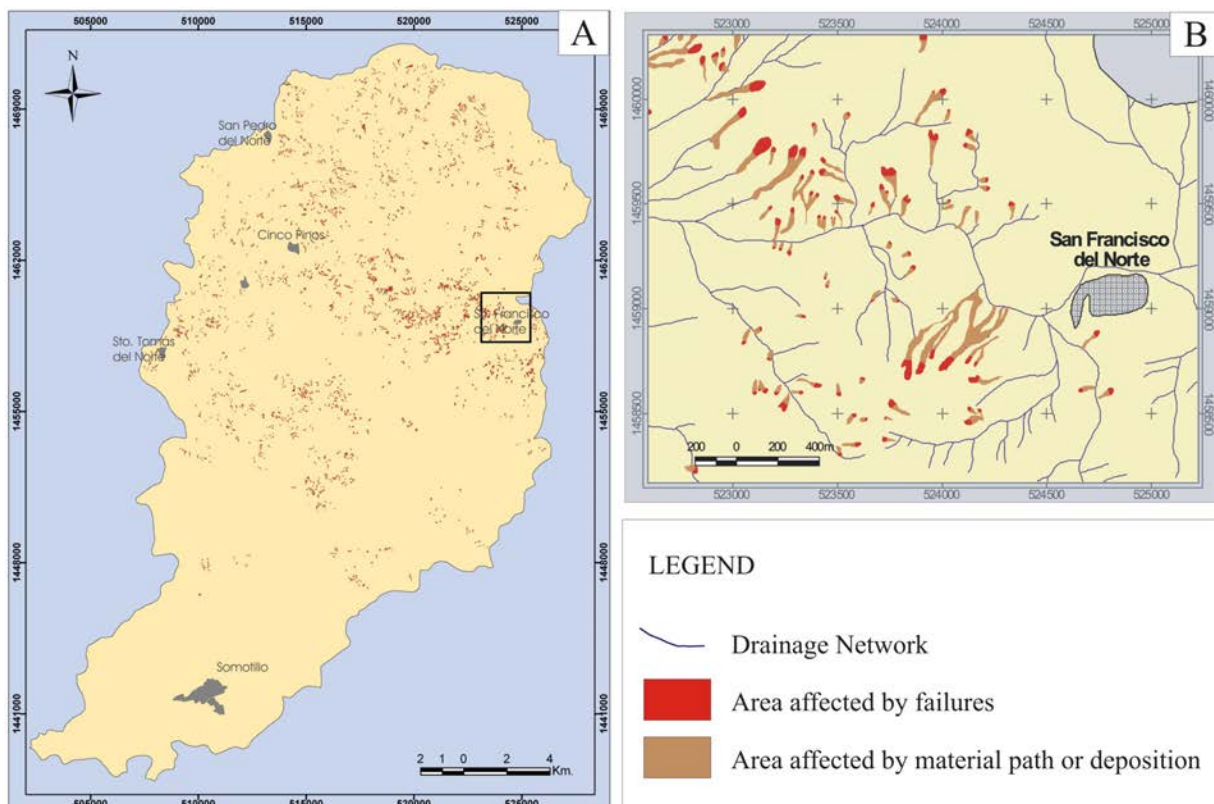


Fig. 2: (A) *Landslide map*. (B) Enlarged portion of the *landslide map* showing failure-zones (in red) and the areas affected by the path or the deposition of mobilised material (in brown). Coordinates are Universal Transverse Mercator.

2.2. *Terrain units map*

With the aid of aerial photointerpretation and field observations, it is possible to obtain significant information on terrain characteristics such as lithology, slope, soil characteristics, land use, which is used to classify the terrain into Terrain Units (Fig. 3A) (Hansen, et al. 1995; Guzzetti, et al. 1999). This term refers to a portion of land surface, which contains uniform ground conditions that differ from the adjacent units across

definable boundaries (Hansen, 1984; Guzzetti, et al. 1999). Ground conditions are defined by a given combination of classes of each terrain factor (Fig. 3B).

The *terrain units map* used in the present study was developed in a GIS environment at 1:10.000 scale. Terrain Units were defined from fourteen different terrain factors. From this *terrain units map* it was possible to obtain *thematic maps*. Each map represents a terrain factor and the different classes that characterise it (Fig. 3A-B).

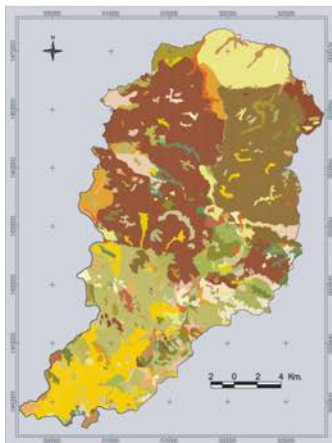
3. Methodology

According to the analysis of terrain conditions in areas affected by landslides in the past or present it is possible to determine zones with similar characteristics such as areas prone to landsliding, termed Landslide Susceptible Areas.

Although terrain instability is governed by a large number of geological and environmental factors, it is necessary to differentiate instability factors, which condition terrain-failure, from other factors, which influence the area affected by the reach of the mobilised material. In the present study only the areas affected by terrain-failures, i.e. the areas where landslides start, are taken into account when determining areas prone to failure (Irigaray, et al., 1999; Baeza and Corominas, 2001; Dai, et al., 2002; Chung and Fabbri, 2003). Thus, the susceptibility map resulting from this methodology represents the susceptibility to terrain-failure.

A given area is declared to be susceptible to terrain-failures when the terrain conditions at a given site are comparable to those in an area where the terrain-failure has occurred. Hence, a comparative analysis between terrain-failure zones affected by Hurricane Mitch and different instability factors allowed us to zone the study area according to its susceptibility to landslides.

A



T U Code	Lithology	Morphology	Slope (degree)	Soil type	Soil thick. (cm.)	Soil texture	...
1	Dcrr/G3S	Dacite	Ridge	> 30	A 3222/sc	< 40	Sand
2	D/Gcrrc/G4F	Dacite	Ridge	> 30	A 3222/eccc	< 40	Sand
3	Dvacc/C6M	Dacite	Valley	0 - 8	A 1452/ecc	> 90	Mud
4	B/D/Glacc/F4F	Andecite	Slope	> 30	A 1442/eccc	> 90	Sand
5	Dvac/C6M	Dacite	Valley	0 - 8	A 1342/ec	> 90	Sand
6	D/Glacc/F4F	Dacite	Slope	> 30	A 1442/eccc	> 90	Sand
7	Bvac/D6M	Basalt	Valley	8 - 15	A 1452/ec	> 90	Mud
8	Dlac/F4S	Dacite	Slope	> 30	A 1452/9bsc	> 90	Mud
9	Bcocc/E4M	Basalt	Hill	15 - 30	A 1452/ec	> 90	Mud
10	Dcrr/G3S	Dacite	Ridge	> 30	A 3202/sc	< 40	Gravel
11	Bvac/C5M	Basalt	Valley	0 - 8	A 1452/ec	> 90	Mud
12	Blac/F4F	Basalt	Slope	> 30	A 1442/ecc	> 90	Sand
13	Btecc/C4M	Basalt	Terrace	0 - 8	A 1452/ecc	> 90	Mud
14	Gcrrc/G4S	Granite	Ridge	> 30	A 1442/scc	> 90	Sand
15	Bcocc/E4F	Basalt	Hill	15 - 30	A 1452/ecc	> 90	Mud
16	Bcrr/G3S	Basalt	Ridge	> 30	A 1452/sc	> 90	Mud
17	Gtec/C5M	Granite	Terrace	0 - 8	A 1452/ec	> 90	Mud
18	B/Dcrr/G4F	Basalt	Ridge	> 30	A 2452/9becc	40 - 90	Mud
19	Bvacc/D6F	Basalt	Valley	15 - 30	A 1442/eccc	> 90	Sand
20	Gcrrc/G4S	Granite	Ridge	> 30	A 1442/scc	> 90	Sand
21	...						

B

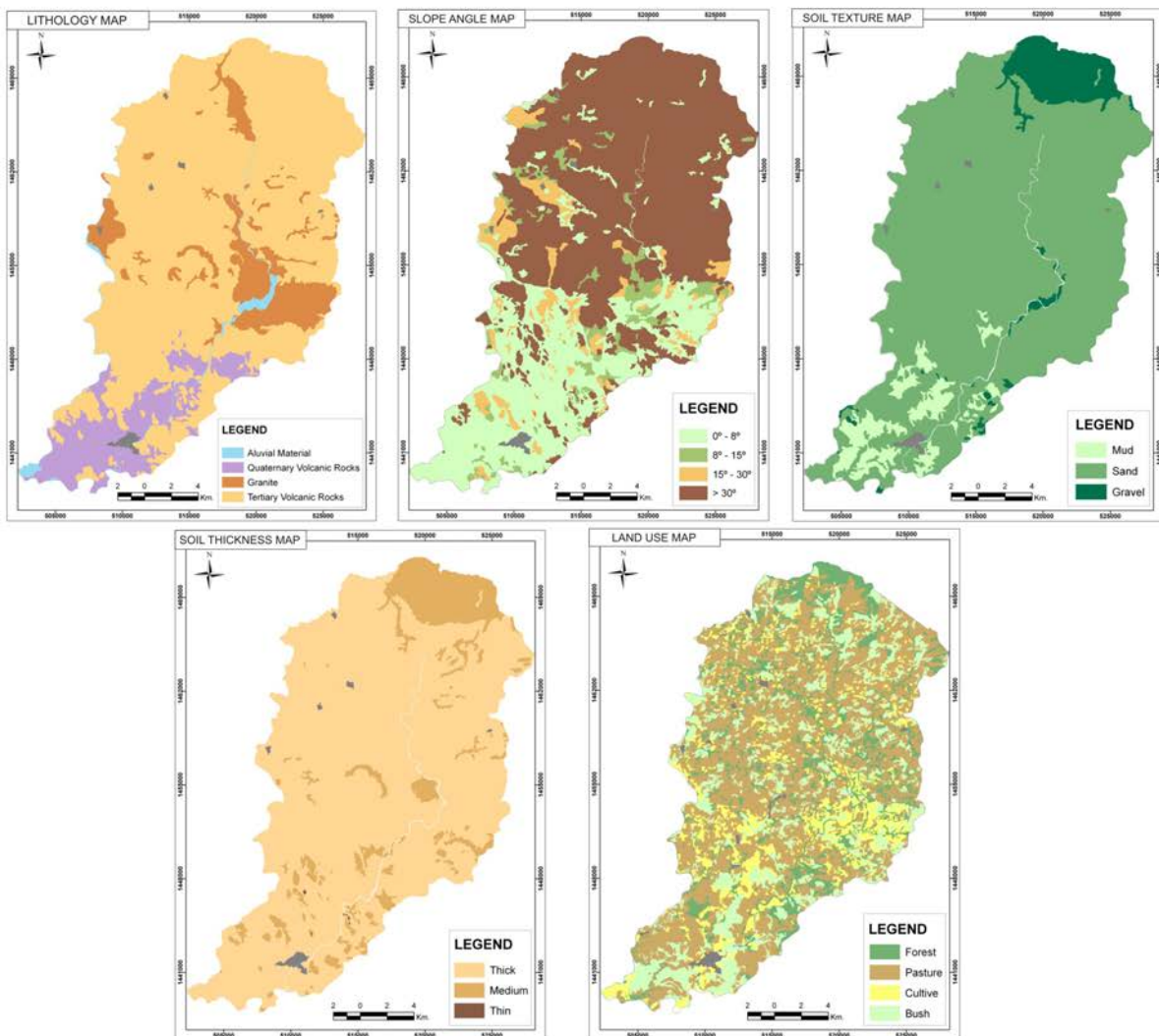


Fig. 3: (A) Terrain units map (different colours corresponding to terrain units 1 to 491) and a portion of the associated data table showing the first twenty Terrain Units and six terrain factors. The values in the second column in the table correspond to terrain unit codes. Columns three to eight show an example of the classes of each terrain factor which characterize Terrain Units. (B) Example of *thematic maps* obtained from the *terrain units map*. Each one shows a terrain factor defined by a given number of classes.

Generally, a minimum of two rainfall events producing landslides are needed to validate a susceptibility map. In our study, lack of historical data or a rainfall event after Hurricane Mitch rules out the possibility of a validation of this kind. However, following the same approach as Baeza and Corominas, (2001), Chung and Fabbri (2003) and Remondo et al., (2003), the division of the study area into two zones (see Fig. 4) allowed us to develop the methodology in a Training Zone, and to validate it in a Test Zone. The main criteria for dividing the study area were the homogeneity of extension and terrain characteristics.

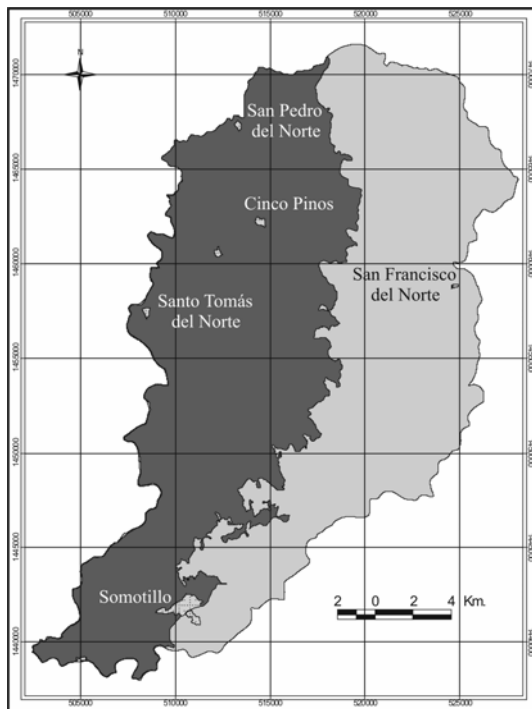


Fig. 4: Division of the study area into Training Zone (in dark grey) and Test Zone (in light grey).

3.1. Selection of instability factors

Slope instability is governed by a complex set of interrelated terrain parameters but a simplified approach requires a selection of a limited number of key instability factors. The factors are selected in accordance with subjective expert opinion and depend on a prior knowledge of the external processes in the study area.

Field observations contribute to the understanding of terrain-failure mechanisms and their conditioning factors. In our study case, most terrain-failures involved the total thickness or a portion of soil formation mobilised over the bedrock (Vilaplana et al., 2002; Pallàs et al., 2004). Based on the field observations, the instability factors from the *terrain units map* that were selected in this study are: slope, lithology, soil thickness, soil texture and land use.

3.2. Weighting instability factors in the Training Zone

As pointed out by van Westen, et al. (1997) and Carrara, et al. (1999), the heuristic method used to choose the relevant instability factors involves a relatively high degree of subjectivity. To determine more objectively the weight of each class for the different instability factors influencing terrain-failure we made a comparative analysis between the terrain characteristics and the distribution of failure-zones by using a Geographic Information System (GIS).

The comparative analysis consisted in superimposing the failure-zones map on each thematic map. Given that each instability factor is divided into a number of classes, it is possible to calculate the percentage of the area covered by failures in each class (W_i):

$$W_i = [A_{f_i} / A_i] \times 100$$

where A_{f_i} is the area covered by failures in a given class and A_i is the area of this class. This percentage W_i represents the weight or degree of influence of each class in terrain-failures (Campbell, 1973; Wright and Nilsen, 1974; Wright, et al., 1974; DeGraff, 1985; Guzzetti, et al., 1994; Clerici, et al. 2002; Dai, et al. 2002).

3.3. Landslide susceptibility calculation in the Training Zone

Given that each Terrain Unit is characterised by a combination of classes, each class corresponding to a terrain factor, it is possible to calculate a cumulative value, adding up the weights obtained previously (Table 1). This cumulative value represents the relative propensity of the terrain to failure in each Terrain Unit.

Table 1
Example of the Terrain Units and the weights associated to their classes.

Terrain Unit Code	Slope Class Weight	Lithology Class Weight	Soil Thick. Class Weight	Soil Texture Class Weight	Land Use Class Weight	Cum. Value
Gacc/G4F	> 30° = 0,32	Granite = 0,45	Low = 0,00	Gravel = 0,31	Forest = 0,13	W = 1,21
Dvac/B3S	8° - 15° = 0,00	Tertiary V = 0,20	High = 0,33	Mud = 0,03	Cultivate = 0,10	W = 0,66
Iva/B6L	0° - 4° = 0,00	Quat V = 0,00	Medium = 0,18	Sand = 0,20	Pasture = 0,22	W = 0,60
Ava/F4M	15° - 30° = 0,03	Alluvial = 0,00	Low = 0,00	Gravel = 0,31	Bush = 0,21	W = 0,55
Dplcc/D5L	0° - 4° = 0,00	Tertiary V = 0,20	High = 0,33	Gravel = 0,31	Pasture = 0,22	W = 1,06
Dvacc/C6M	4° - 8° = 0,00	Tertiary V = 0,20	Medium = 0,18	Mud = 0,03	Cultivate = 0,10	W = 0,51
...

Cumulative values are shown on the right column. Tertiary V: Tertiary Volcanic Rocks (Andesite, Dasite and Basalt) and Quat V: Quaternary Volcanic Rocks (Ignimbrite and Pyroclast)

3.4. Landslide susceptibility classes and mapping in the Training Zone

Cumulative values obtained for each Terrain Unit can be classified into several intervals to define different susceptibility classes. These can be used to classify the land surface into different susceptibility degree domains. We divide the *maximum cumulative susceptibility value* ($C_{v_{max}}$) by the number of intervals (N), which we want to represent in the landslide susceptibility map, obtaining an interval size (X).

$$X = C_{v_{max}} / N$$

Once an interval size (X) has been chosen, GIS utilities allow the classification of the study area into N susceptibility classes. Figure 5 shows an example of subdivision into four susceptibility classes.

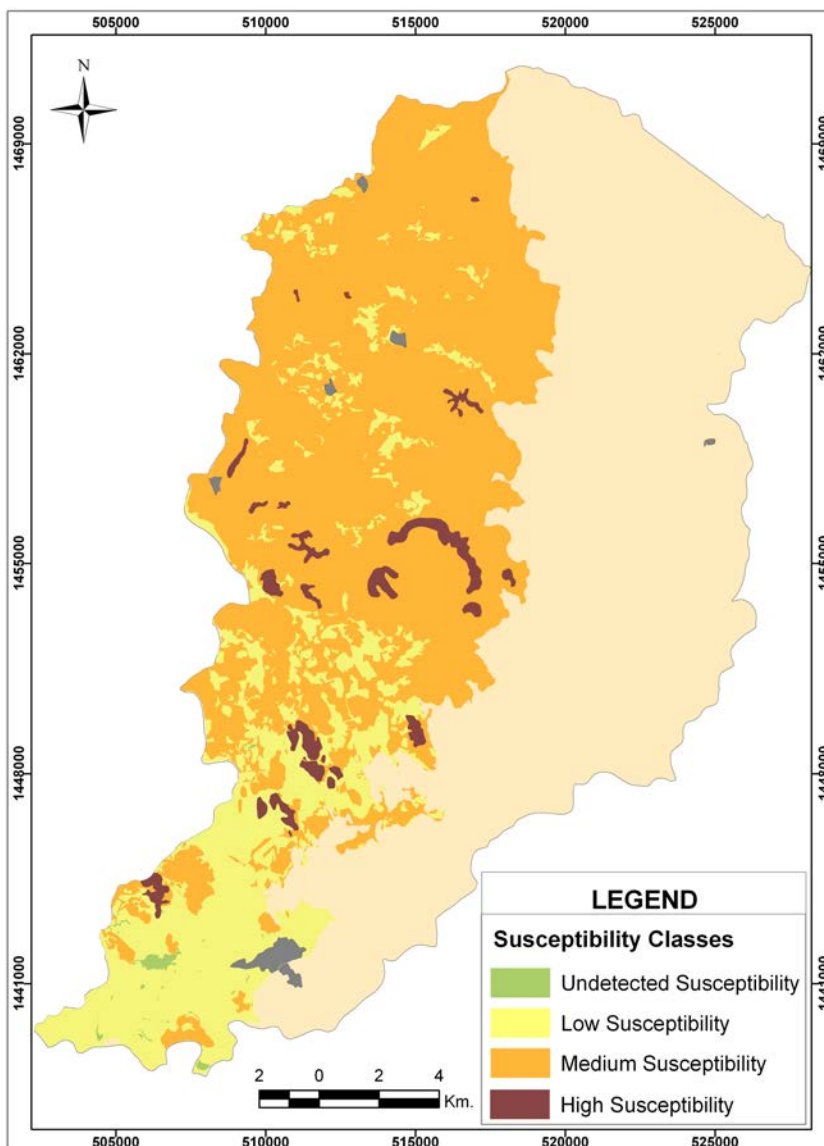


Fig. 5: Landslide susceptibility map obtained in Training Zone.

3.5. Validation of the susceptibility map in the Test Zone

Given that the terrain characteristics in the Test Zone resemble those of the Training Zone, a *landslide susceptibility map* could be obtained by integrating the weights previously determined for each class. Using GIS tools, cumulative values of the weights previously attributed to each class in the Training Zone were calculated for each Terrain Unit in the Test Zone. These cumulative values were distributed in a number of intervals or susceptibility classes (N) in the Test Zone (Fig. 6), coinciding with the number chosen for the Training Zone.

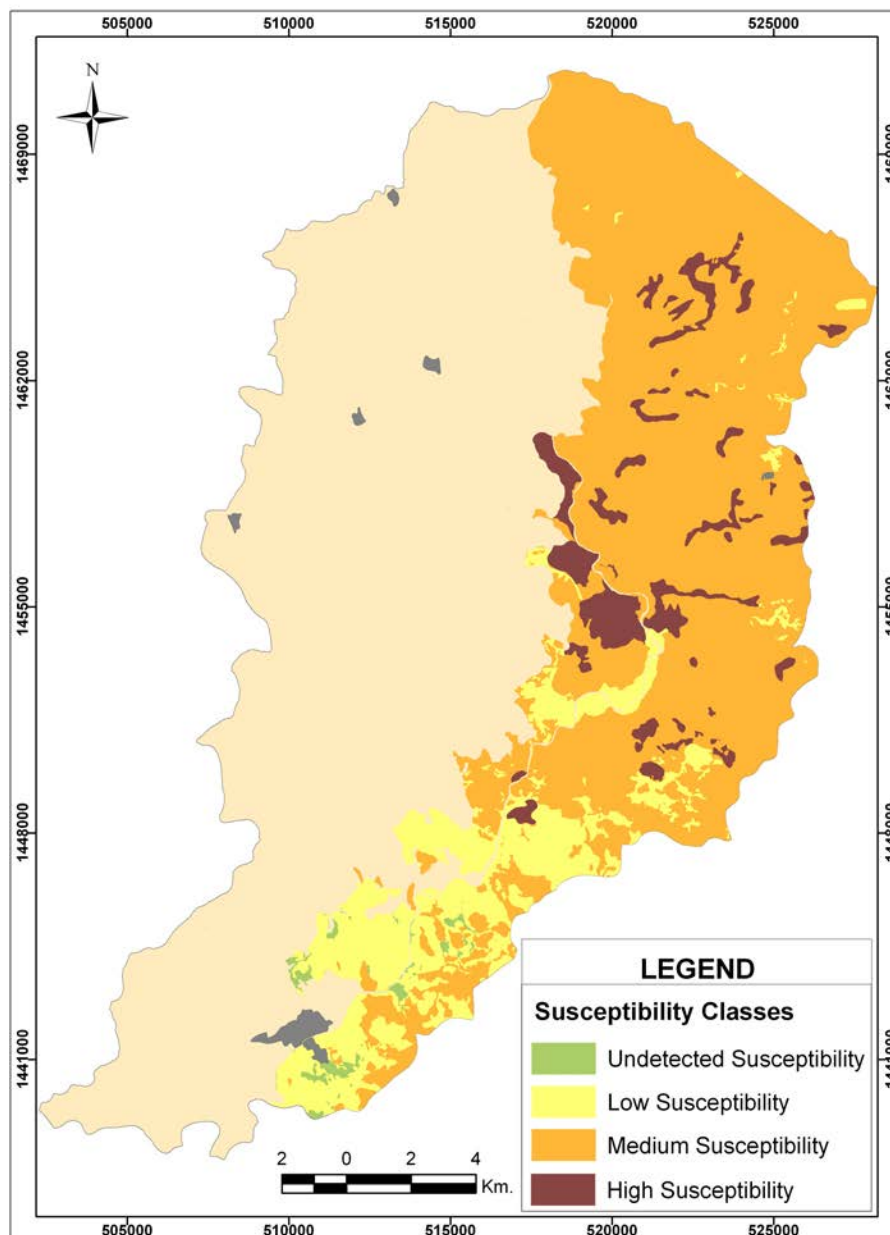


Fig. 6: Landslide susceptibility map obtained in Test Zone.

The *susceptibility map* was then compared with the failure-zones for validation. GIS tools allowed us to obtain the percentage of the area of failure in each susceptibility class ($\%A_{fi}$) with respect to the total area of failure when considering the whole test zone. $\%A_{fi}$ was obtained using the following expression:

$$\%A_{fi} = 100(A_{fi}/A_{sci}) / \sum (A_{fi}/A_{sci})$$

where A_{fi} is the area affected by failures in a given susceptibility class, A_{sci} is the class area. $\%A_{fi}$ allows us evaluate whether failure-zones coincide with the areas regarded as being highly susceptible to failure.

Figure 7 shows a gradual decrease in the percentage of failures between the areas of high susceptibility and the areas of low susceptibility. Equivalent distributions were found when applying this kind of validation to susceptibility maps corresponding to different number of susceptibility classes (N varying between 3 and 6). Such robust outputs suggest that our methodology is adequate to obtain landslide susceptibility maps in the study area.

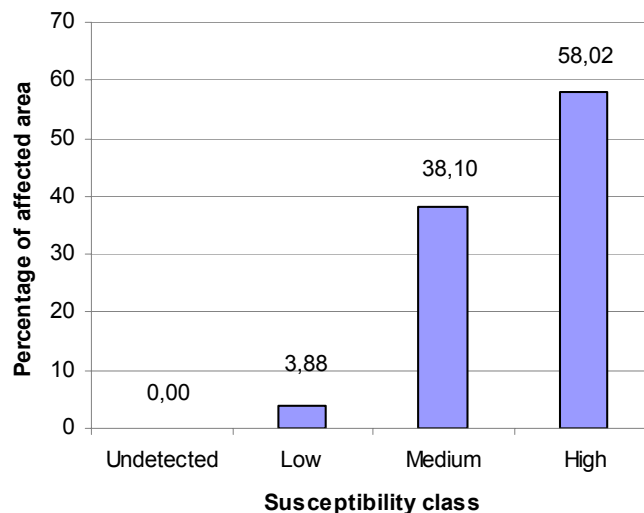


Fig. 7: Graph showing the percentage of area affected by failures on each Susceptibility Class.

4. Discussion

Hurricane Mitch constitutes the reference event in our study to develop a methodology to obtain landslide susceptibility maps. The dominant typology of landslides triggered by this event in the study area is debris flows. Therefore, the resulting *landslide susceptibility map* shows the propensity to debris flows resulting from heavy rainfalls.

The methodology developed in the present paper is based on a comparative analysis between the distribution of the observed failure-zones and the instability factors. Consequently, the landslide susceptibility map obtained shows the propensity of the terrain to failure but not the propensity to be affected by the path or the deposition area of the mobilised material. This is an important limitation of susceptibility maps, which could be improved by considering the fact that debris flows tend to merge with the drainage network. Thus, the methodology shown in the present paper could be complemented with the simplified method suggested by Pallàs et al., (2004) which, based on a Digital Terrain Model, permits the calculation of flow lines from potential source areas. The application of such a methodology is out of the scope of the present paper and is not shown here.

A limitation of the approach to susceptibility analysis presented here is that it implicitly considers that instability factors are mutually independent. Such an assumption may not be realistic and could produce a larger overestimation in the susceptibility values in high susceptibility classes. Thus, the susceptibility values assigned to each susceptibility class must be seen as relative, and need to be used as qualitative indexes. The resulting map is helpful in separating areas of increasing degrees of susceptibility, which is a reasonable first approach to hazard assessment considering the limited resources found in most developing countries.

The methodology suggested in the present paper enables to obtain landslide susceptibility maps with a variable number of susceptibility classes. It has to be pointed out that this number will depend on the requirements and possibilities of the study area. Thus, the technician in charge will need to base his choice on site specific criteria related to socio-economic factors and on the end use of the resulting susceptibility map. As an example, the best choice in the number of classes may vary if the map is to be used for management of emergencies or for land-use planning. Note that the landslide susceptibility map should only be used to establish non-structural strategies to mitigate landslide effects. To implement structural measures it would be necessary to estimate the magnitude of the landslides that can affect the area, which is beyond the scope of our general approach.

The main difficulty when trying to produce sound hazard assessments is the lack of reliable field and historical data. This is especially true in developing countries where data are scarce and where specific studies are rarely made. Our study relies on the combination of two main datasets: On the one hand we made a new collection of high resolution quality data in the

field that enabled us (1) to construct a reliable landslide map at 1:10.000 scale and (2) to gain sufficient knowledge about the key factors involved in debris flow failure in the area. This was a key part of the study, and required the participation of personnel specialised in landslides and time-consuming work in the field. On the other hand we also used a pre-existing non-specific dataset from which the factors relevant to instability were chosen. Although the thematic maps and classes included in these datasets were far from ideal, we have shown that, complemented with good-quality high-resolution field data covering a large portion of the study area, they could be used as the basis for a consistent susceptibility analysis.

In recent years a number of methodologies to produce landslide susceptibility maps have been developed in an attempt to mitigate natural disasters. However, the complexity of these methodologies and the socio-economic situation of developing countries highlight the need for simple and low cost methodologies to obtain necessary information to mitigate natural risks. As recognised by Carrara, et al. (1999) and Clerici, et al. (2002), sophisticated statistic methods may provide relatively accurate results but may be too difficult to comprehend by non-specialists in statistics to be applied with success. A more simple methodology like the one presented in this paper may have the drawback of being less accurate but has the advantages of (1) being feasible when data is limited and (2) being easily learned, fully comprehended and handled by technicians trained in landslide assessment without a high level of specialisation in statistics.

The validation of our susceptibility assessment (Fig. 7) suggests that the application of relatively simple methodologies, even when using non-ideal datasets, can give results which are comparable with those based on sophisticated statistical methods and exhaustive, expensive selection of specific data (e.g. Neuland, 1976; Duque et al., 1990; Irigaray et al., 1999; Baeza and Corominas, 2001; Chung and Fabbri, 2003; Remondo et al., 2003). Obviously different areas and datasets may behave differently, and some kind of validation will always be required. Providing that division into two homogeneous areas is possible, the validation through a training and a test zone appears to be a good approach for those areas where only one reference event is available.

5. Conclusion

The methodology suggested in the present paper allows the detection of potential debris flows source areas under heavy rainfall conditions. This methodology, complemented with simple methods aimed at establishing preferential debris flows paths, could provide a useful document to help in the mitigation of debris flow risk through the implementation of non-structural measures.

Even in developing countries there are regions where datasets collected for purposes other than risk mitigation are available. When combined with good-quality high-resolution specific data and GIS technologies, the use of such datasets can help in reducing the costs of susceptibility analyses, making them available to areas where they could otherwise not be afforded.

Any susceptibility study using non-specific datasets needs to develop some kind of validation process. The division of the study area into training and test zones is a promising approach for validation in areas where, as in most developing countries, little historical information is available.

Simple methodologies for susceptibility assessment are more easily comprehended and handled than sophisticated ones. They may provide a good cost-effective compromise, making them accessible to developing countries where specialised personnel and funds are scarce.

Acknowledgements

This study could not have been possible without the agreement between the Spanish NGO, *Solidaridad Internacional-SI*, the *Instituto de Capacitación y Investigación para el Desarrollo Rural Integral-ICIDRI* of the Universidad Politécnica de Nicaragua -UPOLI and the *Departament de Geodinàmica i Geofísica* of the Universitat de Barcelona-UB. We are indebted to the municipalities and people of Cinco Pinos, San Francisco del Norte, San Pedro del Norte, Santo Tomás del Norte and Somotillo for providing accommodation and support during the fieldwork. This research received financial support from the Generalitat de Catalunya: project SGR 2001 – 00081.

References

- Alcántara-Ayala, I., 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2-4), 107-124.
- Baeza, C., and Corominas, J., 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1251-1263.
- Brabb, E.E., 1984. Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. In: *Landslides-Glissements de Terrain, IV International Symposium on Landslides, Vol. 1*, Toronto, Canada, pp. 307-323.
- Campbell, R., 1973. Dume Quadrangle, Los Angeles County, California; an experiment in generalising and quantifying areal distribution of landslides. US Geological Survey, *Miscellaneous Field Studies. Map, MF-535 Scale 1:24,000*.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 1995. GIS-based techniques for mapping landslide hazard. (<http://deis158.deis.unibo.it>)
- Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. 1999. Use of GIS thechnology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural Hazards*, 20: 117-135.
- Chung, Ch.F. and Fabbri, A.G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30 (3): 451-472.
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., Vescovi, P. 2002. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, 48 (4): 349-364.
- Dai, F. C., Lee, C.F., Ngai, Y.Y., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64 (1): 65-87.
- Darce, M., Levi, B., Nyström, J.O., Troëng, B., 1989. Alteration patterns in volcanic rocks within an east-west traverse through central Nicaragua. *Journal of South American Earth Sciences* 2: 155-161.
- DeGraff, J.V., 1985. Using isopleth maps of landslides deposits as a tool in timber sale planning. *Bulletin American Association of Engineering Geologists* 22: 445-453.
- Duque, A., Echevarría, G., Fernández, E., Kerejeta, A., Cendrero, A., Tamés, P., 1990. Comprobación empírica de metodologías para la elaboración de mapas de amenaza de inestabilidad de laderas; aproximación de un modelo general de evaluación del riesgo. In: Hermelin, M. (Ed.) *Environmental Geology and Natural Hazards in the Andean Region*. AGID Report No. 13, Pereira, Colombia, pp. 189-206.
- Ehrenborg, J., 1996. A new stratigraphy for the Tertiary volcanic rocks of the Nicaraguan Highland. *GSA Bulletin* 108, 830-842.

- Fenzl, N. 1988. Nicaragua: Geografía, Clima, Geología y Hidrogeología. UFPA/INETER/INAN, Belém. 62 pp.
- Guinau, M., Vilaplana, J.M., van der Zee, J. (in press). Propuesta metodológica para la evaluación de la Susceptibilidad a los movimientos de ladera. In: Pobreza en el Trópico seco rural de Nicaragua, causas principales y perspectivas para su aliviación; Estudios aplicados en 9 municipios, con énfasis en el norte de Chinandega. Managua, Nicaragua.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1994. The AVI project: a bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy. *Environmental Management*, 18: 623-633.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31: 181-216
- Hansen, A., 1984. Landslide Hazard Analysis. In; Brunsden, D., Prior, D.B (Eds.), *Slope Instability*. Chapter 13, pp. 523-602.
- Hansen, A., Franks, C.A.M., Kirk, P.A., Brimicombe, A.J., Tung, F., 1995. Application of GIS to hazard assessment, with particular reference to landslides in Hong Kong. In; Carrara, A., Guzzetti, F (Eds.), *Geographical Information Systems in assessing natural hazards*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands, pp 273-298.
- INETER, 1998. Las Lluvias del Siglo en Nicaragua. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, INETER. Managua, Nicaragua. 159 pp.
- Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R., Chacón, J., 1999. Verification of landslide susceptibility mapping: a case study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 537-544.
- Neuland, H. 1976. A prediction model of landslips, *Catena* 3, 215-230.
- Pallàs, R., Vilaplana, J.M., Guinau, M., Falgàs, E., Alemany, X., Muñoz, A., 2004. A pragmatic approach to debris flow hazard mapping in areas affected by Hurricane Mitch: Example from NW Nicaragua. *Engineering Geology* 72: 57-72.
- Remondo, J., González, A., Díaz de Terán, J.R., Fabbri, A., Cheng, Ch.F., 2003. Validation of landslide susceptibility maps; Examples and applications from a case study in Northern Spain. *Natural Hazards*, 30 (3): 437-449.
- Soeters, R., van Westen, C.J., 1996. Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, pp. 129-177.
- Solidaridad Internacional, 2001. Estrategias participativas para el desarrollo rural en seis municipios del norte del Departamento de Chinandega. Proyecto de Cooperación

- Internacional desarrollado conjuntamente con el Instituto de Capacitación e Investigación para el Desarrollo Rural Integral (ICIDRI) de la Universidad Politécnica de Nicaragua (UPOLI). Managua, Nicaragua. Unpublished Report.
- USGS, 1999. Digital Atlas of Central America: Prepared in response to hurricane Mitch, version 2, Vols. 1-2. <http://130.11.52.118/mitch/views/eventimpact.html>.
- van Westen, C. J., Rengers, N., Terlien, M.T.J. 1997. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geol Rundsch* 86: 404-414.
- Vilaplana, J.M., Pallàs, R., Guinau, M., Falgàs, E., Alemany, X., Muñoz, A., 2002. Peligrosidad Geológica Asociada a los Movimientos de Ladera en el Noroeste de Nicaragua. *Serie Geográfica*, 10, 109-119. Dpto. Geografía, Universidad Alcalá de Henares, (Madrid)
- Weyl, R., 1980. *Geology of Central America*. Gebrüder, Borntraeger, Berlin. 371 pp.
- Wright, R.H., and Nilsen, T.H., 1974. Isopleth map of landslide deposits, Southern San Francisco Bay Region, California. US Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map, MF-550. scale 1:250,000.
- Wright, R.H., Campbell, R.H., Nilsen, T.H., 1974. Preparation and use of isopleth maps of landslide deposits. *Geological Society of America, Geology* 2, 483–485.

3.3. Bloque III:

GIS-based debris flow source and runout susceptibility assessment from DEM data. A case study in NW Nicaragua.

M. Guinau (1), I. Vilajosana (1) and J.M. Vilaplana (1)

(1) RISKNAT Research Group. Departament de Geodinàmica i Geofísica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Zona Universitària de Pedralbes, 08028, Barcelona, Spain.

Submitted to; Natural Hazards and Earth System Sciences. *NHESS* Print: ISSN 1561-8633

Online: ISSN 1684-9981. SCI – IF (2007): 0.884

ABSTRACT

In October 1998, Hurricane Mitch triggered numerous landslides (mainly debris flows) in Honduras and Nicaragua, resulting in a high death toll and in considerable damage to property. The potential application of relatively simple and affordable spatial prediction models for landslide hazard mapping in developing countries was studied. Our attention was focused on a region in NW Nicaragua, one of the most severely hit places during the Mitch event.

A landslide map was obtained at 1:10.000 scale in a Geographic Information System (GIS) environment from the interpretation of aerial photographs and detailed field work. In this map the terrain failure zones were distinguished from the areas within the reach of the mobilized materials. A Digital Elevation Model (DEM) with 20m x 20m of pixel size was also employed in the study area.

A comparative analysis of the terrain failures caused by Hurricane Mitch and a selection of 4 terrain factors extracted from the DEM which, contributed to the terrain instability, was carried out. Land propensity to failure was determined with the aid of a bivariate analysis and GIS tools in a terrain failure susceptibility map. In order to estimate the areas that could be affected by the path or deposition of the mobilized materials, we considered the fact that under intense rainfall events debris flows tend to travel long distances following the maximum slope and merging with the drainage network. Using the TauDEM extension for ArcGIS software we generated automatically flow lines following the maximum slope in the DEM starting from the areas prone to failure in the terrain failure susceptibility map. The

areas crossed by the flow lines from each terrain failure susceptibility class correspond to the runout susceptibility classes represented in a runout susceptibility map.

The study of terrain failure and runout susceptibility enabled us to obtain a spatial prediction for landslides, which could contribute to landslide risk mitigation.

1. Introduction

Landslide hazard is generally defined as the probability that a landslide may occur within a given area in a given period of time. This concept includes both spatial and time dimensions. Landslide hazard assessment is not always possible given that data on the temporal occurrence of past landslides are often not easy to obtain (Remondo et al. 2003a; Ayalew et al., 2005). Susceptibility assessment is sometimes used to overcome this problem. The term susceptibility is generally used to identify the location of potential landslides in a given region based on a set of terrain characteristics. Susceptibility analysis assumes that future landslides are likely to be produced by the same conditioning factors as landslides in the past and the present (Varnes, 1984; Carrara et al. 1995). Although these methods provide information on potentially unstable slopes, they do not supply direct information on landslide magnitude and frequency.

To develop an integrate landslide susceptibility analysis, some authors such as Montgomery & Dietrich (1994), Dai et al. (2002), Chung & Fabbri (2003), Corominas et al. (2003), Coe et al. (2004), Hürlimann et al. (2006) propose the following procedure: a) evaluation of terrain failure susceptibility and b) assessment of runout behaviour of the mobilized material. The probability of the spatial occurrence for future landslides is reflected in a terrain failure susceptibility map, which indicates the potential starting zones. This map can be elaborated by heuristic, statistic (bivariate or multivariate analysis) or deterministic approaches (van Westen, 1993; Carrara et al. 1995; van Westen, et al., 1997; Remondo et al, 2003a, Dai et al. 2002; Hürlimann et al. 2006). After determining the potential landslide initiation zones, the runout behaviour is analysed in order to delimit zones that could be reached by the mobilized debris. Approaches to assessing the mobility of debris can be empirical, analytical and numerical (Montgomery & Dietrich, 1994; Dai et al. 2002; Corominas et al. 2003; Pallàs et al., 2004; Hürlimann et al. 2006).

In many parts of the world, especially in developing countries, the scarcity of good quality data, insufficient funds and lack of specialized personnel constitute a disadvantage for landslide susceptibility and hazard assessment. Thus, there is a pressing need for developing feasible and low cost methodologies of landslide hazard assessment, which can be readily tested and implemented under the conditions found in these countries (Pallàs et al. 2004; Coe et al., 2004; Guinau et al. 2005). A number of developing countries, especially in South and Central America and Asia, are currently implementing Geographic Information Systems (GIS) and acquiring digital data, which provide advantages in geoenvironmental analysis. GIS tools enable us to produce and to handle easily a large amount of data. Digital Elevation Models (DEM) also permits the extraction of geometrical variables which can be used in landslide susceptibility assessment. Thus, DEM data would obviate the need for costly and time consuming methods required to obtain geoenvironmental data from conventional processes such as aerial photointerpretation and field work.

The aims of the present study are 1) to develop a methodology for landslide susceptibility zoning considering landslide source and runout susceptibility, and 2) to provide a simple and low cost methodology that is suited to the conditions in most developing countries. This methodology could be implemented in large territories to devise policies for disaster prevention and mitigation.

1.1. Study area

The study area is located in the Interior Highlands of Nicaragua (Fig. 1), an extensive and heavily dissected volcanic plateau and corresponds to the upper part of the Sinecapa River basin. The area displays a hilly landscape with an average slope gradient of 20° and an altitude between 220 and 1265 m. This region is largely constituted by Tertiary volcanic rocks of the Coyol and Matagalpa groups (Fenzl, 1988). The Oligocenic Matagalpa group is composed of rhyolitic to dacitic pyroclastic rocks, whereas the Coyol group emplaced during Miocene-Pliocene period is made up of basaltic rocks, rhyolitic lavas, breccias, lahars and pyroclastic deposits (Darce et al., 1989; Ehrenborg, 1996). Most of these rocks are covered by a thick regolith and colluvial deposits.

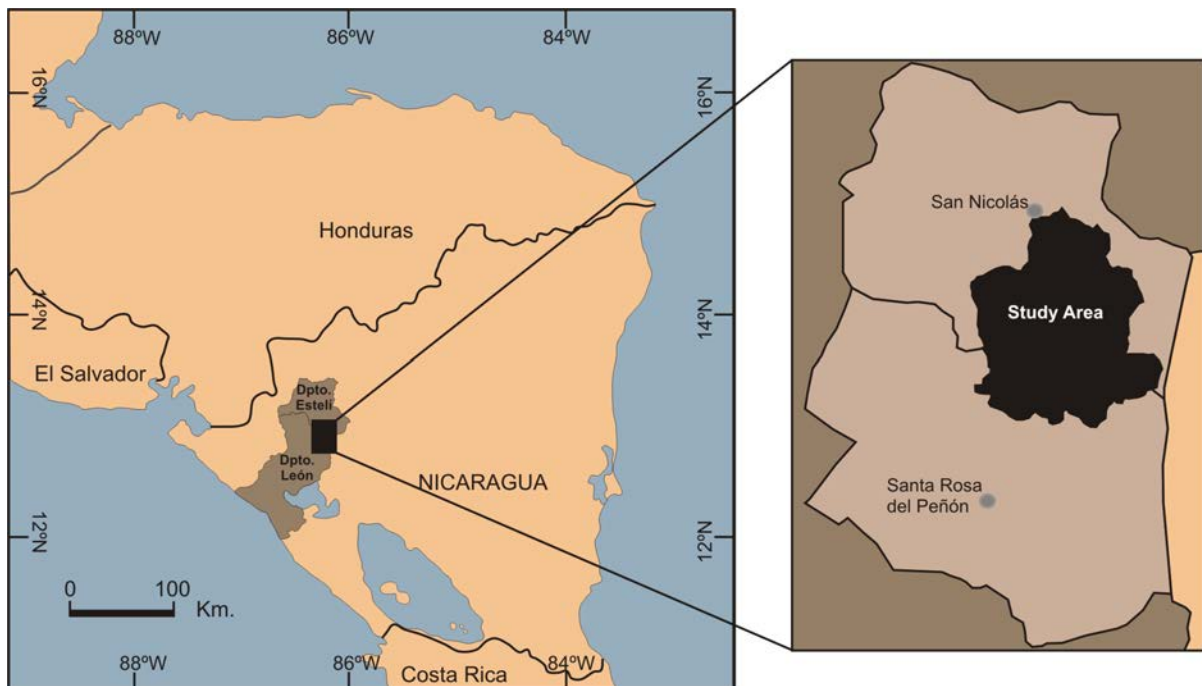


Figure 1. Location of the Departamento de Estelí and Departamento de Leon in NW Nicaragua. In the enlarged zone, the study area (in black) and localities referred to in the text.

The study area covers about 68Km² and forms part of the municipalities of San Nicolás and Santa Rosa del Peñón in the Estelí and Leon Departments, respectively (Fig. 1). The first settlements were established approximately one century ago, and since then around 90% of what used to be thickly forested land has been converted into bush land, degraded pastures and agricultural fields. The settlements are scattered, and construction materials consist of adobe and wood. The economy is based on subsistence corn, bean and cereal agriculture, and to a lesser extent, on cattle.

The region has a tropical climate characterized by hurricanes and tropical storms, especially in the wet months, from September to November. Although the study area has been affected historically by these phenomena, the most catastrophic event was Hurricane Mitch in 1998. This hurricane caused floods and thousands of landslides, mainly debris flows, resulting in a high death toll and in considerable damage to property.

2. Data acquisition

Two types of data enable us to develop and validate the landslide source and runout susceptibility assessment in the study area: 1) a Digital Elevation Model obtained recently for the Pacific region in Nicaragua and 2) a landslide inventory and map produced specifically for this analysis.

2.1. Digital Elevation Model

A 20m x 20m resolution DEM has been available in 15% of the Pacific Region of Nicaragua since August 2006. This model was generated from aerial photograph restitution and elevation control points in the frame of a project developed by INETER (Intituto Nicaragüense de Estudios Territoriales) in cooperation with JICA (Japan International Cooperation Agency).

2.2. Landslide inventory and map

The landslides triggered by Hurricane Mitch were catalogued and mapped to determine the mechanisms of landslides and the instability factors involved. A black and white aerial photograph set, taken in December 1998 (1 month after Hurricane Mitch), was available at 1:30.000 scale in the study area (special flight made by United States Geological Survey). These photographs yielded an acceptable resolution and allowed a detailed interpretation. The landslides caused by Hurricane Mitch were mapped and transferred over orthophotos at 1:10.000 scale, obtaining a preliminary landslide map. This map was checked and corrected in the field to obtain the definitive landslide map at 1:10.000 scale. Field observations were also made in the areas with most landslides to obtain information on the mechanisms and the instability factors involved in slope failure. 90% of the observed movements were shallow landslides controlled by groundwater flow convergence which quickly evolve to debris flow. The average rupture surface was 500 m² and the debris volume mean was 2500 m³.

The resulting inventory and map were digitized in ArcInfoGIS software. In the landslide map the movements were systematically divided into the failure and the runout zones (Fig. 2). In order to carry out a joint analysis of landslides and DEM data, the failure zones were rasterized to the DEM resolution in ArcGIS. Each failure was assumed to be within a single 20m x 20m pixel (Dai & Lee, 2002; Coe et al, 2004).

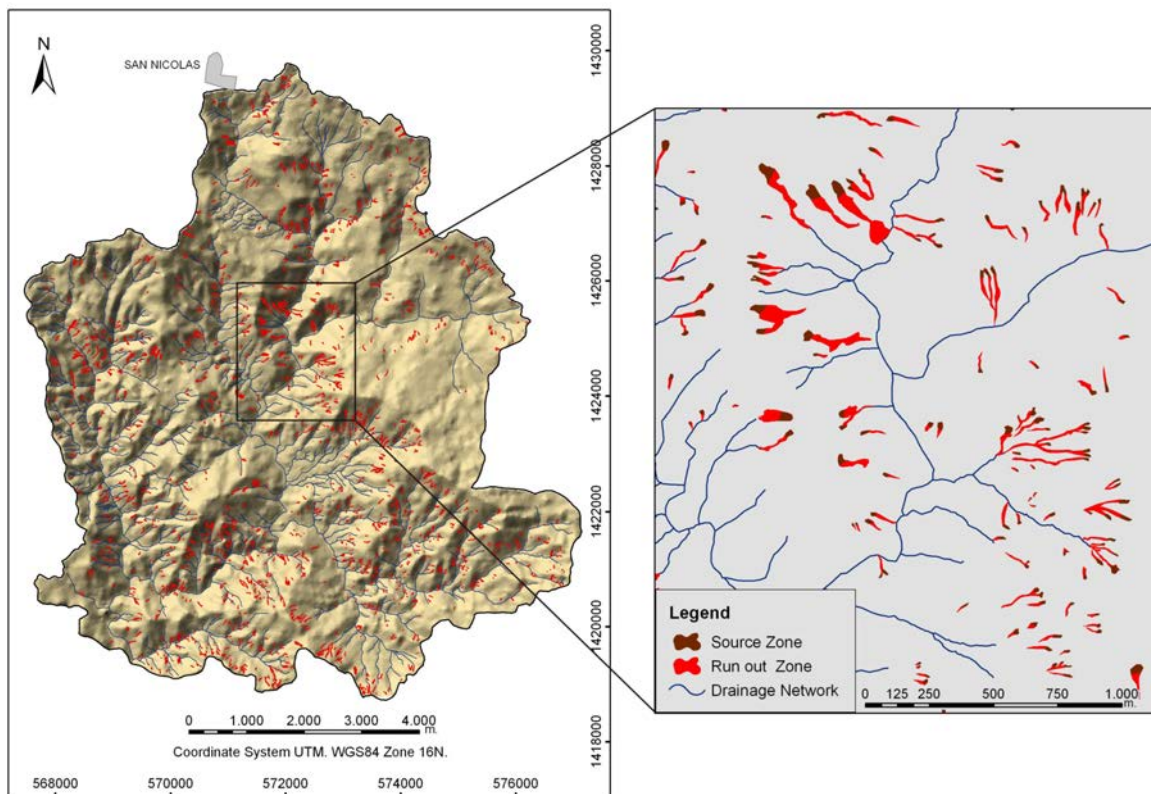


Figure 2. Landslide map and an enlarged portion showing failure-zones (in brown) and the areas affected by the path or the deposition of mobilized material (in red).

3. Terrain failure susceptibility analysis

Bivariate statistical procedure is the most simple and the most quantitatively suitable method to assess terrain failure susceptibility. This analysis makes use of simple statistical calculations, which allows us to determine the contribution of each terrain parameter to the slope instability obviating the need for experts in statistics or specific statistical package. Thus, it can be developed using common GIS tools. The aim of the bivariate method is to combine landslide map and conditioning factors, which exert an influence on slope instability, in order to determine the weight of influence for each factor class. These weights are added up to obtain the terrain failure susceptibility index. Although scientifically a continuous variable is more informative than a stored categorical scale, most of the final users will find that a map with susceptibility classes (i.e. low, medium and high susceptibility) is easier to handle than a cryptic numerical value (Chung & Fabbri, 2003; Begueria, 2006). Thus, the terrain failure susceptibility indexes are generally classified in intervals in order better visualize the terrain failure susceptibility zonation in a map.

Finally, it is of paramount importance to validate the model results. In this process the susceptibility map is compared with a failure population that is independent from the one used to obtain the map in order to determine the accuracy of the model. In the absence of historical data or of a landslide event after Hurricane Mitch, the same failure set should be used for validation. However, in order to obtain two independent failure samples the study area was divided into a training zone and a test zone (Fig. 3), following the approach of Baeza and Corominas (2001), Remondo et al. (2003b) Chung and Fabbri (2003, 2005) and Guinau et al. (2005).

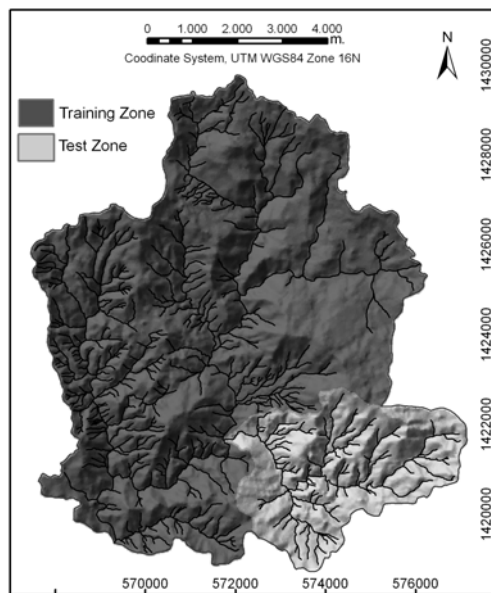


Figure 3. Division of the study area into training zone (in dark grey) and test zone (in light grey).

3.1. Selection, extraction and discretisation of instability factors from DEM

In the absence of geoenvironmental maps and of accurate geological maps of the study area, we proposed a susceptibility model using geometrical parameters extracted from DEM. It has been demonstrated that reliable susceptibility maps can be produced by using conditional parameters exclusively derived from a DEM (Remondo et al., 2003b; Fabbri et al., 2003; Santacana et al. 2003; Pallàs et al. 2004,; Coe et al., 2004).

To determine the factors that contribute most to terrain instability, we considered field data and those parameters that could be directly extracted from DEM. Thus, *Aspect*, *Slope*, *Planar Curvature* (degree of concavity /convexity along a line perpendicular to slope profile) and *Profile Curvature* (degree of concavity/convexity of the slope profile) were obtained by using the 3D-Spatial Analyst module of ArcInfoGIS software (Moore et al., 1991; Ayalev et al., 2004; Coe et al., 2004). These parameters, which were

continuous variables, had to be converted into discrete ones in order to be incorporated at the bivariate analysis. Discretization was developed by using the Equal Interval process for aspect and slope and the Natural Breaks process for both planar and profile curvature (Dai and Lee, 2002). In Fig. 4 we can observe the thematic maps in which the discretized geometric parameters are represented. For Planar Curvature negative values show that the surface is upwardly concave and positive values indicate that the surface is upwardly convex. For profile curvature, negative values indicate that the surface is upwardly convex and positive values show that the surface is upwardly concave. A curvature value of zero indicates that the surface is flat for both planar and profile curvatures. Table 1 shows the percentage of the total study area covered by each class of the four parameters considered in the analysis.

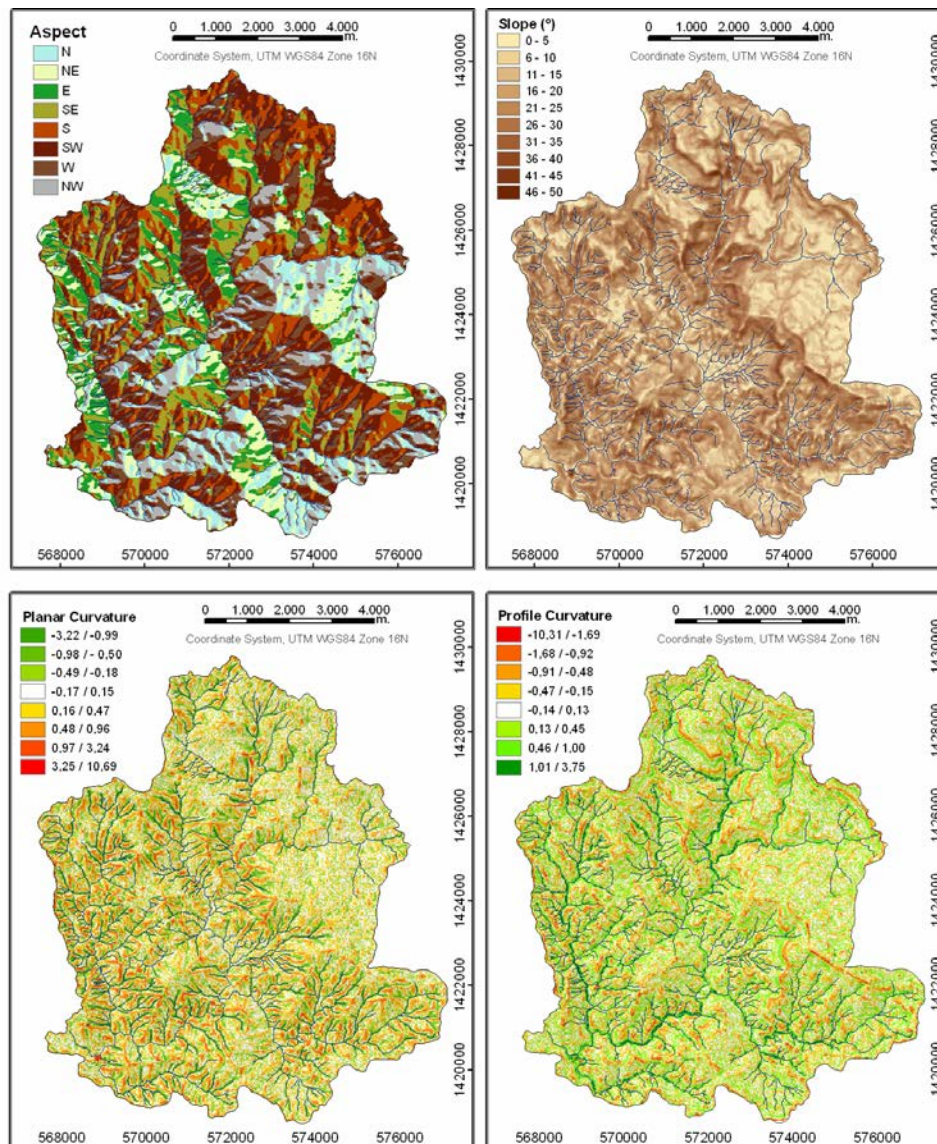


Figure 4. Thematic maps obtained from the DEM. Each one shows a terrain factor defined by a given number of classes; (from left up to right down) Aspect, Slope, Planar Curvature and Profile Curvature.

Table 1; Percentage of the total study area covered by each parameter class

Aspect	% Area	Slope (°)	% Area	Planar Curvature	% Area	Profile Curvature	% Area
N	9	0-5	7	-3,22 / -0,99	3	-10,31 / -1,69	0
NE	10	6-10	14	-0,98 / -0,50	8	-1,68 / -0,92	3
E	10	11-15	17	-0,49 / -0,18	21	-0,91 / -0,48	9
SE	12	16-20	20	-0,17 / 0,15	31	-0,47 / -0,15	21
S	15	21-25	19	0,16 / 0,47	23	-0,14 / 0,13	28
SW	19	26-30	14	0,48 / 0,96	12	0,14 / 0,45	25
W	14	31-35	7	0,97 / 3,24	3	0,46 / 1,00	12
NW	11	36-40	2	3,25 / 10,69	0	1,01 / 3,75	3
		41-45	0				
		46-50	0				

3.2. Terrain failure susceptibility analysis in the Training Zone

Van Westen (1993) and Saha et al. (2005) propose the Information Value (InfoVal) method developed by Yin and Yan (1988) for terrain failure susceptibility assessment. In this procedure combining the failure map with each thematic map in the training zone allows us to determine the weight of influence on terrain instability for each parameter class with the following equation W_i (Eq. 1);

$$W_i = \log \left(\text{Densclass} / \text{Densmap} \right) = \log \left[\left(\text{Npix}(S_i) / \text{Npix}(N_i) \right) / \left(\sum_{i=1}^n \text{Npix}(S_i) / \sum_{i=1}^n \text{Npix}(N_i) \right) \right] \quad (1)$$

Where W_i is the weight for the i th class of a particular thematic map (i.e. 0°-10° or 20°-30° in the thematic map "Slope"), Densclass is the failure density in the factor class, Densmap is the failure density within the whole study area, $\text{Npix}(S_i)$ is the number of failed pixels in the i th factor class, $\text{Npix}(N_i)$ is the number of pixels in the i th factor class, and n is the number of classes in the thematic map. Once the Information Value for each variable class was calculated for all the input maps, the thematic maps were superimposed. The Information Values in each pixel were added in order to obtain a terrain failure susceptibility index ($TFSI$), which defines its landslide susceptibility level.

3.3. Terrain failure susceptibility discretization and validation in the test zone

In order to test this model, the weights determined for each factor class in the training zone were integrated into the thematic maps in the test zone. Terrain failure susceptibility indexes in this area were obtained by adding up the corresponding weights in each pixel. The validation process allowed us to determine the degree of confidence of the method, which is important for transferring the results to the final users (Remondo et al., 2003a,b; Chung & Fabbri, 2003; Beguería, 2006; Guzzetti et al., 2006). The validation of the model also helps to define its suitability for the needs of the end users, which often involves terrain zonation in different susceptibility levels. Thus, the cumulative percentage of failures in the test zone in relation to the terrain failure susceptibility indexes (TFSI) (Fig. 5) was used to define susceptibility classes. Four susceptibility classes were defined as follows; very low susceptibility ($-197 < \text{TFSI} < -153$, interval containing 0% of failures); low susceptibility ($-152 < \text{TFSI} < -31$, interval containing 10% of failures); medium susceptibility ($-30 < \text{TFSI} < 19$, interval containing 30% of failures) and high susceptibility ($20 < \text{TFSI} < 90$, interval containing 60% of failures) (Süzen & Doyuran, 2004). These thresholds were used for the terrain failure susceptibility zonation in the whole study area.

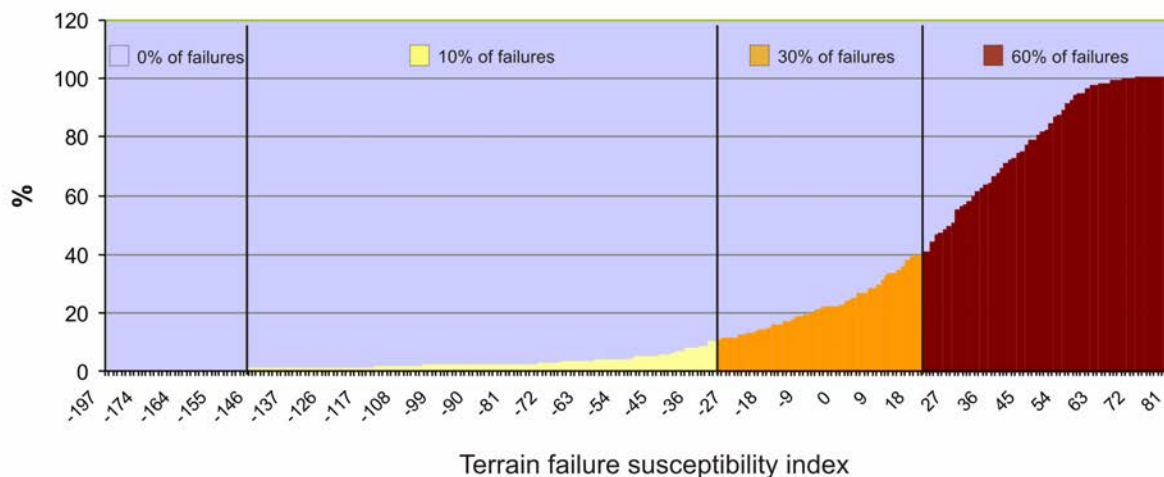


Figure 5. Graphic showing the cumulative percentage of failures versus the terrain failure susceptibility index (TFSI). The intervals used to define the susceptibility classes are marked in different grey tones: In white the range containing 0% of failures, in yellow the range containing 10% of failures, in orange the range containing 30% of failures and in red the range containing 60% of failures.

In order to validate the accuracy of the model, the terrain failure susceptibility map was compared with the failure map in the test zone. A relative failure density (RFD) was used to quantify the accuracy of the method (Eq. 2) (Duque et al., 1990; Baeza and

Corominas, 2001; Santacana et al., 2003; Fernández et al., 2003; Remondo et al., 2003b; Chung and Fabbri, 2003 & 2005; Guinau et al., 2005).

$$RFD_i = 100 \cdot (Npix(S_i) / Npix(N_i)) / \sum_{i=1}^n (Npix(S_i) / Npix(N_i)) \quad (2)$$

Where $Npix(S_i)$ is the number of pixels failed in the i th susceptibility class, $Npix(N_i)$ is the number of pixels in the i th susceptibility class and n is the number of susceptibility classes. Figure 6 shows the relative failure density in each susceptibility class resulting in a gradual decrease in the relative landslide density between the areas with high susceptibility and the areas with low susceptibility. Although this finding shows that the model is a good fit, it does not demonstrate its predictive capability. A set of failures triggered in a time period different from the one used in the analysis is necessary in order to determine this predictive capability.

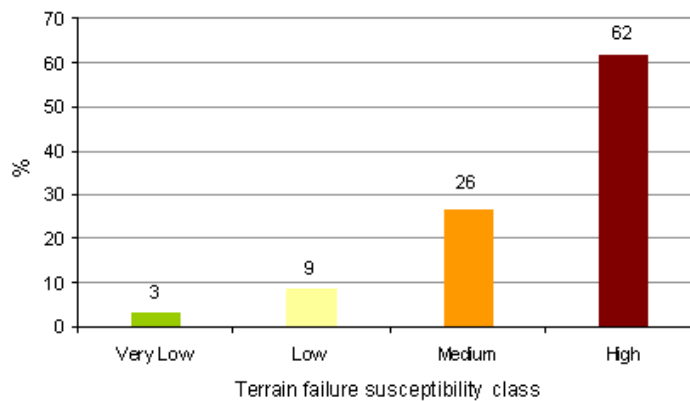


Figure 6. Graphic showing the relative failure density (RFD) for each terrain failure susceptibility class.

Figure 7 shows the terrain failure susceptibility zonation in the whole study area, where; 8% has very low susceptibility, 34% has low susceptibility, 37% has medium susceptibility and 21% has high susceptibility.

4. Runout susceptibility analysis using TauDEM tools

Runout behaviour can be controlled by several parameters such as topography, soil type, land use, debris volume and the amount of interstitial fluids. Given the difficulty of characterizing these parameters for future debris flows, it is not easy to determine the runout path and the reach distance. However, this problem can be overcome by taking into account

the fact that under intense rainfall debris flows tend to travel long distances following the steepest path and merging with the drainage network (Montgomery & Dietrich, 1994; Pallàs et al., 2004; Guinau et al., 2005). In order to determine the areas that are prone to debris flow, we propose a methodology based on the use of the open source TauDEM software developed by Tarboton (1997), which is available electronically on the Internet from the author (dtarb@cc.usu.edu, <http://www.engineering.usu.edu/dtarb/taudem>).

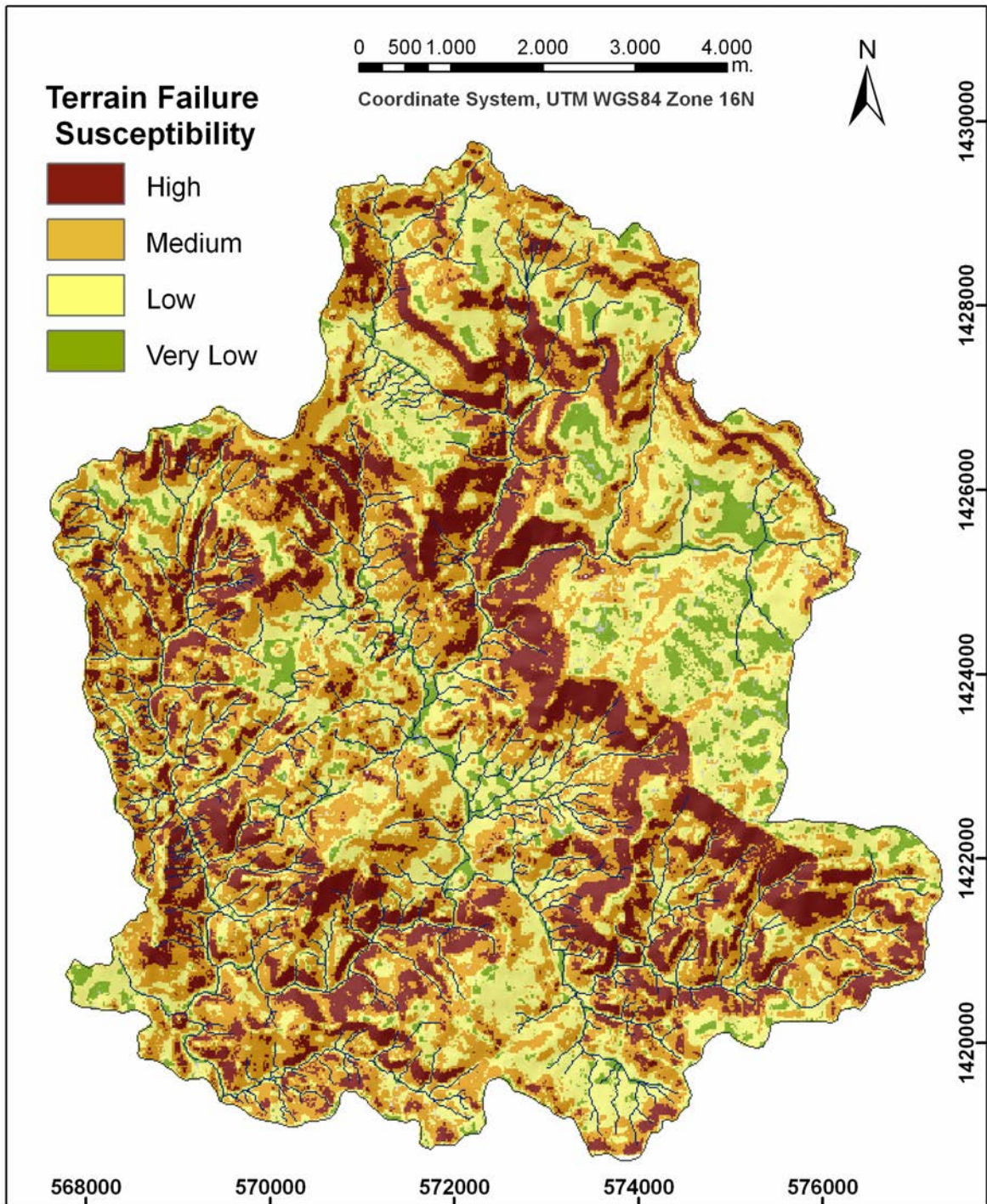


Figure 7. Terrain failure susceptibility map obtained for the whole study area.

4.1. TauDEM tools description

TauDEM is software that can be executed as an ArcGIS extension. This software contains a set of tools which facilitate the assessment of hydrologic processes from DEM. In this study, two of these tools were used: the flow direction (D^∞) and the downslope influence (DI). The former is used to assign a multiple number of possible flow directions to each pixel based on the direction of the steepest downwards slope (Tarboton, 1997). The latter is employed to track the movement of sediment from a given source pixel, taking into account the flow direction in each downslope pixel (Tarboton, 1997).

4.2. Model calibration

The model was calibrated to determine its adjustment with the debris flow behaviour in the study area. This enabled us to compare the model results with a known event (in this case the landslides triggered by Hurricane Mitch resulting in debris flows corresponding to 90% of the total landslides mapped in the study area). The DI tool was used to determine the flow tracks from the pixels affected by terrain failure during Hurricane Mitch, taking into account the flow directions for each downslope pixel. In this way the model calculates the flow concentration for each pixel from the source point to the drainage network, where the flow concentration is the highest. Thus, the highest DI values coincide with the drainage network.

A comparison between the modelled flow paths and the Hurricane Mitch debris tracks shows that the model produced an overestimation (Fig. 8). The relative runout density was calculated to quantify this deviation (Eq. 3).

$$RRD_i = 100 \cdot (A(S_i) / A(DI_i)) / \sum_{i=1}^n (A(S_i) / A(DI_i)) \quad (3)$$

Where $A(S_i)$ is the area affected by debris flow track in the i th ID interval, $A(DI_i)$ is the area of the i th ID interval and n is the number of ID intervals.

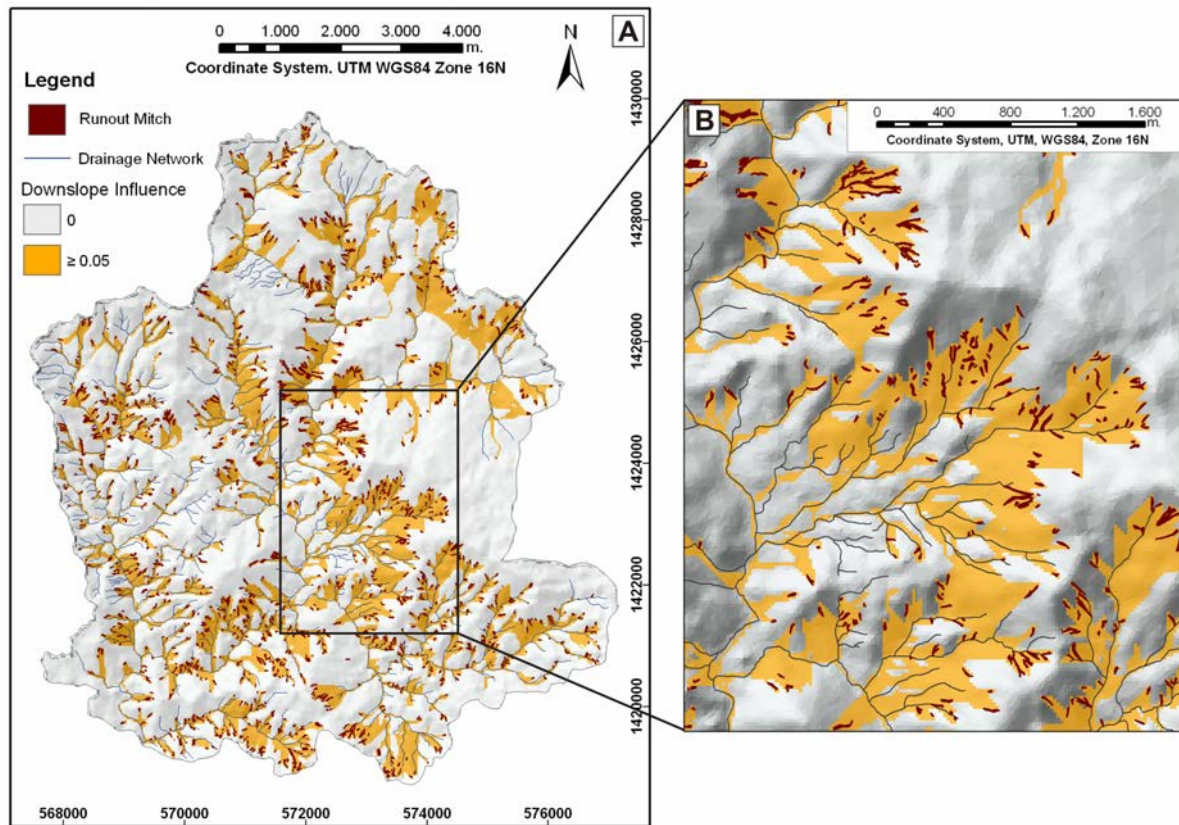


Figure 8. A: Map showing the downslope influence obtained from the terrain failures triggered by Hurricane Mitch in yellow and the Hurricane Mitch runout areas in deep red. B: An enlarged area of this map showing the overestimation of the model.

Figure 9 shows that when DI values are equal to or higher than 0.05 the relative runout density exceeds the value of 10%. This value was taken as the threshold to determine the areas susceptible to debris flows, where $DI \geq 0.05$ and the non susceptible ones, where $DI < 0.05$. Figure 10 shows that the areas with $0 < DI < 0.05$ recover a large area with less than 10% of the Hurricane Mitch affected area. Thus, if pixels with $DI < 0.05$ are considered non susceptible to debris tracks the overestimation of the model can be reduced.

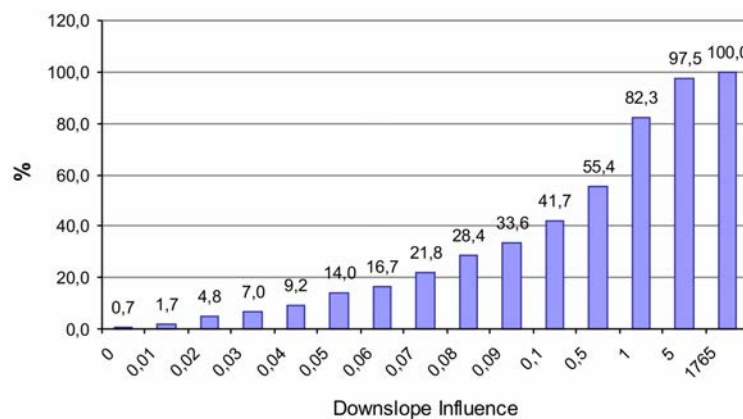


Figure 9. Graphic showing the accumulated relative runout density (RRD) in % versus the Downslope Influence (DI) values.

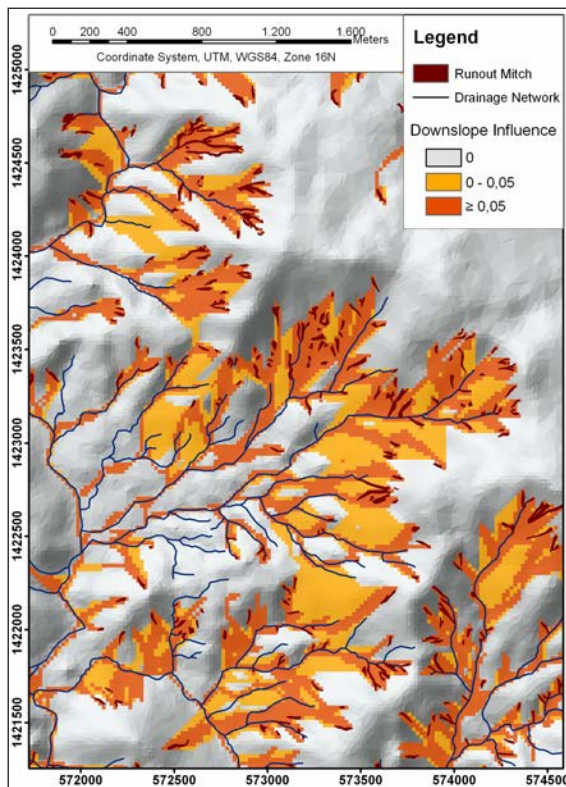


Figure 10. The same enlarged area of figure 8 where the DI values are showed in 3 classes; DI = 0 in grey, $0 < DI < 0.05$ in yellow and $DI \geq 0.05$ in orange. Note that Hurricane Mitch affected areas (in red) are concentrated inside the area with $DI \geq 0.05$.

4.3. Runout susceptibility assessment

Terrain failure susceptibility classes were used in this case as source zones to assess the runout susceptibility in the study area. Each terrain failure susceptibility class was divided into an independent raster file where the pixels susceptible to failure were identified by 1 and the others by 0. Each raster file was processed independently to determine the downslope influence for each susceptibility class. Given the results of the model calibration, the pixels were reclassified as runout susceptible if $DI \geq 0.05$ or non susceptible if $DI < 0.05$. For each resulting file the runout susceptible pixels were identified by a number. The size of this number depended on whether the field was obtained from terrain failure susceptibility high (value assigned 4), medium (value assigned 3), low (value assigned 2) or very low (value assigned 1) (Fig. 11). Finally, the four resulting files were combined bearing in mind that the highest susceptibility value prevailed in each pixel. This resulted in a runout susceptibility map in which the pixels were classified into four susceptibility classes (Fig. 11).

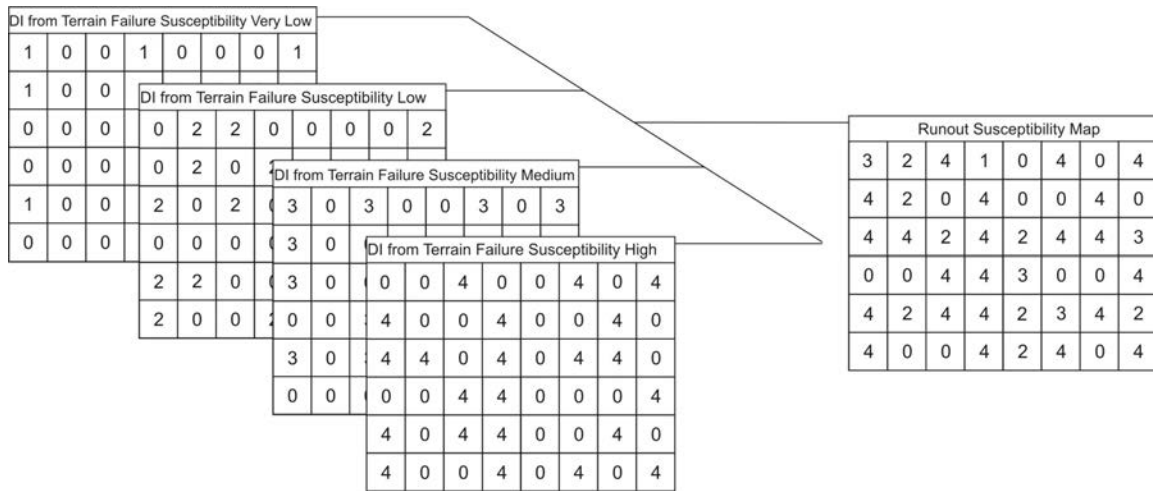


Figure 11. A graphic example of the four raster files obtained after modelling the flow paths from each terrain failure susceptibility map. In each file the pixels that are non susceptible to debris flow were identified with zero and the pixels that are susceptible with a different value (1 to 4). The combination of these files enables to obtain the runout susceptibility map where the pixels were reclassified in four susceptibility classes.

4.4. Runout susceptibility map: description and validation.

Figure 12 shows the runout susceptibility zonation in the whole study area, where 3% has very low susceptibility, 13% has low susceptibility, 28% has medium susceptibility and 56% has high susceptibility. In order to validate the accuracy of the model, this zonation is compared with the Hurricane Mitch runout areas and the relative runout density (RRD) is calculated for each runout susceptibility class (Eq. 4).

$$RRD_i = 100 \cdot (A(S_i) / A(N_i)) / \sum_{i=1}^n (A(S_i) / A(N_i)) \tag{4}$$

Where $A(S_i)$ is the area affected by debris flow track in the i th susceptibility class, $A(N_i)$ is the area of the i th susceptibility class and n is the number of susceptibility classes.

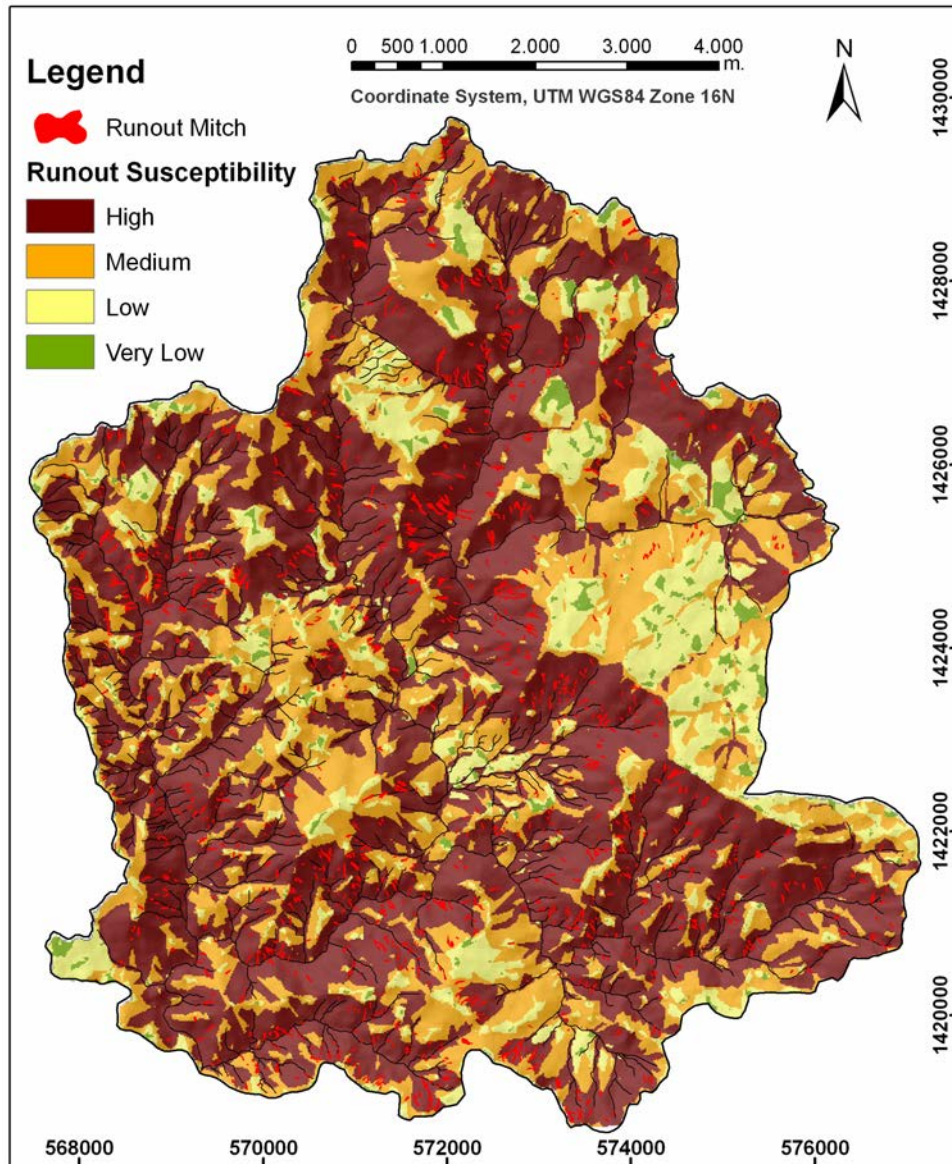


Figure 12. Runout susceptibility map obtained in the whole study area.

Figure 13 shows a higher concentration of affected areas in zones with high susceptibility.

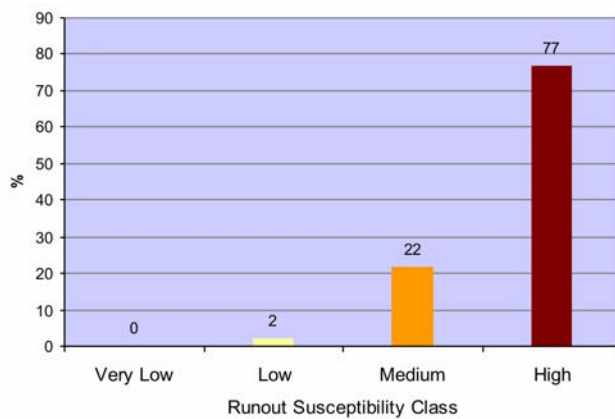


Figure 13. Graphic showing the relative runout density (RRD) in % for each runout susceptibility class obtained from the combination of the Hurricane Mitch runout areas and the runout susceptibility map.

5. Source and runout susceptibility integration

Two concepts were used to assess landslide susceptibility: a) the terrain failure susceptibility and b) the runout susceptibility. The combination of these concepts yields an integrated susceptibility zonation which can be useful for land planning or for the implementation of non structural measures to mitigate debris flow risk.

To obtain an integrated evaluation of the susceptibility, we used a matrix to combine the terrain failure susceptibility values and the runout susceptibility values (Fig. 14). Values such as 40, 30, 20 and 10 were attributed to high, medium low and very low terrain failure susceptibility, respectively, whereas for runout susceptibility the values used were 4, 3, 2, and 1. We considered that the weight of failure susceptibility was higher than that of runout susceptibility given that the debris track depends on the slope failure occurrence. These values were added up and the results were grouped into four susceptibility classes. Thus, each pixel had a susceptibility class in relation to its terrain failure and runout susceptibility class. This result is shown in the debris flow susceptibility map in Fig. 15, where 41% of the study area has high susceptibility, 40% has medium susceptibility, 16% has low susceptibility and 3% has very low susceptibility. This map was compared with the debris flows triggered by Hurricane Mitch to determine the significance of each susceptibility class for land planning. Figure 16 shows the relative debris flow density measured for each susceptibility class. These results can help us to determine the best land use for debris flow risk mitigation.

Failure Susceptibility \ Runout Susceptibility	High 40	Medium 30	Low 20	Very Low 10
High 4	44	34	24	14
Medium 3	43	33	23	13
Low 2	42	23	22	12
Very Low 1	41	31	21	11

Figure 14. Matrix where the terrain failure susceptibility class on the columns and the runout susceptibility class on the rows were combined in order to define four susceptibility classes for the final susceptibility zonation; susceptibility high in deep red, medium in orange, low in yellow and very low in green.

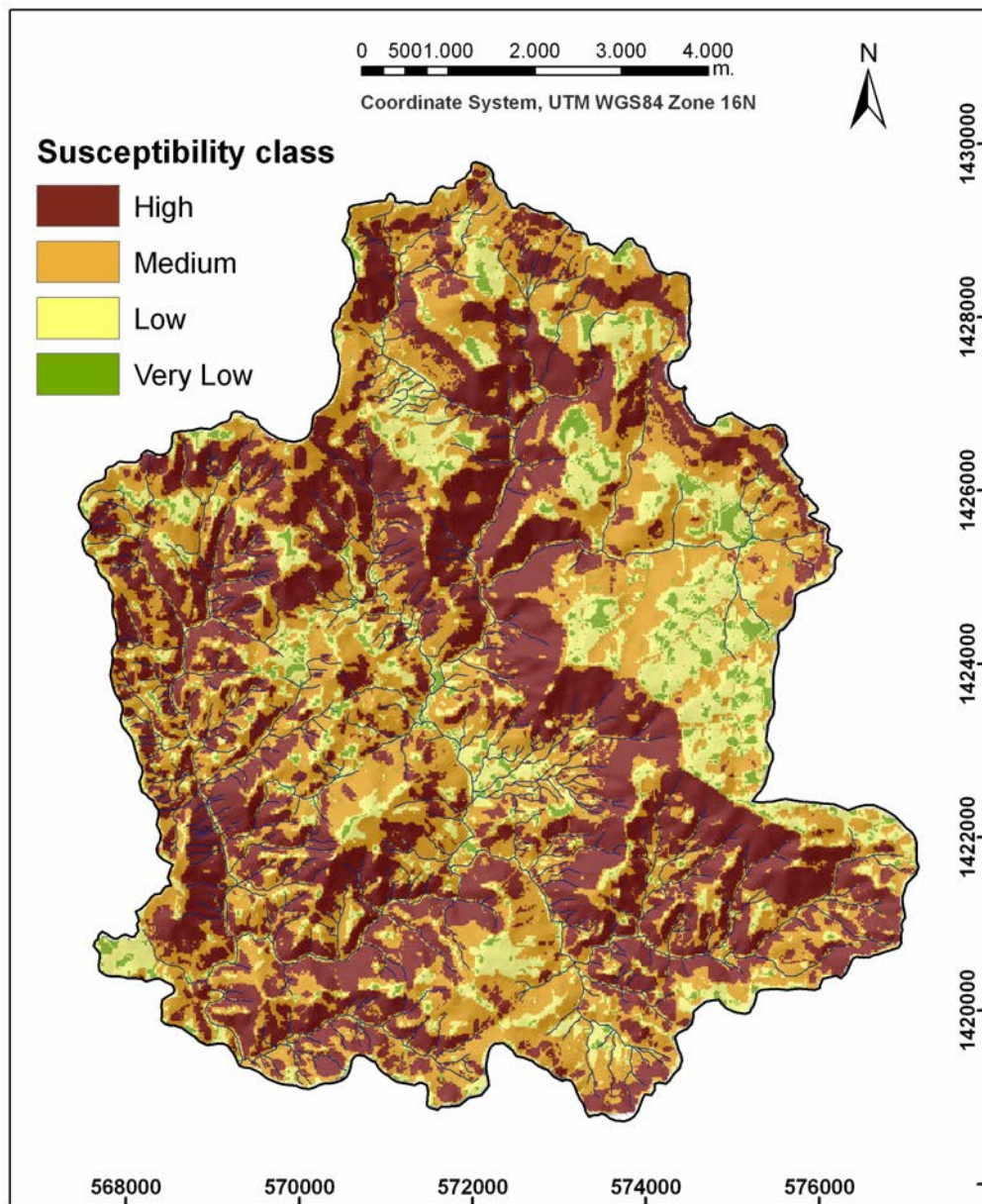


Figure 15. Landslide susceptibility map obtained after terrain failure susceptibility and runoff susceptibility integration.

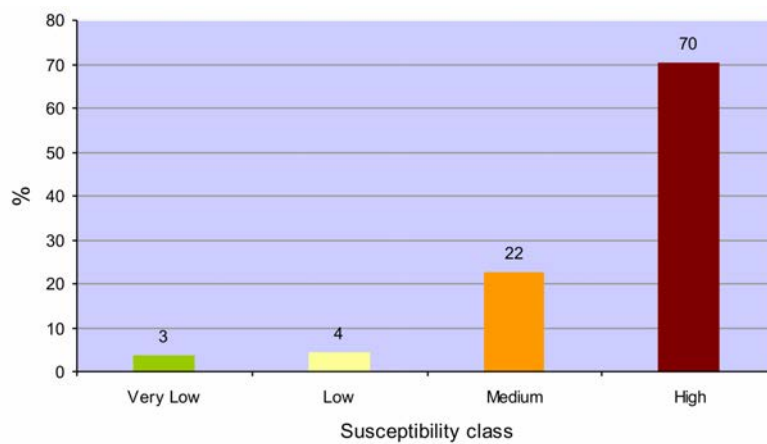


Figure 16. Graphic showing the relative landslide density (in %) for each susceptibility class obtained from the combination of landslides triggered by Hurricane Mitch, and the final susceptibility map.

6. Discussion and conclusions

Landslides triggered by Hurricane Mitch are used in the present study to develop a methodology to assess and map landslide source and runout susceptibility. Therefore, the resulting susceptibility maps show areas that may be affected by landslides under heavy rainfall conditions. Given that the return period for Hurricane Mitch rainfall is estimated at around 100 years (INETER, 1998), the resulting susceptibility zonation would be excessively pessimistic. However, adopting the worst-scenario approach has the advantage of providing a degree of safety.

The principal drawback of the method used to assess terrain failure susceptibility (bivariate analysis) is that it assumes the independence of the different terrain parameters with respect to slope instability. However, the most realistic approaches consider the dependence of the conditioning factors. Some authors overcome the problem by combining the dependent factors in a land unit map and by assessing the landslide susceptibility from this map (Carrara et al., 1995; van Westen et al., 1997). This approach assumes that the instability factors remain the same in the whole study area. In the absence of common factors in the study area, some land units could be present in one zone (i.e. the training area) but not in another (i.e. the test area), which makes the validation process difficult or even impossible (Guzzetti et al., 2006). Although multivariate statistical methods consider various parameters simultaneously, they demand complex and time-consuming analyses and a statistical background, which is not suitable for the conditions in some developing countries. Thus, the bivariate method is the most helpful in obtaining terrain failure susceptibility maps that differentiate areas of increasing degrees of susceptibility. This is a reasonable approach to hazard assessment given that the resources in developing countries are limited.

One problem encountered in the study area when assessing landslide susceptibility is the lack of detailed information about bedrock, soil and geomorphologic characteristics. However, lithology and land cover are relatively uniform with slopes covered by a regolith cloak of volcanic rocks and thick vegetation which exert a homogeneous influence on terrain instability (Parise & Jibson 2000; Baeza & Corominas, 2001; Ayalew et al., 2005). Moreover, geoenvironmental variables are not independent from geometrical ones, i.e. slope is closely related to bedrock and land use could be conditioned by slope gradient. Thus, if both geoenvironmental and geometrical parameters are considered in the analysis, an overestimation of the susceptibility could result (Remondo et al., 2003a). Operations with the GIS enable us to readily obtain geometrical parameters from DEM. Four of these parameters

(slope, aspect, planar and profile curvature) were selected to develop the terrain failure susceptibility analysis given that they are the ones that most affect water infiltration. Thus, they are considered the most important geometrical factors in rainfall triggered landslides in the study area.

DEM resolution exerts a considerable influence on the accuracy of the derived parameters. Although a coarse DEM resolution could be of poor quality in some cases, the gain in the quality of the results would not be worth the efforts (Remondo, et al., 2003b). Given the dimensions of the shallow landslide and debris flows in the study area, a 10m x 10m DEM could be optimal for analysing the landslide source and runout susceptibility (Tarolli and Tarboton, 2006). However, the results obtained with the 20m x 20m DEM available in the study area could constitute a good approach to failure and runout prone areas.

Debris flow is a complex phenomenon involving a highly unsteady motion of heterogeneous material ranging from water and slurries to boulders and timber remains. Debris flow mobility depends on parameters such as debris volume, the amount of interstitial fluids and terrain morphology. The assessment of flow velocities or impact energy to determine runout path and distance is not easy owing to the difficulty of determining these parameters for future debris flows. The methodology proposed to determine areas potentially affected by a debris flow path was based on DEM. The TauDEM extension allowed us to determine the flow paths following the steepest tracks from the potential source areas to the drainage network. However, the flow paths observed in the study area do not always merge with the drainage network with the result that the model overestimates the area that is potentially affected by debris flows.

The model calibration process allows us to determine a downslope influence threshold to adjust the model results to the debris flow behaviour. This process improves the model results. It should also be pointed out that the DEM resolution and the data available are not the best means to obtain a model adjusted to the debris flow behaviour. However, this model is a good way to determine areas prone to debris flows, and can be helpful in some developing countries to mitigate debris flow risk.

The validation of the model can provide useful information to build up the confidence of the end users. Despite the limitations of the validation process based on the division of the study area, it is a good approach in those areas where only one reference event is available. However, this process only provides information about how the model fits and not about the

predictability power of the maps obtained. The validation results suggest that a careful selection of geometrical parameters from DEM and the application of feasible functions to calculate the parameter class contribution to terrain instability enable the detection of potential debris flow source areas. In the case of the runout susceptibility analysis, the validation results show a good model fit. However, the extension of high and medium susceptibilities occupy a considerable area (56% and 28% respectively), which could be disadvantageous for land planning or policy makers. These results are reflected in the susceptibility map obtained with the integration of terrain failure and runout susceptibility. In the debris flow susceptibility map (Fig. 13) 41% and 40% of the study area have high and medium susceptibilities, respectively. These results could be expected given the land characteristics of the study area (drainage network largely incised in altered bedrock and high slopes). Although the susceptibility zonation does not seem very precise, it is possible to propose land planning rules to mitigate landslide risk. Given that the economy is based on subsistence agriculture and that the settlements are scattered, a forested land use is proposed for areas with high susceptibility and agricultural activities for areas with medium susceptibility. The areas with low and very low susceptibility (16% and 3% respectively) are reserved for settlements, schools and churches. These last buildings are reserved for areas with very low susceptibility given their use as shelters in case of emergency.

Acknowledgements

This study was supported by the Generalitat de Catalunya (RISKMAT research group SGR2001-00081) and by the Consolider Igenio 2010 programme, under CSD 2006 "Topo-Iberia". Aerial photographs and DEM were provided by the Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, INETER. Field work would not have been possible without the logistical support provided by the Centro de Investigaciones Geocientíficas, CIGEO (Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua). We are indebted to the local emergency committees and to the people from San Nicolas and Santa Rosa del Peñón communities for providing accommodation and support during the fieldwork.

References

- Ayalew, L., Yamagishi, H., Ugawa, N.: Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japa. *Landslides*, 1, 73 – 81, 2004.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H., Kanno, T.: Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparison of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, 81, 432 – 445, 2005.
- Baeza, C. and Corominas, J.: Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1251 – 1263, 2001.
- Begueria, S.: Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 37, 315 – 329, 2006.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P.: GIS Technology in Mapping Landslide Hazard. In: *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Carrara, A. Guzzetti, F. (Eds.) Academic Pub., Dordrecht, the Netherlands, 360p.1995.
- Chung, C.F., Fabbri, A.G.: Validation of spatial prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Natural Hazards*, 30, 451-472, 2003.
- Chung, C.F., Fabbri, A.G.: Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models. In: *Landslide Risk Assessment*, Glade, T., Anderson, M.G., Crozier, M.J. (Eds.),. John Wiley, 139-174, 2005.
- Coe, J.A., Godt, J.W., Baum, R.L., Bucknam, R.C., Michael, J.A.: Landslide susceptibility from topography in Guatemala. In: *Landslides: Evaluation and stabilization*. Lacerda, W.A.; Ehrlich, M.; Fontura, S.A.B.; Sayao (eds.). Taylor & Francis Group, London, 1, 69 – 78, 2004.
- Corominas, J., Copons, R., Vilaplana, J.M., Altimir, J., Amigó, J.: Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards*, 30, 421 – 435, 2003.
- Dai, F.C. and Lee, C.F.: Landslide characteristics and slope instability modelling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42, 213 – 228, 2002.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Ngai, Y.Y.: Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64, 65 – 87, 2002.
- Darce, M., Levi, B., Nyström, J.O., Troëng, B.: Alteration patterns in volcanic rocks within an east-west transverse through central Nicaragua. *Journal of South American Earth Sciences*, 2, 155 – 161, 1989.

- Duque, A., Echevarría, G., Kerejeta, A., Cendrero, A., Tamés, P.: Comprobación empírica de metodologías para la elaboración de mapas de amenaza de inestabilidad de laderas; aproximación a un modelo general de evaluación del riesgo. In: Environmental geology and natural hazards in the Andean region. Hermelin, M. (Ed). AGID Report nº 13, Pereira, Colombia, 189 – 206, 1990.
- Ehrenborg, J.: A new stratigraphy for the Tertiary volcanic rocks of the Nicaraguan Highland. GSA Bulletin, 108, 830 – 842, 1996.
- Fabbri, A., Chung, C.F., Cendrero, A., Remondo, J.: Is prediction of future landslides possible with a GIS? Natural Hazards, 30, 487 – 499, 2003.
- Fenzl, N.: Nicaragua, Geografía, Clima, Geología y Hidrogeología. UFPA/INETER/INAN, Belem (Eds). 62p., 1988.
- Fernández, T., Irigaray, C., El Hamdouni, R., Chacón, J.: Methodology for landslide susceptibility mapping by means of a GIS. Application to the Contraviesa Area (Granada, Spain). Natural Hazards, 30, 297 – 308, 2003.
- Guinau, M., Pallàs, R., Vilaplana, J.M.: A feasible methodology for landslide susceptibility assessment in developing countries: A case-study of NW Nicaragua after Hurricane Mitch. Engineering Geology, 80, 316 – 327, 2005.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M.: Estimating the quality of landslide susceptibility models. Geomorphology, 81, 166 – 184, 2006.
- Hürlimann, M., Copons, R., Altimir, J.: Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach. Geomorphology, 78, 359-372, 2006.
- INETER: Las lluvias del siglo en Nicaragua. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, INETER. Managua, Nicaragua, 159 pp, 1998.
- Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E.: A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. Water Resources Research, 30, 1153 – 1171, 1994.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R.: Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. Hydrolog. Process., 5, 3 – 30, 1991.
- Pallàs, R., Vilaplana, J.M., Guinau, M., Falgàs, E., Alemany, X., Muñoz, A.: A pragmatic approach to debris flow hazard mapping in areas affected by Hurricane Mitch: example from NW Nicaragua. Engineering Geology, 72, 57 – 72, 2004.
- Parise, M. and Jibson, R.W.: A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake. Engineering Geology, 58, 251 – 270, 2000.
- Remondo, J., González-Díez, A., Díaz de Terán, J.R., Cendrero, A.: Landslide susceptibility models using spatial data analysis techniques. A case study from the Lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain). Natural Hazards, 30, 267 – 279, 2003a.

- Remondo, J., González-Díez, A., Díaz de Terán, J.R., Cendrero, A., Fabbri, A., Chung, C.F.: Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in Northern Spain. *Natural Hazards*, 30, 437 – 449, 2003b.
- Saha, A.K., Gupta, R.P., Sarkar, I., Arora, M.K., Csaplovics, E.: An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation – with a case study in the Himalayas. *Landslides*, 2, 61 – 69, 2005.
- Santacana, N., Baeza, C., Corominas, J., de Paz, A., Marturià, J.: A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards*, 30, 281 – 295, 2003.
- Süzen, M. and Doyuran, V.: A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45, 665 – 679, 2004.
- Tarboton, D.G.: A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resources Research*, 33, 309 – 319, 1997.
- Tarolli, P. and Tarboton, D.G.: A new method for determination of most likely landslide initiation points and the evaluation of digital terrain model scale in terrain stability mapping. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 663 – 677, 2006.
- van Westen, C.J.: Application of Geographical Information Systems to Landslide Hazard Zonation. ITC Publication Number 15, Enschede, The Netherlands. 1993.
- van Westen, C.J., Rengers, N., Terlien, M.T.J., Soeters, R.: Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geol Rundsh*, 86, 404 – 414, 1997.
- Varnes, D.J.: Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice. IAEG Commission on Landslides and Other Mass-Movements. UNESCO Press, Paris. 63 pp. 1984.
- Yin, K.L. and Yan, T.Z.: Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. In: *Landslides-Glissements de Terrain. Proceedings V International Symposium on Landslides*, vol. 2, Lausanne, Switzerland, 1269–1272, 1988.

4- RESUMEN DE LOS RESULTADOS

4. RESUMEN DE LOS RESULTADOS

En este apartado se describen los resultados obtenidos en cada uno de los bloques de esta tesis. La descripción de estos resultados se ha clasificado según el siguiente orden.

4.1. Resultados del Bloque I: Zonas piloto de Cinco Pinos y San Francisco del Norte

- 4.1.1. Mapa e inventario de movimientos de ladera
- 4.1.2. Resultado del análisis comparativo entre movimientos de ladera y propiedades del terreno
- 4.1.3. Mapa de susceptibilidad
- 4.1.4. Mapa de peligrosidad

4.2. Resultados del Bloque II: Zona del Norte del Departamento de Chinandega (municipios de San Pedro del Norte, Cinco Pinos, San Francisco del Norte, Santo Tomás del Norte y Somotillo)

- 4.2.1. Mapa e inventario de movimientos de ladera
- 4.2.2. Resultado del análisis comparativo entre movimientos de ladera y propiedades del terreno
- 4.2.3. Mapa de susceptibilidad

4.3. Resultados del Bloque III: Zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón

- 4.3.1. Mapa e inventario de movimientos de ladera
- 4.3.2. Resultado del análisis comparativo entre movimientos de ladera y propiedades del terreno
- 4.3.3. Mapa de susceptibilidad

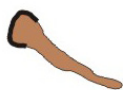
4.1. Resultados del Bloque I: Zonas piloto de Cinco Pinos y San Francisco del Norte

4.1.1. Mapa e inventario de movimientos de ladera

Uno de los puntos fuertes del bloque I de este trabajo es el valor intrínseco de los datos de campo, sintetizados en la cartografía e inventario de deslizamientos, punto de partida para el análisis de la peligrosidad. A partir de la interpretación de fotografías aéreas pre-Mitch y post-Mitch y del trabajo de campo, se obtuvo un mapa de fenómenos para cada una de las 3 zonas piloto delimitadas entre los municipios de Cinco Pinos y San Francisco del Norte (figuras 4.1, 4.2 y 4.3). En estos mapas a escala 1:10.000, se representaron las zonas afectadas por movimientos de ladera indicando en cada caso el tipo y la temporalidad del movimiento. Además, en los casos en los que se podía observar correctamente se indicaron las zonas de escarpe donde se inician los movimientos. Se han podido diferenciar los siguientes casos;



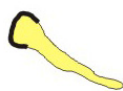
Escarpe de rotura o de coronación. Zona de rotura del material, donde se inicia el movimiento.



Flujo de detritos con funcionamiento anterior al huracán Mitch (pre-Mitch) y durante el huracán, con su escarpe de coronación.



Flujo de detritos con funcionamiento durante el huracán Mitch con su escarpe de coronación.



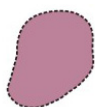
Flujo de detritos con funcionamiento pre-Mitch con su escarpe de coronación.



Flujo o colada de tierra con funcionamiento pre-Mitch y durante el huracán.



Flujo o colada de tierra con funcionamiento pre-Mitch.



Desprendimiento de rocas con funcionamiento pre-Mitch y durante el huracán.

En estos mapas se cartografiaron un total de 450 movimientos de ladera junto con la red de drenaje principal, las cabeceras municipales, los asentamientos de las comunidades de cada municipio y las carreteras y caminos principales.

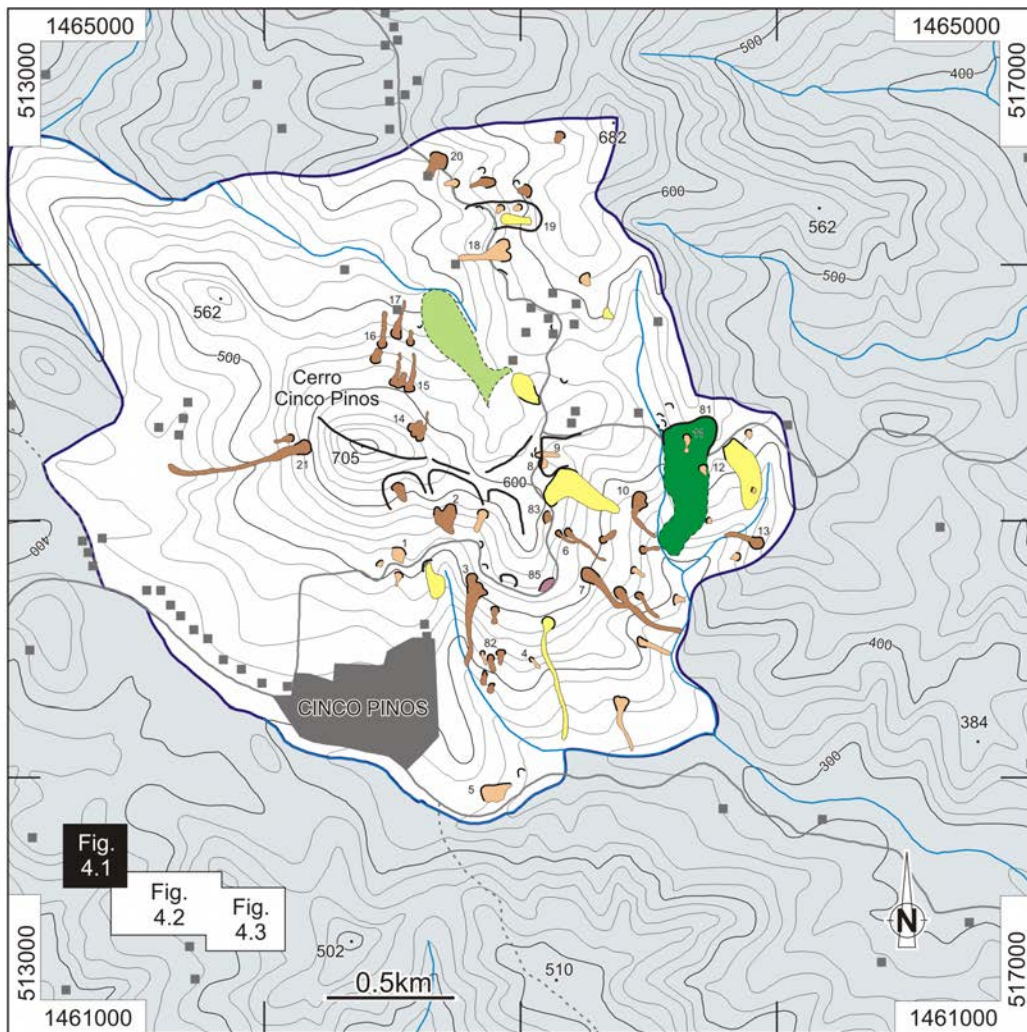


Fig. 4.1. Mapa de movimientos de ladera de la zona piloto de Cinco Pinos. Cotas topográficas en m. Sistema de coordenadas UTM.

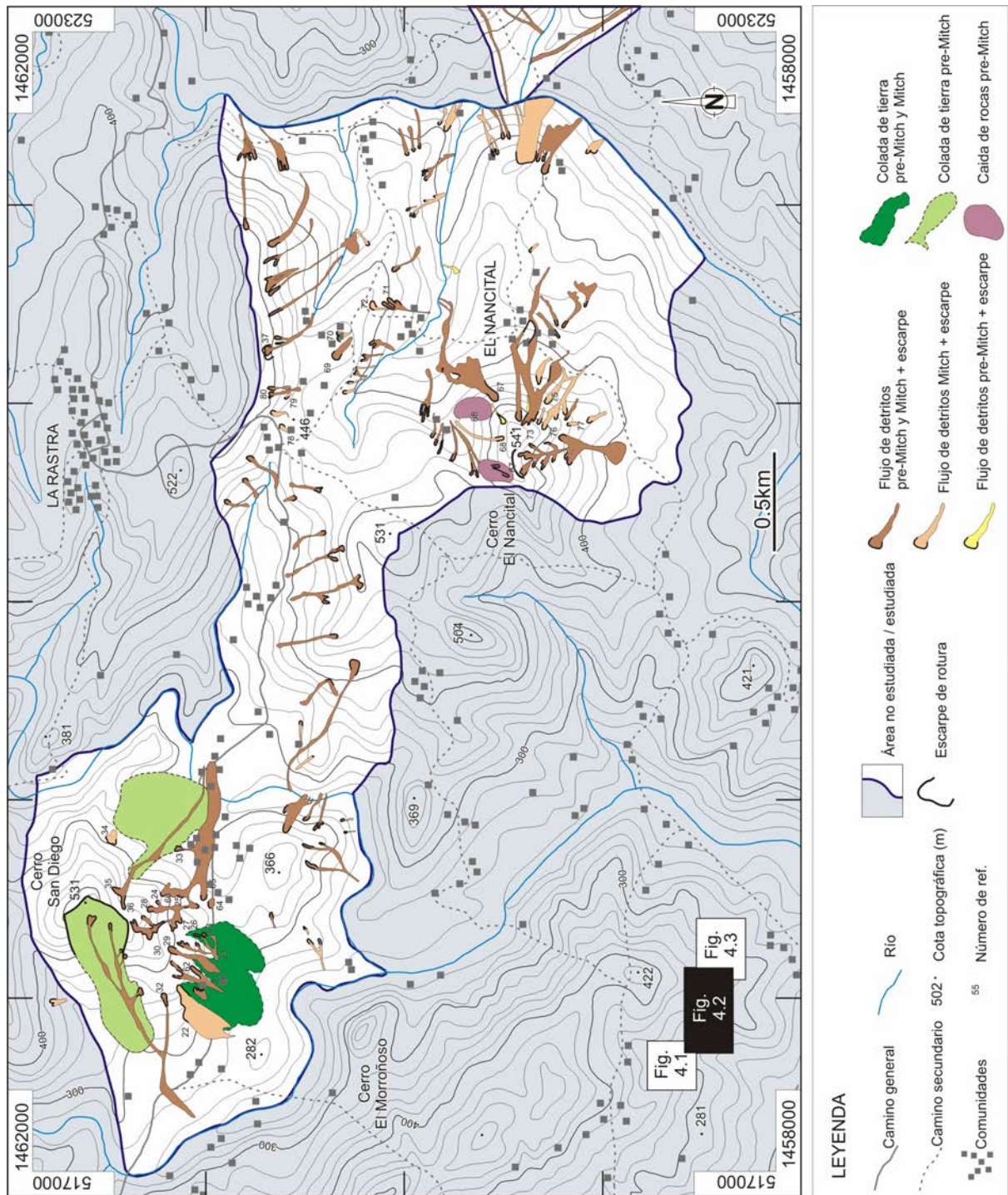


Fig. 4.2. Mapa de movimientos de ladera de la zona piloto entre Cinco Pinos y San Francisco del Norte. Cotas topográficas en m. Sistema de coordenadas UTM.

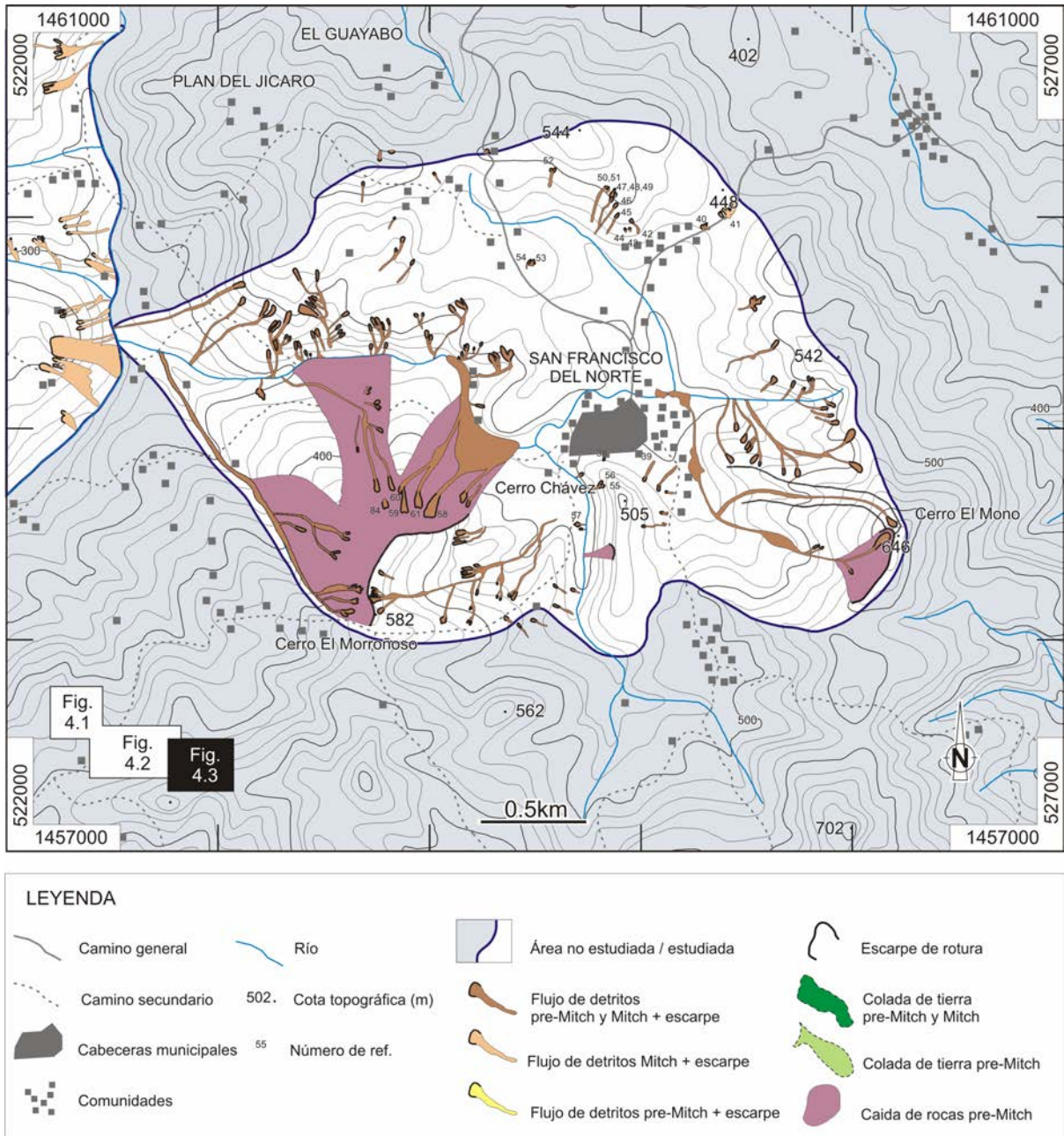


Fig. 4.3. Mapa de movimientos de ladera de la zona piloto de San Francisco del Norte. Cotas topográficas en m. Sistema de coordenadas UTM.

Aquellos movimientos de ladera en los que se hicieron observaciones detalladas de campo sobre el terreno, se identificaron con un número de referencia que corresponde con el número de inventario de la tabla de datos de campo (tabla 4.1). En esta tabla se recogen los datos descriptivos que se observaron sobre el terreno en 157 movimientos de ladera inventariados, correspondientes a dos campañas de campo diferentes. Los datos identificados con la referencia de observador (Ref. Observ.) formada por una inicial y un número corresponden a una primera campaña (año 2000) donde se realizaron observaciones más detalladas. Y los datos referenciados con las letras SI-nº corresponden a una segunda campaña (año 2001) donde se recogieron datos más generales. Así, en la tabla de datos se muestran los siguientes campos de datos;

- *Número de referencia*; identifica cada uno de los movimientos donde se han realizado observaciones detalladas de campo.
- *Referencia del observador*; código con las iniciales del observador y el número de identificación personal del deslizamiento donde se realizó la observación.
- *Pendiente*; con la ayuda de un clinómetro se midió la pendiente del terreno en la zona de rotura de los materiales, donde se inició el movimiento. Este dato se da en grados (°).
- *Litología*; tipo de sustrato rocoso de la zona afectada por el movimiento. Donde Bas = basalto, And = Andesita, y Gr = granito.
- *Tipología*; tipo de movimiento. Se distingue entre deslizamiento, desprendimiento, flujo de detritos y colada de tierra. Cuando el movimiento es complejo, se identifica la combinación de dos de las topologías anteriores.
- *Dirección del movimiento*; indica la dirección en la que se propaga el movimiento de los materiales desde la zona de salida hasta la zona de acumulación.

- *Dimensiones de la zona de salida;* indica la profundidad, el ancho y la longitud de la zona de arranque de los materiales. Estos datos permiten hacer una estimación del volumen de material movilizado.
- *Distribución de los materiales;* indica el tipo de material y el espesor afectado en la zona de rotura. Se diferencia entre material coluvial, alterita y sustrato rocoso.
- *Volumen;* indica el volumen de material movilizado estimado a partir de las dimensiones de la cabecera.
- *Uso del suelo;* indica el tipo de uso del suelo en la zona afectada por el movimiento. Se diferencian cinco tipos de uso del suelo, Pasto, Cultivo, Va = vegetación arbustiva, Bosque a. = bosque abierto (poco denso) y Bosque c. = bosque cerrado (muy denso).

En algunas ocasiones no se pudieron observar y medir algunos de los datos recogidos en esta tabla. Los campos de la tabla identificados con una X corresponden a zonas donde el material no estaba afectado por la rotura de los materiales y en consecuencia no se podía medir su espesor. Y los campos identificados con – corresponden a datos que no se pudieron medir en campo.

El mapa y el inventario de movimientos de ladera sintetizan los datos de campo, los cuales son de gran utilidad para las posteriores evaluaciones de la susceptibilidad y la peligrosidad en estas zonas de estudio piloto.

N° Ref.	Ref.	Pendiente (en °)	Litología	Tipología	Dir.	Dimensiones de la z. Salida			Distribución materiales			Volumen (en m3)	Uso suelo
						Profundidad	Ancho	Longitud	Fm. Detrítica	Alterita	Sustrato		
1	M1	30	Bas / And	desliz. + flujo	S	3	25	40	2.5	1.5	1mín.	3000	Pasto
2	M2	22	Bas / And	desliz. + flujo	SE	2	14	40	0.3	1.5	0.2mín	1200	Bosque a.
3	M3	26	Bas / And	desliz. + flujo	S	4	60	90	6	0.5	0.5mín	25000	Bosque a.
4	M4	22	Bas / And	desliz. + flujo	S	2	50	30	0.5	1.5	X	4000	Pasto
5	M5	20	Bas / And	desliz. + flujo	SE	2	10	4	0.3	1.7	X	100	Pasto
6	M6	17	Bas / And	desliz. + flujo	S	3	60	20	1.5	1	0.5mín	4000	Cultivo
7	M7	25	Bas / And	desliz. + flujo	SE	4	60	200	3	1	X	50000	Pasto
8	M8	32	Bas / And	desliz. + flujo	S	3	50	35	2	1	X	5000	Bosque a.
9	M9	22	Bas / And	desliz. + desprend.	S	2	30	6	2	X	1.5mín	500	Bosque a.
10	M10	18	Bas / And	desliz. + desprend.	E	2	35	10	0.5	X	1.5mín	1000	Bosque a.
11	M11	20	Bas / And	colada de tierra	E	6	50	15	2	3	2mín	5000	Bosque a.
12	M12	20	Bas / And	colada de tierra	E	2	10	40	0.5	1.5	0.5mín	1000	Bosque a.
13	M13	38	Bas / And	desliz. + flujo	S	4	65	50	2	X	2.5mín	13000	Bosque a.
14	M14	30	Bas / And	desliz. + flujo	S	2	10	25	1	X	1.5mín	500	Pasto
15	M15	30	Bas / And	desliz. + flujo	W	3	20	7	1	2.5	X	500	Bosque a.
16	M16	26	Bas / And	desliz. + flujo	W	4,5	50	40	--	--	--	10000	Pasto
17	M17	30	Bas / And	desliz. + flujo	N	3,5	60	40	1	2.5	X	7000	Bosque a.
18	M18	28	Bas / And	desliz. + flujo	N	2	100	40	1.5	0.5m	X	8000	Bosque a.
19	M19	25	Bas / And	desliz. + flujo	N	1,5	35	10	1.5	X	X	500	Bosque a.
20	M20	31	Bas / And	desliz. + flujo	N	3	40	25	0.5	2.5m	X	3000	Bosque a.
21	M21	25	Bas / And	desliz. + flujo	W	5	20	50	2	2	2mín	5000	Cultivo
22	M22	24	Bas / And	desliz. + flujo	W	4,5	50	150	0.5	4mín	X	12000	Pasto
23	M23	40	Bas / And	desliz. + flujo	W	10	40	80	X	8	2mín	50000	Bosque a.
24	X24	30	Bas / And	flujo	NE	1,5	--	--	0.4	0,5	X	63	Pasto
25	X25	40	Bas / And	flujo	NE	3	--	--	0.4	2,5	X	315	Cultivo
26	X26	33	Bas / And	flujo	SE	3	--	--	1	1	X	1500	Pasto
27	X27	30	Bas / And	flujo	SE	3	--	--	0	3	X	2670	Cultivo
28	X28	30	Bas / And	flujo	SE	2,5	--	--	0.4	2	X	720	Cultivo
29	X29	28	Bas / And	flujo	SE	2,5	--	--	0.4	2	X	240	Cultivo
30	X30	28	Bas / And	flujo	SE	2,5	--	--	0.4	2	X	80	Cultivo

Tabla 4.1. Datos de campo de los movimientos de ladera inventariados en las zonas de Cinco Pinos y San Francisco del Norte.

Nº Ref.	Ref.	Pendiente (en °)	Litología	Tipología	Dir.	Dimensiones de la z. Salida			Distribución materiales			Volumen (en m3)	Uso suelo
						Profundidad	Ancho	Longitud	Fm. Detrítica	Alterita	Sustrato		
31	X31	35	Bas / And	flujo	SW	2	--	--	2	1	X	1000	Pasto
32	X32	30	Bas / And	flujo	SW	--	--	--	3	3	X		Pasto
33	X33	45	Bas / And	flujo	SW	1	--	--	0,25	1	X	286	Pasto
34	X34	30	Bas / And	flujo	SW	1	--	--	0,25	1	X	143	Pasto
35	X35	40	Bas / And	flujo	SW	4	--	--	0,25	1	X	220	Pasto
36	X36	30	Bas / And	flujo	WSW	1,5	--	--	0,5	1	X	70	Pasto
37	X37	40	Bas / And	flujo	WSW	1,5	--	--	0,5	1	X	126	Pasto
38	X38	48	Bas / And	flujo	SW	2,5	--	--	0,5	2	X	3125	Pasto
39	X39	31	Gr	flujo	NE	20	--	--	5	15	X	100000	Bosque a.
40	X40	35	Bas / And	flujo	SW	1,5	--	--	0,4	1,1	X	150	Pasto
41	X41	31	Bas / And	flujo	SW	1	--	--	0,4	1	X	90	Pasto
42	X42	32	Gr	flujo	N	6	--	--	1	5	X	22500	Bosque a.
43	X43		Gr	flujo	N	6	--	--	2	4	X	2400	Bosque a.
44	X44	30	Gr	flujo	N	2	--	--	1	1	X	240	Bosque a.
45	X45	30	Gr	flujo	NNE	2	--	--	0,5	1,7	X	3500	Bosque a.
46	X46	32	Bas / And	flujo	SSW	1,5	--	--	0,4	1,2	X	240	Pasto
47	X47	32	Bas / And	flujo	SSW	1,5	--	--	0,4	1,2	X	240	Pasto
48	X48	25	Bas / And	flujo	E	2	--	--	0,4	1,6	X	1750	Pasto
49	E49	32	Gr	flujo	--	2	20	500	0,5	1,7	X	2740	Bosque a.
50	E50	28	Gr	flujo	--	3	10	200	0,5	1	3	1500	Bosque c.
51	E51	27	Gr	flujo	SW	1,5	20	70	0,3	1,5	X	600	Cultivo
52	E52	26	Gr	flujo	--	1,5	15	30	0,3	1	X	200	Cultivo
53	E53	30	Gr	flujo	--	2	15	100	0,5	1,5	X	3000	Pasto
54	E54	28	Gr	flujo	--	2	5	30	0,7	1,5	X	300	Cultivo
55	E55	29	Gr	colada de tierra	--	4	30	700	0,3	2	2	8000/16000	Pasto
56	E56	27	Gr	flujo	--	1	20	200	0,5	1	X	800	Pasto
57	E57	32	Gr	flujo	--	0,5	10	150	0,3	0,7	X	75	Pasto
58	E58	28	Gr	flujo	--	1,5	20	350	0,2	0,7	X	6000	Bosque a.
59	E59	27	Gr	flujo	--	1	9	100	0,5	1	X	180	Bosque a.
60	E60	25	Gr	flujo	--	1	10	75	1	0,5	X	100	Cultivo

Tabla 4.1. Continuación

N° Ref.	Ref.	Pendiente (en °)	Litología	Tipología	Dir.	Dimensiones de la z. Salida			Distribución materiales			Volumen (en m3)	Uso suelo
						Profundidad	Ancho	Longitud	Fm. Detrítica	Alterita	Sustrato		
61	E61	28	--	flujo	--	0,5	10	50	0,5	X	X	100	Cultivo
62	E62	28	Gr	flujo	--	1	7	100	1	X	X	250	Cultivo
63	E63	35	Bas / And	flujo	--	3	40	400	1,5	2	X	2500	Va
64	E64	60	Gr	desprendimiento	--	7	20	--	--	--	--	200	Pasto
65	E65	28	Bas / And	colada de tierra	--	1	150	300	0,5	X	X	900000	Pasto
66	E66	32	Granito	flujo	--	1,5	15	150	1	X	X	300	Cultivo
67	E67	26	Bas / And	flujo	--	5	3,7	70	1,5	4	X	1080	Pasto
68	E68	26	Gr	flujo	--	10	15	75	--	2,5	X	175	Va
69	E69	30	Gr	flujo	--	2	30	40	0,5	1,5	X	300	Cultivo
70	E70	30	Gr	flujo	--	2	20	100	0,5	0,5	2	300	Cultivo
71	E71	27	Bas / And	flujo	--	6	10	60	1,5	3	X	800	Cultivo
72	E72	30	Bas / And	flujo	--	4	25	100	1	3	X	1600	Cultivo
73	E73	30	Bas / And	flujo	--	5	15	25	1,5	2	X	2500	Pasto
74	E74	28	Bas / And	desliz. + flujo	--	7	15	30	0,5	2,5	3	1000	Pasto
75	E75	28	Bas / And	flujo	--	2	20	20	0,5	2	X	400	Bosque a.
76	E76	35	Bas / And	colada de tierra	--	5	20	150	1,5	X	X	2000	Bosque a.
77	E77	25	Bas / And	flujo	--	1	20	30	0,5	1,5	X	200	Bosque a.
78	E78	28	Bas / And	desliz. + flujo	--	4	20	25	1,5	3	2	2800	Bosque a.
79	E79	26	Bas / And	flujo	--	1	--	--	1	2,5	X	3000	Cultivo
80	E80	28	Bas / And	flujo	--	4	10	200	1	0,5	2	800/6000	Cultivo
81	E81	28	Bas / And	flujo	--	4	15	20	1	4	X	200	Va
82	E82	32	Bas / And	flujo	--	5	15	50	4	1	X	2250	Va
83	E83	28	Bas / And	flujo	--	1	15	100	1	X	X	900	Bosque a.
84	Si-1	30	And	flujo	W								Pasto
85	Si-2	34	And	flujo	SSW								Va
86	Si-3	35	And	flujo	SSW								Va
87	Si-4	25	And	flujo	S								Pasto
88	Si-5	30	And	flujo	SSW								Pasto
89	Si-6	31	Gr	desliz. + flujo	NE								Bosque c.
90	Si-7	30	And	desliz. + flujo	S								Va

Tabla 4.1. Continuación

N° Ref.	Ref.	Pendiente (en °)	Litología	Tipología	Dir.	Dimensiones de la z. Salida			Distribución materiales			Volumen (en m3)	Uso suelo
						Profundidad	Ancho	Longitud	Fm. Detrítica	Alterita	Sustrato		
91	Si-8	33	And	flujo	S								Va
92	Si-9	34	And	flujo	SW								Pasto
93	Si-10	31	And	desliz. + flujo	SE								Pasto
94	Si-11	35	And	desliz. + flujo	SW								Pasto
95	Si-12	32	And	deslizamiento	NE								Pasto
96	Si-13	23	And	flujo	N								Bosque c.
97	Si-14	30	And	flujo	SE								Pasto
98	Si-15	28	Bas	flujo	S								Pasto
99	Si-16	28	And	desliz. + flujo	SSE								Pasto
100	Si-17	50	And	desprendimiento	SE								Pasto
101	Si-18	40	And	flujo	NE								Pasto
102	Si-19	--	And	--	SW								Pasto
103	Si-20	30	And	--	SE								Va
104	Si-21	28	And	flujo	E								Pasto
105	Si-22	--	And	deslizamiento	E								Pasto
106	Si-23	--	And	--	SE								Va
107	Si-24	27	Gr	flujo	SSW								Cultivo
108	Si-25	33	Gr	flujo	SSW								Pasto
109	Si-26	35	And	flujo	SSE								Bosque a.
110	Si-27	35	And	flujo	E								Pasto
111	Si-28	32	Gr	--	SE								Pasto
112	Si-29	35	Bas	--	S								Va
113	Si-30	36	And	deslizamiento	SSW								Va
114	Si-31	34	And	flujo	SW								Pasto
115	Si-32	37	Bas/And	flujo	S								Va
116	Si-33	32	And	desliz. + desprend.	W								Bosque c.
117	Si-34	40	And	deslizamiento	SE								Pasto
118	Si-35	35	Bas/And	flujo	S								Cultivo
119	Si-36	30	And/Bas	flujo	NW								Pasto
120	Si-37	31	Bas	flujo	NNW								Cultivo

Tabla 4.1. Continuación

N° Ref.	Ref.	Pendiente (en °)	Litología	Tipología	Dir.	Dimensiones de la z. Salida			Distribución materiales			Volumen (en m3)	Uso suelo
						Profundidad	Ancho	Longitud	Fm. Detrítica	Alterita	Sustrato		
	Observ.				Flujo								
121	Si-38	31	Bas/And	flujo	WSW								Pasto
122	Si-39	33	Gr	deslizamiento	SE								Pasto
123	Si-40	28	Gr	deslizamiento	SW								Pasto
124	Si-41	32	And	flujo	E								Va
125	Si-42	32	And	deslizamiento	E								Pasto
126	Si-43	35	And	flujo	ESE								Pasto
127	Si-44	32	And	flujo	SE								Pasto
128	Si-45	42	And	flujo	SSE								Pasto
129	Si-46	35	And	flujo	SE								Pasto
130	Si-47	35	And	flujo	SE								Bosque c.
131	Si-48	40	And	flujo	SE								Pasto
132	Si-49	37	And	desprendimiento	SSE								Pasto
133	Si-50	48	Bas	desliz. + flujo	SW								Va
134	Si-51	49	Bas	flujo + desprend.	NNE								Va
135	Si-52	32	Bas	flujo	SSW								Pasto
136	Si-53	30	Bas	flujo	SE								Pasto
137	Si-54	45	Bas	flujo	SSE								Pasto
138	Si-55	35	Bas	flujo	SE								Pasto
139	Si-56	32	Bas	flujo	NNE								Pasto
140	Si-57	47	Bas	desprendimiento	W								Pasto
141	Si-58	31	Bas	flujo	NW								Pasto
142	Si-59	40	Bas	flujo	W								Bosque c.
143	Si-60	38	Bas	flujo	NNW								Pasto
144	Si-61	25	Bas	deslizamiento	NE								Pasto
145	Si-62	40	Bas	deslizamiento	S								Pasto
146	Si-63	32	Gr	deslizamiento	NE								Pasto
147	Si-64	34	Gr	flujo	SE								Pasto
148	Si-65	28	Gr	desliz. + flujo	SW								Pasto
149	Si-66	25	Gr	flujo	S								Pasto
150	Si-67	28	Gr	desliz. + flujo	SE								Cultivo

Tabla 4.1. Continuación

N° Ref.	Ref.	Pendiente (en °)	Litología	Tipología	Dir.	Dimensiones de la z. Salida			Distribución materiales			Volumen (en m3)	Uso suelo
						Profundidad	Ancho	Longitud	Fm. Detrítica	Alterita	Sustrato		
	Observ.				Flujo								
151	Si-68	29	Gr	flujo	SSE								Pasto
152	Si-69	30	Gr	deslizamiento	SE								Va
153	Si-70	35	And	flujo	SE								Pasto
154	Si-71	23	And/Gr	deslizamiento	SE								Pasto
155	Si-72	25	Gr	flujo	ESE								Pasto
156	Si-73	29	Gr	flujo	E								Pasto
157	Si-74	27	Gr	deslizamiento	SE								Cultivo

Tabla 4.1. Continuación

4.1.2. Resultados del análisis comparativo entre movimientos de ladera y propiedades del terreno

Como se ha descrito detalladamente en la introducción de esta tesis, la evaluación de la susceptibilidad a los movimientos de ladera se basa en un análisis comparativo entre los movimientos de ladera ocurridos en una zona y las características del terreno. En el caso de la zona piloto de Cinco Pinos este análisis comparativo se basó en la relación existente entre las diferentes litologías, la pendiente del terreno y la ocurrencia de flujos de detritos a partir de las observaciones realizadas en el campo.

Dado que los materiales afectados por los movimientos de ladera son la capa de regolito y de material coluvial que recubre el sustrato rocoso, se observaron las características de estos materiales para poder determinar si existía alguna relación entre estos y el desarrollo de los flujos de detritos. En el caso de los materiales de alteración de las diferentes litologías volcánicas, se observó que todos tienen características muy similares y en consecuencia se determinó que estos materiales tienen un comportamiento homogéneo en cuanto al desarrollo de flujos de detritos. Teniendo en cuenta esta observación, en el bloque I de este trabajo únicamente se diferenciaron dos tipos genéricos de litologías: volcánicas y plutónicas.

En cuanto a la pendiente del terreno, se analizaron las pendientes en las zonas de cabecera de los deslizamientos medidas en el campo y recogidas en el inventario de movimientos de ladera descrito anteriormente. Por una parte se analizó el conjunto de pendientes medidas en 130 movimientos de ladera (ángulos de rotura entre 20° y 49°), y por otra parte se analizaron estas pendientes en función de la litología afectada (ver fig. 4.4).

En el caso de los ángulos de rotura medidos en zonas de litologías plutónicas, se observa una distribución de frecuencias normal a excepción de la pendiente por debajo de 25°, sin movimientos observados en el rango de pendientes entre 20° y 24°. Esto puede ser debido o bien a una muestra demasiado pequeña (33 movimientos registrados en zonas de litologías plutónicas) o bien al hecho de que en la zona de estudio las áreas con litologías plutónicas y pendientes inferiores a los 25° sean muy

reducidas. Teniendo en cuenta estos hechos, se consideró que el ángulo mínimo de pendiente a partir del cual se desarrollan los movimientos de ladera en la zona de estudio es de 20° , tanto para litologías volcánicas como para litologías plutónicas. En consecuencia, el ángulo de 20° se tomó como ángulo umbral de estabilidad para movimientos de ladera desencadenados por lluvias intensas comparables a las del huracán Mitch.

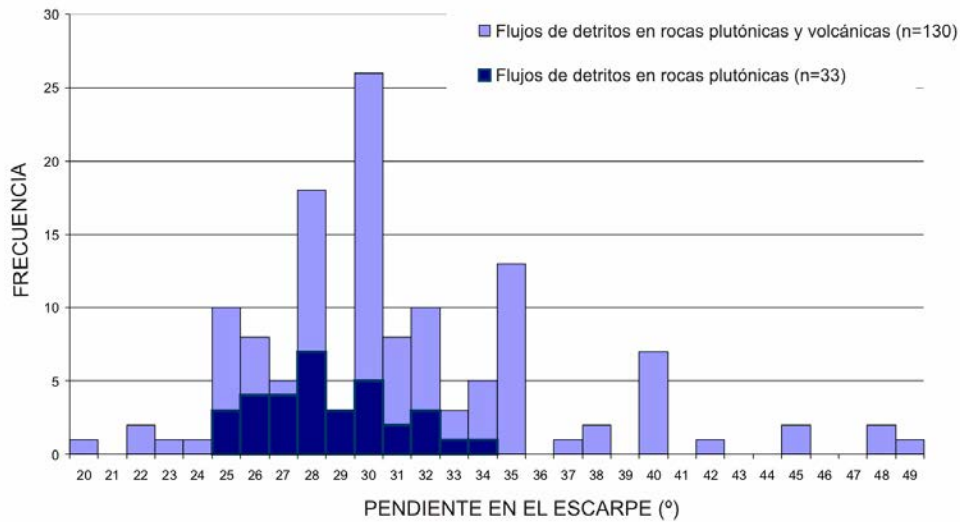


Fig. 4.4. Distribución de pendientes en la zona de salida de flujos de detritos medidas en campo. El histograma en azul muestra las pendientes medidas en rocas volcánicas y rocas plutónicas. El histograma en azul oscuro muestra las pendientes medidas en zonas de rocas plutónicas.

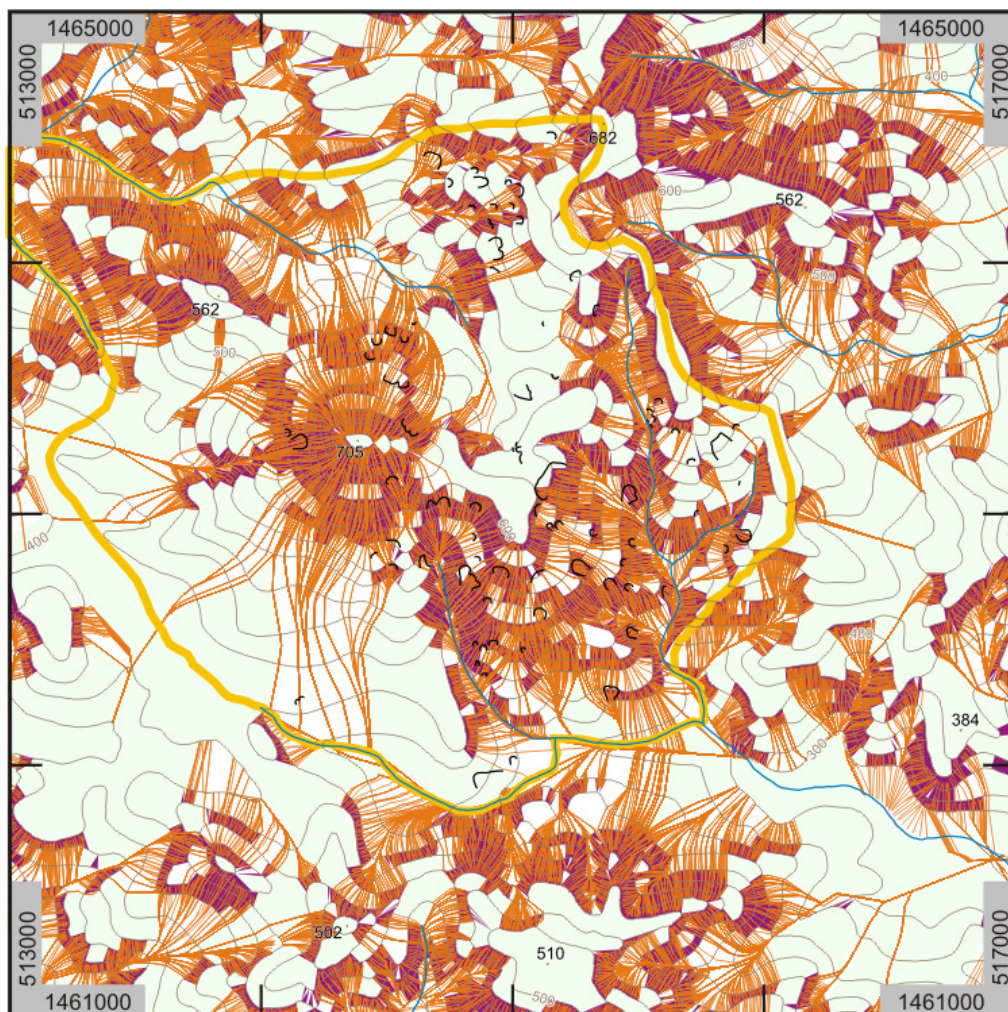
4.1.3. Mapa de susceptibilidad

En la zona piloto de Cinco Pinos se obtuvo el mapa de susceptibilidad analizando por una parte, la susceptibilidad a la rotura de los materiales y por otra la susceptibilidad al alcance de los flujos de detritos.

Teniendo en cuenta la pendiente umbral que se establece a partir de las observaciones de campo y el mapa topográfico digital, se obtuvo la zonificación de las áreas con pendiente superior a 20° , las cuales se identifican como zonas susceptibles a la rotura de los materiales. Esta susceptibilidad a la rotura se complementa con las zonas de rotura representadas en el mapa de movimientos de ladera de esta zona. En el mapa de susceptibilidad (figura 4.5) se muestran las zonas de escarpe de rotura (en negro) y las áreas con pendiente superior a 20° marcadas en violeta, que

conjuntamente indican las zonas susceptibles a la rotura de los materiales, es decir, las zonas potenciales de inicio de movimientos de ladera.

Por otra parte, y utilizando el módulo GeoPack de Microstation® se obtuvieron de forma semiautomática las trayectorias de los posibles flujos a partir de las zonas susceptibles a la rotura y hasta la red de drenaje principal. En el mapa de susceptibilidad (figura 4.5) se muestran las posibles trayectorias de flujo en color anaranjado. Las zonas de acumulación de trayectorias de flujo (sus envolventes) muestran las zonas susceptibles al alcance de los flujos de detritos.



LEYENDA



Fig. 4.5. Mapa de susceptibilidad correspondiente a la zona piloto de Cinco Pinos (localización en Fig. 4.1). Las áreas en violeta corresponden a zonas con pendiente igual o superior a 20°, consideradas zonas susceptibles a la rotura. Las líneas de flujo corresponden a posibles trayectorias de flujos de detritos teniendo en cuenta las zonas susceptibles a la rotura.

4.1.4. Mapa de peligrosidad

La peligrosidad por movimientos de ladera únicamente se evaluó en la zona piloto de Cinco Pinos, en el Bloque I de este trabajo. En esta zona se optó por combinar tres conceptos relacionados con la peligrosidad; el número de movimientos registrados en un lugar determinado, la predictibilidad de estos movimientos y la susceptibilidad detectada en este punto. Entendiendo predictibilidad como una predicción temporal que permite activar una alerta temprana a partir de indicadores precursores. La combinación de estos conceptos permitió obtener una escala de peligrosidad con 7 escenarios diferentes que permiten definir el grado de peligrosidad de menor a mayor, tal como se define a continuación:

Caso-1; zonas donde no se registró ningún evento ni se detectó susceptibilidad.

Caso-2; zonas donde no se registró ningún evento pero se detectó susceptibilidad.

Caso-3; zonas donde se registró un evento predecible (una colada de tierra pre-Mitch).

Caso- 4; zonas donde se registraron dos eventos predecibles (coladas de tierra pre-Mitch y Mitch).

Caso-5; zonas donde se registró un evento no predecible (un flujo de detritos pre-Mitch o Mitch).

Caso-6; zonas donde se registraron dos eventos uno predecible y el otro no predecible (una colada de tierra pre-Mitch y un flujo de detritos Mitch).

Caso-7; zonas donde se registraron dos eventos, ambos no predecibles (flujo de detritos pre-Mitch y Mitch o desprendimientos de bloques pre-Mitch y Mitch)

Estos 7 escenarios se representaron en un mapa de peligrosidad (figura 4.6). La limitación principal de este mapa es que únicamente muestra la peligrosidad en aquellos puntos donde se registró algún movimiento anterior o causado por el Mitch. Dada la escasez de datos cuantitativos, en aquellas zonas donde no se registró ningún movimiento, solamente se puede evaluar la susceptibilidad como predicción espacial de la ocurrencia de eventos futuros.

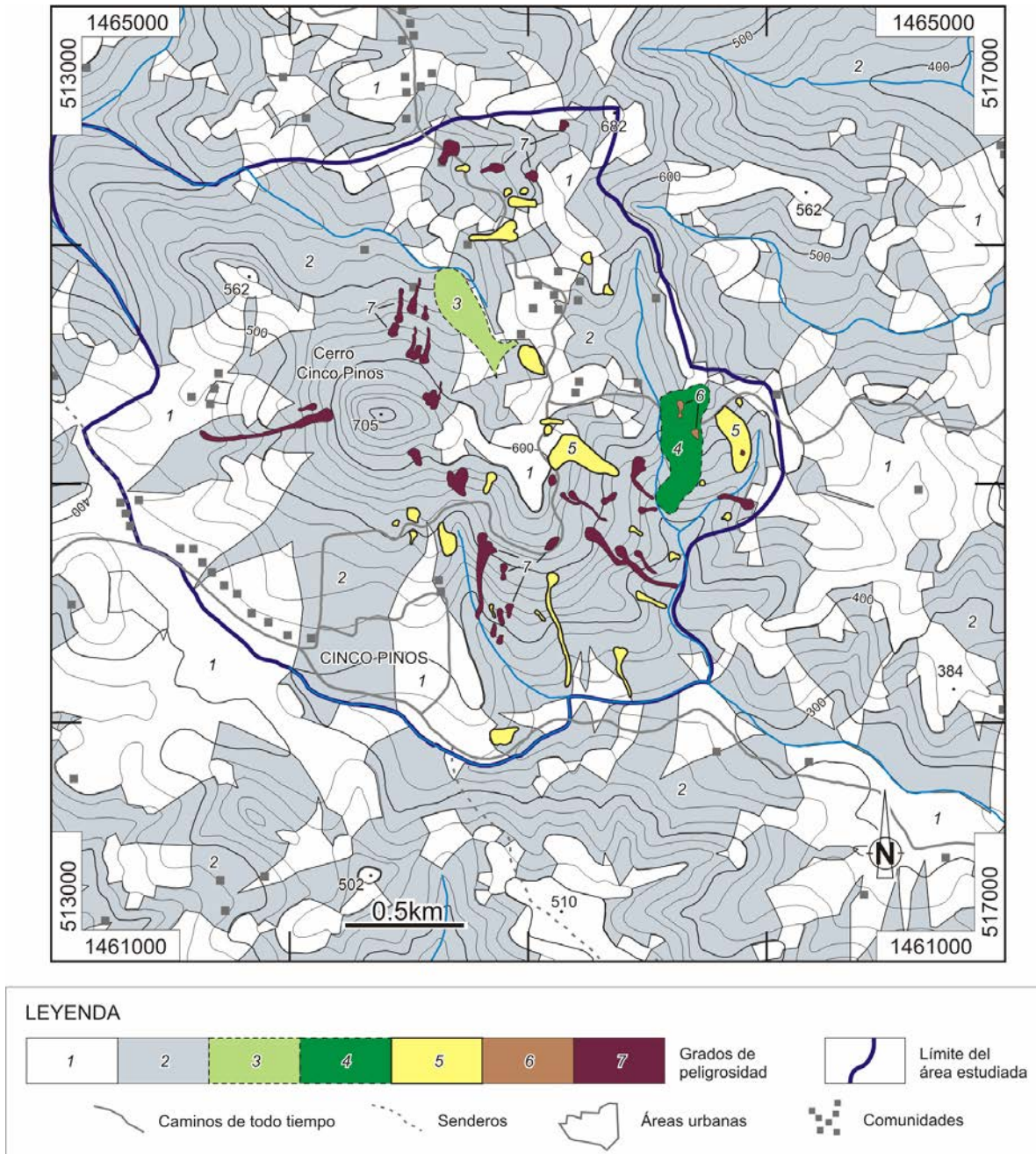


Fig. 4.6. Mapa de peligrosidad correspondiente a la zona piloto de Cinco Pinos (localización en Fig. 4.1).

4.2. Resultados del Bloque II: Zona del Norte del Departamento de Chinandega (municipios de San Pedro del Norte, Cinco Pinos, San Francisco del Norte, Santo Tomás del Norte y Somotillo)

4.2.1. Mapa e inventario de movimientos de ladera

En esta zona de estudio, la información recopilada en la interpretación de fotografías aéreas se representó sobre ortofotos a escala 1:10.000. Este material se utilizó durante las campañas de campo para la orientación (en sustitución del mapa topográfico 1:50.000) y para verificar y corregir la fotointerpretación. El hecho de poder trabajar sobre una base cartográfica a escala 1:10.000 permitió que el mapa de movimientos de ladera obtenido tenga esta misma escala de detalle (figura 4.7).

Posteriormente, los datos recopilados se digitalizaron mediante el SIG ArcInfo® y se prepararon para su presentación con el módulo ArcView®. Este proceso permitió obtener un mapa digital en el cual los movimientos de ladera están georreferenciados, de manera que estos quedan representados en las coordenadas geográficas donde se encuentran. El sistema de coordenadas utilizado para la georreferenciación en este caso, fue el Norte American Datum de 1927 (NAD27) Zona 16N.

En el mapa de movimientos de ladera obtenido se muestran 2.560 puntos afectados, en cada uno de los cuales se diferencian las zonas afectadas por rotura de los materiales, donde se inician los movimientos, de las zonas afectadas por el trayecto o acumulación de los materiales movilizados (ver zona ampliada en el extremo superior izquierdo del mapa, en la figura 4.7). Además de los movimientos de ladera también se han representado la red de drenaje principal, las cabeceras municipales y las comunidades correspondientes a cada una de ellas, así como las carreteras y caminos principales. Estos elementos, ayudan a los propietarios de la zona a la identificación de los movimientos y al reconocimiento de las propiedades afectadas por cada uno de ellos.

MAPA DE MOVIMIENTOS DE LADERA
Chinandega Norte

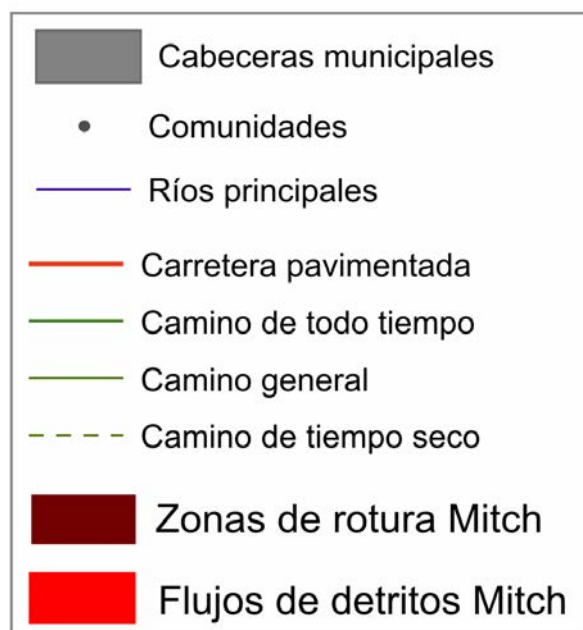
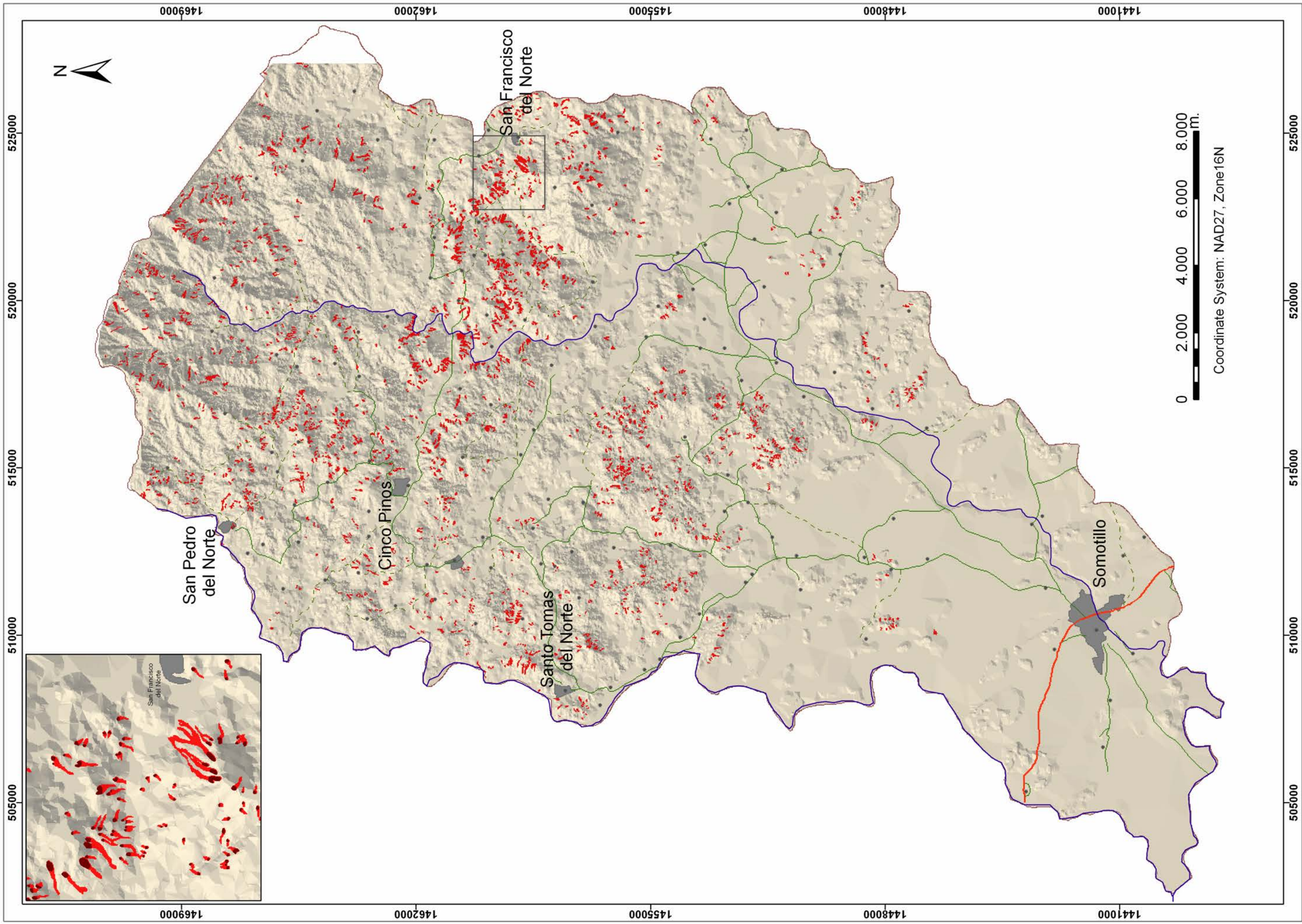


Fig. 4.7. Mapa de movimientos de ladera correspondiente a la zona del norte del Departamento de Chinandega.



4.2.2. Resultado del análisis comparativo entre movimientos de ladera y propiedades del terreno

En la zona del norte del Departamento de Chinandega se disponía de un mapa de unidades de terreno a partir del cual se pudieron extraer mapas temáticos representando algunas propiedades del terreno. La comparación del mapa de movimientos de ladera con los mapas temáticos (ver mapas en el Anexo), mediante el SIG, permitió calcular el índice de influencia de cada uno de los factores condicionantes de la inestabilidad del terreno, previamente seleccionados.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el análisis comparativo entre los movimientos de ladera desarrollados por el huracán Mitch en la zona de estudio del norte del Departamento de Chinandega y los factores del terreno que se seleccionaron como factores condicionantes de los deslizamientos en esta zona.

Para cada uno de los factores condicionantes se presenta una tabla de datos donde se muestran las diferentes clases que describen cada factor, así como la extensión de cada una de estas clases y el área afectada por rotura del terreno. En la última columna de cada tabla se representa el Grado de Influencia (GI) de cada una de estas clases, determinado en base a la densidad de área afectada por rotura de los materiales. Además, para cada uno de los factores condicionantes de la inestabilidad del terreno se representan gráficamente y se comentan los datos presentados en cada tabla.

- La Pendiente

Tabla- 4.2; tabla de datos correspondiente al factor pendiente

Clase Pendiente	Área (en m2)	Área afectada (en m2)	GI
0° - 8°	1819399,07	0,00	0,00
8° - 15°	6203429,67	0,00	0,00
15°- 30°	101557303,47	33206,92	0,03
>30°	134515642,54	424854,72	0,32
Total = 244.095.774 m2		Total = 458.061 m2	

En esta tabla se pueden observar las 4 clases de pendiente diferenciadas para el análisis de susceptibilidad (en la primera columna), con la correspondiente extensión (en la segunda columna), el área afectada por rotura de los materiales en

cada una (en la tercera columna) y el Grado de Influencia obtenido para cada clase (en la cuarta columna). Estos datos explican la principal característica geomorfológica de la zona de estudio, caracterizada por zonas con pendiente elevado $>30^\circ$. La extensión de zonas con pendiente entre 15° y 30° también es importante aunque algo inferior que las zonas más abruptas. Y las áreas con pendiente $<15^\circ$ son las más reducidas.

El cálculo del grado de influencia de cada una de las clases de pendiente a la inestabilidad del terreno, a partir de la densidad de área afectada, demuestra que las zonas con pendiente $>30^\circ$ además de ser las más extensas, son las que tienen mayor densidad afectada por rotura de los materiales (figura 4.8), y por ende son las que tienen un mayor grado de influencia. Este dato coincide con las observaciones de campo en las cuales se observó una influencia importante de las zonas con pendientes elevados en la inestabilidad del terreno. Para las zonas con pendiente entre 15° y 30° se obtuvo un grado de influencia un orden de magnitud inferior y para las clases de pendiente $<15^\circ$ un grado de influencia cero puesto que en estas zonas no se registra ninguna rotura de los materiales.

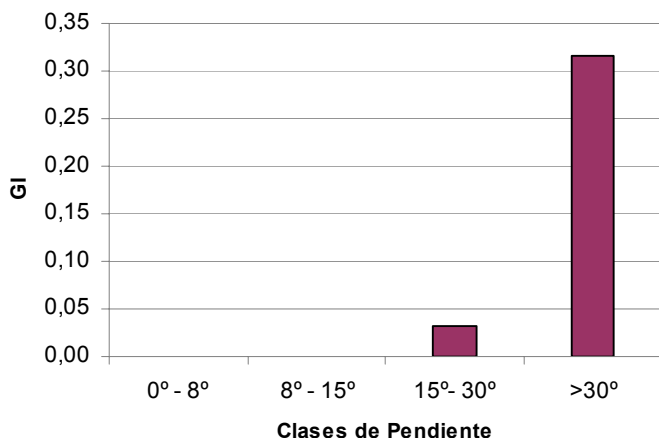


Fig. 4.8. Gráfico de distribución de la densidad de área afectada en cada clase de pendiente, mostrando el Grado de Influencia (GI) de cada clase.

- La Litología

Tabla- 4.3; tabla de datos correspondiente al factor litología

Clase Litología	Área (en m ²)	Área afectada (en m ²)	GI
Material Aluvial	1441737,60	0,00	0,00
Volcánico Cuaternario	28644329,32	0,00	0,00
Volcánico Terciario	200271467,63	405432,08	0,20
Granito	11743600,61	52629,56	0,45
Total = 244.101.135 m ²		Total = 458.061 m ²	

En la primera columna de la tabla 4.3 se pueden observar las cuatro clases de litologías diferenciadas para este análisis. En la segunda columna la extensión de estas clases y en la tercera columna el área afectada por rotura de los materiales. En la última columna se muestran los grados de influencia obtenidos para cada clase de litología mediante el cálculo de densidad de área afectada. El dato más destacable de esta tabla es el dominio de la extensión de litologías volcánicas Terciarias por encima de las demás clases.

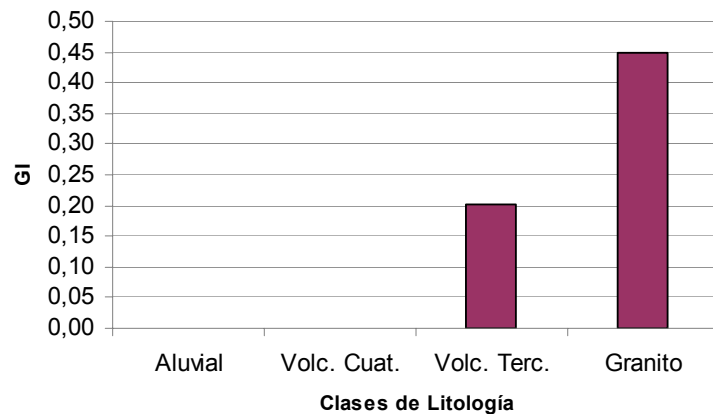


Fig. 4.9. Gráfico de distribución de la densidad de área afectada en cada clase de litología, mostrando el Grado de Influencia (GI) de cada clase.

En cuanto al grado de influencia obtenido para las diferentes clases de litología (figura 4.9), se puede observar que para las zonas con litología volcánica Terciaria, a pesar de albergar la mayor extensión de zona afectada por rotura de los materiales, se obtuvo un grado de influencia inferior que el granito. Esto se debe a la gran extensión de zonas con afloramiento de materiales volcánicos Terciarios y a la alta densidad de área afectada por rotura de los materiales respecto a la baja extensión de litologías graníticas. En el caso de los núcleos poblados, las zonas con materiales aluviales y con rocas volcánicas Cuaternarias, se obtuvo un grado de influencia cero debido a que en estas áreas no se registran zonas afectadas por rotura de los materiales.

Teniendo en cuenta las observaciones de campo, estos resultados eran esperables ya que el material de alteración de las rocas graníticas tiene una permeabilidad mayor que el de las rocas volcánicas Terciarias, esto permite que la infiltración de agua en estos materiales sea más importante y por ende el incremento de la presión

de poro responsable de la rotura de los materiales es mayor en las zonas de litologías graníticas que en las zonas de litologías volcánicas. En cuanto a las zonas con materiales aluviales y con materiales volcánicos Cuaternarios hay que tener en cuenta que se encuentran siempre en áreas con pendientes muy bajas (<15°) y posiblemente esta coincidencia determina que el grado de influencia obtenido para estas clases de litologías sea cero.

- La profundidad de suelo

Tabla- 4.4; tabla de datos correspondiente al factor profundidad de suelo

Clase Profundidad Suelo	Área (en m ²)	Área afectada (en m ²)	GI
Superficial (0cm - 40cm)	59363,17	0,00	0,00
Medio (40cm - 90cm)	11780502,29	39111,37	0,33
Profundo (>90cm)	230436510,22	418950,27	0,18
Total = 244.101.135 m ²		Total = 458.061 m ²	

En la tabla 4.4 se muestran las tres clases de profundidad del suelo edáfico diferenciadas para la evaluación de la susceptibilidad (en la primera columna), la extensión de estas (en la segunda columna), el área afectada por rotura de los materiales en cada una de ellas (en la tercera columna) y el grado de influencia obtenido para cada clase a partir de la densidad de área afectada. En esta tabla se puede observar el predominio de zonas con un espesor de suelo superior a los 90cm, dato que coincide con las observaciones de campo. Así mismo se confirma otra característica observada en campo que es la escasez de zonas sin suelo desarrollado, es decir, con afloramiento rocoso.

A pesar de la gran extensión de zonas con suelo profundo y de la gran cantidad de zonas afectadas por rotura de los materiales que se registran en este tipo de zonas, el mayor grado de influencia se obtuvo para las zonas con una profundidad del suelo media (figura 4.10). Esto seguramente se debe a que el suelo edáfico retiene el agua infiltrada, regulando el flujo que percola a la formación superficial. En las zonas de mayor profundidad de suelo la concentración de agua en la formación superficial es menor que en las zonas con profundidad del suelo media. En estas zonas, la cantidad de agua que se concentra en el material de alteración

es mayor y esta puede ejercer la presión de poro necesaria para desestabilizar los materiales. En las zonas con un suelo muy superficial, poco desarrollado, el sustrato rocoso está muy cerca de la superficie y hay poco desarrollo de formación superficial. Esto evita que el agua pueda concentrarse en el interior de los materiales, por esto, no se registran zonas de rotura de los materiales.

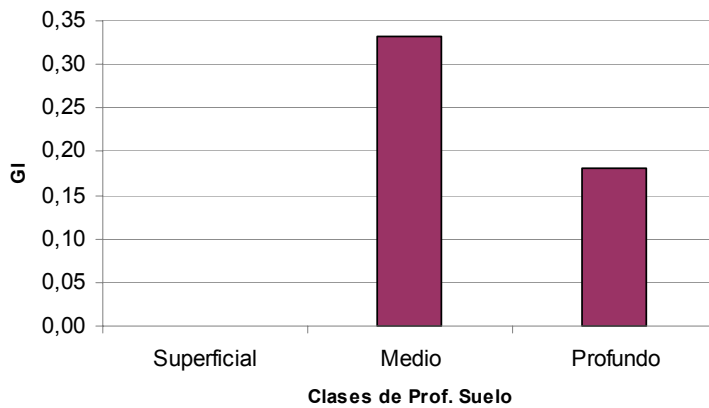


Fig. 4.10. Gráfico de distribución de la densidad de área afectada en cada clase de profundidad del suelo, mostrando el Grado de Influencia (GI) de cada clase.

- La textura del suelo

Tabla- 4.5; tabla de datos correspondiente al factor textura del suelo

Clase Textura Suelo	Área (en m ²)	Área afectada (en m ²)	GI
Grava	3210000,00	10000,00	0,31
Arena	221770000,00	440000,00	0,20
Arcilla	17300000,00	4540,06	0,03
Total = 244.101.135 m ²		Total = 458.061 m ²	

En la tabla anterior se muestran los datos correspondientes a la textura del suelo. En primer lugar, se presentan las tres clases de textura que se diferenciaron para este estudio (en la primera columna), seguidas de su extensión (en la segunda columna) y el área afectada por rotura de los materiales (en la tercera columna). Finalmente se presenta el grado de influencia obtenido para cada una de las clases a partir de la densidad de área afectada por rotura de los materiales (en la cuarta columna). Estos datos muestran un claro dominio de los suelos arenosos por encima de los suelos compuestos por arcillas o gravas.

La figura 4.11 muestra los grados de influencia obtenidos para cada clase de textura del suelo. En este gráfico se puede observar que a pesar de ser los suelos

arenosos los que dominan en extensión y los que albergan una mayor área afectada por rotura de los materiales, son las zonas con suelos compuestos por gravas las que tienen una mayor densidad de área afectada y por ende las que tienen un mayor grado de influencia. Esto se debe a que los suelos con materiales más gruesos permiten una mayor infiltración de agua hacia los materiales de alteración que los suelos con granulometrías muy finas, y esto favorece la desestabilización del terreno.

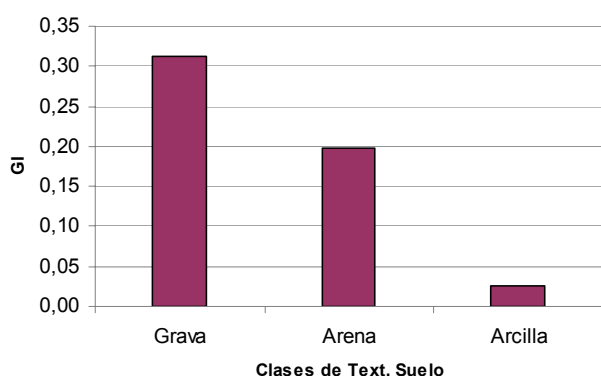


Fig. 4.11. Gráfico de distribución de la densidad de área afectada en cada clase de textura del suelo, mostrando el Grado de Influencia (GI) de cada clase.

- El uso del suelo

Tabla- 4.6; tabla de datos correspondiente al factor uso del suelo

Clase Uso Suelo	Área (en m2)	Área afectada (en m2)	GI
Agua	1673846,72	0,00	0,00
Bosque	30579930,07	37143,58	0,12
Cultivo	32648873,18	33213,07	0,10
Pasto	138110000,00	300000,00	0,22
Arbustivo	39262787,28	83399,58	0,21
Total = 244.101.135 m2		Total = 458.061 m2	

En la tabla 4.6 se muestran las cinco clases de uso del suelo diferenciadas para el análisis de la susceptibilidad (en la primera columna), su extensión (en la segunda columna) y el área afectada por rotura de los materiales (en la tercera columna). En la última columna se muestran los grados de influencia obtenidos para cada una de las clases de uso del suelo. En esta tabla se puede observar un claro dominio de las zonas dedicadas al pasto del ganado, seguidas de las zonas con vegetación arbustiva. En menor proporción, pero con extensiones similares, se encuentran las zonas dedicadas al cultivo y las zonas de bosque.

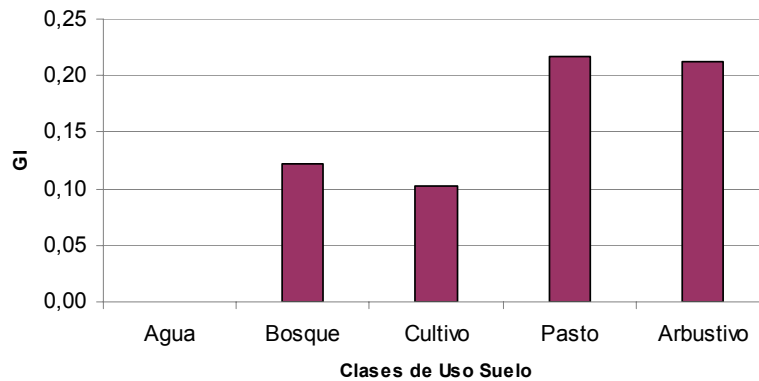


Fig. 4.12. Gráfico de distribución de la densidad de área afectada en cada clase de uso del suelo, mostrando el Grado de Influencia (GI) de cada clase.

En cuanto a los grados de influencia obtenidos para las diferentes clases de uso del suelo, representadas gráficamente en la figura 4.12, se puede observar que tanto las zonas de pasto como las zonas de vegetación arbustiva obtuvieron valores similares. Esto es debido a que el tipo de vegetación que se encuentra en estas zonas es parecido, ya que el ganado en la zona de estudio no se alimenta únicamente de vegetación herbácea sino también de vegetación de tipo arbustivo. Por esto la influencia de estos dos tipos de uso del suelo sobre la inestabilidad del terreno es similar.

4.2.3. Mapa de susceptibilidad

Una vez obtenidos los grados de influencia de las clases de los diferentes factores condicionantes seleccionados para el estudio, se calculó la susceptibilidad en cada unidad de terreno. En este caso, el SIG fue la herramienta básica para el cálculo de la susceptibilidad y su representación en un mapa.

En primer lugar se obtuvo el mapa de susceptibilidad en la zona de desarrollo de la metodología y en segundo lugar, transfiriendo los datos a la zona de validación se obtuvo el mapa de susceptibilidad para esta zona. La unión de ambos mapas permite obtener el mapa de susceptibilidad resultante de toda el área de estudio, en el cual se representaron cuatro clases de susceptibilidad (figura 4.13). En este mapa se representan conjuntamente la red de drenaje principal, las cabeceras municipales y las

comunidades pertenecientes a cada una de ellas, así como las carreteras y caminos principales. El sistema de coordenadas utilizado para la georeferenciación del mapa es el *North American Datum de 1927 (NAD27), Zona 16N*.

Las cuatro clases de susceptibilidad que se representan en el mapa de susceptibilidad resultante, muestran el grado de propensión del terreno a ser afectado por rotura de los materiales. Estas clases se pueden definir de la siguiente manera;

- *Susceptibilidad alta*; son zonas que por sus características morfológicas, geológicas y antrópicas, presentan una elevada posibilidad de ser afectadas por inestabilidad de los materiales.
- *Susceptibilidad media*; son áreas que por sus características presentan alguna posibilidad de ser afectadas por inestabilidad del terreno.
- *Susceptibilidad baja*; son zonas que por sus características raramente se verán afectadas por inestabilidad del terreno.
- *Susceptibilidad no detectada*; son zonas donde no se ha detectado ninguna propensión del terreno a la inestabilidad en base a los factores considerados. No obstante, no se descarta del todo la posibilidad de ser afectadas por algún evento.

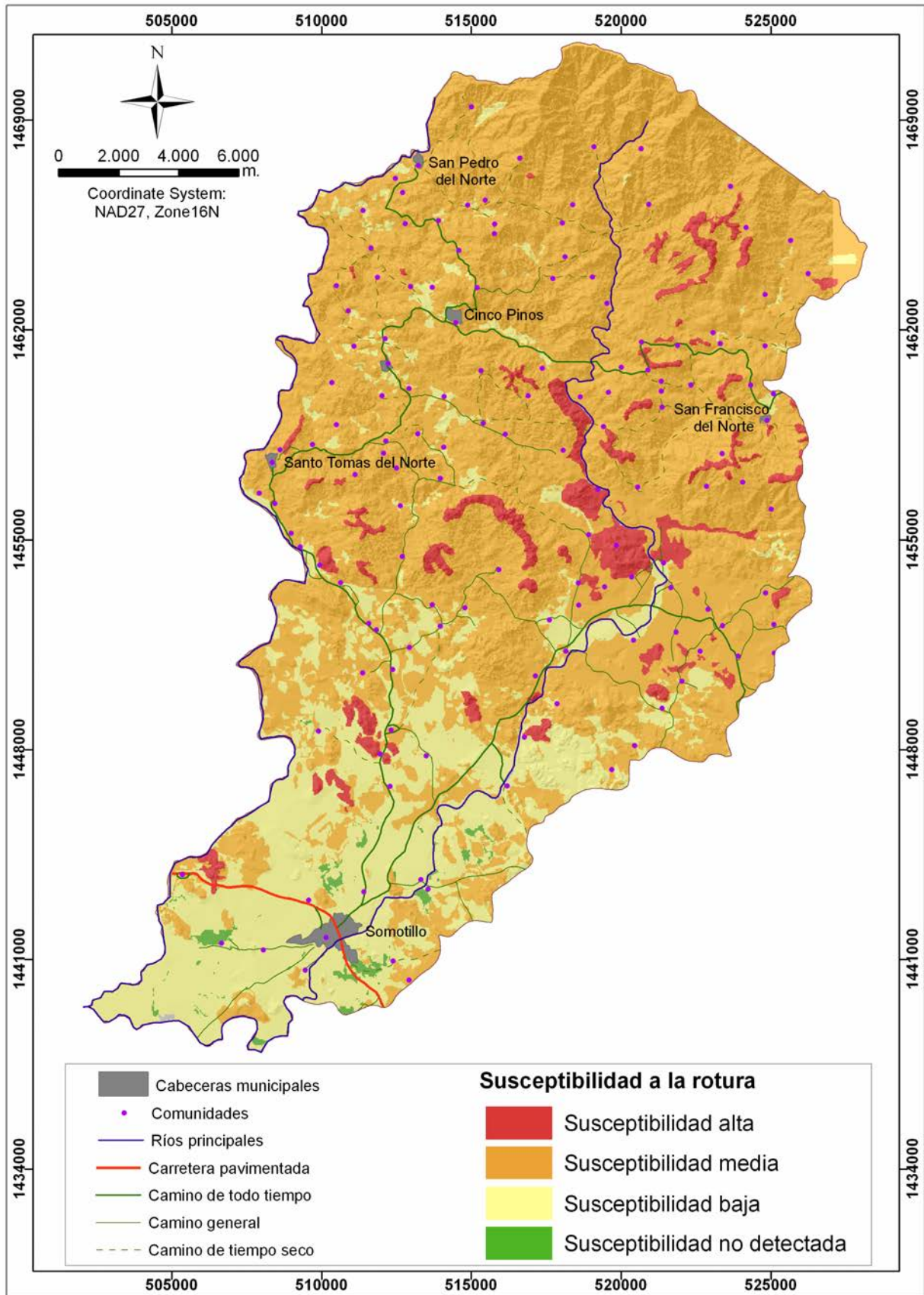


Fig. 4.13. Mapa de susceptibilidad correspondiente al área del norte del Departamento de Chiapas.

En el mapa de susceptibilidad resultante las diferentes clases de susceptibilidad presentan la siguiente distribución (en porcentaje respecto al total del área de estudio (figura 4.14):

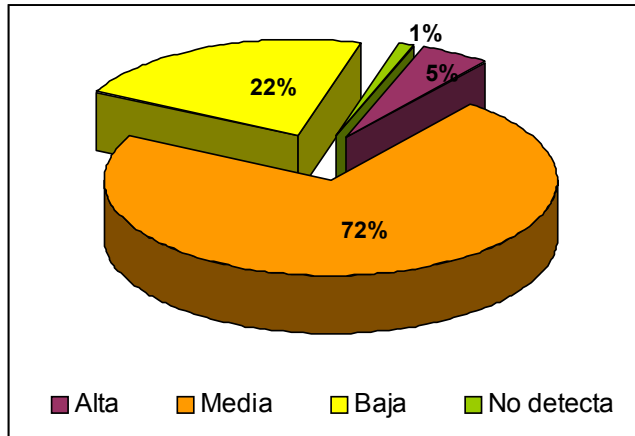


Fig. 4.14: Gráfico del porcentaje de área de estudio ocupado por cada una de las clases de susceptibilidad a la rotura.

El proceso de validación aplicado, demuestra que esta zonificación de la susceptibilidad se ajusta correctamente a la distribución de zonas de rotura de los materiales, permitiendo así, la utilización de este documento para la determinación del uso del suelo y la implementación de medidas no estructurales para la mitigación del riesgo por inestabilidad de laderas. Estos usos y medidas no estructurales se pueden determinar según las características socioeconómicas de la zona y las necesidades de la población.

4.3. Resultados del Bloque III: Zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón

4.3.1. Mapa e inventario de movimientos de ladera

En el área de estudio comprendida entre San Nicolás y Santa Rosa del Peñón se obtuvo un mapa de movimientos de ladera siguiendo un procedimiento similar al presentado en el apartado anterior. Salvo que en este caso, la digitalización de los datos y la presentación del mapa digital se realizaron con los módulos del SIG ArcGIS 9.0[®]. El sistema de coordenadas utilizado en esta zona es del *World Geodetic System de 1984 (WGS84) Zona16N* (figura 4.15).

En este mapa también se presentan las zonas de rotura diferenciadas de las zonas de trayecto y acumulación de los materiales, así como la red de drenaje, las cabeceras municipales y las comunidades correspondientes a cada una de ellas. Estos elementos, ayudan a los propietarios de la zona a la identificación de los movimientos y al reconocimiento de las propiedades afectadas por cada uno de ellos. En total se cartografiaron 1.800 movimientos de ladera afectando el 1,57% del área de estudio.

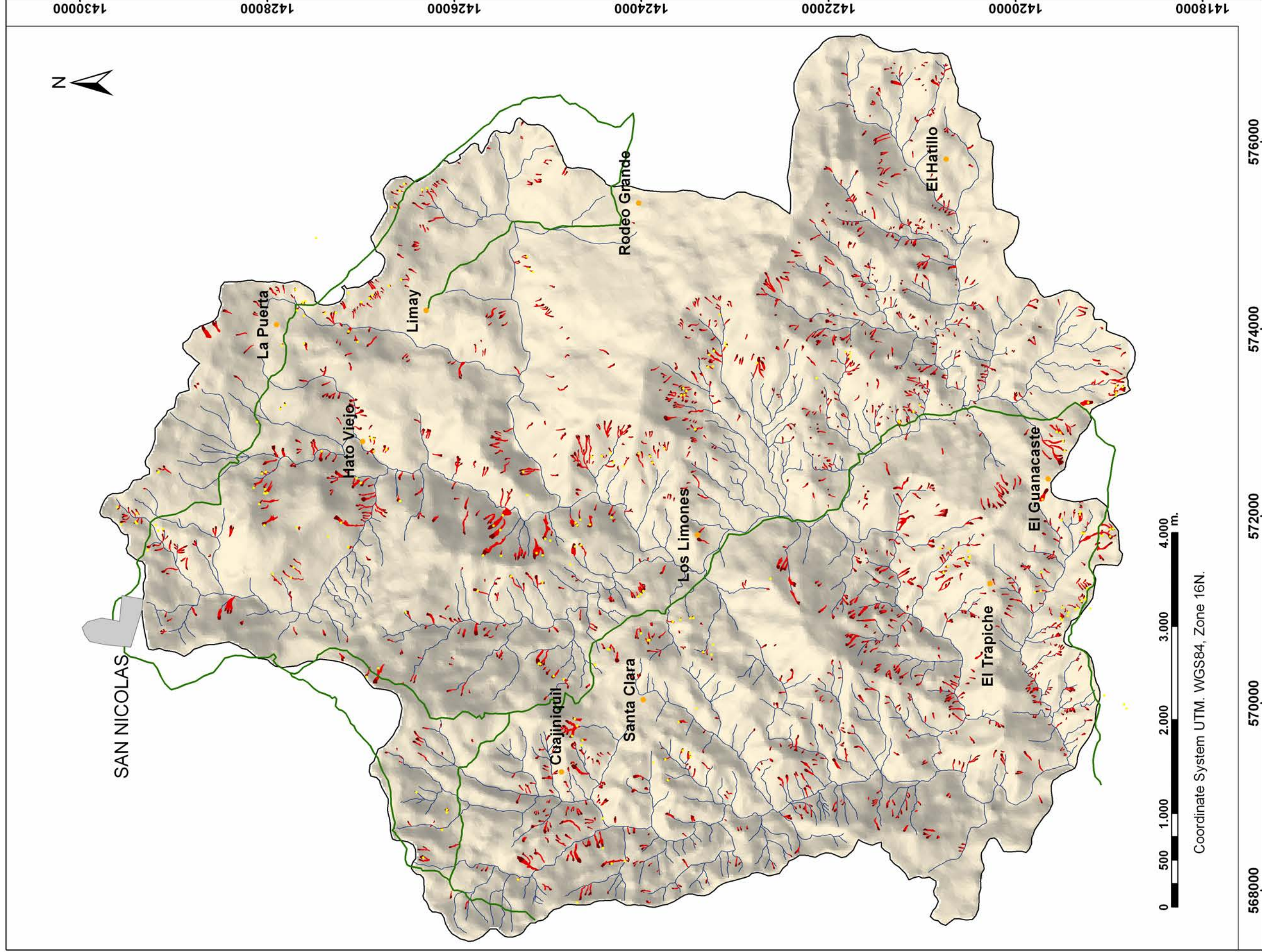
En esta zona de estudio se realiza un inventario de movimientos de ladera que recoge las observaciones realizadas sobre el terreno en 229 localidades afectadas. Las campañas de campo durante las cuales se obtuvo este inventario se realizaron durante los años 2003 al 2005. Con este inventario se elaboró una base de datos Access[®] para facilitar su manipulación y consulta. Dado que en cada uno de los puntos inventariados se tomaron datos de las coordenadas con un GPS, se pudo asociar, a través de las herramientas del SIG, la base de datos con el mapa de movimientos. De esta manera, en el mapa aparecen todos aquellos puntos donde se realizaron observaciones de campo y clicando sobre uno de estos puntos, en el SIG, se abre una tabla de datos con las observaciones recogidas en este punto (figura 4.16).

MAPA DE MOVIMIENTOS DE LADERA

Cuenca alta del Río Sinecapa
San Nicolás, Depto. Estelí
Santa Rosa del Peñón, Depto. León



Fig. 4.15. Mapa de movimientos de ladera correspondiente a la zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón.



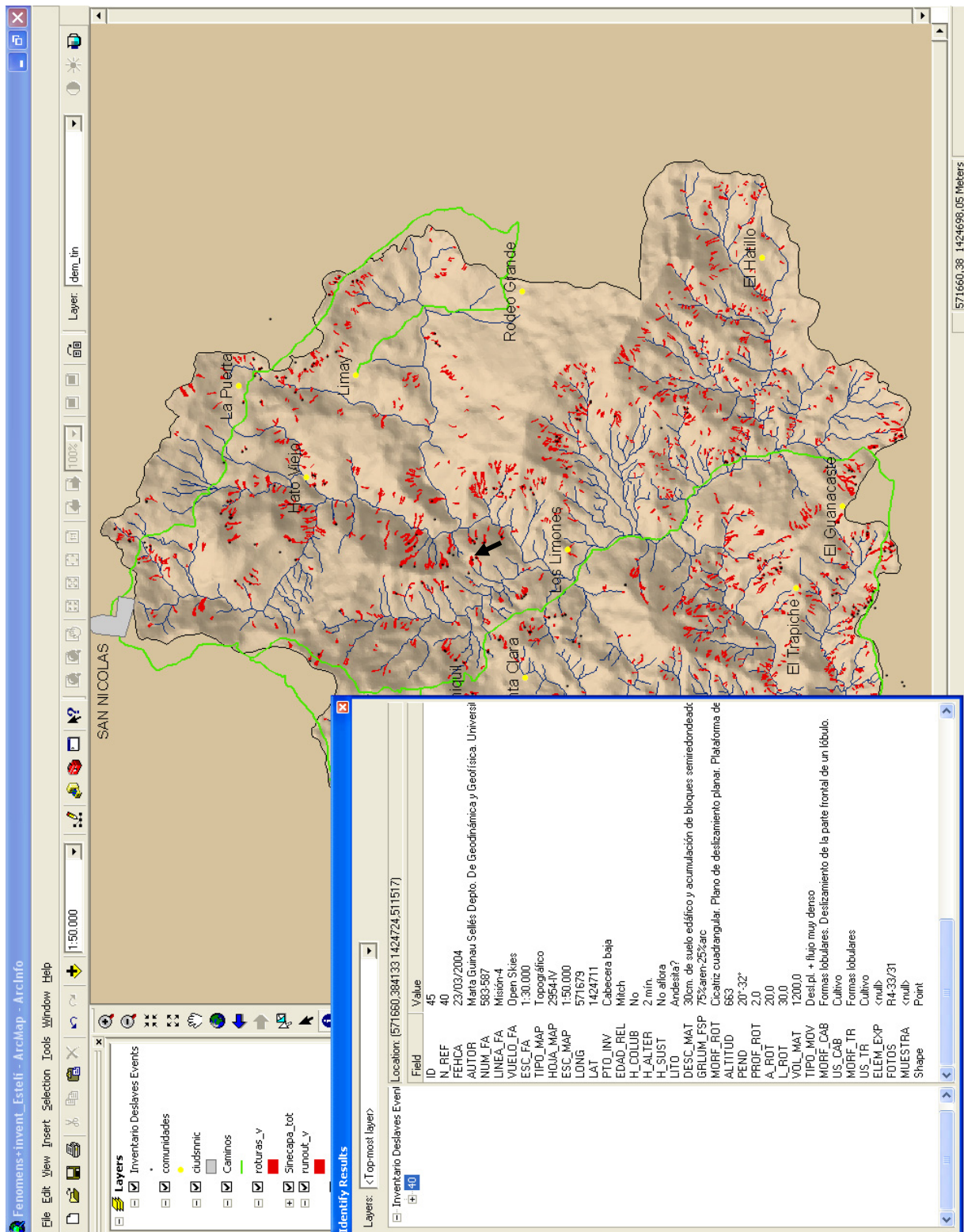


Fig. 4.16. Ejemplo de consulta de la base de datos asociada al mapa de movimientos de ladera correspondiente a la zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón. A través del SIG y clicando encima de los puntos inventariados se obtiene la ficha con la información recopilada en el campo en este punto.

En la base de datos de campo se recoge la siguiente información:

- N_REF; número de referencia con el que se identifica el movimiento observado.
- FECHA; fecha en la que se realizó la observación.
- AUTOR; nombre, puesto de trabajo, teléfono y correo electrónico de quien realizó la observación.
- NUM_FA; número de la foto aérea donde se identifica la localización.
- LINEA_FA; línea de vuelo de la foto aérea.
- VUELO_FA; misión o año del vuelo de la foto aérea.
- ESC_FA; escala de la foto aérea.
- TIPO_MAP; tipo de mapa para la localización de la zona de observación.
- HOJA_MAP; número de hoja del mapa de localización.
- ESC_MAP; escala del mapa.
- LONG; longitud del punto de observación.
- LAT; latitud del punto de observación.
- PTO_INV; localización del punto de observación respecto al movimiento (parte alta de la cabecera, extremo inferior de la cabecera, trayecto, ...)
- EDAD_REL; edad relativa del movimiento respecto al huracán Mitch.
- H_COLUB; indica si en la zona de rotura se observa material colubial y el espesor de este.
- H_ALTER; indica si en la zona de rotura se observa material de alteración y el grosor de este.
- H_SUSTRATO; indica si en la zona de rotura se observa sustrato rocoso y el espesor de este que se puede observar.
- LITO; litología del sustrato rocoso.
- DESC_MAT; descripción del material afectado por el movimiento.
- GRLUM_FSP; granulometría de la formación superficial.
- MORF_ROT; descripción de la morfología de la zona de rotura.
- ALTITUD; altitud de la zona de rotura respecto al nivel del mar.
- PEND; pendiente medida con el clinómetro en la zona de rotura.
- PROF_ROT; profundidad de la zona de rotura.
- A_ROT; ancho de la zona de rotura.
- L_ROT; longitud de la zona de rotura.

- VOL_MAT; volumen de material movilizado estimado a partir de las dimensiones de la zona de rotura.
- TIPO_MOV; tipo de movimiento.
- MORF_CAB; descripción de la morfología de la zona de rotura.
- US_CAB; uso del suelo en la zona de rotura.
- MORF_TR; descripción de la morfología de la zona de trayecto y acumulación del material movilizado.
- US_TR; uso del suelo en la zona de trayecto y acumulación.
- ELEM_EXP; descripción de los elementos expuestos en la zona afectada, si existen.
- FOTOS; número de referencia de las fotos realizadas en campo, si se tomaron en este punto.
- MUESTRA; número de referencia de las muestras tomadas en campo, si se tomaron en este punto.

Toda esta información recopilada en la base de datos ha sido de gran utilidad para conocer bien los mecanismos de rotura y movilización de los materiales, así como los factores del terreno que condicionan la estabilidad y el alcance de los materiales. Dada la extensión del inventario, este se presenta en formato Access en el CD-Rom adjunto para su consulta.

4.3.2. Resultado del análisis comparativo entre movimientos de ladera y propiedades del terreno

Dado que en la zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón no se dispone de mapas de unidades de terreno ni de mapas temáticos que representen los factores geoambientales del terreno con suficiente detalle, en esta zona se obtuvo la información sobre las características del terreno a partir del Modelo Digital del Terreno de 20m x 20m de resolución disponible en la zona. La comparación del mapa de movimientos de ladera con los mapas temáticos obtenidos a partir del MDT, mediante el SIG, permitió calcular el índice de influencia de cada uno de los factores condicionantes de la inestabilidad del terreno, previamente seleccionados.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el análisis comparativo entre los movimientos de ladera desarrollados por el huracán Mitch en la zona de estudio de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón y los factores del terreno que se seleccionaron como factores condicionantes de la inestabilidad del terreno en esta zona. En este caso, dado que los datos extraídos del MDT están en formato raster, la densidad de zonas de rotura y los Valores de Información (Info_Val) calculados para determinar el grado de influencia de los factores condicionantes, se determinan en función del número de píxeles afectados por rotura de los materiales y no en función del área afectada como en la zona del norte del Departamento de Chinandega.

Para cada uno de los factores condicionantes se presenta una tabla de datos donde se muestran las diferentes clases que describen cada factor, así como el número de píxeles de cada una de estas clases y el número de píxeles afectados por rotura del terreno. En la penúltima columna de cada tabla se representa la densidad de roturas en cada clase y en la última el Valor de Información (Info_Val) que indica el grado de influencia de cada una de las clases. Además, para cada uno de los factores condicionantes de la inestabilidad del terreno se representan gráficamente y se comentan los datos presentados en cada tabla.

- La Pendiente

Tabla- 4.7; tabla de datos correspondiente al factor pendiente

Clase Pendiente	Nº Píxeles	Extensión (en m ²)	Nº Roturas	Densidad	Info_Val
0° - 5°	10643	4257200	3	0,03	-153
5° - 10°	19405	7762000	18	0,09	-101
10° - 15°	22630	9052000	68	0,30	-50
15° - 20°	27301	10920400	145	0,53	-25
20° - 25°	25876	10350400	292	1,13	7
25° - 30°	18897	7558800	347	1,84	29
30° - 35°	9999	3999600	314	3,14	52
35° - 40°	3373	1349200	107	3,17	52
40° - 45°	656	262400	27	4,12	64
45° - 50°	70	28000	1	1,43	18
Total = 138850		Total = 55540000		Total = 1322	

En esta tabla se pueden observar las diez clases de pendiente consideradas para este estudio seguidas del número de píxeles ocupado por cada una de ellas y la extensión correspondiente en m². A continuación se presentan el número de roturas

en cada clase de pendiente, la densidad de roturas y el Info_Val obtenido después de comparar el mapa de pendientes con el mapa de zonas de rotura del huracán Mitch en la zona.

En la figura 4.17 se muestran dos gráficos. En la parte superior el gráfico de densidad de píxeles afectados por rotura en cada clase de pendiente y en el gráfico inferior la distribución de Info_Val obtenido para cada clase. Tal y como muestran los datos de la tabla y como se había observado en el campo, la mayor densidad de zonas de rotura se concentra en las zonas de pendiente entre 25° y 45°. Así mismo, en el gráfico inferior de la figura 4.17 se puede ver que las clases de pendiente comprendidas en este rango son las que presentan valores más positivos de Info_Val, mientras que las clases de pendiente con menor densidad de roturas (pendientes entre 0° y 20°) son las que presentan valores de Info_Val negativos.

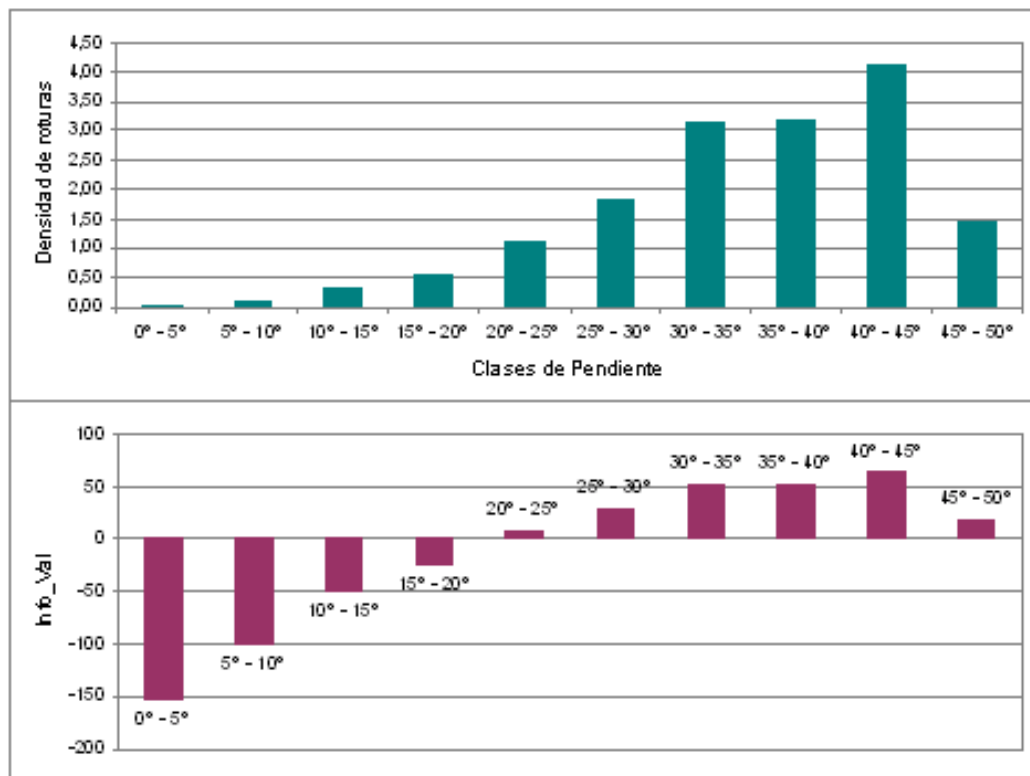


Fig. 4.17. Comparación de los gráficos de densidad de roturas (gráfico superior) y de Info_Val (gráfico inferior) para cada clase de pendiente.

- La Orientación de las laderas

Tabla- 4.8; tabla de datos correspondiente al factor orientación de las laderas

Clases Orientación	Nº Píxeles	Extensión (en m2)	Nº Roturas	Densidad	Info_Val
N	10876	4350400	114	1,05	4,06
NE	12736	5094400	89	0,70	-13,54
E	14682	5872800	137	0,93	-0,99
SE	18004	7201600	181	1,01	2,25
S	20540	8216000	228	1,11	6,55
SW	26681	10672400	246	0,92	-1,51
W	19339	7735600	182	0,94	-0,62
NW	15217	6086800	141	0,93	-1,29
Total = 138850		Total = 55540000	Total = 1322		

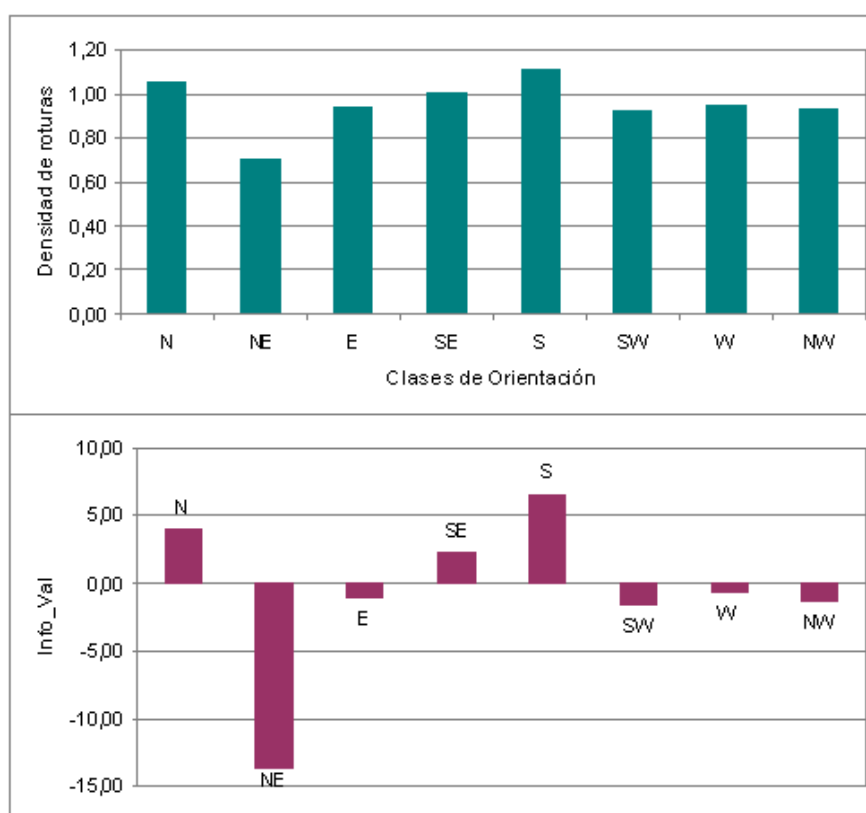


Fig. 4.18. Comparación de los gráficos de densidad de roturas (gráfico superior) y de Info_Val (gráfico inferior) para cada clase de orientación.

En la tabla 4.8 se presentan los datos correspondientes a las ocho clases del factor orientación de las laderas consideradas en este estudio. En la figura 4.18 se presenta el gráfico de distribución de densidad de roturas para cada una de estas clases junto con el gráfico de Info_Val obtenido para cada clase. En el gráfico superior se puede ver que la variación de densidad entre las diferentes clases es muy suave. En

cambio, con los valores de Info_Val se acentúan estas variaciones, obteniendo valores negativos para las clases con densidades más bajas y valores más positivos para las clases con mayor densidad de roturas. De esta manera, en el cálculo de susceptibilidad a la inestabilidad del terreno, las clases con mayor densidad de roturas tendrán una influencia mucho más grande que las clases con densidades algo más bajas.

- La Curvatura Planar

Tabla- 4.9; tabla de datos correspondiente al factor curvatura planar

Clases Curvatura Planar	Nº Píxeles	Extensión (en m ²)	Nº Roturas	Densidad	Info_Val
-3 / -1,10	2227	890800	12	0,54	-25
-1,10 / -0,57	9455	3782000	79	0,84	-6
-0,57 / -0,21	27822	11128800	285	1,02	3
-0,21 / 0,09	40809	16323600	340	0,83	-6
0,09 / 0,34	29313	11725200	276	0,94	0
0,34 / 0,66	18468	7387200	196	1,06	5
0,66 / 1,12	8510	3404000	114	1,34	15
1,12 / 3	2246	898400	20	0,89	-3
Total = 138850		Total = 55540000	Total = 1322		

En la tabla anterior se presentan las ocho clases de Curvatura planar consideradas para el análisis de susceptibilidad a la rotura (en la primera columna). En las columnas siguientes se presentan la extensión, en número de píxeles, y la extensión en m² de cada una de las clases. En la cuarta columna se puede ver el número de píxeles afectados por rotura de los materiales y en las columnas quinta y sexta, la densidad de roturas y el Info_Val respectivamente.

En la figura 4.19 se muestran los gráficos de distribución de densidad de roturas y de Info_Val para las clases de curvatura planar. En el gráfico superior se puede observar que los valores más elevados de densidad de rotura se encuentran en las clases de convexidad media (valores positivos medios) o de concavidad media (valores negativos medios). En cambio, los valores más bajos de densidad se encuentran en zonas con valores extremos de concavidad (valores negativos extremos) o convexidad (valores positivos extremos) o en las zonas llanas (valores próximos a cero). Esto puede ser porque las zonas de convexidad o concavidad

media, medida en dirección perpendicular a la pendiente, favorecen la concentración de fluidos en el terreno.

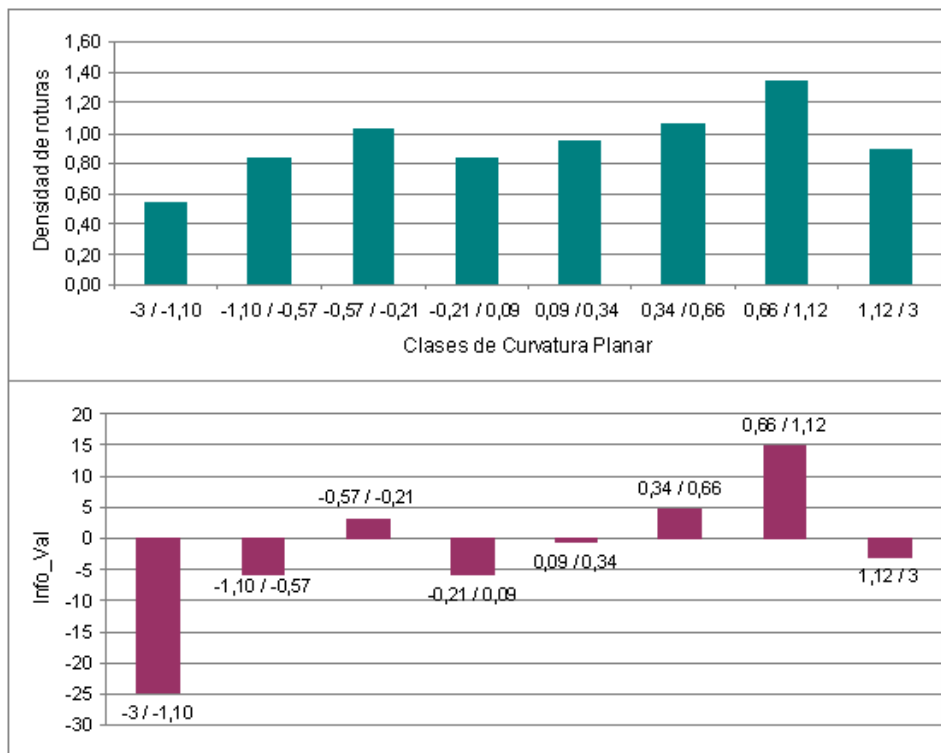


Fig. 4.19. Comparación de los gráficos de densidad de roturas (gráfico superior) y de Info_Val (gráfico inferior) para cada clase de curvatura planar.

- La Curvatura en perfil

Tabla- 4.10; tabla de datos correspondiente al factor curvatura en perfil

Clases Curvatura en perfil	N°Pixels	Extensión (en m2)	N° Roturas	Densidad	Info_Val
-6 / -2,70	66	26400	0	0,00	null
-2,70 / -1,19	1881	752400	31	1,65	24
-1,19 / -0,61	8535	3414000	81	0,95	0
-0,61 / -0,23	25950	10380000	258	0,99	2
-0,23 / 0,08	42349	16939600	356	0,84	-5
0,08 / 0,38	35452	14180800	346	0,98	1
0,38 / 0,86	19238	7695200	215	1,12	7
0,86 / 2,89	5379	2151600	35	0,65	-17
Total = 138850		Total = 55540000	Total = 1322		

En la tabla 4.10 se presentan las ocho clases de curvatura en perfil consideradas para el análisis de susceptibilidad a la rotura de los materiales. En la segunda

columna se presenta la extensión de cada clase en número de píxeles y en la tercera la extensión en m^2 . A continuación se detalla el número de roturas identificadas en cada clase (en la cuarta columna), la densidad de roturas (en la quinta columna) y el Info_Val obtenido para cada clase (en la sexta columna).

En cuanto a la extensión, las zonas sin curvatura o con curvatura suave son las que dominan en esta zona de estudio. No obstante, en la figura 4.20 se puede ver que las zonas con más densidad de roturas y por lo tanto con un Info_Val más alto son las que presentan convexidad importante (valores de curvatura de -2,7 a -1,19). En cambio, las zonas de concavidad y convexidad extremas y las zonas sin curvatura son las que presentan densidades más bajas. Las clases de concavidad y convexidad suave y media presentan valores muy similares de densidad de roturas. Aunque estos resultados no presenten un patrón de influencia de la curvatura en perfil muy claro, teniendo en cuenta las observaciones de campo se puede deducir que la rotura de los materiales se suelen dar en zonas con cierta convexidad del terreno.

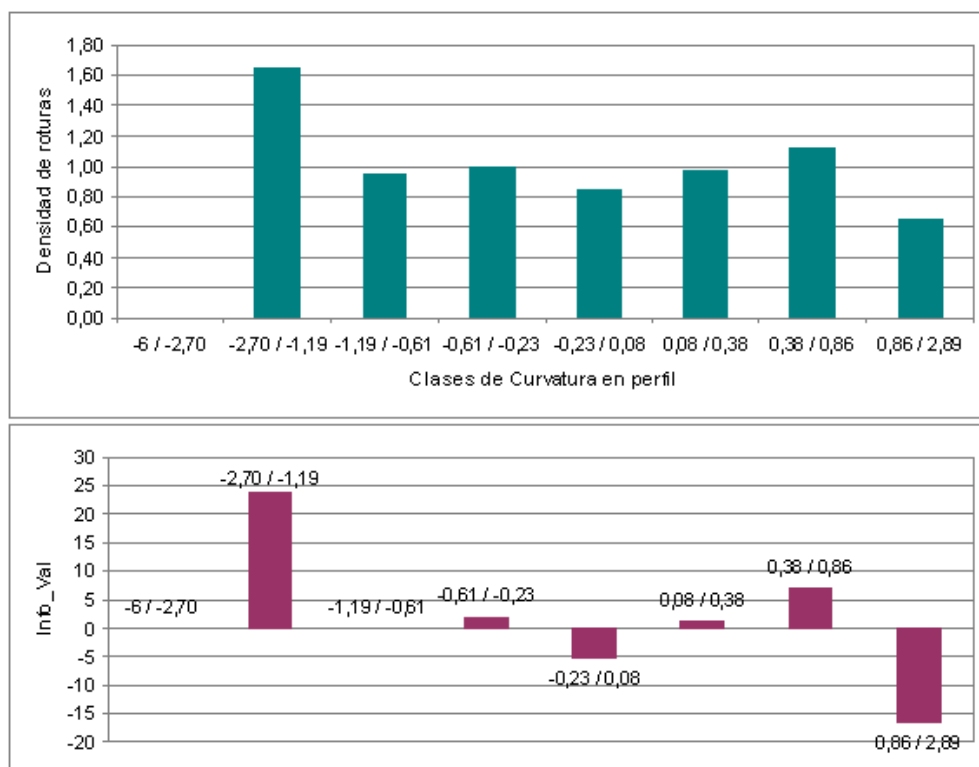


Fig. 4.20. Comparación de los gráficos de densidad de roturas (gráfico superior) y de Info_Val (gráfico inferior) para cada clase de curvatura en perfil.

4.3.3. Mapa de susceptibilidad

En la zona de estudio de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón, a partir del mapa de movimientos de ladera y del MDT y mediante la utilización del SIG, se obtuvieron, por una parte un mapa de susceptibilidad a la rotura de los materiales y por otra parte un mapa de susceptibilidad al alcance de los flujos de detritos. La combinación de estos dos mapas, permitió obtener un mapa de susceptibilidad global a los flujos de detritos.

- Mapa de susceptibilidad a la rotura de los materiales:

En este mapa se representan cuatro clases de susceptibilidad que muestran el grado de propensión del terreno a la inestabilidad y por tanto al inicio de movimientos de ladera. Para determinar y definir estas cuatro clases de susceptibilidad, se observó la distribución de zonas afectadas por rotura de los materiales durante el huracán Mitch en la zona de validación. Esto, permitió definir las cuatro clases de susceptibilidad a la rotura de la siguiente manera;

Susceptibilidad alta; zonas con valores de susceptibilidad que comprenden el 60% de las roturas ocasionada por el huracán Mitch.

Susceptibilidad media; zonas con valores de susceptibilidad que comprenden el 30% de las roturas del huracán Mitch.

Susceptibilidad baja; zonas con valores que comprenden el 10% de roturas del huracán Mitch.

Susceptibilidad muy baja; zonas con valores que incluyen el 0% de roturas del Mitch.

Transfiriendo estos intervalos en toda el área de estudio se obtiene el mapa de susceptibilidad a la rotura de los materiales (ver mapa en la figura 4.21).

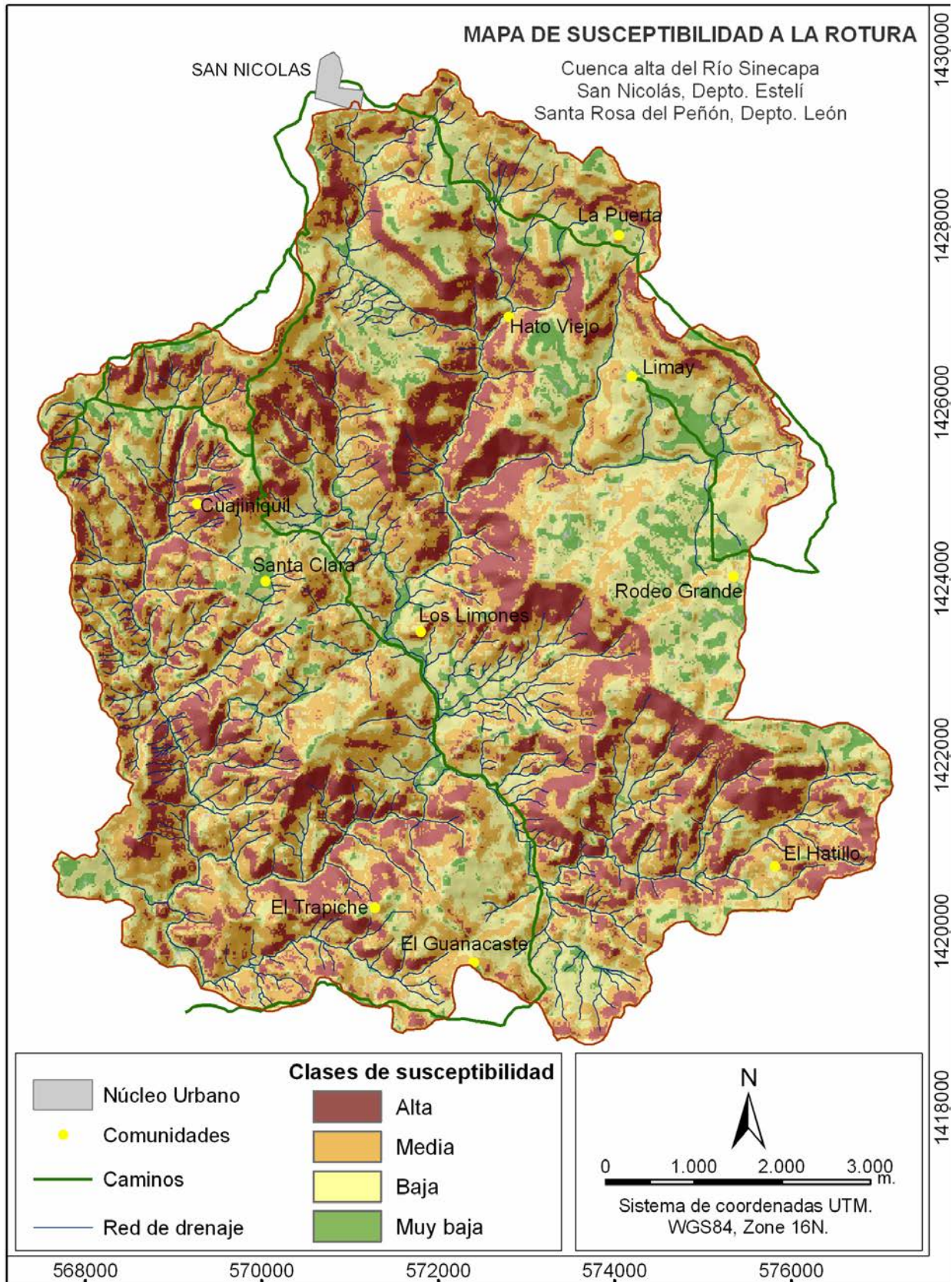


Fig. 4.21: Mapa de susceptibilidad a la rotura de los materiales correspondiente e la zona de San Nicolás, Departamento de Estelí y Santa Rosa del Peñón, Departamento de León.

Este mapa de susceptibilidad a la rotura presenta la siguiente distribución espacial de clases de susceptibilidad (figura 4.22):

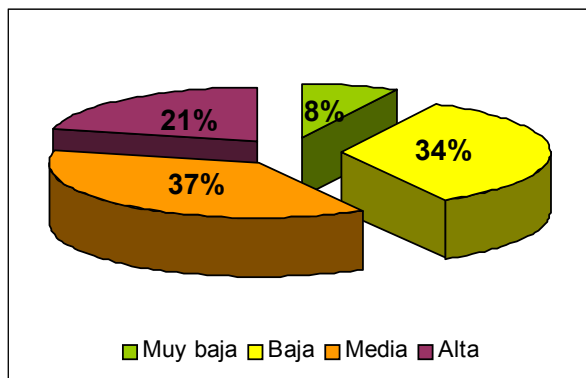


Fig. 4.22: Gráfico del porcentaje de área de estudio ocupado por cada una de las clases de susceptibilidad a la rotura.

La validación de esta zonificación de la susceptibilidad mostró un buen ajuste con la distribución de zonas de rotura del huracán Mitch cartografiadas en toda el área de estudio.

- Mapa de susceptibilidad al alcance de los flujos de detritos

Dado que en esta zona se dispone de un MDT, se pudo complementar la zonificación de la susceptibilidad a la rotura de los materiales con la zonificación de la susceptibilidad al alcance de los materiales movilizados. Aplicando la metodología propuesta en el Bloque I de este trabajo (Pallás et al., 2004), se determinan las zonas potenciales al alcance de los materiales. No obstante, en este caso, el proceso de obtención de las posibles trayectorias de flujo se obtiene de forma automática mediante la herramienta TauDEM acoplada al SIG ArcGIS 9.0[®]. Esta herramienta permitió obtener para cada píxel susceptible a la rotura, las posibles trayectorias de flujo hasta la red de drenaje. La combinación de trayectorias de flujo, teniendo en cuenta la clase de susceptibilidad a la rotura del píxel del cual provinieran, permitió obtener el mapa de susceptibilidad al alcance de los flujos de detritos (figura 4.23).

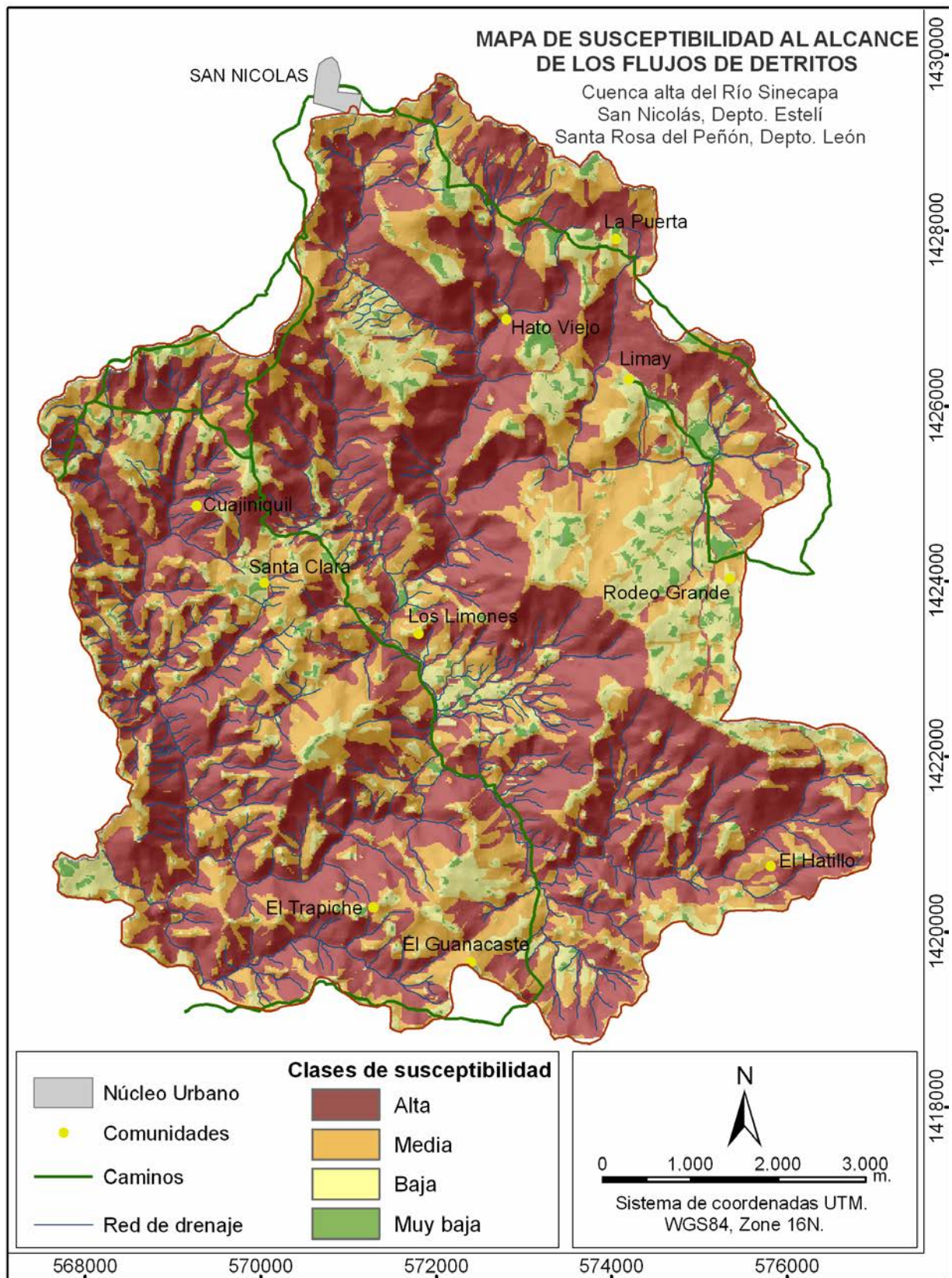


Fig. 4.23: Mapa de susceptibilidad al alcance de los flujos de detritos correspondiente a la zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón.

En el mapa de susceptibilidad al alcance se representan cuatro clases de susceptibilidad con la siguiente distribución (figura 4.24):

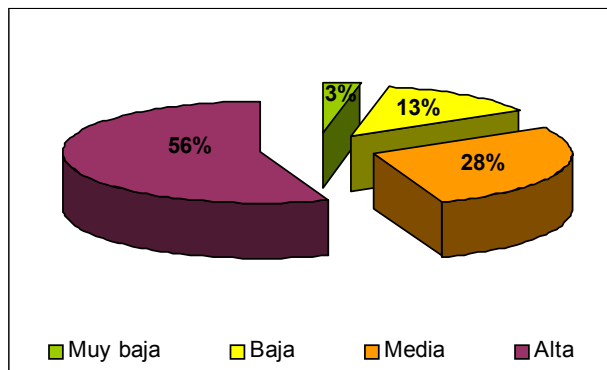


Fig. 4.24: Gráfico del porcentaje de área ocupada por cada clase de susceptibilidad al alcance de los flujos de detritos.

Aunque esta distribución de clases de susceptibilidad pueda parecer poco precisa, se debe tener en cuenta que el modelo utilizado produce una sobreestimación de la susceptibilidad, a pesar de que esta se redujo parcialmente con el proceso de calibración del modelo. Comparando esta zonificación de la susceptibilidad al alcance con las zonas afectadas por trayectorias de flujos de detritos durante el huracán Mitch, se determinó que el 77% de los flujos se encuentran en zonas con susceptibilidad alta y el 22% en zonas de susceptibilidad media, mientras que únicamente el 2% y el 0% se encuentran en zonas con susceptibilidad baja y muy baja respectivamente. De esta manera se demuestra el ajuste del mapa con la distribución de trayectorias de flujo.

- Mapa de susceptibilidad a los flujos de detritos

Con la combinación del mapa de susceptibilidad a la rotura y el mapa de susceptibilidad al alcance, se obtuvo el mapa de susceptibilidad a los flujos de detritos (figura 4.25). En este mapa se representan cuatro clases de susceptibilidad que muestran el grado de propensión del terreno a ser afectado por el conjunto de los flujos (inicio + alcance del material movilizado).

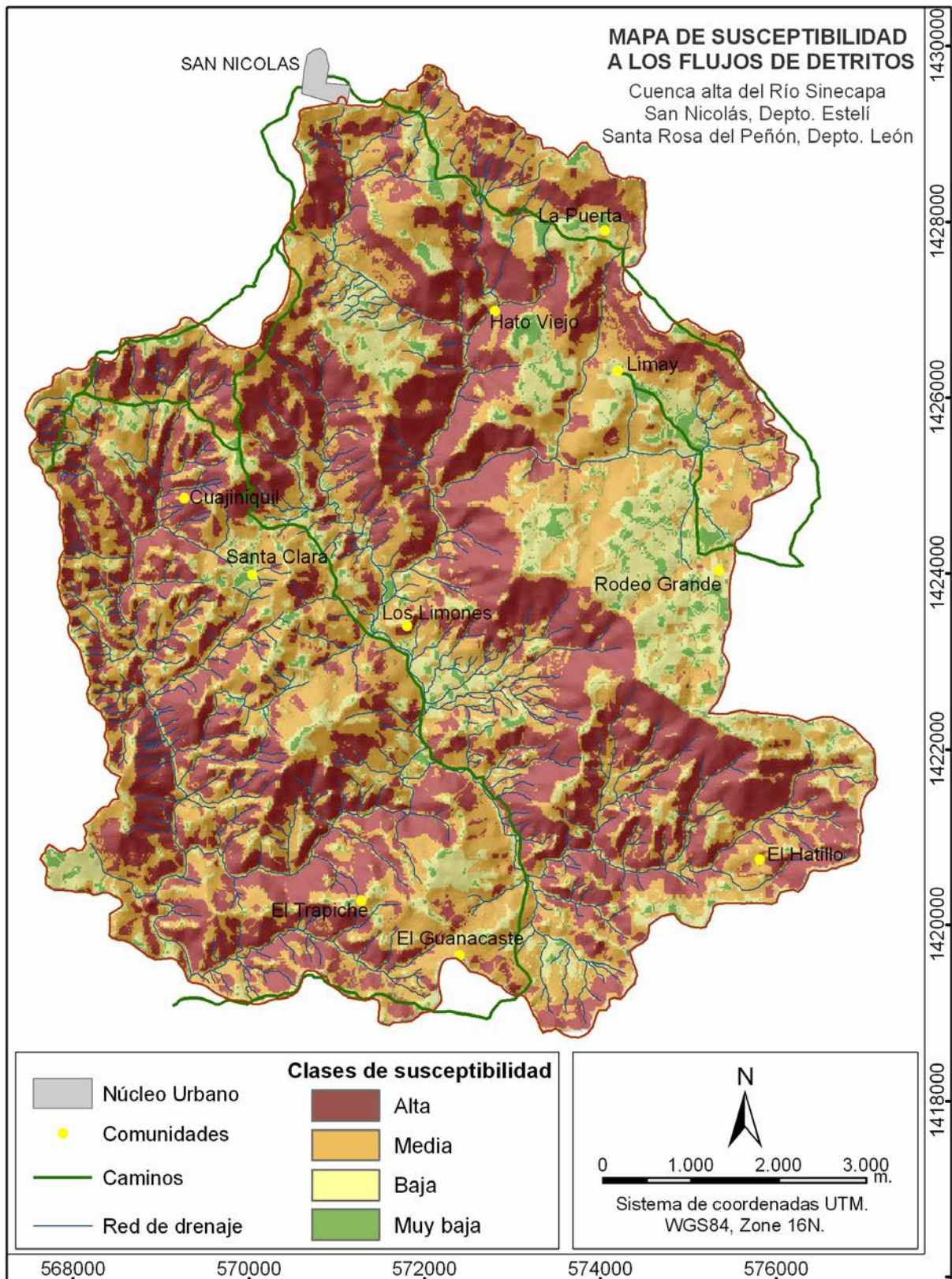


Fig. 4.25: Mapa de susceptibilidad a los flujos de detritos correspondiente a la zona de San Nicolás y Santa Rosa del Peñón.

Esta zonificación de la susceptibilidad presenta la siguiente distribución de clases (figura 4.26):

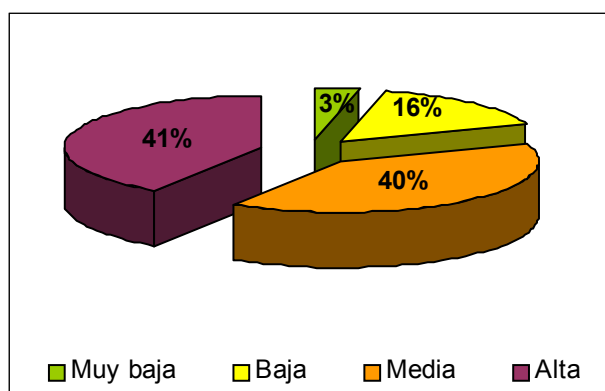


Fig. 4.26: Gráfico del porcentaje de área ocupada por cada clase de susceptibilidad a los flujos de detritos

Comparando la distribución de clases de susceptibilidad con las zonas afectadas por flujos de detritos durante el huracán Mitch se observó que el 70% de los flujos se encuentran en zonas de susceptibilidad alta y el 22% en zonas de susceptibilidad media, mientras que únicamente el 4% y el 3% se encuentran en zonas con susceptibilidad baja y muy baja. Estos valores demuestran el ajuste de las clases de susceptibilidad con la distribución de zonas afectadas por flujos de detritos, y permiten, teniendo en cuenta las características socioeconómicas del área de estudio, definir cual es el uso del suelo más adecuado para cada una de estas zonas para mitigar el riesgo por flujos de detritos.

5- RESUMEN DE LA DISCUSIÓN

5. RESUMEN DE LA DISCUSIÓN

Existen múltiples factores que pueden desencadenar movimientos de ladera. Las precipitaciones pueden ser uno de ellos. Las lluvias intensas y prolongadas que se producen durante un huracán o tormenta tropical, provocan la acumulación de grandes cantidades de agua en el terreno. Cuando la presión de poro que ejerce esta agua en los materiales supera las fuerzas de resistencia se desencadenan los movimientos de ladera. En algunas ocasiones los efectos causados por estos fenómenos son más dañinos que los efectos causados directamente por los fuertes vientos y lluvias del huracán. El análisis de los movimientos de ladera causados por el huracán Mitch en Nicaragua, realizado al poco tiempo de haberse producido el huracán, permitió la obtención de datos de alta calidad para el desarrollo de este trabajo.

Los efectos de los deslizamientos se pueden reducir considerablemente con una planificación del territorio efectiva, que incluye; 1) restricción de determinados usos en zonas susceptibles, 2) desarrollo e implementación de sistemas de alerta temprana, y 3) estabilización de zonas inestables mediante obras de defensa (Dai, et al. 2002; Pallàs, et al. 2004). Para esta última tipología de actuación, es necesario conocer la magnitud y la frecuencia de los fenómenos futuros a través de un análisis de la peligrosidad. Dada la dificultad de analizar la peligrosidad en el área de estudio, debido a la escasez de datos cuantitativos (volúmenes y velocidades de los movimientos y series de datos temporales), se optó por desarrollar una metodología de análisis de la susceptibilidad que aportara información útil para la determinación de medidas no estructurales, como la planificación territorial y los planes de emergencia, acordes con las necesidades locales. Teniendo en cuenta que los flujos de detritos o corrientes de derrubios son los más abundantes y destructivos entre los movimientos generados por el huracán Mitch, y en general por cualquier tormenta tropical en la región, el conjunto de este estudio se basa en el análisis de la susceptibilidad a los flujos de detritos desencadenados por lluvias intensas.

El uso de un evento extremo de referencia como el huracán Mitch para el análisis de la susceptibilidad, puede comportar un resultado conservador, el cual repercutirá a la

hora de determinar normativas o actuaciones para la mitigación de los efectos de los flujos de detritos. Estas repercusiones influirán en los resultados confiriéndoles un aumento del grado de seguridad.

A pesar de que en Nicaragua las series de datos históricos son muy limitadas para determinar el periodo de recurrencia para los huracanes y tormentas tropicales, se estima que en la región central y norte del país, donde se encuentran las áreas de estudio de este trabajo, el periodo de recurrencia para precipitaciones similares a las del Mitch podría ser de unos 100 años. No obstante, existen registros asociados a tormentas tropicales que, sin llegar a la categoría de huracán, pueden producir localmente efectos tan devastadores como estos (evento de junio del 2004 en Río Blanco, Departamento de Matagalpa <http://www.ineter.gob.ni/geofisica/desliza/estudios/musun/index.html>). Por esto, se considera que el registro de movimientos de ladera generados por el huracán Mitch es adecuado para el análisis de la susceptibilidad a los flujos de detritos.

En el Bloque I de este estudio se realizó un exhaustivo trabajo de campo en tres zonas piloto de extensiones reducidas que permitió obtener datos de campo de gran calidad y detalle sobre los movimientos de ladera. Estos datos, que se recopilan en el inventario y cartografía de movimientos de ladera, aportaron información relevante para conocer los mecanismos de movilización de los materiales y los factores del terreno que condicionan la inestabilidad. A partir del número de eventos registrados, de la predictabilidad de estos y de la susceptibilidad, se propone una aproximación cualitativa a la peligrosidad. De estos tres conceptos, los dos primeros permiten únicamente determinar la peligrosidad en aquellas zonas donde previamente se había registrado un evento. No obstante, las áreas donde no se había detectado inestabilidad pueden ser potencialmente inestables y por ende se deben incluir en el análisis de peligrosidad. En este caso, el análisis de la susceptibilidad permite detectar las zonas potencialmente inestables, y así incluir las zonas sin movimientos de ladera registrados, a la zonificación de la peligrosidad.

El análisis de susceptibilidad propuesto en el Bloque I se basa por una parte, en la determinación de zonas susceptibles a la rotura de los materiales, donde se inician los movimientos, y por otra, en determinar zonas de posible afectación por la trayectoria y

la acumulación de los materiales movilizados. Para este análisis se utilizó una topografía digital obtenida a partir de la digitalización del mapa topográfico 1:50.000. Dado que estos datos digitales no tienen una resolución equiparable a la de un Modelo Digital del Terreno propiamente dicho, los límites entre zonas susceptibles y zonas no susceptibles se deben interpretar como una aproximación. Por otra parte, el proceso seguido para determinar las trayectorias potenciales de flujo, mediante el GeoPack del software MicroStation®, es largo y tedioso ya que se deben marcar manualmente cada uno de los posibles puntos de salida. Teniendo en cuenta estas limitaciones y la importancia de determinar la susceptibilidad en zonas donde, por falta de datos históricos cuantitativos, es muy difícil determinar la peligrosidad, en los Bloques II y III de la tesis se desarrollan propuestas metodológicas que evitan estas limitaciones y mejoran los resultados del análisis de la susceptibilidad a los flujos de detritos.

Después del huracán Mitch se realizaron numerosos proyectos para el desarrollo de las zonas más afectadas por este evento. En el norte del Departamento de Chinandega, la ONG española Solidaridad Internacional, realizó un mapa de unidades de terreno con el objetivo de recopilar información útil para determinar el uso del suelo más apropiado para el desarrollo de la zona. Dado que este mapa contiene información a cerca de algunas propiedades del terreno que podrían condicionar su estabilidad, se propuso la utilización de estos datos para el análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera. A pesar de que estos datos no se elaboraron específicamente para el análisis de los deslizamientos, su combinación con una cartografía detallada de deslizamientos, generada específicamente para este estudio, permitió desarrollar una metodología para la evaluación de la susceptibilidad a la rotura de los materiales más consistente que la propuesta en el Bloque I.

Los datos obtenidos a partir del mapa de unidades de terreno y del inventario y cartografía de movimientos de ladera aportan información útil para determinar los factores condicionantes de la inestabilidad del terreno y por tanto permiten analizar la facilidad o propensión del terreno a generar movimientos de ladera. No obstante, para determinar la frecuencia y la intensidad de los posibles movimientos de ladera son necesarias series históricas de datos cuantitativos que permitan determinar el periodo de recurrencia de los eventos y el volumen y la velocidad de los movimientos. Dado que en

el área de estudio no se disponía de estos datos, y por ende el análisis de la peligrosidad resultaba muy complicado, si no inviable, se optó por centrar la propuesta metodológica en la evaluación de la susceptibilidad a los movimientos de ladera para obtener una zonificación espacial de posibles inestabilidades del terreno.

Puesto que el mapa de unidades de terreno se ejecutó para 6 municipios del norte del Departamento de Chinandega, se realizó un exhaustivo trabajo de campo y de fotointerpretación para extender el inventario y cartografía de movimientos de ladera de las zonas piloto de Cinco Pinos y San Francisco del Norte al resto de municipios, extendiendo así el análisis de susceptibilidad a 473Km² del Departamento de Chinandega.

En la metodología propuesta en el Bloque II se analiza la susceptibilidad en base a cinco factores condicionantes de la inestabilidad del terreno, extraídos del mapa de unidades de terreno. La selección de estos factores se realizó con criterio experto teniendo en cuenta la información adquirida durante el trabajo de campo. El análisis de los cinco factores condicionantes junto con la cartografía de unos 2500 movimientos de ladera, en una extensión de 473 Km², no hubiese sido posible sin la incorporación de un Sistema de Información Geográfica. El SIG ArcView 3.2® facilitó el manejo de un gran volumen de datos para una extensión considerable de terreno. Además, estos sistemas confieren de cierta objetividad la metodología, ya que los grados de influencia de los factores condicionantes no se atribuyen únicamente por criterio de experto, sino que se incorpora la relación de estos factores con la distribución de zonas afectadas por inestabilidad, determinada mediante el SIG. La incorporación de este sistema es por lo tanto una mejora sustancial en el análisis de la susceptibilidad.

Dado que en la zona de estudio del Bloque II se analizó la susceptibilidad en base a las zonas de rotura producidas por el huracán Mitch y a cinco factores condicionantes de la inestabilidad del terreno, el mapa de susceptibilidad obtenido muestra la zonificación de la susceptibilidad a la rotura de los materiales indicando aquellas zonas potenciales al inicio de deslizamientos. En el mapa de susceptibilidad resultante se presentan 4 clases de susceptibilidad que indican el grado de propensión a la inestabilidad del terreno, información que puede ser de gran utilidad para determinar medidas no estructurales,

especialmente de planificación territorial, para mitigar los efectos de las inestabilidades del terreno.

En el Bloque III del estudio se presenta una mejora de las propuestas metodológicas presentadas en el Bloque I y el Bloque II, basada en la incorporación de un Modelo Digital del Terreno con una resolución de 20m x 20m, proporcionado por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) y la Agencia de Cooperación Japonesa (JICA). Dado que este MDT no estaba disponible para la zona norte del Departamento de Chinandega en el momento de desarrollar el estudio, se decidió trabajar en otra zona también afectada por el huracán Mitch.

En la nueva zona de estudio, localizada entre los departamentos de Estelí y León, se realizó un exhaustivo trabajo de campo para elaborar una base de datos y una cartografía de movimientos de ladera. En este caso, la integración de la base de datos en la cartografía digital mediante el SIG ArcGIS 9.0®, permite un manejo más sencillo y ordenado de los datos. Dado que en esta zona no se dispone de mapas geoambientales, se decidió extraer los factores condicionantes de la inestabilidad del terreno directamente del MDT, teniendo en cuenta la información que aportan los datos de campo y las facilidades que proporcionan las herramientas del SIG. En este caso, los factores condicionantes seleccionados son, la pendiente, la orientación, la curvatura planar y la curvatura en perfil del terreno.

Para determinar la influencia de las diferentes clases que definen cada factor condicionante, se incorpora una fórmula logarítmica que sustituye la fórmula de densidad utilizada en la metodología propuesta en el Bloque II. Esta nueva fórmula, sin dejar de ser sencilla, proporciona una mayor discretización entre las clases que contribuyen más y las que contribuyen menos en la inestabilidad, y por ende, mejora los resultados del análisis de susceptibilidad (Saha et al., 2005; van Westen, 1993; Yin & Yan, 1988). Antes de aplicar esta fórmula en la zona de estudio del Bloque III, se aplicó en la zona de estudio del Departamento de Chinandega (Bloque II), para comprobar si realmente mejoraba los resultados obtenidos utilizando la densidad de movimientos de ladera. Aunque estos resultados no se presentan en los artículos que forman parte de esta tesis, se comprobó que la fórmula logarítmica mejora los resultados ya que con la

combinación del mapa de susceptibilidad obtenido y la distribución de zonas de rotura, se observa una mayor concentración de zonas de rotura en las áreas de susceptibilidad alta en comparación con los resultados obtenidos en la validación del mapa de susceptibilidad obtenido mediante la fórmula propuesta en el Bloque II.

Aunque existen varios estudios que demuestran que el uso de factores geométricos extraídos de un MDT puede sustituir el uso de factores geoambientales en el análisis de la susceptibilidad a la rotura de los materiales (Fabbri et al., 2003; Remondo et al., 2003b; Santacana et al., 2003; Coe et al., 2004), se debería realizar el mismo análisis con un tipo y otro de factores condicionantes en la misma zona para corroborarlo. En este trabajo, esta comprobación no ha sido posible debido a que en la zona de estudio no existe un área donde se disponga de datos geoambientales y a la vez de un MDT suficientemente detallados.

El hecho de disponer de un MDT permite completar la zonificación de la susceptibilidad a la rotura de los materiales con la delimitación de la susceptibilidad al alcance de los flujos de detritos, a partir de la idea propuesta en el Bloque I de este estudio. En este caso, la resolución del MDT, a pesar de no ser la mejor para el análisis del comportamiento de los flujos de detritos, proporciona una mejora sustancial respecto a la topografía digital utilizada en el Bloque I.

En el Bloque I, la aplicación del GeoPack de MicroStation® permitió determinar las trayectorias potenciales de flujos de detritos marcando manualmente cada uno de los puntos de salida potencial. En este tercer bloque, se propone una mejora de la metodología basada en la automatización de este proceso. En primer lugar, se generó un modelo numérico con el programa de análisis numérico MATLAB® que, en base al MDT y a una serie de píxeles identificados como puntos potenciales de salida, trazara las trayectorias de máxima pendiente hasta la red de drenaje. Posteriormente se decidió aplicar la extensión TauDEM, que permite aplicar algoritmos más complejos sin tenerlos que desarrollar, mejorando los resultados obtenidos con el modelo en MATLAB®. Además, TauDEM permite trabajar directamente desde ArcGIS® ejecutándose como una extensión de este. En el artículo correspondiente al Bloque III de este trabajo, únicamente se presentan los resultados utilizando la extensión TauDEM.

El proceso de calibrado del modelo propuesto en este Bloque III, permite la disminución de la sobreestimación de zonas potenciales al alcance producido por el modelo, ajustando así la respuesta de este a un comportamiento más real de los flujos de detritos.

Una aportación destacable de este estudio es el intento de combinar la zonificación de la susceptibilidad a la rotura y la zonificación de la susceptibilidad al alcance, ya que de esta manera se obtiene una zonificación integrada de los dos tipos de susceptibilidad a los flujos de detritos que puede ser de gran utilidad para la planificación territorial y el diseño de planes de emergencia para reducir los efectos de los flujos de detritos.

Los procesos de validación aplicados tanto en el Bloque II como en el Bloque III de este trabajo para validar los resultados de los análisis de susceptibilidad a la rotura, permiten comprobar el ajuste de los resultados de las metodologías propuestas con la distribución de zonas de rotura causadas por el huracán Mitch. El sistema de validación aplicado, basado en la división del área de estudio en un área de desarrollo de la metodología y un área de validación, es una buena alternativa para aquellas zonas donde únicamente se dispone de un evento de referencia. No obstante, para determinar la capacidad predictiva de los mapas de susceptibilidad obtenidos, se debería validar mediante dos eventos temporalmente diferentes. En el caso de la zonificación de la susceptibilidad al alcance obtenida en el Bloque III, la comparación de las clases de susceptibilidad con las zonas afectadas por el alcance de flujos de detritos durante el Mitch, permite comprobar el ajuste del modelo con la distribución de las zonas afectadas. Una vez integradas la susceptibilidad a la rotura de los materiales y la susceptibilidad al alcance de los flujos de detritos, la comparación de las clases de susceptibilidad con las zonas afectadas por flujos de detritos durante el Mitch, permite determinar la distribución de estas zonas en cada clase de susceptibilidad. Esta información puede ser útil para la determinación del uso del suelo más adecuado para cada clase de susceptibilidad en función de las características y necesidades de la zona.

6- RESUMEN DE LAS CONCLUSIONES

6. RESUMEN DE LAS CONCLUSIONES

Disponer de un evento de referencia como el huracán Mitch permitió obtener un inventario detallado de deslizamientos, con información de alta calidad para los análisis de peligrosidad y susceptibilidad a los movimientos de ladera. La posibilidad de realizar campañas de campo al poco tiempo del evento y la disponibilidad de fotografías aéreas de alta calidad, realizadas en un vuelo especial justo después del huracán, permitieron obtener un registro de indicadores referentes a las inestabilidades del terreno que con el tiempo han ido desapareciendo.

La utilización de un evento extremo como el Mitch para analizar la susceptibilidad y la peligrosidad por movimientos de ladera, confiere a los resultados de estos análisis un componente de seguridad. A pesar del periodo de retorno estimado para este evento en las zonas de estudio, en Nicaragua se registran tormentas tropicales que, con periodos de retorno más reducidos, pueden provocar efectos similares a los producidos por el huracán Mitch. Por esto se considera, que la utilización de un evento como el Mitch, a pesar de ser un evento extremo, es adecuada para desarrollar metodologías de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera.

Dado que las corrientes de derrubios fueron la tipología de movimientos de ladera más abundante de las producidas por el huracán Mitch, las metodologías propuestas en este trabajo se basan en la zonificación de la susceptibilidad a las corrientes de derrubios desencadenadas por lluvias intensas.

En el Bloque I de este trabajo, se propone una metodología empírica que permite una aproximación a la peligrosidad en base al número de eventos registrados, a la predictabilidad de estos y a la susceptibilidad. La evaluación de la susceptibilidad propuesta en este bloque se basa en el análisis de la distribución de pendientes, para determinar zonas potenciales de salida y de alcance de flujos de detritos. A pesar de que la resolución del mapa de peligrosidad obtenido es baja, la metodología permite determinar áreas seguras, información que puede ser de gran utilidad para localizar nuevos asentamientos o establecer planes de emergencia.

La disponibilidad de cartografías detalladas de factores geoambientales en la zona de estudio permite mejorar la metodología de análisis de susceptibilidad a la rotura de los materiales propuesta en el Bloque I. En el Bloque II de este estudio se propone un método estadístico bivariante, para la evaluación de la susceptibilidad a las inestabilidades del terreno. Este análisis se basa en el cálculo de densidades de zonas de rotura para determinar el grado de influencia de 5 factores condicionantes de la inestabilidad del terreno (pendiente, litología, textura del suelo, profundidad del suelo y uso del suelo).

A pesar de que los mapas temáticos utilizados en el Bloque II no se elaboraron específicamente para el análisis de movimientos de ladera, la combinación de estos con un detallado inventario de zonas de inicio de movimientos de ladera permite obtener una buena zonificación del terreno en función de la susceptibilidad a la rotura de los materiales. Esto demuestra que el uso de datos no específicos combinados con datos específicos de alta calidad y resolución, puede ser útil para reducir el coste de los análisis de susceptibilidad, haciéndolos accesibles a zonas donde, de otro modo, no podrían ser aplicados.

La disponibilidad de un Modelo Digital del Terreno (MDT) con una resolución de 20m x 20m, en una zona de estudio diferente de la zona estudiada en los Bloques I y II, permite desarrollar otra metodología de análisis de la susceptibilidad a las inestabilidades del terreno y mejorar el análisis de la susceptibilidad al alcance de flujos de detritos propuesta en el Bloque I.

En el Bloque III se propone un método estadístico bivariante, basado en una fórmula logarítmica, para determinar la susceptibilidad del terreno a la rotura de los materiales. En este caso se utilizan 4 factores condicionantes de la inestabilidad del terreno obtenidos directamente del MDT mediante el SIG ArcGIS 9.0[®] (pendiente, orientación, curvatura planar y curvatura longitudinal). Esta metodología permite zonificar el terreno en función de la propensión a la rotura de los materiales y por tanto al inicio de flujos de detritos.

La aplicación de la extensión TauDEM a partir del SIG ArcGIS 9.0[®] permite obtener de forma automática las posibles trayectorias de flujo a partir de las zonas potenciales de salida siguiendo la máxima pendiente. Este proceso, junto a la utilización del MDT, más detallado que la topografía digital obtenida en el Bloque I, suponen una mejora sustancial para la zonificación del terreno según su propensión a ser alcanzado por un flujo de detritos.

La combinación de la susceptibilidad a la rotura de los materiales y la susceptibilidad al alcance de los flujos de detritos permiten obtener una zonificación integrada de la susceptibilidad a los flujos de detritos que puede ser de gran utilidad para la planificación territorial y el diseño de planes de emergencia para reducir los efectos de los flujos de detritos.

Los procesos de validación aplicados en este estudio, permiten determinar el ajuste de los resultados con la distribución de movimientos de ladera ocasionados por el huracán Mitch. No obstante, estos procesos de validación no permiten determinar la capacidad predictiva de los mapas de susceptibilidad obtenidos, ya que para esto, sería necesario disponer de datos referentes a un evento diferente del huracán Mitch. La información obtenida a través de la validación de los mapas de susceptibilidad es de gran utilidad para la mejora de las metodologías utilizadas y, de cara a los usuarios finales de los mapas, para la determinación del uso del suelo más adecuado para cada clase de susceptibilidad en función de las características y necesidades de la zona.

En este estudio se proponen una serie de metodologías que si bien requieren una formación básica en el análisis de movimientos de ladera y el manejo de los sistemas de información geográfica, utilizan procesos prácticos que facilitan su aplicación y la comprensión de los resultados. Esto las hace aplicables a regiones donde los recursos económicos y la disponibilidad de técnicos especializados son escasos.

7- BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alcántara-Ayala, I., 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2-4), 107-124.
- Alemaný Monsó, X. 2001. Inestabilidad de Laderas en un Sector del Departamento de Chinandega, Nicaragua. Trabajo de Final de Carrera de Geología. Universidad de Barcelona. España. 163 pp. (no publicado)
- Alexander, D., 1995. A survey of the Field of Natural Hazards and Disaster Studies. In: *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publishers, 1-19.
- Anbalagan, D., 1992. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology* 32, 269 – 277.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Ugawa, N., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japa. *Landslides*, 1, 73 – 81.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H., Kanno, T., 2005. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparison of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, 81, 432 – 445.
- Baeza, C., and Corominas, J., 1996. Assessment of shallow landslides susceptibility by means of statistical techniques. In: Senneset, K. (ed): *Landslides / Glissements de terrain - Proceedings of the 7th international symposium on landslides*, Trondheim, Norway, 17-21 June 1996. Balkema. Rotterdam A.A., 7, 196 pp.
- Baeza, C., and Corominas, J., 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1251-1263.
- Begueria, S., 2006. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 37, 315 – 329.
- Bommer, J.J., Rodríguez, C.E., 2002. Earthquake-induced landslides in Central America. *Engineering Geology* 63, 189-220.

- Brabb, E.E., 1984. Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. In: Landslides-Glissements de Terrain, IV International Symposium on Landslides, Vol. 1, Toronto, Canada, pp. 307-323.
- Campbell, R., 1973. Dume Quadrangle, Los Angeles County, California; an experiment in generalising and quantifying areal distribution of landslides. US Geological Survey, Miscellaneous Field Studies. Map, MF-535 Scale 1:24,000.
- Cannon, S.H., and Savage, W.Z., 1988. A mass change model for debris flow. The journal of Geology 96, 221 – 227.
- Caracterizaciones Municipales, 2000. Proyecto Transmisión de Gobiernos Locales. Managua, Nicaragua.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach, P., 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. Earth Surface Processes and Landforms 16, 427 – 445.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 1995. GIS Technology in Mapping Landslide Hazard. In: Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Carrara, A. Guzzetti, F. (Eds.) Academic Pub., Dordrecht, the Netherlands, 360p.
- Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. 1999. Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. Natural Hazards, 20: 117-135.
- Chung, C.F., and Fabbri, A., 1993. The representation of geoscience information for data integration. Nonrenewable Resources 2 (2), 122 – 139.
- Chung, Ch.F. and Fabbri, A.G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. Natural Hazards, 30 (3): 451-472.
- Chung, C.F., Fabbri, A.G., 2005. Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models. In: Landslide Risk Assessment, Glade, T., Anderson, M.G., Crozier, M.J. (Eds.), John Wiley, 139-174.
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., Vescovi, P. 2002. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. Geomorphology, 48 (4): 349-364.
- Coe, J.A., Godt, J.W., Baum, R.L., Bucknam, R.C., Michael, J.A., 2004. Landslide susceptibility from topography in Guatemala. In: Landslides: Evaluation and

- stabilization. Lacerda, W.A.; Ehrlich, M.; Fontura, S.A.B.; Sayao (eds.). Taylor & Francis Group, London, 1, 69 – 78.
- Consortio BIT, 1999a. Plan de Desarrollo Municipal de San Francisco del Norte, Departamento de Chinandega, 47 pp. Unpublished Report.
- Consortio BIT, 1999b. Plan de Desarrollo Municipal de San Juan de Cinco Pinos 200-2004, 71 pp. Unpublished Report.
- Corominas, J. 1989. Estabilidad de Taludes y Laderas Naturales. Monografía nº3. Sociedad Española de Geomorfología. (Ed.) Kronos, Zaragoza. 249 pp.
- Corominas, J. 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal* 33, 260 – 271.
- Corominas, J., Copons, R., Vilaplana, J.M., Altimir, J., Amigó, J., 2003. Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards*, 30, 421 – 435.
- Costa, J.E., 1997. Hydraulic modelling for lahar hazards at Cascades volcanoes. *Environmental and Engineering Geosciences* 3, 21 – 30.
- Crosta, G.B., Imposimato, S., Roddeman, D., Chiesa, S., Moia, F., 2005. Small fast-moving flow-like landslides in volcanic deposits: The 2001 Las Colinas Landslide (El Salvador). *Engineering Geology* 79, 185 – 214.
- Dai F.C., Lee, C.F., Wang-Sijing, 1999. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Engineering Geology* 51, 279-290.
- Dai, F. C., Lee, C.F., Ngai, Y.Y., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64 (1): 65-87.
- Dai, F.C. and Lee, C.F., 2002. Landslide characteristics and slope instability modelling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42, 213 – 228.
- Darce, M., Levi, B., Nyström, J.O., Troëng, B., 1989. Alteration patterns in volcanic rocks within an east-west traverse through central Nicaragua. *Journal of South American Earth Sciences*, 2, 155-161.
- DeGraff, J.V., 1985. Using isopleth maps of landslides deposits as a tool in timber sale planning. *Bulletin American Association of Engineering Geologists* 22: 445–453.
- Duque, A., Echevarría, G., Fernández, E., Kerejeta, A., Cendrero, A., Tamés, P., 1990. Comprobación empírica de metodologías para la elaboración de mapas de

- amenaza de inestabilidad de laderas; aproximación de un modelo general de evaluación del riesgo. In: Hermelin, M. (Ed.) *Environmental Geology and Natural Hazards in the Andean Region*. AGID Report No. 13, Pereira, Colombia, pp. 189-206.
- Ehrenborg, J., 1996. A new stratigraphy for the Tertiary volcanic rocks of the Nicaraguan Highland. *GSA Bulletin* 108, 830-842.
- Fabbri, A., Chung, C.F., Cendrero, A., Remondo, J., 2003. Is prediction of future landslides possible with a GIS? *Natural Hazards*, 30, 487 – 499.
- Falgàs Parra, E. 2001. Estudio de Inestabilidades de Ladera en los Municipios de Cinco Pinos y San Francisco del Norte, Nicaragua. Trabajo de Final de Carrera de Geología. Universidad de Barcelona. España. 130 pp. (no publicado)
- Fenzl, N. 1988. Nicaragua: Geografía, Clima, Geología y Hidrogeología. Gráfica Editora Universitaria, Belém. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, (INETER). Managua, Nicaragua. 62pp.
- Fernández, T., Irigaray, C., El Hamdouni, R., Chacón, J., 2003. Methodology for landslide susceptibility mapping by means of a GIS. Application to the Contraviesa Area (Granada, Spain). *Natural Hazards*, 30, 297 – 308.
- Gökceoglu, C. and Aksoy, H., 1996. Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering Geology*, 44, 147 – 161.
- Guinau Sellés, M. 2001. Evaluación del Riesgo Geológico de Movimientos de Ladera en el Municipio de Cinco Pinos (Dpto. de Chinandega, Nicaragua). Trabajo de Final de Carrera de Geología. Universidad de Barcelona. España. 126 pp. (no publicado)
- Guinau, M., Pallàs, R., Vilaplana, J.M., 2005. A feasible methodology for landslide susceptibility assessment in developing countries: A case-study of NW Nicaragua after Hurricane Mitch. *Engineering Geology*, 80, 316 – 327.
- Guinau, M., Vilaplana, J.M., van der Zee, J. (in press). Propuesta metodológica para la evaluación de la Susceptibilidad a los movimientos de ladera. In: *Pobreza en el Trópico seco rural de Nicaragua, causas principales y perspectivas para su aliviación; Estudios aplicados en 9 municipios, con énfasis en el norte de Chinandega*. Managua, Nicaragua.

- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1994. The AVI Project: A bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy. *Environmental Management* 18, 623-633.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31: 181-216.
- Guzzetti, F., 2000. Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy. *Engineering Geology* 58, 89-107.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F., 2005. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology* 72, 272 – 299.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., 2006. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81, 166 – 184.
- Hansen, A., 1984. Landslide Hazard Analysis. In; Brunsden, D., Prior, D.B (Eds.), *Slope Instability*. Chapter 13, pp. 523-602.
- Hansen, A., Franks, C.A.M., Kirk, P.A., Brimicombe, A.J., Tung, F., 1995. Application of GIS to hazard assessment, with particular reference to landslides in Hong Kong. In; Carrara, A., Guzzetti, F (Eds.), *Geographical Information Systems in assessing natural hazards*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands, pp 273-298.
- Hungr, O., 1995. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal* 32, 610 – 623.
- Hürlimann, M., Rickenmann, D., Graf, C., 2003. Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal* 40, 161 – 175.
- Hürlimann, M., Copons, R., Altimir, J., 2006. Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach. *Geomorphology*, 78, 359-372.
- Hutchinson, J.N., 1986. A sliding-consolidation model for flow slides. *Canadian Geotechnical Journal* 23, 115 – 126.
- Ibsen, M.-L., Brunsden, D., 1996. The nature, use and problems of historical archives for temporal occurrence of landslides, with specific reference to south coast of Britain, Ventnor, Isle of Wight. *Geomorphology* 15, 241-258.

- Incer, J., Wheelock, J., Cardenal, L., Rodriguez, A.C. 2000. Desastres Naturales de Nicaragua, Guía para conocerlos y prevenirlos. Ed. Jaime Wheelock Román. HISPAMER. 278pp.
- INETER, 1990. Nicaragua, Regiones I y II, Departamentos de Madriz y Chinandega, Cinco Pinos 2855-IV, 1:50.000.
- INETER, 1998. Las lluvias del Siglo en Nicaragua. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Managua, Nicaragua, 159 pp.
- INETER, 2001. Amenazas Naturales de Nicaragua. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Managua, Nicaragua.
- INETER-COSUDE, 2005. Recomendaciones técnicas para la elaboración de mapas de amenaza por inestabilidad de laderas. Proyecto MET-ALARN. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales – Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. Managua, Nicaragua-
- Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R., Chacón, J., 1999. Verification of landslide susceptibility mapping: a case study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 537-544.
- Jibson, R.W., 1996. Use of landslides for paleoseismic analysis. *Engineering Geology* 43, 291-323.
- Lorente, A., García-Ruiz, J.M., Beguería, S., Arnáez, J., 2002. Factors Explaining the Spatial Distribution of Hillslope Debris Flows. *Mountain Research and Development*, 22, 32-39.
- Mc Birney, A.R., Williams, H., 1965. Volcanic history of Nicaragua. Univ. Calif. Publi. Geol. Sci, 55, 1-65.
- McGuire, B., Mason, I., Kilburn, C., 2002. Natural Hazards and Environmental Change, Key Issues in Environmental Change, Arnold, 187 pp.
- Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E., 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30, 1153 – 1171.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R., 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrolog. Process.*, 5, 3 – 30.
- Neuland, H. 1976. A prediction model of landslips, *Catena* 3, 215-230.

- Pallàs, R., Vilaplana, J.M., Guinau, M., Falgàs, E., Alemany, X., Muñoz, A., 2004. A pragmatic approach to debris flow hazard mapping in areas affected by Hurricane Mitch: example from NW Nicaragua. *Engineering Geology*, 72, 57 – 72.
- Parise, M. and Jibson, R.W., 2000. A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake. *Engineering Geology*, 58, 251 – 270.
- PROCHILEON (IDR – gtz). Base de Información Sobre Riesgos. (en el Norte del Departamento de Chinandega, Nicaragua). León, Marzo del 2000.
- Remondo, J., González-Díez, A., Díaz de Terán, J.R., Cendrero, A., 2003a. Landslide susceptibility models using spatial data analysis techniques. A case study from the Lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain). *Natural Hazards*, 30, 267 – 279.
- Remondo, J., González, A., Díaz de Terán, J.R., Fabbri, A., Cheng, Ch.F., 2003b. Validation of landslide susceptibility maps; Examples and applications from a case study in Northern Spain. *Natural Hazards*, 30 (3): 437-449.
- Rickenmann, D., Laigle, D., McArdell, B.W., Hübl, J., 2006. Comparison of 2D Debris-flow simulation models with field events. *Computational Geosciences* 10, 241 – 264.
- Saha, A.K., Gupta, R.P., Sarkar, I., Arora, M.K., Csaplovics, E., 2005. An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation – with a case study in the Himalayas. *Landslides*, 2, 61 – 69.
- Santacana, N., Baeza, C., Corominas, J., de Paz, A., Marturià, J., 2003. A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards*, 30, 281 – 295.
- Sassa, K., 1988. Geotechnical model for the motion of landslides. In: Bonnard, C. (Ed.), *Proceedings of 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne. Balkema, Rotterdam, pp. 37 – 55.
- Selby, M.J. 1993. *Hillslope Materials and Processes*. Oxford University press. Oxford New York. 451 pp.
- Sharpe C.F.S. 1938. *Landslides and related Phenomena*. Columbia Univ. Press. New York. 137 pp.

- Soeters, R., van Westen, C.J., 1996. Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, pp. 129-177.
- Solidaridad Internacional, 2001. Estrategias participativas para el desarrollo rural en seis municipios del norte del Departamento de Chinandega. Proyecto de Cooperación Internacional desarrollado conjuntamente con el Instituto de Capacitación e Investigación para el Desarrollo Rural Integral (ICIDRI) de la Universidad Politécnica de Nicaragua (UPOLI). Managua, Nicaragua. (No publicado).
- Süzen, M. and Doyuran, V., 2004. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45, 665 – 679.
- Tarboton, D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resources Research*, 33, 309 – 319.
- Tarolli, P. and Tarboton, D.G., 2006. A new method for determination of most likely landslide initiation points and the evaluation of digital terrain model scale in terrain stability mapping. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 663 – 677.
- USGS, 1999. Digital Atlas of Central America: Prepared in response to hurricane Mitch, version 2, Vols. 1-2. <http://130.11.52.118/mitch/views/eventimpact.html>.
- van Westen, C.J., 1993. *Application of Geographical Information Systems to Landslide Hazard Zonation*. ITC Publication Number 15, Enschede, The Netherlands.
- van Westen, C. J., Rengers, N., Terlien, M.T.J. 1997. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geol Rundsch* 86: 404-414.
- van Westen, C.J., Seijmonsbergen, A.C., Montovani, F., 1999. Comparing landslide hazard maps. *Natural Hazards* 20, 137 – 158.
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.I. (eds.) *Landslides analysis and control*. TRB Special Report 176, Washington, 11-33.

- Varnes, D.J., 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements, UNESCO Press, Paris, 63 pp.
- Vilaplana, J.M., Pallàs, R., Guinau, M., Falgàs, E., Alemany, X., Muñoz, A., 2002. Peligrosidad Geológica Asociada a los Movimientos de Ladera en el Noroeste de Nicaragua. Serie Geográfica, 10, 109-119. Dpto. Geografía, Universidad Alcalá de Henares, (Madrid)
- Weyl, R., 1980. Geology of Central America. Gebrüder, Borntraeger, Berlin. 371 pp.
- Wright, R.H., and Nilsen, T.H., 1974. Isopleth map of landslide deposits, Southern San Francisco Bay Region, California. US Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map, MF-550. scale 1:250,000.
- Wright, R.H., Campbell, R.H., Nilsen, T.H., 1974. Preparation and use of isopleth maps of landslide deposits. Geological Society of America, Geology 2, 483–485.
- Yin, K.L. and Yan, T.Z., 1988. Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. In: Landslides-Glissements de Terrain. Proceedings V International Symposium on Landslides, vol. 2, Lausanne, Switzerland, 1269–1272.
- Zhou, C.H., Lee, C.F., Li, J., Xu, Z.W., 2002. On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong. Geomorphology 43, 197-207.