



COSTA RICA

TOMO II ANÁLISIS PROBABILISTA DE AMENAZAS Y RIESGOS NATURALES

INFORME TÉCNICO ERN-CAPRA-T2-11 AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR EL SISMO DE CINCHONA DEL 8 DE ENERO DE 2009



CEPRENAC



Inter-American Development Bank



opportunities for all



Evaluación de Riesgos Naturales
- América Latina -
Consultores en Riesgos y Desastres

Consortio conformado por:

Colombia

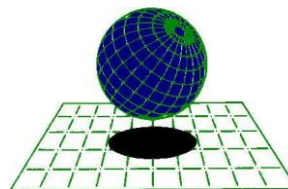
Carrera 19A # 84-14 Of 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C.



INGENIERIA TECNICA Y CIENTIFICA LTDA

España

Centro Internacional de Métodos Numéricos
en Ingeniería - CIMNE
Campus Nord UPC
Tel. 34-93-401-64-96
Fax 34-93-401-10-48
Barcelona



C I M N E

México

Vito Alessio Robles No. 179
Col. Hacienda de Guadalupe Chimalistac
C.P.01050 Delegación Álvaro Obregón
Tel. 55-5-616-8161
Fax 55-5-616-8162
México, D.F.



ERN Ingenieros Consultores, S. C.

ERN Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina
www.ern-la.com

Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico – Consorcio ERN América Latina

Omar Darío Cardona A.
Dirección General del Proyecto

Luis Eduardo Yamín L.
Dirección Técnica ERN (COL)

Gabriel Andrés Bernal G.
Coordinación General ERN (COL)

Mario Gustavo Ordaz S.
Dirección Técnica ERN (MEX)

Eduardo Reinoso A.
Coordinación General ERN (MEX)

Alex Horia Barbat B.
Dirección Técnica CIMNE (ESP)

Martha Liliana Carreño T.
Coordinación General CIMNE (ESP)

Especialistas y Asesores – Grupos de Trabajo

Miguel Genaro Mora C.
Especialista ERN (COL)

César Augusto Velásquez V.
Especialista ERN (COL)

Karina Santamaría D.
Especialista ERN (COL)

Mauricio Cardona O.
Asistente Técnico ERN (COL)

Andrés Mauricio Torres C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Diana Marcela González C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Yinsury Sodel Peña V.
Asistente Técnico ERN (COL)

Andrei Garzón B.
Asistente Técnico ERN (COL)

Carlos Eduardo Avelar F.
Especialista ERN (MEX)

Benjamín Huerta G.
Especialista ERN (MEX)

Mauro Pompeyo Niño L.
Especialista ERN (MEX)

Isaías Martínez A.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Edgar Osuna H.
Asistente Técnico ERN (MEX)

José Juan Hernández G.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Marco Torres
Asesor Asociado (MEX)

Johner Venicio Correa C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Mabel Cristina Marulanda F.
Especialista CIMNE(ESP)

Jairo Andrés Valcarcel T.
Especialista CIMNE(ESP)

Juan Pablo Londoño L.
Especialista CIMNE(ESP)

René Salgueiro
Especialista CIMNE(ESP)

Nieves Lantada
Especialista CIMNE(ESP)

Álvaro Martín Moreno R.
Asesor Asociado (COL)

Mario Díaz-Granados O.
Asesor Asociado (COL)

Liliana Narvaez M.
Asesor Asociado (COL)

Asesores Nacionales

Osmar E. Velasco
Guatemala

Sandra Zúñiga
Nicaragua

Alonso Brenes
Costa Rica

Banco Mundial – Gestión de Riesgo de Desastres / Región Latinoamérica y el Caribe

Francis Ghesquiere
Coordinador Regional

Oscar A. Ishizawa
Especialista

Joaquín Toro
Especialista

Fernando Ramírez C.
Especialista

Edward C. Anderson
Especialista

Stuart Gill
Especialista

Banco Interamericano de Desarrollo – Medio Ambiente / Desarrollo Rural / Desastres Naturales

Flavio Bazán
Especialista Sectorial

Cassandra T. Rogers
Especialista Sectorial

Hori Tsuneki
Consultor Interno

LIMITACIONES Y RESTRICCIONES

La aplicación que aquí se presenta es de carácter ilustrativo y presenta limitaciones y restricciones debido al nivel de resolución de la información disponible, de lo cual debe ser consciente el usuario final para efectos de poder dar un uso adecuado y consistente a los resultados obtenidos teniendo en cuenta el tipo de análisis realizado, el tipo y calidad de datos empleados, el nivel de resolución y precisión utilizado y la interpretación realizada. En consecuencia es importante señalar lo siguiente:

- Los modelos utilizados en los análisis tienen simplificaciones y supuestos para facilitar el cálculo que el usuario debe conocer debidamente. Éstas están descritas en detalle en los informes técnicos respectivos (ver referencias).
- Los análisis se han desarrollado con la mejor información disponible que presenta limitaciones en su confiabilidad y su grado actualización. Es posible que exista información mejor y más completa a la cual no se tuvo acceso.
- La información utilizada y los resultados de los análisis de amenaza, exposición y riesgo tienen un asociado un nivel de resolución según las unidades de análisis utilizadas, lo que se explica en el documento descriptivo del ejemplo.
- El uso que el usuario final le dé a la información no compromete a los autores de los estudios realizados, quienes presentan este ejemplo como lo que puede ser factible de hacer si se cuenta con información confiable con la precisión adecuada.
- Es responsabilidad del usuario comprender el tipo de modelo utilizado y sus limitaciones, la resolución y calidad de los datos, las limitaciones y suposiciones de los análisis y la interpretación realizada con el fin de darle a estos resultados un uso adecuado y consistente.
- Ni los desarrolladores del software, ni los promotores o financiadores del proyecto, ni los contratistas o subcontratistas que participaron en las aplicaciones o ejemplos de uso de los modelos asumen ninguna responsabilidad por la utilización que el usuario le dé a los resultados que aquí se presentan, por lo tanto están libres de responsabilidad por las pérdidas, daños, perjuicios o efectos que pueda derivarse por la utilización o interpretación de estos ejemplos demostrativos.

Tabla de contenido

1	Introducción y generalidades	1-1
2	Objetivos	2-1
3	Metodología de evaluación de la amenaza	3-1
4	Información de referencia para los análisis	4-1
4.1	Distribución de cuencas	4-1
4.2	Modelo de elevación digital	4-1
4.3	Geología	4-2
4.4	Información de suelos	4-4
5	Mapas de amenaza por deslizamiento.....	5-1
6	Conclusiones.....	6-1
7	Acciones Recomendadas	7-1
8	Referencias	8-1

Índice de figuras

FIGURA 1-1 UBICACIÓN ESPACIAL DE LA CUENCA DEL RÍO SAVEGRE, COSTA RICA.	1-1
FIGURA 1-2 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN LA CUENCA DEL RÍO SAVEGRE DESARROLLADA CON LA METODOLOGÍA MORA-VAHRSON, MODIFICADA POR CAMPOS (1991).....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 4-1 MAPA DE CUENCAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	4-1
FIGURA 4-2 CURVAS DE NIVEL DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DISPONIBLE, CON DIFERENCIAS ALTIMÉTRICAS DE 20 M.	4-2
FIGURA 4-3 GEOLOGÍA DEL DISTRITO	4-3
FIGURA 4-4 MAPA EDAFOLÓGICO DEL DISTRITO	4-5
FIGURA 5-1 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO PARA LA CUENCA DEL RÍO SAVEGRE. ESTADO DE SUELO SECO CON SISMO. ANÁLISIS MÉTODO MORA VAHRSON.....	5-2
FIGURA 5-2 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO PARA LA CUENCA DEL RÍO SAVEGRE. ESTADO DE SUELO SECO SIN SISMO. ANÁLISIS MÉTODO DE FALLA TRASLACIONAL.....	5-3
FIGURA 5-3 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO PARA LA CUENCA DEL RÍO SAVEGRE. ESTADO DE SUELO SATURADO CON SISMO. ANÁLISIS MÉTODO MORA VAHRSON.	5-4
FIGURA 5-4 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO PARA LA CUENCA DEL RÍO SAVEGRE. ESTADO DE SUELO SATURADO SIN SISMO. ANÁLISIS MÉTODO DE FALLA TRASLACIONAL.	5-4

Índice de tablas

TABLA 4-1. VALORES TÍPICOS DE ÁNGULOS DE FRICCIÓN PARA VARIOS TIPOS DE ROCA.....	4-3
TABLA 4-2 VALORES TÍPICOS DE ÁNGULOS DE FRICCIÓN PARA VARIOS TIPOS DE ROCA.	4-3
TABLA 4-3. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI.	4-4
TABLA 4-4. VALORES REPRESENTATIVOS PARA EL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA	4-6
TABLA 4-5. RELACIÓN DE VACIOS, CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO SECO PARA ALGUNOS SUELOS TÍPICOS EN ESTADO NATURAL.....	4-6
TABLA 4-6. DATOS GEOMECÁNICOS INFERIDOS PARA EL ANÁLISIS DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO....	4-7
TABLA 5-1 MAPAS DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO GENERADOS PARA LA ZONA DE ESTUDIO.	5-1

1 Introducción y generalidades

El 8 de enero de 2009, a la 1:21 pm, un terremoto de magnitud Mw 6.2 sacudió la región de Varablanca, 1 Km al sur de Cinchona, y a unos 35 Km al norte de San José. El sismo está asociado a un área de ruptura del orden de 72 Km² en la falla Ángel-Varablanca, ubicada al costado este del volcán Poás. Cerca de 25 personas perdieron la vida, y 128,000 resultaron directamente afectadas. Las pérdidas económicas se estiman alrededor de \$USD 490 millones (RSN Costa Rica, 2009). La Figura 1-1 presenta la ubicación del epicentro del evento y la zona de influencia. Los principales efectos inducidos por el terremoto de Cinchona se presentan en la Tabla XX.

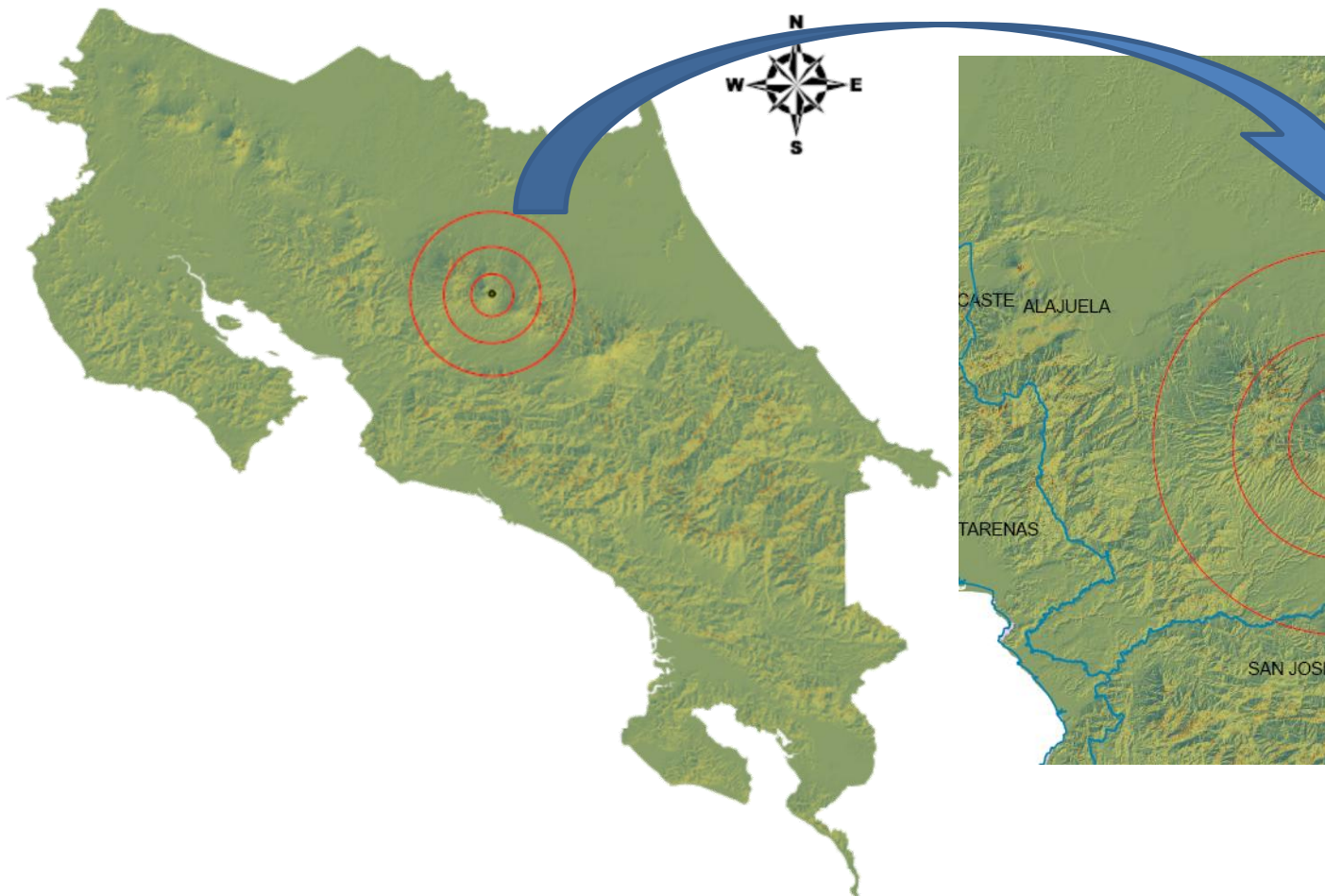


Figura 1-1
Epicentro del sismo del 8 de enero de 2009, Costa Rica.
(Fuente: maps.google.es)

Tabla 1-1.
Datos de los efectos principales del terremoto de Cinchona.
 (Fuente: Red Sismológica Nacional. Informe Terremoto de Cinchona. Abril 2009)

Lugar	Efectos
Cinchona e Isla Bonita	Gran cantidad de deslizamientos, casi 90% de destrucción de infraestructura incluyendo las casas, escuela, iglesia, negocios e industria. Cambios importantes en la topografía y el relieve, 13 muertos, 15 heridos y varios desaparecidos. Muy pocas estructuras quedaron en pie.
Vara Blanca, San Rafael de Vara Blanca, Cariblanco, Ujarraz, Poasito, Volcán-Poás, Colonia Virgen del Socorro	70 % de infraestructura destruida, 7 muertos y 10 heridos, varias personas desaparecidas, muchos deslizamientos, gran cantidad de fracturas del terreno, tuberías rotas, caída de postes eléctricos, más de 50 reses muertas y animales heridos. Imposibilitó la conducción de vehículos.
Los Cartagos, Fraijanes, San Miguel, La Virgen, Bajos del Toro, Colonia Toro, Sacramento, Carrizal, Sabana Redonda	Deslizamientos de laderas, agrietamiento moderado del suelo, casas de mala construcción colapsadas y averiadas, casas de calidad A y B con fracturas leves, cinco muertos. Sentido en vehículos en circulación. Corrimiento de muebles y caída de algunos. Pánico general.
Alajuela, Heredia, San José, Puerto Viejo, Ciudad Quesada, Zarcero, San Pedro de Poás, Veracruz	Sentido por todas las personas en movimiento, caída de repellos y algunos cielorrasos, fracturamiento moderado en las paredes de edificaciones de baja calidad, fracturamiento de algunas vidrieras, dos muertes por infarto, muchas personas asustadas.
Guápiles, San José, Atenas, Turrialba, Cartago, Muelle de San Carlos, San Ramón	Sentido por casi todas las personas en movimiento, balanceo fuerte en el agua de las piscinas, caída de objetos.
Puntarenas, Los Santos, Siquirres, San Isidro de Pérez Zeledón, Jacó	Sentido por muchas personas, vibración de Ventanas y personas levemente asustadas.
Nicoya, Dominical, Limón, Los Chiles	

El mapa generalizado y preliminar de los principales deslizamientos y flujos de lodos detonados por el terremoto se presenta en la Figura 1-3. Este mapas ha sido compilado con base en datos de la UNA, ICE, CNE y UCR, y con comprobación parcial de campo y sobrevuelos En la Figura 1-3 a Figura 1-5 se presentan algunos ejemplos de los deslizamientos detonados por el sismo de Cinchona.

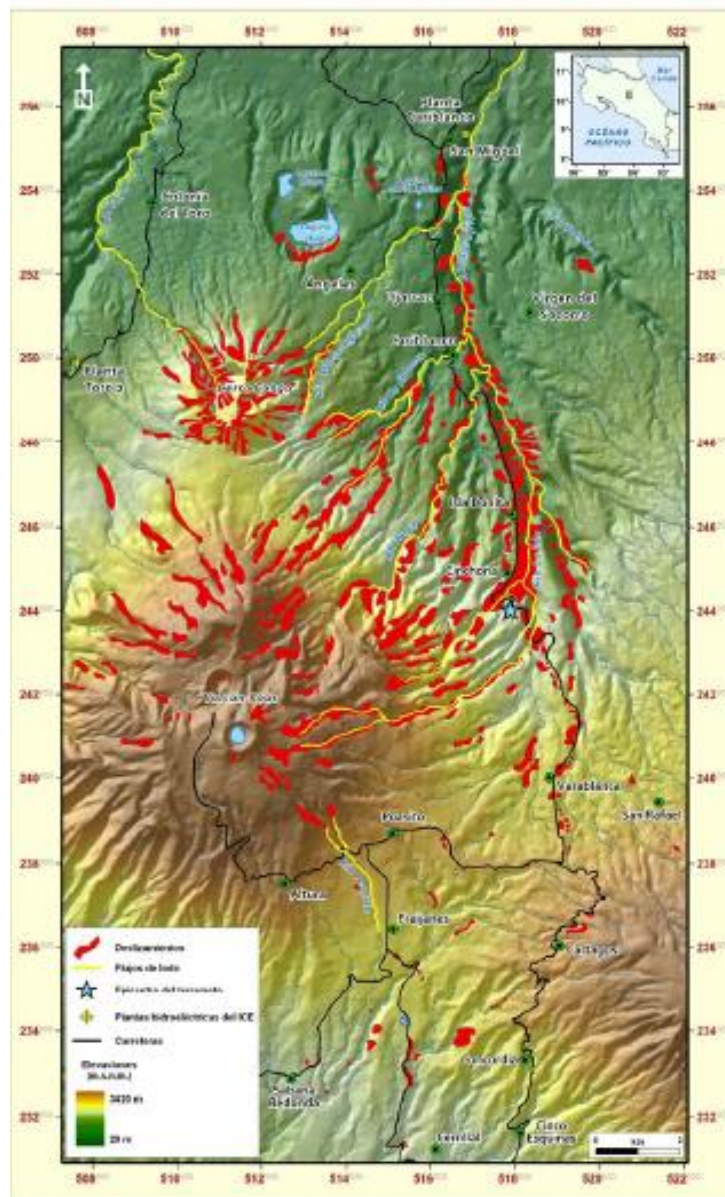


Figura 1-2. Mapa generalizado y preliminar de los principales deslizamientos y corrientes de lodo disparados por el terremoto del 8 de enero, basado en datos de la UNA, ICE, CNE y UCR, con comprobación parcial de campo y con sobrevuelos. (Fuente: Red Sismológica Nacional. Informe Terremoto de Cinchona. Abril 2009)



Figura 1-3

Flujo de lodo ocurrido en María Aguilar indicativo de una viscosidad elevada
(Fuente: Red Sismológica Nacional. Informe Terremoto de Cinchona. Abril 2009. Fotografía: G.E. Alvarado).



Figura 1-4

Frente dejado por el flujo de lodo cerca de puente sobre el río Seco.
(Fuente: Red Sismológica Nacional. Informe Terremoto de Cinchona. Abril 2009. Fotografía: A. Rodríguez).



Figura 1-5
Deslizamientos concentrados en el tercio superior de las laderas
(Fuente: Red Sismológica Nacional. Informe Terremoto de Cinchona. Abril 2009).

2 Objetivos

El objetivo principal de la simulación realizada consiste en plantear un modelo de evaluación de la amenaza por deslizamiento en el área de influencia del sismo de Cinchona calibrar el modelo, definir como evento detonante un escenario sísmico con las mismas características en la fuente que las del sismo de Cinchona y evaluar de esta manera en forma analítica la estabilidad de los taludes en la zona de influencia del evento. El modelo debe permitir establecer las zonas de mayor amenaza por deslizamiento con el fin de comparar dicha zonificación con las zonas que realmente presentaron situaciones de inestabilidad.

Para la selección del modelo de amenaza sísmica y el escenario compatible con el sismo de Cinchona, se recurre a la información de amenaza sísmica regional más actualizada disponible (NORSAR et. al. 2008. Proyecto RESIS II), y a la selección del evento con magnitud 6.2 en cercanías a las coordenadas epicentrales reportadas para el evento.

Los resultados de la simulación se presentan a manera de mapas de amenaza para diferentes condiciones de análisis. Se establecen comparaciones con los reportes existentes de zonas con problemas de inestabilidad para efectos de validación del modelo. Una vez calibrado y ajustado el modelo puede utilizarse para analizar zonas con características similares, para analizar otras situaciones de eventos detonantes o para realizar estudios específicos de riesgo considerando la infraestructura expuesta en las zonas de influencia de la amenaza.

3 Metodología de evaluación de la amenaza

Para la evaluación de la amenaza por deslizamiento en la zona seleccionada de estudio se siguió la metodología propuesta en el marco de la iniciativa CAPRA la cual se describe en detalle en el informe ERN-CAPRA-T1-3 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección, ERN 2009), y en el sitio www.ecapra.org.

La metodología para la evaluación de la amenaza por deslizamiento en la zona de estudio incluyó los siguientes aspectos:

- (a) Evaluación de la amenaza sísmica: ésta se evalúa mediante un análisis probabilístico (PSHA - Probabilistic Seismic Hazard Analysis) y mediante escenarios específicos determinísticos.
- (b) Levantamiento de información básica para el estudio lo cual incluye como mínimo el modelo de elevación digital, las propiedades geotécnicas de los suelos superficiales, las condiciones de humedad interna en los suelos en el momento del evento, la profundidad media de los estratos susceptibles a deslizarse.
- (c) Evaluación de la amenaza por deslizamiento siguiendo la siguientes metodologías de análisis:
 - Análisis mediante el método de Mora-Varhson
 - Análisis mediante hipótesis de falla translacional o plana
- (d) Las condiciones utilizadas en los análisis fueron las siguientes:
 - Humedad. Esta condición depende directamente de la saturación del suelo, para el caso se trabajan dos episodios extremos de saturación, completamente seco y completamente saturado.
 - Propiedades de los suelos. Es necesario definir las características geotécnicas del área de estudio con mapas de pesos unitarios, mapa de cohesiones del suelo en condiciones drenadas, mapa de ángulos de fricción en condiciones drenadas, espesores de los estratos de suelo potencialmente deslizables.
 - Propiedades de las rocas (litología): Dependiendo de los tipos de formaciones existentes en el área de estudio, se requiere el mapa de pesos unitario, el ángulo de fricción y la cohesión de la roca.
 - Casos de análisis. Se analizaron dos escenarios de agua, y un escenario sísmico.
- (e) Generación de los mapas de amenaza para las diferentes metodologías y situaciones de análisis y edición para visualización.

4 Información de referencia para los análisis

En este numeral se presenta la información utilizada para los análisis. Cabe mencionar que este caso de estudio se analiza como un modelo demostrativo de las capacidades de las metodologías adoptadas y las herramientas desarrolladas en el proyecto CAPRA. Empleando estas metodologías y herramientas es posible hacer análisis posteriores en cuanto se cuente con más y mejor información que la referenciada a continuación.

4.1 Distribución administrativa

Los límites administrativos son tomados de la información disponible del Instituto Tecnológico de Costa Rica. La Figura 4-1 resume las características de esta información.

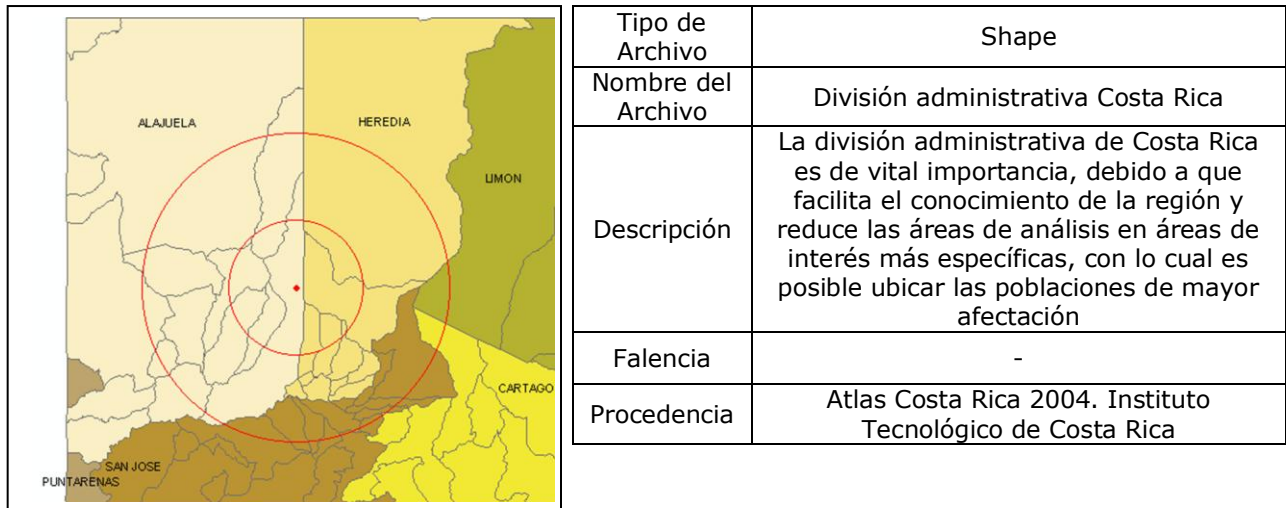


Figura 4-1
 División administrativa del área de estudio

4.2 Modelo de elevación digital

El modelo de elevación digital se obtuvo a partir de la información de curvas de nivel de todo Costa Rica (Atlas Costa Rica 2004. Instituto Tecnológico de Costa Rica) el cual tiene una precisión altimétrica con curvas de nivel cada 20 m. La Figura 4-2 resume las características de la información disponible.

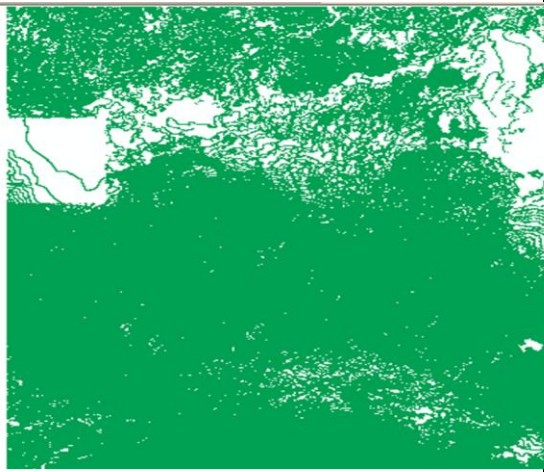
	Tipo de Archivo	Shape
	Nombre del Archivo	Curvas cuadrante influencia sismo enero de 2009
	Descripción	Curvas de nivel del cuadrante de influencia del sismo ocurrido en enero de 2009, Costa Rica. Levantadas cada 20m. Tomadas a partir del shape de curvas de nivel para todo Costa Rica.
	Falencia	Una precisión altimétrica de 20 m puede omitir taludes y condiciones de suelo que pueden llegar a ser críticas en el desarrollo de la amenaza por deslizamiento.
	Procedencia	Atlas Costa Rica 2004. Instituto Tecnológico de Costa Rica

Figura 4-2
 Curvas de nivel del modelo digital de elevación disponible, con diferencias altimétricas de 20 m.

4.3 Geología

La geología básica de la zona se obtiene a partir del mapa de geología general para Costa Rica (Atlas Costa Rica 2004. Instituto Tecnológico de Costa Rica). La Figura 4-3 resume las características de esta información.

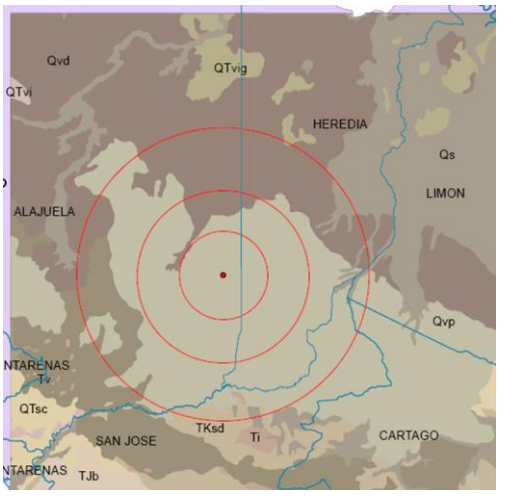
	Tipo de Archivo	Shape
	Nombre del Archivo	Geología cuadrante influencia sismo enero 2009
	Descripción	Geología general del área de influencia del sismo ocurrido en Costa Rica enero de 2009. La base de datos del shape incluye datos referentes a la nomenclatura, el sistema al cual pertenece, la serie, la formación, su litología y una descripción general de la roca
	Falencia	Es una caracterización geológica regional, por lo tanto existe una incertidumbre en la distribución exacta de estas rocas, niveles de meteorización, diaclasamientos y discontinuidades, entre otros.
	Procedencia	Atlas Costa Rica 2004. Instituto Tecnológico de Costa Rica

Figura 4-3
Geología de la región

Para la selección de los parámetros geomecánicos de las rocas, se requiere conocer la litología y la formación a la que pertenecen, con ello se puede conocer teóricamente algunas propiedades. Para el ángulo de fricción de la roca existe literatura especializada que indican valores comunes para esta propiedad, en la Tabla 4-1 se presenta el compendio de información utilizado para dicho fin.

Tabla 4-1.
Valores típicos de ángulos de fricción para varios tipos de roca.
 (Fuente: Jaime Suarez Días. Deslizamientos. Capítulo 9 Geología)

Clase de Roca	Rango de ángulo de fricción (Grados)	Tipos de Roca
Fricción Baja	20 a 27	Esquistos; Rocas con alto contenido de Mica, Lutitas y Margas.
Fricción Mediana	27 a 34	Arenisca, Limolita, Neiss, Pizarra.
Fricción Alta	34 a 40	Basalto, Granito, Caliza, Conglomerado.

Para el caso del peso específico de la roca, se sigue un procedimiento similar, tomando valores teóricos de referencia como los que se muestran en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2
Valores típicos de ángulos de fricción para varios tipos de roca.
 (Fuente: EIA y EIS Proyecto de Explotación de Cantera GNL2 Cañete - Perú)

Tipo de roca	Litología	Peso Específico (t/m ³)	Tamaño granos (mm)	Factor de Esponjamiento (%)	Resistencia a compresión (Mpa)	
Ígneas	Intrusiva	Granodiorita			50-250	
		Granito	2,7	0,1 - 2	1,60	200 - 350
		Monzonita				
		Diorita				
		Tonalita	2,85 - 3,2	2	1,60	260 - 350
		Adamelita				50-250
	Gabro					
	Extrusiva	Andesita	2,7	0,1	1,60	300 - 400
Sedimentarias		Conglomerado	2,6	2	1,50	140
		Arenisca	2,5	0,1 - 1	1,50	160 - 255
		Lutita	2,7	< 0.004	1,35	70
		Coquina				
		Diatomita				
Metamórficas		Gneis	2,7	2	1,50	140 - 300
		Esquisto	2,7	0,1 - 1	1,60	60 - 400

La selección de la cohesión para cada tipo de roca se realizó con base al ángulo de fricción asignado, con base en la clasificación geomecánica según el sistema de clasificación Bieniawski (sistema RMR desarrollado por Z.T. Bieniawski. 1972-1973).

Tabla 4-3.

Clasificación geomecánica de Bieniawski.

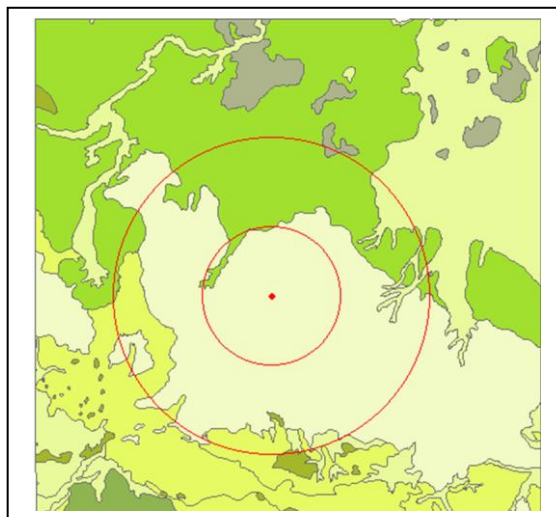
(Fuente: Bieniawski, Z.T. *Engineering Rock Mass Classifications*, John Wiley & Sons, Inc., 1989)

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy Buena	Buena	Mediana	Mala	Muy Mala
RMR	81-100	61-80	41-60	21-40	0-20
Cohesión	> 0.4Mpa	0.3 - 0.4 Mpa	0.2 - 0.3 Mpa	0.1 - 0.2 Mpa	< 0.1 Mpa
Angulo de rozamiento	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°

Para los casos en que no se cuenta con información referente a la roca, se recurrió a técnicas indirectas. Aprovechando las características de las formaciones, es posible identificar mineralogías más detalladas y tipos de granos que conforman dichas formaciones, para ello se correlacionaron rocas con ayuda de métodos como por ejemplo el triangulo de Streckeisen para rocas ígneas, que identifica la roca dependiendo de la cantidad de minerales que contiene, dando una idea de la resistencia y el tipo de roca a que pertenece.

4.4 Información de suelos

En lo que se refiere a zonificación geotécnica, se cuenta con un mapa edafológico y de usos del suelo (Atlas Costa Rica 2004. Instituto Tecnológico de Costa Rica) el cual incluye el nombre del suelo, su tipo, el área que abarca, las características de su orden, el grupo al que pertenece, el elemento formador y las características de la pendiente del terreno que ocupa. En general, esta información de suelos es insuficiente para realizar un análisis confiable. Sin embargo considerando que es la única información disponible, es empleada en este estudio para realizar estimativos de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos de la zona con base en referencias a suelos con características descriptivas similares.



Tipo de Archivo	Shape
Nombre del Archivo	Suelos cuadrante influencia sismo enero 2009
Descripción	Ubicación espacial de los suelos para el cuadrante de influencia del sismo ocurrido en enero de 2009, Costa Rica, dicho mapa cuenta con una base de datos que incluye el nombre del suelo, el tipo, el área que abarca, las características de su orden, el gran grupo al que pertenece, el elemento formador y las características de la pendiente del terreno que ocupa el suelo. El mapa de suelos del cuadrante de estudio, es tomado a partir del mapa general de suelos para Costa Rica.
Falencia	No se cuenta con una estratigrafía de precisión de los suelos existentes en el país, por ende los espesores de suelo deben ser inferidos, igualmente sus propiedades geomecánicas.
Procedencia	Atlas Costa Rica 2004. Instituto Tecnológico de Costa Rica

Figura 4-4
Mapa edafológico del distrito

La selección de los datos geotécnicos como cohesión, ángulo de fricción, peso unitario, espesor del estrato y desplazamientos permisibles requieren de estudios detallados del terreno, sin embargo de modo demostrativo, las propiedades se infieren teóricamente. Como información inicial se cuenta con las formaciones y las texturas correspondientes al área de estudio, siendo posible asignar de una manera muy general una categorización de los suelos en gravas, arenas, limos o arcillas. Es posible entonces referirse de nuevo a la literatura especializada para asignar valores teóricos de las propiedades geotécnicas de los suelos. En la Tabla 4-4 se presenta alguna de esta información de referencia para la asignación de los valores del ángulo de fricción. Debido a la variabilidad de los suelos y como son afectados por los cambios de humedad, tectonismo, etc., y sin una prospección pertinente, el valor de la cohesión resulta muy difícil de establecer, por lo tanto se tomo un valor homogéneo de 1 ton/m^2 para toda el área de estudio, un valor conservador, con una influencia moderada en los análisis. Para el caso de la selección del peso unitario del suelo se recurrió a lo establecido por autores como Terzagui, Peck, Garcia Valcarce, entre otros. En la Tabla 4-5 se muestra una de las referencias usadas para la selección de este parámetro.

Tabla 4-4.
Valores representativos para el ángulo de fricción interna
(Fuente: Joseph E. Bowles, RE., S.E. *Foundation analysis and desing. Fifth edition. Pag 108*)

Type of test*			
	Unconsolidated-undrained,	Consolidated-undrained,	Consolidated-drained,
Soil	U	CU	CD
Gravel			
Medium size	40-55°		40-55°
Sandy	35-50°		35-50°
Sand			
Loose dry	28-34°		
Loose saturated	28-34°		
Dense dry	35-46°		43-50°
Dense saturated	1-2° less than		43-50°
dense dry			
Silt or silty sand			
Loose	20-22°		27-30°
Dense	25-30°		30-35°
Clay	0° if saturated	3-20°	20-42°

Tabla 4-5.
Relación de vacíos, contenido de humedad y peso unitario seco para algunos suelos típicos en estado natural
(Fuente: Braja M. Das. *Principal of geotechnical engineering. Fifth edition. pag 53*)

Type of soil	Void ratio, e	Natural moisture content in a saturated state (%)	Dry unit weight, gd	
			lb/ft ³	kN/m ³
Loose uniform sand	0.8	30	92	14.5
Dense uniform sand	0.45	16	115	18
Loose angular-grained silty sand	0.65	25	102	16
Dense angular-grained silty sand	0.4	15	121	19
Stiff clay	0.6	21	108	17
Soft clay	0.9-1.4	30-50	73-93	11.5-14.5
Loess	0.9	25	86	13.5
Soft organic clay	2.5-3.2	90-120	38-51	6 -8
Glacial till	0.3	10	134	21

Los espesores de los estratos potencialmente deslizables se asignaron dependiendo del tipo de suelo escogido y con base en su ubicación espacial, pendiente topográfica y los

regímenes de lluvias de las zonas. A las zonas de alta montaña con problemas de erosión y lluvias fuertes, se les asignan espesores bajos, a las zonas de depresión de acumulación de sedimentos o zonas de mesetas se asignan espesores altos, y a zonas con condiciones intermedias a las anteriormente mencionadas se asigna un valor intermedio de espesor. Se establecieron en total tres espesores característicos, 1, 3 y 5 m.

Los valores de las propiedades geomecánicas de los suelos y las rocas para el área de análisis inferidos mediante el procedimiento explicado anteriormente se presenta en la tabla 4-7, tomando como referencia la zonificación geológica.

Tabla 4-6.
Datos geomecánicos inferidos para el análisis de amenaza por deslizamiento.

NOMENCLATURA	Espesor	CSuelo	CRoca	GamSuelo	GamRoca	PhiSuelo	PhiRoca
N(2-1)-3c1	1.0	1.0	35.0	1.5	2.7	30.0	40.0
N2-c2	1.0	1.0	35.0	1.7	2.6	25.0	40.0
P3-N(2-1)mt	5.0	1.0	30.0	2.0	2.5	25.0	35.0

5 Mapas de amenaza por deslizamiento

Con base en la información presentada, se realiza el cálculo de la amenaza por deslizamientos empleando el sistema ERN-Deslizamiento (ERN 2009). Los resultados del análisis se representan mediante índices de inestabilidad en forma de mapas de amenaza por deslizamiento. Para el análisis se usaron los modelos de Mora-Vahrson y Falla Traslacional, para ilustrar el uso del programa. Los casos de análisis se relacionan en la Tabla 5-1.

*Tabla 5-1
 Mapas de Amenaza por deslizamiento generados para la zona de estudio.*

Área de Cálculo	Tipo de análisis	Escenarios de agua*	Escenarios de sismo **	N° de escenarios del AME de deslizamiento.
Área de influencia sismo de Cinchona	Mora Vahrson	2	1	2
	Falla Plana	2	1	2

* Los escenarios de agua analizados son: situación completamente seca y situación completamente saturada.

** Los análisis con sismo se llevaron a cabo con un escenario similar al sismo de Cinchona, ocurrido el 8 de enero de 2009. El escenario empleado es un sismo de magnitud 6.3, ocurriendo 35 km al norte de San José.

Los índices de inestabilidad arrojados por las dos metodologías mencionadas se explican a continuación:

- *Escala método Mora – Vahrson:* la clasificación de la amenaza potencialmente deslizable por este método se divide en varias clases que se describen en la siguiente escala de colores, que va desde insignificante hasta muy alta.

I	II	III	IV	V	VI
Insignificante <6	Bajo 7-32	Moderado 33-162	Medio 163-512	Alto 513-1250	Muy Alto >1250

- *Escala método de falla traslacional:* la escala gráfica de estos mapas, representa el factor de inseguridad (FI) calculados, de manera que va desde cero (0) en verde, sin amenaza aparente, incrementándose progresivamente dependiendo del nivel de inestabilidad hasta tornarse completamente rojo, para valores de FI de 2.0 o más correspondientes en este caso a factores de seguridad inferiores a 0.5.



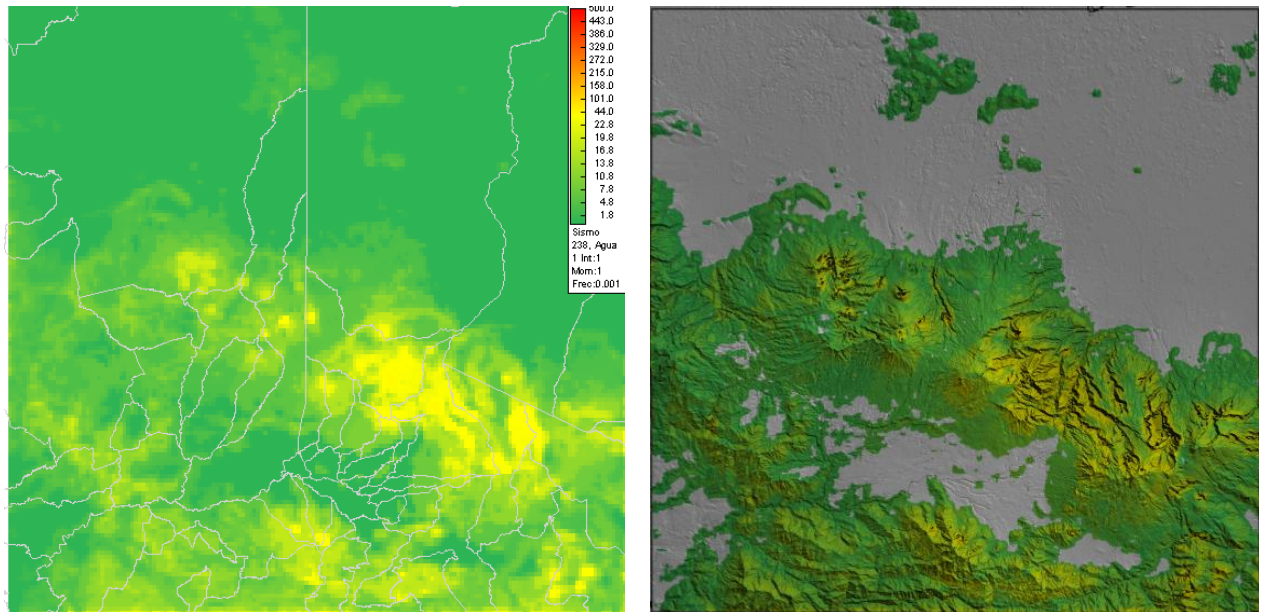


Figura 5-1
Mapa de amenaza por deslizamiento en el área de influencia del sismo. Estado de suelo seco. Análisis método Mora Vahrson.

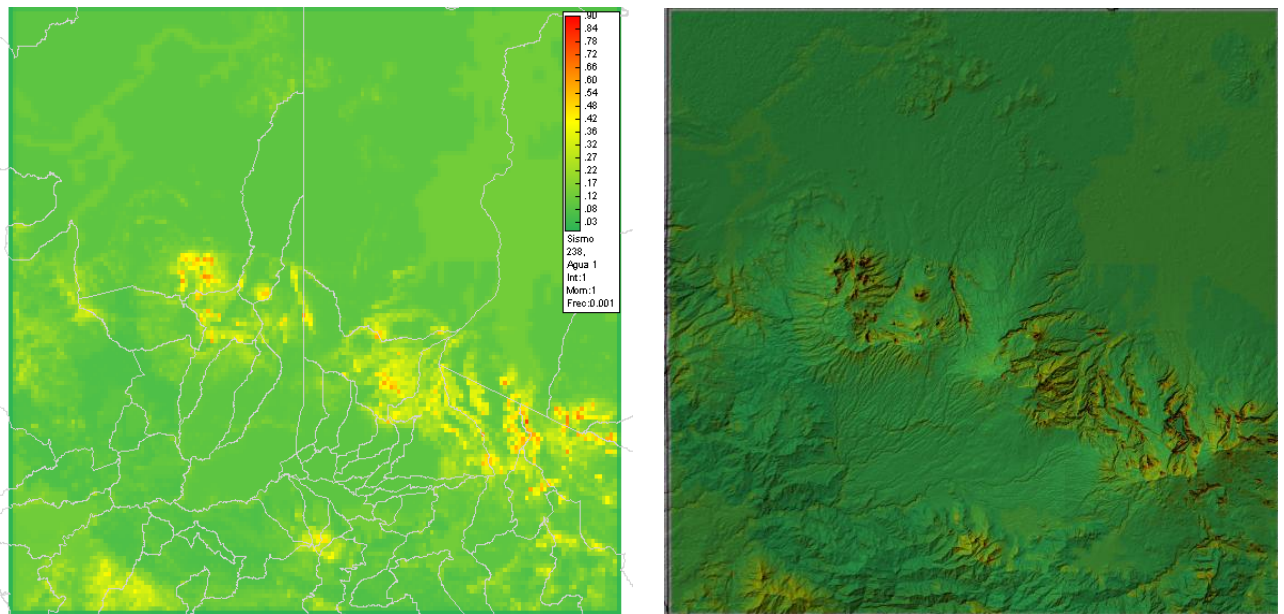


Figura 5-2

Mapa de amenaza por deslizamiento en el área de influencia del sismo. Estado de suelo seco. Análisis método de falla traslacional.

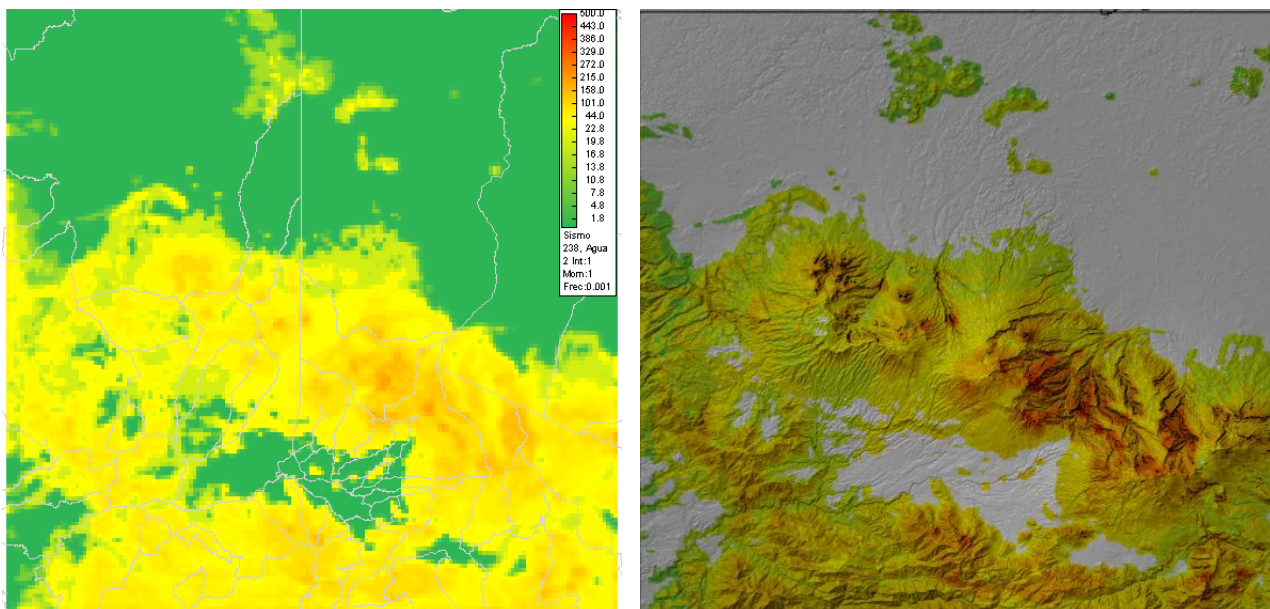


Figura 5-3

Mapa de amenaza por deslizamiento en el área de influencia del sismo. Estado de suelo saturado. Análisis método Mora Vahrson.

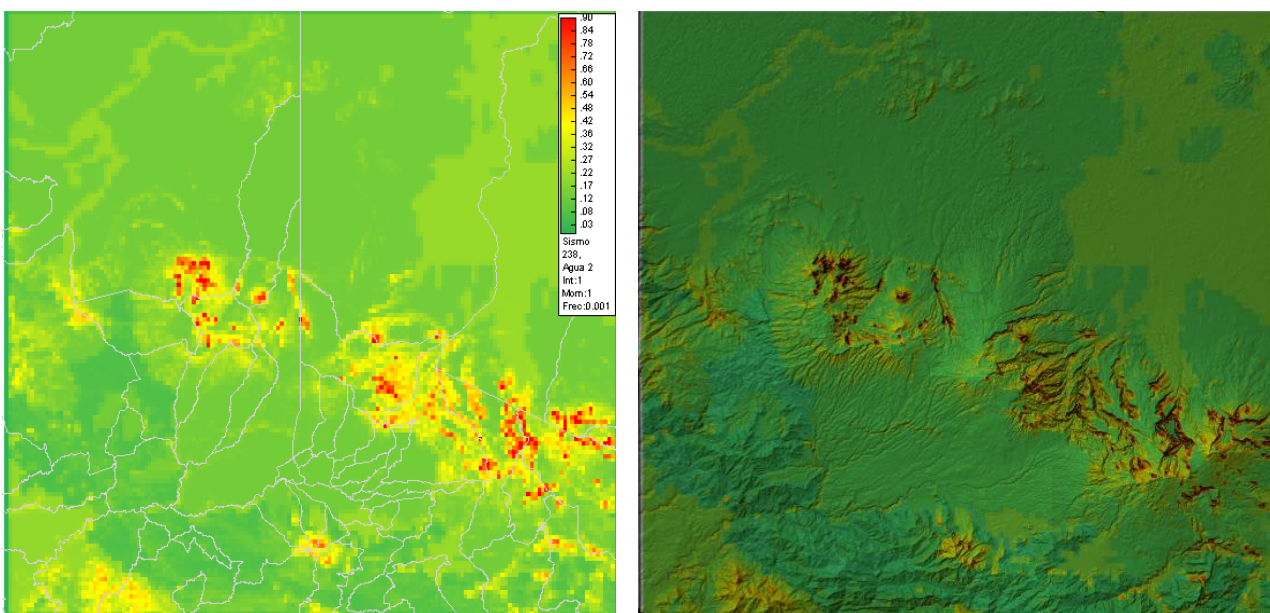
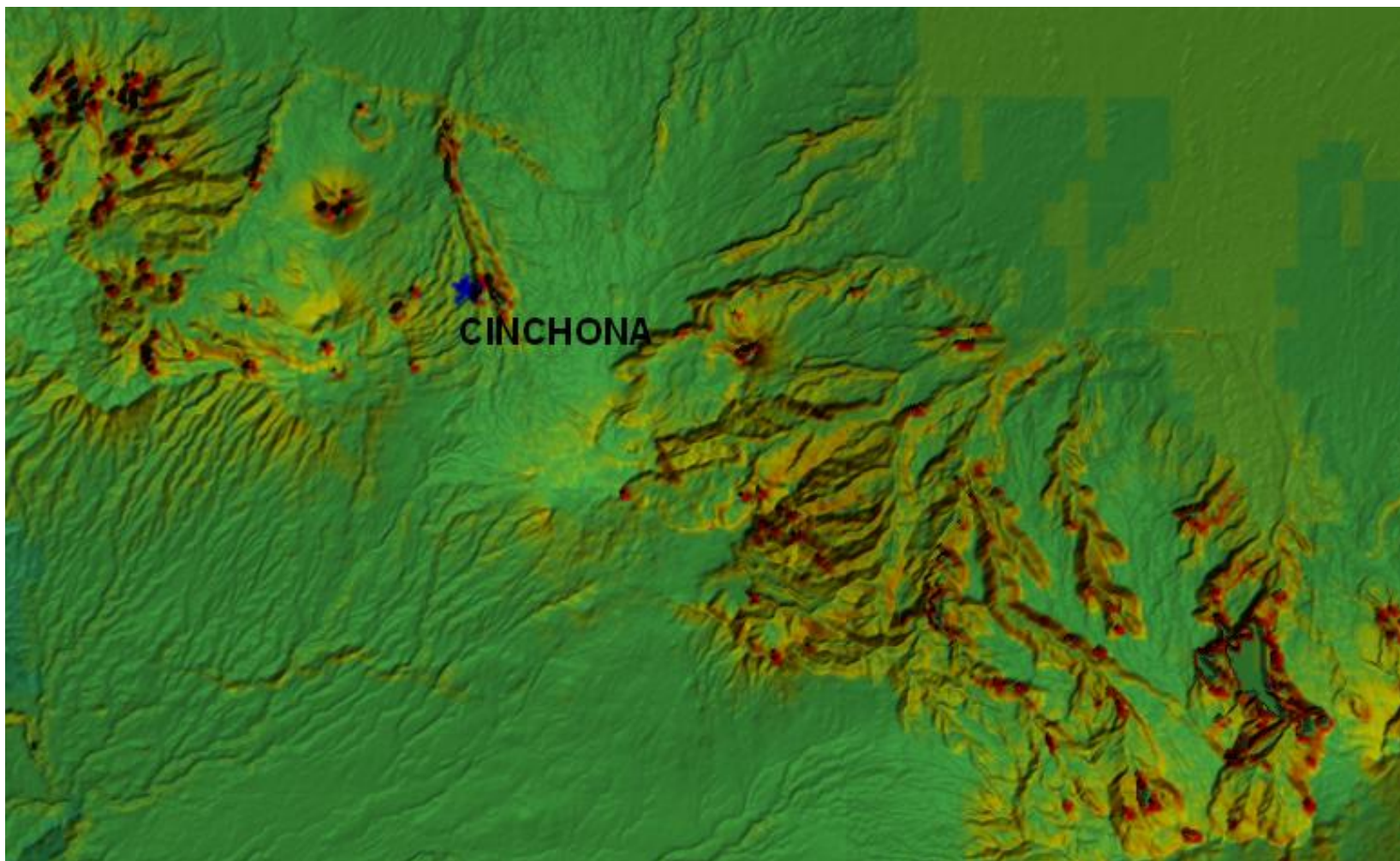


Figura 5-4

Mapa de amenaza por deslizamiento en el área de influencia del sismo. Estado de suelo saturado sin sismo. Análisis método de falla traslacional.



*Figura 5-5
Ampliación de la zona de estudio con mayor amenaza por deslizamiento. Estado de suelo saturado. Análisis método Falla traslacional.*

Si se comparan los mapas de amenaza generados por el programa ERN-Deslizamientos, empleando las metodologías Mora-Vahrson y Falla Traslacional con el mapa generalizado de deslizamientos y lodos detonados por el terremoto (ver Figura 1-2), se aprecia como la metodología de amenaza empleada sectoriza y enfatiza los lugares con predisposiciones y susceptibilidades a la ocurrencia de un deslizamiento, mostrando que la zonificación de la amenaza es un recurso indispensable en el plan de manejo territorial tanto a nivel nacional como a niveles regionales.

La identificación realizada de zonas potencialmente deslizables en la región, debe ser una actividad periódica que permita identificar adecuadamente los niveles de riesgo de las poblaciones y áreas vulnerables.

6 Conclusiones

Los análisis realizados permiten obtener las siguientes conclusiones:

- (a) Los mapas de amenaza por deslizamiento que arroja la metodología Mora- Vahrson sectorizan de manera más homogénea las zonas potencialmente deslizables, según las condiciones intrínsecas de los materiales y los factores detonantes que varían estas condiciones. En la comparación de los dos mapas de amenaza realizados por la metodología Mora – Vahrson es clara la incidencia que presenta la saturación del suelo para otras condiciones idénticas. Esto se debe a que la metodología tiene en cuenta la gran susceptibilidad de la litología a la acción del agua.
- (b) Ante el total desconocimiento de los niveles freáticos para las condiciones de análisis, factor que puede ser determinante en la valoración del factor o índice de inseguridad, es preciso seleccionar dos escenarios extremos por lo cual se toma un escenario completamente saturado y otro completamente seco.
- (c) Las zonas de mayor amenaza son aquellas con presencia de asentamientos humanos, entre los que se destacan Varablanca, San Rafael de Varablanca, Cariblanco, Ujarraz, Poasito y Colonia Virgen del Socorro, entre otras.
- (d) Los análisis realizados demuestran que, ante diferentes condiciones de saturación del suelo, pueden llegar a presentarse situaciones de riesgo en poblaciones como Alajuela, Heredia, San José, Puerto Viejo, Ciudad Quesada, Zarcero, San Pedro de Poás y Veracruz, entre otras
- (e) Los mapas de amenaza por deslizamiento generados empleando la metodología de falla traslacional, muestran un mayor detalle de las zonas que pueden presentar afectación por deslizamiento. Esto debido a que el análisis por falla plana se realiza con base en información más detallada, lográndose en general una mejor resolución en los resultados finales.
- (f) La metodología por falla plana puntualiza en mayor grado las zonas inestables en comparación con la metodología Mora – Vahrson. Los mapas generados al emplear las dos metodologías son por lo tanto complementarios y de gran ayuda en la toma de decisiones, particularmente de ordenamiento territorial.
- (g) Como era de esperarse, los sectores con mayor susceptibilidad, son las zonas ribereñas y los poblados, así como las vías construidas a media ladera y las zonas de altas pendientes.

Se debe tener en cuenta que dada la escala a la que se aplican los métodos y la información utilizada en los cálculos, estos análisis en ningún caso pretenden sustituir eventuales análisis detallados en zonas críticas. Esta metodología representa una herramienta de diagnóstico muy útil que proporciona cierto grado de precisión, con el cual es posible la toma de decisiones y el manejo de grandes áreas afectadas.

7 Acciones Recomendadas

El análisis de amenaza de deslizamiento presentado para el caso del área de estudio debe verse como una evaluación inicial que permite la cuantificación y calificación de la amenaza en esta zona y zonas cercanas considerando la mejor información disponible en el momento.

A continuación se dejan explícitas las limitaciones en la información utilizada para los análisis, lo cual debe servir de base para los planes de trabajos y estudios futuros por parte del país y las regiones con miras a mejorar la calidad y confiabilidad de estos resultados preliminares presentados.

- (a) Información Sísmica: Se puede considerar de muy buena calidad y completa para efectos del presente análisis. Sería deseable la calibración del escenario con algunos registros acelerográficos existentes.
- (b) Modelo de elevación digital: con curvas de nivel cada 20 m el análisis es capaz de detectar deslizamiento con alturas del orden de 20 a 50 m como mínimo. Nada inferior a esto. Sería ideal contar con modelos de elevación digital con curvas de nivel cada 2 m, especialmente para las áreas críticas que se desee estudiar.
- (c) Información de suelos: siempre es escasa y difícil de conseguir. Se recomienda realizar una serie de estudios de suelos para caracterización de dichas propiedades en sectores críticos y utilizando como orientación básica los tipos de formaciones geológicas y los tipos de suelo representativos en una región dada.
- (d) Información de niveles freáticos: es prácticamente inexistente. Sin embargo en la mayoría de los casos, la situación seca puede en general presentarse cuando hay largos periodos de sequia. La situación de total saturación, aunque posible, es difícil que llegue a presentarse, en especial a nivel regional.
- (e) Los resultados de los análisis de amenaza y su interpretación para la toma de decisiones debe realizarse de manera conjunta con las entidades y especialistas a cargo de la planificación del ordenamiento territorial y la atención de emergencias de la región.

Los resultados presentados anteriormente dependen directamente de la calidad y tipo de información suministrada al modelo. Entre más detallada y confiable sea la información, menor será la incertidumbre asociada a los resultados y por lo tanto el proceso de toma de decisiones podrá realizarse con mayor nivel de confianza.

El análisis de amenaza por deslizamientos presentado se convierte por lo tanto en un elemento fundamental en la gestión integral del riesgo de zonas montañosas. El proceso

exige la participación activa de entidades públicas, universidades, sector privado y de la comunidad en general relacionada con esta temática.

8 Referencias

- Montgomery, David R. Dietrich, William E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. APRIL 1994.
- Guzzetti, Reichenbach, Ardizzone, Cardinali, Galli. Estimating the quality of landslide susceptibility models. 22 May 2006.
- Mora, Sergio. Vahrson, Wilhelm-Gunter. Macrozonation methodology for landslide hazard determination. 1994.
- Milesa, S.B. Hob, C.L.. Rigorous landslide hazard zonation using Newmark's method and stochastic ground motion simulation.
- Stark, Colin P. Hovius, Niels. The characterization of landslide size distributions. 2001.
- Taylor & Francis. The stability of slopes. 2nd edition. 1999.
- Cheng, Y.M. and Lau, C.K. Slope Stability Analysis and Stabilization. New methods and insight. 2008
- Duncan, J. Michael. Wright, Stephen G. Soil Strength and Slope Stability. 2005
- Bardet, Jean-Pierre. Experimental soil Mechanics. 1997.
- Bowles, Joseph. E. Foundation Analysis and Desing. Fifth edition.
- Suarez, Jaime. Deslizamientos. Análisis Geotécnico.
- Bieniawski, Z.T. Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- Das, Braja M. Principles of geotechnical Engineering. Fifth edition.
- Red Sismológica Nacional. El terremoto de Cinchona del 8 de enero del 2009. Abril 2009.
- OVSICORI. Sobrevuelo Áreas más afectadas por el terremoto.