



COSTA RICA

TOMO I METODOLOGÍA DE MODELACIÓN PROBABILISTA DE RIESGOS NATURALES

INFORME TÉCNICO ERN-CAPRA-T2-3 MODELACIÓN PROBABILISTA DE AMENAZAS NATURALES



CEPRENAC



Inter-American Development Bank



opportunities for all



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

Consorcio conformado por:

Colombia

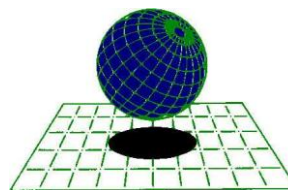
Carrera 19A # 84-14 Of 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C.



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)

Carlos Eduardo Avelar F.
Especialista ERN (MEX)

Mabel Cristina Marulanda F.
Especialista CIMNE(ESP)

César Augusto Velásquez V.
Especialista ERN (COL)

Benjamín Huerta G.
Especialista ERN (MEX)

Jairo Andrés Valcarcel T.
Especialista CIMNE(ESP)

Karina Santamaría D.
Especialista ERN (COL)

Mauro Pompeyo Niño L.
Especialista ERN (MEX)

Juan Pablo Londoño L.
Especialista CIMNE(ESP)

Mauricio Cardona O.
Asistente Técnico ERN (COL)

Isaías Martínez A.
Asistente Técnico ERN (MEX)

René Salgueiro
Especialista CIMNE(ESP)

Andrés Mauricio Torres C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Edgar Osuna H.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Nieves Lantada
Especialista CIMNE(ESP)

Diana Marcela González C.
Asistente Técnico ERN (COL)

José Juan Hernández G.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Álvaro Martín Moreno R.
Asesor Asociado (COL)

Yinsury Sodel Peña V.
Asistente Técnico ERN (COL)

Marco Torres
Asesor Asociado (MEX)

Mario Díaz-Granados O.
Asesor Asociado (COL)

Andrei Garzón B.
Asistente Técnico ERN (COL)

Johner Venicio Correa C.
Asistente Técnico ERN (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

Joaquín Toro
Especialista

Edward C. Anderson
Especialista

Oscar A. Ishizawa
Especialista

Fernando Ramírez C.
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

Tabla de contenido

1	Amenaza Sísmica.....	1-1
1.1	Introducción	1-1
1.2	Entorno Local de la Amenaza	1-1
1.2.1	Sismotectónica de Costa Rica.....	1-1
1.2.2	Tectónica de Placas	1-1
1.2.3	Sismicidad de costa rica.....	1-2
1.3	Información Empleada en la Modelación	1-2
1.3.1	Catálogo sísmico	1-2
1.3.2	Parámetros de sismicidad	1-3
1.3.3	Fuentes sísmicas empleadas.....	1-4
1.3.4	Modelo de atenuación de movimiento fuerte	1-8
1.4	Mapas de Amenaza para Costa Rica	1-9
2	Amenaza por Tsunami.....	2-1
2.1	Introducción	2-1
2.2	Información Empleada en la Modelación	2-1
2.2.1	Batimetría y Topografía.....	2-1
2.3	Parámetros del Modelo.....	2-2
2.3.1	Eventos	2-2
2.3.2	Puntos de cálculo y efectos en bahías.....	2-3
2.4	Mapas de Amenaza por Tsunami en la Costa Pacífica de Costa Rica	2-3
3	Amenaza por Huracán	3-1
3.1	Introducción	3-1
3.2	Información Empleada en la Modelación	3-1
3.2.1	Topografía	3-1
3.2.2	Batimetría	3-2
3.2.3	Áreas urbanas y uso de suelo.....	3-3
3.2.4	Registros de velocidad de viento y altura de marea.....	3-4
3.2.5	Catálogo de Huracanes.....	3-4
3.3	Parámetros del Modelo.....	3-5
3.3.1	Depuración del catálogo de huracanes.....	3-5
3.3.2	Factores de exposición topográfica al viento para Costa Rica	3-7
3.3.3	Variación de la velocidad del viento con la altura.....	3-8
3.4	Mapas de Amenaza por Huracán en Costa Rica	3-10
3.4.1	Mapas de amenaza por vientos fuertes	3-10
3.4.2	Mapas de amenaza por marea de tormenta en la costa Atlántica	3-16
3.4.3	Mapas de amenaza por lluvias huracanadas	3-20

3.4.4	Mapas de amenaza por inundación asociada a lluvias huracanadas	3-26
4	Amenaza por Lluvias Intensas e Inundación	4-1
5	Amenaza por Deslizamientos	5-1
5.1	Introducción	5-1
5.2	Información Empleada en la Modelación	5-1
5.3	Parámetros del modelo.	5-1
5.3.1	Información general.....	5-2
5.3.2	Información de eventos detonantes.....	5-2
5.4	Mapas de Amenaza por Deslizamiento.....	5-2
6	Amenaza Volcánica	6-1
6.1	Introducción	6-1
6.2	Entorno Local de la Amenaza	6-1
6.2.1	Volcán Poas	6-2
6.2.2	Volcán Arenal.....	6-7
6.2.3	Volcán Irazú	6-10
6.2.4	Volcán Turrialba	6-14
6.2.5	Volcán Rincón de la Vieja.....	6-19

Índice de figuras

FIGURA 1-1 ENTORNO TECTÓNICO DE CENTROAMÉRICA	1-2
FIGURA 1-2 CATÁLOGO SÍSMICO REGIONAL DEL PROYECTO RESIS II.....	1-3
FIGURA 1-3 FUENTES DE TIPO CORTICAL. PROYECTO RESIS II	1-6
FIGURA 1-4 FUENTES DE TIPO INTERFASE. PROYECTO RESIS II	1-7
FIGURA 1-5 FUENTES DE TIPO INTRAPLACA. PROYECTO RESIS II.....	1-8
FIGURA 1-6 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PGA [CM/S ²] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	1-10
FIGURA 1-7 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PGA [CM/S ²] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	1-11
FIGURA 1-8 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PGA [CM/S ²] PARA 2500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	1-12
FIGURA 1-9 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SA(T=1SEG) [CM/S ²] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	1-13
FIGURA 1-10 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SA(T=1SEG) [CM/S ²] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	1-14
FIGURA 1-11 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SA(T=1SEG) [CM/S ²] PARA 2500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	1-15
FIGURA 2-1 IMAGEN DE LA BATIMETRÍA Y TOPOGRAFÍA EMPLEADA PARA EL MODELO DE TSUNAMI EN COSTA RICA.....	2-2
FIGURA 2-2 PUNTOS DE CÁLCULO PARA TSUNAMI.	2-3
FIGURA 2-3 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INUNDACIÓN [M] PARA 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	2-1
FIGURA 2-4 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INUNDACIÓN [M] PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	2-2
FIGURA 2-5 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INUNDACIÓN [M] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	2-3
FIGURA 2-6 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INUNDACIÓN [M] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	2-4
FIGURA 3-1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN PARA COSTA RICA	3-2
FIGURA 3-2 IMAGEN DE LA BATIMETRÍA EMPLEADA PARA EL MODELO DE MAREA DE TORMENTA EN COSTA RICA	3-3
FIGURA 3-3 POLÍGONOS DE ÁREAS URBANAS Y USO DE SUELO PARA COSTA RICA	3-4
FIGURA 3-4 TRAYECTORIA DE CICLONES TROPICALES PARA LOS OCÉANOS PACÍFICO (IZQ.) Y ATLÁNTICO (DER.) HASTA EL AÑO 2007 DE ACUERDO CON LA INFORMACIÓN DE LA BASE DE DATOS HURDAT DE LA NOAA.	3-5
FIGURA 3-5 CICLONES TROPICALES CON TRAYECTORIA A MENOS DE 200KM DE LA COSTA ATLÁNTICA DE COSTA RICA, CON CATEGORÍA MAYOR O IGUAL A HURACÁN 1 EN LA ESCALA SAFFIR-SIMPSON.....	3-6
FIGURA 3-6 FACTORES DE EXPOSICIÓN TOPOGRÁFICA POR VIENTO PARA COSTA RICA	3-8
FIGURA 3-7 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO CON LA ALTURA Y PARA DIFERENTES TIPOS DE TERRENO.....	3-10
FIGURA 3-8 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LA VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO [KM/H] PARA 20 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-11
FIGURA 3-9 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LA VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO [KM/H] PARA 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-12
FIGURA 3-10 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LA VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO [KM/H] PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-13

FIGURA 3-11 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LA VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO [KM/H] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-14
FIGURA 3-12 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LA VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO [KM/H] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-15
FIGURA 3-13 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL TIRANTE DE INUNDACIÓN [M] PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-16
FIGURA 3-14 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL TIRANTE DE INUNDACIÓN [M] PARA 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-17
FIGURA 3-15 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL TIRANTE DE INUNDACIÓN [M] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-18
FIGURA 3-16 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL TIRANTE DE INUNDACIÓN [M] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-19
FIGURA 3-17 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL TIRANTE DE INUNDACIÓN [M] PARA 2500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-20
FIGURA 3-18 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE PRECIPITACIÓN [MM] PARA 20 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-21
FIGURA 3-19 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE PRECIPITACIÓN [MM] PARA 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-22
FIGURA 3-20 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE PRECIPITACIÓN [MM] PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-23
FIGURA 3-21 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE PRECIPITACIÓN [MM] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-24
FIGURA 3-22 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE PRECIPITACIÓN [MM] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-25
FIGURA 3-23 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN [M] PARA 20 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-27
FIGURA 3-24 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN [M] PARA 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-28
FIGURA 3-25 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN [M] PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-29
FIGURA 3-26 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN [M] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-30
FIGURA 3-27 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN [M] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	3-31
FIGURA 4-1 DISTRIBUCIÓN DE ESTACIONES CON INFORMACIÓN DISPONIBLE EN NOAA.....	4-1
FIGURA 5-1 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN CONDICIONES SECAS CON SISMO. CALCULADO CON EL MÉTODO DE MORA-VARHSON	5-4
FIGURA 5-2 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN CONDICIONES HÚMEDAS CON SISMO. CALCULADO CON EL MÉTODO DE MORA-VARHSON	5-5
FIGURA 5-3 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN CONDICIONES SECAS SIN SISMO. CALCULADO CON EL MÉTODO DE FALLA TRASLACIONAL	5-6
FIGURA 5-4 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN CONDICIONES SATURADAS SIN SISMO. CALCULADO CON EL MÉTODO DE FALLA TRASLACIONAL	5-7
FIGURA 6-1 LOCALIZACIÓN DE PRINCIPALES VOLCANES EN COSTA RICA	6-2
FIGURA 6-2 VOLCÁN POAS, A LA DERECHA (ARRIBA) CONO BOTOS Y EN LA IZQUIERDA (MEDIO) CONO VON FRANTZIUS CON SU LAGO ACIDO.	6-3
FIGURA 6-3 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR FLUJOS DE LAVA EN EL VOLCÁN POAS	6-5
FIGURA 6-4 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR FLUJOS PIROCLÁSTICOS EN EL VOLCÁN POAS	6-6
FIGURA 6-5 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR CAÍDA DE CENIZAS [M] EN EL VOLCÁN POAS	6-7
FIGURA 6-6 VOLCÁN ARENAL	6-8
FIGURA 6-7 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR FLUJOS DE LAVA EN EL VOLCÁN ARENAL	6-9

FIGURA 6-8 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR FLUJOS PIROCLÁSTICOS EN EL VOLCÁN ARENAL ...	6-10
FIGURA 6-9 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR CAÍDA DE CENIZAS [M] EN EL VOLCÁN ARENAL ...	6-10
FIGURA 6-10 VOLCÁN IRAZÚ	6-11
FIGURA 6-11 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR FLUJOS DE LAVA EN EL VOLCÁN IRAZÚ	6-13
FIGURA 6-12 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR FLUJOS PIROCLÁSTICOS EN EL VOLCÁN IRAZÚ	6-13
FIGURA 6-13 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR CAÍDA DE CENIZAS [M] EN EL VOLCÁN IRAZÚ	6-14
FIGURA 6-14 VOLCÁN TURRIALBA	6-15
FIGURA 6-15 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR FLUJOS DE LAVA EN EL VOLCÁN TURRIALBA	6-17
FIGURA 6-16 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR FLUJOS PIROCLÁSTICOS EN EL VOLCÁN TURRIALBA	6-18
FIGURA 6-17 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR CAÍDA DE CENIZAS [M] EN EL VOLCÁN TURRIALBA.	6-19
FIGURA 6-18 VOLCÁN RINCÓN DE LA VIEJA	6-20
FIGURA 6-19 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR FLUJOS PIROCLÁSTICOS EN EL VOLCÁN RINCÓN DE LA VIEJA	6-22
FIGURA 6-20 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR CAÍDA DE CENIZAS [M] EN EL VOLCÁN RINCÓN DE LA VIEJA	6-22

Índice de tablas

TABLA 1-1 PARÁMETROS DE SISMICIDAD DE LAS FUENTES.....	1-4
TABLA 1-2 COEFICIENTES DEL MODELO DE ATENUACIÓN DE CLIMENT ET AL. 1994	1-9
TABLA 3-1 PARÁMETROS PRINCIPALES (VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO, CATEGORÍA, NOMBRE Y FECHA) DE LOS CICLONES TROPICALES CONSIDERADOS.	3-6
TABLA 3-2 DISTRIBUCIÓN POR CATEGORÍA EN LA ESCALA SAFFIR-SIMPSON, DE LOS CICLONES TROPICALES CONSIDERADOS.	3-7
TABLA 3-3 FACTORES DE EXPOSICIÓN TOPOGRÁFICA AL VIENTO PARA COSTA RICA	3-7
TABLA 3-4 PARÁMETROS α Y δ PARA LOS TIPOS DE TERRENO MÁS REPRESENTATIVOS EN LA REGIÓN COSTARRICENSE	3-9
TABLA 4-1 REGISTROS DISPONIBLES POR ESTACIÓN EN LA CUENCA DEL RIO GRANDE DE TARCOLES	4-2
TABLA 5-1. ANÁLISIS DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO REALIZADOS	5-3
TABLA 6-1 VOLCANES EN COSTA RICA	6-1
TABLA 6-2 PARÁMETROS DEL MODELO DEL VOLCÁN POAS	6-4
TABLA 6-3 PARÁMETROS DEL MODELO DEL VOLCÁN ARENAL	6-9
TABLA 6-4 PARÁMETROS DEL MODELO DEL VOLCÁN IRAZÚ	6-12
TABLA 6-5 PARÁMETROS DEL MODELO DEL VOLCÁN TURRIALBA.....	6-16
TABLA 6-6 PARÁMETROS DEL MODELO DEL VOLCÁN RINCÓN DE LA VIEJA	6-21

1 Amenaza Sísmica

1.1 Introducción

Este capítulo presenta la reevaluación de la amenaza sísmica de Costa Rica, empleando los avances presentados en el proyecto regional RESIS II (NORSAR et. al. 2008), el cual constituye el estudio más avanzado a la fecha con relación a evaluación de amenaza sísmica en América Central. A partir de la sismotectónica de la región, y la sismicidad registrada e histórica, se definieron una serie de fuentes sismogénicas, las cuales cubren la totalidad del territorio centroamericano, y conservan las condiciones de sismicidad generales y su variación regional.

1.2 Entorno Local de la Amenaza

1.2.1 *Sismotectónica de Costa Rica*

La historia geológica de Costa Rica tiene sus inicios alrededor del periodo Jurásico Inferior-Superior (hace 200 millones de años). La interacción de las placas Caribe, Cocos y Sur América promovió el desarrollo de una gran actividad volcánica durante dicho periodo, acompañada de surgimiento de dorsales oceánicas y crestas submarinas. La orogénesis comienza entonces con la formación de pequeñas islas volcánicas orientadas hacia el este, conformando el arco externo que constituye actualmente las regiones de la Península de Nicoya, Playa Herradura, Península de Osa y Punta Burica.

Durante el Eoceno Inferior-Medio (hace 60 millones de años) desapareció el archipiélago del arco externo, a medida que emergía un nuevo conjunto de islas conocidas como islas Guanarivas. Durante el Oligoceno (hace 25 millones de años), las Guanarivas se hundieron bajo el océano, resultando cubiertas por material detrítico como consecuencia de la degradación y posterior sedimentación de formaciones recientes.

La cordillera de Talamanca emergió durante el periodo Mioceno Superior (hace 1.8 millones de años). La actividad tectónica asociada a la formación de la cordillera de Talamanca, estaría relacionada en el Plioceno al surgimiento de los territorios actuales de Nicaragua, Costa Rica y Panamá, que conforman el eslabón ístmico entre las provincias septentrional y meridional del continente americano. En Costa Rica el vulcanismo dio origen a la Cordillera Volcánica Central y a la Cordillera Volcánica de Guanacaste.

1.2.2 *Tectónica de Placas*

Costa Rica se encuentra ubicada en la zona de interacción de las placas Cocos y Caribe, en el inicio de la zona de subducción. Al suroriente del país se inicia el punto triple o zona de convergencia de las placas Cocos, Caribe y Nazca, en la región de Golfo Dulce (ver Figura

1-1). Esta zona de convergencia posee una alta sismicidad, razón por la cual es común la presencia de enjambres sísmicos en esta región del país.

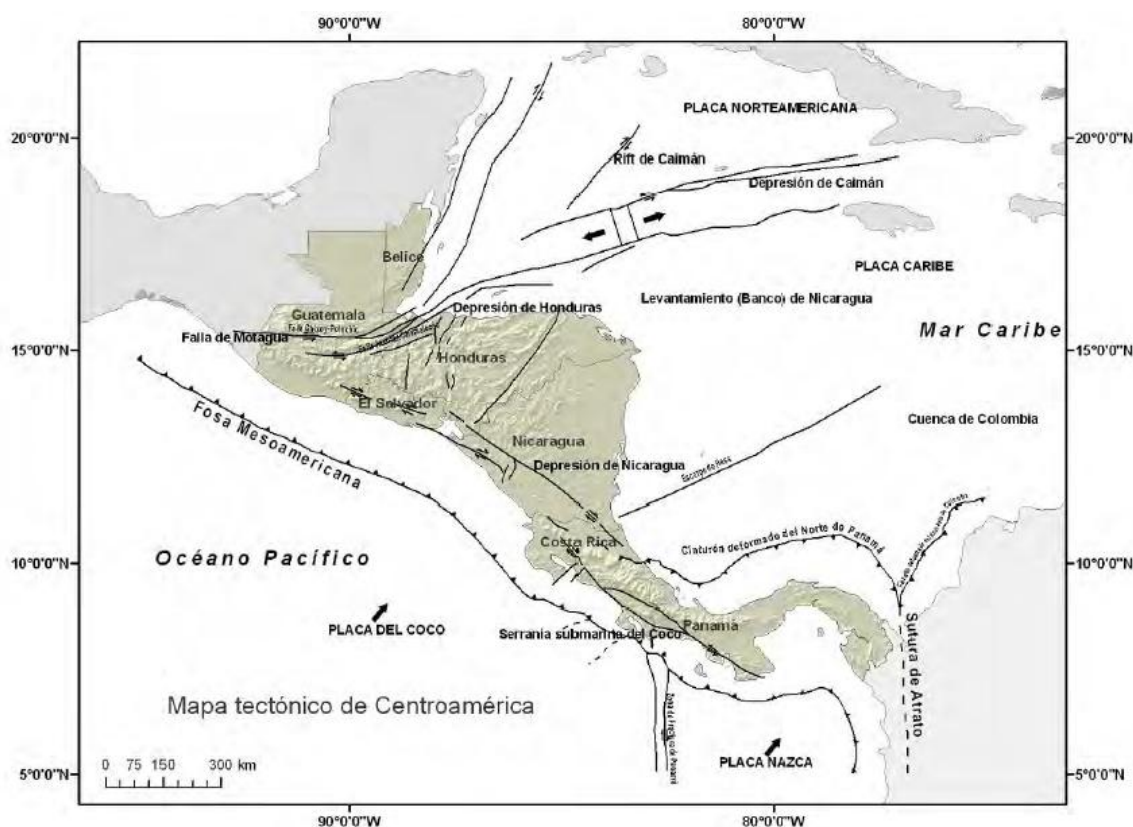


Figura 1-1
Entorno Tectónico de Centroamérica
(Fuente: RESIS II. Informe Final.)

1.2.3 Sismicidad de costa rica

La ocurrencia de eventos sísmicos en Costa Rica está relacionada con la zona de subducción del Pacífico. La subducción es capaz de generar eventos sísmicos de magnitud importante (8+), a profundidades que son variables a medida que se adentra en el continente, siendo más probable la generación de un sismo relativamente superficial en cercanías a la costa Pacífica, situación que implica una importante amenaza por tsunamis sobre la infraestructura y poblaciones expuestas.

1.3 Información Empleada en la Modelación

1.3.1 Catálogo sísmico

Se trabajó con un catálogo sísmico regional (RESIS II), compilado a partir de catálogos individuales recopilados del Centro sismológico para América Central (CASC), y catálogos

nacionales de El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá, el cual cuenta con 29.918 sismos de magnitud M_w igual o superior a 3.5. La Figura 1-2 presenta el catálogo de eventos total para el proyecto RESIS II.

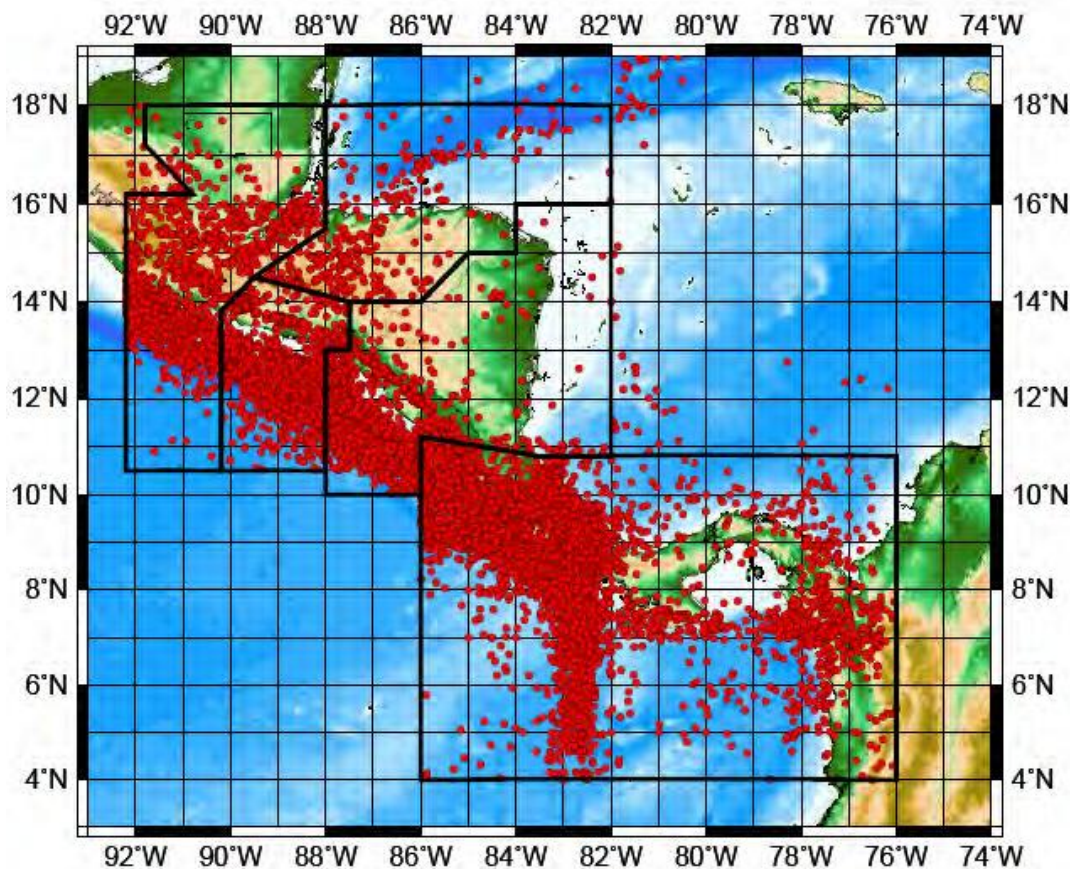


Figura 1-2

Catálogo sísmico regional del proyecto RESIS II

(Tomado de Proyecto RESIS II Evaluación de la Amenaza Sísmica en Centroamérica, 2008)

1.3.2 Parámetros de sismicidad

Cada una de las fuentes sismogénicas se caracteriza mediante una serie de parámetros de sismicidad los cuales se determinan con base en la información sísmica disponible. Estos parámetros son los siguientes:

- **Recurrencia de magnitudes:** se identifica mediante el parámetro β que representa la pendiente promedio de la curva de recurrencia de magnitudes (curva de número de eventos con magnitud mayor que M , versus magnitud sísmica M) en la zona de magnitudes bajas.
- **Magnitud máxima:** se estima con base en la máxima longitud de ruptura posible de cada una de las fuentes y en otras características morfotectónicas.

- Tasa de recurrencia de sismos con magnitud mayor que 4.5: corresponde al número promedio de eventos por año de sismos con magnitud mayor que 4.5 que ocurren en una determinada fuente.

1.3.3 Fuentes sísmicas empleadas

El modelo de cálculo de la amenaza sísmica se basa en la información de fuentes sismogénicas a nivel regional. Los parámetros de las fuentes sísmicas nacionales son los mismos que los determinados en el estudio RESIS II. El modelo de amenaza sísmica queda conformado por 53 fuentes regionales, 37 de las cuales son de tipo cortical, y 16 profundas. En la Tabla 1-1 se presentan los parámetros de caracterización de las fuentes empleadas en el presente estudio. En la Figura 1-3, Figura 1-4, y Figura 1-5 se presenta la distribución geográfica de las fuentes sismogénicas a nivel regional.

Tabla 1-1
Parámetros de sismicidad de las fuentes.
(Se resaltan las fuentes particulares de Costa Rica)

Nombre zona	Código	Prof (Km)	λ_0	β	Mu	Mo
Guat. Pacífico Ctral.	G1	20	3.51	2.05	7.5	4.5
Guat-El.Salv.Antearco.Ctrl	G2-S2	20	1.6	2.22	6.3	4.5
Guat. Acrc.Volc.Oeste	G3	10	0.18	1.35	6.7	4.5
Guat. Arc.Volc.Este	G4	10	0.65	1.63	7	4.5
Guat-Sal-Hon. Depresión ctrl.	G5-S5-H1	10	0.97	1.94	6.8	4.5
Guat. Polich-Motagua Oeste	G6	10	1.32	1.88	7.8	4.5
Guat. Poloch-Motagoa NE	G7	10	0.93	1.8	7.8	4.5
Guat. Norte (Peten-Belice)	G8	10	0.75	1.71	6.7	4.5
Hond. Altiplano Central	H2	10	0.73	2.62	6.3	4.5
Hond-Nic.Zona Gayape	H3-N11	10	0.36	2.38	6.3	4.5
El Salv.Pacífico Central	S1	20	9.77	3.42	7.5	4.5
El Salv. Arco Volcánico ctrl.	S3	10	1.18	1.92	7	4.5
Salv.Nic.ArcVolc (G.Fonsec)	S4-N5-H4	10	0.52	2.11	6.6	4.5
Nic. Pacífico Oeste	N1	10	13.73	2.67	8	4.5
Nic. Pacíf. SE- CR Papagayo	N2-C1	20	25.03	3.28	7.4	4.5
Nic. Antearco Oeste	N3	20	1.35	1.96	6.8	4.5
Nic. Antearco Este	N4	20	1.05	3.42	6.8	4.5
Nic. Arco Volc. O-Ctral	N6-N7	10	1.68	2.07	6.5	4.5
Nic. Arco Volc. SE	N8	10	0.27	1.4	6.8	4.5
Nic. Depres. Tras Arco	N9-N10	10	0.24	0.97	6.8	4.5
Nic. Caribe Sur	N12	10	0.44	2.53	6.2	4.5
Nic. Caribe Noroeste	N13-N14	10	0.57	2.2	6.2	4.5
CR. Antearco Noroeste	C2	20	2.2	2.27	7.2	4.5
CR. Ante Acto Pac. Ctral.	C3	15	4.56	2.11	7.3	4.5
Pan-CR.ZFP-Burica	P1-C4	5	19.61	2.37	7.5	4.5

CR. Arc.Voc.Guanacaste	C5	10	1	2.04	6.6	4.5
CR. Cord. Volc. Ctral	C6	10	1.09	2.02	7.1	4.5
CR-Talamanca.	C7	10	2.76	2.73	7.1	4.5
CR. Trascasco Norte	C9	10	0.25	1.99	6.3	4.5
CR. Carib.Ctral-Parismina	C10	20	0.44	2.41	6.2	4.5
Pan. Cint.Def.Sur-Pan	P2	10	2.97	2.05	7.1	4.5
Pan. Antearo Colombia	P3	20	0.73	1.95	7	4.5
Pan. Zona de Sutura Atrato	P4	10	1.93	2.2	7.2	4.5
Pan Occidental	P5	10	0.89	3.12	6.5	4.5
Pan. Central	P6	10	0.08	2.23	6.7	4.5
Pan. Este-Darién	P7	10	1.12	1.61	7.4	4.5
Pan.Cint.Def.N.Pan-Limón	P8-C8	15	2.6	1.94	7.8	4.5
Guat. Interplaca	Gsi9	26 -70	2.14	1.89	7.9	4.5
El Salv. Interplaca	Ssi5	26 -70	3.93	2.27	7.9	4.5
Nic.Interplaca Noroeste	Nsi15	26 -70	4.32	3.09	7.9	4.5
Nic. Interplaca Sureste	Nsi16	26 -70	1.94	1.8	7.9	4.5
CR. Interplaca Nicoya	Csi11	26 -63	0.38	1.14	7.8	4.5
CR. Interplaca Quepos	Csi12	26 -51	0.65	2	7	4.5
CR. Interplaca Osa	Csi13	26 -52	0.14	1.02	7.4	4.5
Pan. Interplaca Sur.Pan	Psi9	26 -50	0.58	2.08	7.1	4.5
Pan.InterpS.Blas.Darién -Chocó	Psi10	50 Fijo	1.16	1.72	7.5	4.5
Guat. Intraplaca	Gsp10	61- 250	5	2.11	7.9	4.5
El Salv. Intraplaca	Ssp6	61- 200	4.49	2.4	7.9	4.5
Nic. Intraplaca	Nsp17	61- 200	13.76	2.78	7.3	4.5
CR. Intraplaca NW	Csp14	40- 177	0.98	2.42	7	4.5
CR. Intraplaca Central	Csp15	40- 155	0.54	1.56	7.4	4.5
CR. Intraplaca SE	Csp16	40- 82	0.11	1.45	6.8	4.5
Pan. Intraplaca Sur	Psp11	50- 100	0.14	1.2	7.1	4.5

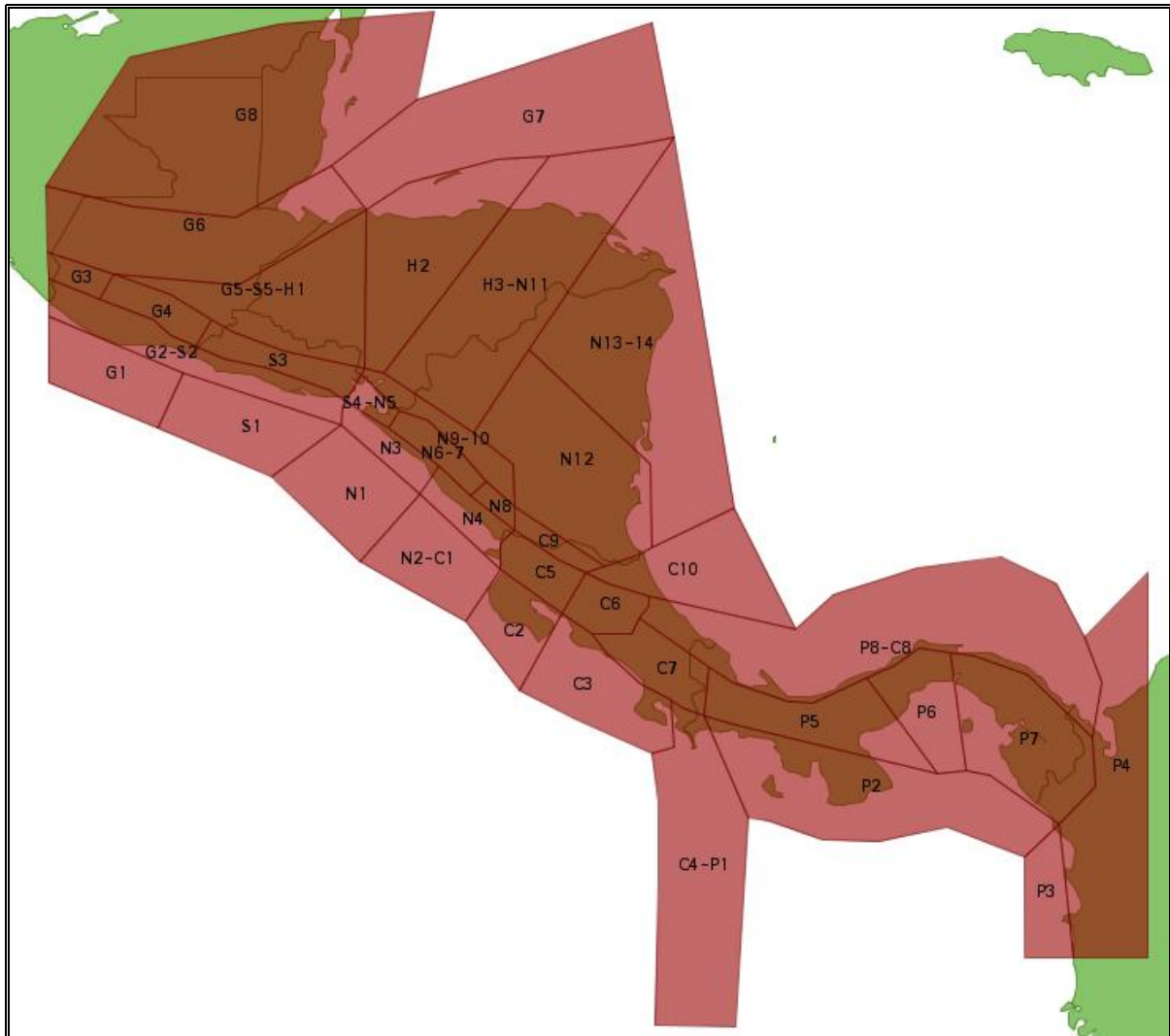


Figura 1-3
Fuentes de tipo cortical. Proyecto RESIS II



Figura 1-4
Fuentes de tipo interfase. Proyecto RESIS II



Figura 1-5
Fuentes de tipo intraplaca. Proyecto RESIS II

1.3.4 Modelo de atenuación de movimiento fuerte

Como modelo de atenuación de ondas sísmicas se adoptó el propuesto por Climent et al. 1994, el cual fue generado con sismos de la región y otras regiones tectónicamente similares. La función de atenuación se basa en la siguiente ecuación general.

$$\ln A = c_1 + c_2 M + c_3 \ln R + c_4 R + c_5 S \quad (\text{Ec. 1})$$

donde M es magnitud de momento, R es la distancia hipocentral, y S es un factor de suelo, que vale cero para sitios en roca y 1 para sitios en suelo blando. Los coeficientes c se definen como se muestra en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2
Coefficientes del modelo de atenuación de Climent et al. 1994

A	T [seg]	c1	c2	c3	c4	c5	σ
PSV	4	-7.441	1.007	-0.601	-0.0004	0.496	0.73
PSV	2	-7.348	1.128	-0.728	-0.00053	0.536	0.79
PSV	1	-6.744	1.081	-0.756	-0.00077	0.588	0.82
PSV	0.5	-5.862	0.917	-0.726	-0.00107	0.566	0.82
PSV	0.2	-4.876	0.642	-0.642	-0.00156	0.47	0.82
PSV	0.1	-4.726	0.483	-0.581	-0.00199	0.381	0.8
PSV	0.05	-5.487	0.447	-0.55	-0.00246	0.309	0.78
PGA		-1.687	0.553	-0.537	-0.00302	0.327	0.75

1.4 Mapas de Amenaza para Costa Rica

Se calculó la amenaza sísmica de Costa Rica para varios periodos estructurales y varios periodos de retorno. Los mapas de amenaza uniforme que se presentan a continuación, permiten visualizar la distribución de las intensidades máximas probables debidas a la ocurrencia de sismos simultáneos en todas las fuentes generadoras, para el periodo de retorno correspondiente. Son mapas de amenaza indicativos del peligro específico de la zona, y sus aplicaciones permiten adoptar criterios para la zonificación de amenaza, insumo para normativas de diseño y planes de socialización del riesgo.

A continuación se presentan los mapas de amenaza calculados para Costa Rica, para aceleración máxima del terreno (PGA), y aceleración espectral para periodo estructural de 1 segundo, para periodos de retorno de 500, 1000 y 2500 años. Los cálculos fueron realizados empleando el programa CRISIS 2007 (Ordaz et. al. 2007)

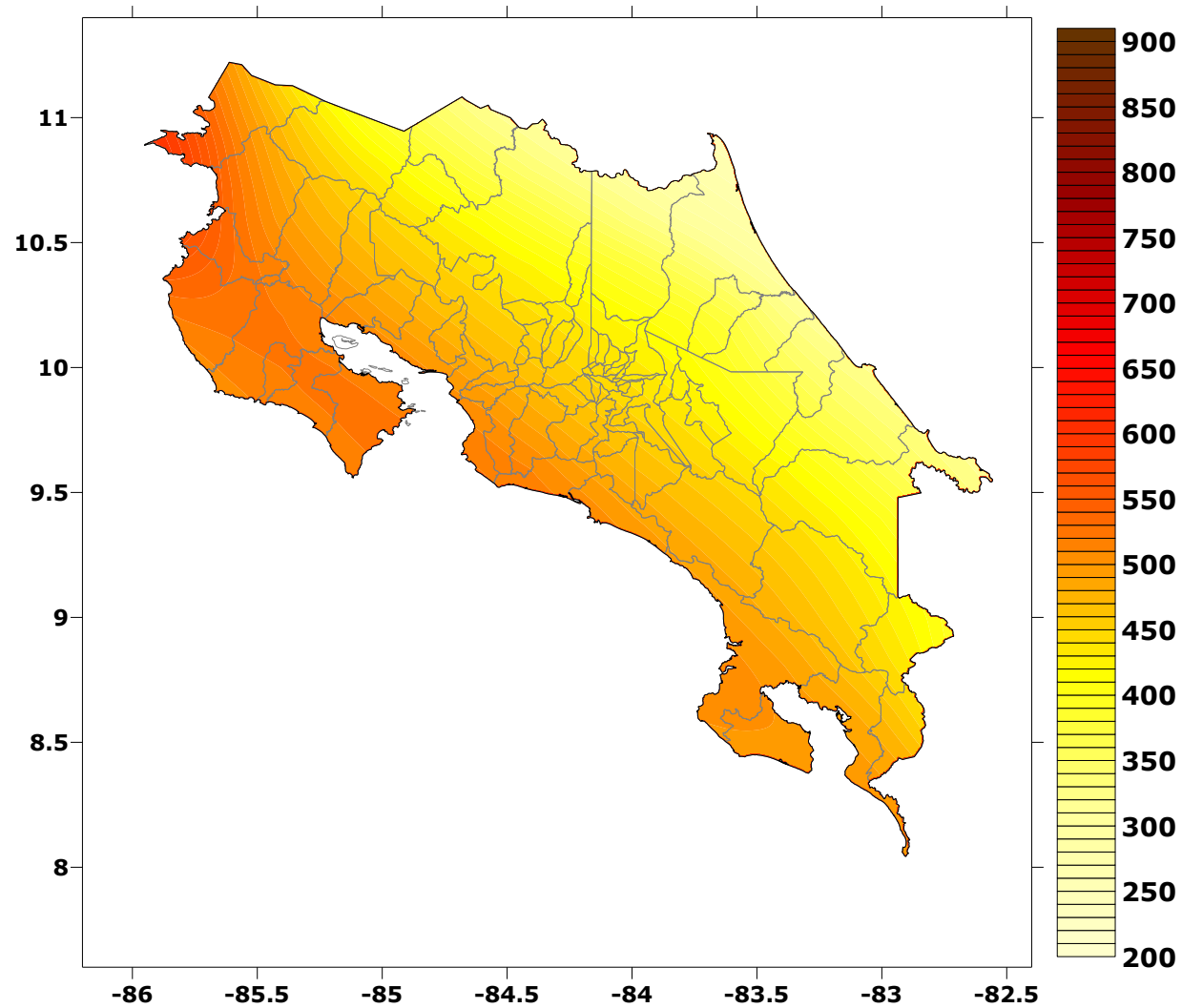


Figura 1-6
Mapa de distribución espacial de PGA [cm/s²] para 500 años de periodo de retorno

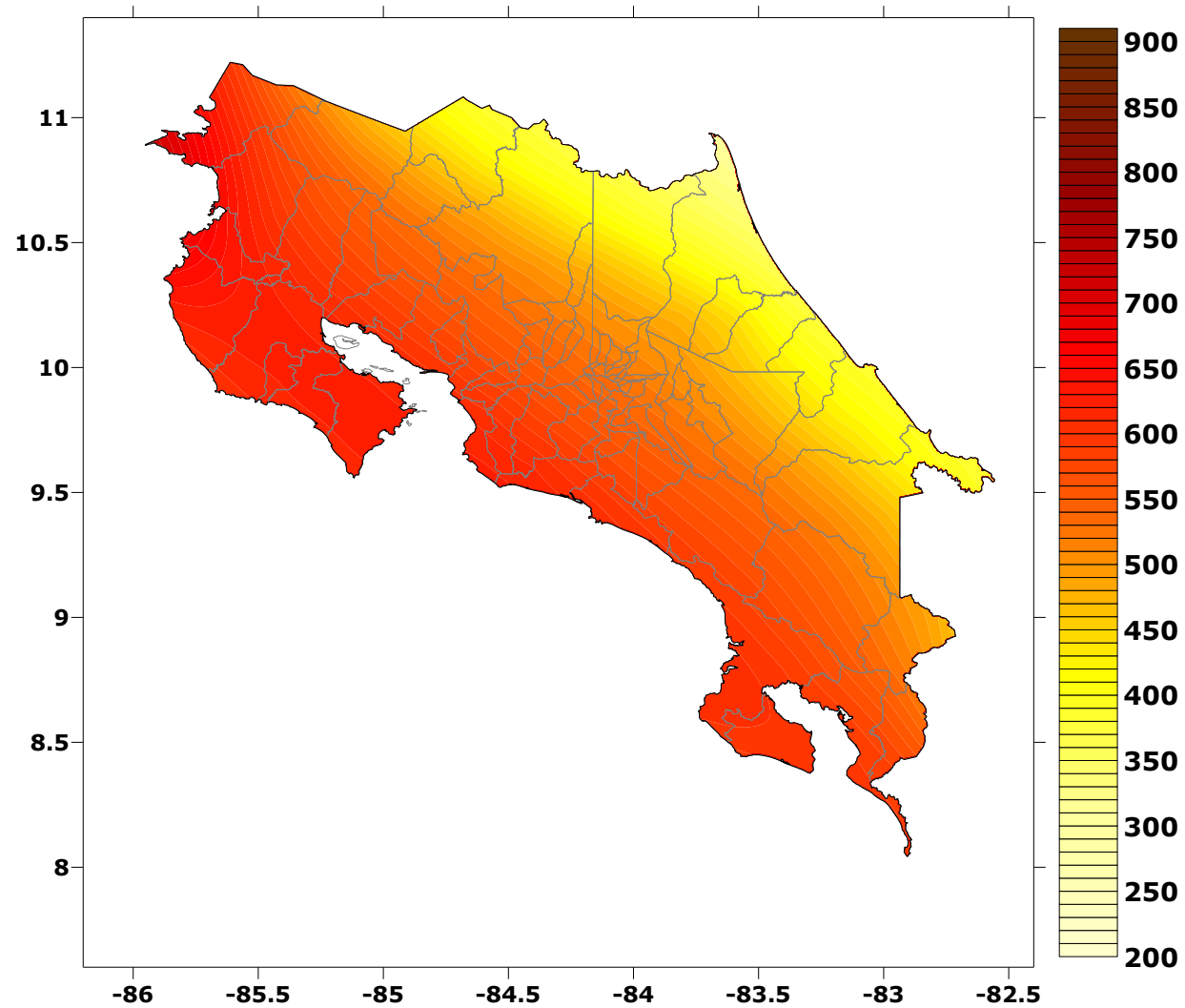


Figura 1-7
Mapa de distribución espacial de PGA [cm/s²] para 1000 años de periodo de retorno

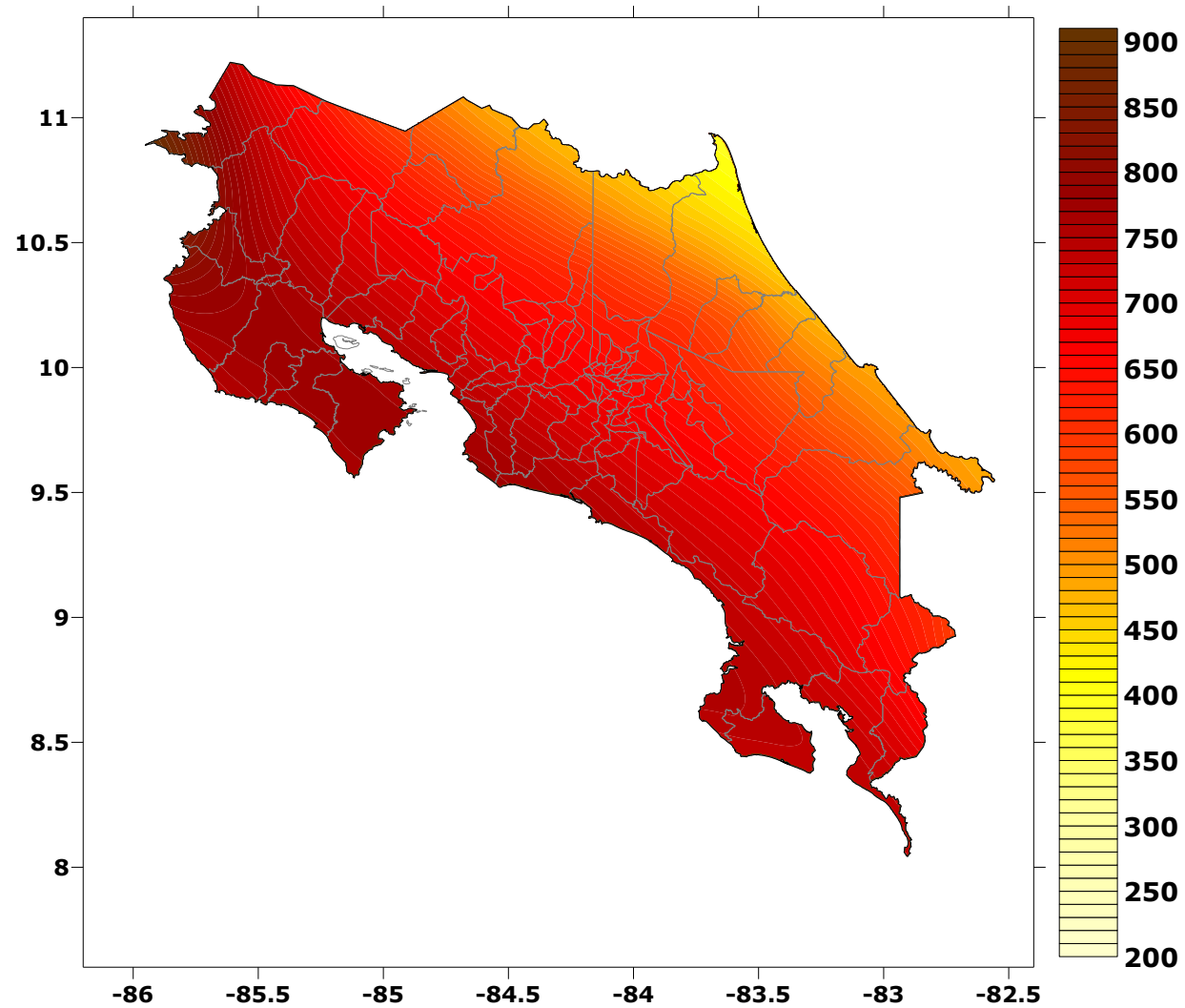


Figura 1-8
Mapa de distribución espacial de PGA [cm/s²] para 2500 años de periodo de retorno

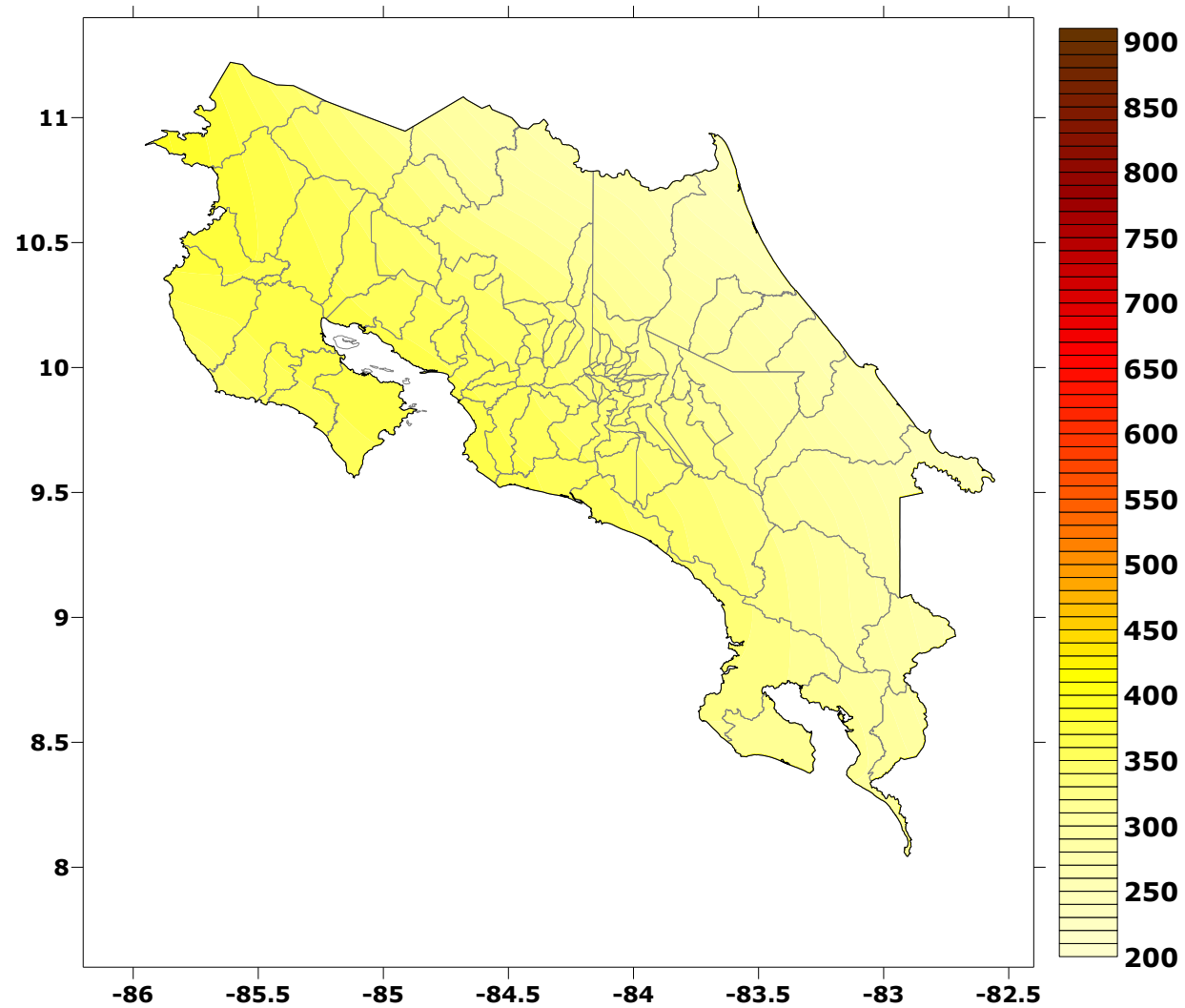


Figura 1-9
Mapa de distribución espacial de $S_a(T=1\text{seg})$ [cm/s²] para 500 años de periodo de retorno

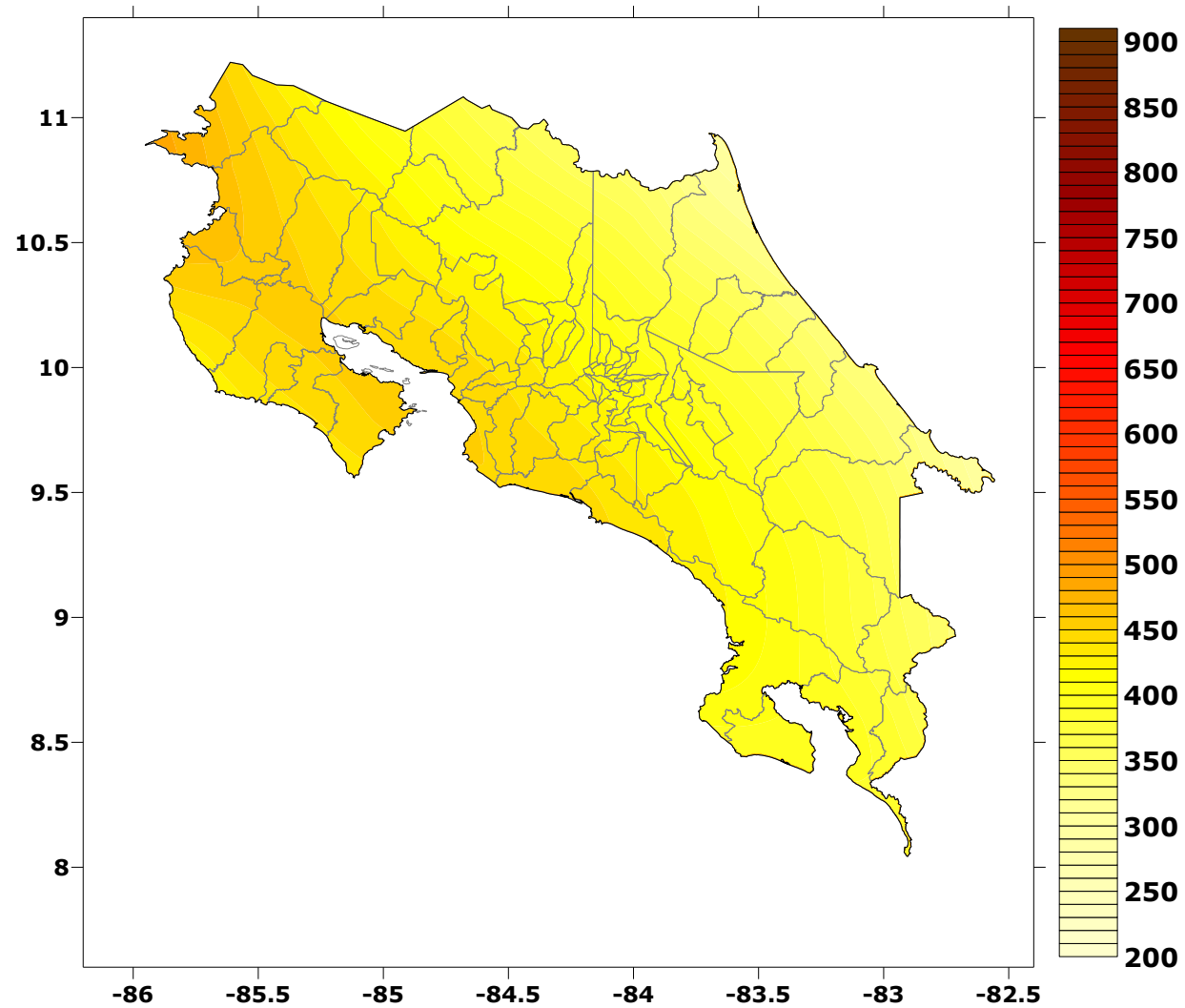


Figura 1-10
Mapa de distribución espacial de $S_a(T=1\text{seg})$ [cm/s²] para 1000 años de periodo de retorno

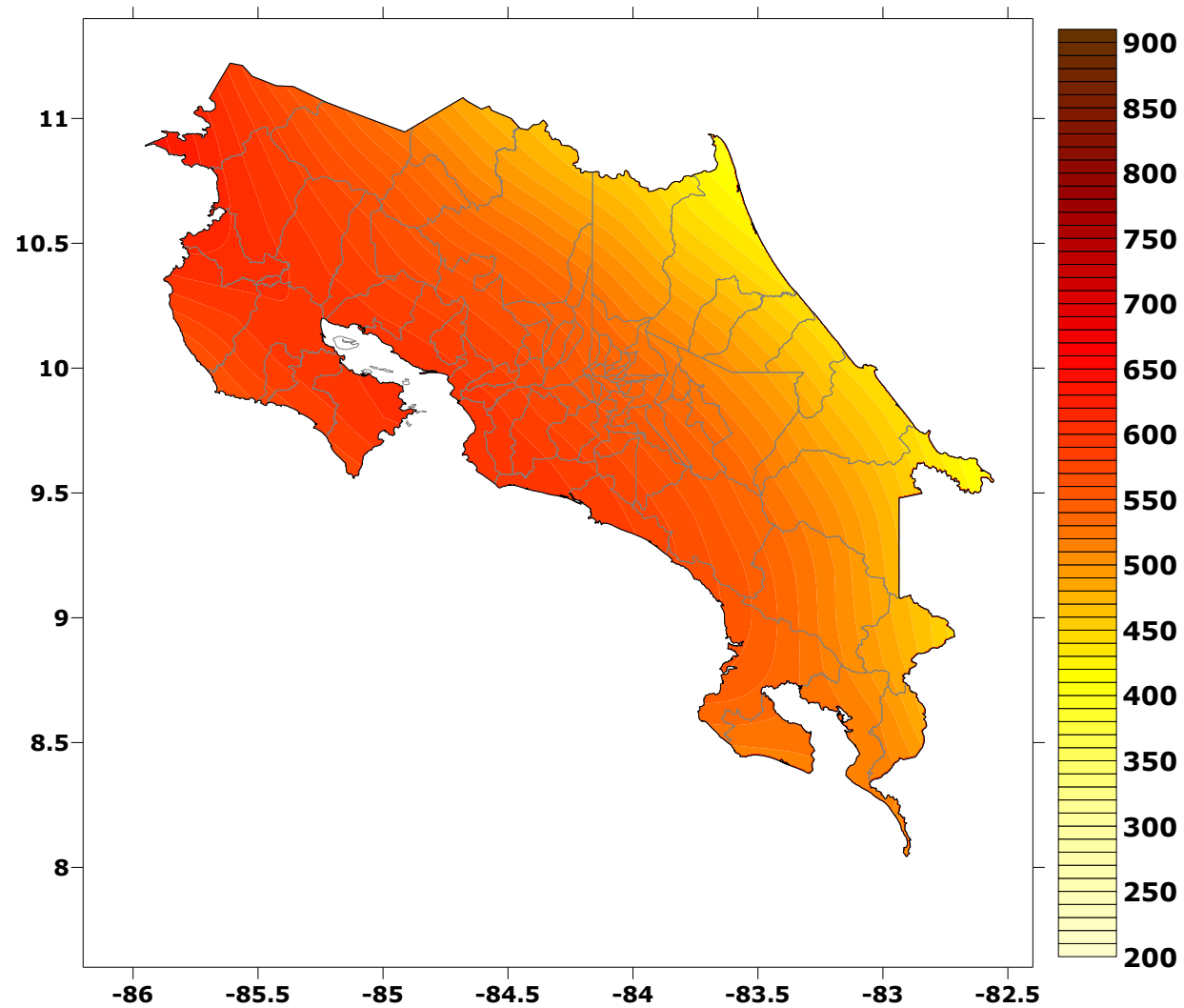


Figura 1-11
Mapa de distribución espacial de $S_a(T=1\text{seg})$ [cm/s²] para 2500 años de periodo de retorno

2 Amenaza por tsunami

2.1 Introducción

Los tsunamis están directamente asociados a la actividad tectónica de la zona de subducción del Pacífico costarricense. Las condiciones propias de esta zona de interacción de placas, implican el potencial de generación de sismos altamente destructivos, de magnitudes mayores a 7, y mecanismos de ruptura particulares que pueden generar un desnivel importante y relativamente repentino en el fondo del lecho marino, condición ideal de detonación de tsunami.

La generación de tsunami puede presentarse en cualquier punto a lo largo de la costa pacífica de Centroamérica. El impacto de un tsunami particular depende en gran medida de las condiciones batimétricas y topográficas locales, así como de la localización exacta de la población o infraestructura expuesta con relación a la costa, y su vulnerabilidad a este tipo de amenaza.

El análisis de amenaza por tsunami se realiza en dos pasos principales. Inicialmente se definen las condiciones de *generación*, las cuales están asociadas a las tasas de ocurrencia de terremotos de magnitud alta en la subducción. Los sismos que detonen un tsunami serán aquellos que induzcan un levantamiento significativo del lecho marino. Una vez se conocen las condiciones de generación, se analiza la *propagación y arribo* del tsunami, fenómeno que está asociado al desplazamiento de las ondas gravitacionales por el océano, y la modificación de sus características de arribo en función de características batimétricas locales.

2.2 Información Empleada en la Modelación

2.2.1 Batimetría y Topografía

La batimetría y topografía costera definen la manera como se verá amplificada la amplitud de la ola, o *Run-up*, con el fin de calcular las condiciones particulares de impacto del tsunami. Se empleó un modelo digital de batimetría y topografía combinado, disponible en la base de datos de ERN, con una resolución de 2 minutos, lo cual corresponde a un tamaño de píxel de 3.6 kilómetros. La información se obtuvo de la base de datos ETOPO2v2 (2006), de la agencia estadounidense NOAA. La Figura 2-1 presenta el modelo digital de elevación empleado.

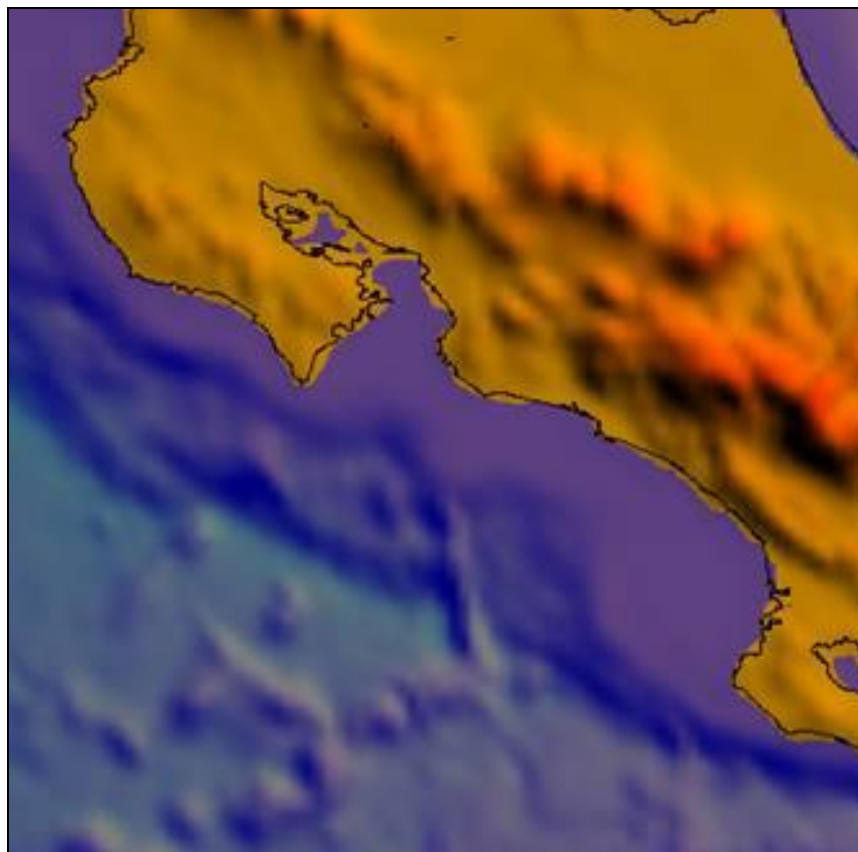


Figura 2-1

Imagen de la batimetría y topografía empleada para el modelo de tsunami en Costa Rica.

2.3 Parámetros del Modelo

Con el fin de automatizar el proceso de cálculo, fue necesario precalcular las alturas de ola debido a cada uno de los escenarios. Se consideró la zona de subducción del pacífico como única fuente generadora de tsunami.

2.3.1 Eventos

El modelo considera la presencia de un número suficiente de sismos con magnitudes de 7 a 8.2 grados los cuales representan sismos históricos y postulados obtenidos con el módulo CAPRA de amenaza sísmica. Las frecuencias de recurrencia de cada escenario se asignan de acuerdo a la actividad sísmica de la región. La modelación de la componente sísmica del análisis se realiza empleando el módulo CAPRA de amenaza sísmica *CRISIS*.

2.3.2 Puntos de cálculo y efectos en bahías

Se eligieron 152 puntos sobre la costa costarricense para estimar las alturas máximas de tsunami, la ubicación de estos puntos se muestra en la Figura 2-2. Para simular adecuadamente la altura del tsunami en la costa y su penetración tierra adentro, se requiere emplear un procedimiento aproximado a partir de la isóbata 100, el cual consiste en aplicar un factor de amplificación al tsunami aguas adentro para calcular la altura del tsunami al aproximarse a la costa. Este factor debe ingresarse junto con la lista de puntos de cálculo.

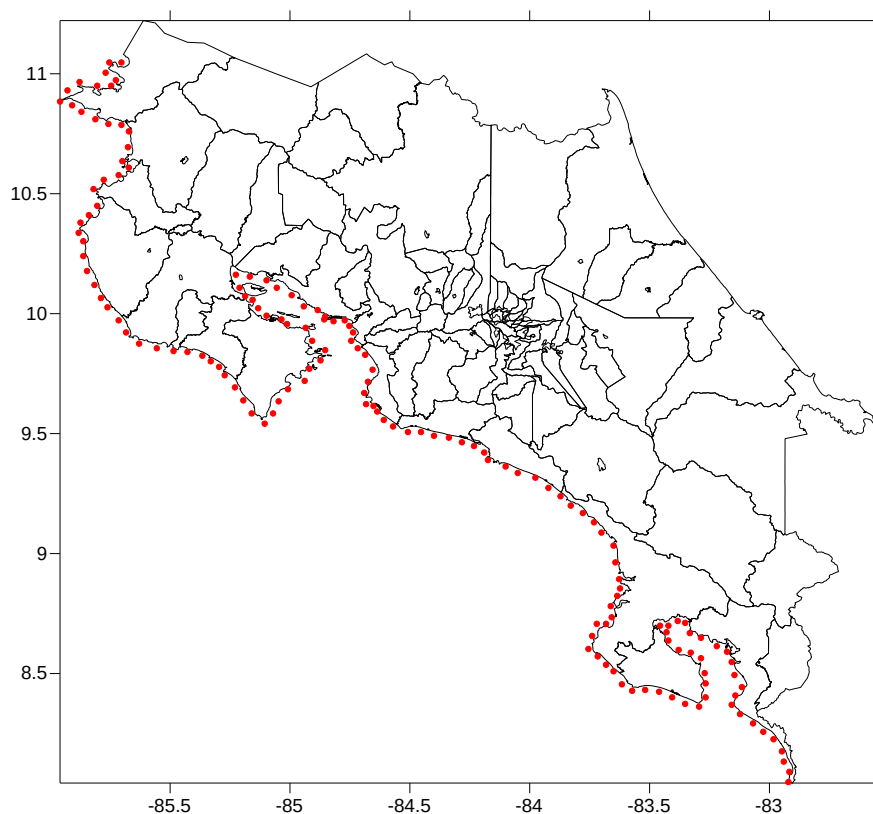


Figura 2-2
Puntos de cálculo para tsunami.

2.4 Mapas de Amenaza por Tsunami en la Costa Pacífica de Costa Rica

Para la elaboración de los mapas se empleó la información mencionada anteriormente, y se asignó la frecuencia de ocurrencia de los diferentes escenarios, de acuerdo con la sismicidad propia de las fuentes generadoras. Se calcularon mapas de amenaza uniforme por tsunami, tomando como medida de intensidad el tirante de inundación, según lo explicado en el informe ERN-CAPRA-T1-3 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN 2009), y para periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años. Los cálculos fueron realizados empleando el programa CRISIS 2007 (Ordaz et. al. 2007).

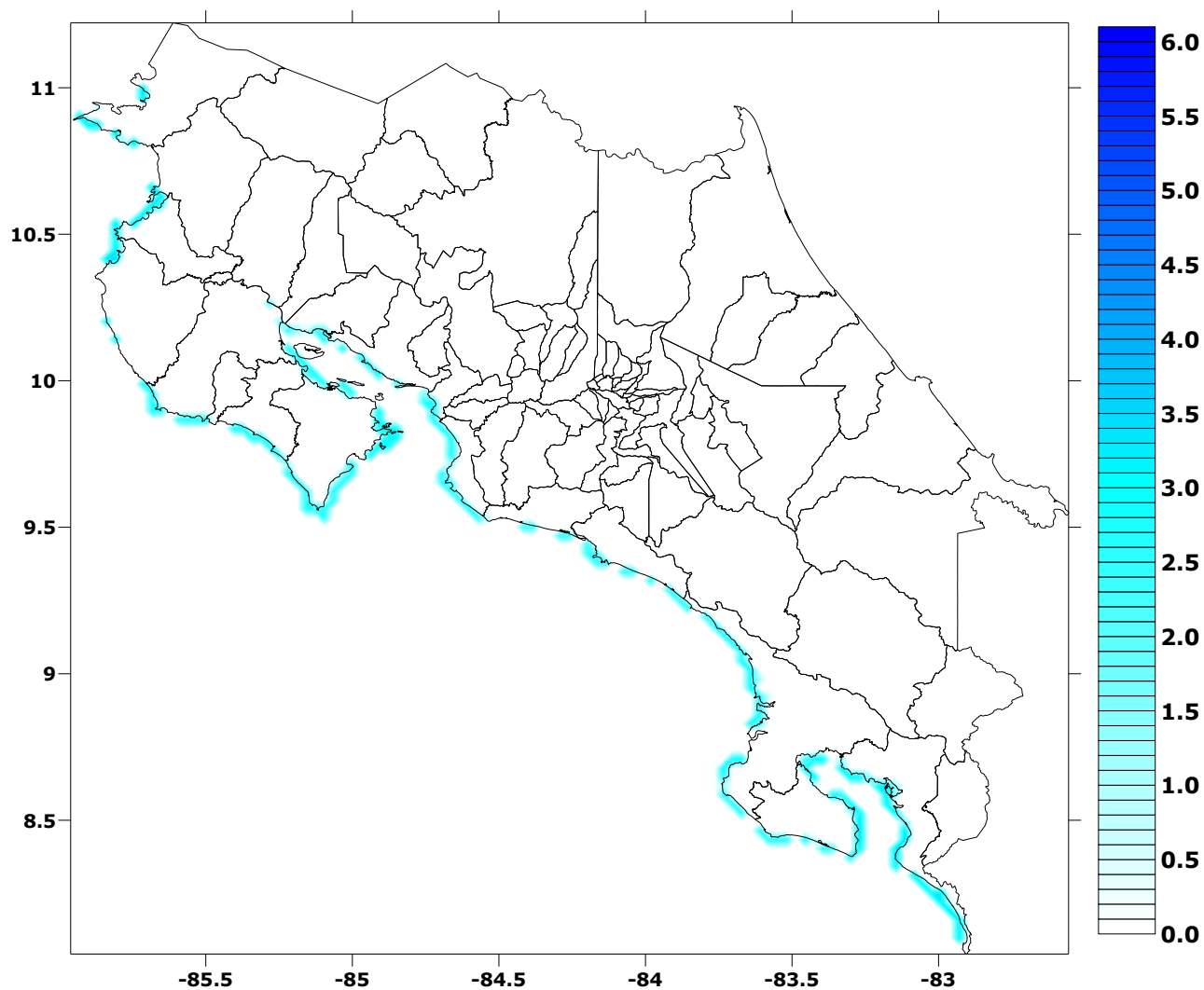


Figura 2-3
Mapa de distribución espacial de inundación [m] para 50 años de periodo de retorno

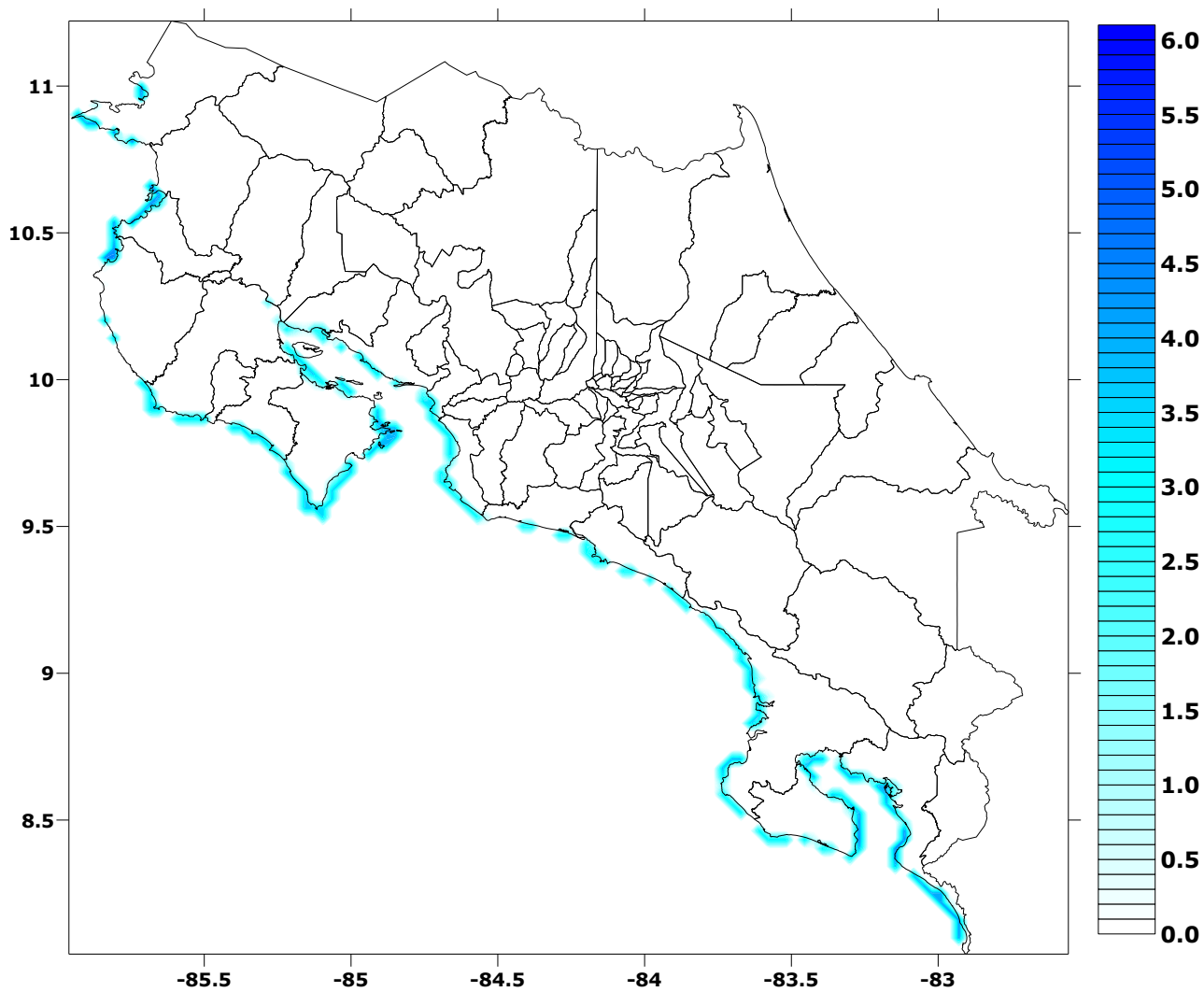


Figura 2-4
Mapa de distribución espacial de inundación [m] para 100 años de periodo de retorno

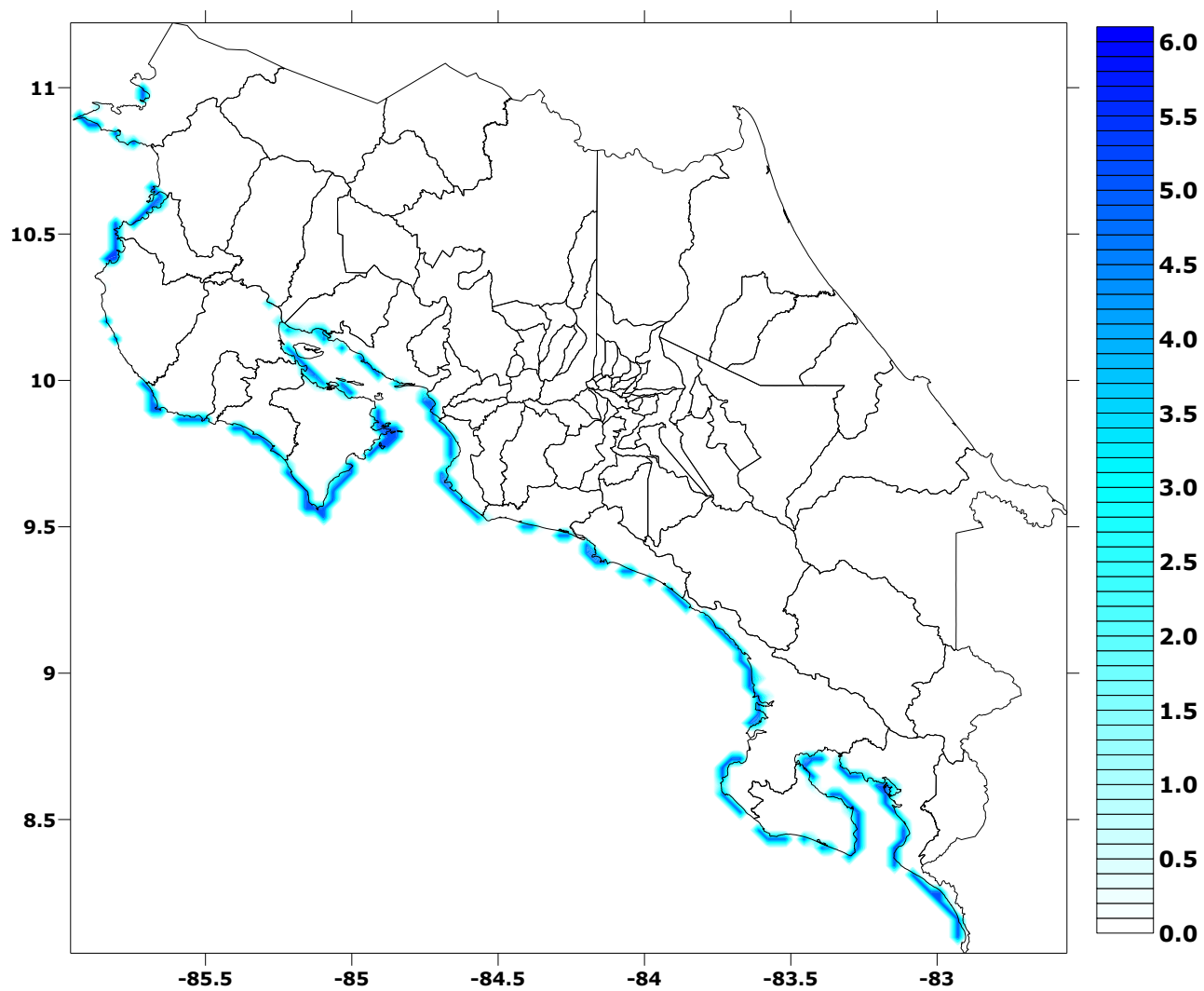


Figura 2-5
Mapa de distribución espacial de inundación [m] para 500 años de periodo de retorno

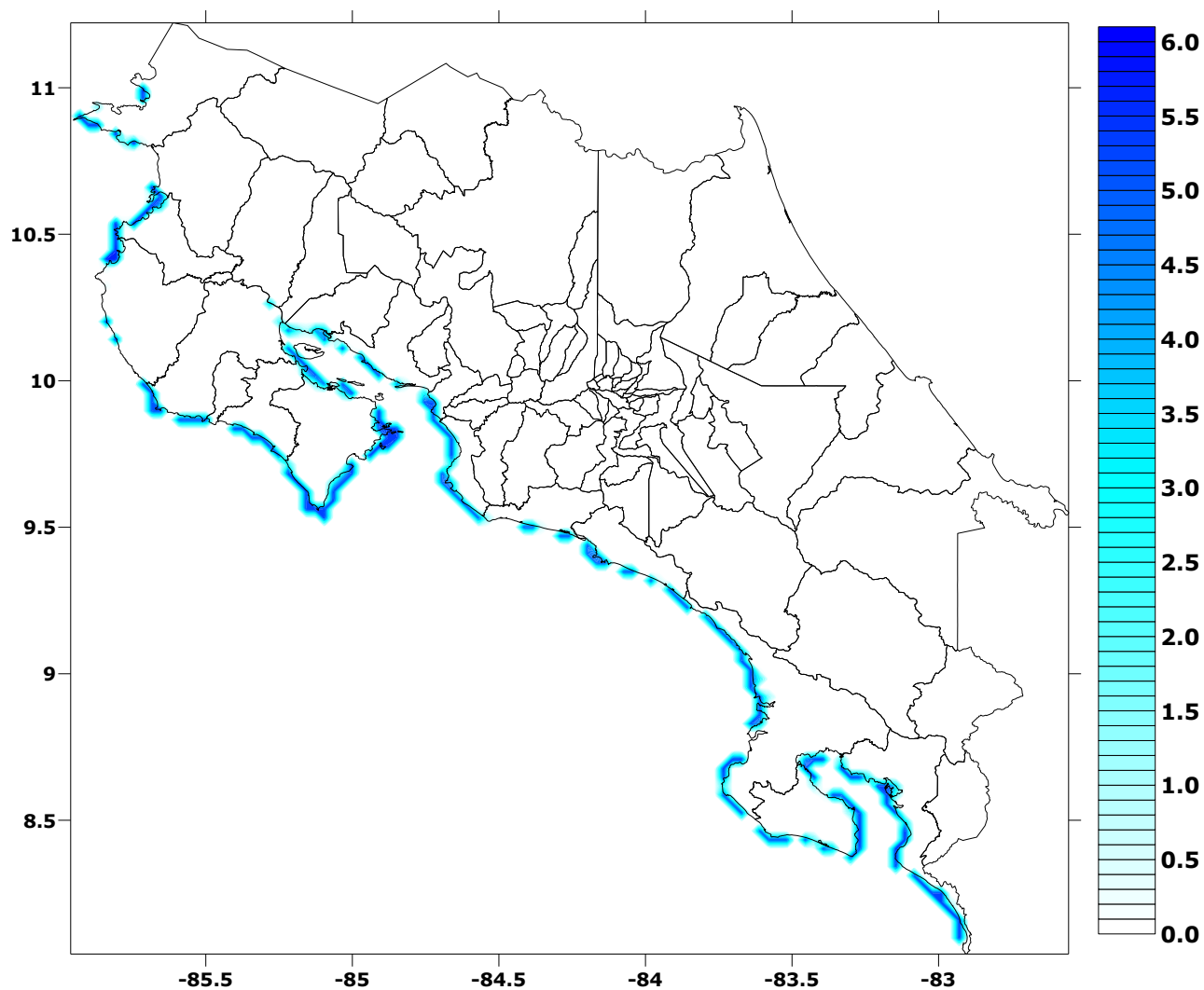


Figura 2-6
Mapa de distribución espacial de inundación [m] para 1000 años de periodo de retorno

3 Amenaza por huracán

3.1 Introducción

Los huracanes tienen la particularidad de ser fenómenos altamente destructivos, con frecuencias altas de ocurrencia. Sin embargo, sus trayectorias históricas normalmente alejadas del territorio costarricense, implican que su impacto en el país es típicamente bajo. La modelación de la amenaza por huracán tiene en cuenta los efectos relacionados con la velocidad del viento y la altura de marea de tormenta. El modelo predice las intensidades máximas asociadas a la posible ocurrencia y paso de un huracán por el territorio de análisis (territorio que comprende al país y 200km en todas direcciones alrededor de la costa), a partir de un procedimiento estadístico conocido como *perturbación*, el cual permite generar trayectorias aleatorias que conservan las características principales de las trayectorias históricas identificadas.

3.2 Información Empleada en la Modelación

El modelo de amenaza por huracán requiere de información específica, que puede encontrarse disponible para cierto nivel de detalle. La calidad de la modelación dependerá del detalle con que se cuente en toda la información recolectada. Se requieren las siguientes capas de información geográfica para la aplicación del modelo de amenaza por huracán en Costa Rica:

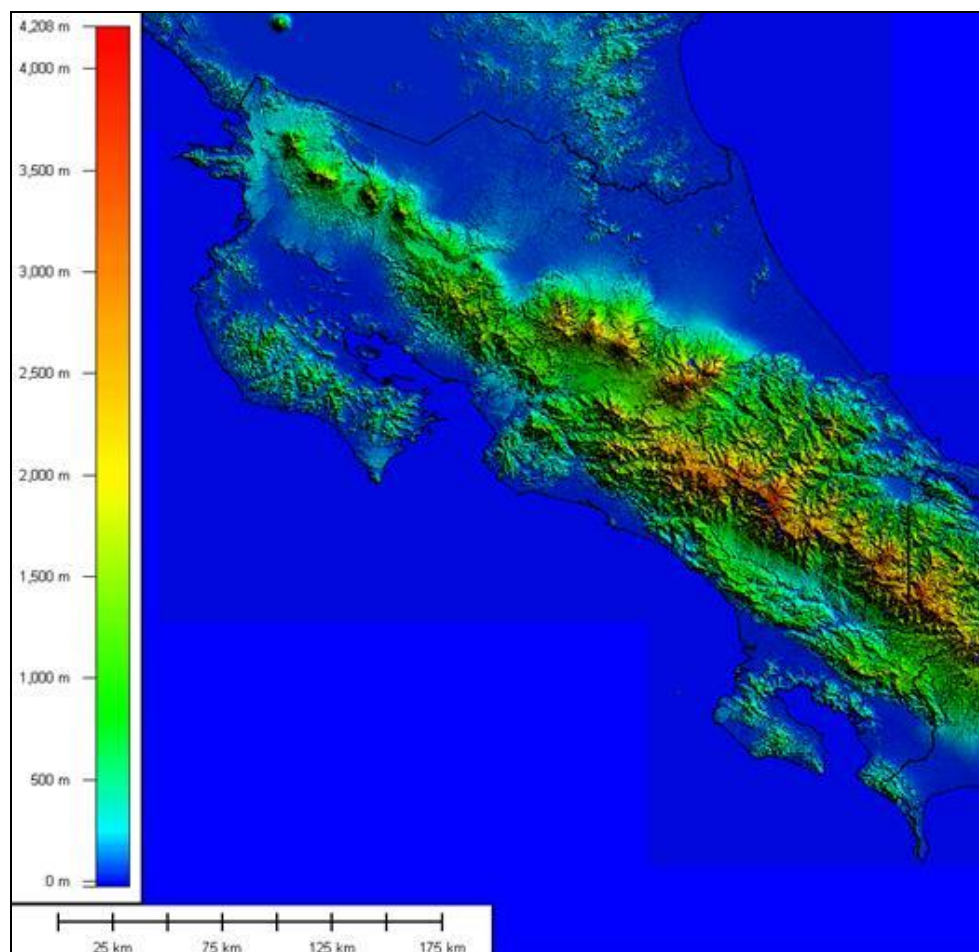
- a) Topografía.
- b) Batimetría.
- c) Áreas urbanas y uso de suelo.
- d) Registros de velocidad de viento y altura de marea.
- e) Catálogo de huracanes

La información que fue posible obtener para la modelación de la amenaza de huracán se describe a continuación.

3.2.1 Topografía

Las corrientes de viento se ajustan a la topografía de la zona, pasando alrededor de los obstáculos orográficos existentes. De esta manera, se modifica la uniformidad del campo de velocidad, generando zonas con velocidades mayores o menores a la promedio establecida en una zona hipotética sin obstáculos. En este orden de ideas, la capacidad del modelo para detectar mayores detalles en la variación de la velocidad del viento, depende fuertemente de la calidad de la información topográfica con que se cuenta. El modelo digital de elevación para el territorio costarricense se obtuvo del *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, y cuenta con una resolución de 0.0008333 grados (aproximadamente un píxel cada

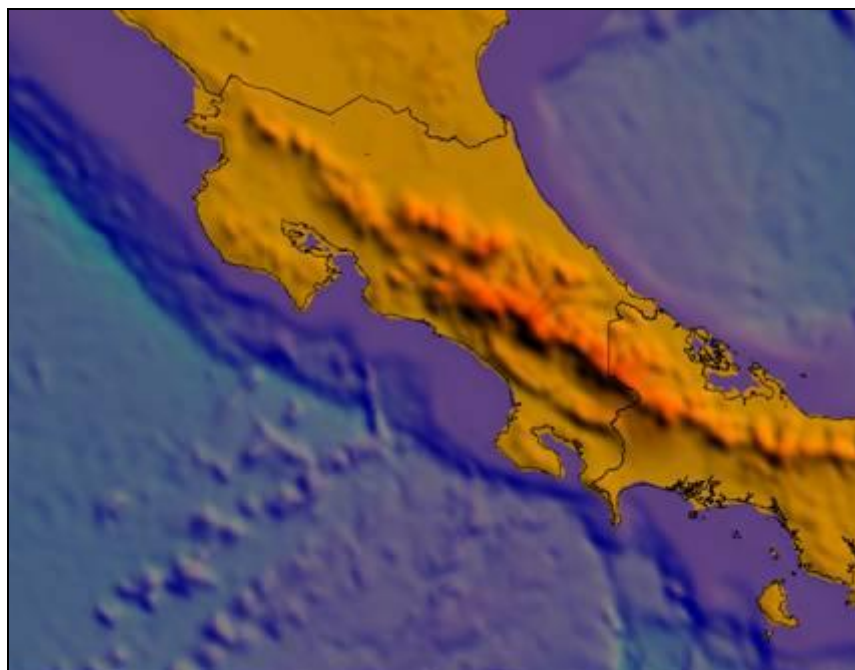
91.667 metros), lo cual es una resolución aceptable para un análisis nacional y subnacional. En la Figura 3-1 se presenta el modelo digital de elevación empleado para la modelación.



*Figura 3-1
Modelo Digital de Elevación para Costa Rica*

3.2.2 Batimetría

La batimetría es necesaria para el cálculo de la sobreelevación del mar y la consecuente marea de tormenta que se origina durante el paso de un huracán por una zona costera. La información batimétrica corresponde a un modelo digital de batimetría-topografía disponible en la base de datos de ERN, y que cuenta con una definición de 2 minutos (aproximadamente un píxel cada 3.6 kilómetros). La información se obtuvo de la base de datos ETOPO2v2 (2006), de la agencia estadounidense NOAA. Si bien la información no cuenta con la resolución deseada, es común que la información batimétrica no sea de calidad comparable a la información topográfica disponible, razón por la cual la resolución se considera igualmente aceptable. La Figura 3-2 presenta el modelo digital de batimetría empleado.



*Figura 3-2
Imagen de la batimetría empleada para el modelo de marea de tormenta en Costa Rica*

3.2.3 Áreas urbanas y uso de suelo

La rapidez con que la velocidad del viento aumenta con la altura es función de la rugosidad del terreno. Por lo tanto, el gradiente de velocidad debe encontrarse a partir de información geográfica de usos del suelo, la cual permite establecer las condiciones de rugosidad específicas. La información de polígonos de áreas urbanas y usos del suelo se obtuvo de la Base de datos SIG para Mesoamérica de la *Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo CCAD*. La Figura 3-3 muestra los polígonos de áreas urbanas y uso de suelo.

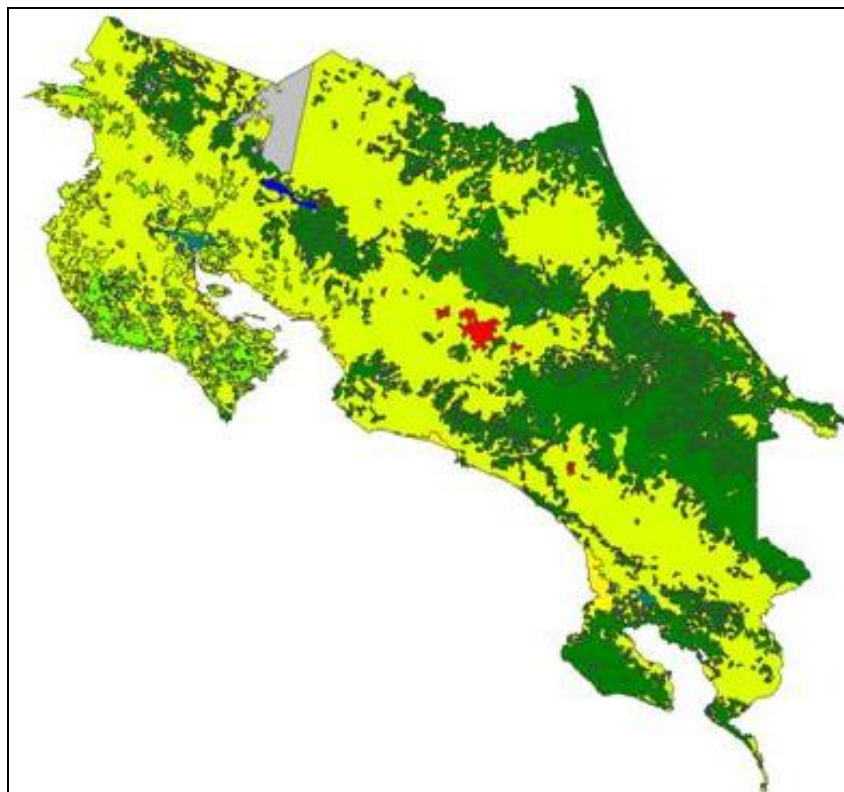


Figura 3-3
Polígonos de áreas urbanas y uso de suelo para Costa Rica

3.2.4 Registros de velocidad de viento y altura de marea

Los registros de intensidades históricas son altamente útiles para la calibración de los modelos de cálculo. En el caso de Costa Rica, no fue posible encontrar registros históricos con información de este tipo, por lo cual no se incluyeron consideraciones particulares en la modelación del fenómeno.

3.2.5 Catálogo de Huracanes

Las trayectorias de los huracanes históricos, al igual que los diferentes parámetros de intensidad asociados y su variación con la trayectoria, se obtuvieron de la base de datos HURDAT, del *National Hurricane Center*, de la agencia estadounidense NOAA. Ésta base de datos cuenta con la siguiente información:

- Fecha (hora, día, mes y año)
- Presión central del ciclón (en milibares)
- Posición geográfica (latitud, longitud)
- Velocidad máxima sostenida de viento promediada a 1 min

Para el Océano Atlántico, la base de datos HURDAT cuenta con 1377 ciclones tropicales del año 1851 a 2007. Para el Océano Pacífico la base de datos cuenta con 833 ciclones tropicales de 1949 a 2007. En la Figura 3-4 se muestran las trayectorias de los ciclones tropicales para los Océanos Atlántico y Pacífico contenidas en la base de datos HURDAT hasta el año 2007.

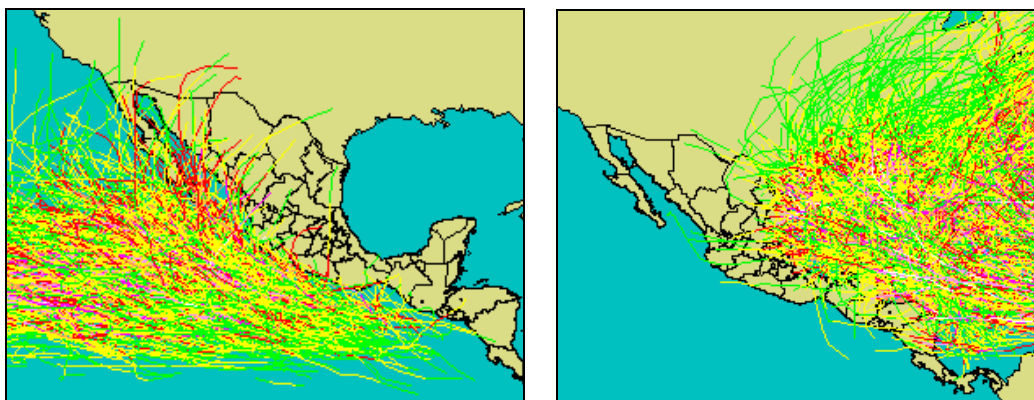


Figura 3-4
Trayectoria de ciclones tropicales para los Océanos Pacífico (izq.) y Atlántico (der.) hasta el año 2007 de acuerdo con la información de la base de datos HURDAT de la NOAA.

3.3 Parámetros del Modelo

3.3.1 Depuración del catálogo de huracanes

A partir de la base de datos HURDAT de la NOAA, se depuró el catálogo de huracanes de manera que sólo se tomaran en cuenta aquellos ciclones tropicales que han afectado el territorio costarricense. Los criterios de depuración empleados fueron los siguientes:

- Eventos con categoría $\geq$ H1 (119 km/h) en la escala Saffir-Simpson (SS).
- Que en algún momento de su trayectoria, el ojo del huracán se localizara a menos de 200 km de las costas costarricenses.

Los criterios anteriores aplicados a la base de datos de ciclones tropicales para el Océano Atlántico, permiten obtener un total de 12 huracanes con categoría $\geq$ H1 SS. La trayectoria de estos huracanes se presenta en la Figura 3-5.

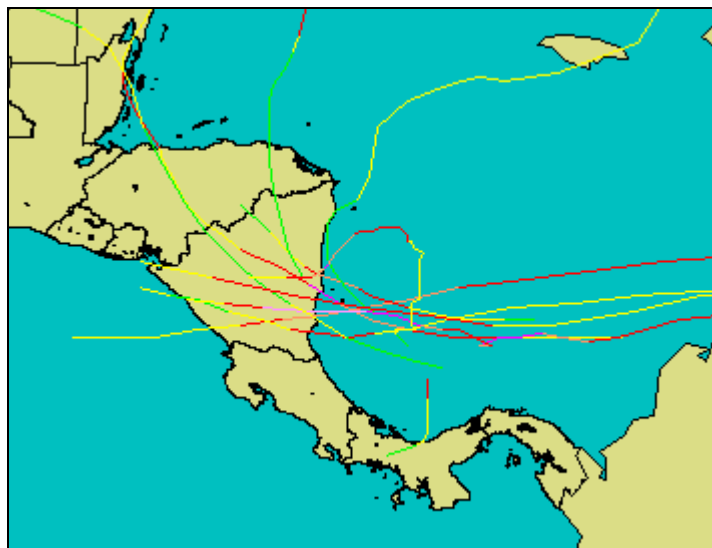


Figura 3-5

Ciclones tropicales con trayectoria a menos de 200km de la costa Atlántica de Costa Rica, con categoría mayor o igual a huracán 1 en la escala Saffir-Simpson.

En la Tabla 3-1 se presentan los parámetros principales (velocidad máxima de viento, categoría, nombre y fecha) de cada uno de los 12 huracanes que se consideraron para el estudio en territorio costarricense.

Tabla 3-1

Parámetros principales (velocidad máxima del viento, categoría, nombre y fecha) de los ciclones tropicales considerados.

#	Oceano	Nombre	Fecha	Vel Máx	Cat Máx
1	Atl	NOT NAMED	11/08/1855	129.5245	H1
2	Atl	NOT NAMED	28/09/1876	166.5315	H2
3	Atl	NOT NAMED	08/10/1906	194.2867	H3
4	Atl	NOT NAMED	14/10/1908	166.5315	H2
5	Atl	ALMA	04/06/1966	203.5385	H3
6	Atl	MARTHA	21/11/1969	148.028	H1
7	Atl	IRENE	11/09/1971	129.5245	H1
8	Atl	JOAN	10/10/1988	231.2937	H4
9	Atl	GERT	14/09/1993	157.2798	H2
10	Atl	GORDON	08/11/1994	138.7762	H1
11	Atl	CESAR	24/07/1996	129.5245	H1
12	Atl	BETA	26/10/2005	185.2	H3

En la Tabla 3-2 se presenta la distribución, por categoría en la escala Saffir-Simpson, de los 12 huracanes que forman la base de datos depurada para el Océano Atlántico, cuya trayectoria ha circulado a menos de 200 km de la costa Atlántica de Costa Rica con categoría $\geq$ H1 SS.

Tabla 3-2
Distribución por categoría en la escala Saffir-Simpson, de los ciclones tropicales considerados.

Categoría	Número de huracanes
H5	0
H4	1
H3	3
H2	3
H1	5

3.3.2 Factores de exposición topográfica al viento para Costa Rica

Debido al efecto de la topografía del sitio en que se ubica una construcción, se presentan variaciones en la velocidad del viento generada por un huracán. Los factores de topografía permiten tomar en cuenta el incremento o decremento en la velocidad del viento debido a las características topográficas del sitio en que se ubica una construcción, por ejemplo en la cima de promontorios, terrenos inclinados, islas o valles cerrados. En este estudio, para tomar en cuenta las modificaciones a la velocidad de viento debido al efecto de la topografía circundante al sitio en que se ubica la construcción, se define un factor de incremento en la velocidad, el cual actúa como un multiplicador de la velocidad de viento considerada en terreno plano; estos factores de topografía se asignaron a partir de la determinación de áreas de exposición por viento (Avelar, 2006).

Para el cálculo de las áreas de exposición por viento se planteó un procedimiento que permite, a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE), obtener mapas digitales con valores del factor de topografía para Costa Rica (ver Figura 3-6). Estos factores se calculan para cada uno de los píxeles que conforman el MDE de acuerdo con su exposición al flujo de viento, localizados por las coordenadas geográficas de su centroide. Este tipo de información permite conocer el factor de topografía particular de la infraestructura a evaluar, solo con conocer su ubicación geográfica. La definición y características de exposición al flujo de viento se indican en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3
Factores de exposición topográfica al viento para Costa Rica

Sitio	Topografía	F_T
Protegido	Valles cerrados	0.8
Plano	Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores que 5%	1.0
Expuesto	Cimas de promontorios, colinas o montañas, islas, terrenos con pendientes mayores que 5%	1.2

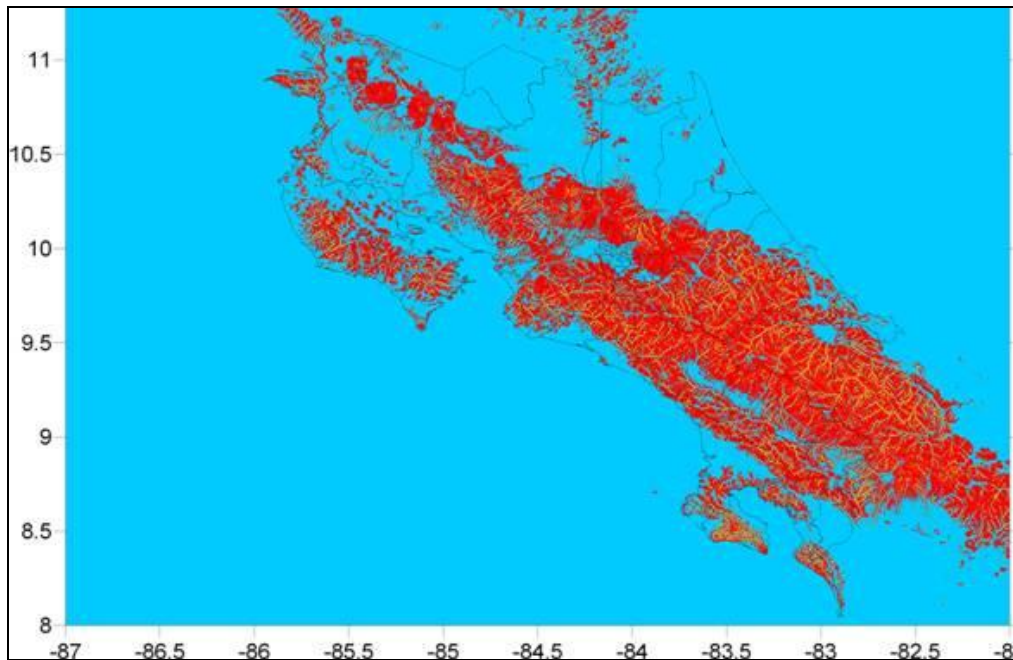


Figura 3-6
Factores de exposición topográfica por viento para Costa Rica

3.3.3 Variación de la velocidad del viento con la altura

El movimiento de las masas de aire se ve restringido por la fricción con la superficie del terreno, lo cual origina que la velocidad sea prácticamente nula en contacto con el mismo, y aumente con la altura hasta alcanzar la velocidad del flujo no perturbado, llamada *velocidad gradiente*.

Para un terreno muy liso, como es el caso de campo abierto con vegetación muy baja, el viento mantiene una velocidad muy alta aún muy cerca de la superficie, mientras que en el centro de grandes ciudades, con edificaciones altas, la velocidad disminuye rápidamente desde una altura de varias decenas de metros hasta la superficie del terreno. La expresión que permite obtener una estimación de la variación de la velocidad de viento con la altura y para diferentes tipos de terreno, se representa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 Frz &= 1.56 \left(\frac{Z}{\delta} \right)^{\alpha} \quad \text{si } 10 < Z < \delta \\
 Frz &= 1.56 \left(\frac{10}{\delta} \right)^{\alpha} \quad \text{si } Z \leq 10 \text{ m} \\
 Frz &= 1.56 \quad \text{si } Z \geq \delta
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 2}$$

donde: Z es la altura en metros a la cual se desea determinar la velocidad de viento. Los parámetros α y δ para los tipos de terreno más comunes en la región costarricense se presentan en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4

Parámetros α y δ para los tipos de terreno más representativos en la región costarricense

Tipo	Descripción	α	δ (m)
1	Campo abierto plano (terreno abierto, prácticamente plano y sin obstrucciones, por ejemplo franjas costeras planas, zonas de pantanos, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin bardas alrededor)	0.099	245
2	Árboles o construcciones dispersas (campos de cultivo o granjas con pocas obstrucciones, por ejemplo bardas, árboles y construcciones dispersas)	0.128	315
3	Arbolado, barrio residencial (terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas, por ejemplo áreas urbanas, suburbanas y de bosques; el tamaño de las construcciones corresponde al de casas y viviendas)	0.156	390
4	Muy accidentada, centro de ciudad (terreno con numerosas obstrucciones largas, altas y estrechamente espaciadas como el centro de grandes ciudades y complejos industriales desarrollados)	0.170	455

En la figura siguiente se muestra la variación con la altura sobre la superficie del terreno del factor Frz . Se observa que para una altura de 10m sobre la superficie del terreno el mayor valor del factor Frz es de 1.137, el cual se presenta en terreno tipo 1 (terreno abierto, prácticamente plano y sin obstrucciones). El menor factor para una altura de 10m corresponde a 0.815, el cual se presenta en terreno tipo 4 (terreno con numerosas obstrucciones).

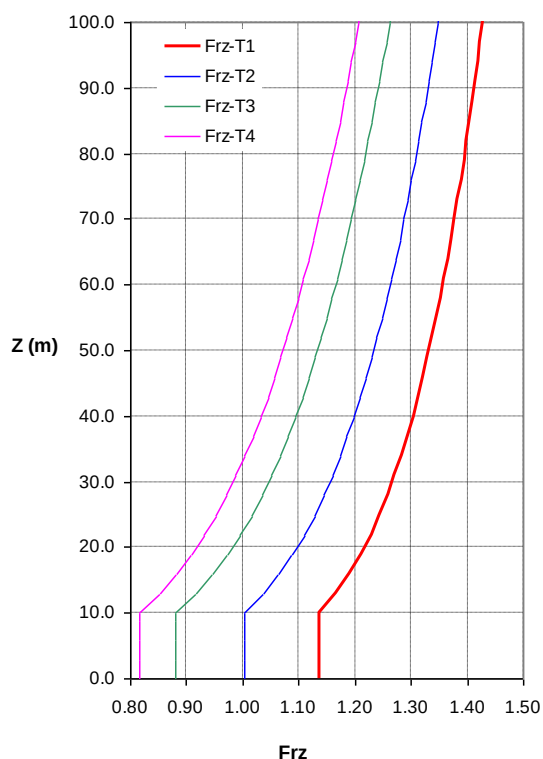


Figura 3-7

Variación de la velocidad del viento con la altura y para diferentes tipos de terreno.

3.4 Mapas de Amenaza por Huracán en Costa Rica

Se calcularon de manera independiente los mapas de amenaza por vientos fuertes, marea de tormenta, precipitación huracanada e inundación. Los resultados se presentan a continuación.

3.4.1 Mapas de amenaza por vientos fuertes

Se calcularon mapas de amenaza uniforme por vientos fuertes, tomando como medida de intensidad la velocidad pico de ráfagas de viento de 3 segundos de duración, según lo explicado en el informe ERN-CAPRA-T1-3 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN 2009), y para periodos de retorno de 20, 50, 100, 500 y 1000 años. Los cálculos fueron realizados empleando el programa ERN-Huracán (ERN 2009).

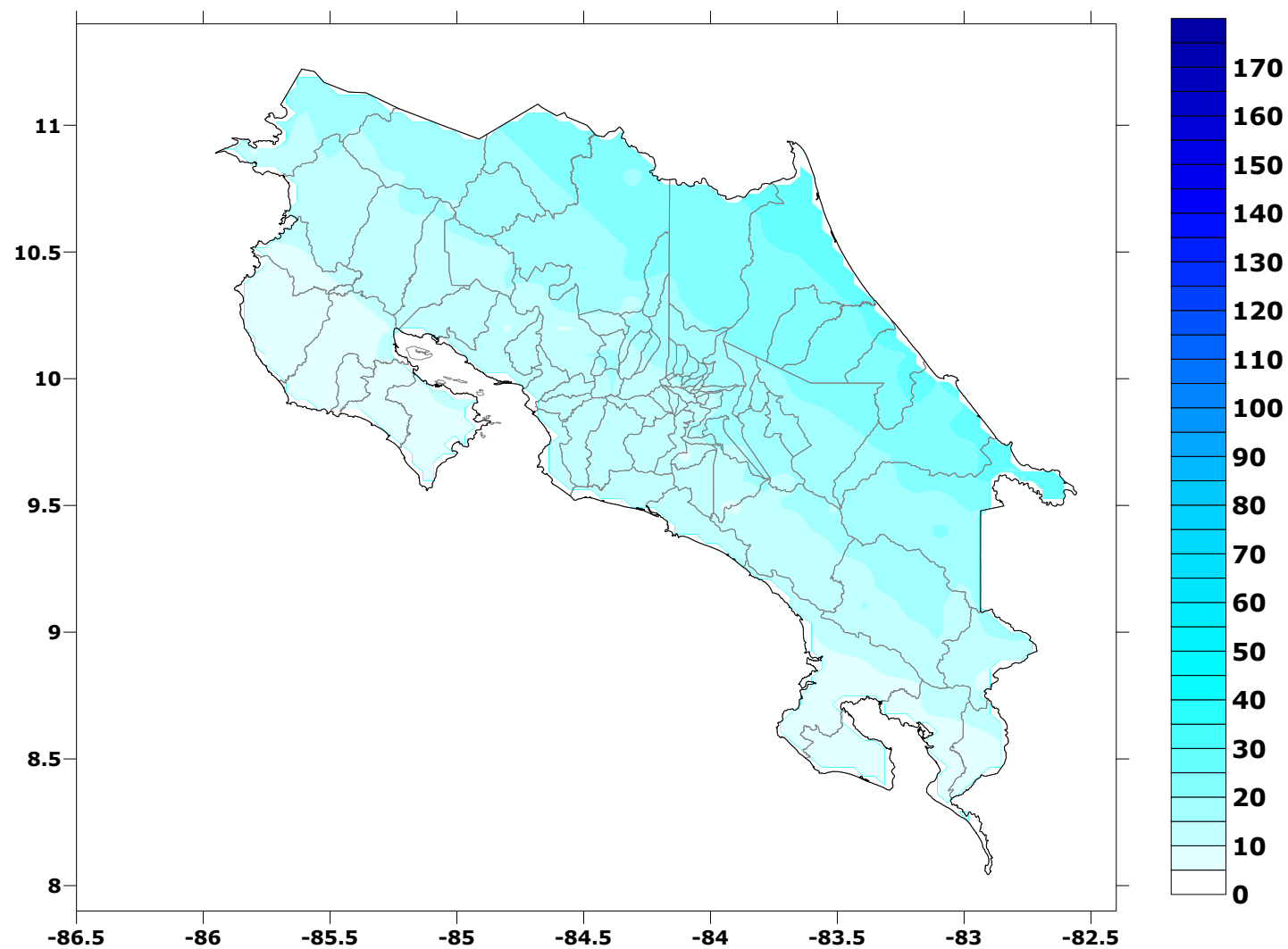


Figura 3-8
Mapa de distribución espacial la velocidad máxima del viento [km/h] para 20 años de periodo de retorno

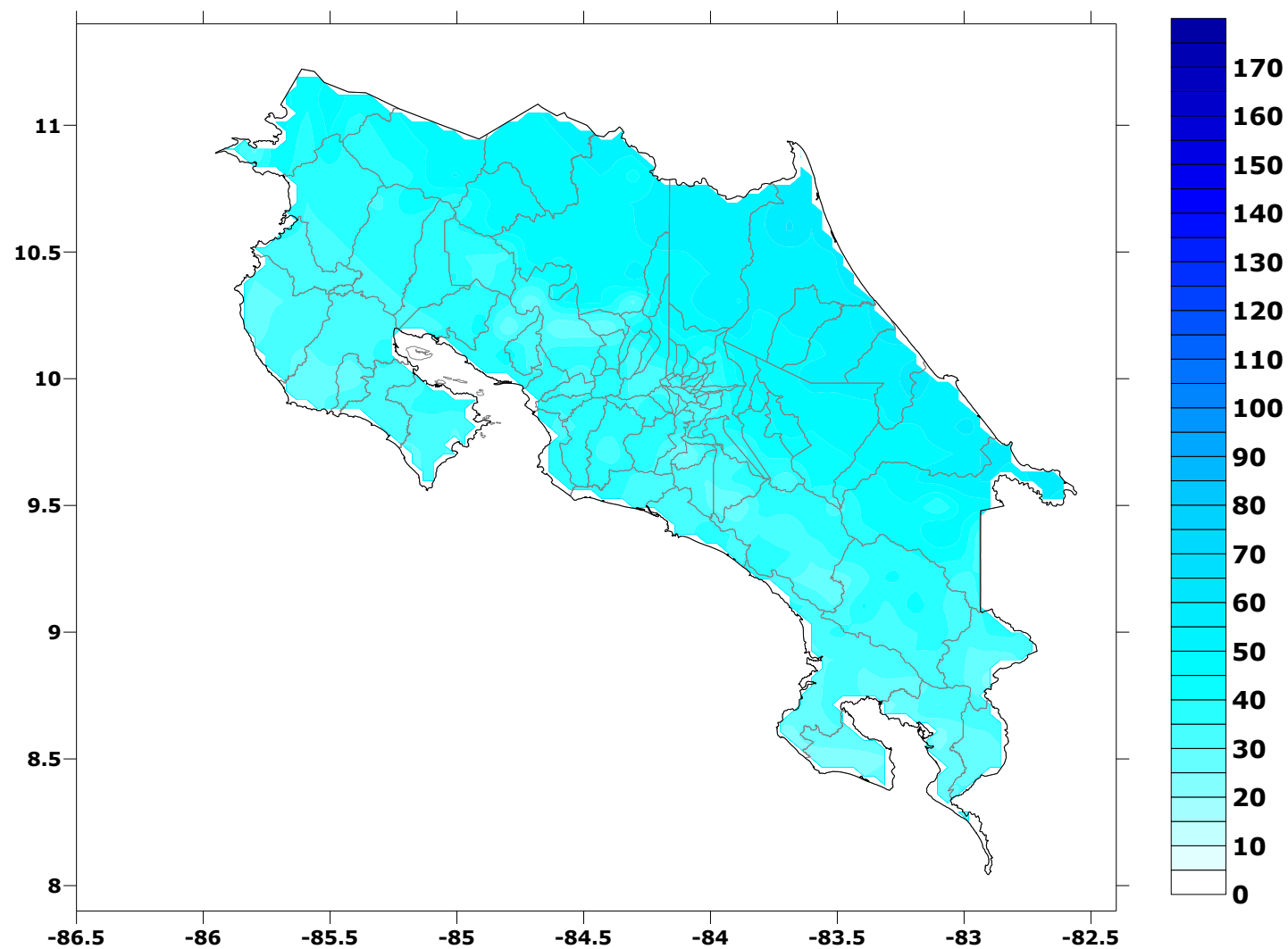


Figura 3-9
Mapa de distribución espacial la velocidad máxima del viento [km/h] para 50 años de periodo de retorno

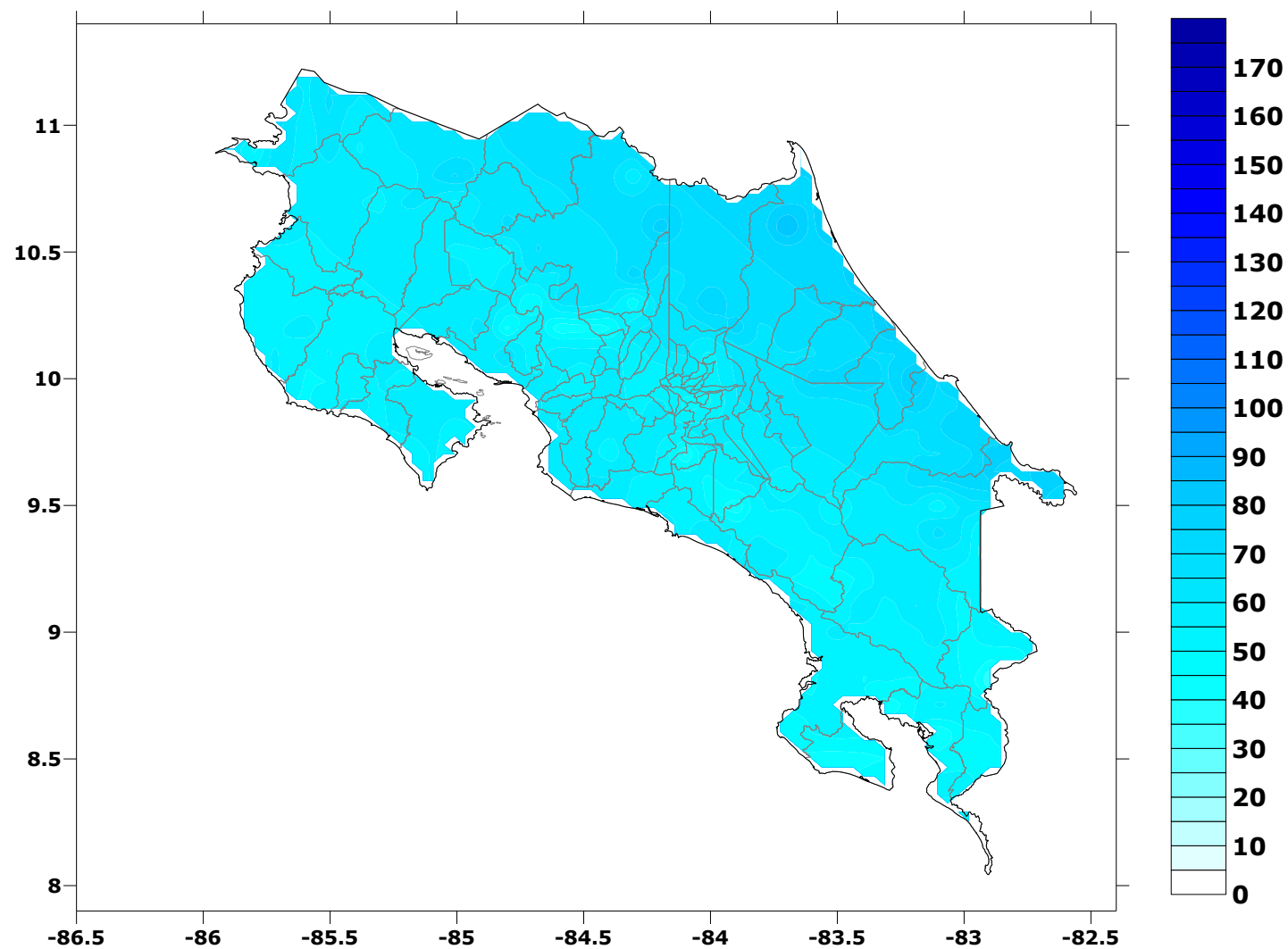


Figura 3-10
Mapa de distribución espacial la velocidad máxima del viento [km/h] para 100 años de periodo de retorno

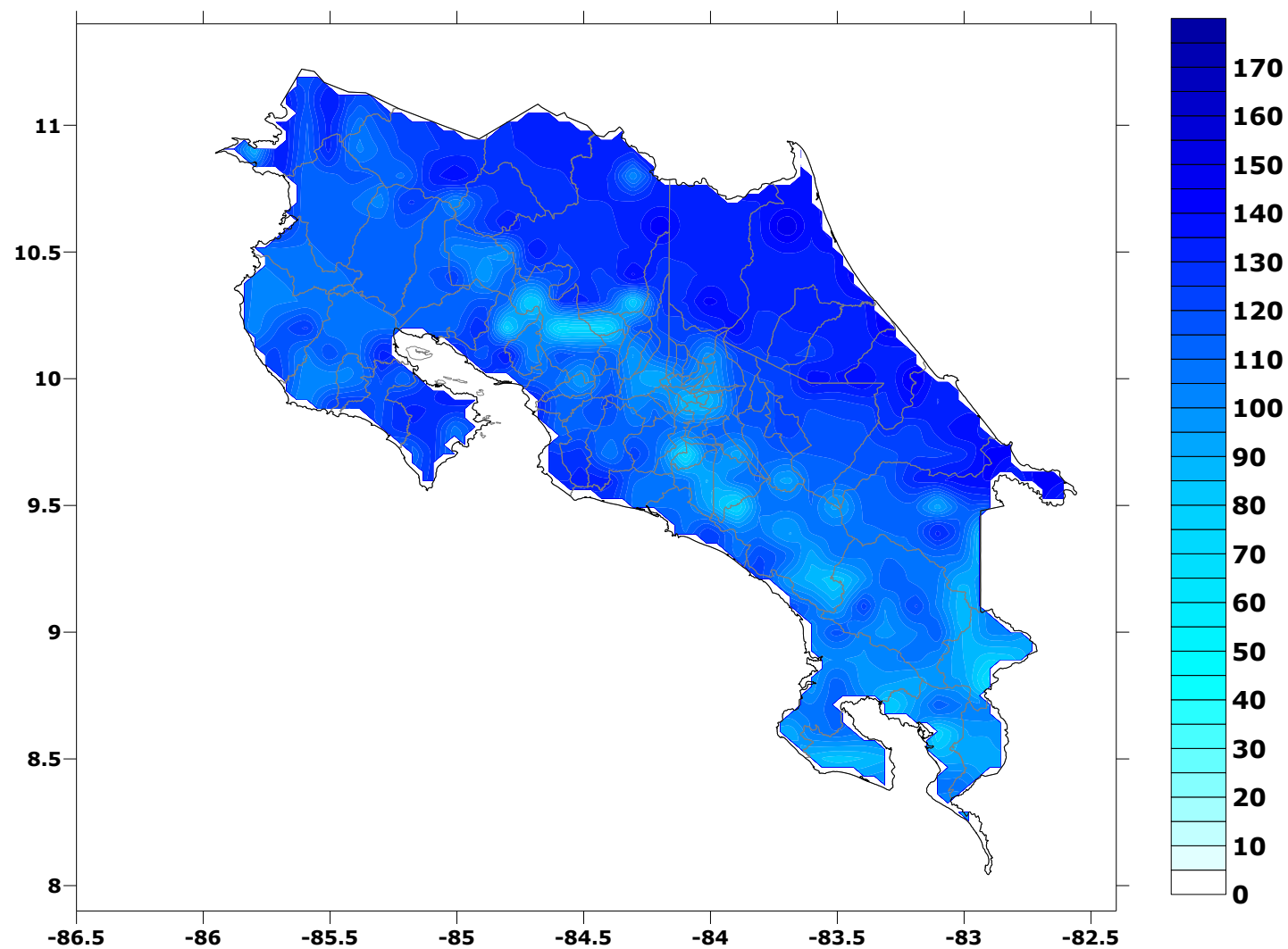


Figura 3-11
Mapa de distribución espacial la velocidad máxima del viento [km/h] para 500 años de periodo de retorno

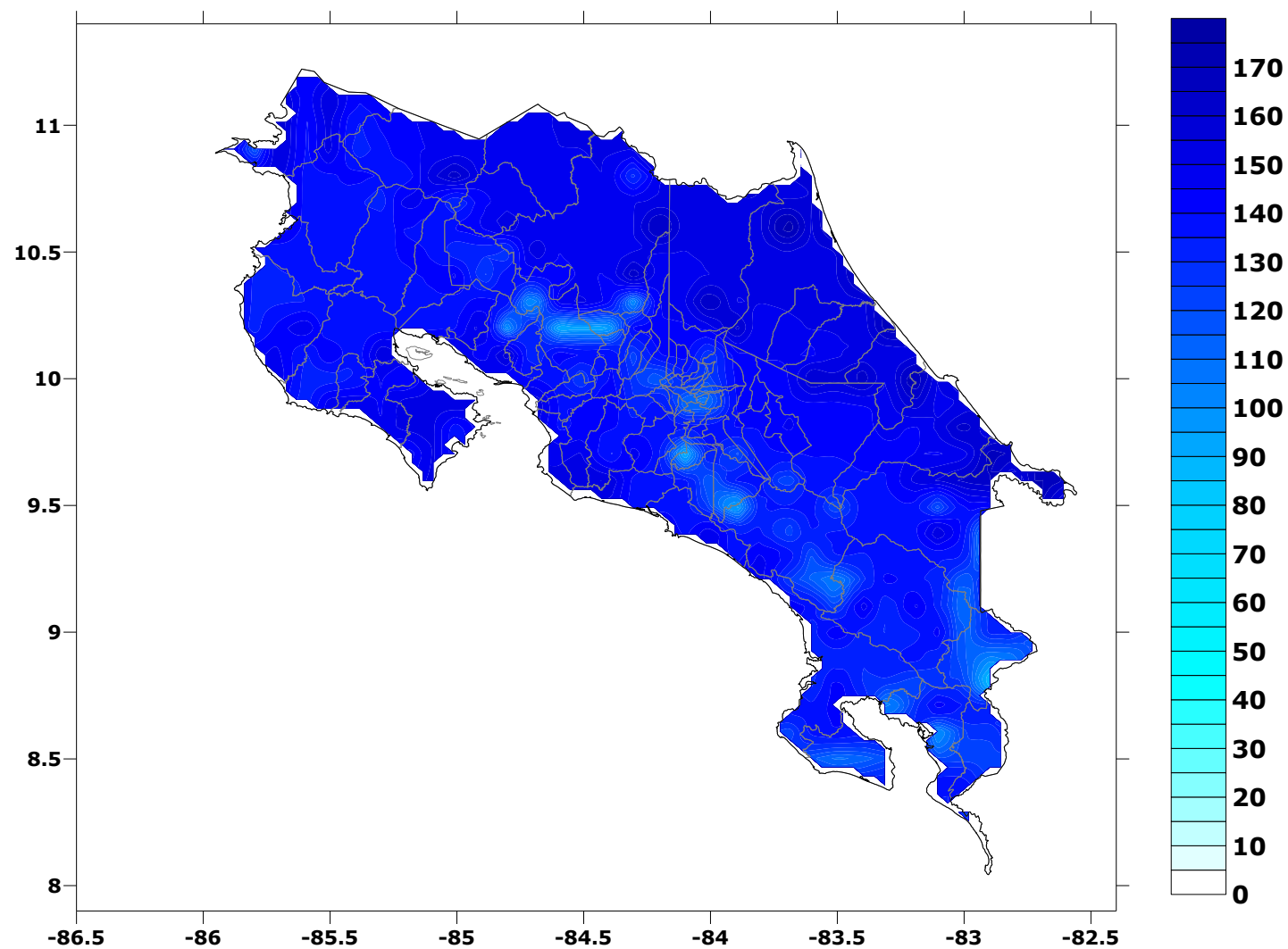


Figura 3-12
Mapa de distribución espacial la velocidad máxima del viento [km/h] para 1000 años de periodo de retorno

3.4.2 Mapas de amenaza por marea de tormenta en la costa Atlántica

Se calcularon mapas de amenaza uniforme por marea de tormenta en la costa Atlántica costarricense, tomando como medida de intensidad tirante de inundación, según lo explicado en el informe ERN-CAPRA-T1-3 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN 2009), y para periodos de retorno de 100, 200, 500, 1000 y 2500 años. Los cálculos fueron realizados empleando el programa ERN-Huracán (ERN 2009).

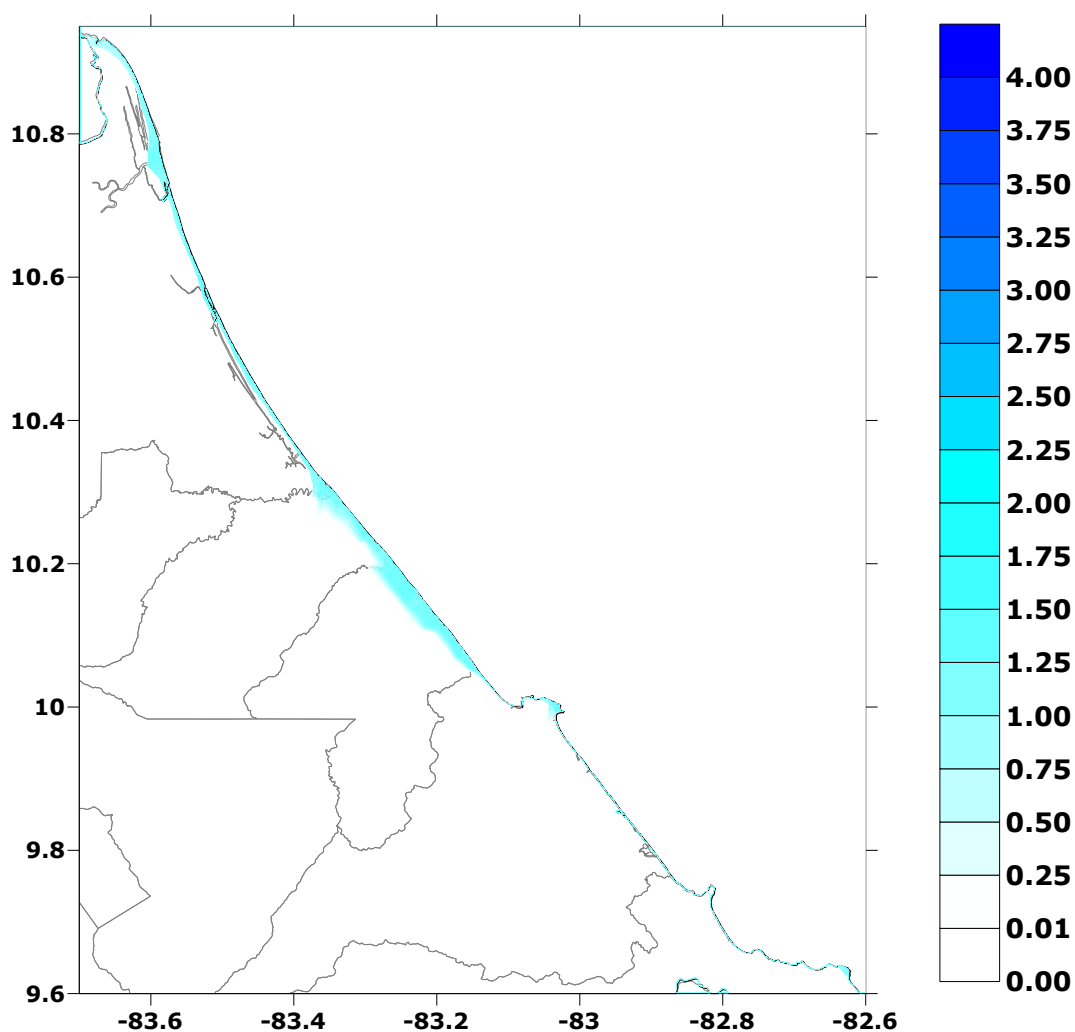


Figura 3-13
Mapa de distribución espacial del tirante de inundación [m] para 100 años de periodo de retorno

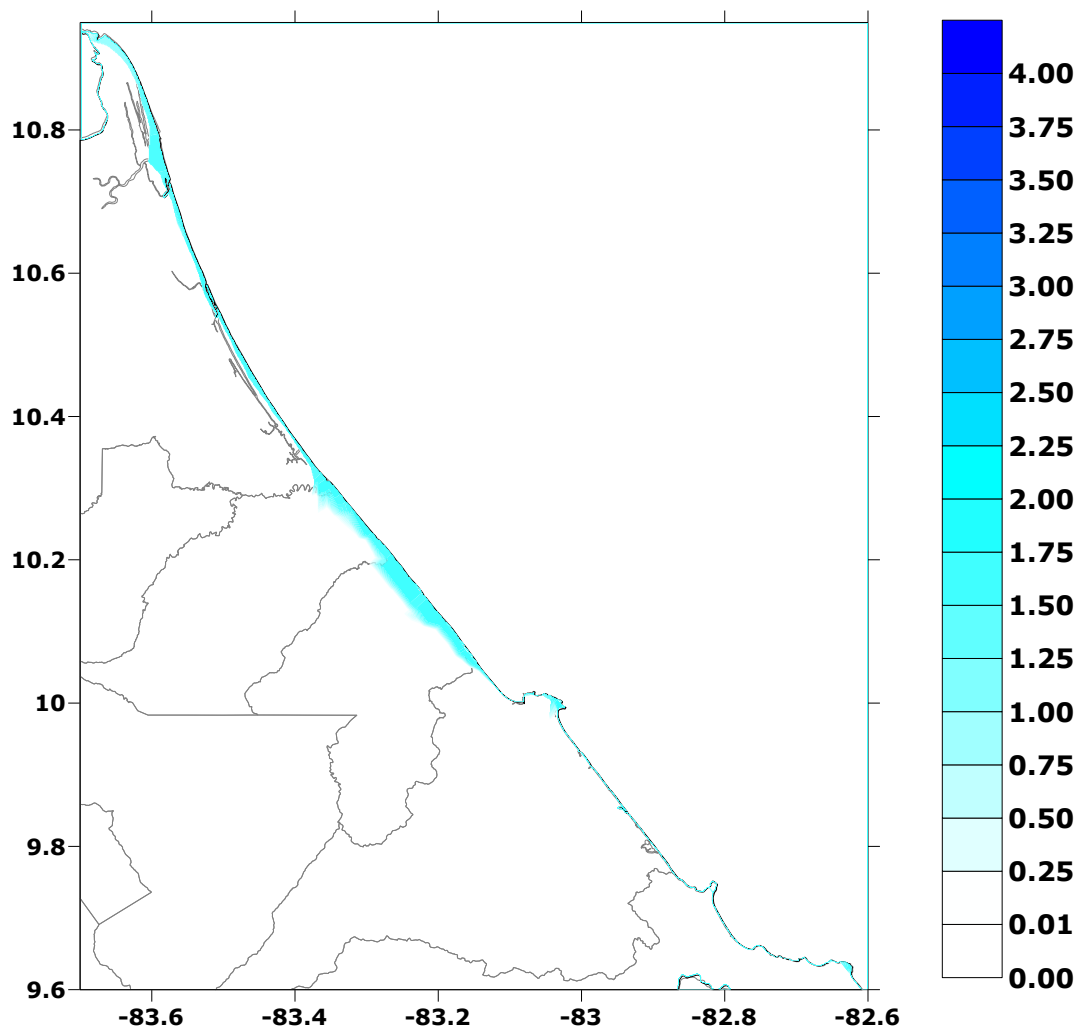


Figura 3-14
Mapa de distribución espacial del tirante de inundación [m] para 200 años de periodo de retorno

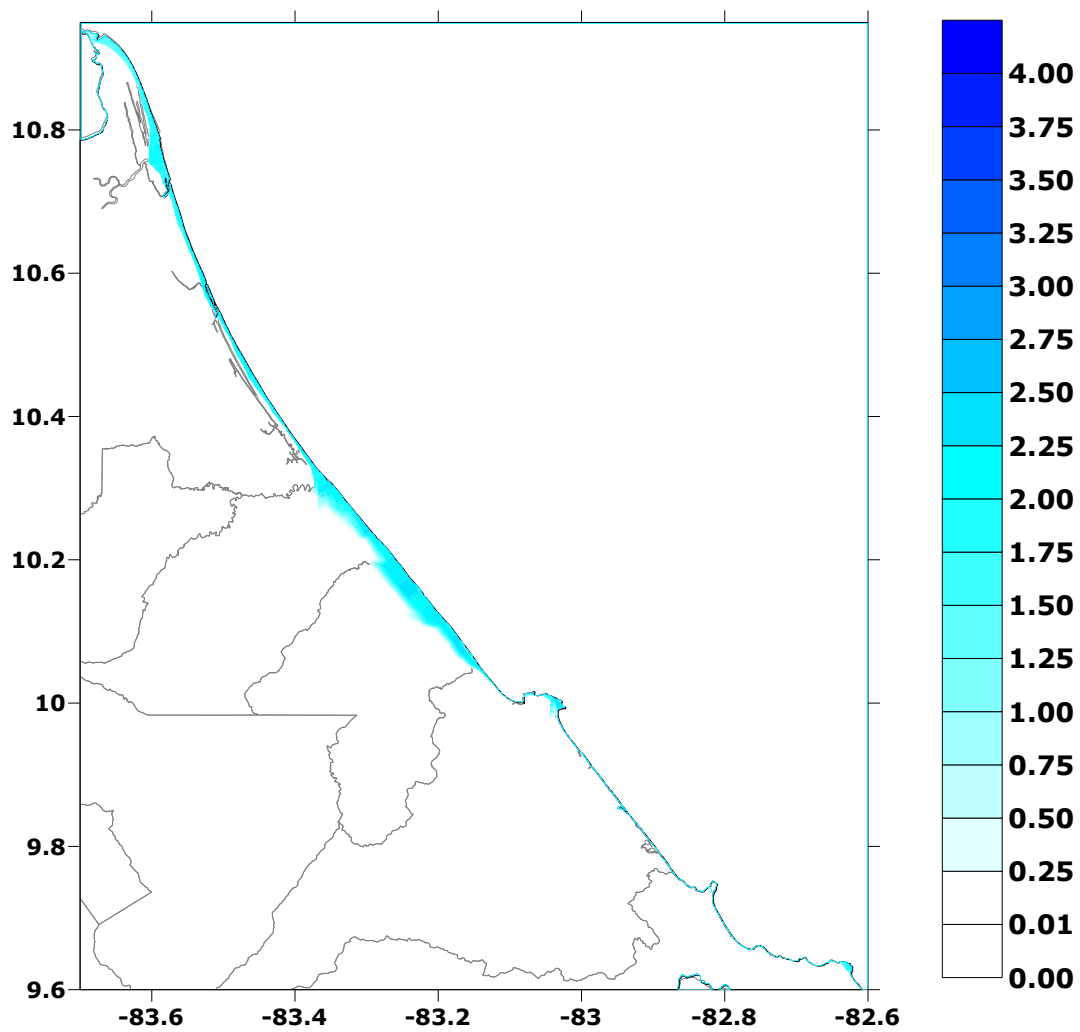


Figura 3-15
Mapa de distribución espacial del tirante de inundación [m] para 500 años de periodo de retorno

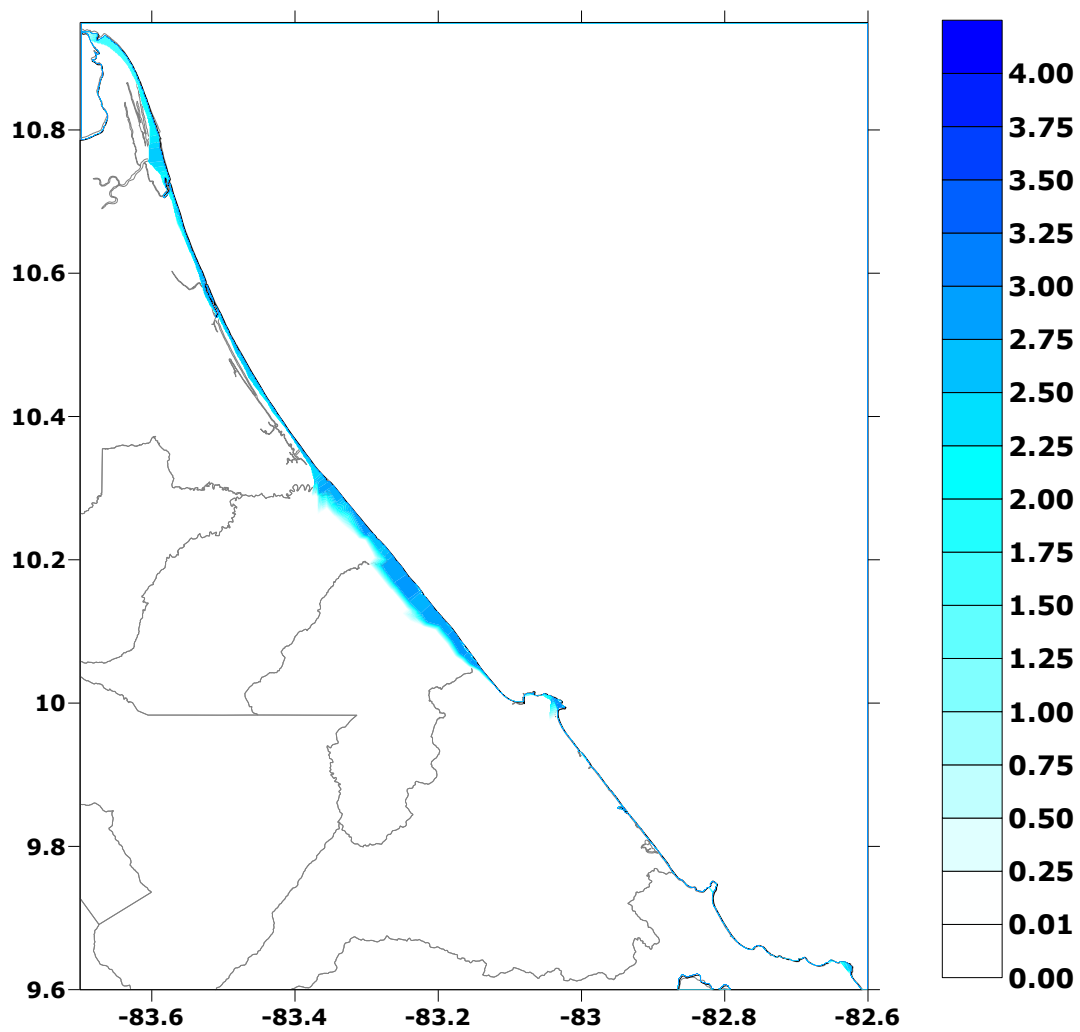


Figura 3-16
Mapa de distribución espacial del tirante de inundación [m] para 1000 años de periodo de retorno

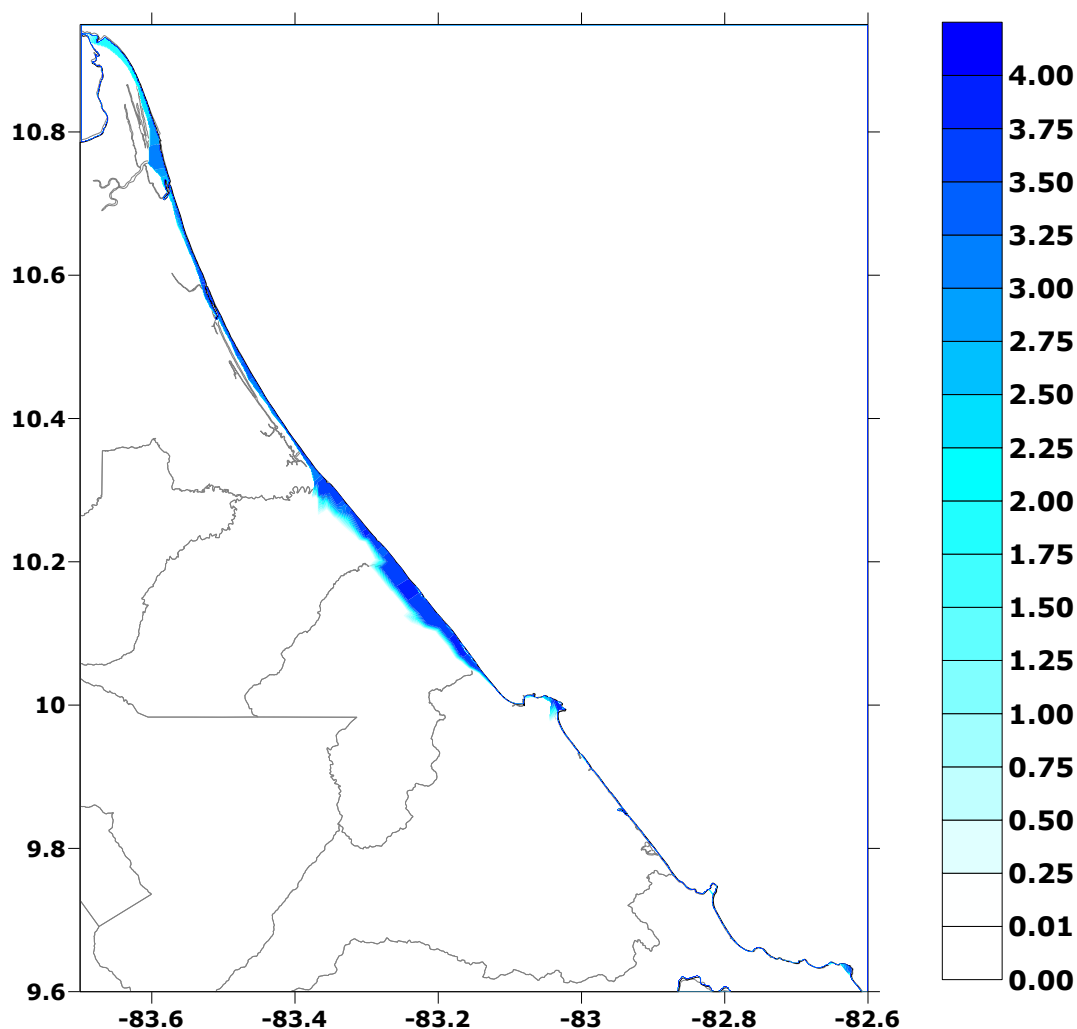


Figura 3-17

Mapa de distribución espacial del tirante de inundación [m] para 2500 años de periodo de retorno

3.4.3 Mapas de amenaza por lluvias huracanadas

Se calcularon mapas de amenaza uniforme por lluvias huracanadas, tomando como medida de intensidad la profundidad de precipitación, según lo explicado en el informe ERN-CAPRA-T1-3 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN 2009), y para periodos de retorno de 20, 50, 100, 500 y 1000 años. Los cálculos fueron realizados empleando el programa ERN-Huracán (ERN 2007).

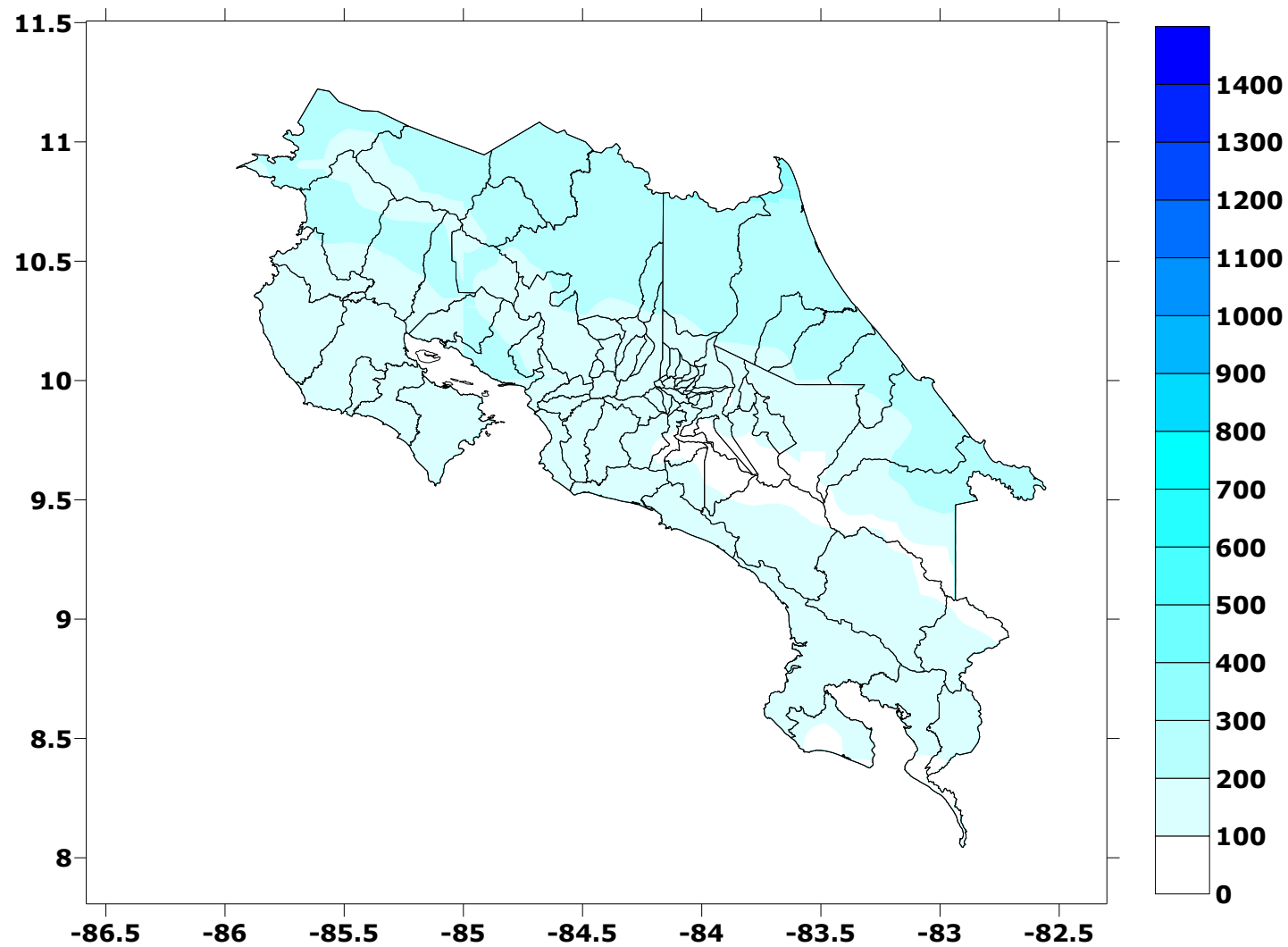


Figura 3-18
Mapa de distribución espacial de la profundidad de precipitación [mm] para 20 años de periodo de retorno

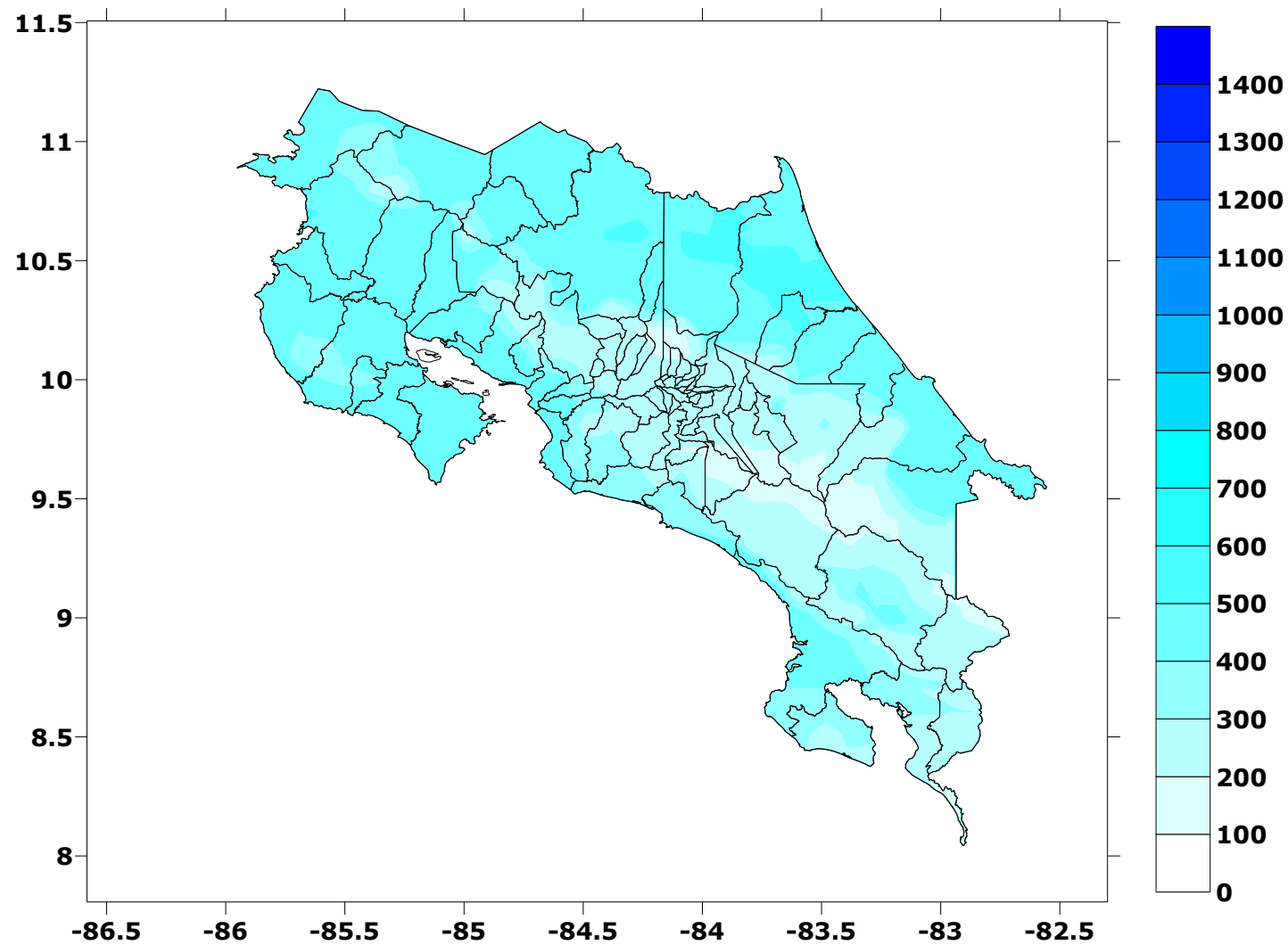


Figura 3-19
Mapa de distribución espacial de la profundidad de precipitación [mm] para 50 años de periodo de retorno

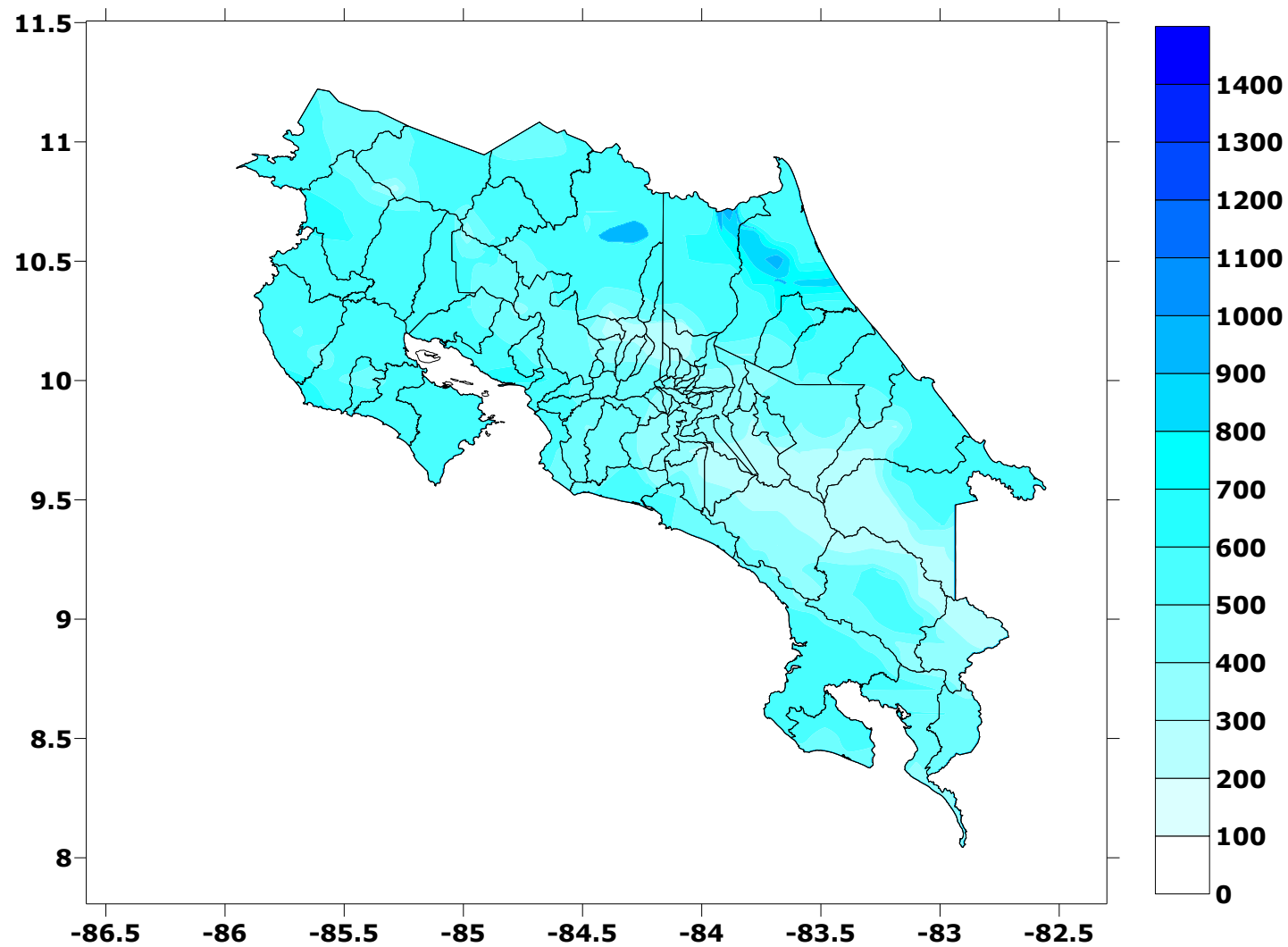


Figura 3-20
Mapa de distribución espacial de la profundidad de precipitación [mm] para 100 años de periodo de retorno

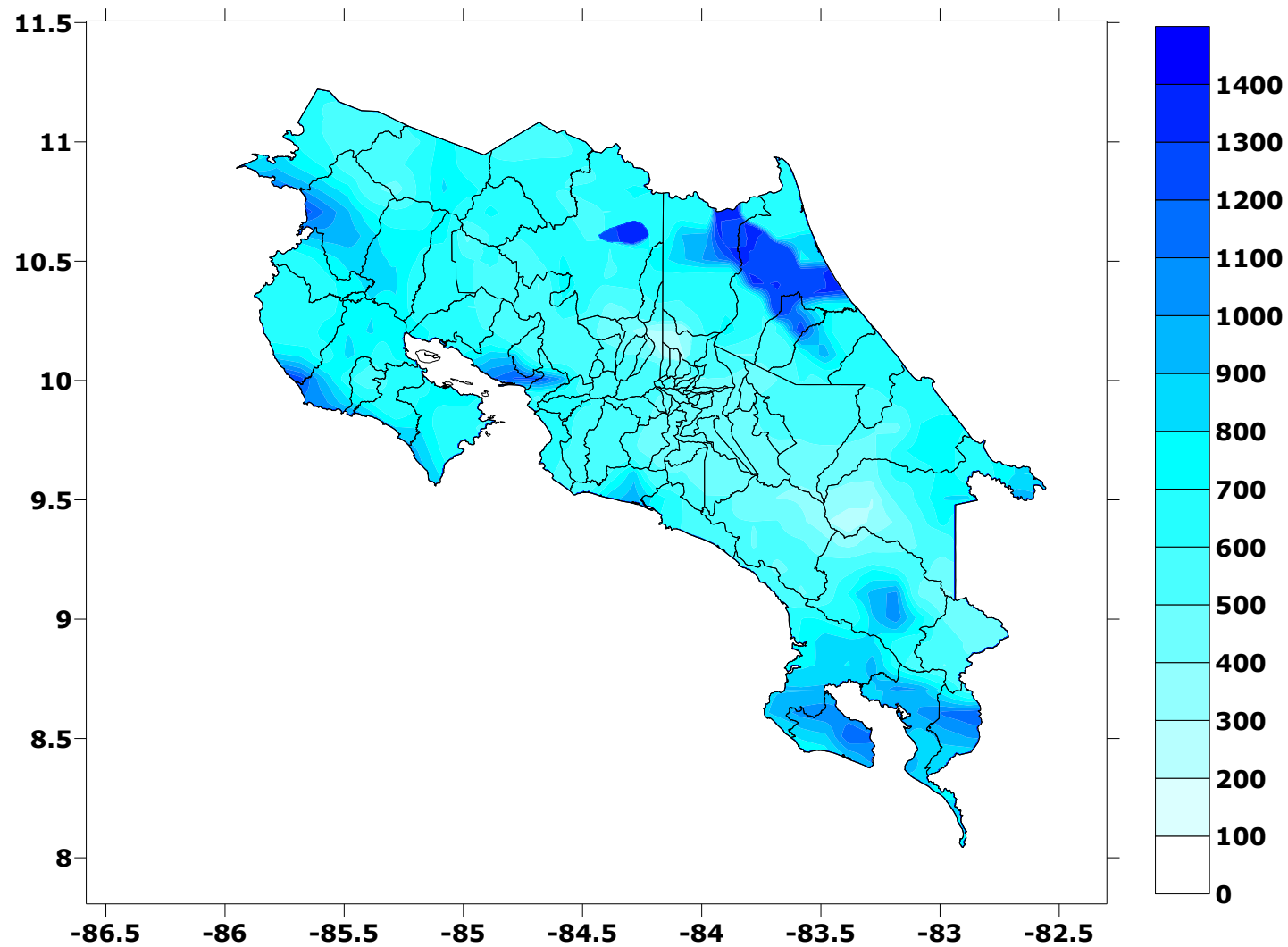


Figura 3-21
Mapa de distribución espacial de la profundidad de precipitación [mm] para 500 años de periodo de retorno

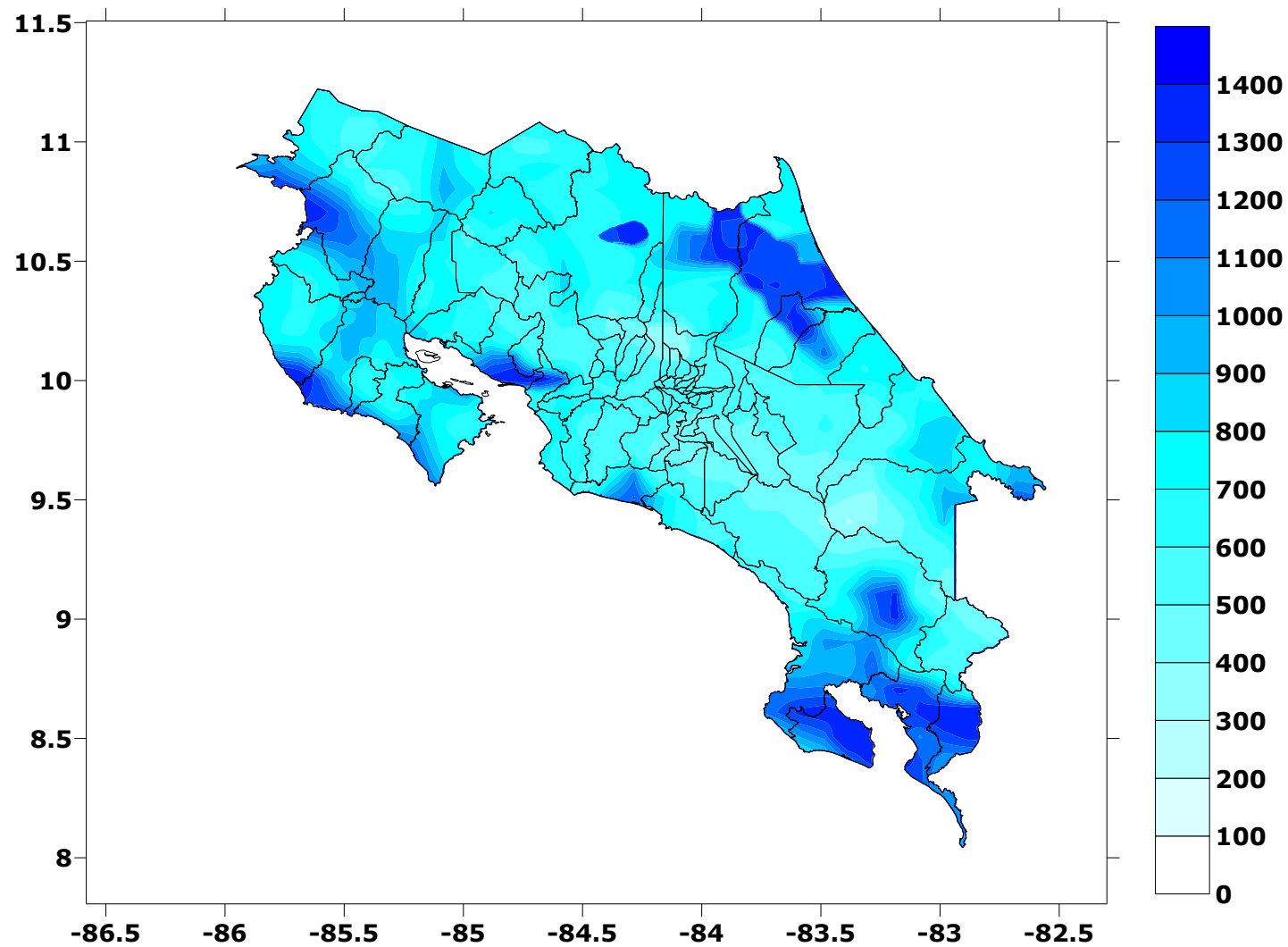


Figura 3-22
Mapa de distribución espacial de la profundidad de precipitación [mm] para 1000 años de periodo de retorno

3.4.4 Mapas de amenaza por inundación asociada a lluvias huracanadas

Aplicando el modelo de eventos detonantes propuesto en este estudio (ERN-CAPRA-T1-1 Componentes Principales del Análisis de Riesgos, ERN 2009), se calcularon los mapas de amenaza por inundación asociada a lluvias huracanadas, tomando como medida de intensidad la profundidad de inundación, y para periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años. Los cálculos fueron realizados empleando el programa ERN-Inundación (ERN 2009).

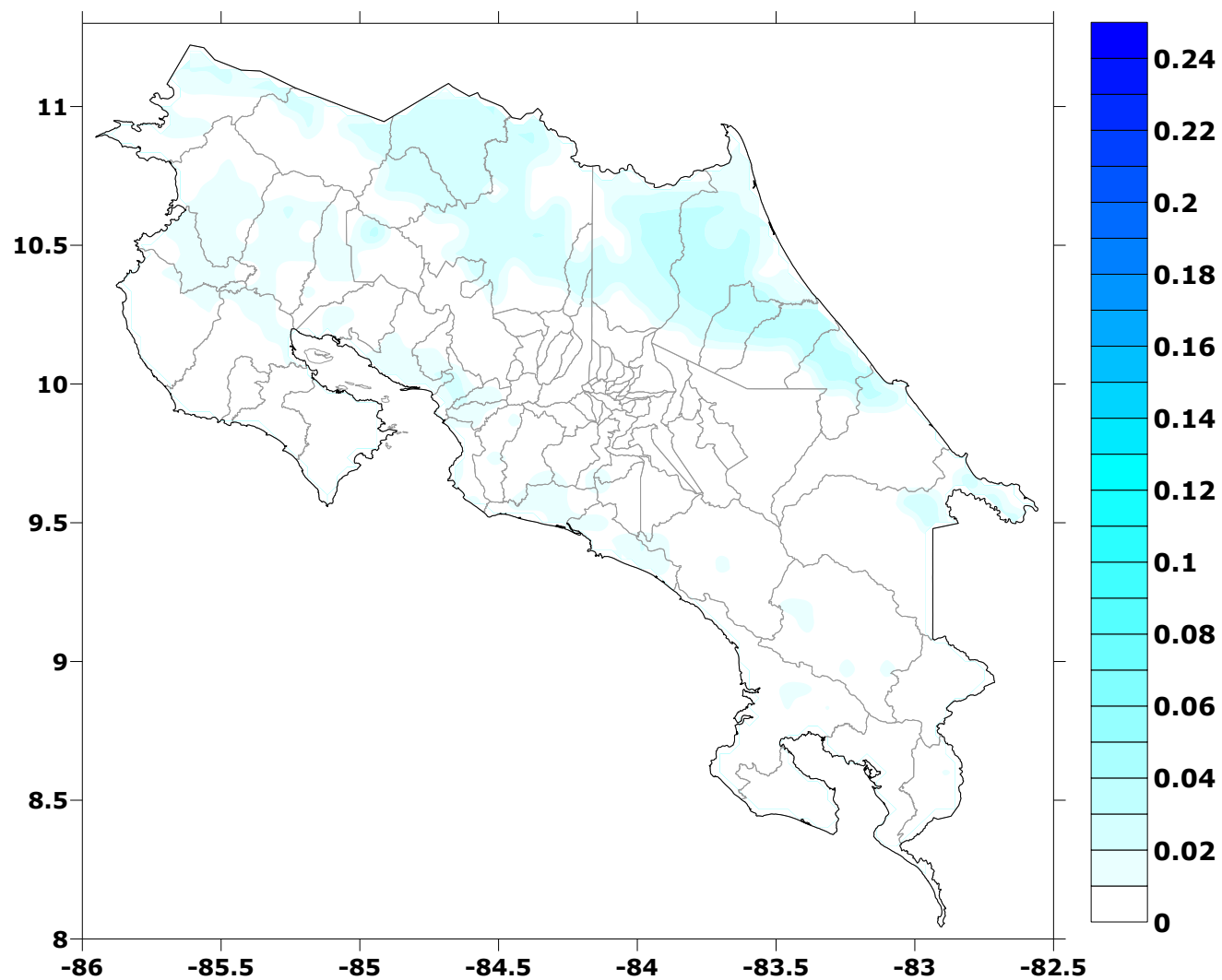


Figura 3-23
Mapa de distribución espacial de la profundidad de inundación [m] para 20 años de periodo de retorno

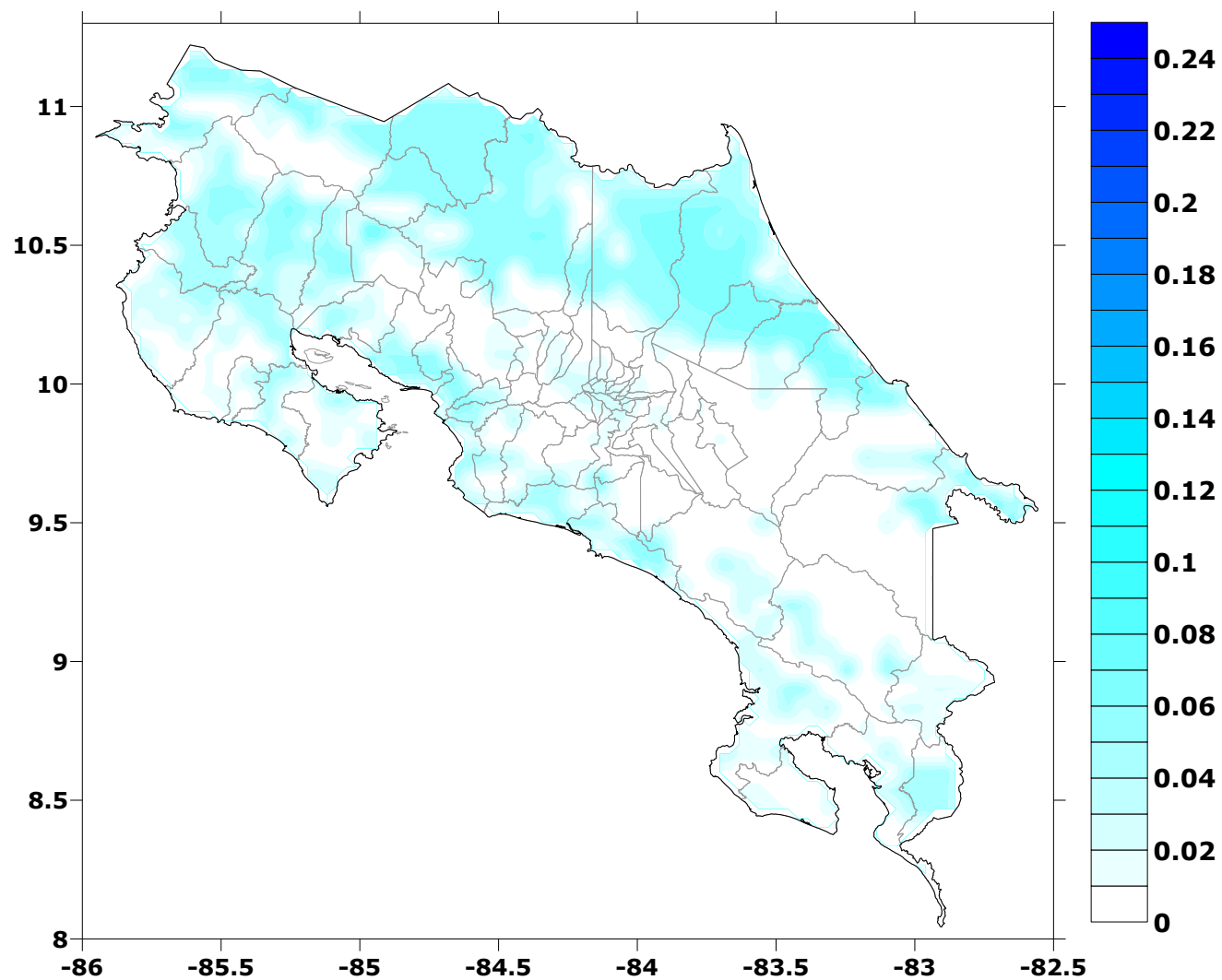


Figura 3-24
Mapa de distribución espacial de la profundidad de inundación [m] para 50 años de periodo de retorno

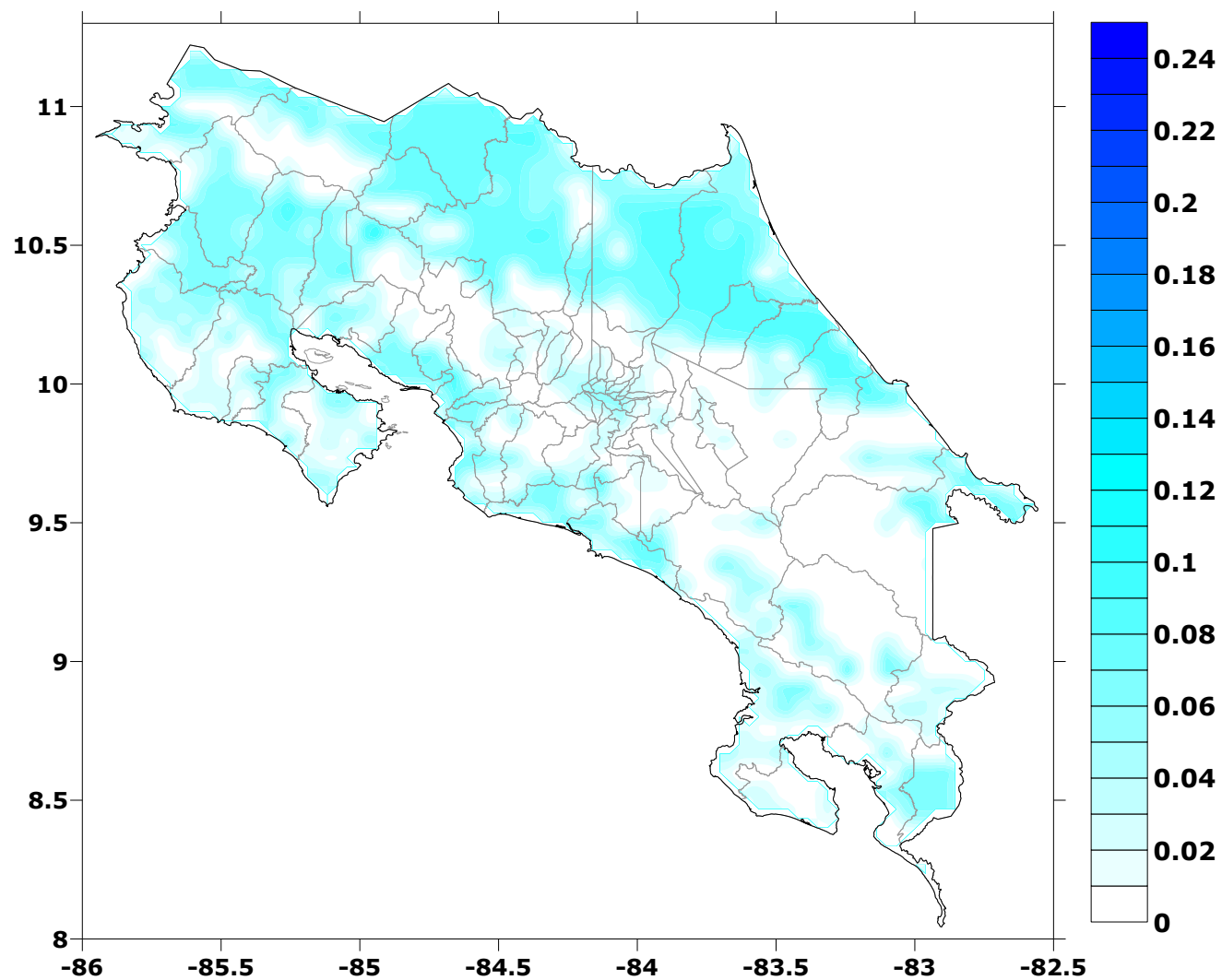


Figura 3-25
Mapa de distribución espacial de la profundidad de inundación [m] para 100 años de periodo de retorno

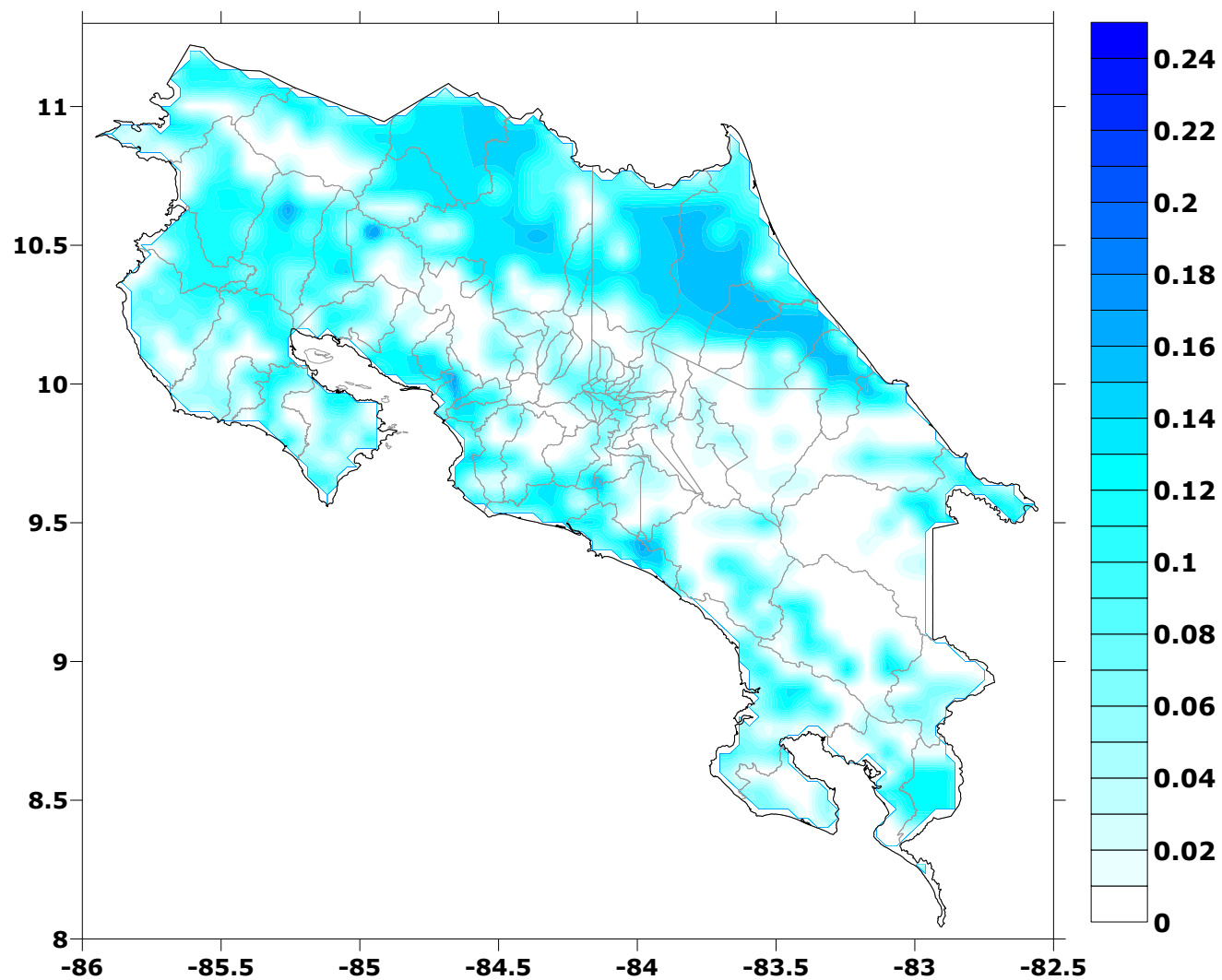


Figura 3-26
Mapa de distribución espacial de la profundidad de inundación [m] para 500 años de periodo de retorno

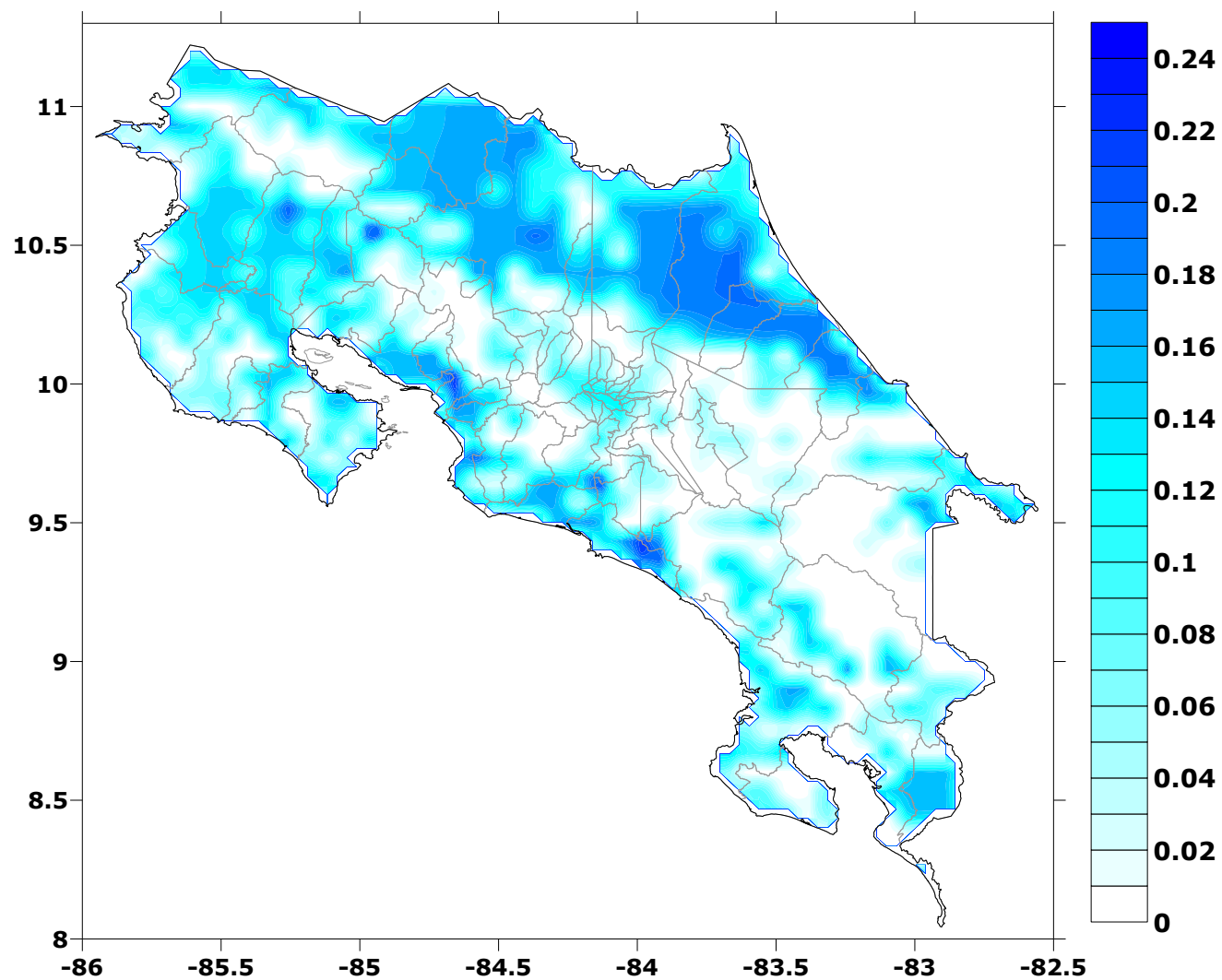


Figura 3-27
Mapa de distribución espacial de la profundidad de inundación [m] para 1000 años de periodo de retorno

4 Amenaza por lluvias intensas e inundación

Con el fin de llevar a cabo el análisis de amenaza por lluvias intensas, se recurrió a la revisión de toda la información meteorológica disponible. La modelación adecuada de las precipitaciones que pueden presentarse en un territorio particular depende fuertemente de la calidad de la información. Se requiere de un periodo de mediciones de valores de precipitación diarios, de alrededor de 30 años para caracterizar correctamente el régimen de lluvias de una región. En el caso particular de Costa Rica, la información hidrometeorológica puesta a disposición de CAPRA en la actualidad, cuenta con una calidad que no permite la predicción de las condiciones climáticas empleando los modelos propuestos (ver informe ERN-CAPRA-T1-3 Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN 2009).

Por ejemplo, se revisó la información obtenida del sitio web de la NOAA. La distribución de estaciones con registros diarios en dicha base de datos, permitió hacer la escogencia preliminar de la cuenca mejor caracterizada y potencialmente analizable. Observando la distribución de estaciones, se consideró que la única cuenca que podría ser analizada es la del río grande de Tarcoles, ya que posee más de dos estaciones (ver Figura 4-1). Sin embargo, dichas estaciones se encuentran centradas, lo que impide una caracterización del régimen de lluvias en la totalidad de la cuenca. Adicionalmente, después de revisar la información disponible en dichas estaciones, se descartó realizar el estudio sobre esta cuenca por la poca fiabilidad que de la información, ya que el número de registros resulta insuficiente, como se indica en la Tabla 4-1.

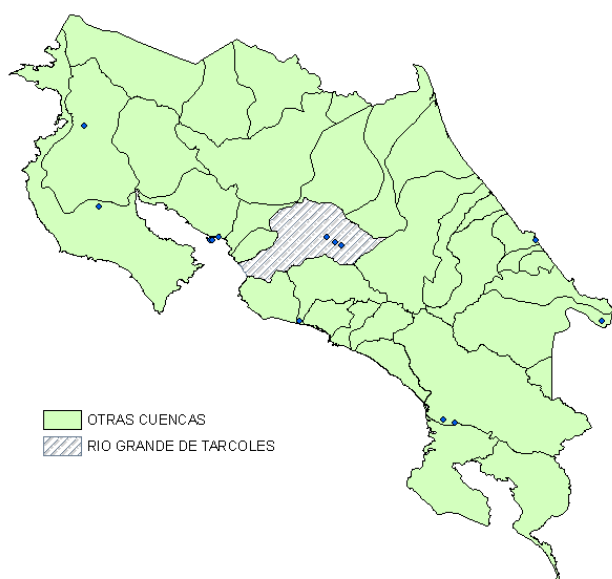


Figura 4-1
Distribución de estaciones con información disponible en NOAA

Tabla 4-1
Registros disponibles por estación en la cuenca del río grande de Tarcoles

USAF ID	Estación	Registros
787605	SAN JOSE/LA SABANA	1
787620	JUAN SANTAMARIA INT	42,000
787625	TOBIAS BOLANOS INTL	660

Por este motivo, no se calculó amenaza por lluvias intensas y la inundación asociada.

5 Amenaza por deslizamientos

5.1 Introducción

Los deslizamientos son fenómenos muy comunes en países tropicales con alta densidad de zonas montañosas, y regímenes de precipitaciones fuertes. Si bien la magnitud misma de un deslizamiento puede no derivar en catástrofes, su alta frecuencia de ocurrencia los posiciona como una de las amenazas más comunes y más importantes en Costa Rica.

El enfoque de cálculo aquí presentado está basado en la modelación punto a punto de la estabilidad, con el fin de cubrir espacialmente las condiciones generales de estabilidad de una región.

5.2 Información Empleada en la Modelación

Para la evaluación de la amenaza al deslizamiento se requiere información detallada de la zona de estudio, según lo especificado en el informe ERN-CAPRA-T1-3 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN 2009). A continuación se lista la información disponible para conformar los datos de entrada del modelo, que hacen parte de la información geográfica existente para Costa Rica:

- Mapa topográfico, con resolución de grilla de 90 m
- Mapa geológico general con información relacionada a los diferentes tipos de roca, como descripción, edad de formación, composición mineralógica, estratigrafía y simbología.
- Mapa de zonificación agronómica de suelos con información que permite conocer las características específicas de evolución y creación del suelo, dando indicios de los horizontes en que se desarrolla, y su procedencia (rocas parentales, texturas y tamaños de las partículas). Cabe anotar que no se cuenta con una estratigrafía de precisión de los suelos existentes en el país, por ende los espesores de suelo deben ser inferidos.

5.3 Parámetros del modelo.

Según lo especificado en el informe ERN-CAPRA-T1-3 (ERN 2009), se desarrollaron módulos de cálculo para cuatro modelos diferentes de amenaza por deslizamientos, cuya aplicabilidad es función de la información disponible. En este caso, se realizó la modelación a nivel nacional empleando los métodos de Mora-Varhson 1993, y de falla translacional. La información que se empleó en la modelación se indica a continuación.

5.3.1 Información general

La información general incluye la topografía del país, y la información geotécnica que requiera cada uno de los modelos. Las capas de propiedades de los suelos deslizables se generaron a partir de la información geotécnica y geológica disponible. La totalidad de las capas de información general son las siguientes:

- Topografía.
- Suelos.
 - Cohesión del estrato potencialmente deslizante
 - Cohesión del estrato base
 - Ángulo de fricción del estrato potencialmente deslizante
 - Ángulo de fricción del estrato base
 - Peso específico del estrato potencialmente deslizante
 - Peso específico del estrato base
 - Espesor del estrato potencialmente deslizante

5.3.2 Información de eventos detonantes

Los eventos considerados en este proyecto como detonantes de deslizamientos se deben especificar de maneras diferentes. La amenaza sísmica debe incluirse al modelo como un conjunto de escenarios estocásticos, cada uno con como una capa de intensidades de movimiento y una frecuencia anual de ocurrencia.

Las lluvias intensas no se consideran de manera directa. Se deben indicar el *estado de humedad* del suelo potencialmente deslizante, a partir del espesor de la capa de suelo. Para el caso en que la capa se encuentre completamente saturada, el estado de humedad toma un valor de cero (0), mientras que para un suelo completamente seco toma un valor de uno (1). Es posible variar las condiciones de humedad entre los valores descritos, y asignarle a cada escenario de humedad una frecuencia anual de ocurrencia. A partir de esta información se puede ubicar el nivel freático en el estrato potencialmente deslizante.

5.4 Mapas de Amenaza por Deslizamiento

Se calcularon los mapas de amenaza por deslizamiento para Costa Rica mediante los dos métodos mencionados anteriormente. El cálculo con el método de Mora-Varhson se realizó para 2 condiciones de humedad del suelo (completamente saturado y completamente seco), y un escenario sísmico, correspondiente con el terremoto de chinchona de Enero de 2009 (calculado con el programa CRISIS 2007, Ordaz et al 2007). El cálculo con el método de falla traslacional se realizó para las mismas 2 condiciones de humedad, sin sismo. Los análisis realizados se listan en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Análisis de amenaza por deslizamiento realizados

N°	Tipo de análisis	Escenarios de humedad	Escenarios de sismo	N° de escenarios de deslizamiento.
1	Mora Vahrson	2	1	2
2	Falla Plana	2	0	2

El parámetro de intensidad empleado es el *factor de inseguridad*, el cual corresponde al inverso del factor de seguridad. A mayor factor de inseguridad, mayor será la probabilidad de ocurrencia de la amenaza por deslizamiento. Los cálculos se realizaron empleando el programa ERN-Deslizamiento (ERN 2009).

Los mapas presentados a continuación se dibujan teniendo en cuenta las siguientes escalas:

Escala método Mora – Vahrson: La clasificación de la amenaza por este método se divide en varias clases que se describen en la siguiente escala de colores, que va desde amenaza 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 se da en función del factor de inseguridad, de la manera mostrada a continuación.

0	0.1	0.5	0.83	>1.11
Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto

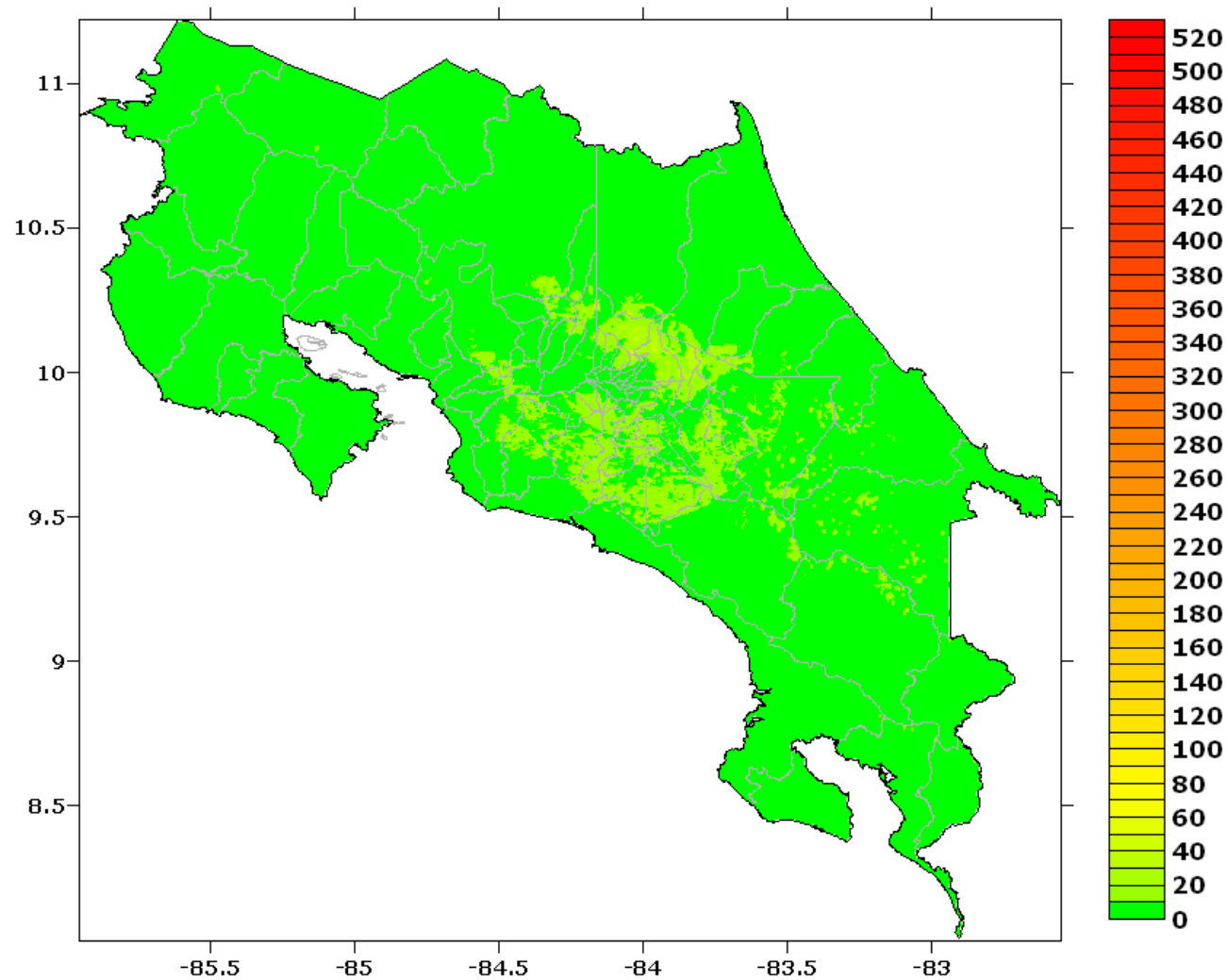


Figura 5-1

Mapa de amenaza por deslizamiento en condiciones secas con sismo. Calculado con el método de Mora-Varhson

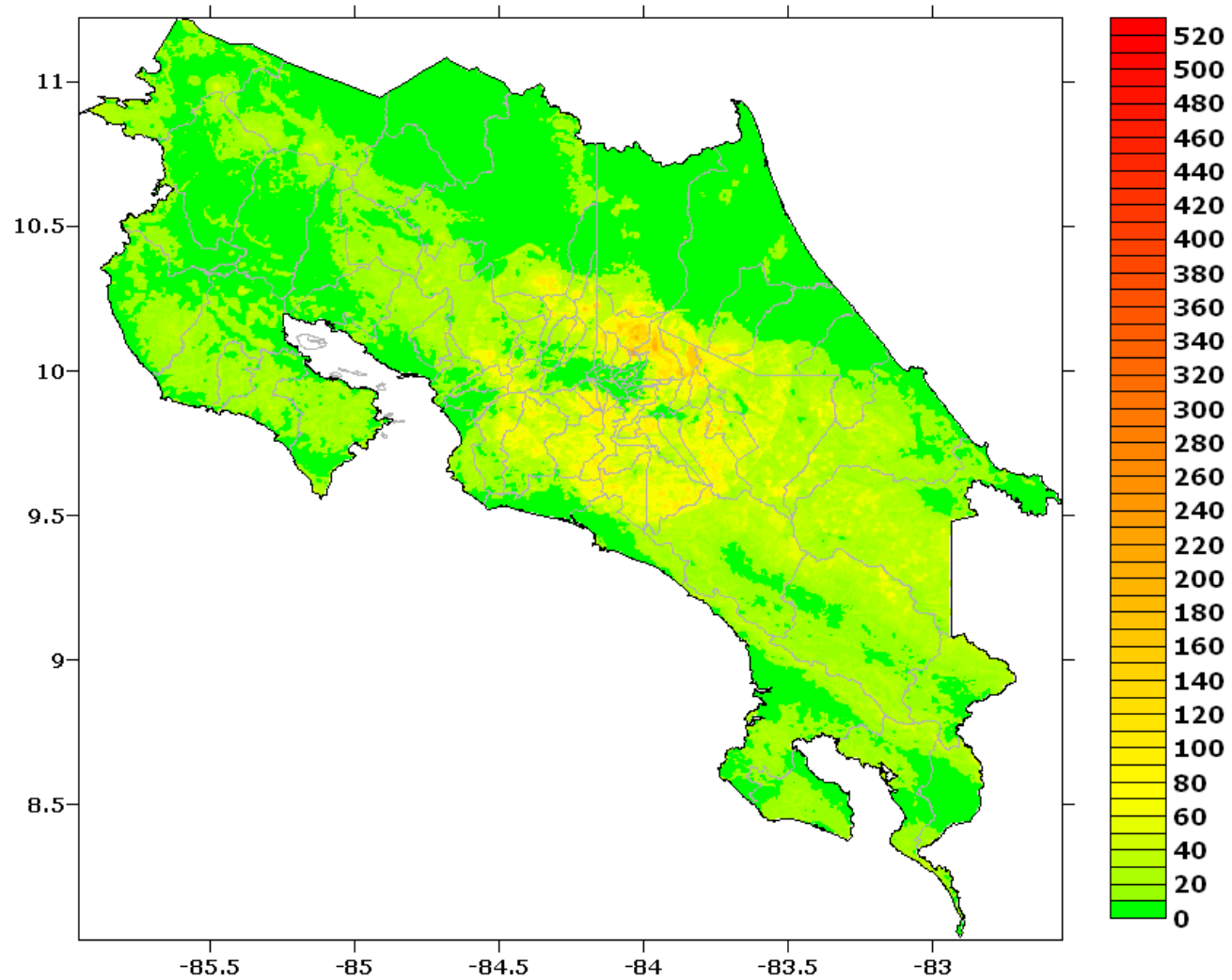


Figura 5-2
Mapa de amenaza por deslizamiento en condiciones húmedas con sismo. Calculado con el método de Mora-Varhson

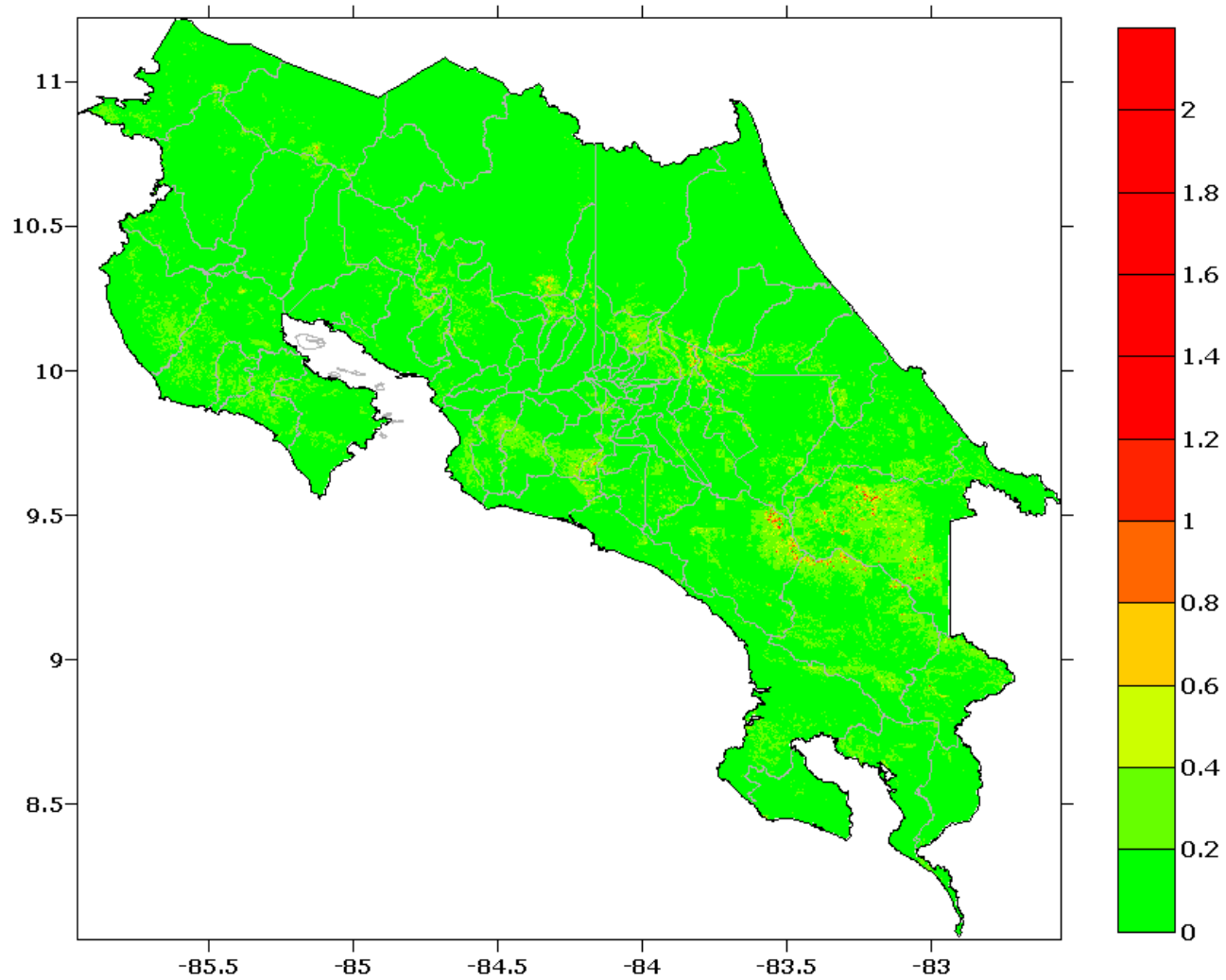


Figura 5-3

Mapa de amenaza por deslizamiento en condiciones secas sin sismo. Calculado con el método de falla traslacional

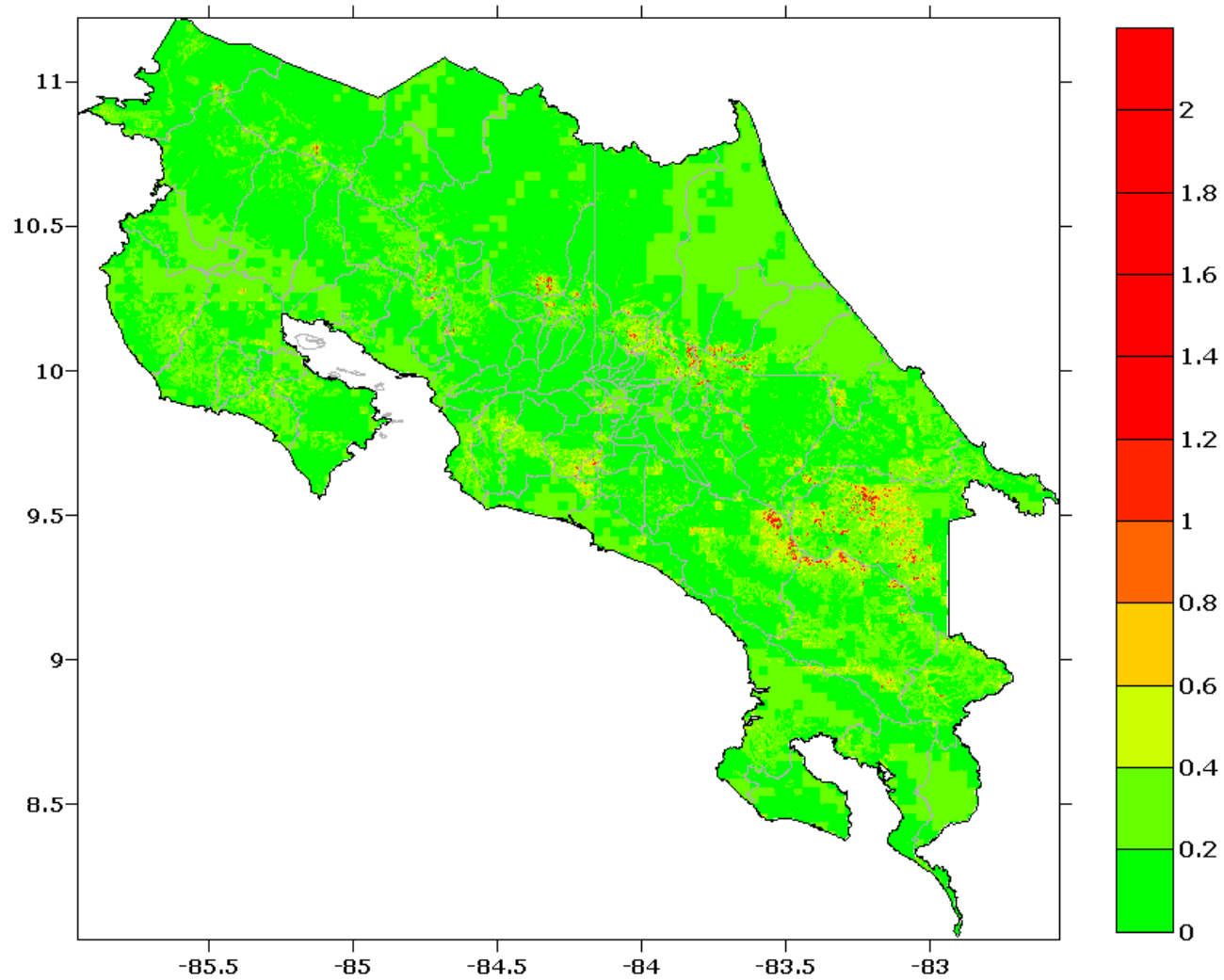


Figura 5-4

Mapa de amenaza por deslizamiento en condiciones saturadas sin sismo. Calculado con el método de falla traslacional

6 Amenaza volcánica

6.1 Introducción

Para el caso de la amenaza volcánica en Costa Rica, se realizó una modelación determinista de la amenaza al no contarse, en la mayoría de los casos, con información suficiente para una adecuada modelación probabilista. Cada volcán fue caracterizado a partir de su historia eruptiva y características vulcanológicas generales, con el fin de modelar el escenario de amenaza más representativo.

6.2 Entorno Local de la Amenaza

En Costa Rica hay 12 edificios volcánicos de los cuales tan solo 5 presentan indicios de actividad como por ejemplo sulfataras, fumarolas y esporádicas erupciones de vapor o lava (ver Tabla 6-1). La mayoría de los volcanes de Costa Rica se encuentran en la parte norte del país y en las tierras altas centrales, como se muestra en la Figura 6-1.

Tabla 6-1
Volcanes en Costa Rica

Nombre del volcán	Tipo de Volcán	Actividad
POAS	Estrato volcán	Reciente
ARENAL	Estrato volcán	Reciente
IRAZU	Estrato volcán	Reciente
TURRIALBA	Estrato volcán	Reciente
RINCON DE LA VIEJA	Complejo	Reciente
TENORIO	Estrato volcán	Inactivo
BARVA	Complejo	Inactivo
MIRAVALLS	Estrato volcán	Inactivo
OROSI	Estrato volcán	Inactivo

La modelación de la amenaza volcánica se realizó exclusivamente sobre los volcanes activos del país, que presentan actividad reciente a partir de la cual fue posible recopilar datos de erupciones históricas para la caracterización del volcán.

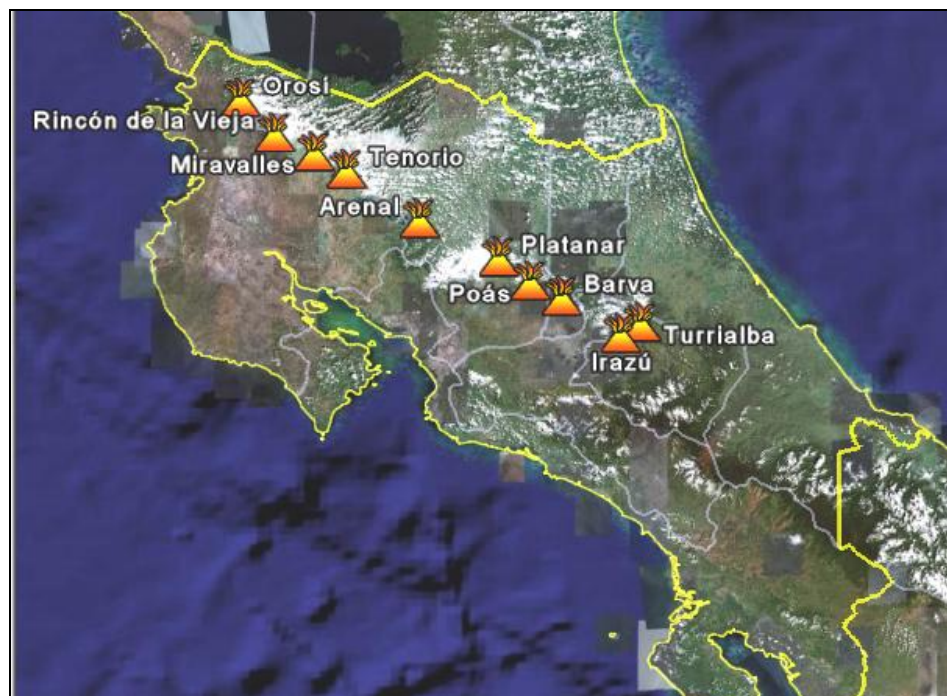


Figura 6-1

Localización de principales volcanes en Costa Rica

(Tomado de Global Volcanism Program - Smithsonian Institute. Disponible en Google Earth)

6.2.1 Volcán Poas

Es uno de los edificios volcánicos más activos de Costa Rica, tiene tres cráteres alineados de Norte a Sur. Es un estratovolcán con composición magmática basáltica-andesítica. Se localiza al norte del Valle Central a unos 45 km al noroeste de San José. La cima se conforma de una gran caldera antigua la cual posee el Cono Botos (con una laguna fría), el Von Frantzius y el cráter activo (con un lago caliente y ácido). Botos es un antiguo cráter ocupado por una laguna fría de unos 9 m de profundidad, agua cristalina y de fondo semiplano y sedimentado por materiales de las paredes interiores con el aporte de material orgánico. El cono Von Frantzius se localiza a unos 900 m al norte del cráter activo y se encuentra parcialmente destruido en su flanco sur, el lago en su cima es uno de los más ácidos en el mundo, con un pH cerca de cero. (Figura 6-2)



Figura 6-2
Volcán Poas, a la derecha (arriba) cono Botos
y en la izquierda (medio) cono Von Frantzius con su lago ácido.
 (Fuente: http://thetouristtravel.com/archivos_subidos/Image/CENTROAMERICA/Costarica/Vulkan_Poas.jpg)

La geología del cráter activo del Volcán Poás ha sido estudiada por muchos investigadores, entre ellos Thorpe et al (1981)¹ quien consideró que está compuesto por rocas piroclásticas y *flujos de lava*. Estas últimas están expuestas en las paredes norte, este y sur del cráter, con espesores de hasta 50 m, la composición química de estas lavas son de tipo andesítico, mientras que las rocas piroclásticas están formadas por cenizas y arenas volcánicas.

Desde 1828 se han reportado erupciones freáticas y freatomagmáticas, y es común observar geisers emanando del lago cráter. Algunos de los eventos más connotados se refieren a la actividad de 1910 y el periodo entre 1952-1955. Después de este último periodo freatomagmático la actividad se ha caracterizado por eventos extraordinarios de

¹Tomado de: http://atlas.snet.gob.sv/documentos/volcanes/texto4.php?pagina=Actividad_CostaRica2.html#cr_poas

desgasificación y emanación de vapores. En casos específicos los sedimentos del fondo del lago disecado ha alcanzado grandes distancias hacia el oeste y suroeste al ser arrastrados por los vientos prevalecientes.

6.2.1.1 Modelación de la amenaza

La modelación de la amenaza se llevó a cabo empleando el programa ERN-Volcán (ERN, 2009). Los valores de las diferentes variables involucradas en la modelación de la amenaza del volcán Poas se presentan en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2
Parámetros del modelo del Volcán Poas

Modelo de ERN-Volcán				
Tipo de análisis:	Determinista			
Definición de ventosas:	Única Ventosa	Coordenadas:	Este	-84.24°
			Norte	10.17°
Flujos de lava				
Distancia máxima:	15000 m	Espesor:	5 m	
Flujos piroclásticos				
Altura columna eruptiva:	10 Km	Ángulo cono:	50°	
Verifica accesibilidad:	Si			
Caída de cenizas				
Altura columna eruptiva:	10 Km	Campo de viento		
Volúmen expulsado:	0.01 Km3	Altura (%)	Vel (m/s)	Dir (°)
Factor de forma:	0.2	0	1	180
Nº divisiones altura:	20	20	1	180
μ Tamaño partículas:	-1.5	40	1	180
σ Tamaño partículas:	3	80	1	270
Paso discretización X:	30	100	1	270
Paso discretización Y:	30			
Coeficiente difusividad:	750 m2/s			

A continuación se presentan los mapas de amenaza para los diferentes tipos de productos volcánicos considerados.

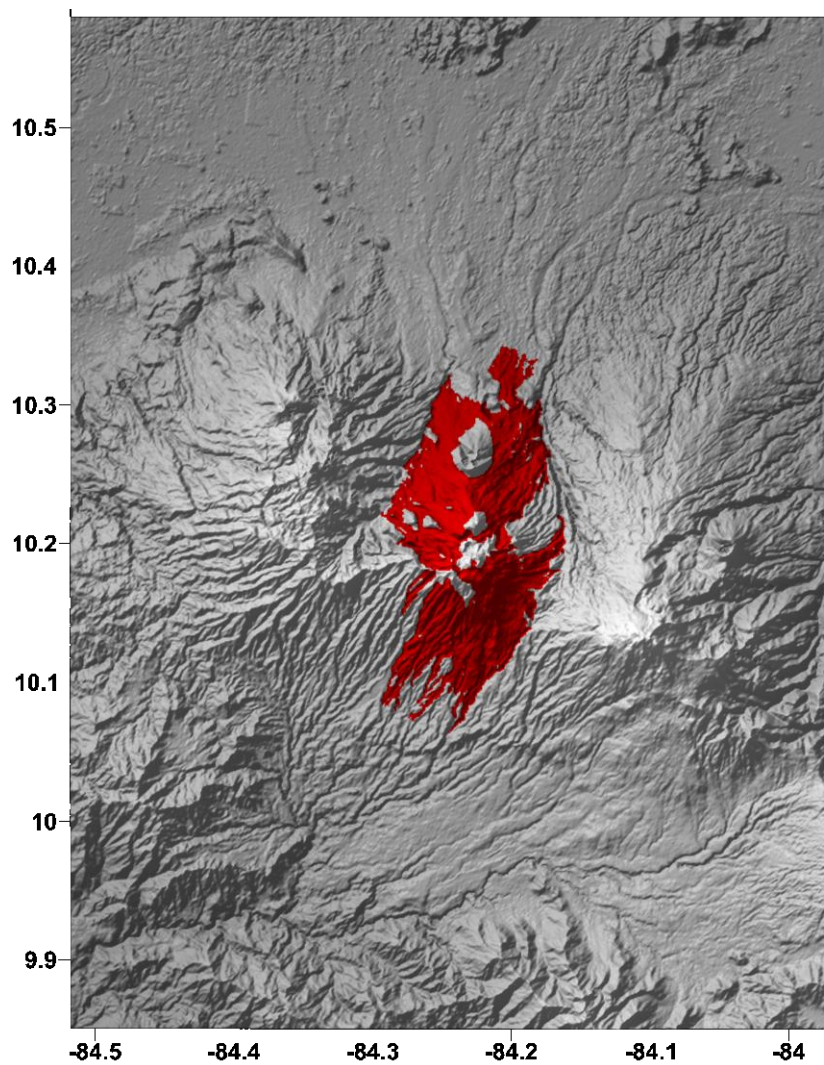


Figura 6-3
Mapa de amenaza determinista por flujos de lava en el volcán Poas

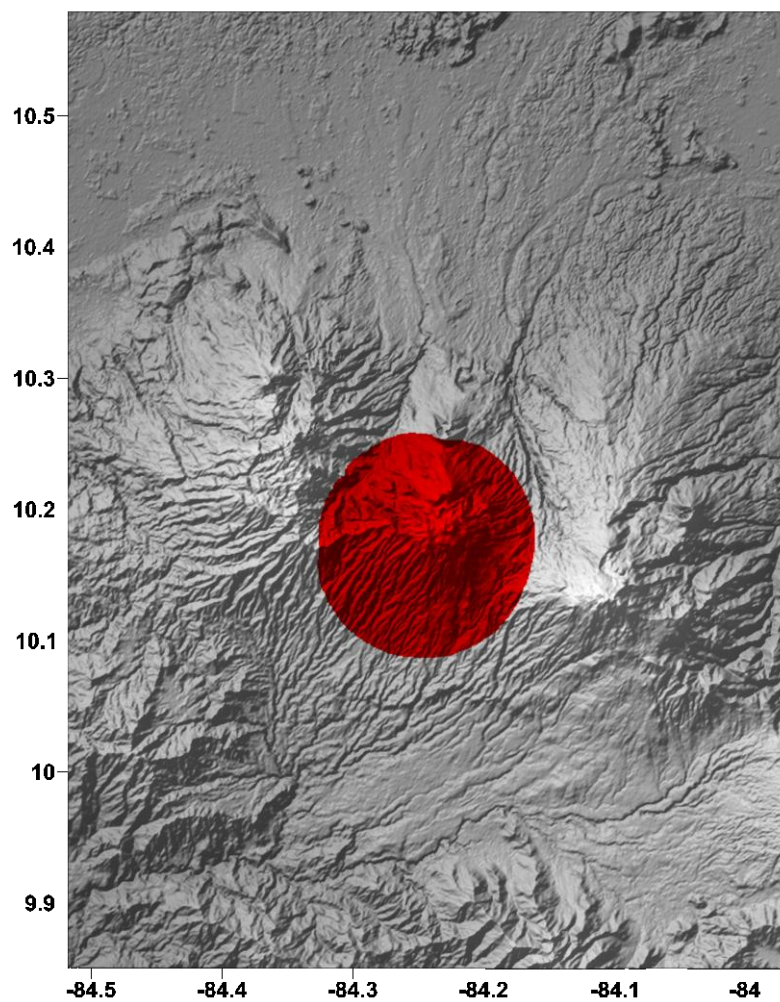


Figura 6-4

Mapa de amenaza determinista por flujos piroclásticos en el volcán Poas

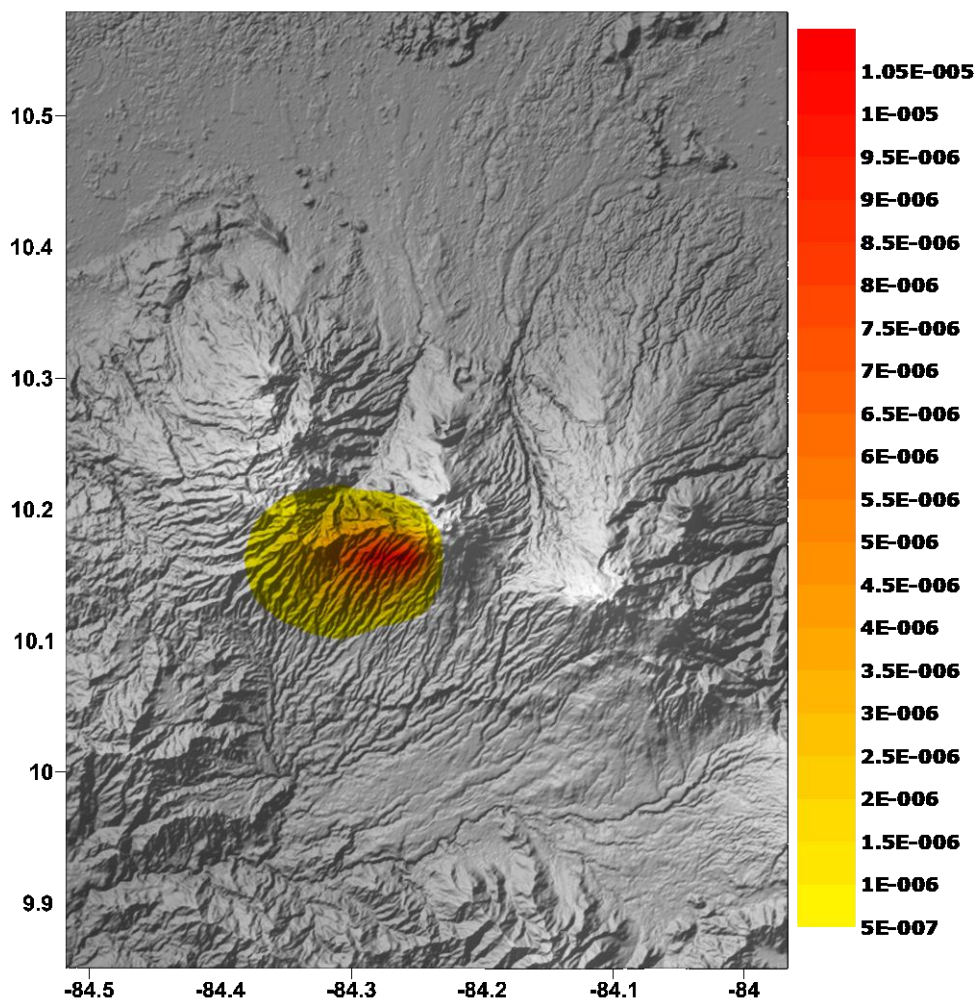


Figura 6-5

Mapa de amenaza determinista por caída de cenizas [m] en el volcán Poas

6.2.2 Volcán Arenal

Es uno de los estratovolcanes más jóvenes de Costa Rica y más estudiados del mundo. El volcán Arenal, se encuentra localizado al noroeste de Costa Rica, formando parte de la Cordillera Volcánica de Guanacaste. Es un estratovolcán de forma cónica, con una altura de aproximadamente 1700 m.s.n.m. (Figura 6-6)

Antes de 1968 era un estratovolcán de forma cónica casi perfecta construido por capas alternas de ceniza volcánica y lapilli angular, flujos de lava de tipo Aa y en bloques y por depósitos de nubes ardientes con bloques y ceniza. Actualmente, un cono adosado se eleva desde el flanco oeste para dar la apariencia de volcanes gemelos cuando se observan desde el norte o sur. En su flanco este se distingue el Cerro Chato.

Estudios recientes indican que el volcán arenal detono erupciones de hasta $VEI = 4$ en el año 3900 AC, arrojando a la atmosfera un volumen de Tefra de $1.5 \times 10^8 m^3$. Así mismo los registros indican que en el año 1030 DC un nuevo evento de $VEI = 4$ produjo $9 \times 10^8 m^3$ de material, siendo esta la última erupción de tales proporciones. Después de más de 500 años el Arenal dejó su estado pasivo y despertó en julio de 1968, con un $VEI = 3$, un volumen de lava de $6.4 \pm 1.0 \times 10^8 m^3$ y un volumen de tefra de $3.5 \pm 0.6 \times 10^7 m^3$ expulsados produciendo flujos piroclásticos y avalanchas de escombros que arrasaron kilómetros de bosque virgen y un par de comunidades lecheras y agrícolas que se localizaban en la zona de influencia del volcán. Unas 90 personas fallecieron y las pérdidas materiales fueron incalculables.

Esta actividad se ha mantenido desde entonces y se alterna de muchos modos. Periodos de emplazamiento de flujos de lava contrastan con periodos de erupciones cargadas de gases, vapores y cenizas. Algunas veces presentándose flujos piroclásticos.



Figura 6-6
Volcán Arenal

(Fuente: <http://www.arenal.net/photo/volcano-updates/may-31-2006/>)

6.2.2.1 Modelación de la amenaza

La modelación de la amenaza se llevó a cabo empleando el programa ERN-Volcán (ERN, 2009). Los valores de las diferentes variables involucradas en la modelación de la amenaza del volcán Arenal se presentan en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3
Parámetros del modelo del Volcán Arenal

Modelo de ERN-Volcán				
Tipo de análisis:	Determinista			
Definición de ventosas:	Única Ventosa	Coordenadas:	Este	-84.70°
			Norte	10.46°
Flujos de lava				
Distancia máxima:	25000 m	Espesor:	5 m	
Flujos piroclásticos				
Altura columna eruptiva:	20 Km	Ángulo cono:	70°	
Verifica accesibilidad:	No			
Caída de cenizas				
Altura columna eruptiva:	20 Km	Campo de viento		
Volumen expulsado:	1.00 Km3	Altura (%)	Vel (m/s)	Dir (°)
Factor de forma:	0.2	0	1	180
Nº divisiones altura:	20	20	1	180
μ Tamaño partículas:	-1.5	40	1	180
σ Tamaño partículas:	3	80	1	180
Paso discretización X:	30	100	1	180
Paso discretización Y:	30			
Coefficiente difusividad:	750 m2/s			

A continuación se presentan los mapas de amenaza para los diferentes tipos de productos volcánicos considerados.

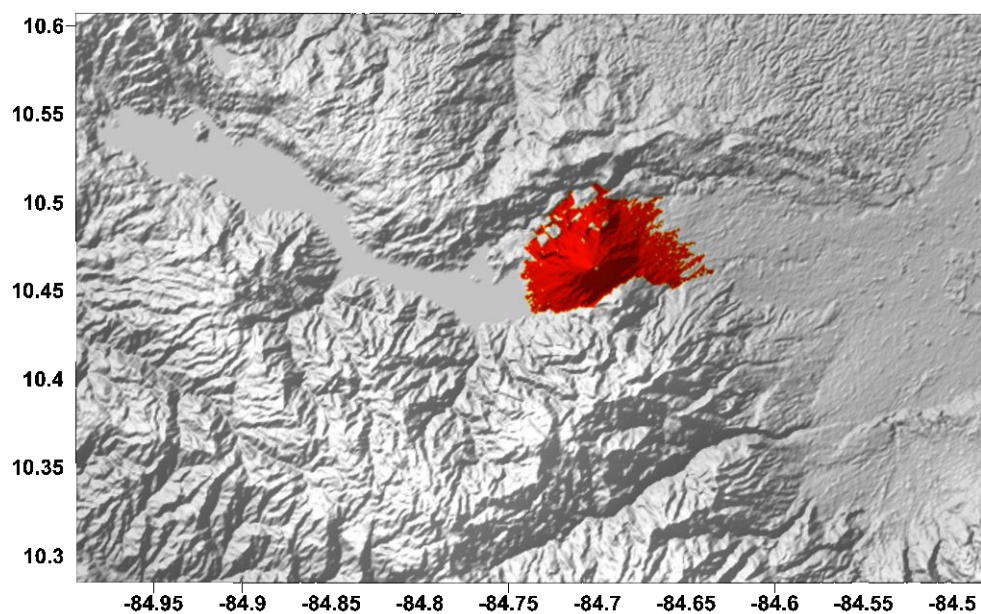


Figura 6-7
Mapa de amenaza determinista por flujos de lava en el volcán Arenal

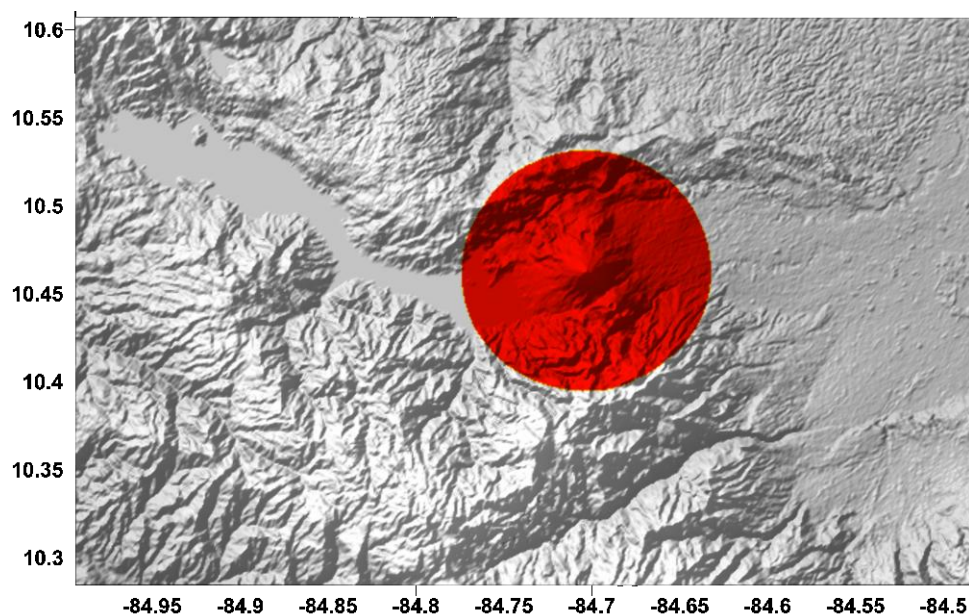


Figura 6-8

Mapa de amenaza determinista por flujos piroclásticos en el volcán Arenal

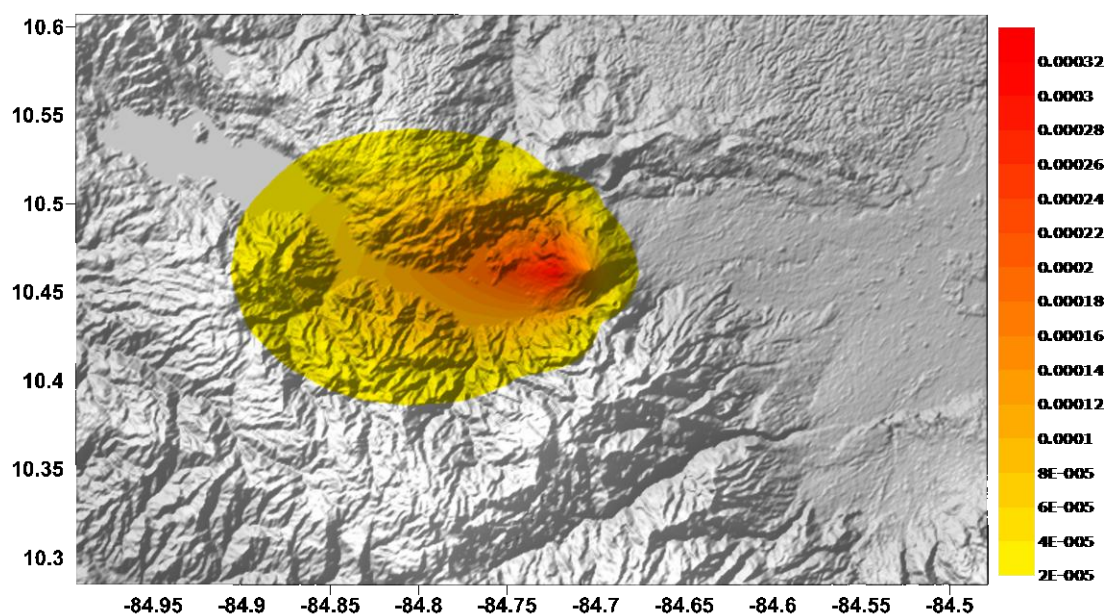


Figura 6-9

Mapa de amenaza determinista por caída de cenizas [m] en el volcán Arenal

6.2.3 Volcán Irazú

El Volcán Irazú es un estratovolcán activo y forma parte de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica. Durante toda su vida prehistórica ha tenido una actividad en su mayor parte relacionada a *flujos de lava*, sin embargo gran parte del edificio volcánico está cubierto de capas de cenizas y flujos de barro de espesor variable que forman los fértiles suelos de la

zona. (Saénz R., Barquero J., Malavassi E., 1982)². Es el volcán activo más alto de Costa Rica (3432 msnm) y en general posee una forma sub-cónica irregular (Figura 6-10)



Figura 6-10
Volcán Irazú

(Fuente: https://royshencr.powweb.com/html/pic/main.php?g2_itemId=235&g2_imageViewsIndex=1)

La zona intracratérica se encuentra formada por 3 estructuras principales; el cráter activo hacia el noreste con unos 1000 m de diámetro, una profundidad de 180 m y que alberga un lago de color y características cambiantes. El cráter Diego de la Haya se encuentra al norte de la caldera con unos 80 m de profundidad y de forma alargada hacia el este. Finalmente se observa en el lado sur una larga estructura semiplana que corresponde a los restos de una terraza antigua la cual se conoce con el nombre de Playa Hermosa.

Desde 1723, Irazú ha tenido al menos 23 erupciones. La más reciente duró desde 1963 hasta 1965. Causó al menos 40 muertos y destruyó unas 400 casas, fábricas y terreno cultivable. Esta erupción se calificó con un VEI = 3.

6.2.3.1 Modelación de la amenaza

La modelación de la amenaza se llevó a cabo empleando el programa ERN-Volcán (ERN, 2009). Los valores de las diferentes variables involucradas en la modelación de la amenaza del volcán Irazú se presentan en la Tabla 6-4.

² Tomado de: http://atlas.snet.gob.sv/documentos/volcanes/texto4.php?pagina=Actividad_CostaRica2.html#cr_irazu

Tabla 6-4
Parámetros del modelo del Volcán Irazú

Modelo de ERN-Volcán				
Tipo de análisis:	Determinista			
Definición de ventosas:	Única Ventosa	Coordenadas:	Este Norte	-83.90° 9.97°
Flujos de lava				
Distancia máxima:	25000 m	Espesor:	5 m	
Flujos piroclásticos				
Altura columna eruptiva:	15 Km	Ángulo cono:	60°	
Verifica accesibilidad:	No			
Caída de cenizas				
Altura columna eruptiva:	15 Km	Campo de viento		
Volumen expulsado:	10.0 Km3	Altura (%)	Vel (m/s)	Dir (°)
Factor de forma:	0.1	0	0.5	180
Nº divisiones altura:	20	30	0.5	180
μ Tamaño partículas:	-3.2	50	0.5	180
σ Tamaño partículas:	1.5	70	0.5	180
Paso discretización X:	20	90	0.5	180
Paso discretización Y:	20			
Coeficiente difusividad:	750 m2/s			

A continuación se presentan los mapas de amenaza para los diferentes tipos de productos volcánicos considerados.

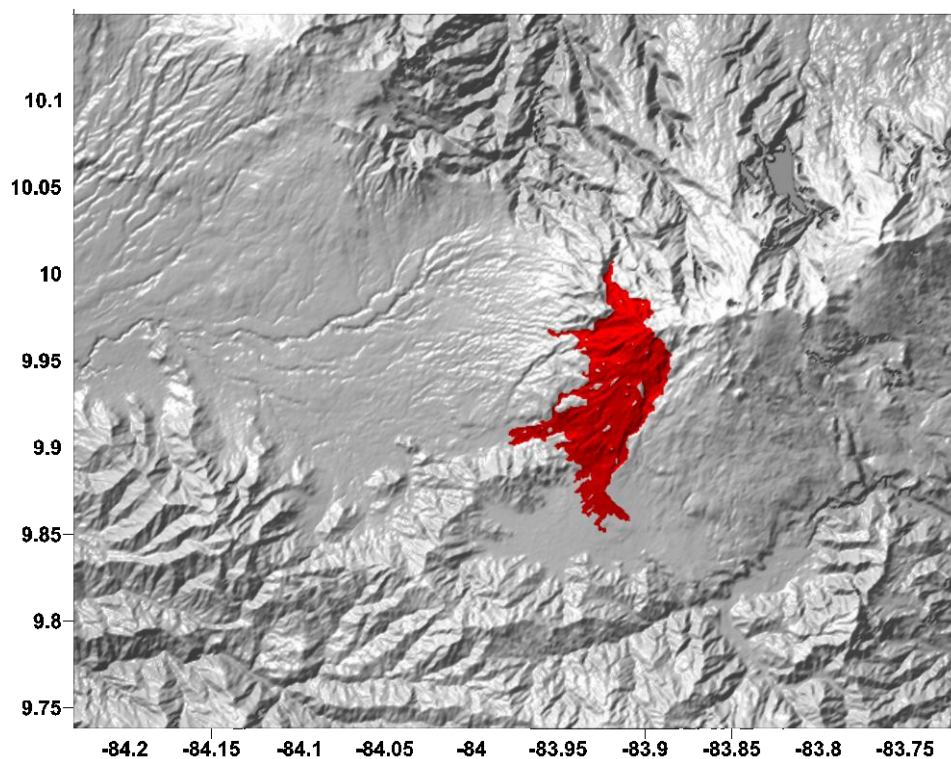


Figura 6-11
Mapa de amenaza determinista por flujos de lava en el volcán Irazú

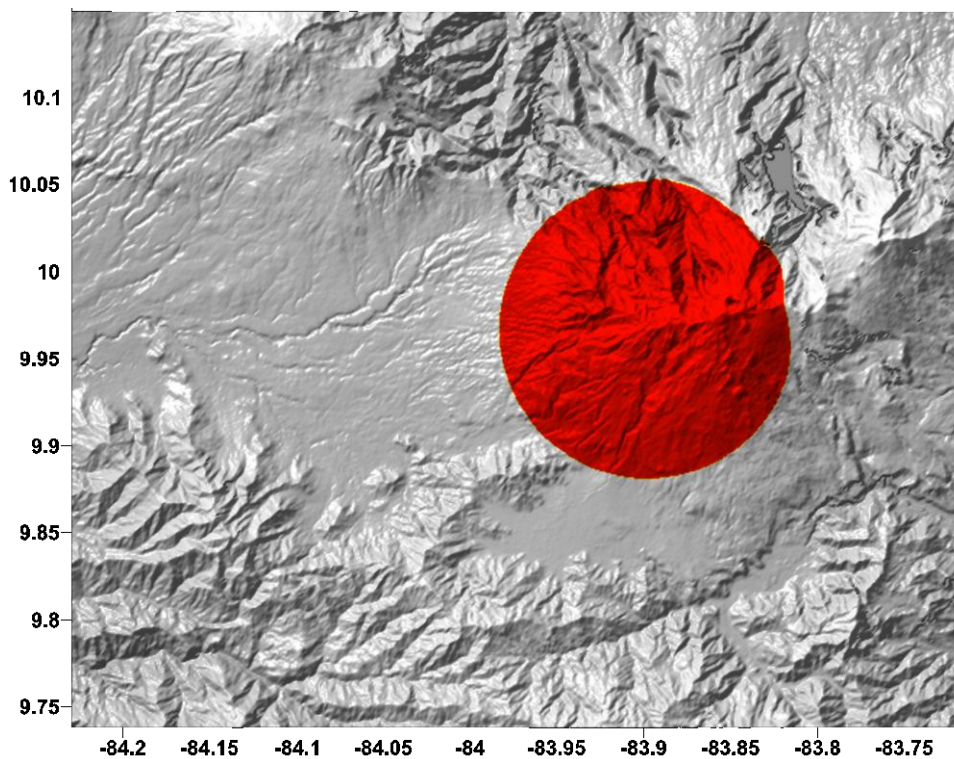


Figura 6-12
Mapa de amenaza determinista por flujos piroclásticos en el volcán Irazú

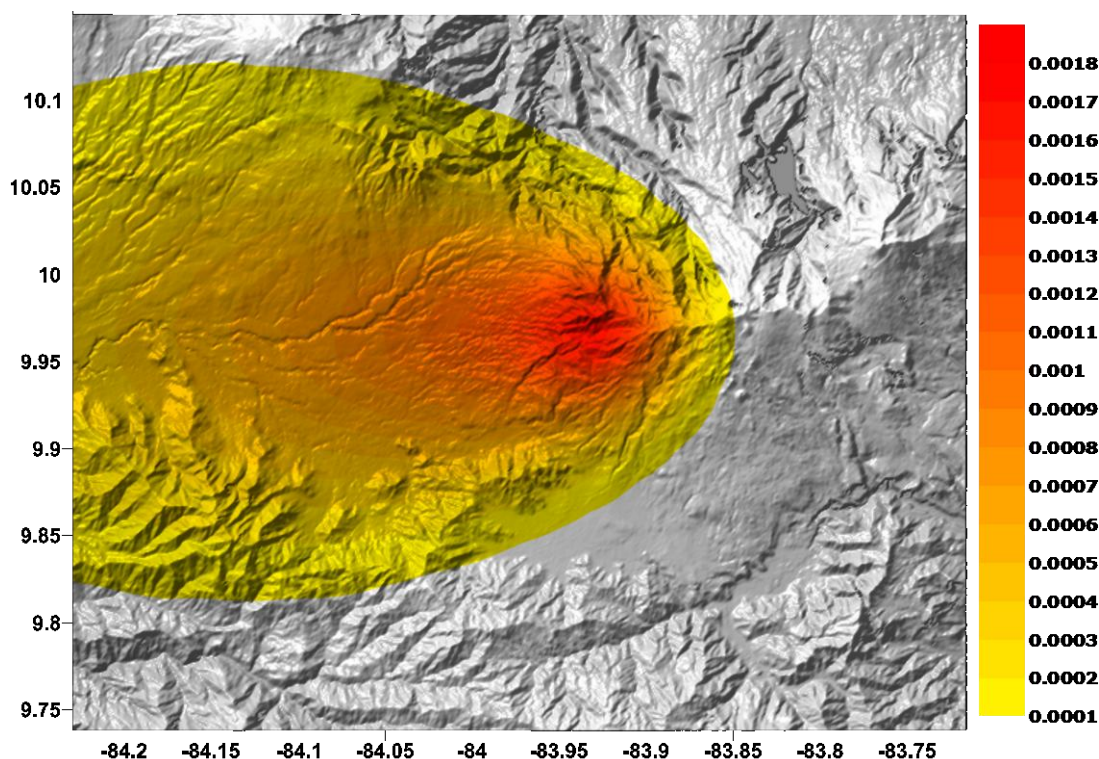


Figura 6-13

Mapa de amenaza determinista por caída de cenizas [m] en el volcán Irazú

6.2.4 Volcán Turrialba

El volcán Turrialba es un estratovolcán basalto-andesítico, próximo a la ciudad de Cartago. Tiene una altitud de 3,340 m y cubre una superficie de 500 km². Se ubican en esta cima 3 cráteres principales. Uno al este ocupado por un cuerpo de agua intermitente, somero y de unos 100 m de diámetro. Un cráter central en cuyas paredes se observa actividad fumarólica también posee un lago intermitente gracias a las abundantes precipitaciones de la región. Finalmente, al oeste se tiene el cráter asociado a la actividad magmática más reciente que data de casi 150 años. En el fondo de este cráter se manifiestan salidas importantes de gas y vapor y su fondo ésta siendo colmatado por materiales que se desprenden desde sus empinadas paredes. (Figura 6-14)



Figura 6-14
Volcán Turrialba

(Fuente: <http://www.ticoturri.com/VolcanTurrialba.jpg/VolcanTurrialba-full.jpg>)

El pasado eruptivo del Turrialba está marcado por eventos poderosos de lavas, piroclastos y cenizas las cuales han alcanzado los cientos de kilómetros al ser llevadas por los vientos en dirección oeste. Estudios radiométricos permiten establecer un $VEI = 4$ durante una erupción del año 40 DC la cual arrojó un volumen de tefra de $4 \times 10^8 \text{ m}^3$ y produjo *flujos piroclásticos*. En contraste la erupción de 1866 alcanzó un $VEI = 3$ con un volumen de $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ de tefra expulsada. La actividad fumarólica continúa en la parte central y al suroeste de los cráteres. Este volcán muestra actividad de vapores y gases en forma sostenida y algunos problemas menores de inestabilidad física en sus paredes internas y algunas paredes externas.

6.2.4.1 Modelación de la amenaza

La modelación de la amenaza se llevó a cabo empleando el programa ERN-Volcán (ERN, 2009). Los valores de las diferentes variables involucradas en la modelación de la amenaza del volcán Turrialba se presentan en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5
Parámetros del modelo del Volcán Turrialba

Modelo de ERN-Volcán				
Tipo de análisis:	Determinista			
Definición de ventosas:	Única Ventosa	Coordenadas:	Este Norte	-83.77° 10.03°
Flujos de lava				
Distancia máxima:	25000 m	Espesor:	5 m	
Flujos piroclásticos				
Altura columna eruptiva:	20 Km	Ángulo cono:	65°	
Verifica accesibilidad:	Si			
Caída de cenizas				
Altura columna eruptiva:	20 Km	Campo de viento		
Volumen expulsado:	10.0 Km3	Altura (%)	Vel (m/s)	Dir (°)
Factor de forma:	0.2	0	1	180
Nº divisiones altura:	20	20	1	180
μ Tamaño partículas:	-3	40	1	180
σ Tamaño partículas:	1.5	60	1	180
Paso discretización X:	20	80	1	180
Paso discretización Y:	20			
Coeficiente difusividad:	750 m2/s			

A continuación se presentan los mapas de amenaza para los diferentes tipos de productos volcánicos considerados.

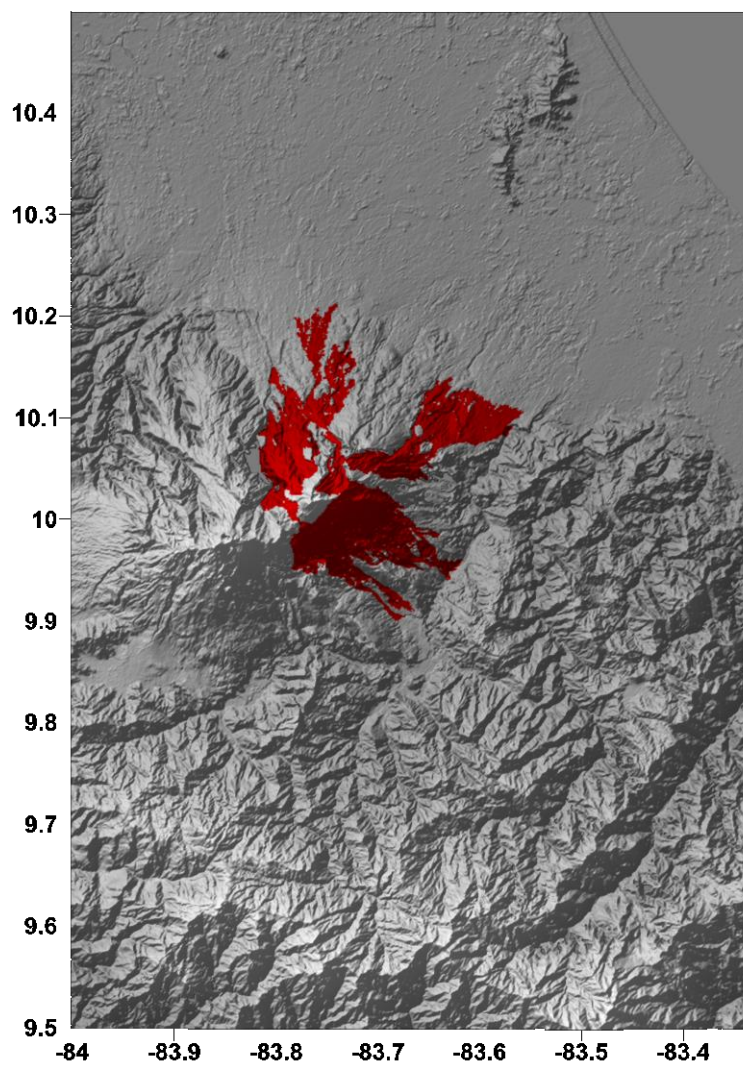


Figura 6-15

Mapa de amenaza determinista por flujos de lava en el volcán Turrialba

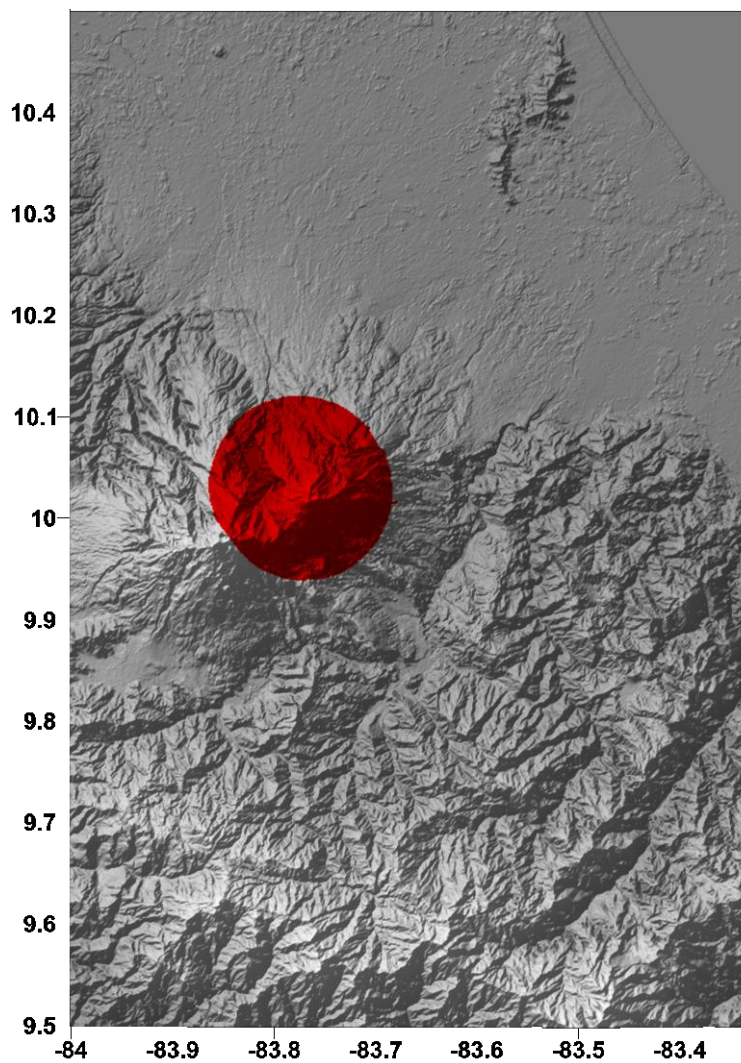


Figura 6-16

Mapa de amenaza determinada por flujos piroclásticos en el volcán Turrialba

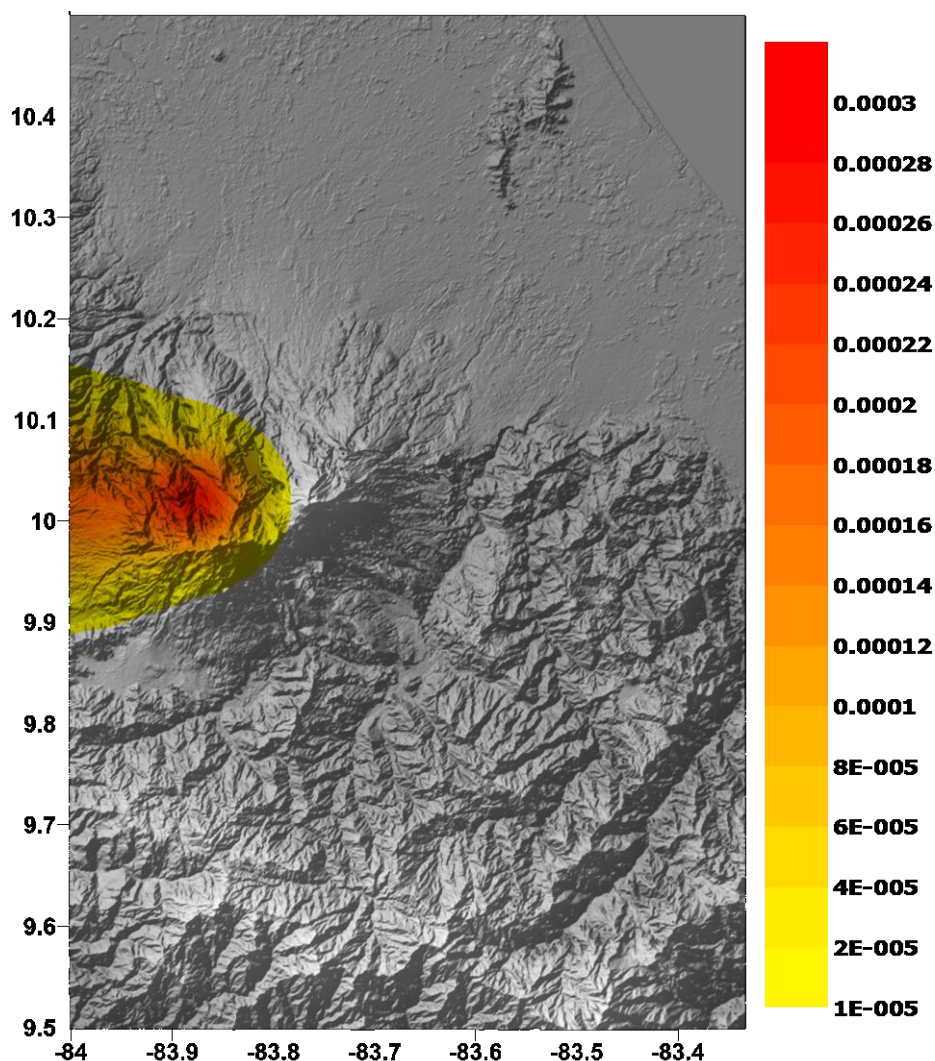


Figura 6-17

Mapa de amenaza determinista por caída de cenizas [m] en el volcán Turrialba

6.2.5 Volcán Rincón de la Vieja

Es un antiguo complejo volcánico al noroeste de Costa Rica, localizado, en la Cordillera de Guanacaste, su altura es de 1,805 m.s.n.m. y su composición química es andesítica. En su lado Sur se ha formado la caldera de Guachapalín. Al Rincón La Vieja se le conoce como el Coloso de Guanacaste; se ha estimado que tiene un volumen de material expulsado fuera de la corteza de unos 130 km³. La actividad eruptiva ha migrado hacia el sureste, donde se localizan los cráteres jóvenes. El delgado cono de 1,916 m. de altitud del Volcán Santa María, es el punto más alto del Complejo Rincón de la Vieja y al este, a 5 km hay una pequeña caldera de 500 m. de largo (Figura 6-18).



Figura 6-18
Volcán Rincón de la Vieja
(Fuente: <http://www.alertatierra.com/VolRinconVieja.htm>)

Datos radiométricos señalan una gran erupción de VEI = 4 en el año 1820 AC que arrojó $>2.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ de tefra. En cuanto a las erupciones recientes no superan valores de VEI = 2.

6.2.5.1 Modelación de la amenaza

La modelación de la amenaza se llevó a cabo empleando el programa ERN-Volcán (ERN, 2009). Los valores de las diferentes variables involucradas en la modelación de la amenaza del volcán Rincón de la Vieja se presentan en la Tabla 6-6.

Tabla 6-6
Parámetros del modelo del Volcán Rincón de la Vieja

Modelo de ERN-Volcán				
Tipo de análisis:	Determinista			
Definición de ventosas:	Única Ventosa	Coordenadas:	Este	-85.33°
			Norte	10.82°
Flujos de lava				
EL VOLCÁN NO REPORTA FLUJOS DE LAVA				
Flujos piroclásticos				
Altura columna eruptiva:	20 Km	Ángulo cono:	70°	
Verifica accesibilidad:	Si			
Caída de cenizas				
Altura columna eruptiva:	20 Km	Campo de viento		
Volumen expulsado:	0.25 Km3	Altura (%)	Vel (m/s)	Dir (°)
Factor de forma:	0.2	0	1	180
Nº divisiones altura:	20	20	1	180
μ Tamaño partículas:	-1.5	40	1	180
σ Tamaño partículas:	3	80	1	270
Paso discretización X:	10	100	1	270
Paso discretización Y:	10			
Coeficiente difusividad:	750 m2/s			

A continuación se presentan los mapas de amenaza para los diferentes tipos de productos volcánicos considerados.

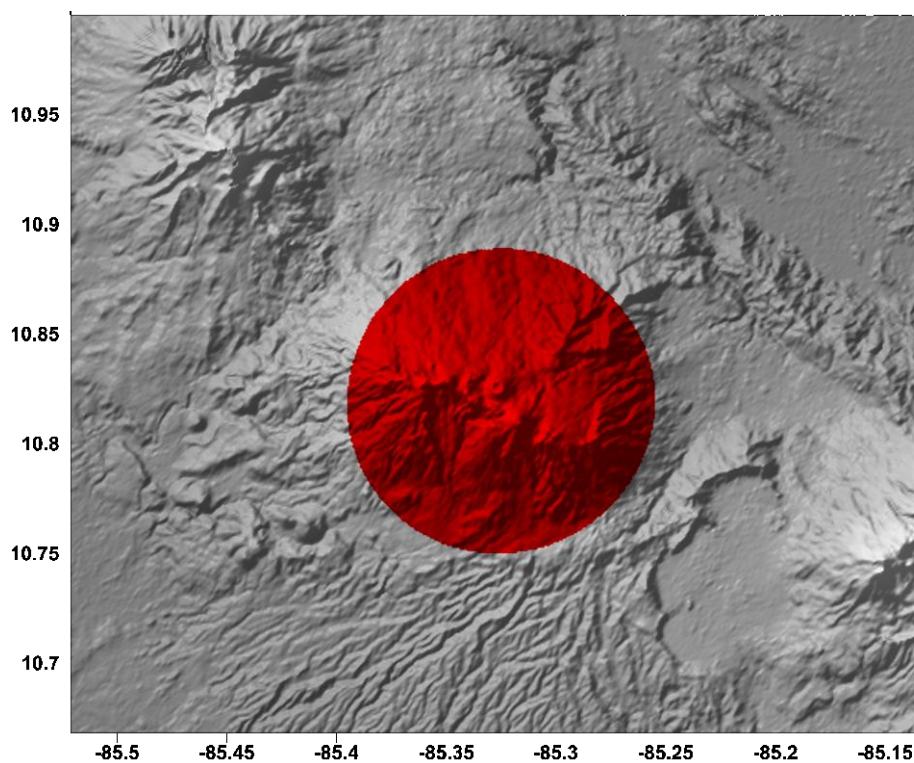


Figura 6-19

Mapa de amenaza determinista por flujos piroclásticos en el volcán Rincón de la Vieja

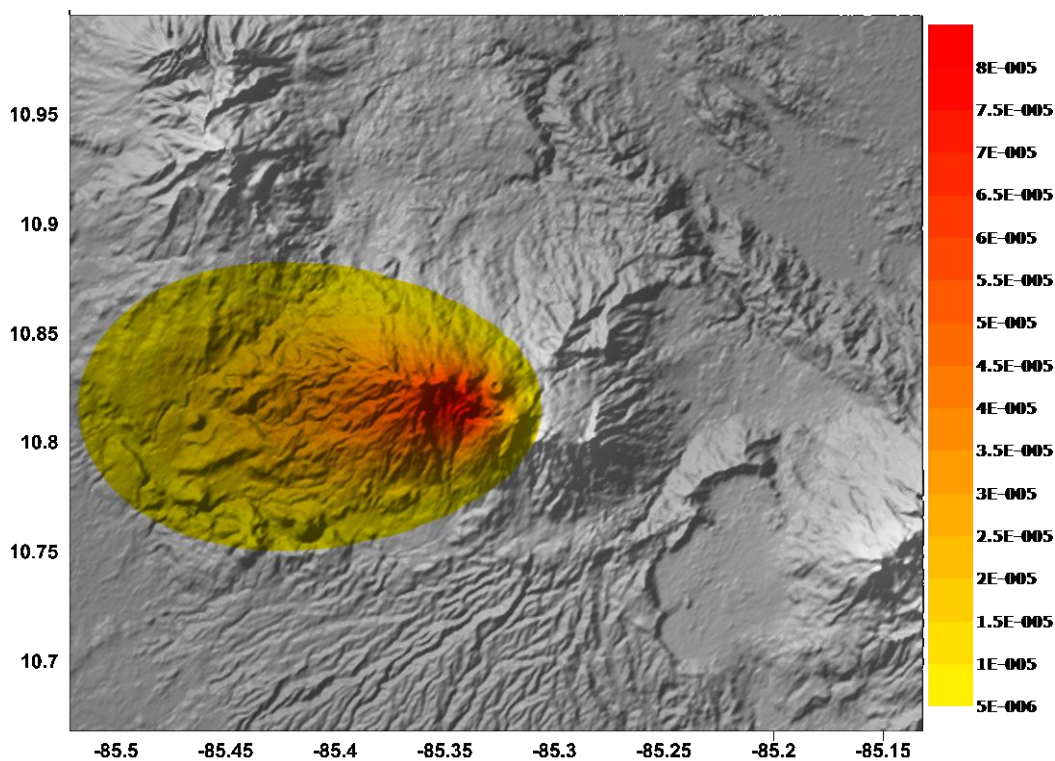


Figura 6-20

Mapa de amenaza determinista por caída de cenizas [m] en el volcán Rincón de la Vieja