



# Evaluación probabilista de la amenaza sísmica en roca para la armonización de la microzonificación sísmica de Manizales



## **ARMONIZACIÓN DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA E IMPLICACIONES ECONÓMICAS Y DE SEGUROS**

**Armonización de la microzonificación sísmica con las normas NSR-10 e  
implicaciones económicas y de seguros**

**EVALUACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA SÍSMICA EN ROCA PARA LA  
ARMONIZACIÓN DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE MANIZALES**

**Mario Andrés Salgado Gálvez**

**INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES**

**MANIZALES  
2014**

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Alcance del informe.....	1
1.2	Información disponible .....	1
1.3	Estudios previos .....	3
2.	MODELO TECTÓNICO.....	4
2.1	Introducción .....	4
2.2	Sistemas de fuentes sismogénicas en Colombia.....	6
2.3	Fuentes sismogénicas consideradas .....	12
2.3	Modelo geométrico seleccionado.....	16
3.	MODELO DE SISMICIDAD Y PARÁMETROS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO .....	17
3.1	Sismicidad histórica.....	17
3.2	Sismicidad instrumental.....	18
3.3	Ensamblaje y características del catálogo sísmico utilizado .....	19
3.4	Parámetros de sismicidad para las fuentes sismogénicas consideradas.....	25
4.	LEYES DE ATENUACIÓN DE MOVIMIENTO FUERTE.....	36
4.1	Selección y asignación de las leyes de atenuación de movimiento fuerte existentes para las fuentes sismogénicas consideradas.....	36
5.	METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA SÍSMICA EN ROCA.....	39
5.1	Metodología de evaluación probabilista de amenaza sísmica.....	39
5.2	Probabilidad de excedencia y períodos de retorno .....	40
5.3	Resultados de amenaza sísmica .....	41
6.	PROPUESTA DE ESPECTROS DE DISEÑO EN ROCA PARA MANIZALES .....	57
6.1	Definición de los parámetros del sismo de diseño .....	57
6.2	Definición de los parámetros del sismo de seguridad limitada .....	61
6.3	Definición de los parámetros del sismo de umbral de daño.....	62
	REFERENCIAS.....	64

ANEXO 1: CURVAS DE RECURRENCIA DE MAGNITUDES PARA LAS  
FUENTES SISMOGENÉTICAS CONSIDERADAS ..... 66



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Neotectónica de la zona andina norte (tomada de: Taboada et al., 2000) .....	4
Figura 2 Fallas con actividad comprobada (Ingeominas, 2008) .....	5
Figura 3 Fuentes sismogénicas superficiales consideradas.....	14
Figura 4 Fuentes sismogénicas profundas consideradas .....	15
Figura 5 Modelo geométrico de área fuente .....	16
Figura 6 Sismicidad histórica en el área de estudio .....	18
Figura 7 Sismicidad instrumental en el área de estudio .....	19
Figura 8 Chequeo de completitud del catálogo utilizado para la magnitud umbral seleccionada.....	20
Figura 9 Eventos asignados a las fuentes superficiales.....	23
Figura 10 Eventos asignados a las fuentes profundas.....	24
Figura 11 Curvas de recurrencia de magnitudes.....	26
Figura 12 Distribución normal para la estimación de la magnitud máxima .....	28
Figura 13 Parámetro $\lambda_0$ para las fuentes sismogénicas superficiales .....	30
Figura 14 Parámetro $\lambda_0$ para las fuentes sismogénicas profundas .....	31
Figura 15 Parámetro $\beta$ para las fuentes sismogénicas superficiales.....	32
Figura 16 Parámetro $\beta$ para las fuentes sismogénicas profundas .....	33
Figura 17 Parámetro $M_U$ para las fuentes sismogénicas superficiales .....	34
Figura 18 Parámetro $M_U$ para las fuentes sismogénicas profundas.....	35
Figura 19 Ley de atenuación Bernal et al. fuentes intraplaca .....	38
Figura 20 Ley de atenuación Bernal et al. fuentes subducción.....	38
Figura 21 Programa CRISIS2014 .....	42
Figura 22 Curvas de amenaza para diferentes ordenadas espectrales en Manizales .....	43
Figura 23 Curva de amenaza para velocidad máxima del terreno en Manizales.....	43
Figura 24 Participación de las fuentes en la amenaza sísmica de Manizales.....	44
Figura 25 Espectros de amenaza uniforme para Manizales.....	45
Figura 26 Mapa de amenaza sísmica. PGA, 31 años .....	46
Figura 27 Mapa de amenaza sísmica. PGA, 225 años .....	47
Figura 28 Mapa de amenaza sísmica. PGA, 475 años .....	48
Figura 29 Mapa de amenaza sísmica. PGA, 975 años .....	49
Figura 30 Mapa de amenaza sísmica. PGA, 2,475 años .....	50
Figura 31 Mapa de amenaza sísmica. TR: 475 años, Sa: 0.10seg.....	51
Figura 32 Mapa de amenaza sísmica. TR: 475 años, Sa: 0.15seg.....	52
Figura 33 Mapa de amenaza sísmica. TR: 475 años, Sa: 0.50seg.....	53
Figura 34 Mapa de amenaza sísmica. TR: 475 años, Sa: 1.00seg.....	54
Figura 35 Mapa de amenaza sísmica. TR: 475 años, Sa: 2.00seg.....	55
Figura 36 Desagregación de la amenaza sísmica para Manizales .....	56
Figura 37 Espectro elástico de diseño (pseudoaceleración) establecido por el Reglamento NSR-10 .....	57

Figura 38 Espectro elástico de diseño (velocidad) establecido por el Reglamento NSR-10 .....	58
Figura 39 Espectro elástico de diseño (desplazamiento) establecido por el Reglamento NSR-10 .....	58
Figura 40 Comparación espectros de diseño (Sa) .....	59
Figura 41 Comparación espectros de diseño (Sv) .....	60
Figura 42 Comparación espectros de diseño (Sd) .....	60
Figura 43 Comparación espectros de seguridad limitada (Sa) .....	61
Figura 44 Espectro de umbral de daño establecido por el Reglamento NSR-10 .....	62
Figura 45 Comparación espectros de umbral de daño (Sa) .....	63
Figura 46 Curva de recurrencia para la fuente Arco de Dabeiba .....	66
Figura 47 Curva de recurrencia para la fuente Bahía Solano .....	66
Figura 48 Curva de recurrencia para la fuente Benioff Intermedia Sur .....	67
Figura 49 Curva de recurrencia para la fuente Benioff Intermedia Centro .....	67
Figura 50 Curva de recurrencia para la fuente Benioff Intermedia Norte .....	68
Figura 51 Curva de recurrencia para la fuente Benioff Profunda .....	68
Figura 52 Curva de recurrencia para la fuente Boconó.....	69
Figura 53 Curva de recurrencia para la fuente Bucaramanga-Santa Marta Norte .....	69
Figura 54 Curva de recurrencia para la fuente Bucaramanga-Santa Marta Centro.....	70
Figura 55 Curva de recurrencia para la fuente Bucaramanga-Santa Marta Sur .....	70
Figura 56 Curva de recurrencia para la fuente Cauca .....	71
Figura 57 Curva de recurrencia para la fuente Cimitarra.....	71
Figura 58 Curva de recurrencia para la fuente Compresión Caribe S-E .....	72
Figura 59 Curva de recurrencia para la fuente Compresión Caribe S-W .....	72
Figura 60 Curva de recurrencia para la fuente Cuiza .....	73
Figura 61 Curva de recurrencia para la fuente Espíritu Santo .....	73
Figura 62 Curva de recurrencia para la fuente Fallas del Magdalena.....	74
Figura 63 Curva de recurrencia para la fuente Frontal Cordillera Oriental Norte .....	74
Figura 64 Curva de recurrencia para la fuente Frontal Cordillera Oriental Centro.....	75
Figura 65 Curva de recurrencia para la fuente Frontal Cordillera Oriental Sur .....	75
Figura 66 Curva de recurrencia para la fuente Garrapatas.....	76
Figura 67 Curva de recurrencia para la fuente Ibagué.....	76
Figura 68 Curva de recurrencia para la fuente Junín .....	77
Figura 69 Curva de recurrencia para la fuente Murindó.....	77
Figura 70 Curva de recurrencia para la fuente Nido de Bucaramanga .....	78
Figura 71 Curva de recurrencia para la fuente Compresión Normal Panamá .....	78
Figura 72 Curva de recurrencia para la fuente Oca.....	79
Figura 73 Curva de recurrencia para la fuente Palestina .....	79
Figura 74 Curva de recurrencia para la fuente Perijá.....	80
Figura 75 Curva de recurrencia para la fuente Puerto Rondón .....	80
Figura 76 Curva de recurrencia para la fuente Romeral .....	81
Figura 77 Curva de recurrencia para la fuente Romeral Norte .....	81
Figura 78 Curva de recurrencia para la fuente Salinas.....	82
Figura 79 Curva de recurrencia para la fuente Suárez .....	82

Figura 80 Curva de recurrencia para la fuente Subducción Norte.....	83
Figura 81 Curva de recurrencia para la fuente Subducción Centro .....	83
Figura 82 Curva de recurrencia para la fuente Subducción Sur .....	84
Figura 83 Curva de recurrencia para la fuente Uribante-Caparro .....	84



## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1 Características principales del catálogo utilizado.....	21
Tabla 2 Características del catálogo por magnitud .....	21
Tabla 3 Características del catálogo por profundidad.....	22
Tabla 4 Parámetros de sismicidad de las fuentes sismogénicas consideradas.....	29
Tabla 5 Comparación de los valores para los parámetros Aa y Av .....	59
Tabla 6 Comparación de los valores para el parámetro Ae .....	61
Tabla 7 Comparación de los valores para el parámetro Ad .....	62



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Alcance del informe

En el marco del proyecto de armonización de la microzonificación sísmica de Manizales e implicaciones económicas y de seguros se ha realizado una evaluación probabilista de la amenaza sísmica en roca para la determinación de los parámetros  $A_a$ ,  $A_v$ ,  $A_e$  y  $A_d$ ; todos ellos asociados a niveles de aceleración para diferentes períodos de retorno (475, 225 y 31 años) así como para diferentes ordenadas espectrales para obtener los resultados que se requieren para este fin de acuerdo a lo estipulado en el numeral A.2.9 del Reglamento NSR-10 (MAVDT, 2010). De acuerdo a lo que en ese numeral se establece, este reporte contiene la información referente a:

- Sismología regional.
- Definición de fuentes sismogénicas.
- Determinación de la aceleración y velocidad esperada para las ondas sísmicas de diseño en roca.
- Comparación con los valores  $A_a$  y  $A_v$  del Reglamento NSR-10.

El presente informe presenta los insumos, metodologías y resultados de la evaluación probabilista de la amenaza sísmica en roca en Manizales a partir de curvas de recurrencia de magnitudes para las fuentes sismogénicas consideradas, curvas de amenaza, nivel de contribución de las fuentes en la amenaza total, espectros de amenaza uniforme para diferentes períodos de retorno, mapas de amenaza y desagregación de la amenaza sísmica para 475 años.

La evaluación de la amenaza sísmica se ha realizado utilizando el programa CRISIS 2014 (Ordaz et al., 2013) el cual es mundialmente aceptado y reconocido para este tipo de evaluaciones.

## 1.2 Información disponible

A continuación se resume por categorías la información disponible existente para la elaboración del presente trabajo:

### 1.2.1 Información acerca de la tectónica

El sistema de fallas Romeral es quizás el más importante a considerar en la evaluación de la amenaza sísmica en Manizales. El sistema está compuesto mediante la agrupación de diferentes fallas las cuales tienen características similares en cuanto a tasa de actividad y

magnitudes últimas esperadas. Este sistema de fallas ha sido estudiado por diferentes especialistas y a partir de dicha información es posible la determinación de características geométricas y de localización para la modelación de esta fuente.

A nivel regional y local se han realizado diferentes estudios para definir y caracterizar el entorno tectónico realizados por especialistas nacionales e internacionales como París et al., 2000; Taboada et al., 2000; Pulido, 2003; Proyecto Multinacional Andino, 2009; Kellogg y Vega, 1995)

Adicionalmente se cuenta con información acerca de fuentes sismogénicas a nivel regional y nacional tales y como las consignadas en los estudios generales de amenaza sísmica de Colombia realizados por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS (AIS, 1984; AIS, 1996; AIS, 2010).

### **1.2.2 Información acerca de la sismicidad**

En lo referente al catálogo de eventos sísmicos se cuenta con información recopilada por instituciones como el Servicio Geológico Colombiano (antiguo Ingeominas) la cual para el presente trabajo ha sido complementada con datos del United States Geological Survey y el catálogo de sismicidad generado por el International Seismological Centre en el marco del convenio con el Global Earthquake Model (GEM) el cual se considera en la actualidad uno de los catálogos sísmicos más completos y depurados disponibles.

### **1.2.3 Información acerca de las leyes de atenuación de movimiento fuerte**

Existen hoy en día un sinnúmero de ecuaciones de atenuación de movimiento fuerte publicadas; para fines de este trabajo se ha realizado la selección de las más adecuadas a partir de la información de registros acelerográficos locales y regionales (a nivel Colombia) disponible siempre y cuando estén definidas para diferentes ordenadas espectrales que incluyan el rango entre la aceleración máxima del terreno (0.0 seg) y 5.0 seg. Adicionalmente, se requiere que las leyes de atenuación de movimiento fuerte permitan la obtención de resultados en términos de velocidad dado que es este uno de los parámetros de amenaza sísmica requeridos según lo establecido en el numeral A.2.9 del Reglamento NSR-10.

Se cuenta con información acerca de leyes de atenuación de movimiento fuerte nacionales e internacionales las cuales se comparan con la información sismográfica existente para la selección de la que más se ajuste al entorno de análisis.

### 1.3 Estudios previos

Tanto a nivel nacional como local se han realizado previamente estudios de amenaza sísmica. Los resultados de todos estos estudios contienen información acerca de la aceleración máxima del terreno esperada para un período de retorno de 475 años.

A nivel nacional como se mencionó se han realizado, con fines del establecimiento de los valores de coeficiente sísmico a incluir en las diferentes versiones del reglamento de diseño y construcción sismo resistente, diferentes estudios por parte de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (AIS, 1984; AIS, 1996; AIS, 2010; Salgado et al., 2010). Adicionalmente otros autores como Shedlock y Tanner (1999) han realizado estimaciones de la amenaza sísmica a nivel regional.

Específicamente en Manizales, en el marco del proyecto de microzonificación sísmica de la ciudad se realizó un estudio de amenaza sísmica en roca (Uniandes, 2002) tras la consideración de diferentes fuentes sismogénicas con una aproximación probabilista. Dichos estudios, así como la información que fue utilizada para la realización de ellos ha sido revisada para el presente trabajo.

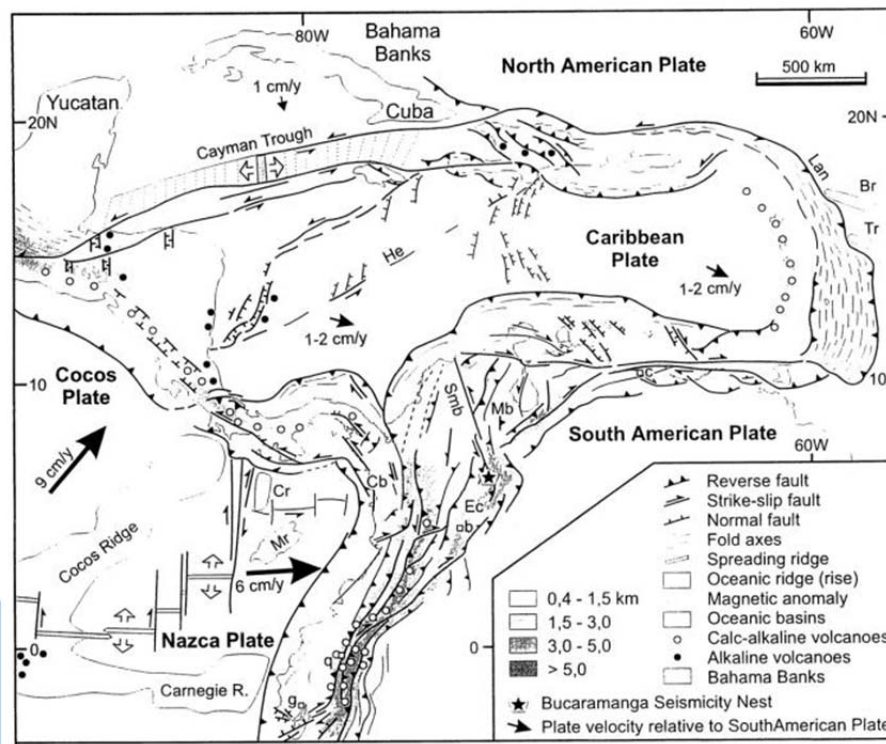
## 2. MODELO TECTÓNICO

### 2.1 Introducción

El presente capítulo presenta un resumen del entorno tectónico colombiano así como del proceso de definición de las fuentes sismogénicas a ser consideradas en la evaluación probabilista de la amenaza sísmica en Manizales.

Manizales está localizada en una zona de amenaza sísmica alta dada su ubicación en un lugar de convergencia de tres placas tectónicas. Los eventos de mayor impacto están asociados a las fuentes del sistema de fallas Romeral, a la zona de Benioff y a la fuente Palestina.

La zona colombiana ha estado sujeta a niveles de esfuerzo importantes debido a la convergencia de las placas Caribe, Suramérica y Nazca (Pulido, 2003). La interacción entre las placas Nazca y Suramérica generan una zona de subducción a lo largo de la costa pacífica de la cual se entiende, la zona de Benioff es una prolongación en profundidad de dicho proceso. La Figura 1 resume de manera esquemática este proceso.

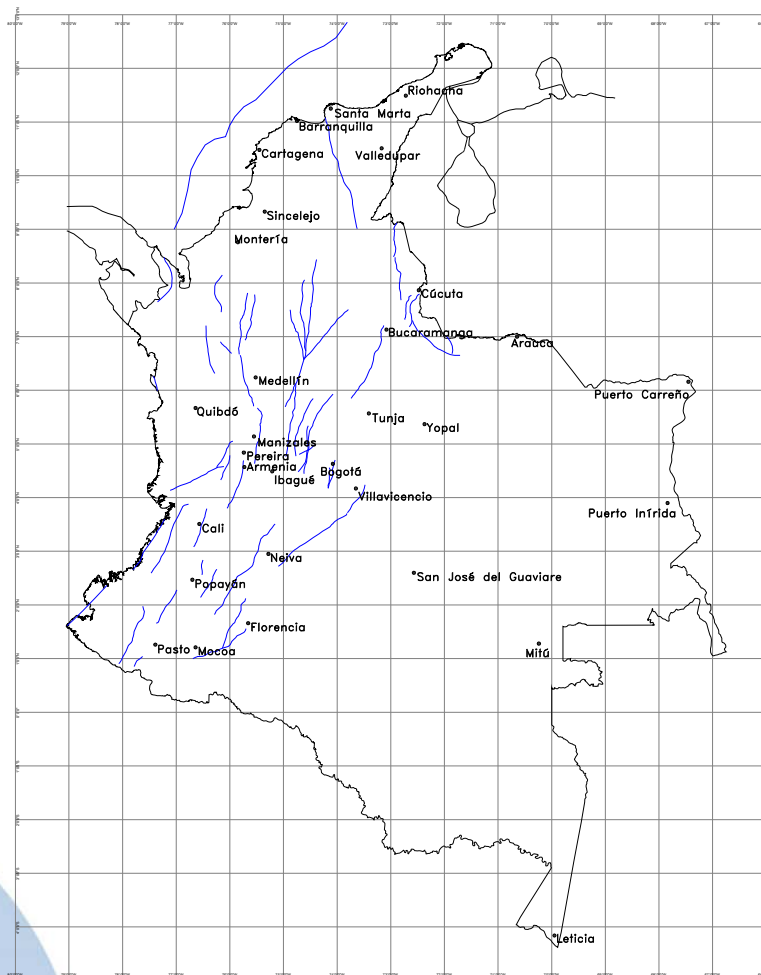


**Figura 1**  
*Neotectónica de la zona andina norte (tomada de: Taboada et al., 2000)*

Adicionalmente, la región occidental de Suramérica hace parte del denominado *Cinturón de Fuego del Pacífico* donde es posible encontrar fosas tectónicas y donde también, las principales placas tectónicas de la corteza terrestre interactúan a partir de procesos de expansión (dorsales) y colisión (zonas de subducción) generando erupciones volcánicas y terremotos respectivamente.

Adicional a esto, existen sistemas de falla intraplaca para los cuales se encuentran asociados diferentes eventos, principalmente de profundidad moderada, conocidos también como superficiales. Fallas de tipo normal, inversa o de cabalgamiento pueden encontrarse en los sistemas de falla cercanos a Manizales (Paris et al., 2000).

El Servicio Geológico Colombiano (antiguo Ingeominas) ha realizado diferentes estudios concernientes a la localización de las fallas denominadas comprobadas y probables a nivel nacional a partir de las deformaciones cuaternarias. La Figura 2 presenta las fallas con actividad comprobada.



**Figura 2**  
**Fallas con actividad comprobada (Ingeominas, 2008)**

A partir de la información existente se ha procedido a la definición de las fuentes sismogénicas a ser consideradas en el análisis tal y como se presenta a continuación.

## 2.2 Sistemas de fuentes sismogénicas en Colombia

A continuación se presentan unas breves descripciones de las diferentes zonas sismogénicas a nivel nacional las cuales han sido consideradas en el presente análisis. Modificado de Salgado (2010) y AIS (1996).

### 2.2.1 Arco de Dabeiba

La falla del Arco de Dabeiba se extiende a lo largo del costado oriental del Arco de Dabeiba terminando en la parte del norte con el bloque de Panamá. Está conformada por un sistema de fallas de cabalgamiento ubicados en la zona norte que afectan los sedimentos marinos localizados en el norte de Panamá. Los sedimentos marinos son conocidos como la cadena de cabalgamiento de Panamá y forman un prisma de acreción, el cual se encuentra asociado con una lenta subducción con un bajo ángulo de buzamiento el cual ocurre con la placa Caribe entando bajo el bloque de Panamá (AIS, 1996).

### 2.2.2 Bahía Solano

La falla de Bahía Solano se extiende a lo largo de la costa pacífica colombiana desde la frontera con Panamá hasta los límites con Ecuador y a través de imágenes de radar ha sido posible su visualización en superficie en la parte norte del país (AIS, 1996). La falla es de tipo inverso con un bajo ángulo de buzamiento. Se encuentra limitando con la zona de subducción por lo cual la diferenciación de la actividad de esta falla no es fácil de diferenciar lo que lleva a asociar una magnitud última posible de 7.5.

### 2.2.3 Boconó

Es una falla de desplazamiento lateral con movimiento hacia el lado derecho, a la cual se le ha establecido una tasa de desplazamiento de aproximadamente 7 mm por año. La falla es una sección del límite entre la Placa Caribe y la Placa Suramericana y tiene eventos asociados de considerable importancia. La falla se extiende desde el sur de Cúcuta, Norte de Santander hacia el territorio venezolano.

### 2.2.4 Bucaramanga-Santa Marta Sur

Es el tramo más activo del sistema de fallamiento Bucaramanga – Santa Marta; presentando un movimiento lateral hacia el oriente con un movimiento inverso. Tiene un buzamiento considerablemente pronunciado en dirección E-NE. Es catalogada, al igual que los otros dos tramos del sistema de fallamiento como un sistema activo. A pesar de las recomendaciones realizadas en estudios anteriores (AIS 1996) no ha sido mucho el avance realizado en el campo de la investigación de este sistema de fallamiento.

### **2.2.5 Bucaramanga-Santa Marta Centro**

La falla Bucaramanga – Santa Marta en su zona intermedia presenta un rumbo N-S con un buzamiento fuerte en el sentido E-NE. Es un tramo con menor sismicidad comparado con el tramo sur pero fuertemente más activo si se compara con el tramo norte.

### **2.2.6 Bucaramanga-Santa Marta Norte**

La falla Bucaramanga – Santa Marta Norte consiste en el tramo localizado en el extremo superior del país y el que presenta una menor sismicidad dentro del sistema de fallamiento. La falla termina en la zona cercana a la ciudad de Santa Marta. Es una zona con pocos eventos recientes y por lo tanto ha sido estudiada en menor grado que el resto de los tramos.

### **2.2.7 Cauca**

El alineamiento de esta falla se asocia al curso del Río Cauca. La falla es de tipo normal con un buzamiento considerable hacia el lado occidental. La longitud de la falla es de aproximadamente 400 kilómetros, extendiéndose desde el departamento de Caldas hacia el sur del país. La ciudad de Cali, tercera en población del país, está bastante cercana a la falla lo cual implica un alto interés en el entendimiento de éste sistema.

### **2.2.8 Cimitarra**

Es una de las fallas consideradas como jóvenes y la actividad asociada a ésta está catalogada como reciente. Se extiende desde Barrancabermeja con rumbo sur hacia la parte norte de la falla Palestina.

### **2.2.9 Cuiza**

Es la falla que se encuentra más al norte sobre el territorio continental colombiano; se encuentra localizada de forma casi paralela con la falla Oca. La falla está catalogada como de desplazamiento lateral derecho y se extiende hacia al oriente hasta entrar a territorio venezolano.

### **2.2.10 Espíritu Santo**

La falla de Espíritu Santo limita con las fallas Romeral y Cauca en predios del departamento de Antioquia y es catalogada como una falla de rumbo con desplazamiento lateral hacia el costado derecho. Se han realizado diferentes estudios específicos sobre la actividad de esta falla y la actividad del movimiento se ha establecido por el orden de 0.2 mm/año aproximadamente.

### **2.2.11 Fallas del Magdalena**

Este conjunto de fallas recibe su nombre por la ubicación de estas en la ribera occidental del Río Magdalena en su paso por el departamento del Huila. Se han realizado diferentes estudios acerca de esta familia de fallas y su actividad se ha establecido como superficial al mostrar los focos de sismicidad ubicados a una muy poca profundidad.

### **2.2.12 Frontal Cordillera Oriental Norte**

Anteriormente la falla frontal de la cordillera oriental se trató como una sola a lo largo de toda su extensión; sin embargo fue posible establecer diferentes tasas de actividad en tres grandes zonas diferenciadas acá como Norte, Intermedia y Sur, donde también echando mano de los estudios relacionados con este sistema es posible diferenciar el buzamiento de los tramos teniendo el del norte  $45^\circ$  W-NW.

La falla frontal es además de un sistema extenso un sistema altamente activo. El sistema de fallas se extiende a lo largo de toda la cordillera oriental por su flanco este presentando un tipo compresional.

El sistema de la falla frontal de la cordillera oriental norte se extiende aproximadamente desde el municipio Tame, Arauca hasta el de Puerto Santander en Norte de Santander.

### **2.2.13 Frontal Cordillera Oriental Centro**

Aparte de una diferente tasa de actividad sísmica el tramo intermedio tiene un buzamiento de  $60^\circ$  W-NW. El tipo de falla es igual a lo largo de todo el recorrido siendo de tipo compresional hacia el sentido occidental. En este tramo se presentan tramos en los cuales se puede observar movimiento de rumbo con desplazamiento lateral derecho, teniendo estos longitudes de hasta 80 kilómetros.

Este tramo de la falla pasa relativamente cerca de la ciudad de Bogotá y como se verá más adelante es la que representa el mayor porcentaje de la amenaza para la capital colombiana. Este aspecto precisamente ha sido motivo de recomendaciones para mejorar los estudios detallados acerca de esta zona.

El sistema de la falla frontal de la cordillera oriental intermedia se extiende aproximadamente desde el municipio Tame, Arauca hasta Palestina, Huila.

### **2.2.14 Frontal Cordillera Oriental Sur**

Este tramo presenta características geométricas casi iguales a las del tramo Intermedio, la única razón para tratarla como una falla aparte es la diferencia en la actividad sísmica. El sistema de la falla frontal de la cordillera oriental sur se extiende aproximadamente desde el municipio Palestina, Huila hasta la frontera sur del país con Ecuador.



### **2.2.15 Garrapatas**

La falla de Garrapatas se extiende a partir de la costa pacífica hacia el costado oriental de la cordillera occidental. La falla ha sido catalogada como una falla de rumbo lateral derecho.

### **2.2.16 Ibagué**

Es una falla con desplazamiento de rumbo en el sentido lateral derecho que se encuentra localizada entre la cordillera central y la cordillera oriental por su costado occidental en las inmediaciones de la cabecera urbana de la ciudad de Ibagué. La falla es catalogada como activa según las deformaciones que han sido posibles establecerse.

### **2.2.17 Junín-Sambiambi**

Esta falla ubicada a lo largo de la costa pacífica de Colombia desde el límite sur del territorio nacional hasta la falla Garrapatas. Es clasificada como una falla de tipo inverso con un buzamiento alto orientado hacia el este.

### **2.2.18 Murindó**

Es una de las fallas que más actividad presenta en el territorio colombiano sobre la cual se pueden asociar sismos de magnitud considerable y profundidad relativamente baja. En el tramo común con la falla Bahía Solano corren relativamente paralelas. La falla es catalogada como de tipo inverso con un buzamiento alto con tendencia este.

### **2.2.19 Normal Panamá-Pacífico**

La falla Normal Panamá-Pacífico hace parte del límite entre la placa Nazca y el bloque de Panamá. La falla se extiende con dirección este - oeste y llega a aflorar a una profundidad de aproximadamente 3 kilómetros bajo el mar en el sur de Panamá. La falla es catalogada como de tipo inverso con desplazamiento hacia el lado izquierdo con un buzamiento leve con orientación norte. La orientación conocida del grupo de fallas pareciera indicar una subducción de la placa de Nazca bajo el bloque de Panamá.

### **2.2.20 Oca**

Es una falla localizada al norte del país en el departamento de la Guajira; se encuentra localizada de forma casi paralela con la falla Cuiza. La falla está catalogada como de desplazamiento lateral derecho y se extiende hacia al oriente hasta entrar a territorio venezolano, territorio donde eventos catastróficos de grandes magnitudes han sido asociados con esta falla.

### **2.2.21 Palestina**

La falla Palestina tiene una longitud de aproximadamente 300 kilómetros con orientación sur-norte corriendo de forma paralela al lado de la cordillera central por su costado oriental. La falla tiene una gran cercanía a la ciudad de Manizales.

### **2.2.22 Perijá**

Es una falla que se encuentra localizada entre los límites de Colombia con Venezuela que ha sido catalogada como de tipo inversa. La falla presenta un buzamiento en dirección S-E que es consistente con la dirección de convergencia entre las placas Caribe y Suramericana.

### **2.2.23 Puerto Rondón**

Esta falla se extiende desde las capitales de departamento Yopal hasta Arauca para terminar un poco más adentro en territorio venezolano. Está catalogada como una falla inversa que tiene además un buzamiento con orientación N-W. Según los estudios realizados acerca de esta está asociada con el sistema de Piedemonte Llanero.

### **2.2.24 Romeral**

Junto con el sistema de la falla Frontal Cordillera Oriental es otro sistema que atraviesa el país de sur a norte. Tiene eventos catastróficos de relevancia nacional asociados tales como el de Popayán en 1983 y Armenia en 1999. La mayoría de los sismos asociados con esta fuente tienen un poco profundidad. La falla se encuentra catalogada como de tipo inverso con desplazamiento a la derecha. La falla Romeral se dividió en este estudio en dos tramos por tener actividades diferentes fácilmente diferenciables tal y como ocurre con las de la falla Frontal Cordillera Oriental.

### **2.2.25 Romeral Norte**

La falla Romeral Norte tiene propiedades similares a la falla Romeral salvo que la actividad asociada con ese tramo de la falla es considerablemente diferente por lo que se optó por darle un tratamiento independiente.

### **2.2.26 Salinas**

La falla salinas está catalogada como del tipo inverso presentando además un buzamiento con orientación hacia el oriente. La falla tiene una longitud de un poco más de 150 kilómetros corriendo a lo largo del costado oriental de la cordillera oriental.

### **2.2.27 Suárez**

La falla Suárez es una extensión de la falla Bucaramanga - Santa Marta Sur y se extiende hacia al sur con una pronunciada curvatura por una longitud de aproximadamente 110 kilómetros. La falla está catalogada como de tipo inverso presentando un buzamiento con orientación hacia el occidente.

### **2.2.28 Uribante-Caparro**

La falla se encuentra localizada en la sierra de Mérida en Venezuela y se extiende hacia territorio colombiano corriendo de forma paralela con la falla Boconó terminando en el sur limitando en el sur con la falla Frontal Cordillera Oriental en su tramo norte. La falla presenta un movimiento en sentido hacia la derecha que además muestra algunos tramos con comportamientos compresivos.

### **2.2.29 Zona de compresión del caribe (Sur-Este)**

La zona de Compresión del Caribe es debida a la convergencia de la placa Caribe con respecto a la Suramericana que a su vez representa un acortamiento en la dirección del movimiento. La zona de fallamiento se extiende hacia la parte continental para limitar al norte con la falla Romeral Norte.

La falla se divide en dos tramos diferentes debido a que existen dos grandes zonas que presentan un movimiento con orientación claramente diferente, una de Sur-Este y otra Norte-Oeste.

### **2.2.30 Zona de compresión del caribe (Sur-Oeste)**

Esta zona presenta características iguales a la última previamente descrita con la diferencia de la orientación del movimiento tal y como fue descrito anteriormente.

### **2.2.31 Zona de Subducción Norte**

La zona de subducción de la placa de Nazca ocurre a lo largo de la costa pacífica colombiana. La falla es consecuencia del desplazamiento existente las placas de Nazca y Suramericana. La falla de Subducción ha sido dividida en tres tramos debido a que presentan diferentes tasas de actividad tal y como ha sido realizado para diferentes fallas y se ha mencionado anteriormente.

La falla a lo largo de su recorrido presenta un buzamiento de aproximadamente 35° con orientación hacia el este. La parte norte es la que menor actividad entre las tres zonas presenta. El tramo norte se encuentra comprendido entre las coordenadas 6.5 y 7.5 N.

### **2.2.32 Zona de Subducción Centro**

El tramo intermedio se encuentra comprendido entre las coordenadas 4.5 y 6.5 N se encuentra localizado sobre la costa del Pacífico con un buzamiento similar al de los otros tramos. El tramo tiene una orientación S-NE coincidente con la forma de la placa y la costa Pacífica colombiana.

### **2.2.33 Zona de Subducción Sur**

Es el tramo con mayor actividad en de la Falla de Subducción el cual tiene asociados sismos de gran magnitud que han causado eventos catastróficos tales como el tsunami de Tumaco a principios del siglo pasado. El tramo sur se encuentra comprendido entre las coordenadas 0.5 y 4.5 N. De los sistemas de fallamiento en Colombia es el que tiene asociado una magnitud última más alta debido a la considerable tasa de movimiento entre las placas así como por el sistema de fractura en el caso de ocurrencia de un sismo que ocurriría.

### **2.2.34 Zona de Benioff intermedia (norte-centro-sur)**

La zona de Benioff intermedia, en los tres tramos que se encuentra dividida hace parte de la parte de la placa Nazca que subduce en el territorio colombiano en su prolongación en profundidad. El buzamiento es menor que el de la zona de subducción y localizado en profundidad se encuentra ubicada entre los 60 y los 120 km.

La división de estos tramos coincide con los realizados para la zona de subducción y también presenta diferentes patrones de sismicidad, encontrando un mayor grado de ésta en el sector sur, disminuyendo paulatinamente en la zona intermedia y norte.

### **2.2.35 Zona de Benioff profunda**

Es el último de los tramos en profundidad modelados en el presente estudio; consiste en la prolongación en profundidad de la zona de Benioff intermedia que a su vez es continua a las zonas de subducción. Este tramo cubre una porción considerable del país y tienen asociados los eventos localizados dentro de ella a unas profundidades entre 120 y 280 km. El ángulo de buzamiento de esta falla es menor que la zona de Benioff intermedia. Esta zona tiene una actividad considerablemente menor a las localizadas en la parte intermedia, teniendo en cuenta además que existe una incertidumbre considerable en el momento de localizar la profundidad de los eventos sísmicos.

## **2.3 Fuentes sismogénicas consideradas**

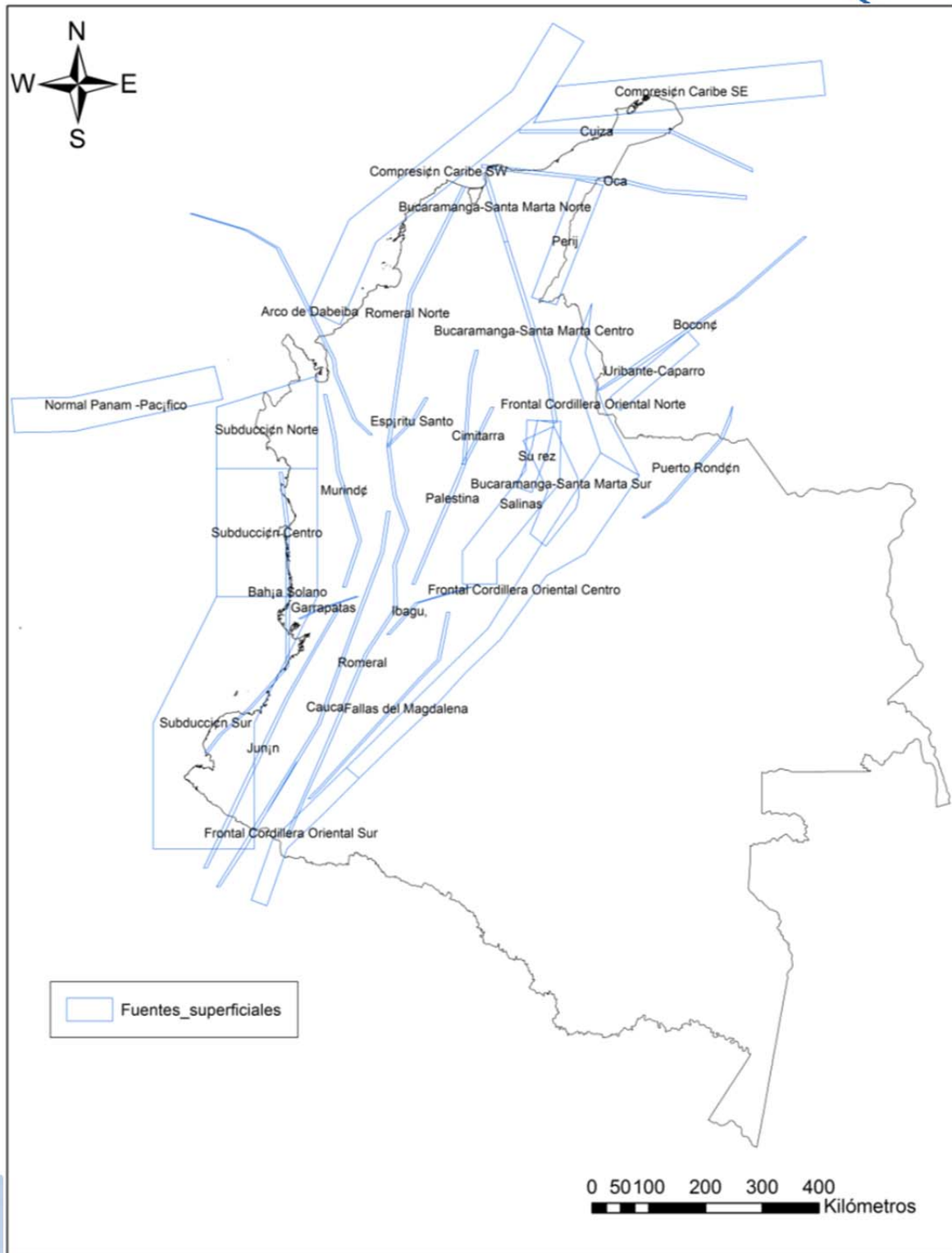
Con base en las referencias anteriormente nombradas se ha realizado la definición de la geometría de cada una de las fuentes sismogénicas a considerarse en el análisis de amenaza sísmica. La información que se requiere para la definición de cada una de estas

fuentes consiste en su localización en planta, rango de profundidad y su ángulo de buzamiento.

La sismicidad en el presente trabajo ha sido separada en dos categorías, de acuerdo a la profundidad de ocurrencia de los sismos. La primera categoría agrupa los eventos que ocurren entre los 0 y los 60 km y es denominada como superficial, mientras que la segunda, denominada profunda, agrupa las fuentes cuyos sismos ocurren con profundidades mayores a los 60 km.

### **2.3.1 Fuentes superficiales**

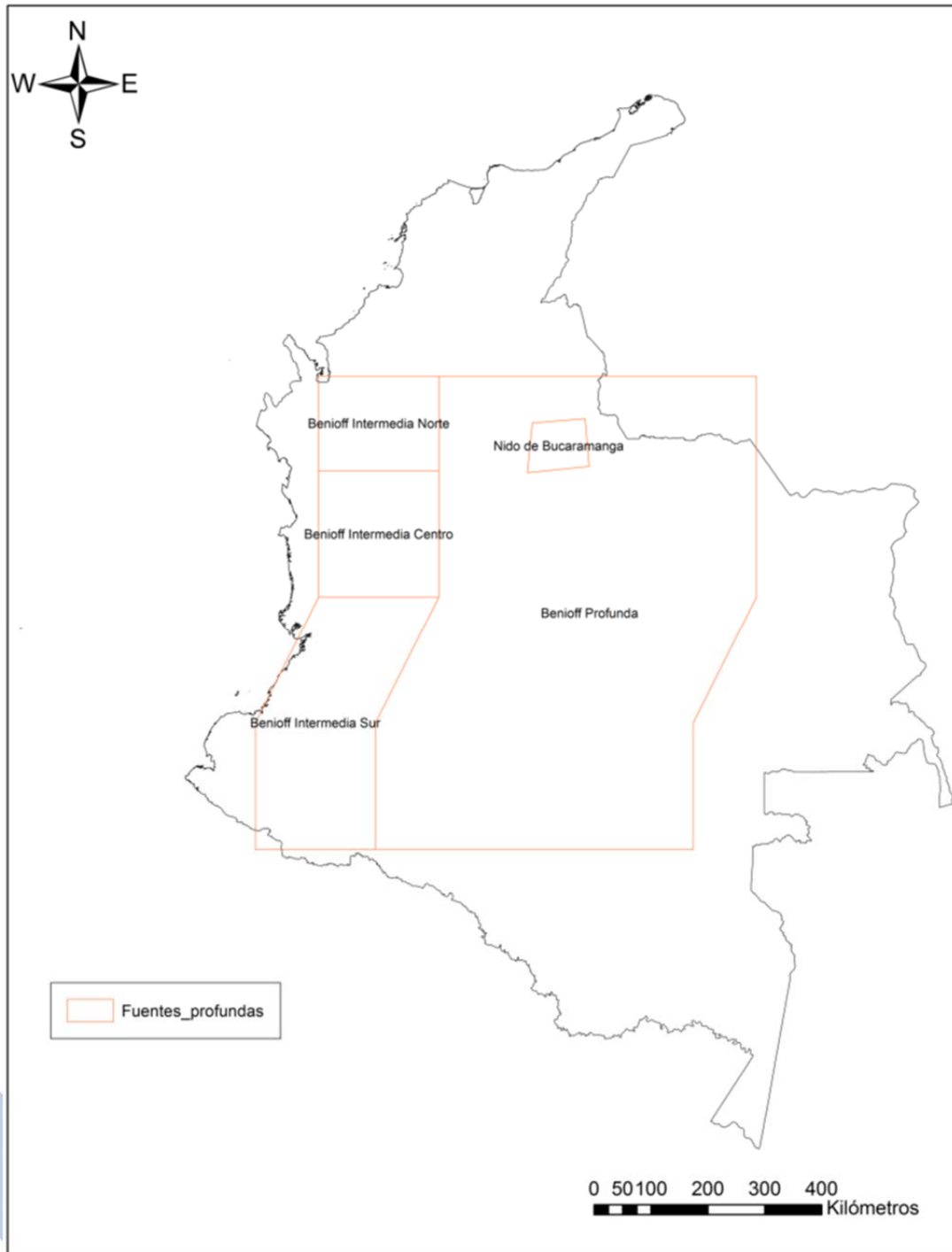
La Figura 3 presenta las fuentes sismogénicas superficiales consideradas para el presente trabajo. En total se cuenta con 33 fuentes sismogénicas las cuales recogen y agrupan diferentes tramos o segmentos de fallas con actividad similar pero que, con base en la información actual disponible, no es posible caracterizar de manera individual debido a los pocos sismos que tendrían asignados para el cálculo de los parámetros de sismicidad que se presentan en el Capítulo 3.



**Figura 3**  
*Fuentes sismogénicas superficiales consideradas*

### 2.3.2 Fuentes profundas

La Figura 4 presenta la geometría de las 5 fuentes sismogénicas profundas consideradas en el análisis.

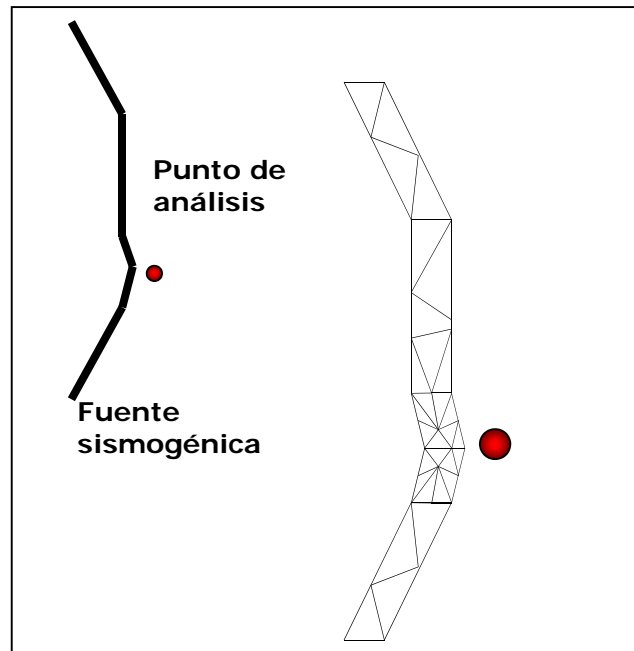


**Figura 4**  
*Fuentes sismogénicas profundas consideradas*

## 2.3 Modelo geométrico seleccionado

Dado que se cuenta con la información suficiente para la caracterización de las fuentes sismogénicas consideradas se ha seleccionado el modelo geométrico de área-fuente en el cual, cada una de las fuentes se modela a partir de la definición de un plano cuyos vértices contienen información acerca de la localización tanto en planta como en profundidad de cada uno de ellos disminuyendo así la incertidumbre asociada con la geometría de las fuentes.

La Figura 5 presenta de manera esquemática la totalidad de una fuente sismogénica, a partir de la cual, es posible ver que se realiza una subdivisión en triángulos de ella donde se considera que, en cada localización dentro de la fuente, la probabilidad espacial de ocurrencia de un sismo es exactamente igual.



*Figura 5*  
*Modelo geométrico de área fuente*

El plano es dividido en subfuentes más pequeñas conforme se está cercano a un punto de análisis (i.e. uno de los nodos de la malla de cálculo). Es importante notar que cada uno de dichos triángulos tiene asociada la misma sismicidad por unidad de área, es decir, conserva de manera uniforme a lo largo de la fuente los parámetros de sismicidad independientemente del tamaño del triángulo.



## 3. MODELO DE SISMICIDAD Y PARÁMETROS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

---

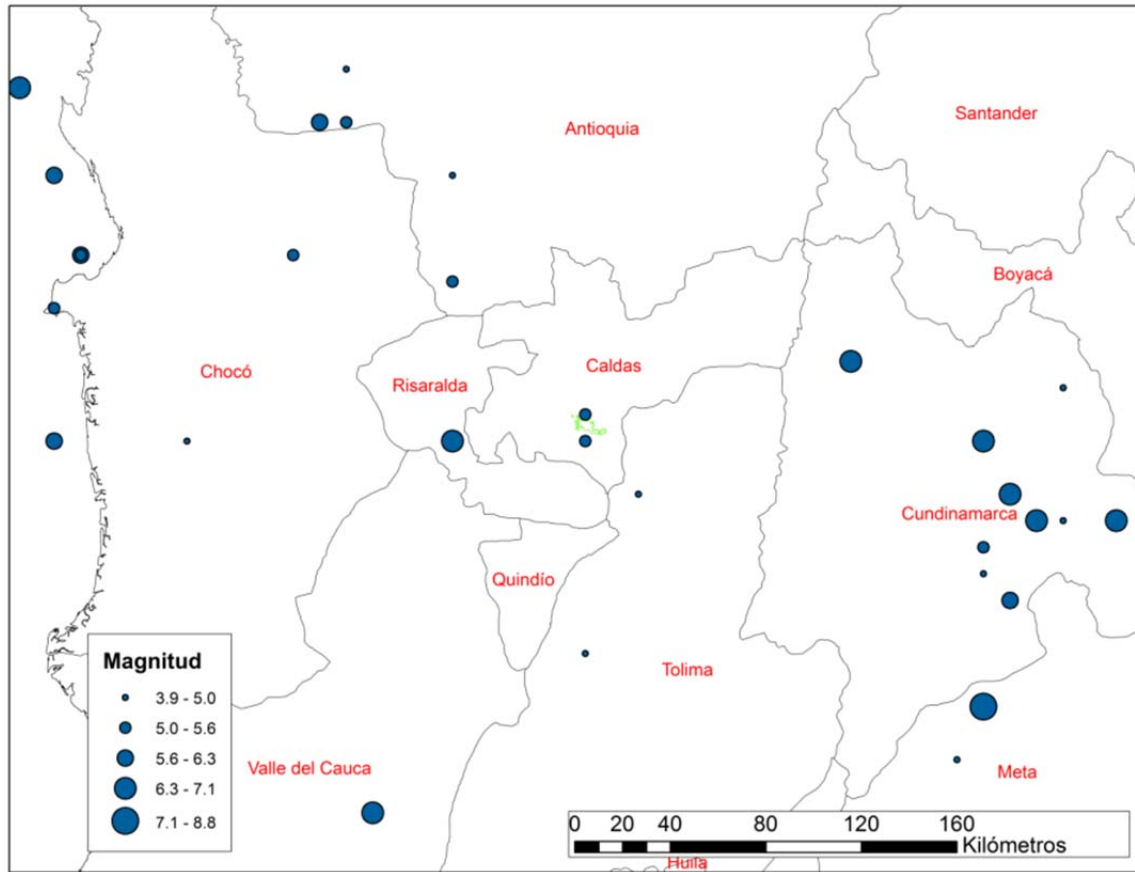
### 3.1 Sismicidad histórica

Históricamente han existido eventos sísmicos que han generado daños y pérdidas de consideración en Manizales. El 23 de noviembre de 1979 Manizales fue sacudida por un evento de magnitud 6.5 asociado a la zona de subducción. En Manizales, el daño observado se concentró principalmente en edificaciones de altura media.

Adicionalmente, sismos de magnitudes intermedias como los ocurridos el 9 de febrero de 1878, el 4 de febrero de 1938, el 20 de diciembre de 1961 y el 30 de julio de 1962 generaron daños importantes en la ciudad afectando principalmente edificaciones antiguas, históricas y religiosas (Ramírez, 2004).

Es importante recordar también que el 25 de enero de 1999 la zona del eje cafetero fue sacudida por un evento de magnitud 6.2 asociado al sistema de fallas Romeral. De las tres principales ciudades del eje cafetero Armenia fue la más afectada seguida por Pereira. En Manizales aunque se sintió el movimiento, el daño fue mínimo comparado con las otras dos poblaciones.

La Figura 6 presenta la localización de sismos históricos en el área de análisis.



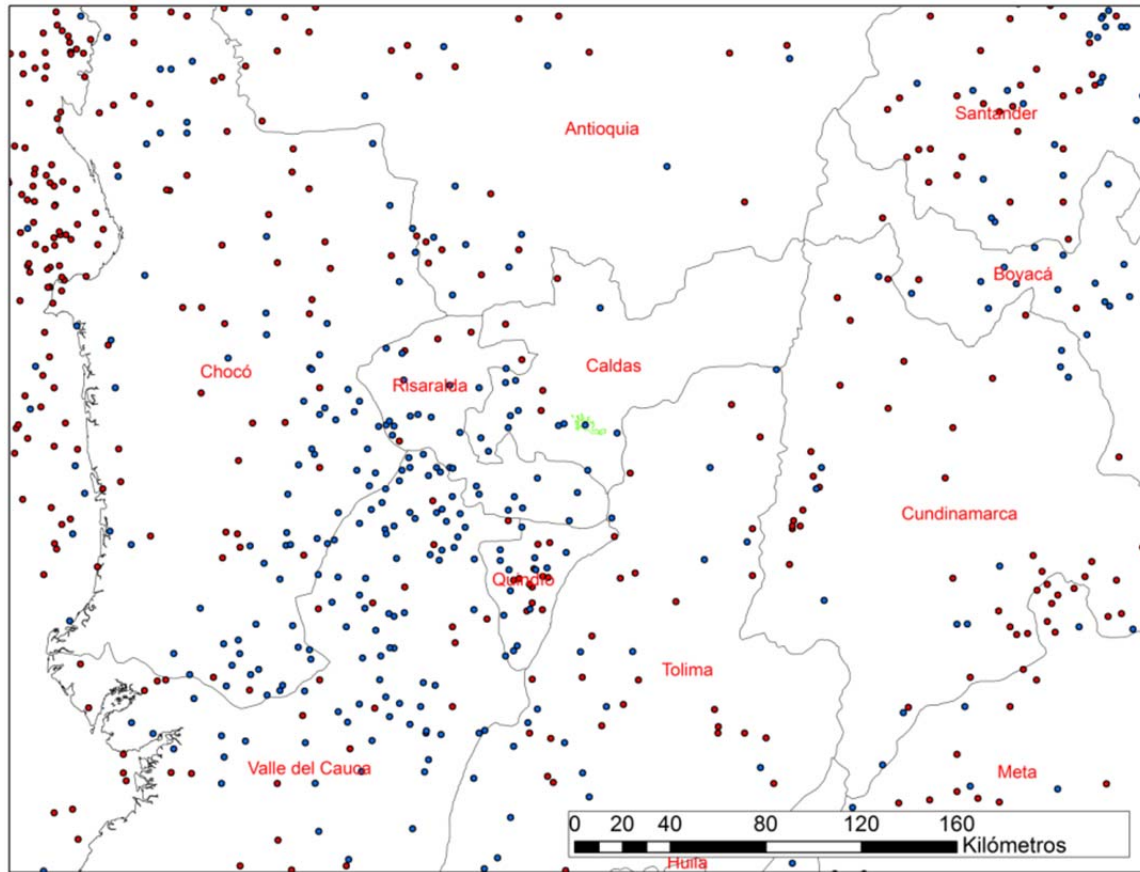
*Figura 6*  
*Sismicidad histórica en el área de estudio*

### 3.2 Sismicidad instrumental

1923 se puede considerar como el año de inicio de la sismicidad instrumental en Colombia dado que fue cuando se instaló el primer acelerógrafo. A partir de esa fecha se han instalado diferentes acelerógrafos por parte de instituciones públicas y privadas que de alguna u otra manera han contribuido al registro de eventos, con todas sus características a nivel nacional.

En 1993 se puso en funcionamiento la Red Nacional de Acelerógrafos por parte de Ingeominas (hoy Servicio Geológico Colombiano).

La Figura 7 presenta la sismicidad instrumental registrada en el área de análisis. En color rojo se presentan los eventos superficiales mientras en azul se presentan los profundos. Es evidente que debe considerarse la participación de los dos tipos de fuentes en el análisis de amenaza sísmica de Manizales dado que es sus vecindades ocurren eventos asociados con los dos rangos de profundidad.



**Figura 7**  
*Sismicidad instrumental en el área de estudio*

### 3.3 Ensamblaje y características del catálogo sísmico utilizado

Para el presente estudio se ha utilizado un catálogo de eventos sísmicos con fecha de inicio el 1 de abril de 1541 y con fecha de corte el 31 de mayo de 2013 cuya información está asociada a diferentes orígenes. El catálogo base utilizado corresponde al catálogo utilizado por la Asociación de Ingeniería Sísmica (AIS) en la elaboración del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia de 2009 (AIS, 2010) que cuenta con 12,694 eventos entre el período comprendido entre el 1 de abril de 1541 y el 28 de diciembre de 2008.

Por estar la fecha de corte 5 años atrás del presente proyecto, se ha consultado la base de datos del National Earthquake Information Center del United States Geological Survey (NEIC, 2013) para incluir eventos entre el período de tiempo comprendido entre el 29 de diciembre de 2008 y el 31 de mayo de 2013. En total, en ese período de tiempo comprendido, se tienen 284 eventos con magnitud (en  $M_w$ ) igual o superior a 4.0 que ha sido el umbral seleccionado para el presente estudio.

Adicionalmente, tras realizarse el proceso de remoción de réplicas en el catálogo que da como resultado la combinación de las dos anteriormente mencionadas fuentes, se procedió a la revisión individual de 141 eventos contenidos en el catálogo del International Seismological Centre (Storchak et al., 2013) para ser incluidos o corregidos, en términos de localización en planta, profundidad y/o magnitud en el catálogo original. Este último catálogo mencionado se considera un importante aporte a nivel internacional en el cual se incluyen eventos (únicamente los principales) con base en información histórica e instrumental confiable para eventos con magnitud igual o superior a 5.5.

Dado que una de las suposiciones del modelo de sismicidad seleccionado, que es explicado en el capítulo siguiente, consiste en la independencia de los eventos, se realizó un proceso de remoción de premonitorios y réplicas para que en el catálogo. Lo anterior se ha realizado utilizando el algoritmo incluido en el programa de cálculo Strong Motion Analyst (Bernal, 2013). El catálogo original consta de 12,995 eventos y tras el proceso de remoción de réplicas se cuenta con 8,186.

### 3.3.1 Chequeo de completitud para la magnitud umbral seleccionada

Como se mencionó, se ha seleccionado una magnitud umbral igual a 4.0 y para ella se ha realizado la verificación de la completitud del catálogo siguiendo el procedimiento propuesto por Tinti y Mulargia (1985). La Figura 8 presenta los resultados de esta evaluación para la cual se ha determinado que el año de inicio, para la magnitud umbral seleccionada, corresponde a 1962. Tras esta verificación, realizando el corte a partir del 1 de enero del año en cuestión y considerando únicamente los eventos con magnitud igual o superior a 4.0, se cuenta con un total de 7,650 eventos a usar en la asignación de las fuentes sismogénicas en el presente trabajo.

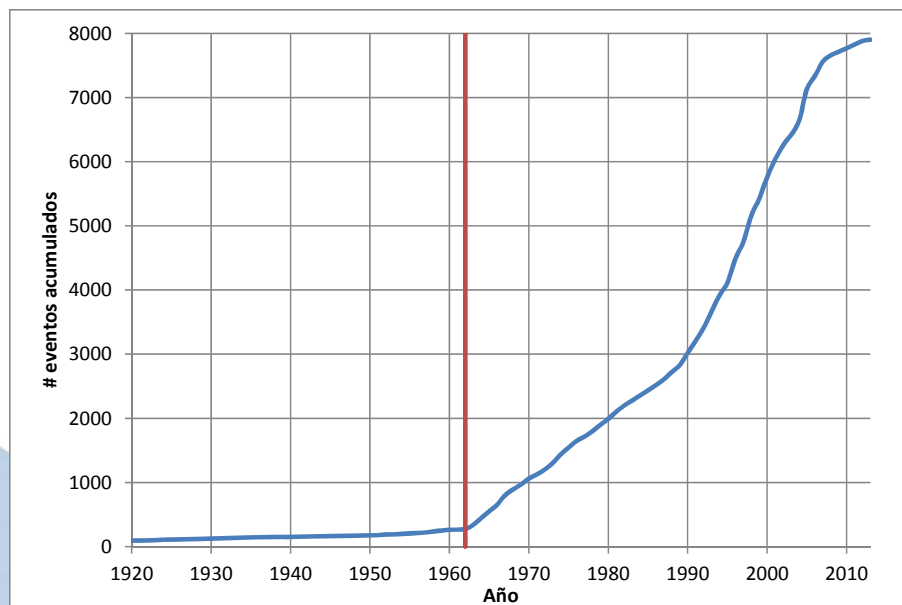


Figura 8

*Chequeo de completitud del catálogo utilizado para la magnitud umbral seleccionada*

### 3.3.2 Estadísticas del catálogo

En esta sección se presentan algunas estadísticas relevantes del catálogo sísmico utilizado para el presente análisis. Como se mencionó anteriormente se cuenta con un total de 7,650 eventos, aproximadamente 250 más si se compara con el utilizado en la versión más actualizada del estudio general de amenaza sísmica de Colombia (AIS, 2010).

La Tabla 1 presenta un resumen de las principales características del catálogo empleado.

**Tabla 1**  
*Características principales del catálogo utilizado*

Magnitud mínima	4.0
Magnitud máxima	8.1
Año de inicio	1962
Año de finalización	2013
Número de eventos	7,650
Tipo de magnitud	$M_w$

La Tabla 2 presenta estadísticas acerca del número de eventos con magnitudes superiores o iguales a las indicadas.

**Tabla 2**  
*Características del catálogo por magnitud*

Magnitud	Número de eventos
4	7,650
4.5	3,274
5	1,201
5.5	290
6	84
6.5	31
7	12
7.5	1
8	1
8.1	1

La Tabla 3 presenta estadísticas acerca del número de eventos con profundidades superiores o iguales a las indicadas. A partir de esta información es posible identificar que un número considerable de eventos está asociado a la sismicidad superficial, es decir, entre 0 y 60 km de profundidad.

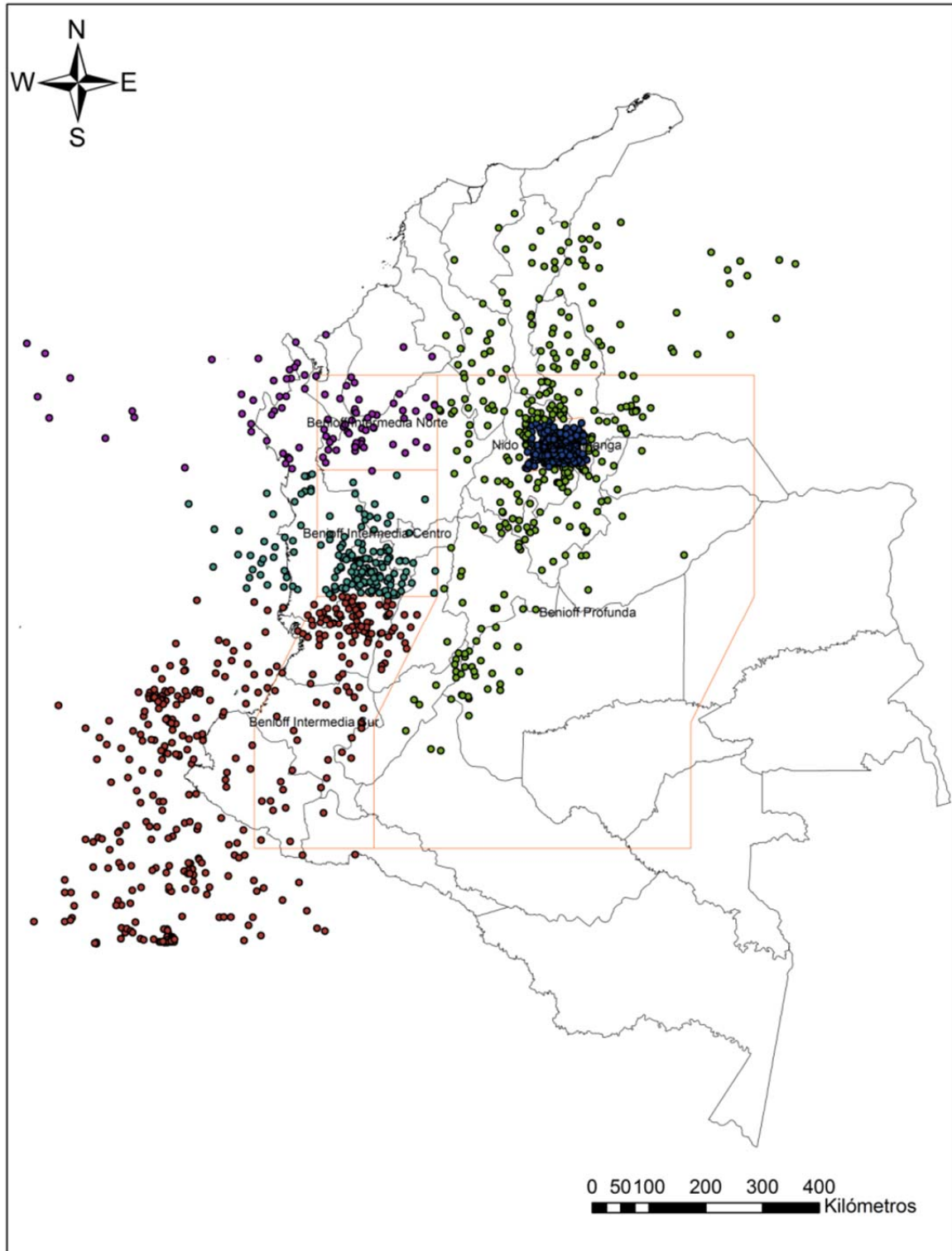
*Tabla 3*  
*Características del catálogo por profundidad*

Profundidad (Km)	Número de eventos
0	7,650
5	7,142
20	5,123
35	3,683
60	2,743
80	2,431
120	1,960
200	91
250	19
300	11

### 3.3.3 Asignación de eventos a las fuentes sismogénicas definidas

Se han utilizado corredores de 60 kilómetros de ancho (30km hacia cada lado) para la asignación de los eventos en el catálogo. Inicialmente se hizo la separación en rangos de profundidad entre superficial y profunda para dicha asignación. La Figura 9 presenta los eventos asignados a las fuentes superficiales mientras que la Figura 10 presenta los eventos asignados a las fuentes profundas.





**Figura 10**  
*Eventos asignados a las fuentes profundas*



### 3.4 Parámetros de sismicidad para las fuentes sismogénicas consideradas

#### 3.4.1 Modelo de sismicidad seleccionado

El modelo de sismicidad seleccionado para el presente estudio consiste en el de recurrencia de magnitudes Gutenberg-Richter (1944) el cual sigue un proceso de Poisson. En dicho modelo, la actividad de cada fuente sismogénica definida se especifica a partir de la tasa de excedencia de las magnitudes,  $\lambda(M)$  que pueden generarse en ella. Esta tasa, expresa usualmente en número de veces por año, el número promedio de eventos que ocurren en esa fuente con magnitud igual o superior a la seleccionada. Específicamente, se sigue la siguiente expresión (Cornell, 1969):

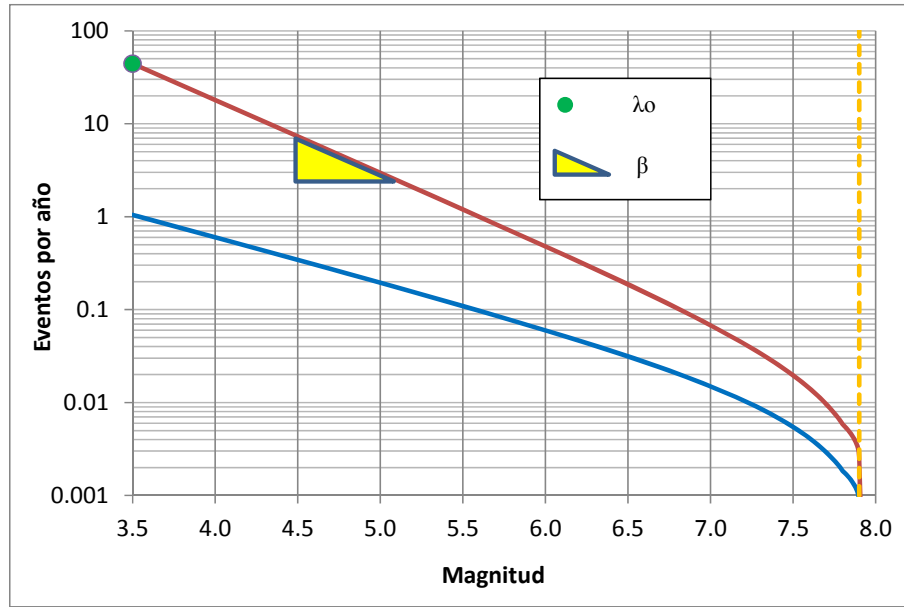
$$\lambda(M) = \lambda_0 \cdot \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \quad (\text{Ec. 3-1})$$

Donde  $M_0$  corresponde a la magnitud umbral seleccionada, en este caso 4.0 y  $\lambda_0$ ,  $\beta$ ,  $M_u$  son parámetros que definen la tasa de excedencia asociada a cada una de las fuentes. Los dos primeros es posible establecerlos mediante métodos estadísticos, mientras que para el último como se verá más adelante, se hace uso de valores establecidos mediante deformaciones históricas y tasas de desplazamiento.

La densidad de probabilidad para las magnitudes se calcula de la siguiente forma:

$$p(M) = -\frac{d\lambda(M)}{dM} = \lambda_0 \cdot \beta \cdot \frac{e^{-\beta M}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}}, M_0 \leq M \leq M_u \quad (\text{Ec. 3-2})$$

La Figura 11 ilustra la forma de las curvas de recurrencia para dos fuentes hipotéticas donde es posible observar que la curva roja tiene más actividad y representa mayor amenaza si se compara con la azul.



**Figura 11**  
*Curvas de recurrencia de magnitudes*

El Anexo 1 presenta las curvas de recurrencia de magnitudes para todas las fuentes sismogénicas consideradas en el presente análisis.

### 3.4.2 Metodología para el cálculo de los parámetros de sismicidad

Una vez asignados la totalidad de los eventos contenidos en el catálogo utilizado a alguna de las fuentes sismogénicas se procede mediante métodos estadísticos al cálculo de los valores  $\lambda_0$  y  $\beta$  de cada una de ellas. El método estadístico utilizado para la determinación de estos parámetros corresponde al de máxima verosimilitud (McGuire, 2004) el cual refleja una mayor calidad el valor de esos parámetros si se compara con el de regresiones lineales y mínimos cuadrados.

La determinación del valor de magnitud umbral ( $M_0$ ) es de 4.0 debido a que eventos con magnitud inferior a esta no son representativos en la estimación de la amenaza sísmica debido a las bajas intensidades asociadas que tienen así sean someros.

El parámetro  $\lambda_0$  describe la actividad de la fuente en una escala de tiempo, definida en años del número de eventos que en promedio ocurren que igualan o exceden la magnitud umbral seleccionada. Esta se calcula a partir del número de eventos con magnitud igual o superior a la umbral seleccionada ( $N$ ) dividida entre la ventana de tiempo en el cual fueron observados ( $t$ ).

$$\lambda_0 = \frac{N}{t}$$

(Ec. 3-3)

La ventana de tiempo se calcula a partir del número de años para los cuales el catálogo utilizado se considera como completo la cual en el presente trabajo se establece en 51 años.

El parámetro  $\beta$  representa la pendiente inicial de la regresión logarítmica siguiendo la definición de la ecuación de regresión de magnitudes establecida por Gutenberg y Richter (1944) que sigue la siguiente expresión:

$$N(m) = e^{(\lambda_0 - \beta m)} \quad (\text{Ec. 3-4})$$

Y se calcula como:

$$\beta = \frac{N}{\sum_{i=1}^N (M_i - M_0)} \quad (\text{Ec. 3-5})$$

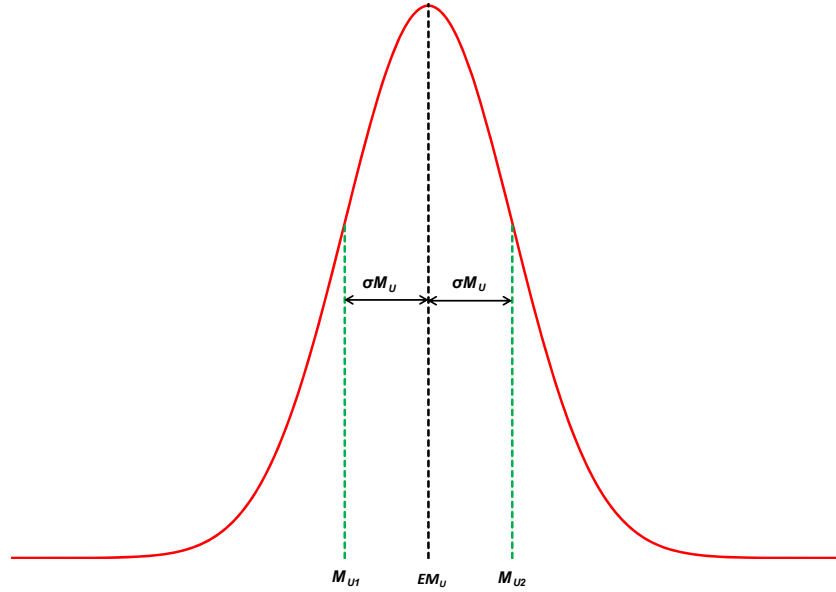
Donde N es el número de eventos con magnitud mayor o igual a la umbral dividido entre la sumatoria de la diferencia entre la magnitud de cada evento y la magnitud umbral. Este parámetro es importante al indicar la capacidad que tiene cualquier fuente sismogénica de generar eventos de magnitudes grandes, la cual aumenta si este parámetro disminuye.

Adicionalmente, para una evaluación consistente de manera probabilista de la amenaza sísmica se requiere calcular el coeficiente de variación del parámetro  $\beta$  el cual se hace dividiendo la media entre la desviación estándar.

$$CV(\beta) = \frac{1}{\sqrt{N-1}} \quad (\text{Ec. 3-6})$$

Por último para la definición del parámetro  $M_0$  de cada una de las fuentes que representa la máxima magnitud que se espera pueda generar cada una de ellas se realiza la estimación mediante valores incluidos en estudios anteriores, generalmente aceptados por especialistas, la evaluación de la longitud de ruptura máxima de cada fuente así como de características morfotectónicas.

Para la determinación de la magnitud última asociada a cada una de las fuentes se han utilizado los valores del último estudio general de amenaza sísmica de Colombia (AIS, 2010). Dado que existe una alta incertidumbre en la determinación de este parámetro este no se determina a partir de un valor fijo sino que se trata como una variable aleatoria que sigue una distribución normal la cual se determina a partir de su valor esperado y la desviación estándar y se trunca a dos valores como se muestra en la Figura 12.



**Figura 12**

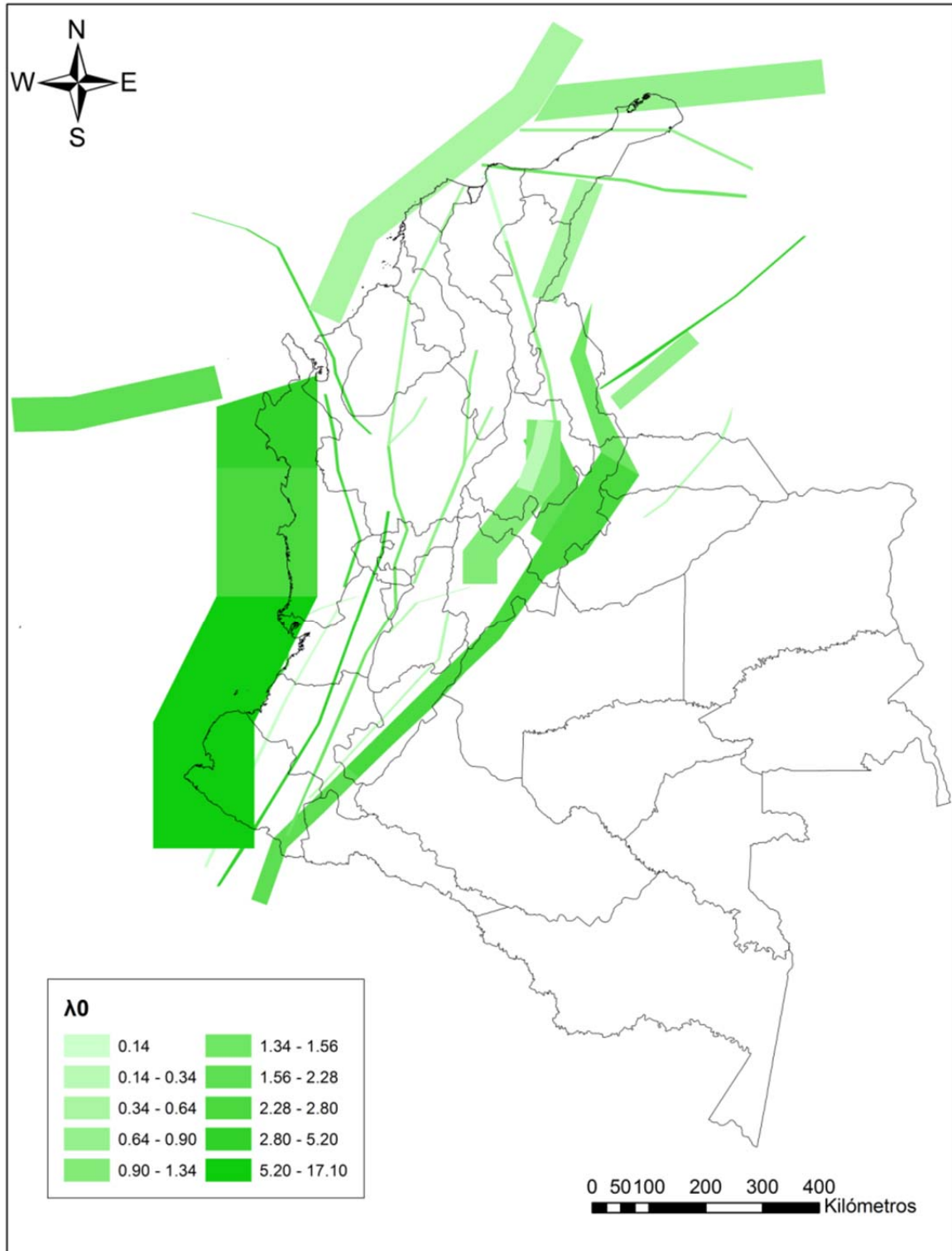
*Distribución normal para la estimación de la magnitud máxima*

La Tabla 4 presenta los valores de los parámetros de sismicidad calculados para cada una de las fuentes sismogénicas.

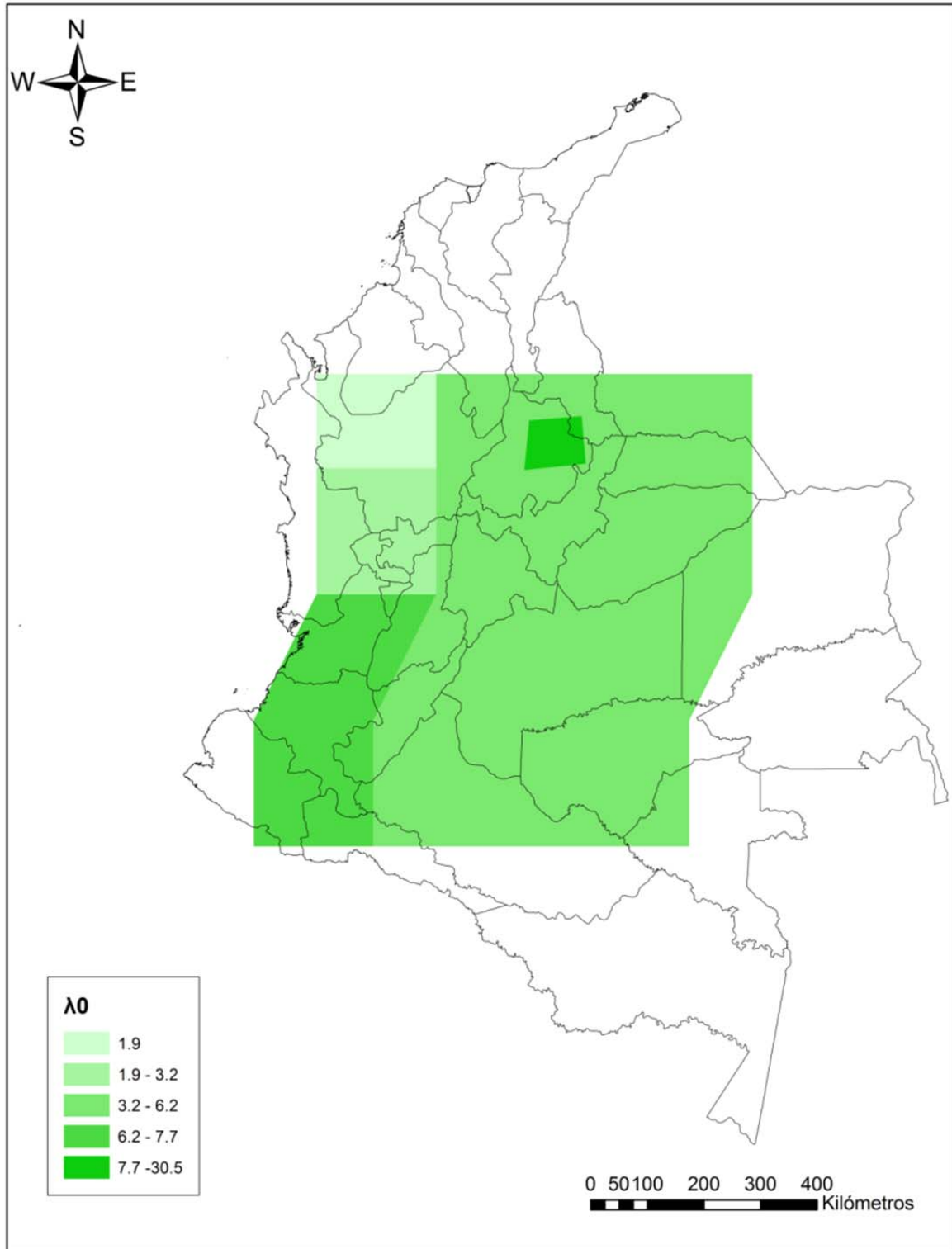
**Tabla 4**  
**Parámetros de sismicidad de las fuentes sismogénicas consideradas**

Fuente	M <sub>0</sub>	λ <sub>0</sub>	β	CV(β)	Mu	σMu
Arco de Dabeiba	4.0	2.480	1.605	0.090	6.9	0.2
Bahía Solano	4.0	2.540	1.318	0.089	7.5	0.2
Benioff Intermedia I	4.0	7.720	1.714	0.051	8.0	0.2
Benioff Intermedia II	4.0	3.220	1.431	0.079	8.0	0.2
Benioff Intermedia III	4.0	1.900	2.079	0.103	8.0	0.2
Benioff Profunda	4.0	6.220	2.000	0.057	7.5	0.2
Boconó	4.0	5.200	2.020	0.062	7.4	0.2
Bucaramanga-Santa Marta Norte	4.0	0.140	1.373	0.408	6.5	0.2
Bucaramanga-Santa Marta Centro	4.0	0.700	2.134	0.172	6.5	0.2
Bucaramanga-Santa Marta Sur	4.0	1.920	3.466	0.103	6.9	0.2
Cauca	4.0	4.700	2.574	0.065	7.5	0.2
Cimitarra	4.0	0.640	2.783	0.180	6.5	0.2
Compresión Caribe SE	4.0	0.700	1.651	0.172	6.5	0.2
Compresión Caribe SW	4.0	0.580	2.528	0.189	6.1	0.2
Cuiza	4.0	0.820	1.847	0.158	6.6	0.2
Espíritu Santo	4.0	0.300	1.546	0.267	6.5	0.2
Fallas del Magdalena	4.0	0.300	1.081	0.267	7.0	0.2
Frontal Cordillera Oriental Norte	4.0	1.500	1.558	0.116	8.0	0.2
Frontal Cordillera Oriental Centro	4.0	2.640	1.468	0.087	8.0	0.2
Frontal Cordillera Oriental Sur	4.0	2.280	2.049	0.094	8.0	0.2
Garrapatas	4.0	0.320	2.162	0.258	6.5	0.2
Ibagué	4.0	0.320	1.553	0.258	6.9	0.2
Junín	4.0	0.140	2.188	0.408	7.0	0.2
Murindó	4.0	2.800	1.411	0.084	7.5	0.2
Nido Bucaramanga	4.0	30.500	1.804	0.025	6.5	0.2
Normal Panamá-Pacífico	4.0	2.080	1.737	0.098	7.1	0.2
Oca	4.0	1.560	2.060	0.114	6.5	0.2
Palestina	4.0	0.900	1.786	0.151	6.5	0.2
Perijá	4.0	0.540	2.935	0.196	6.5	0.2
Puerto Rondón	4.0	0.260	1.526	0.288	6.7	0.2
Romeral	4.0	1.520	1.872	0.115	7.6	0.2
Romeral Norte	4.0	0.460	1.679	0.213	6.5	0.2
Salinas	4.0	1.340	1.791	0.123	6.5	0.2
Suárez	4.0	0.340	2.329	0.250	6.5	0.2
Subducción Norte	4.0	4.320	1.260	0.068	8.6	0.2
Subducción Centro	4.0	2.740	1.118	0.085	8.6	0.2
Subducción Sur	4.0	17.100	1.923	0.034	8.9	0.2
Uribante-Caparro	4.0	0.820	1.487	0.158	7.0	0.2

Las Figuras 13 y 14 presentan los valores del parámetro λ<sub>0</sub> para las fuentes superficiales y profundas respectivamente.



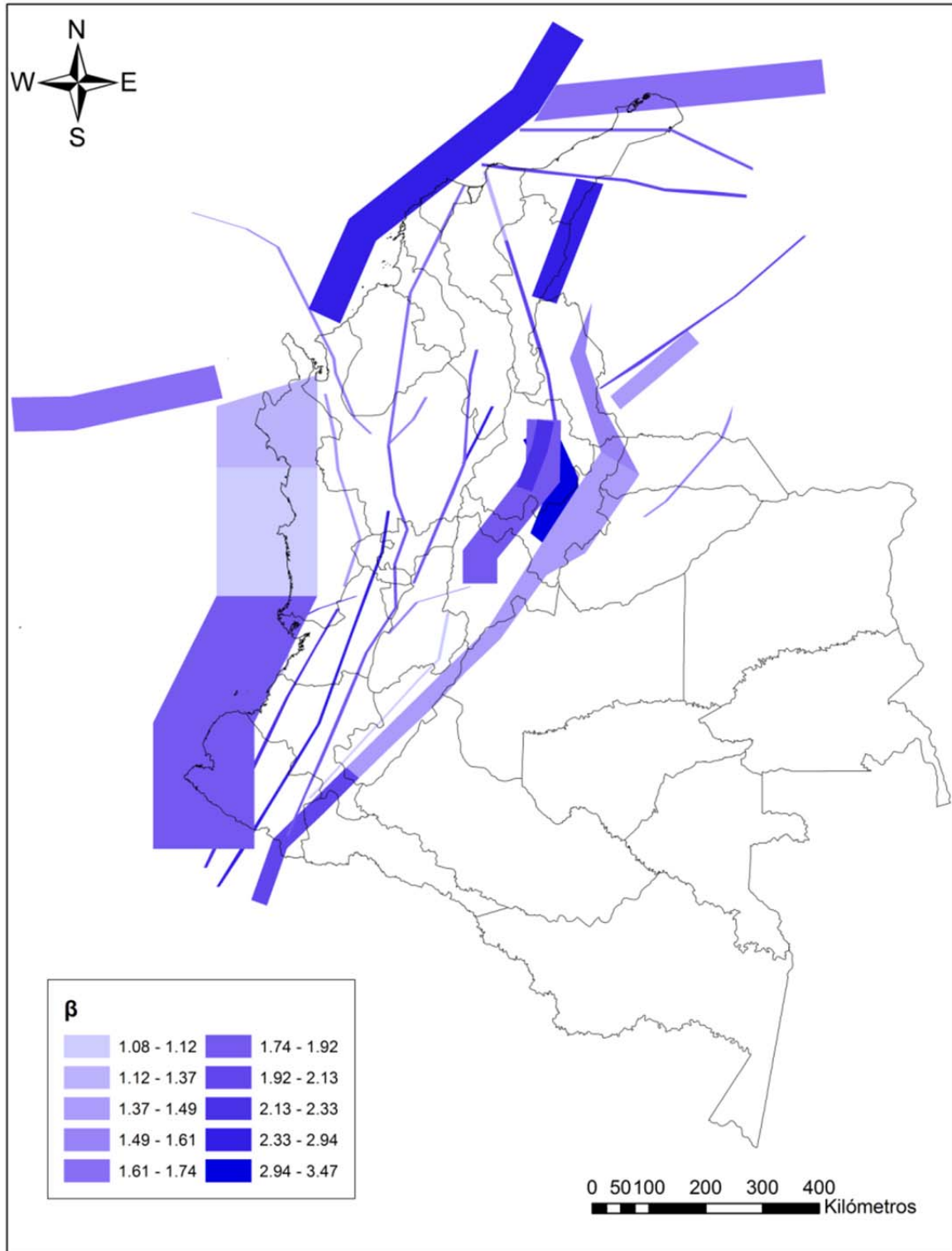
**Figura 13**  
*Parámetro  $\lambda_0$  para las fuentes sismogénicas superficiales*



**Figura 14**

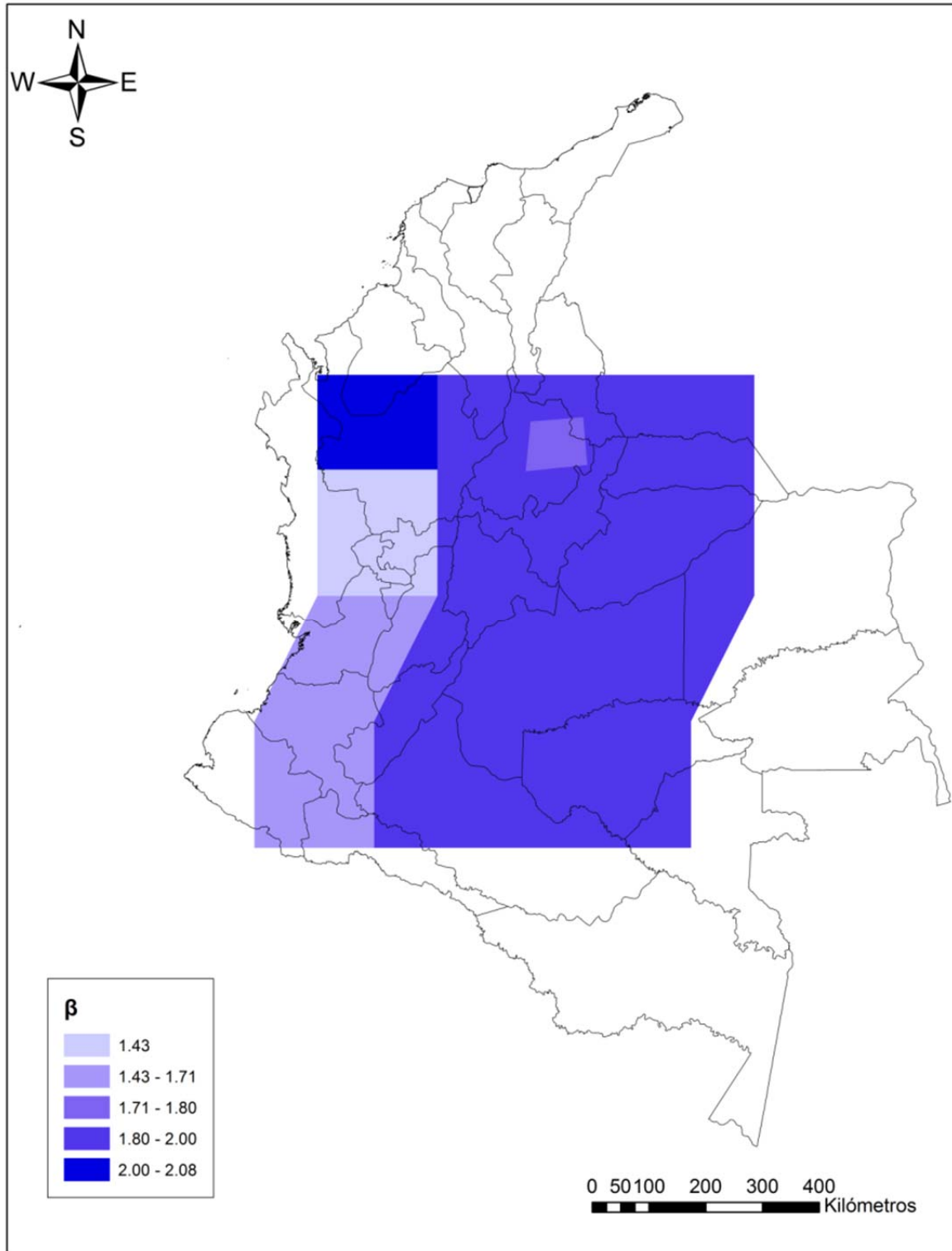
*Parámetro  $\lambda_0$  para las fuentes sismogénicas profundas*

Las Figuras 15 y 16 presentan los valores del parámetro  $\beta$  para las fuentes superficiales y profundas respectivamente.



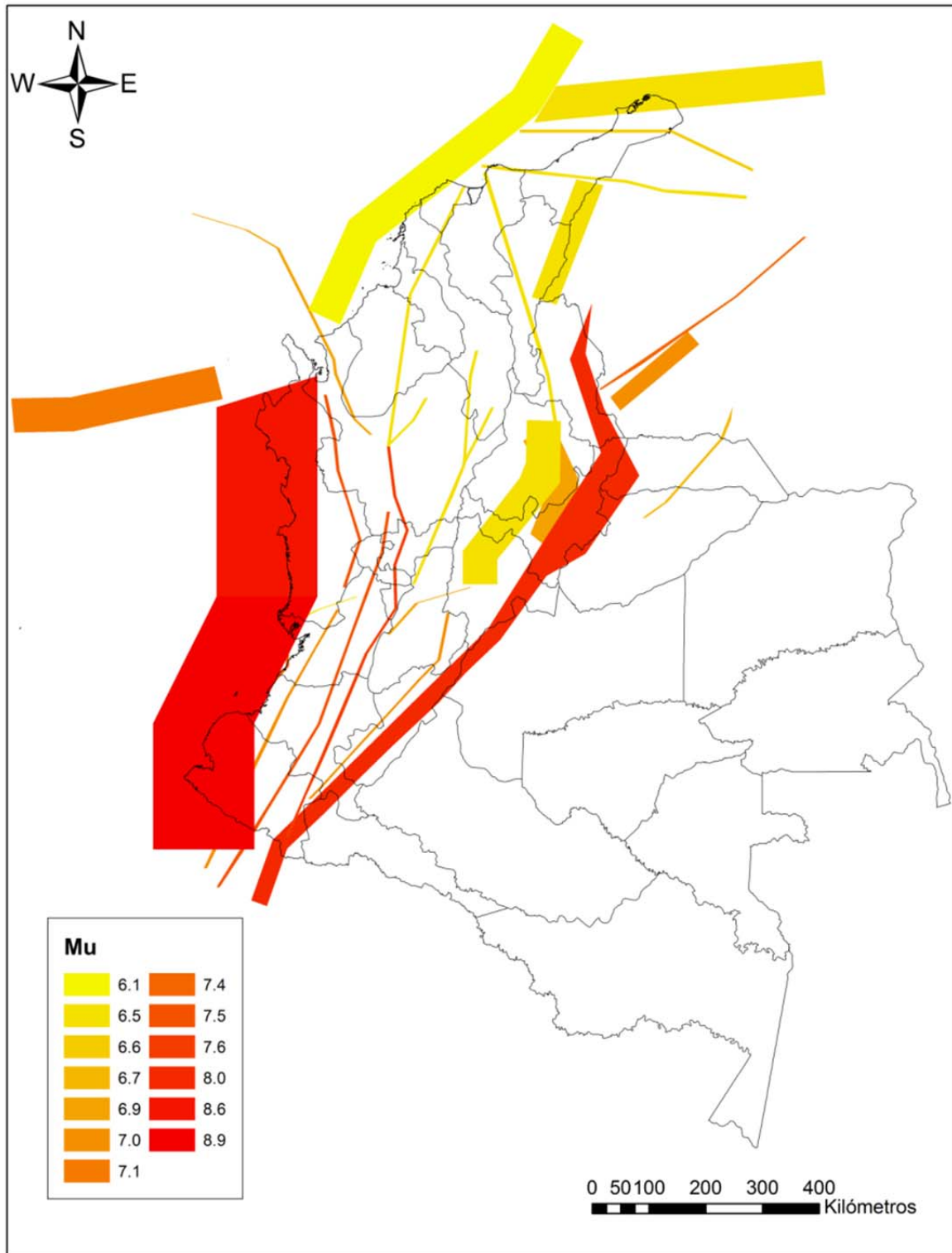
**Figura 15**  
*Parámetro  $\beta$  para las fuentes sismogénicas superficiales*



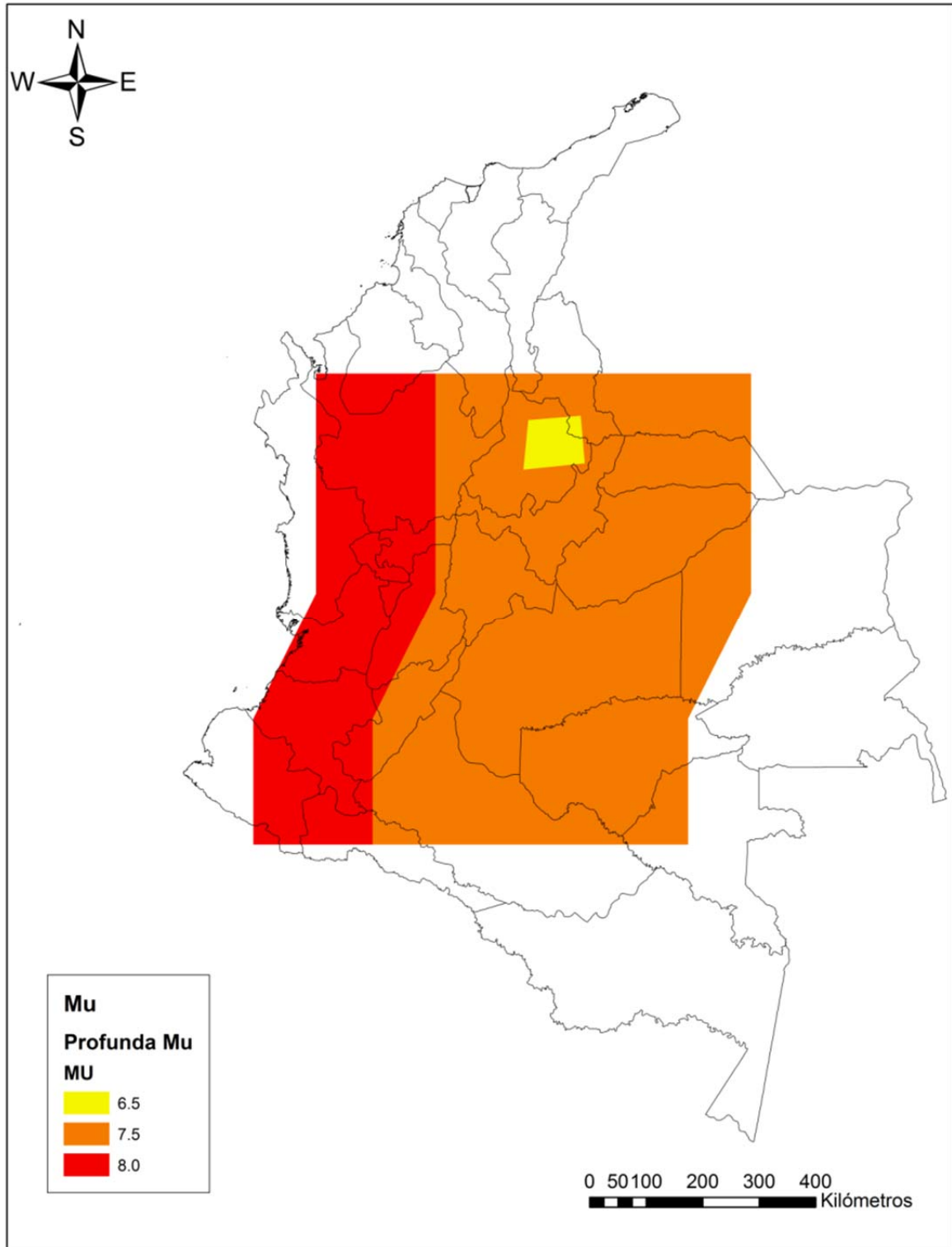


**Figura 16**  
*Parámetro  $\beta$  para las fuentes sismogénicas profundas*

Finalmente, las Figuras 17 y 18 presentan los valores del parámetro  $M_U$  para las fuentes superficiales y profundas respectivamente.



**Figura 17**  
*Parámetro  $M_U$  para las fuentes sismogénicas superficiales*



*Figura 18*  
*Parámetro  $M_U$  para las fuentes sismogénicas profundas*

## 4. LEYES DE ATENUACIÓN DE MOVIMIENTO FUERTE

---

Como sucede con todas liberaciones de energía, existe una atenuación de la intensidad de ésta conforme se aleja el observador. En el caso de los sismos la tendencia general muestra que a medida que aumenta la distancia de observación, la intensidad medida a través del movimiento del terreno se atenúa. (Sarria, 1995), (Sarria, 2008). Para el cálculo de la amenaza sísmica, la definición de las leyes de atenuación de movimiento fuerte (GMPEs por sus siglas en inglés) juega un papel fundamental pues es a partir de estas que se cuantifica en términos de cualquier parámetro físico, tal y como la aceleración espectral o la velocidad y/o desplazamiento máximo del terreno, el valor de este para una magnitud y una distancia conocida.

Las leyes de atenuación entonces pueden verse de forma general como:

$$I = f(M, r, T) \quad (\text{Ec. 4-1})$$

donde:

- I: Intensidad
- M: Magnitud del sismo
- r: Distancia hipocentral
- T: Período natural de vibración

Para el presente análisis se consideran leyes de atenuación espectrales para tomar en cuenta que ondas con diferente contenido frecuencial atenúan de manera diferente así como también, leyes de atenuación donde la distancia esté medida en términos de la distancia focal o hipocentral, para considerar el parámetro de profundidad del sismo. Adicionalmente, el valor de la desviación estándar de la intensidad estimada por la ley de atenuación de movimiento fuerte debe ser conocido pues este debe utilizarse en el momento de la evaluación probabilista de la amenaza sísmica.

### 4.1 Selección y asignación de las leyes de atenuación de movimiento fuerte existentes para las fuentes sismogénicas consideradas

A nivel internacional actualmente se encuentra un número considerable de leyes de atenuación de movimiento disponible, muchas de ellas generadas a partir de diferentes metodologías que pueden ser empíricas a partir de regresiones de registros reales para la zona de análisis así como teóricos con bases sismológicas.

Para el presente análisis se han clasificado las fuentes sismogénicas en dos grupos, el primero correspondiente a aquellas de tipo intraplaca y el segundo a aquellas asociadas a procesos de subducción. Para la evaluación de la amenaza sísmica es posible asociar a cada fuente una ley de atenuación de movimiento fuerte diferente.

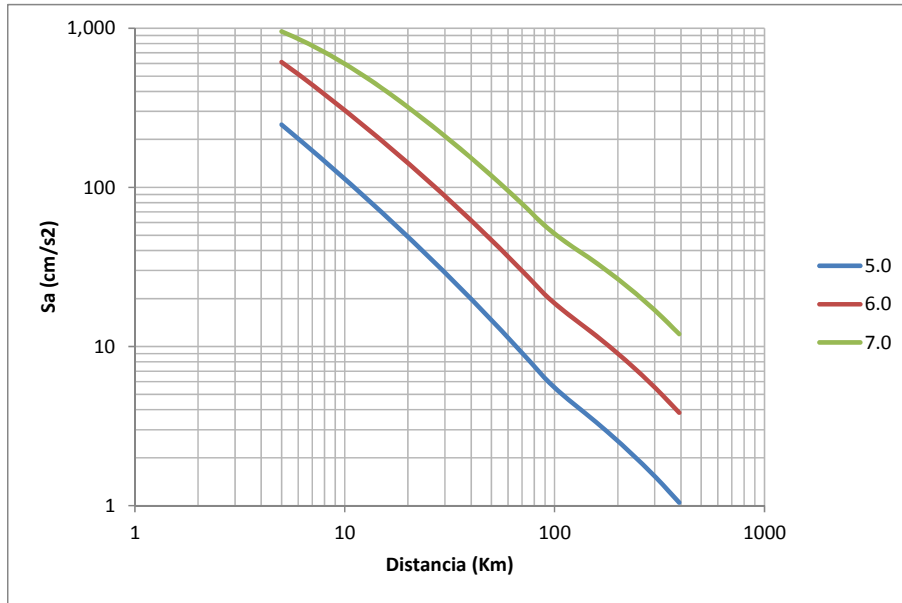
A nivel nacional son pocas las leyes de atenuación disponibles; sin embargo, para el presente trabajo se ha utilizado la ley de atenuación propuesta por Bernal et al. (2012) la cual ha sido calibrada para la minimización de sesgos y desviaciones estándar a partir de registros nacionales.

Esta ley de atenuación está basada en un modelo de espectro fuente para el cual una serie de parámetros se calibran para aumentar la compatibilidad con el entorno tectónico colombiano a partir de la información disponible. Para el presente análisis se ha definido un amortiguamiento con respecto al crítico del 5%, nivel compatible con el establecido en la evaluación de la amenaza sísmica en el Reglamento NSR-10.

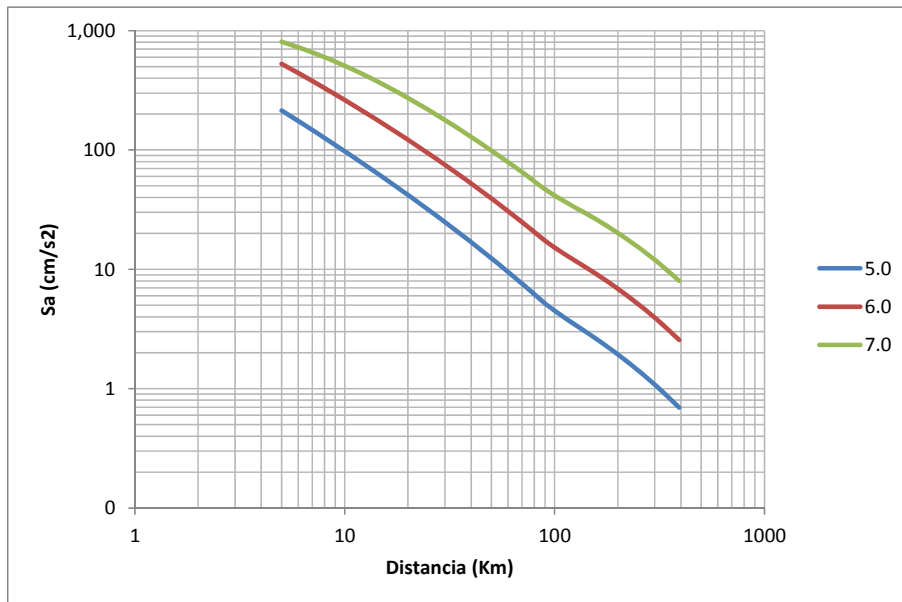
Esta ley de atenuación también diferencia la actividad entre intraplaca y subducción por lo que en términos prácticos, se cuenta con dos diferentes leyes de atenuación, es decir, una para cada entorno.

Dado que el origen de la ley de atenuación es el modelo de espectro fuente, es posible la obtención de las intensidades esperadas para diferentes ordenadas espectrales así como también para parámetros como la velocidad máxima del terreno y el desplazamiento máximo del mismo.

La Figura 19 presenta las intensidades esperadas para diferentes combinaciones de magnitudes y distancias de categoría intraplaca, mientras la Figura 20 presenta la misma información para la categoría de subducción para la aceleración máxima del terreno (PGA).



**Figura 19**  
*Ley de atenuación Bernal et al. fuentes intraplaca*



**Figura 20**  
*Ley de atenuación Bernal et al. fuentes subducción*

## 5. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA SÍSMICA EN ROCA

### 5.1 Metodología de evaluación probabilista de amenaza sísmica

Caracterizadas cada una de las fuentes mediante los parámetros descritos en el capítulo anterior, se realiza el cálculo de la amenaza sísmica para determinar los diferentes valores de los diversos parámetros de intensidad tales como aceleración y velocidad en el área de estudio.

Una vez conocidas la sismicidad de las fuentes, los patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de ellas, y los efectos de la geología local, puede calcularse la amenaza sísmica considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio donde se encuentra la estructura. La amenaza, expresada en términos de las tasas de excedencia de intensidades  $a$ , se calcula mediante la siguiente expresión: (Ordaz, 2000)

$$v(a) = \sum_{n=1}^N \int_{M_0}^{M_u} -\frac{\partial \lambda}{\partial M} \Pr(A > a | M, R_i) dM \quad (\text{Ec. 5-1})$$

donde la sumatoria abarca la totalidad de las fuentes sísmicas  $N$ , y  $\Pr(A > a | M, R_i)$  es la probabilidad de que la intensidad exceda un cierto valor, dadas la magnitud del sismo  $M$ , y la distancia entre la  $i$ -ésima fuente y el sitio  $R_i$ . Las funciones  $\lambda_i(M)$  son las tasas de actividad de las fuentes sísmicas. La integral se realiza desde  $M_0$  hasta  $M_u$ , lo que indica que se toma en cuenta, para cada fuente sísmica, la contribución de todas las magnitudes.

Conviene hacer notar que la ecuación anterior sería exacta si las fuentes sísmicas fueran puntos. En realidad son volúmenes, por lo que los epicentros no sólo pueden ocurrir en los centros de las fuentes sino, con igual probabilidad, en cualquier punto dentro del volumen correspondiente. Se debe tomar en cuenta esta situación subdividiendo las fuentes sísmicas en triángulos, en cuyo centro de gravedad se considera concentrada la sismicidad del triángulo. La subdivisión se hace recursivamente hasta alcanzar un tamaño de triángulo suficientemente pequeño como para garantizar la precisión en la integración de la ecuación anterior. En vista de que se supone que, dadas la magnitud y la distancia, la intensidad tiene distribución lognormal, la probabilidad  $\Pr(A > a | M, R_i)$  se calcula de la siguiente manera (Ordaz, 2000).

$$\Pr(A > a | M, R_i) = \phi \left( \frac{1}{\sigma_{Lna}} \ln \frac{\text{MED}(A | M, R_i)}{a} \right)$$

(Ec. 5-2)

Siendo  $\phi(\cdot)$  la distribución normal estándar,  $\text{MED}(A | M, R_i)$  la mediana de la intensidad dado por la ley de atenuación de movimiento fuerte asociada para un par de magnitud y distancia conocido y  $\sigma_{Lna}$  su correspondiente desviación estándar.

La amenaza sísmica se expresa, entonces, en términos de la tasa de excedencia de valores dados de intensidad sísmica. Como se ha indicado, en este caso la intensidad sísmica,  $a$ , se mide con las ordenadas del espectro de respuesta de pseudo-aceleraciones para 5% del amortiguamiento crítico y el periodo natural de vibración de la edificación de interés,  $T$ .

## 5.2 Probabilidad de excedencia y períodos de retorno

La forma más común de expresar la amenaza sísmica de un lugar es a través de la probabilidad de excedencia de un parámetro típico. Para el caso de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente se llevó a cabo la estimación de los parámetros  $A_a$ ,  $A_v$ ,  $A_e$  y  $A_d$ . Los dos primeros parámetros se encuentran asociados con el sismo de diseño mientras que los otros dos corresponden al sismo de seguridad limitada y de umbral de daño respectivamente.

El sismo de diseño se encuentra establecido para que el nivel de amenaza tenga una probabilidad de excedencia del 10% en una vida útil de la estructura de 50 años; el sismo de seguridad limitada tiene asociada una probabilidad de excedencia del 20% en 50 años; y el sismo de umbral de daño tiene una probabilidad de excedencia del 80% en 50 años. La probabilidad  $q$  de que se exceda un valor definido de la aceleración horizontal del terreno  $a_o$  sin importar éste cual sea en un año puede expresarse a través de:

$$q = P(a \geq a_o, 1 \text{ año}) \quad (\text{Ec. 5-3})$$

La probabilidad de excedencia se puede asociar con el periodo de retorno a través de la siguiente expresión:

$$\bar{T} = \frac{1}{q} \quad (\text{Ec. 5-4})$$

donde el periodo de retorno  $\bar{T}$  es el tiempo medio de recurrencia en años de un evento que tiene una aceleración horizontal mayor o igual a  $a_o$ .

Por último, se define  $q_o$  como la probabilidad de que se tenga como mínimo un evento que tenga una aceleración mayor o igual a  $a_o$ , la cual se puede calcular de la siguiente manera:



$$q_o = 1 - (1 - q)^t$$

(Ec. 5-5)

donde  $t$  es el tiempo de exposición. Conociendo entonces lo anterior se puede también expresar  $q_o$  como:

$$q_o = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^t$$

(Ec. 5-6)

Para el sismo de diseño  $q_o=0.1$  y  $t=50$  años lo que conduce a un periodo de retorno de 475 años. Para el sismo de seguridad limitada  $q_o=0.2$  y  $t=50$  años lo que conduce a un periodo de retorno de 225 años y para el sismo de umbral de daño  $q_o=0.8$  y  $t=50$  años lo que lleva a un periodo de retorno de 31 años.

Que el período de retorno de un evento corresponda a un número determinado de años no garantiza que este ocurra dentro de este lapso y siempre debe entenderse que dicho período representa la recurrencia media para que ocurra un evento que supere cierto parámetro establecido.

### 5.3 Resultados de amenaza sísmica

A continuación se presentan los resultados de la evaluación probabilista de amenaza sísmica en Manizales. El principal resultado del análisis probabilista consiste en la estimación de la curva de excedencia de intensidades (también conocida como curva de amenaza) para diferentes ordenadas espectrales.

La evaluación de la amenaza sísmica en roca se ha realizado utilizando el programa de cálculo CRISIS2014 V1.2 (Ordaz et al., 2013) como se muestra en la Figura 21, el cual es mundialmente reconocido y aceptado para evaluaciones probabilistas de la amenaza sísmica. Este programa permite considerar tanto el modelo de sismicidad como geométrico que se ha querido emplear para el presente análisis.

Se ha utilizado una distancia de integración igual a 500 km la cual garantiza la consideración de todos los eventos que puedan contribuir en cualquier grado a la amenaza sísmica en el área de estudio.

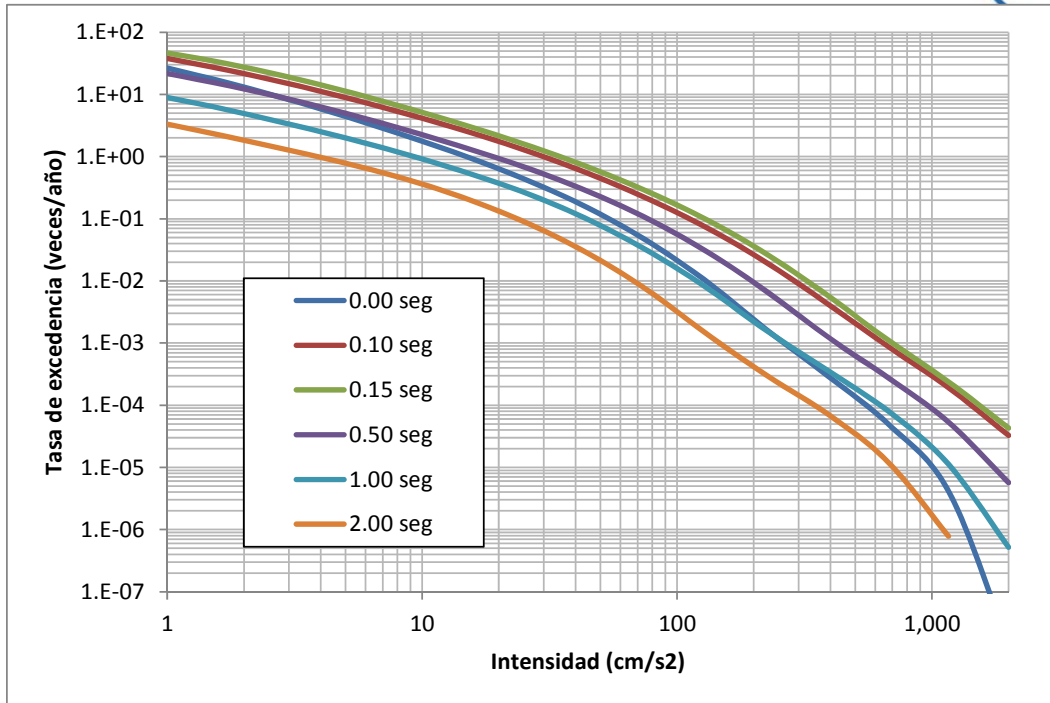


*Figura 21*  
*Programa CRISIS2014 V1.2*

Dado que la estimación se está realizando a nivel de roca las variaciones dentro de pares de coordenadas inscritas dentro del perímetro urbano de Manizales son mínimas y las que acá se presentan, para las coordenadas -75.58, 5.11 pueden considerarse como representativas del área de estudio.

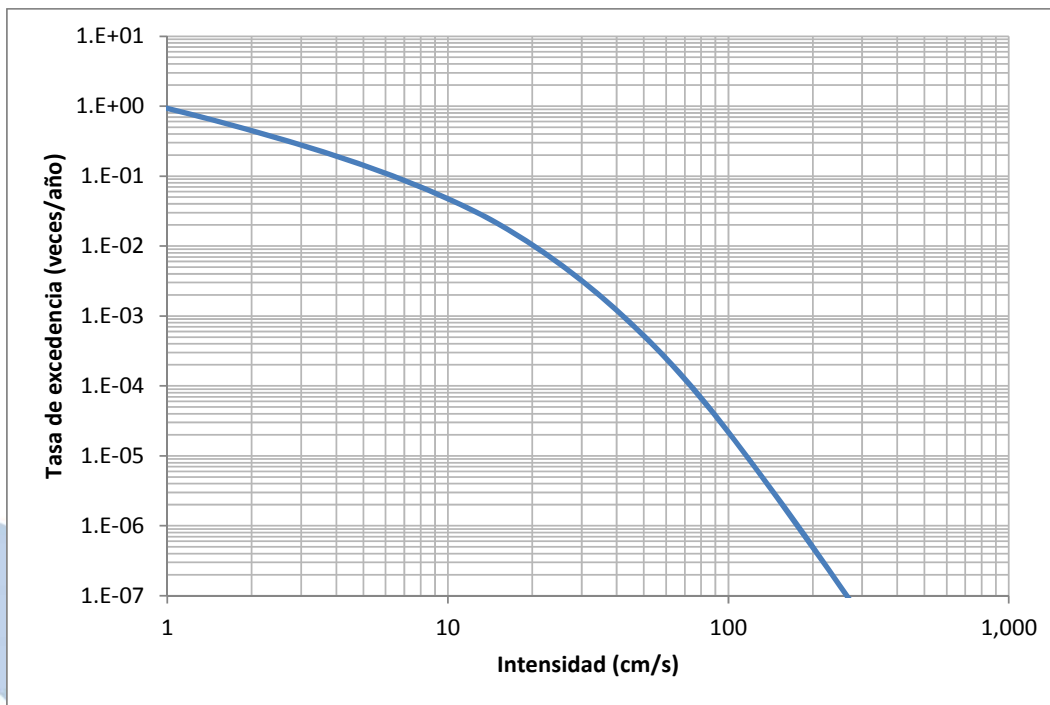
### **5.3.1 Curvas de excedencia de intensidad**

La Figura 22 presenta las curvas de excedencia de intensidades para las siguientes seis ordenadas espectrales: 0.0seg, 0.10seg, 0.15seg, 0.50seg, 1.0seg y 2.0seg. Cada curva presenta la tasa de excedencia (expresada en número de veces por año) para cada nivel de intensidad expresado en aceleración espectral.



**Figura 22**  
*Curvas de amenaza para diferentes ordenadas espectrales en Manizales*

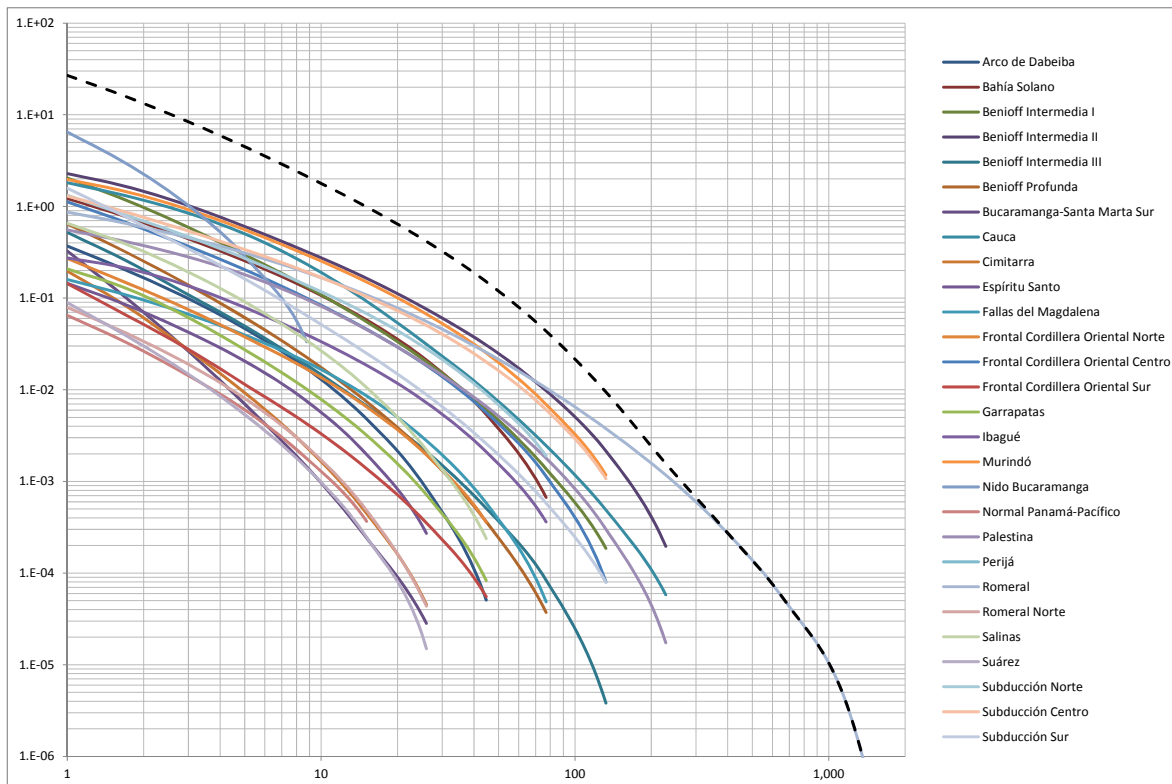
Adicionalmente la Figura 23 presenta la curva de excedencia de intensidades para la velocidad máxima del terreno.



**Figura 23**  
*Curva de amenaza para velocidad máxima del terreno en Manizales*

### 5.3.2 Curva de excedencia de intensidad con la contribución de las fuentes sismogénicas

La Figura 24 presenta la curva de amenaza en términos de la aceleración máxima del terreno (PGA) mostrando al mismo tiempo la contribución de cada una de las fuentes sismogénicas, es decir, la curva de amenaza individual de cada fuente. A partir de la figura es evidente que, para un período de retorno dado, la contribución de cada fuente varía. La curva negra punteada constituye la curva de amenaza integrada (presentada anteriormente en la Figura 22) para la aceleración máxima del terreno.



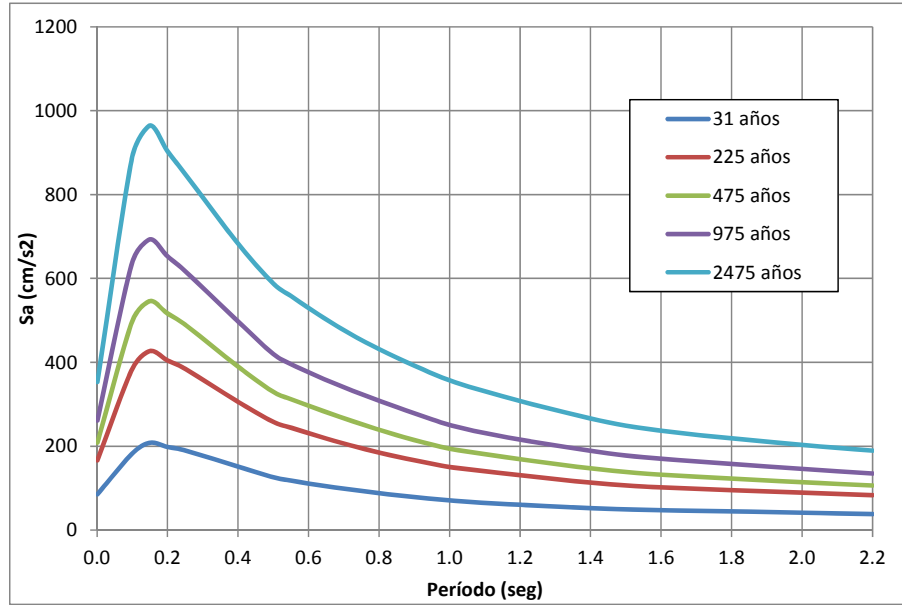
**Figura 24**  
*Participación de las fuentes en la amenaza sísmica de Manizales*

### 5.3.3 Espectros de amenaza uniforme

Al haberse realizado un análisis probabilista espectral de la amenaza sísmica, a partir de la información contenida en las curvas de amenaza para diferentes ordenadas espectrales es posible construir el espectro de amenaza uniforme para diferentes períodos de retorno. En cada una de estas curvas, las intensidades asociadas a las diferentes ordenadas espectrales tienen la misma tasa de excedencia, lo cual no ocurre con los espectros elásticos de diseño por ejemplo, los cuales generalmente se especifican a partir de una serie de coeficientes sísmicos.

Se presentan los espectros de amenaza uniforme para 31, 225, 475, 975 y 2,475 años respectivamente. Estos períodos de retorno corresponden a los de umbral de daño, seguridad limitada y diseño respectivamente de acuerdo al Reglamento NSR-10. Adicionalmente el de 975 es el utilizado para el código de puentes en Colombia mientras el de 2,475 años corresponde al de las recomendaciones para diseño de infraestructura no convencional por parte del Comité AIS-180 (AIS, 2012).

La Figura 25 presenta estos resultados para la ciudad de Manizales.



**Figura 25**  
*Espectros de amenaza uniforme para Manizales*

### 5.3.4 Mapas de amenaza sísmica

A continuación se presentan los mapas de amenaza sísmica de la zona de análisis para diferentes períodos de retorno y ordenadas espectrales.

En primer lugar las Figuras 26 a 30 presentan los mapas para la aceleración máxima del terreno (PGA) para 31, 225, 475, 975 y 2,475 años de período de retorno.

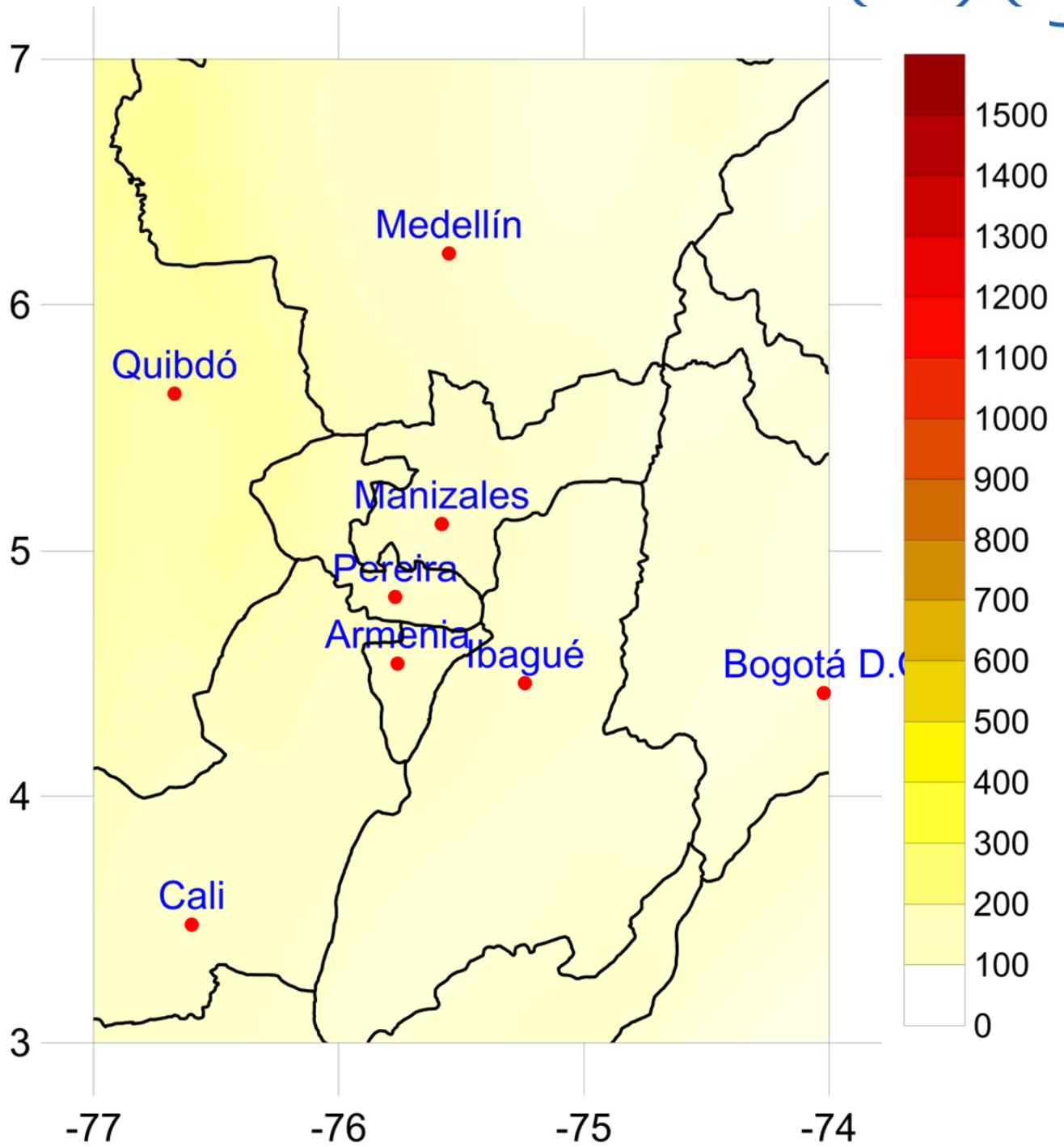


Figura 26  
Mapa de amenaza sísmica. PGA, 31 años

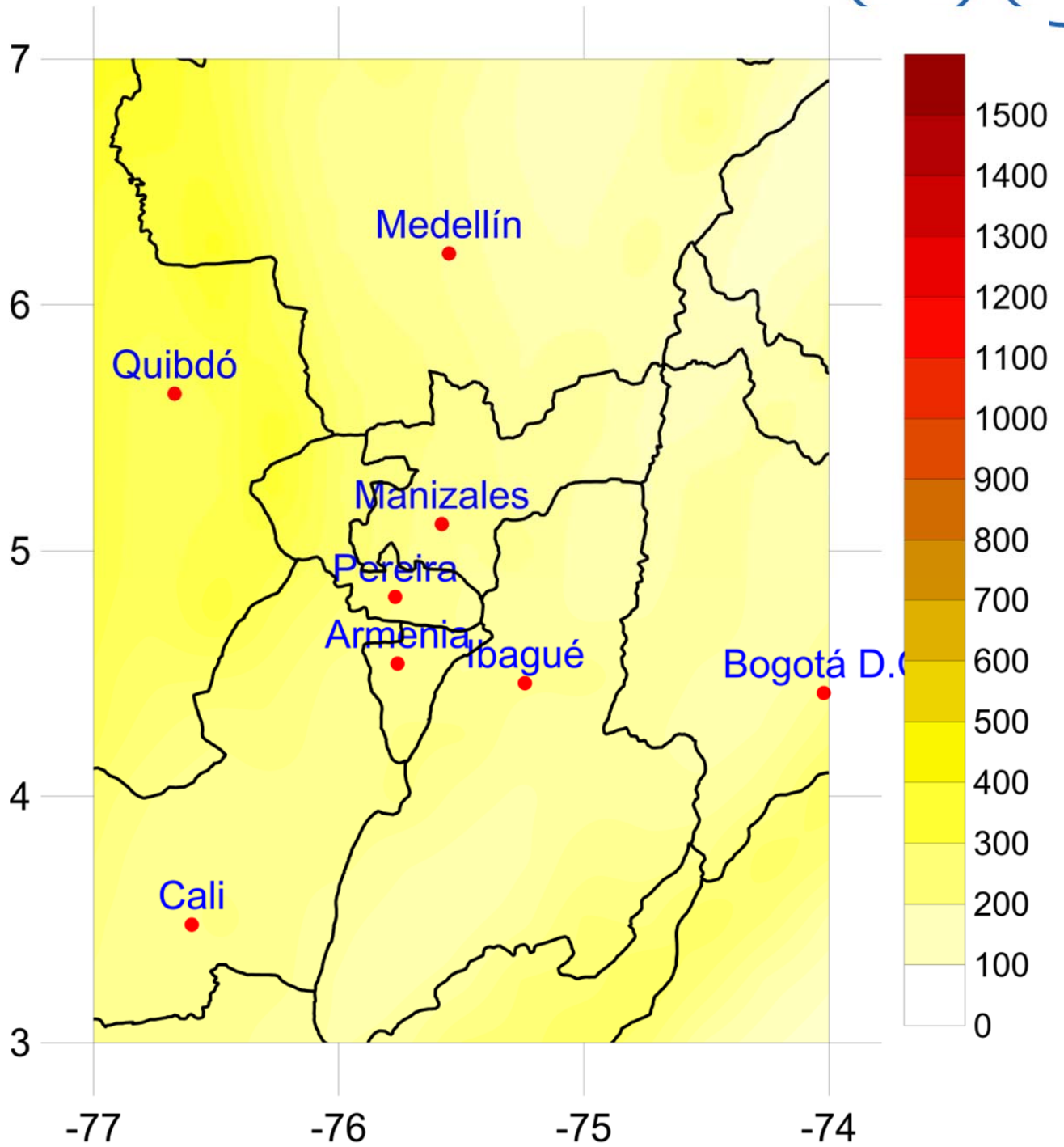


Figura 27  
Mapa de amenaza sísmica. PGA, 225 años

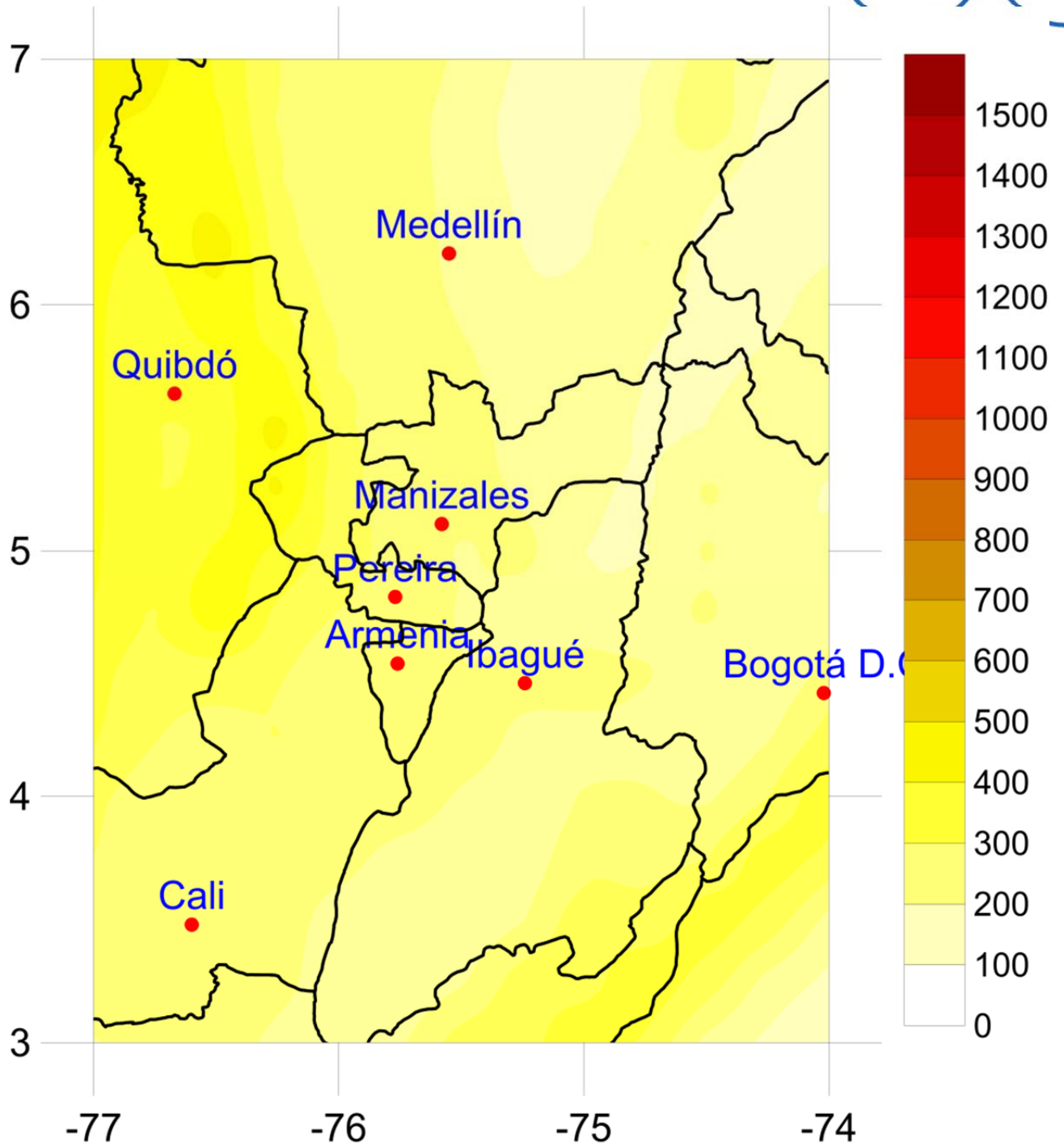


Figura 28  
Mapa de amenaza sísmica. PGA, 475 años



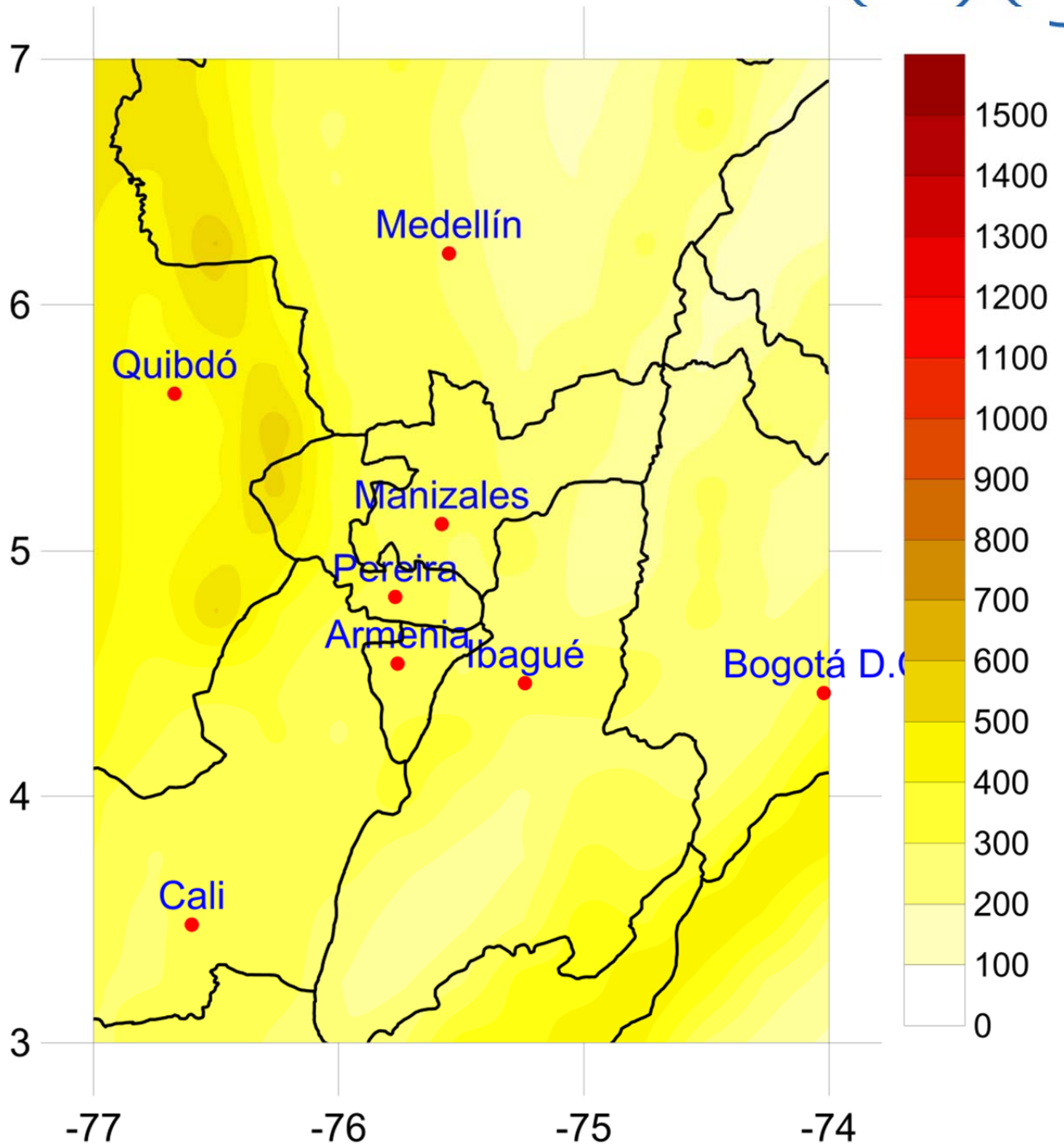
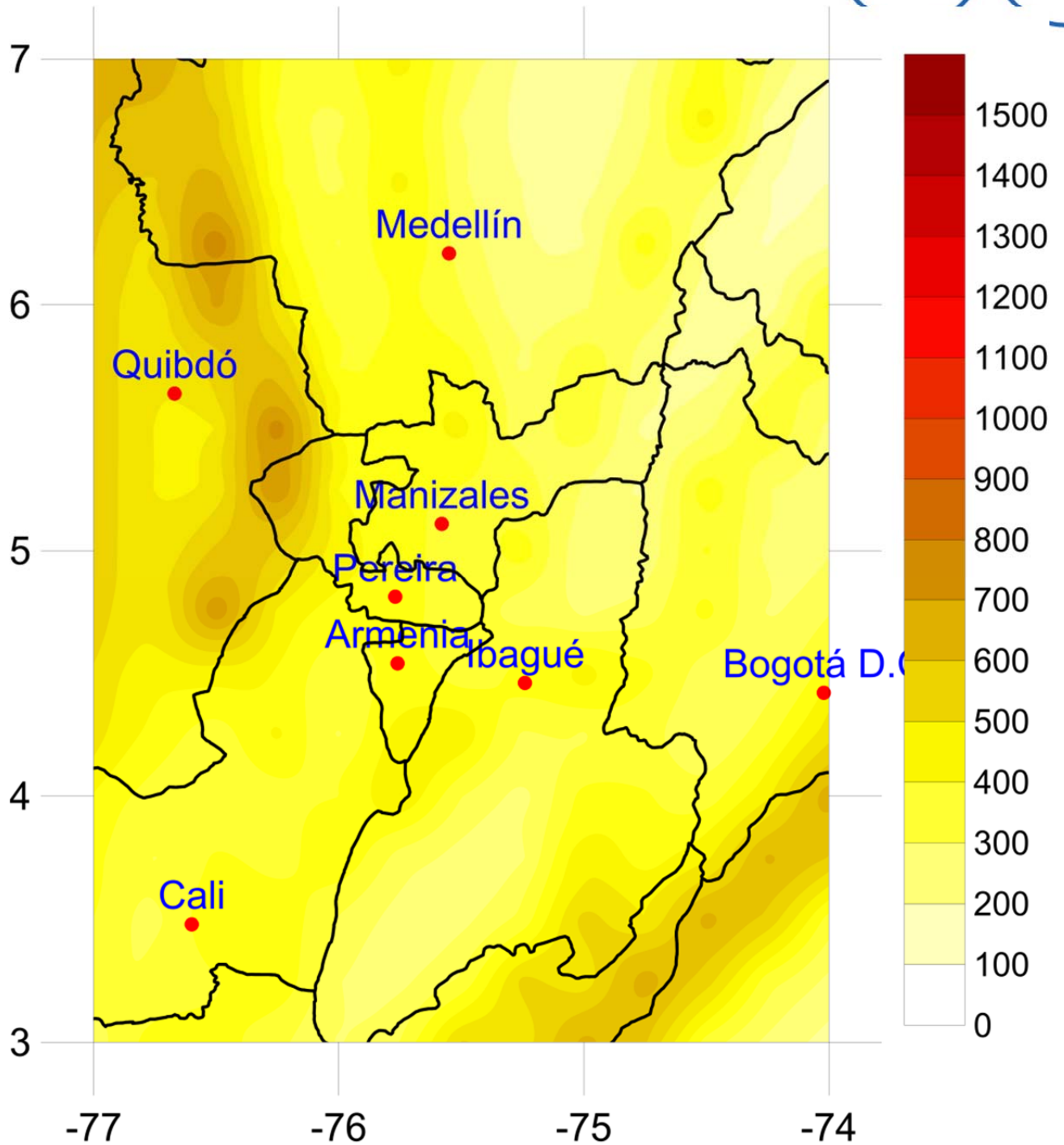


Figura 29  
Mapa de amenaza sísmica. PGA, 975 años



*Figura 30*  
*Mapa de amenaza sísmica. PGA, 2,475 años*

Las Figuras 31 a 35 presentan los mapas de amenaza sísmica para 475 años de período de retorno y para las ordenadas espectrales de 0.10, 0.15, 0.50, 1.00 y 2.00 segundos.

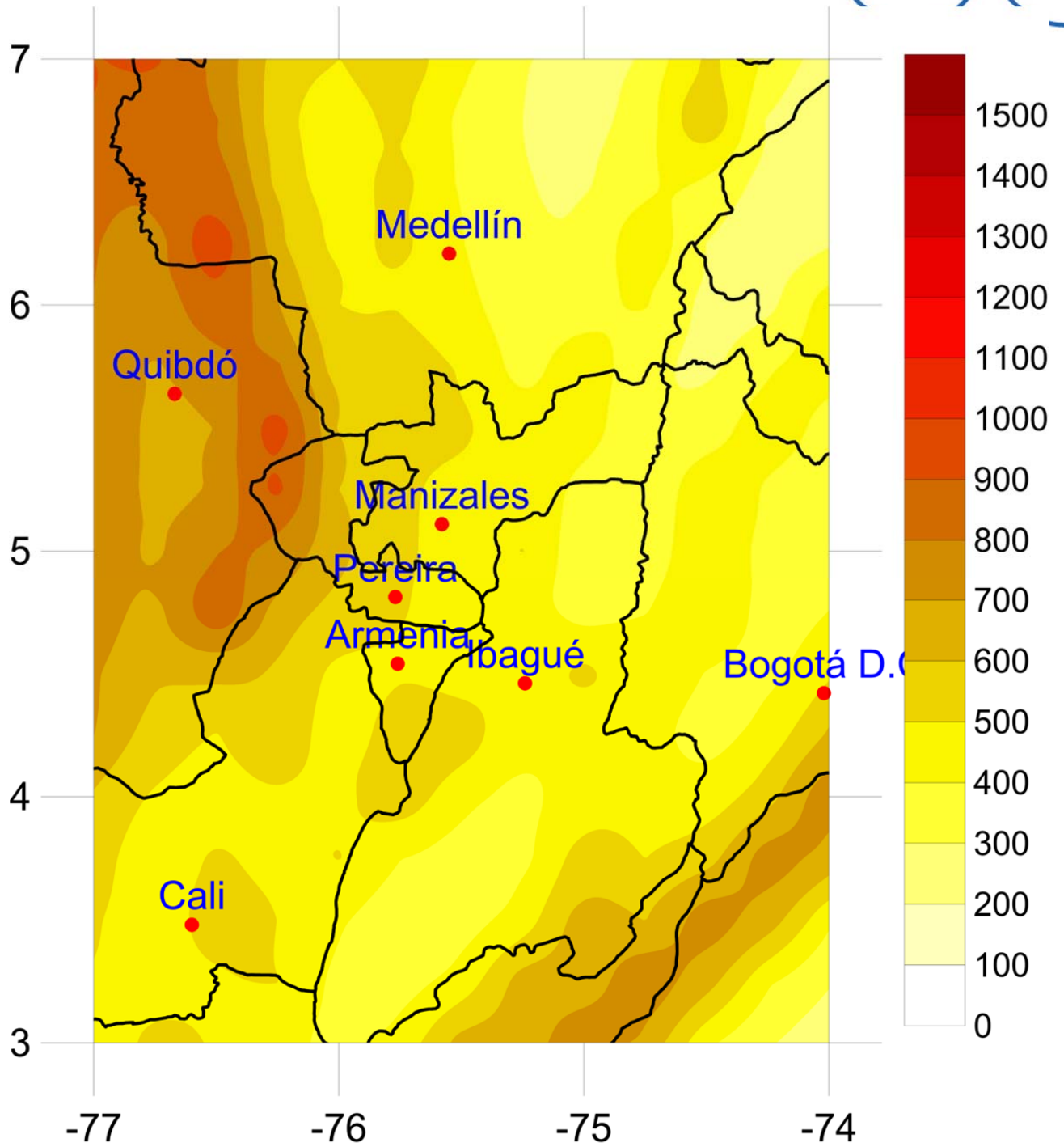


Figura 31  
Mapa de amenaza sísmica. TR: 475 años, Sa: 0.10seg

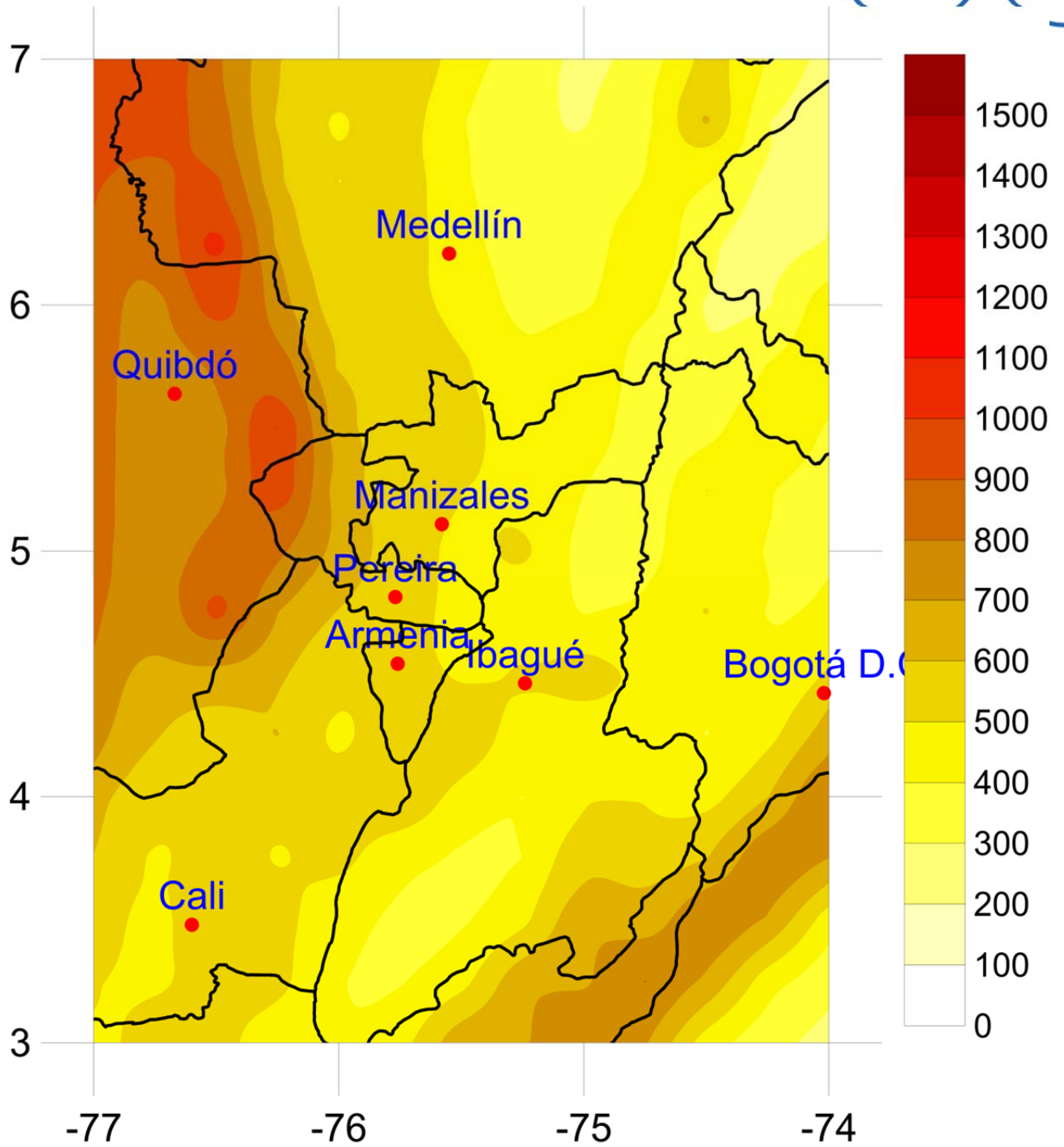


Figura 32  
Mapa de amenaza sísmica. TR: 475 años, Sa: 0.15seg

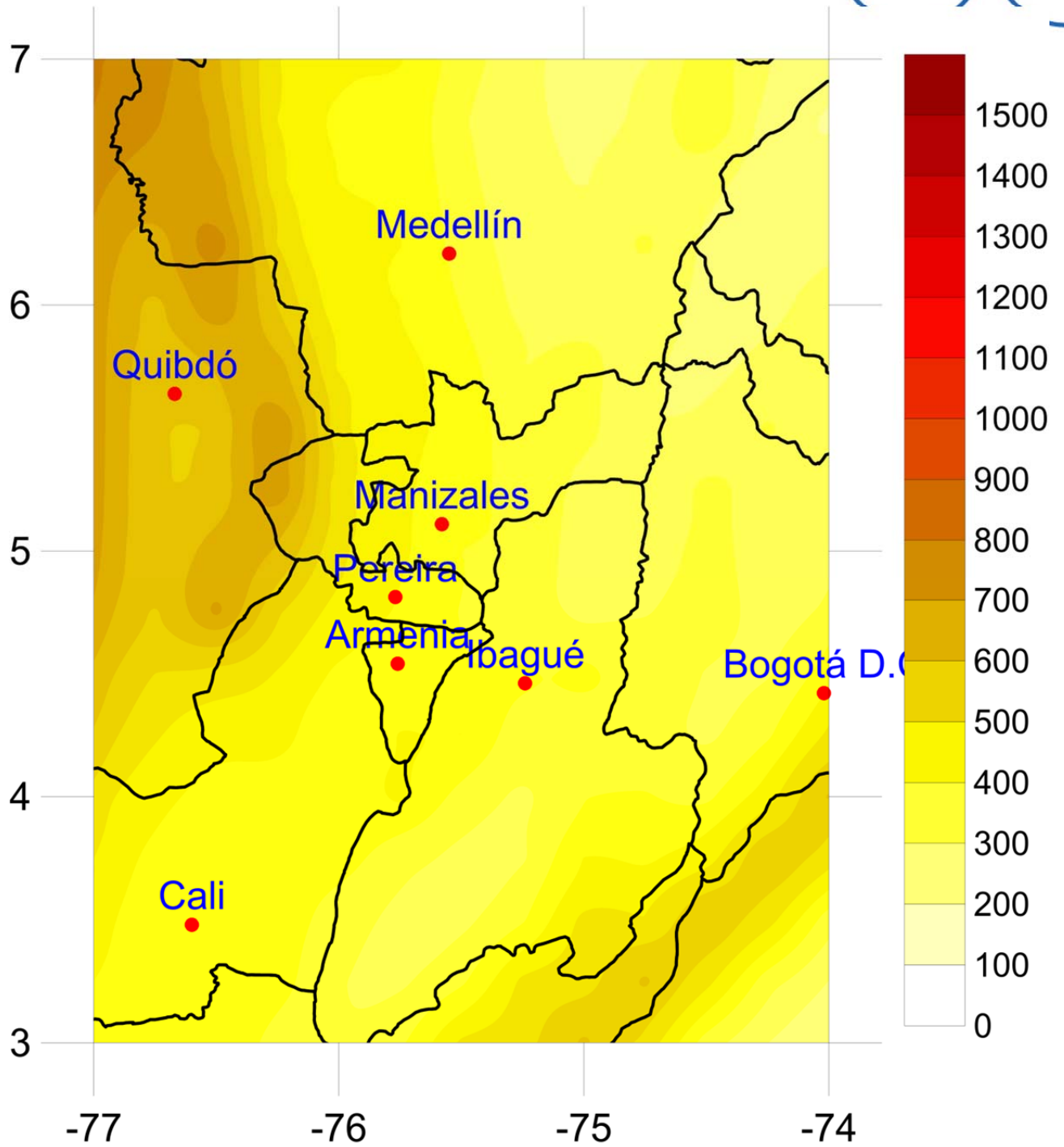


Figura 33  
Mapa de amenaza sísmica. TR: 475 años, Sa: 0.50seg

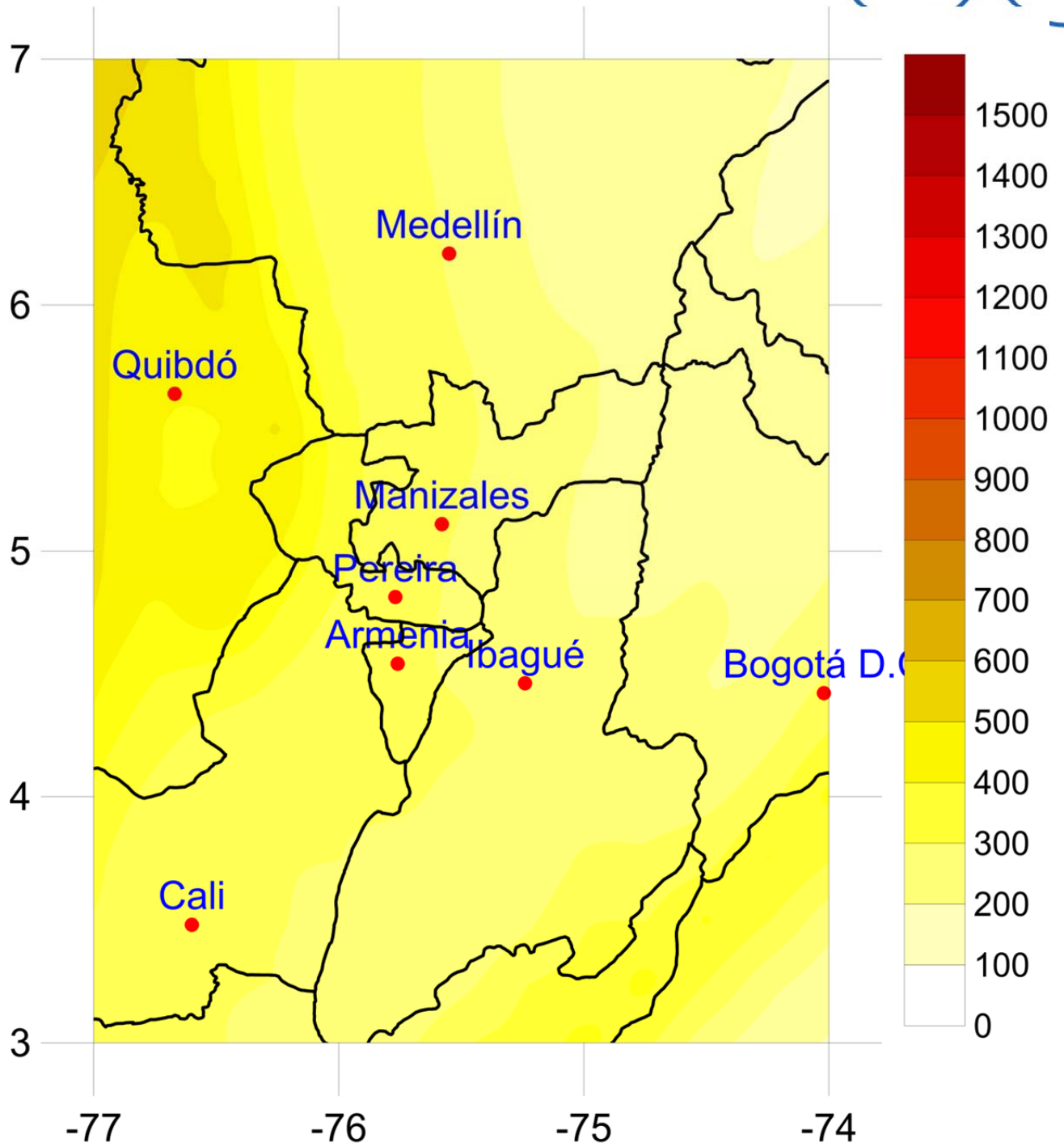
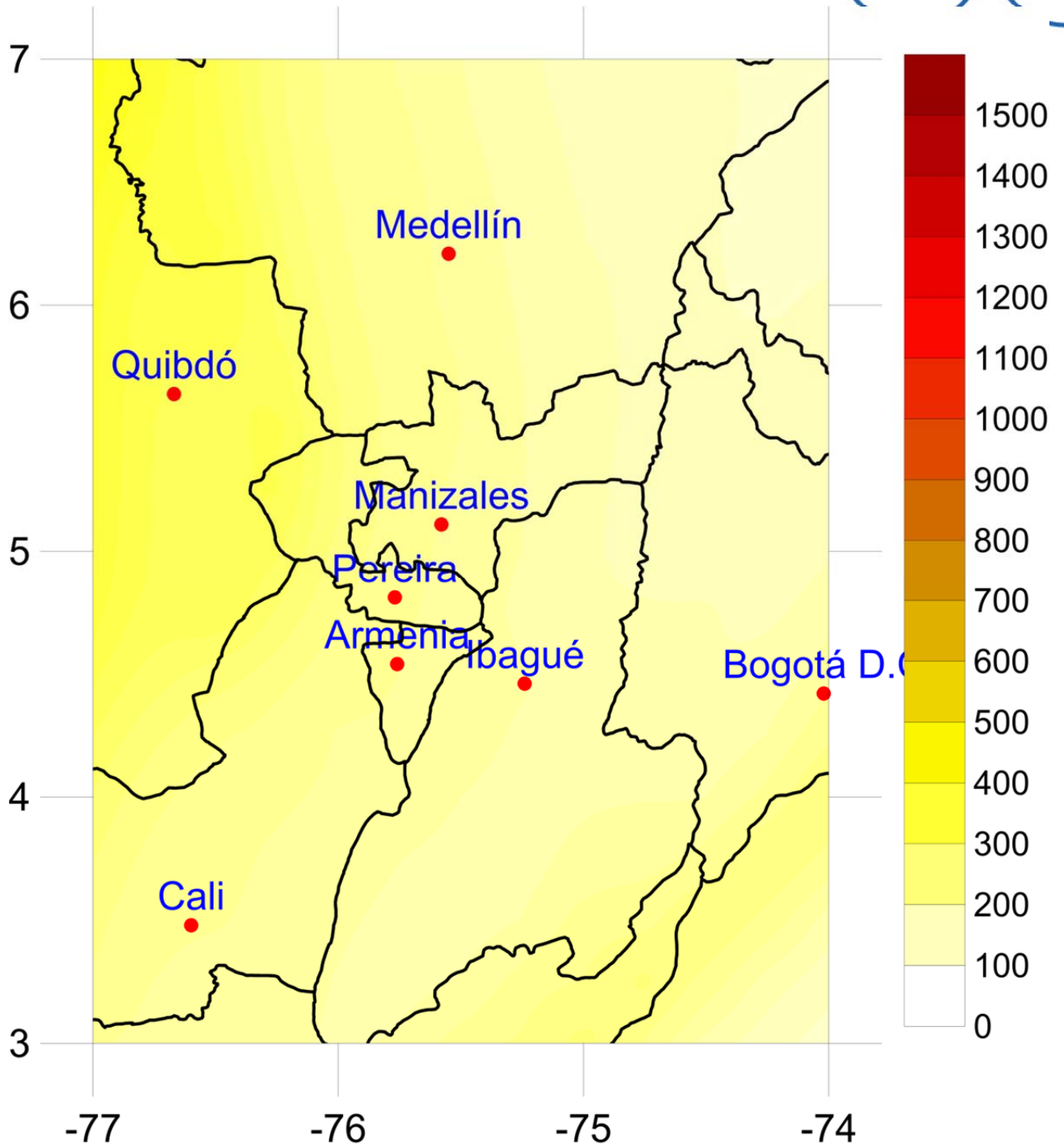


Figura 34  
Mapa de amenaza sísmica. TR: 475 años, Sa: 1.00seg



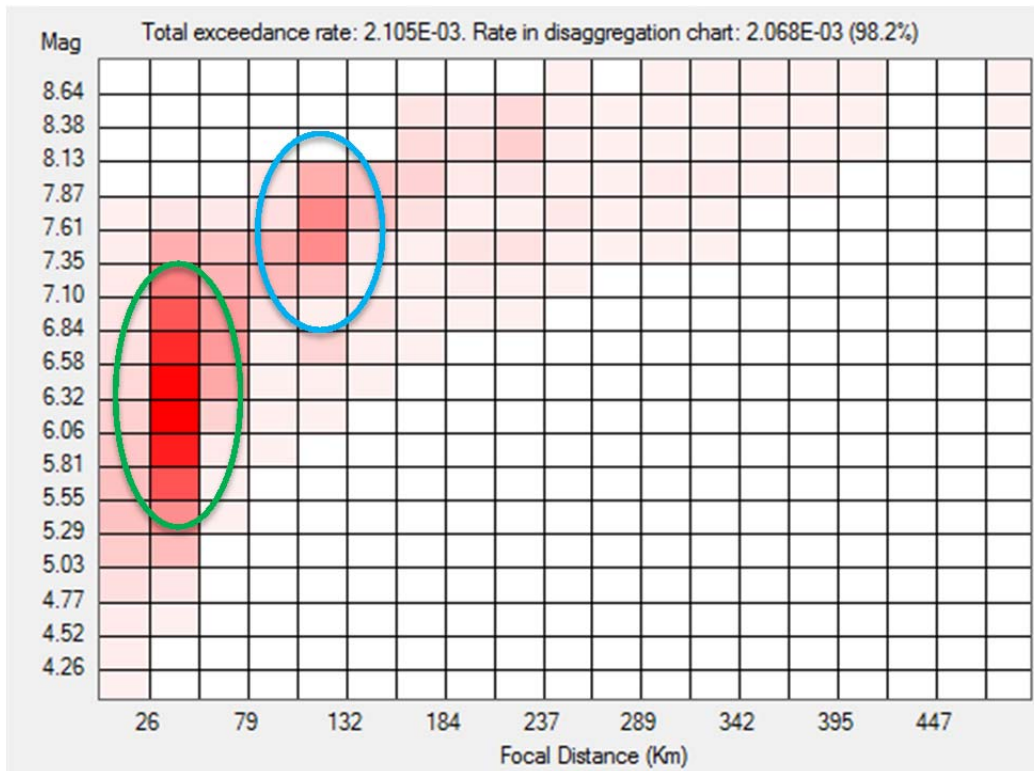
*Figura 35*  
*Mapa de amenaza sísmica. TR: 475 años, Sa: 2.00seg*

### 5.3.5 Desagregación de la amenaza sísmica para Manizales

La Figura 36 presenta la desagregación de la amenaza sísmica para Manizales para la aceleración máxima del terreno y 475 años de período de retorno. La desagregación se

hace en términos de la distancia focal dado que este es el tipo de distancia utilizado por la ley de atenuación de movimiento fuerte empleada en este trabajo.

De la figura es evidente que la amenaza para dicha ordenada espectral y período de retorno se encuentra controlada por eventos de magnitudes entre 6.0 y 6.6 ocurriendo a distancias entre 25 y 50 kilómetros como se denota en el óvalo verde. Sin embargo, el óvalo azul denota la contribución de eventos de magnitudes más altas, entre 7.3 y 7.9 ocurriendo a distancias entre 110 y 130 kilómetros.



*Figura 36*  
*Desagregación de la amenaza sísmica para Manizales*



## 6. PROPUESTA DE ESPECTROS DE DISEÑO EN ROCA PARA MANIZALES

A partir de los resultados hasta ahora obtenidos es posible la determinación de los parámetros  $A_a$ ,  $A_v$ ,  $A_e$  y  $A_d$  para los diferentes niveles establecidos en el Reglamento NSR-10. Los dos primeros corresponden al sismo de diseño el cual tiene una probabilidad de exceder esos niveles del 10% en 50 años. El tercero corresponde al parámetro de seguridad limitada según lo establece el numeral A.10 del Reglamento NSR-10, el cual tiene asociado un período de retorno de 225 años. Finalmente, el cuarto parámetro corresponde al sismo de umbral de daño según lo establecido en el numeral A.12 del Reglamento NSR-10. Este último tiene asociado un período de retorno asociado de 31 años.

### 6.1 Definición de los parámetros del sismo de diseño

El espectro elástico de diseño, en términos de pseudoaceleración, establecido en el Reglamento NSR-10 es el que se presenta en la Figura 37. De la figura se puede observar que el espectro está definido a partir de los coeficientes de amenaza sísmica  $A_a$  y  $A_v$  así como de los parámetros de suelo  $F_a$  y  $F_v$ . Para el alcance del trabajo que acá se realiza, estos dos parámetros se fijan iguales a 1.0.

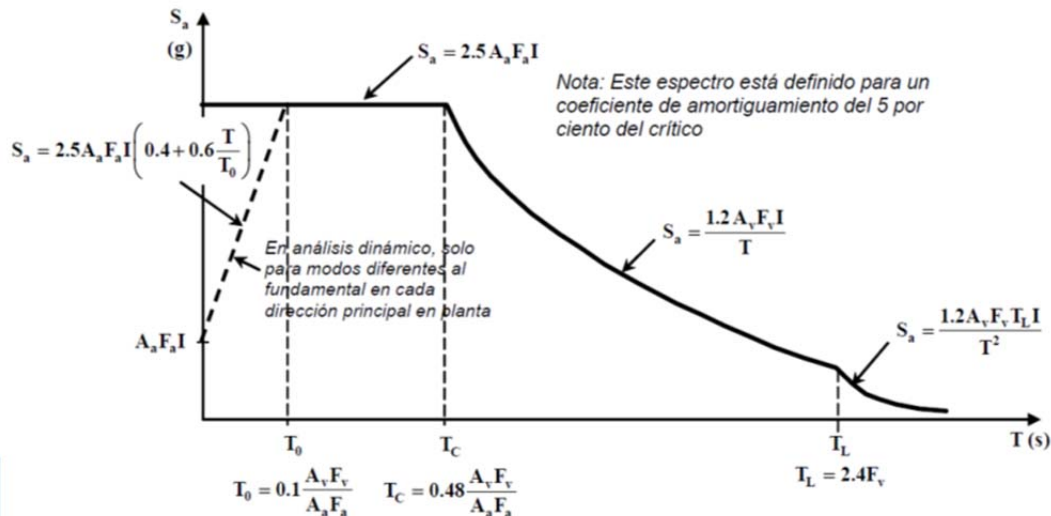


Figura 37

Espectro elástico de diseño (pseudoaceleración) establecido por el Reglamento NSR-10

Adicionalmente, el Reglamento establece los espectros en términos de velocidad, a partir de los mismos parámetros tal y como se presenta en la Figura 38.

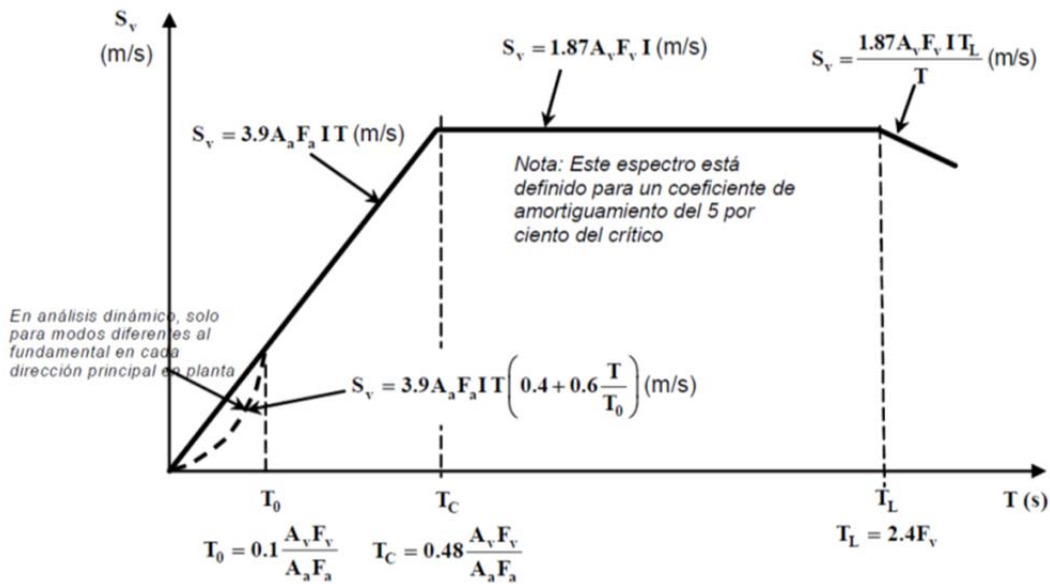


Figura 38

Espectro elástico de diseño (velocidad) establecido por el Reglamento NSR-10

Finalmente, también se establece la forma del espectro en términos de desplazamiento espectral como se presenta en la Figura 39.

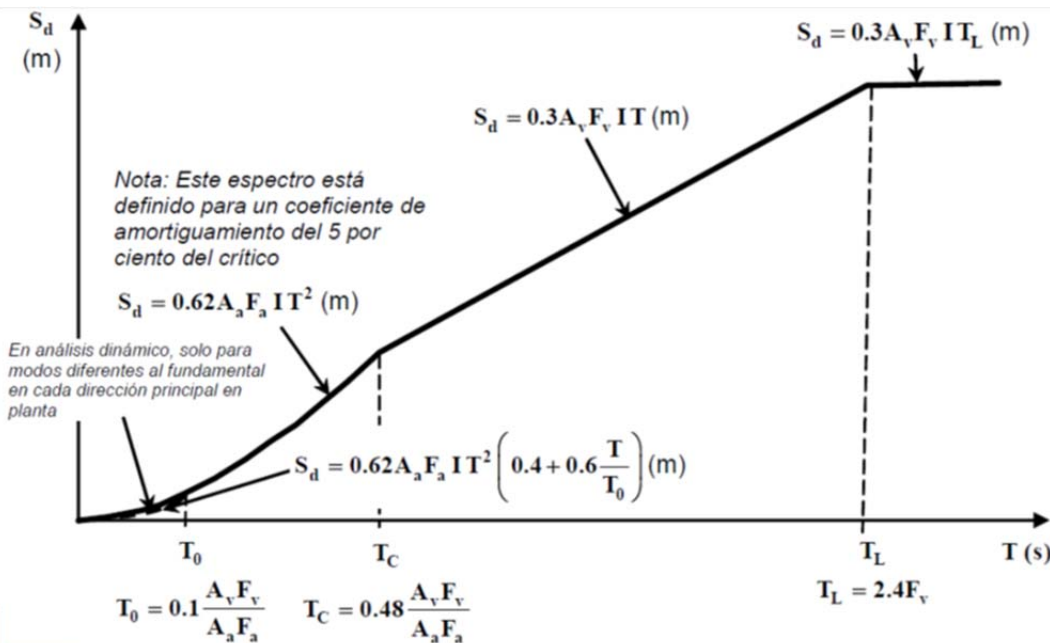


Figura 39

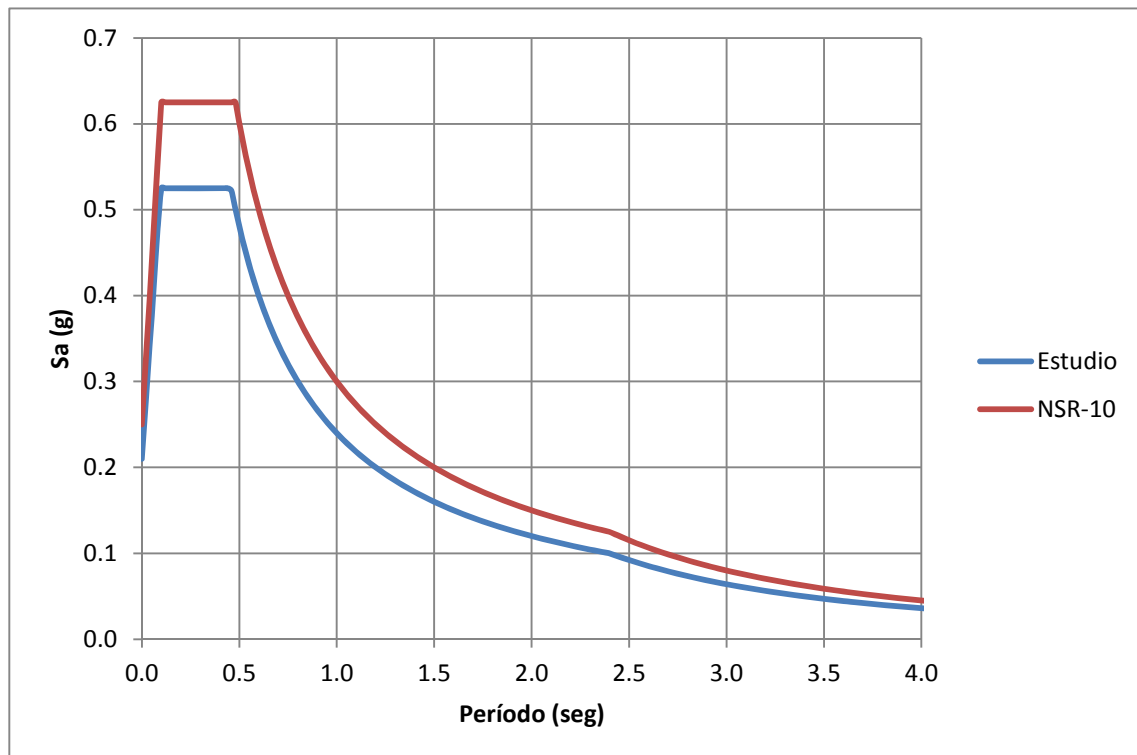
Espectro elástico de diseño (desplazamiento) establecido por el Reglamento NSR-10

Con base en los resultados del presente trabajo se han establecido los valores de los parámetros  $A_a$  y  $A_v$  (sin redondeo) para la ciudad de Manizales tal y como se presentan en la Tabla 5.

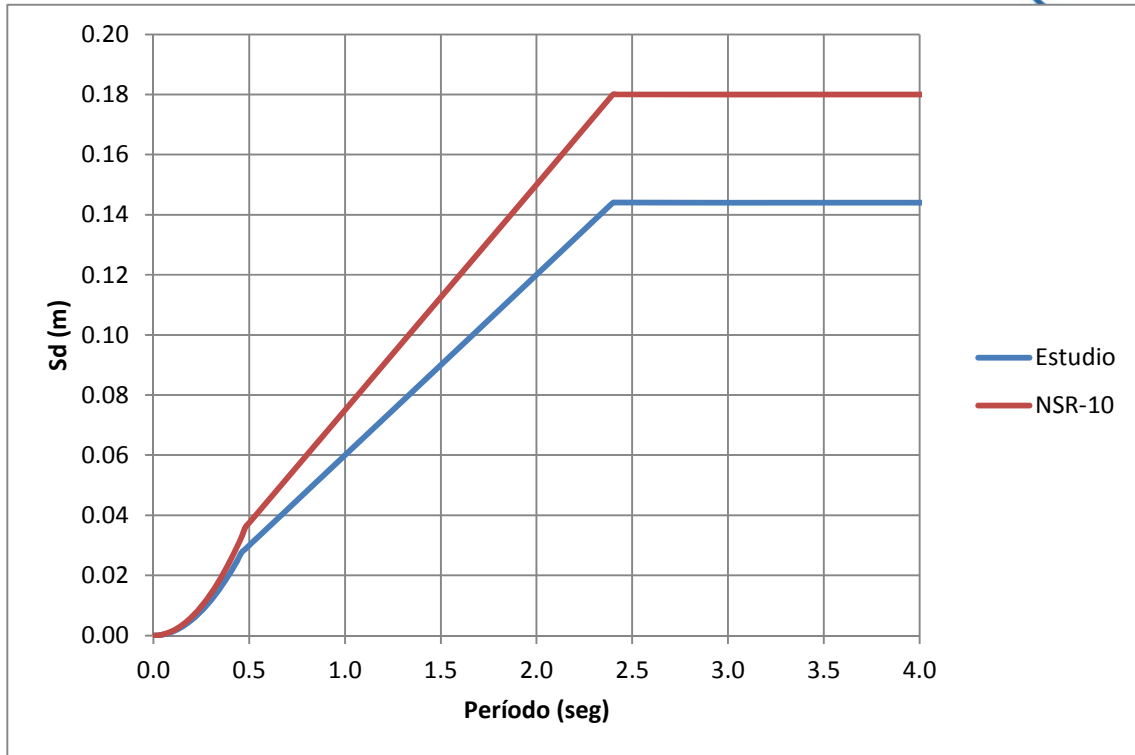
**Tabla 5**  
*Comparación de los valores para los parámetros Aa y Av*

Parámetro	Valor estudio	Valor NSR-10
Aa	0.21	0.25
Av	0.20	0.25

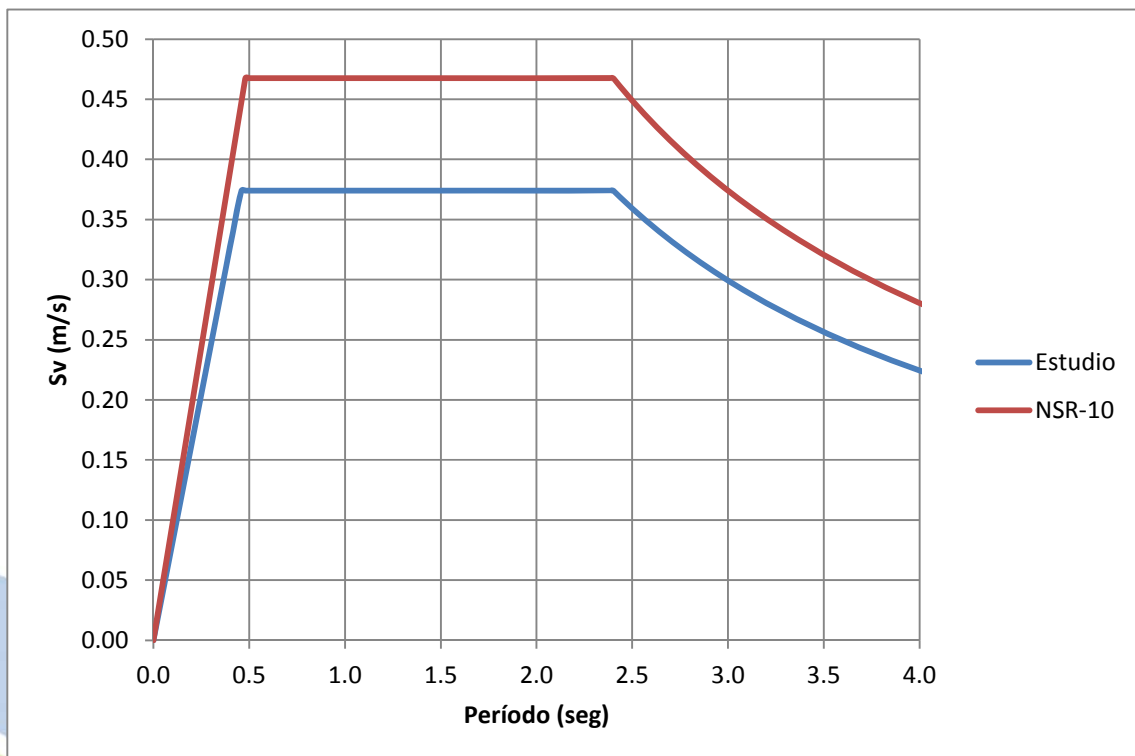
Las Figuras 40 a 42 presentan la comparación de los espectros elásticos de diseño para pseudoaceleración, velocidad y desplazamiento según estos valores y los establecidos por el Reglamento NSR-10.



**Figura 40**  
*Comparación espectros de diseño (Sa)*



**Figura 41**  
*Comparación espectros de diseño (Sv)*



**Figura 42**  
*Comparación espectros de diseño (Sd)*

## 6.2 Definición de los parámetros del sismo de seguridad limitada

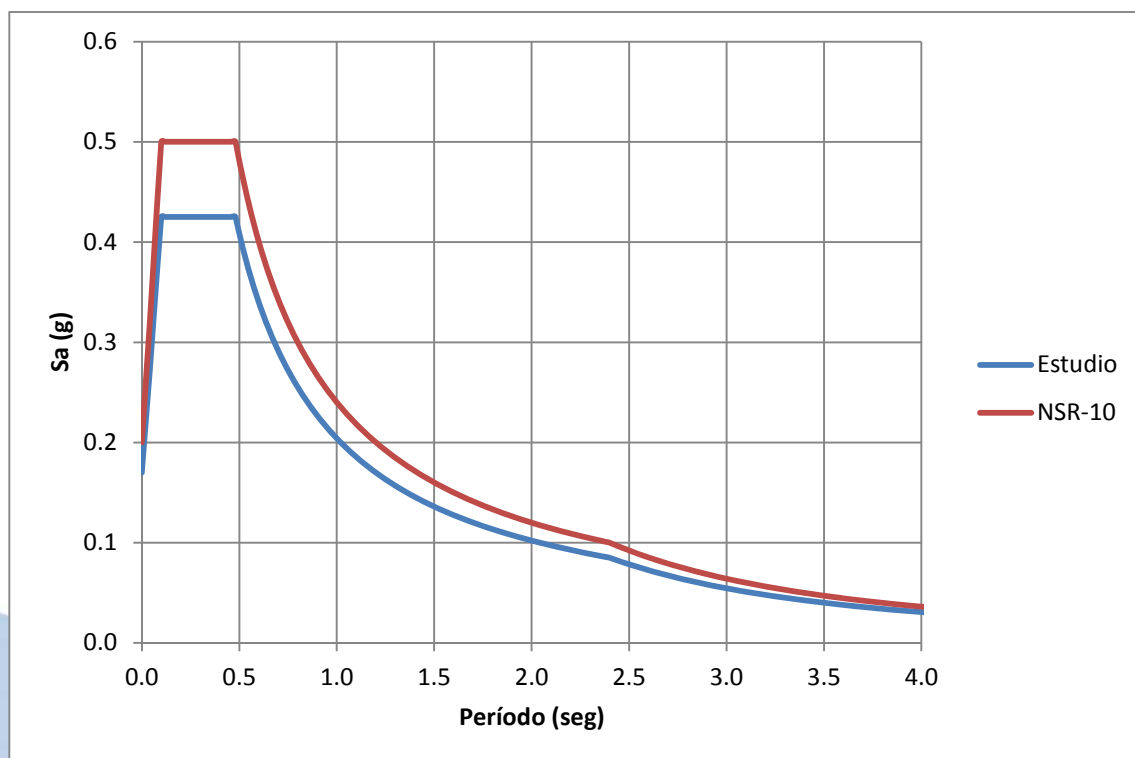
De acuerdo al numeral A.10 del Reglamento NSR-10, para el sismo de seguridad limitada debe utilizarse la misma forma espectral definida para el sismo de diseño pero reemplazando el valor del parámetro  $A_e$  en donde se definen los de  $A_a$  y  $A_v$ . Como se mencionó anteriormente, este parámetro de aceleración está relacionado con la aceleración máxima del terreno con un período de retorno de 225 años.

Con base en los resultados del presente trabajo se han establecido los valores del parámetro  $A_e$  (sin redondeo) para la ciudad de Manizales tal y como se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6**  
*Comparación de los valores para el parámetro  $A_e$*

Parámetro	Valor estudio	Valor NSR-10
$A_e$	0.17	0.20

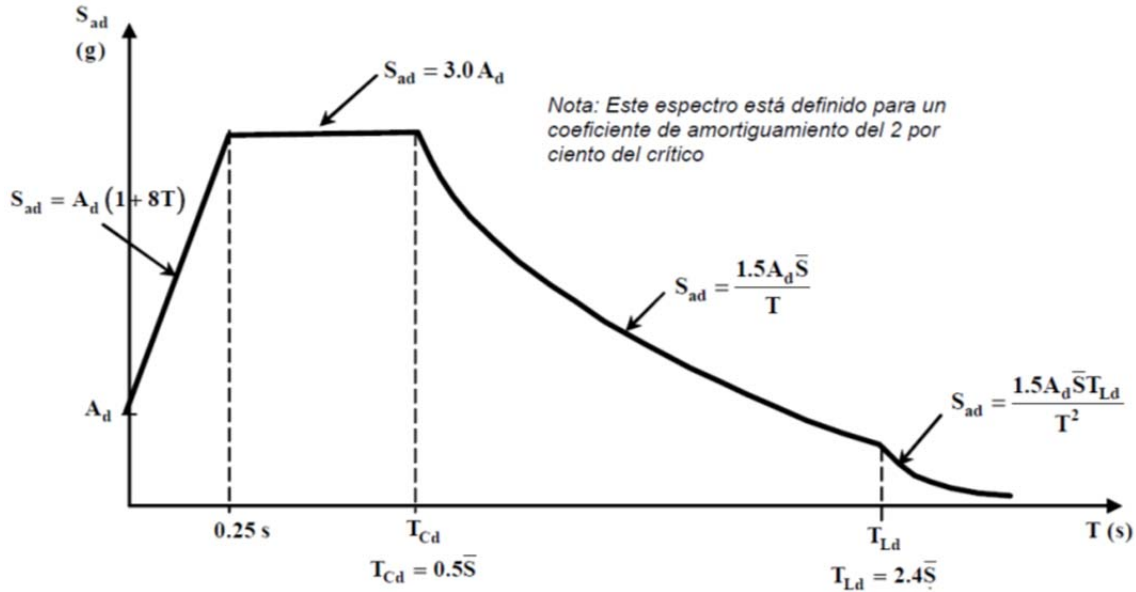
La Figura 43 presenta la comparación de los espectros elásticos de seguridad limitada en términos de la pseudoaceleración según estos valores y los establecidos por el Reglamento NSR-10.



**Figura 43**  
*Comparación espectros de seguridad limitada ( $S_a$ )*

### 6.3 Definición de los parámetros del sismo de umbral de daño

De acuerdo al numeral A.12 para edificaciones indispensables se establecen requisitos para el denominado sismo de umbral de daño, el cual está asociado a intensidades con períodos de retorno de 31 años. La Figura 44 presenta la forma del espectro.



**Figura 44**  
*Espectro de umbral de daño establecido por el Reglamento NSR-10*

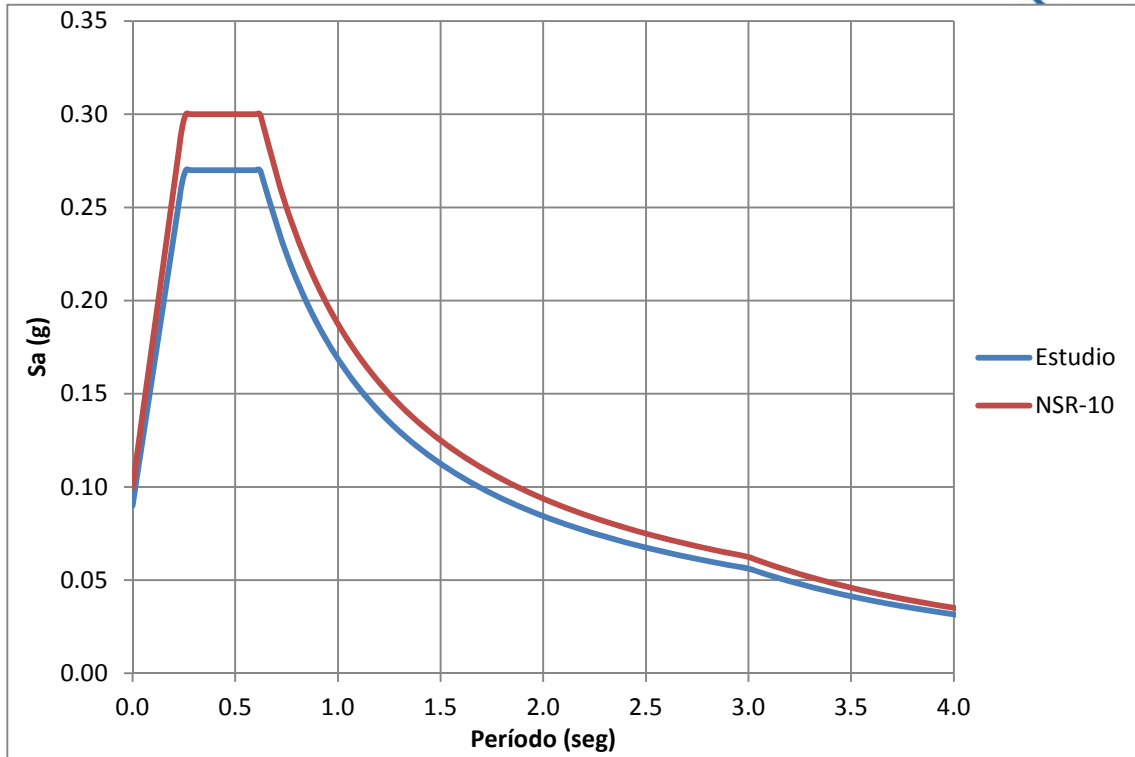
De la figura es posible observar que el coeficiente sísmico está asociado al parámetro  $A_d$ , el cual corresponde a la aceleración máxima del terreno asociada a 31 años de período de retorno.

Con base en los resultados del presente trabajo se han establecido los valores del parámetro  $A_d$  (sin redondeo) para la ciudad de Manizales tal y como se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7**  
*Comparación de los valores para el parámetro  $A_d$*

Parámetro	Valor estudio	Valor NSR-10
$A_d$	0.09	0.10

La Figura 45 presenta la comparación de los espectros elásticos de umbral de daño para pseudoaceleración según estos valores y los establecidos por el Reglamento NSR-10.



*Figura 45*  
*Comparación espectros de umbral de daño (Sa)*



## REFERENCIAS

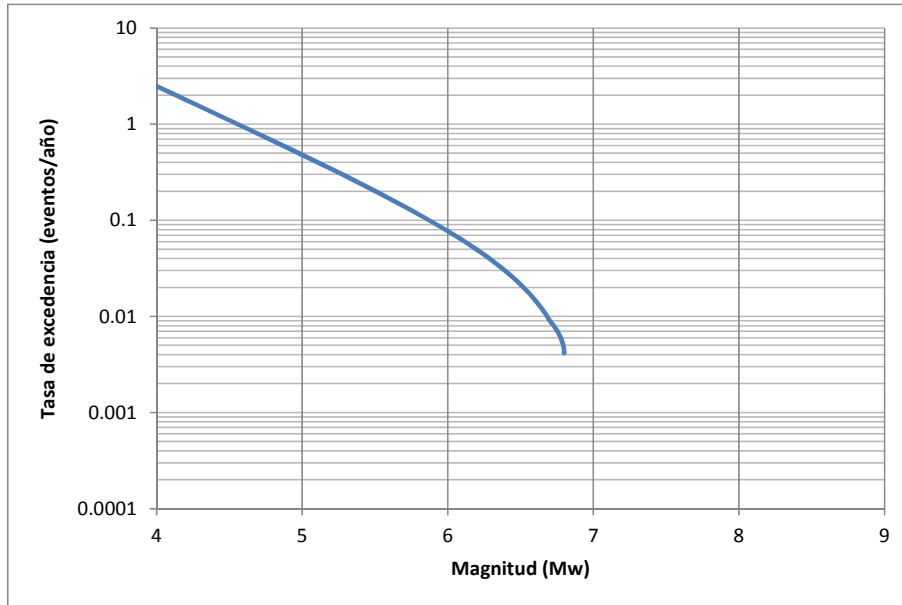
---

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica-AIS, (1984). Estudio General del Riesgo Sísmico de Colombia.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica-AIS, (1996). Estudio General de la Amenaza Sísmica de Colombia. Comité AIS-300.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica-AIS, (2010). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Comité AIS-300.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica-AIS, (2012). Recomendaciones para requisitos sísmicos de estructuras diferentes de edificaciones. Comité AIS-180. Bogotá, Colombia.
- Bernal G. (2013). Strong Motion Analyst.
- Bernal G., Ordaz M., Salgado M., Yamín L., Cardona O. (2012). Calibration of a source spectrum model and construction of spectral strong motion attenuation relationships from accelerogram records. Proceedings of the 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Lisboa, Portugal.
- Cornell, C. A., and E. H. Van Marke (1969). The major influences on seismic risk, in Proc. Third World Conf. on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, A-1, 69–93.
- Gutenberg R., Richter C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, 34, 185-188.
- INGEOMINAS (2008). Deformaciones cuaternarias de Colombia, mapa indicativo de fallas y pliegues cuaternarios activos. Subdirecciones de Geología Básica y Amenazas Geológicas, Bogotá.
- Kellogg J., Vega V. (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity. Geol. Soc. Amer. Special Paper 295, 75-90.
- McGuire, R.K. (2004). Seismic Hazard and Risk Analysis, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland CA, EEUU, EERI, 221pp.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10.
- National Earthquake Information Center-NEIC, (2013). Earthquake catalogue search. United States Geological Survey.
- Ordaz M. (2000) Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros por terremoto. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

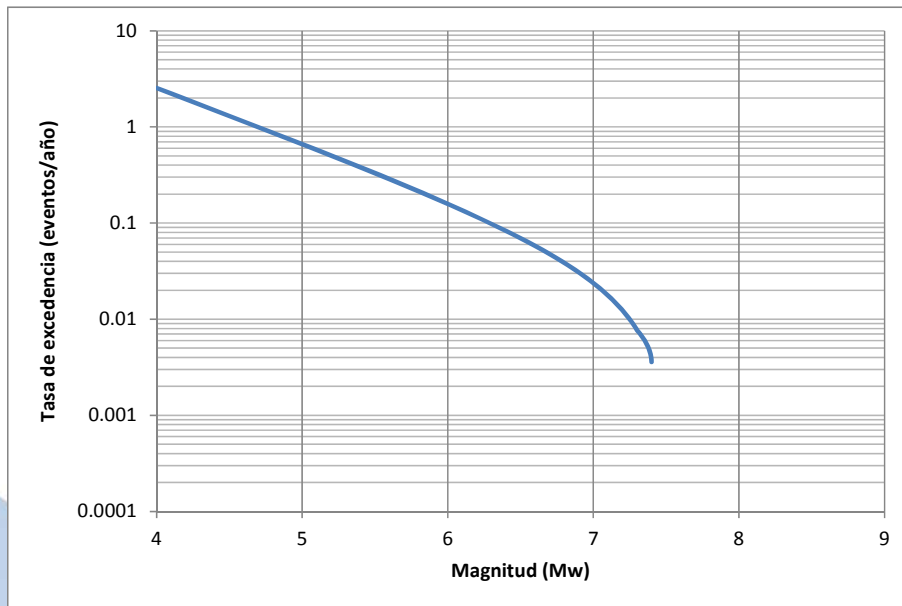


- Ordaz M., Martinelli F., Aguilar A., Arboleda J., Meletti C., D'Amico V. (2013) CRISIS 2014, Program for computing seismic hazard. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Paris G., Machete M, Dart R., Haller K. (2000). Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and Offshore Regions, USGS Open-File Report.
- Proyecto Multinacional Andino, (2009) Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes, Publicación Geológica Multinacional No.7, Canada.
- Pulido N. (2003). Seismotectonics of the Northern Andes (Colombia) and the Development of Seismic Networks. Bull. of the int. inst. of seismol. and earthq. eng. Special Edition:69-76.
- Ramírez J. (2004). Actualización de la historia de los terremotos en Colombia. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Salgado M., Bernal G., Yamín L., Cardona O. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. Rev. de Ing. 32: 28-37. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.
- Sarria, A., (1995) Ingeniería Sísmica, 2ª Edición, Ediciones Uniandes, Bogotá.
- Sarria, A., (2008) Terremotos e infraestructura, 2ª Edición, Ediciones Uniandes, Bogotá.
- Shedlock K.M., Tanner J.G. (1999). Seismic hazard map of the western hemisphere. Ann. di geofis. 42(6): 1199-1214.
- Shedlock K.M., Tanner J.G. (1999). Seismic hazard map of the western hemisphere. Ann. di geofis. 42(6): 1199-1214.
- Storchak, D.A., D. Di Giacomo, I. Bondár, E. R. Engdahl, J. Harris, W.H.K. Lee, A. Villaseñor and P. Bormann. Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900- 2009).
- Taboada A., Rivera A., Fuenzalida A., Cisternas A., Philip H., Bijwaard H., Olaya J., Rivera C. (2000). Geodynamics of the northern Andes. Subductions and intracontinental deformation (Colombia). Tecton. 19(5): 787-813.
- Tinti S., Mulargia F. (1985). Completeness analysis of a seismic catalogue. Annales Geophysicae. 3:407-414.
- Universidad de Los Andes (2002). Microzonificación sísmica de la Ciudad de Manizales. Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles – Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos. Bogotá, Colombia.

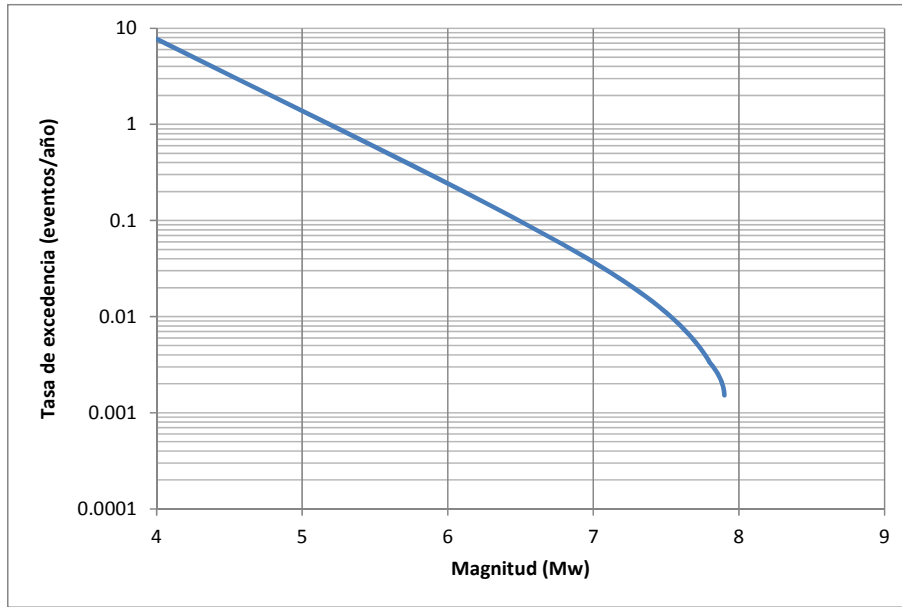
## ANEXO 1: CURVAS DE RECURRENCIA DE MAGNITUDES PARA LAS FUENTES SISMOGENÉTICAS CONSIDERADAS



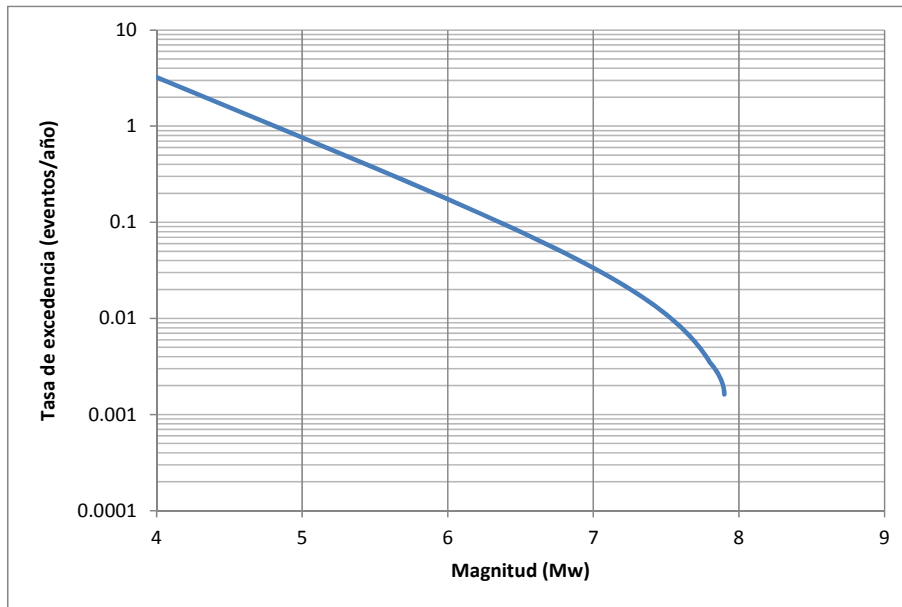
**Figura 46**  
*Curva de recurrencia para la fuente Arco de Dabeiba*



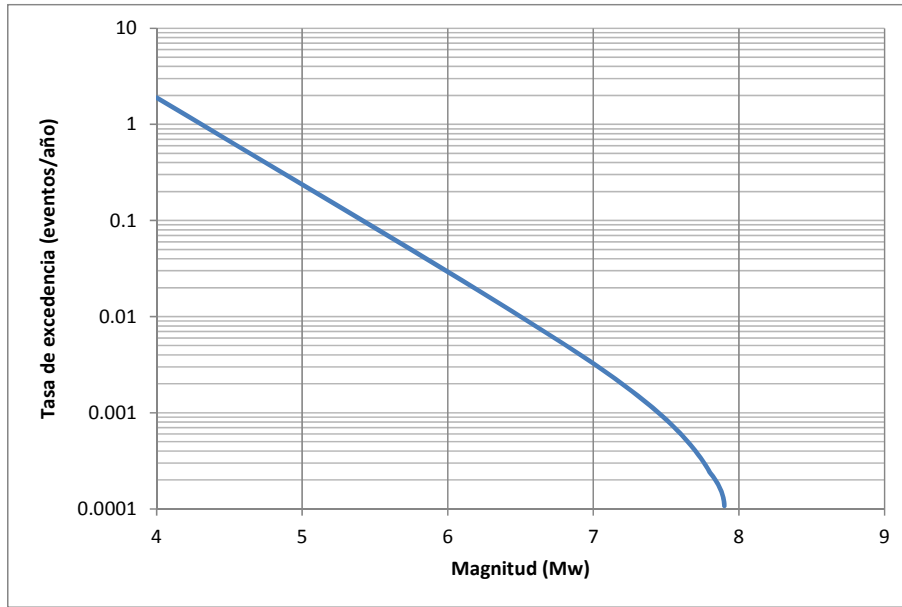
**Figura 47**  
*Curva de recurrencia para la fuente Bahía Solano*



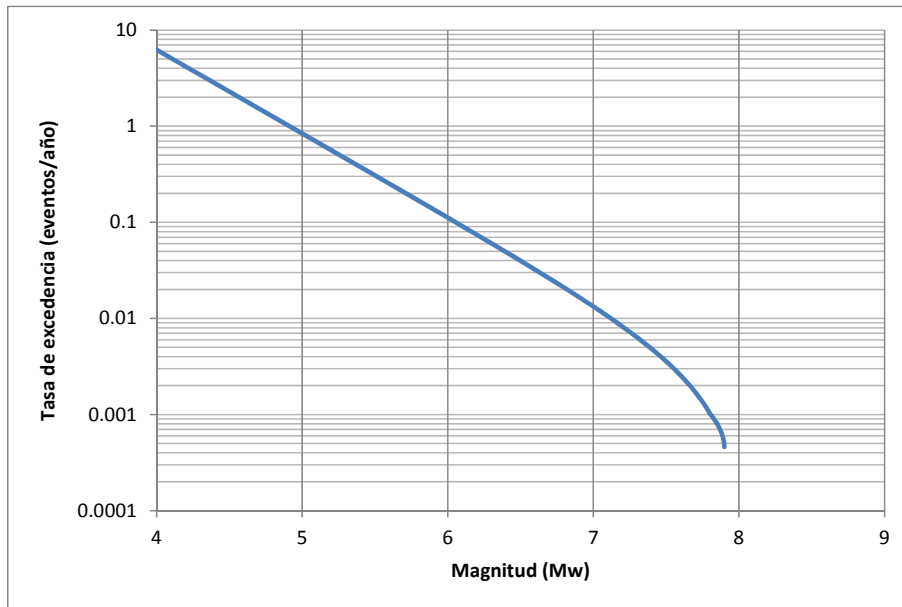
**Figura 48**  
*Curva de recurrencia para la fuente Benioff Intermedia Sur*



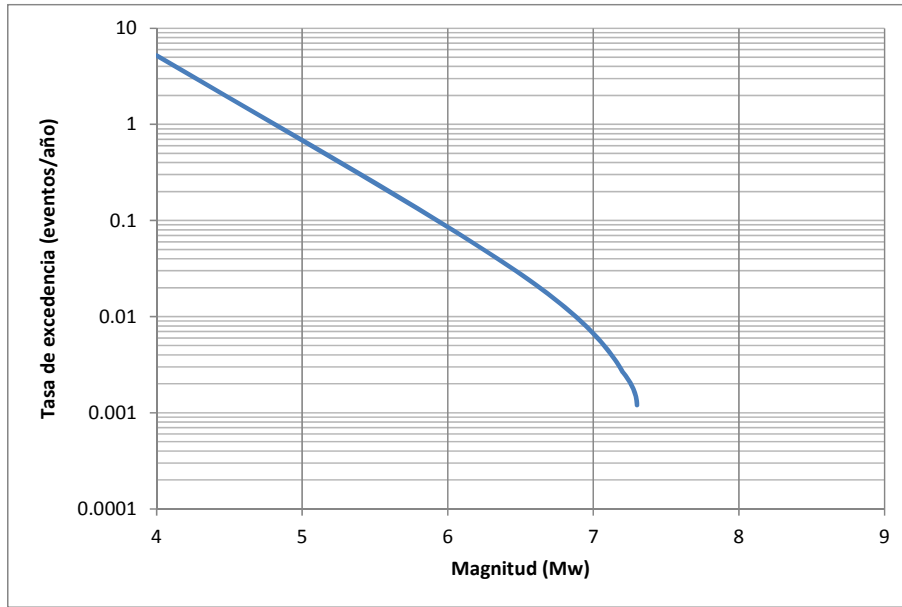
**Figura 49**  
*Curva de recurrencia para la fuente Benioff Intermedia Centro*



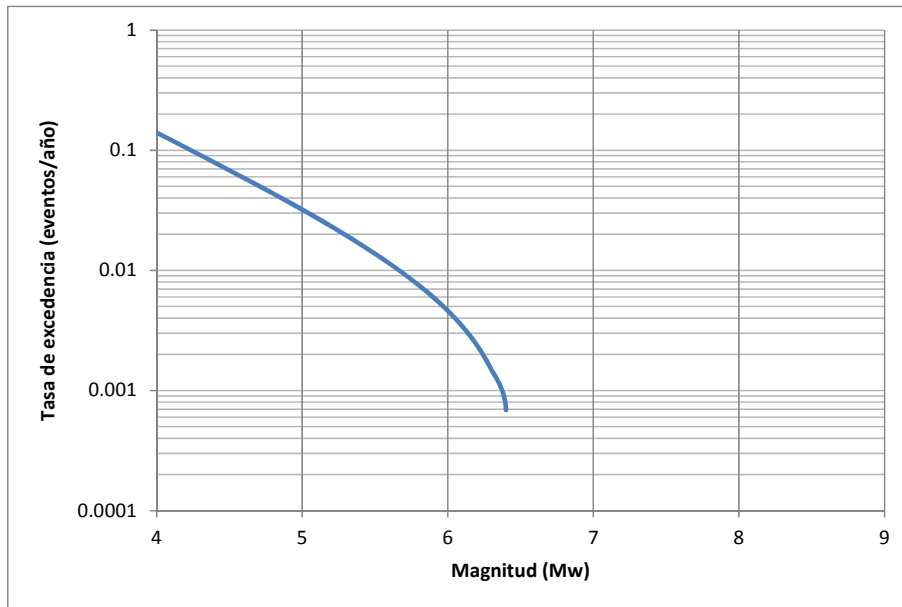
**Figura 50**  
*Curva de recurrencia para la fuente Benioff Intermedia Norte*



**Figura 51**  
*Curva de recurrencia para la fuente Benioff Profunda*

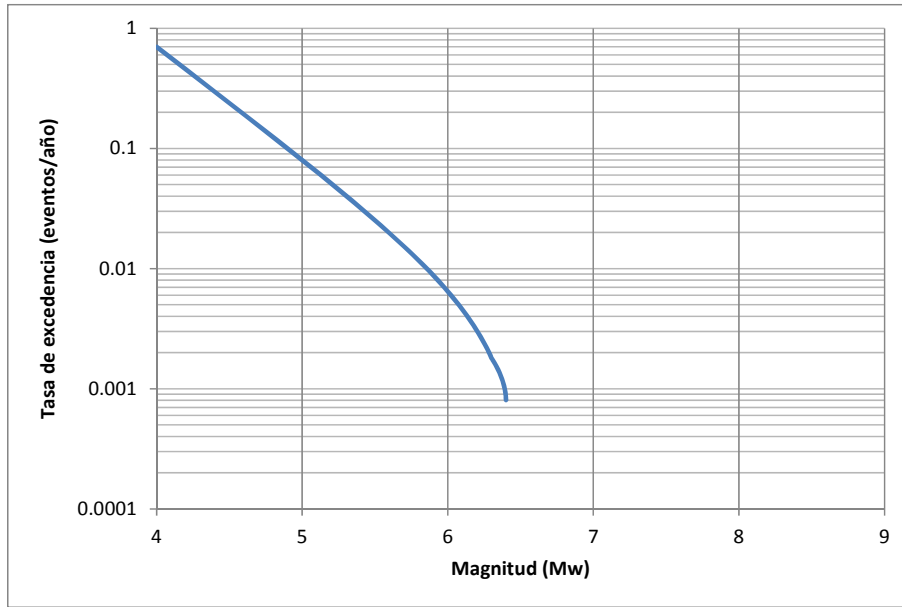


**Figura 52**  
*Curva de recurrencia para la fuente Boconó*



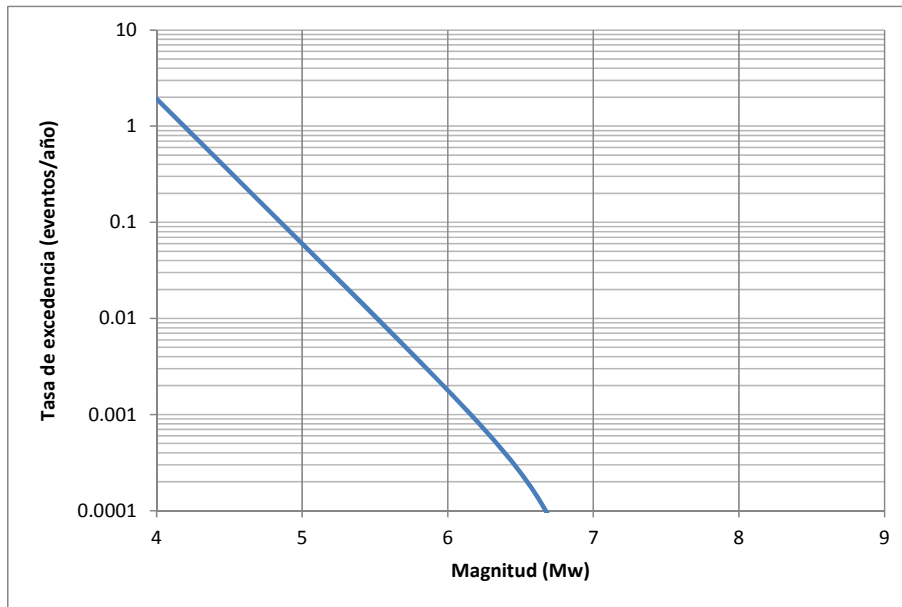
**Figura 53**  
*Curva de recurrencia para la fuente Bucaramanga-Santa Marta Norte*





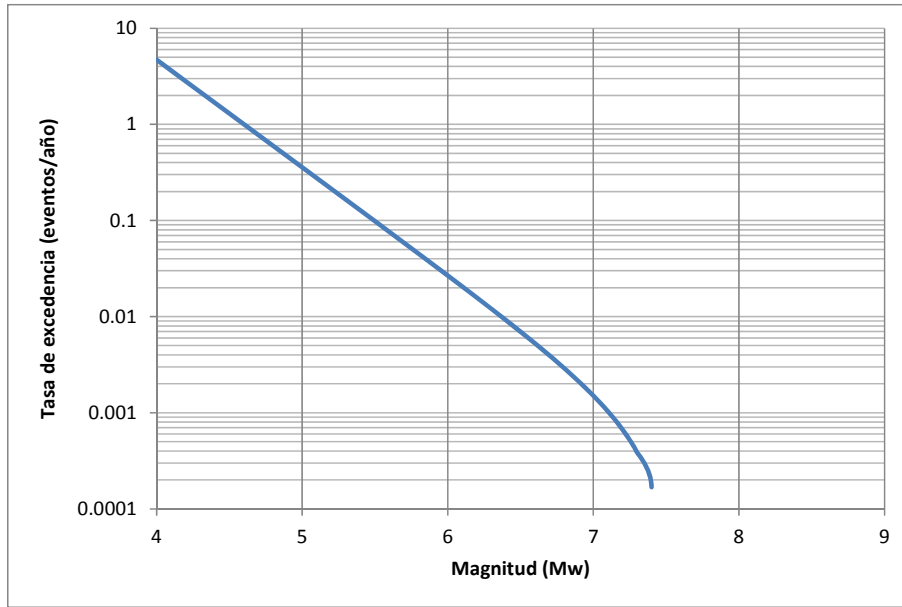
**Figura 54**

*Curva de recurrencia para la fuente Bucaramanga-Santa Marta Centro*

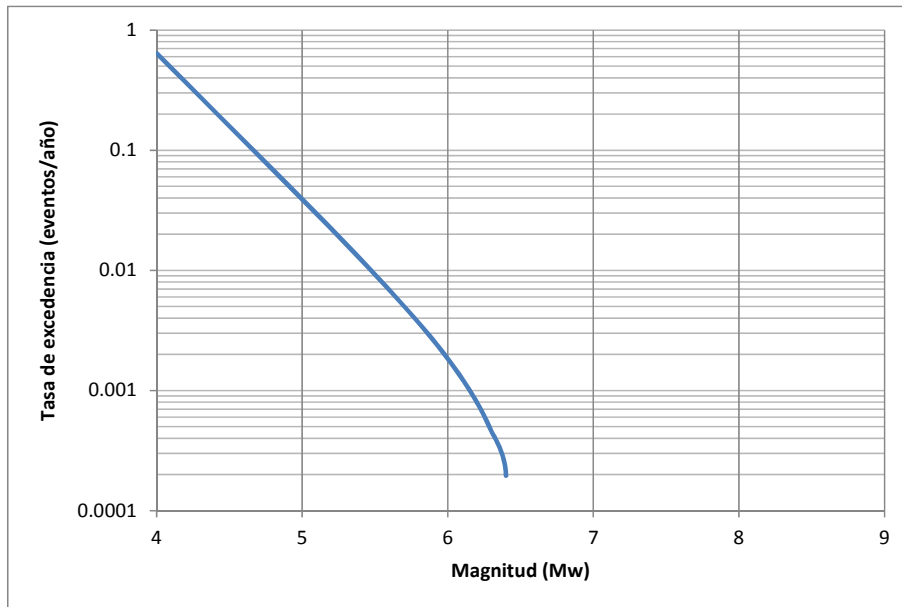


**Figura 55**

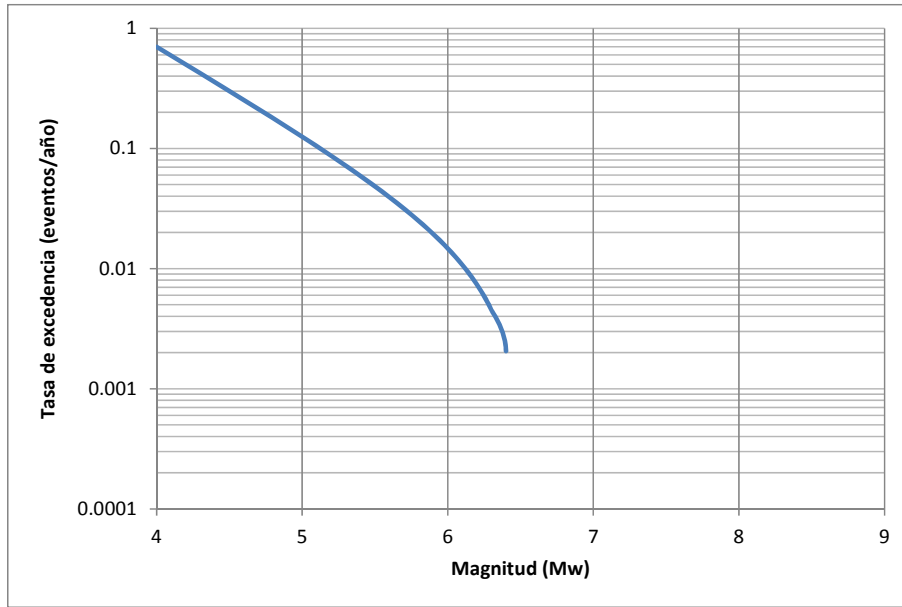
*Curva de recurrencia para la fuente Bucaramanga-Santa Marta Sur*



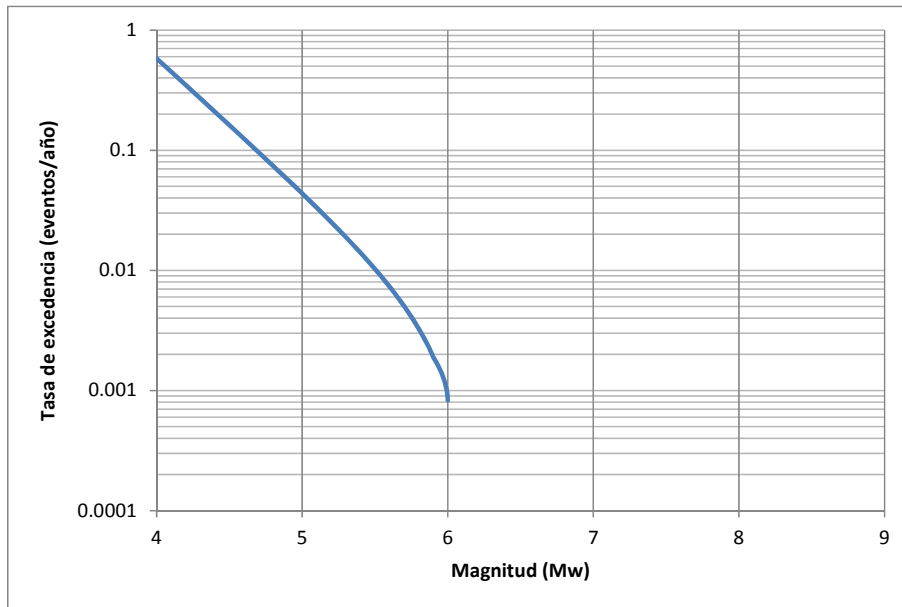
**Figura 56**  
*Curva de recurrencia para la fuente Cauca*



**Figura 57**  
*Curva de recurrencia para la fuente Cimitarra*

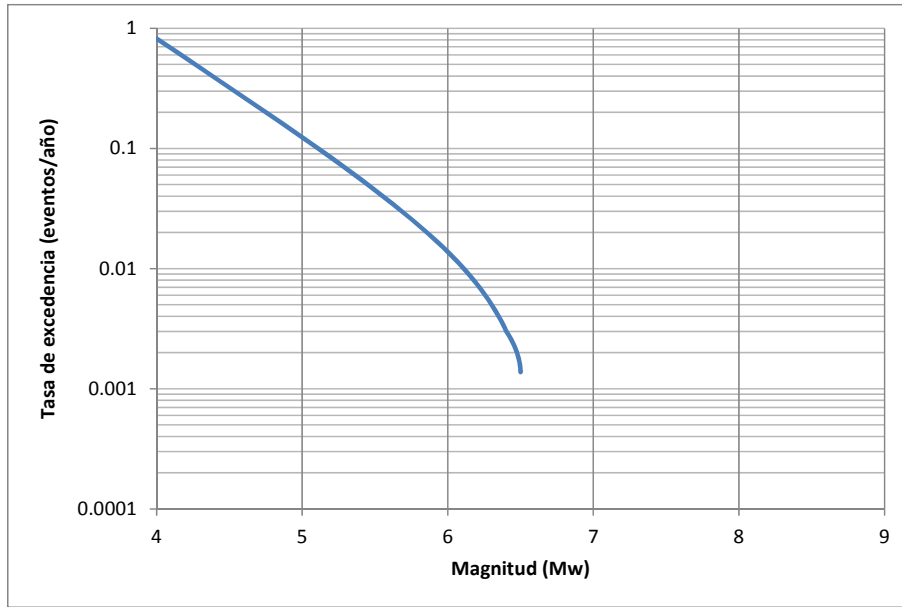


**Figura 58**  
*Curva de recurrencia para la fuente Compresión Caribe S-E*

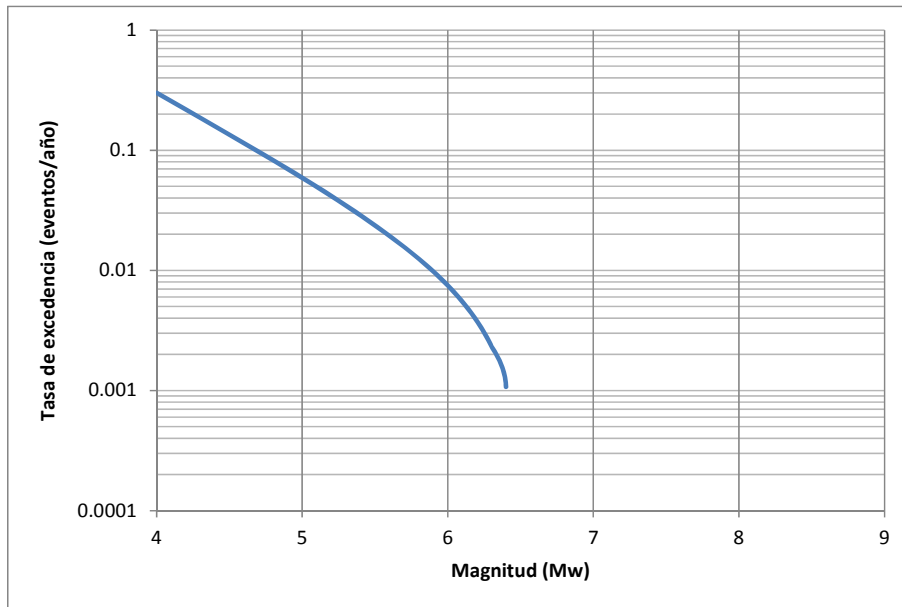


**Figura 59**  
*Curva de recurrencia para la fuente Compresión Caribe S-W*

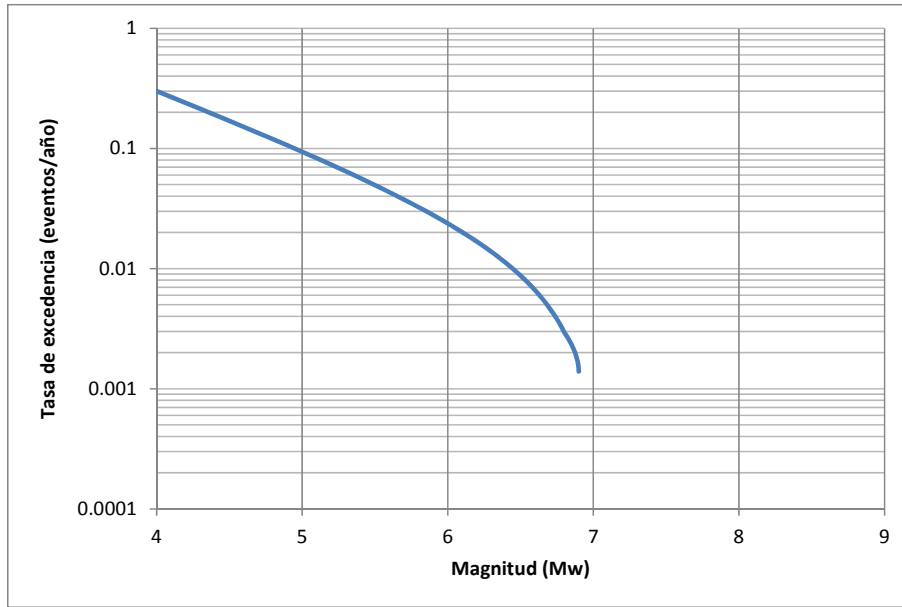




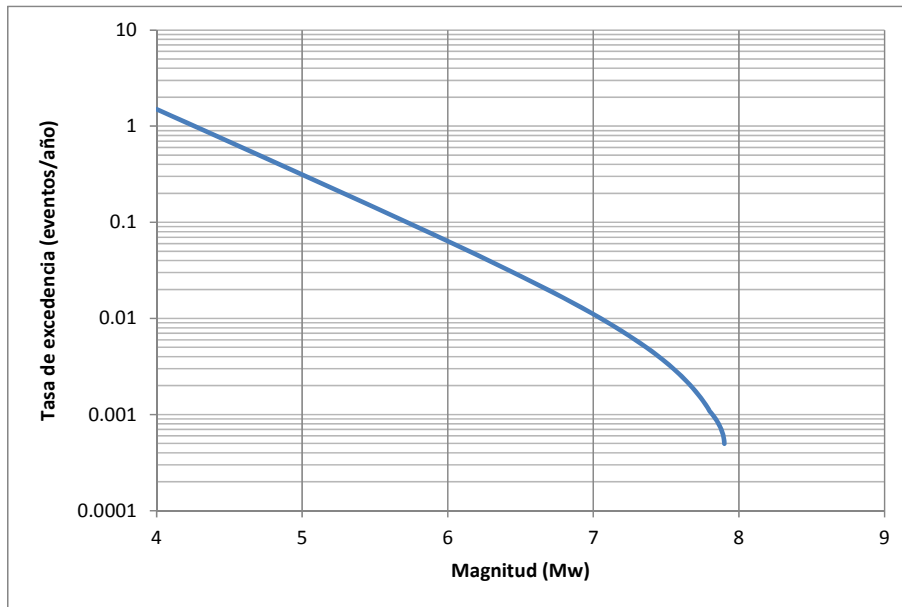
**Figura 60**  
*Curva de recurrencia para la fuente Cuiza*



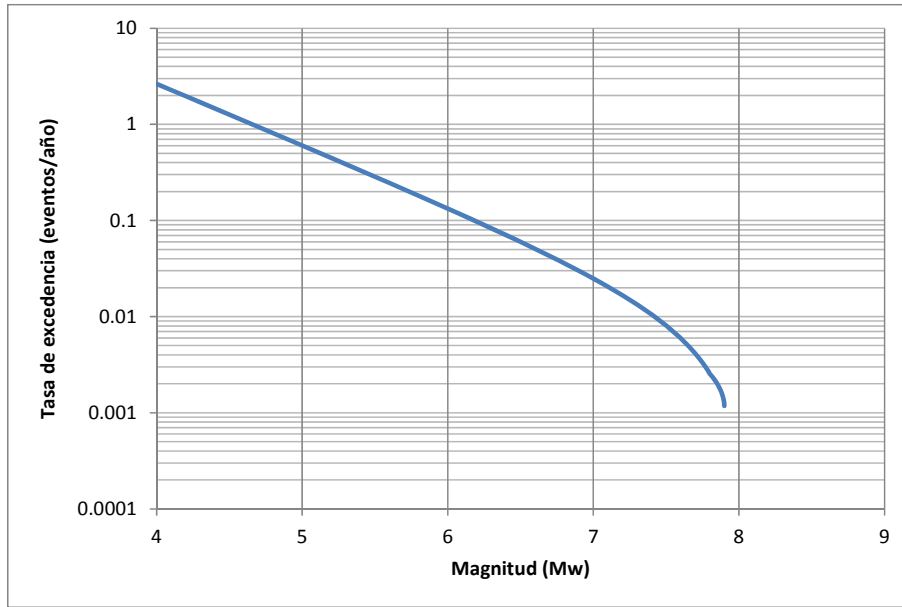
**Figura 61**  
*Curva de recurrencia para la fuente Espíritu Santo*



**Figura 62**  
*Curva de recurrencia para la fuente Fallas del Magdalena*

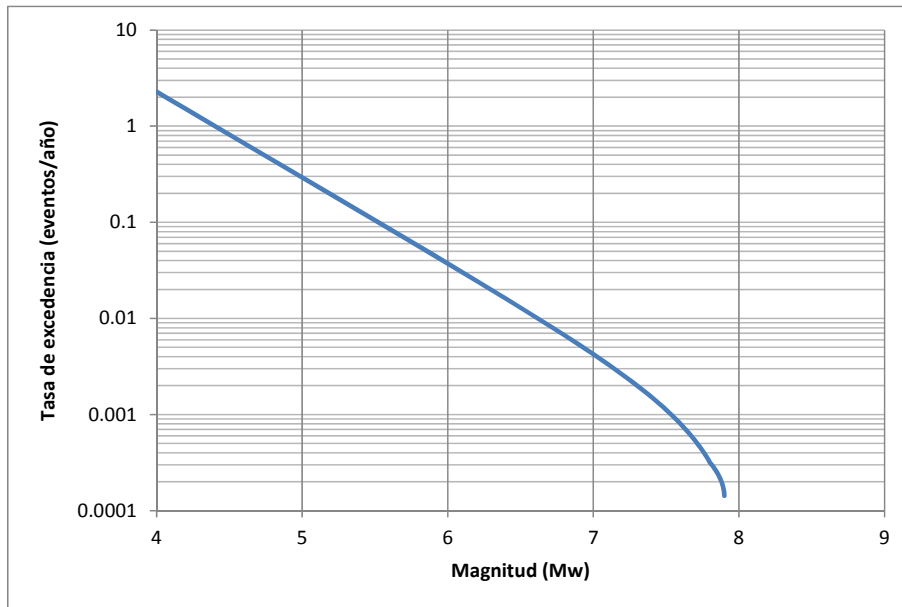


**Figura 63**  
*Curva de recurrencia para la fuente Frontal Cordillera Oriental Norte*



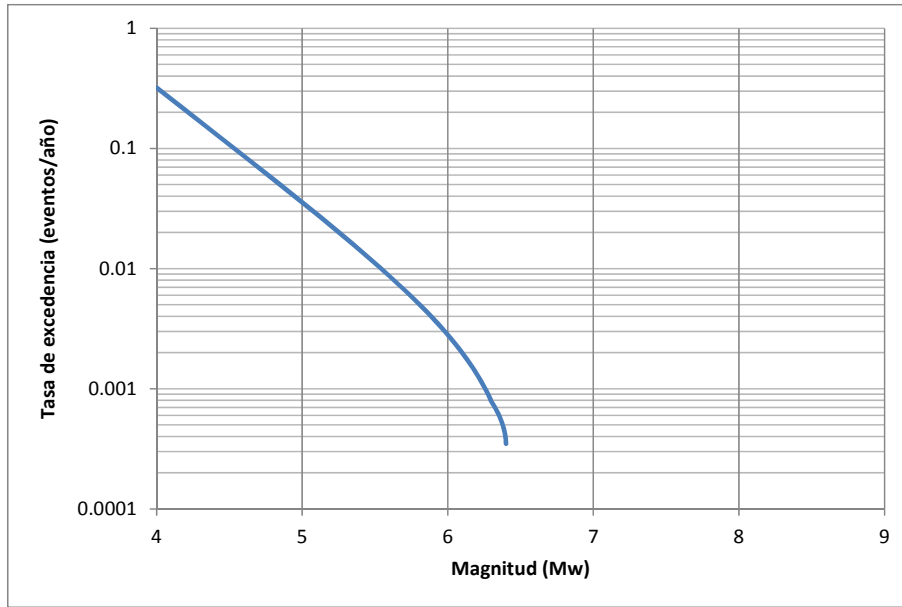
**Figura 64**

*Curva de recurrencia para la fuente Frontal Cordillera Oriental Centro*

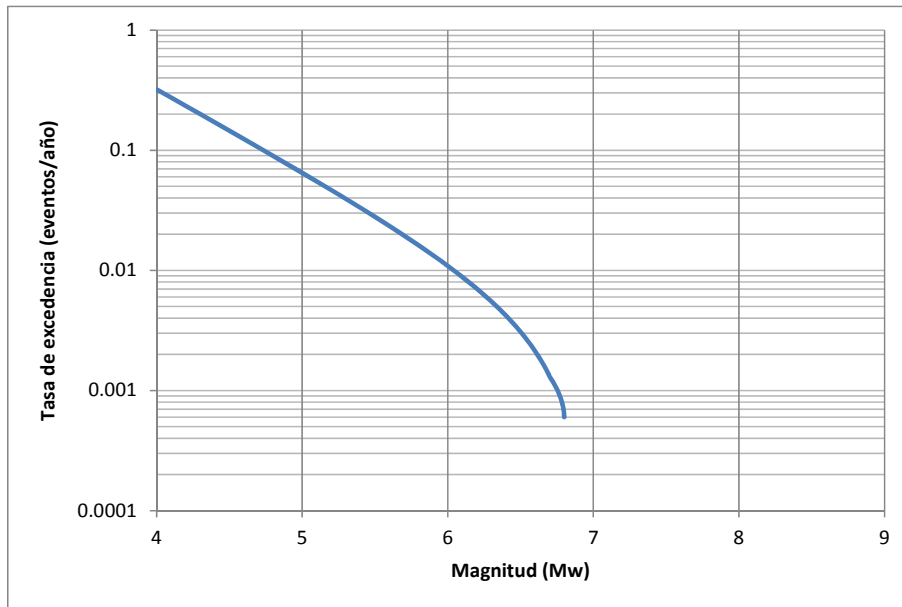


**Figura 65**

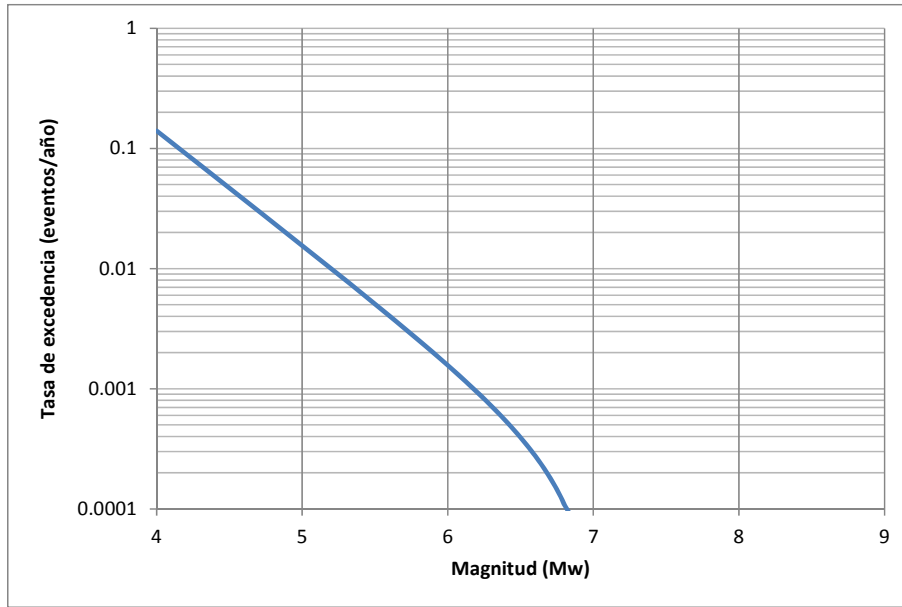
*Curva de recurrencia para la fuente Frontal Cordillera Oriental Sur*



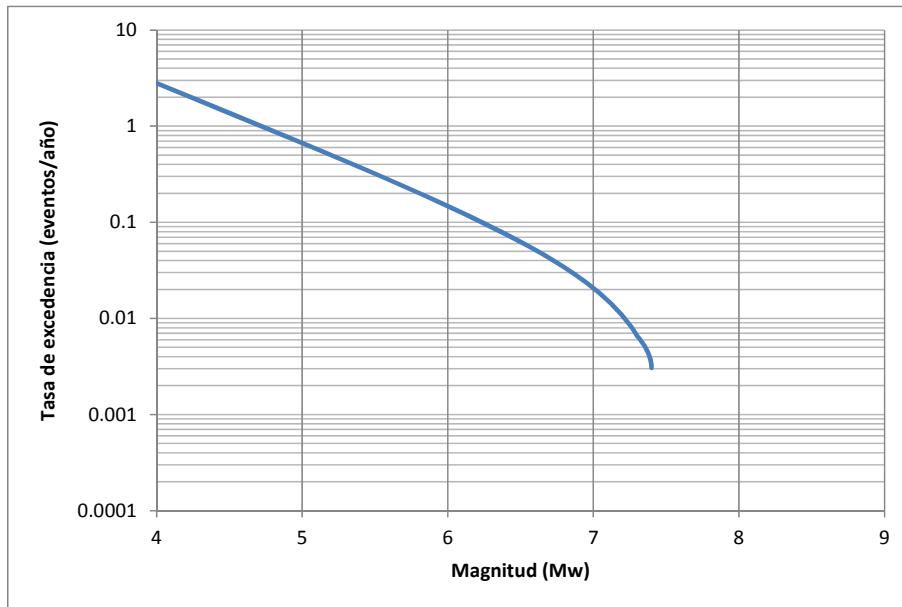
**Figura 66**  
*Curva de recurrencia para la fuente Garrapatas*



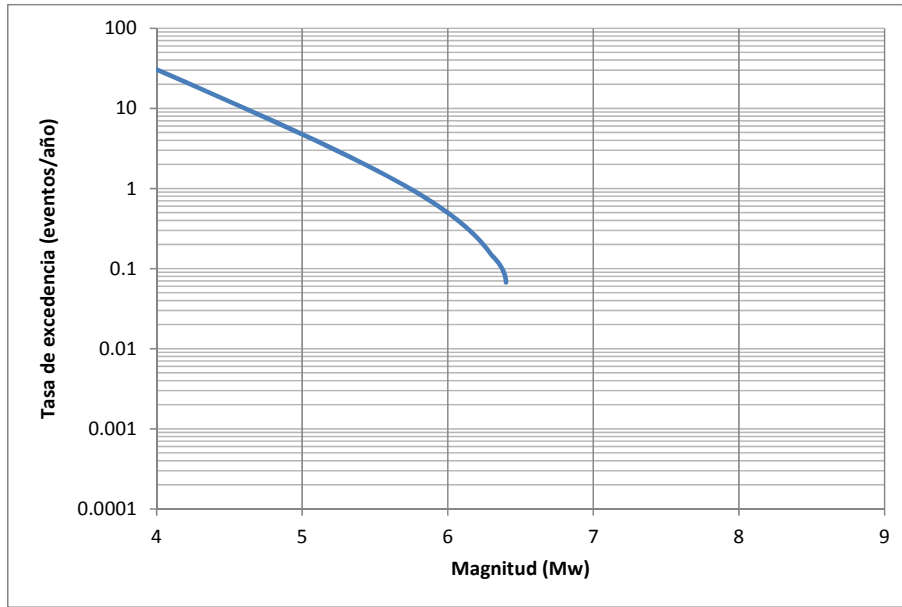
**Figura 67**  
*Curva de recurrencia para la fuente Ibagué*



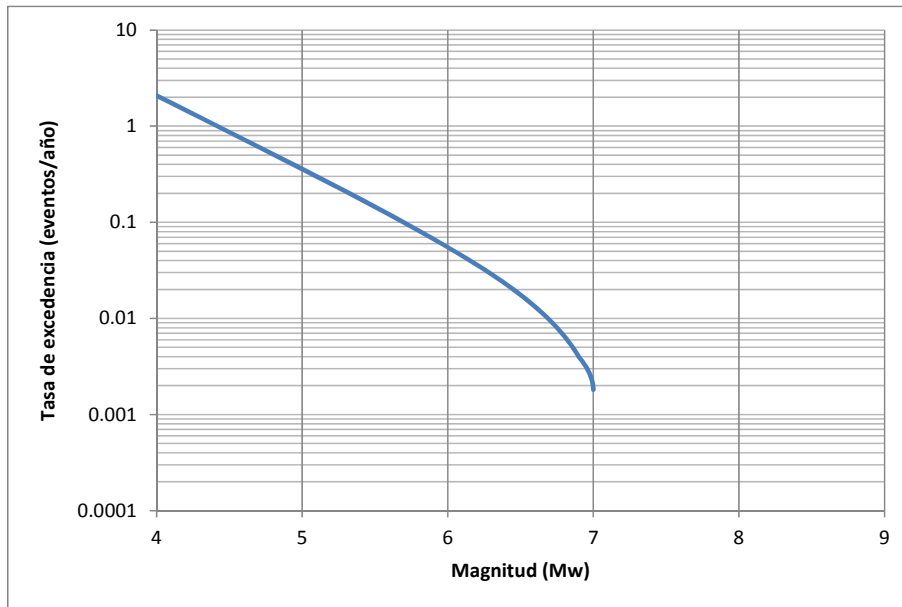
*Figura 68*  
*Curva de recurrencia para la fuente Junín*



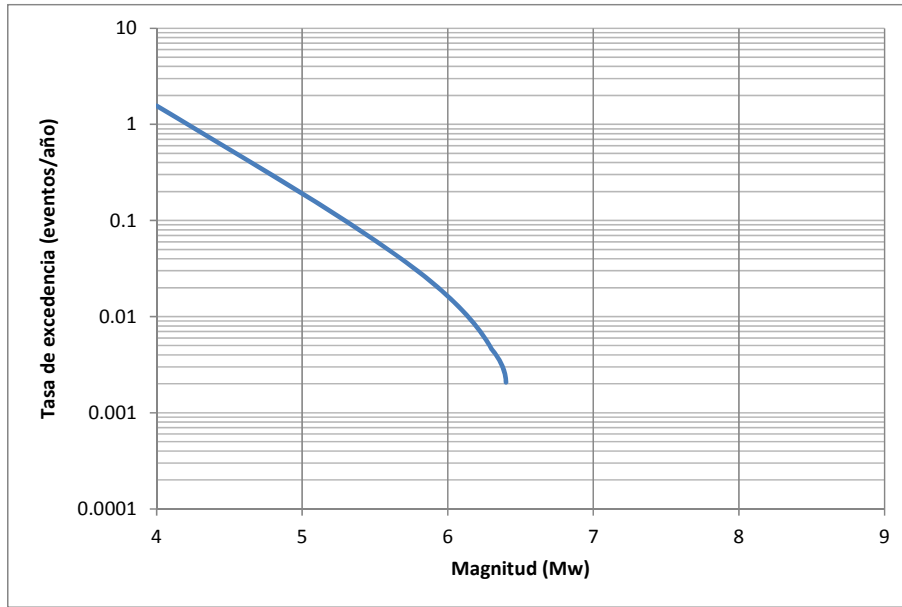
*Figura 69*  
*Curva de recurrencia para la fuente Murindó*



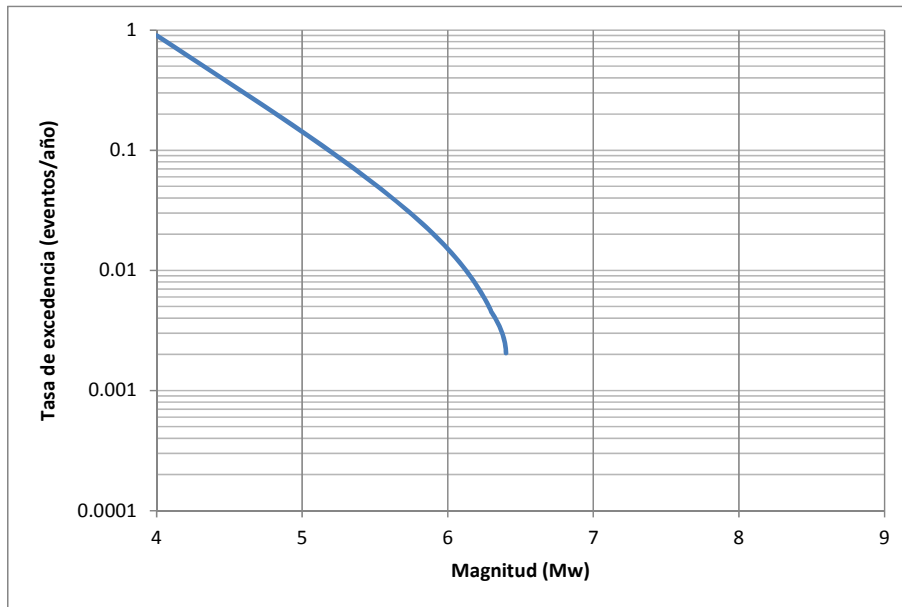
**Figura 70**  
*Curva de recurrencia para la fuente Nido de Bucaramanga*



**Figura 71**  
*Curva de recurrencia para la fuente Compresión Normal Panamá*

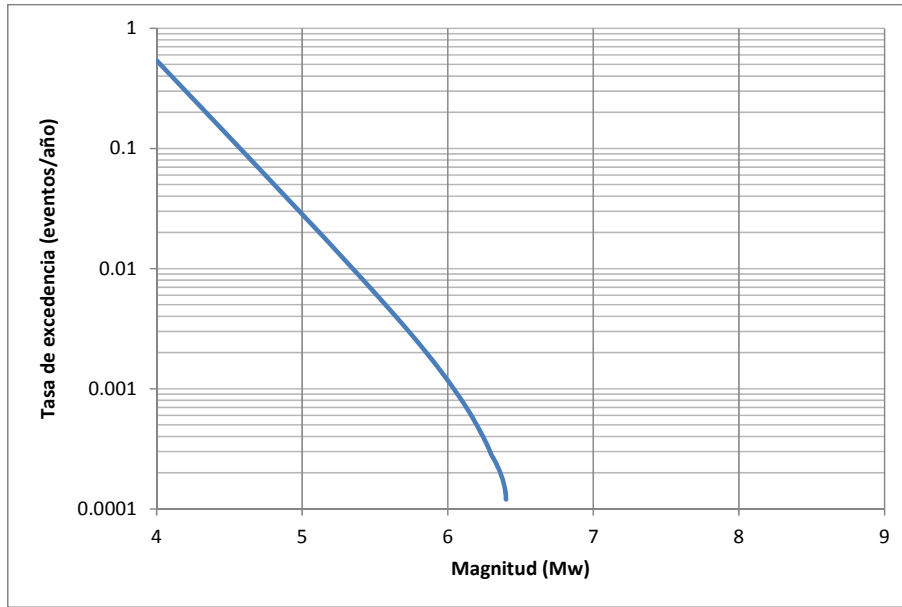


*Figura 72*  
*Curva de recurrencia para la fuente Oca*

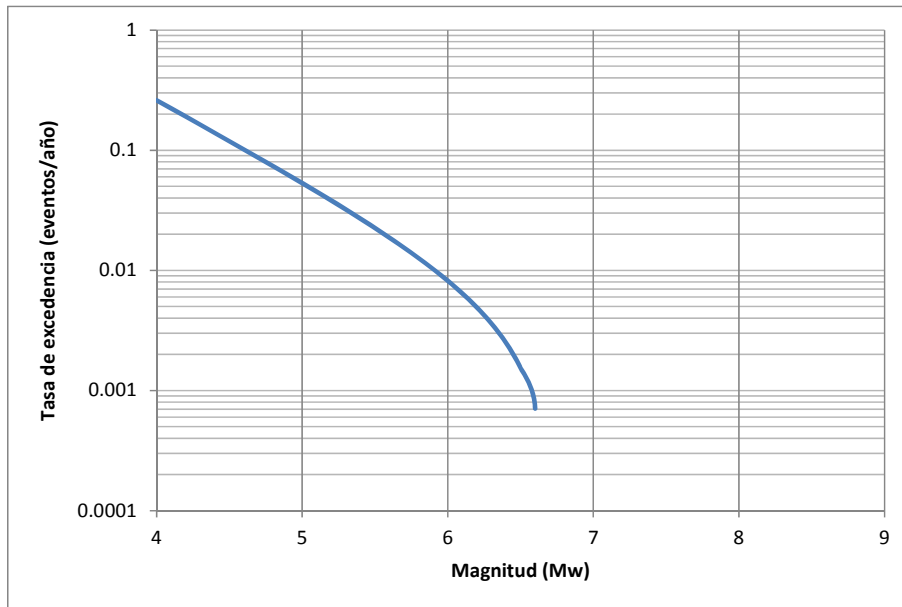


*Figura 73*  
*Curva de recurrencia para la fuente Palestina*



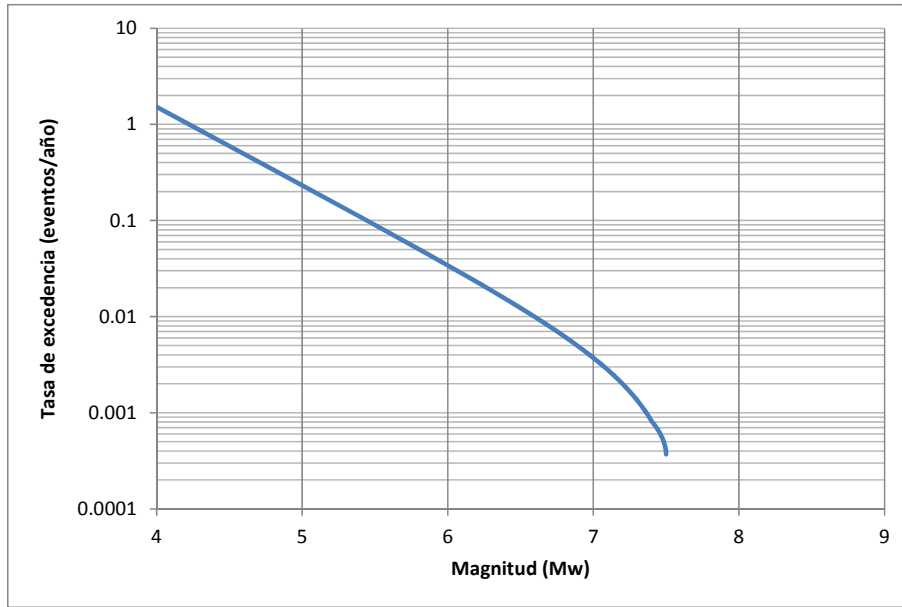


**Figura 74**  
*Curva de recurrencia para la fuente Perijá*

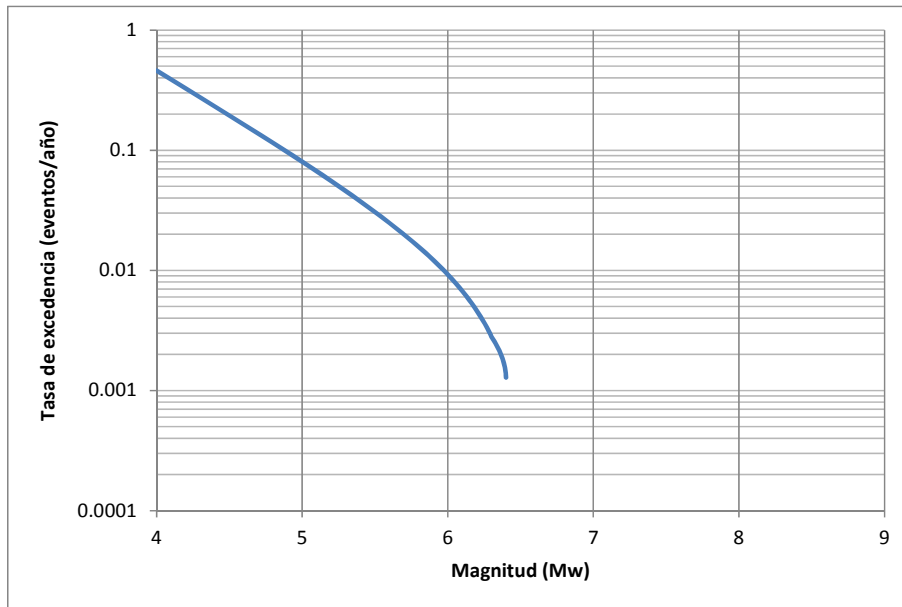


**Figura 75**  
*Curva de recurrencia para la fuente Puerto Rondón*

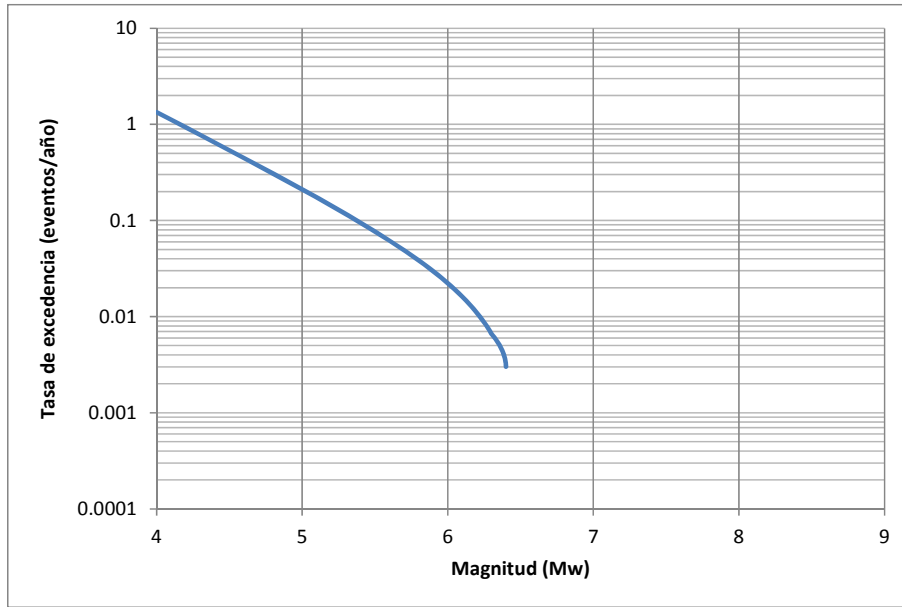




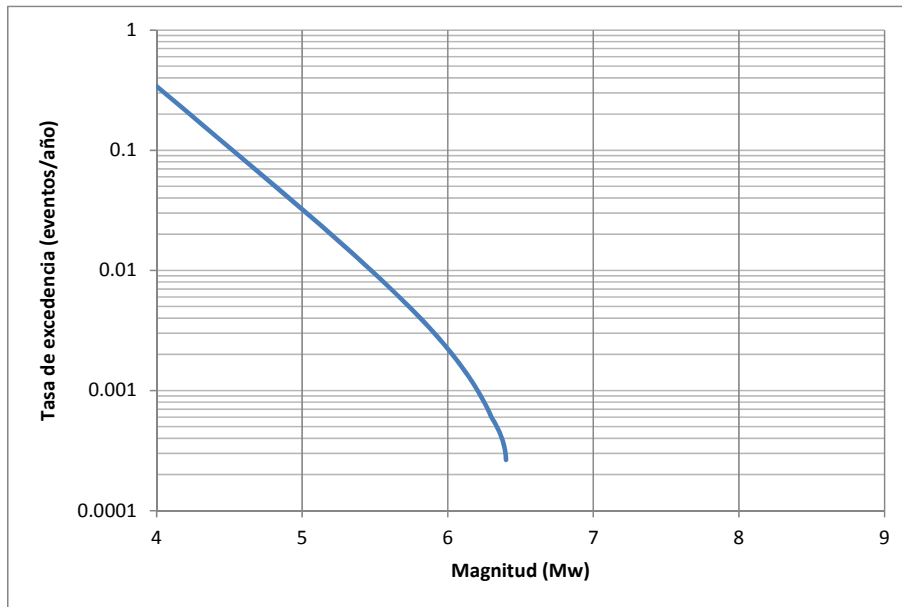
**Figura 76**  
*Curva de recurrencia para la fuente Romeral*



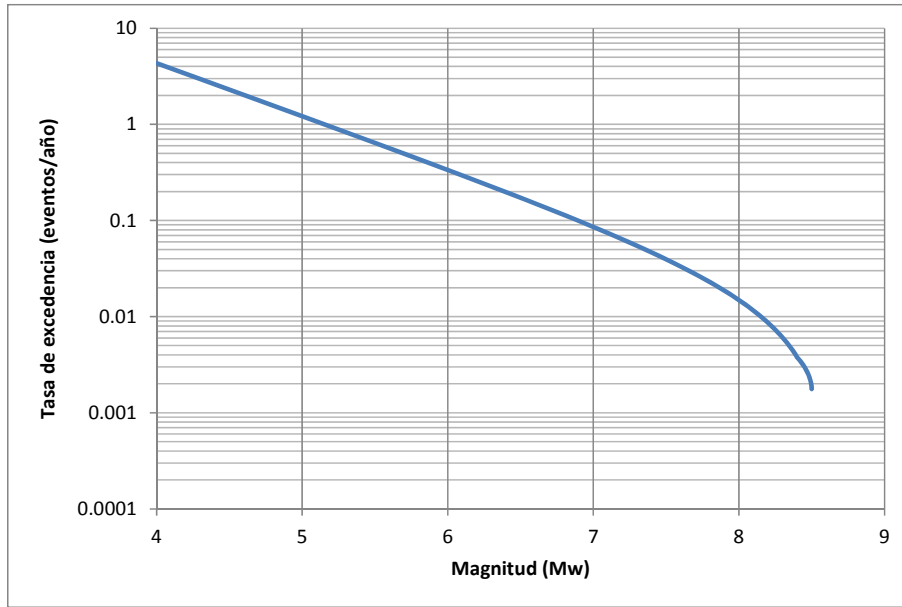
**Figura 77**  
*Curva de recurrencia para la fuente Romeral Norte*



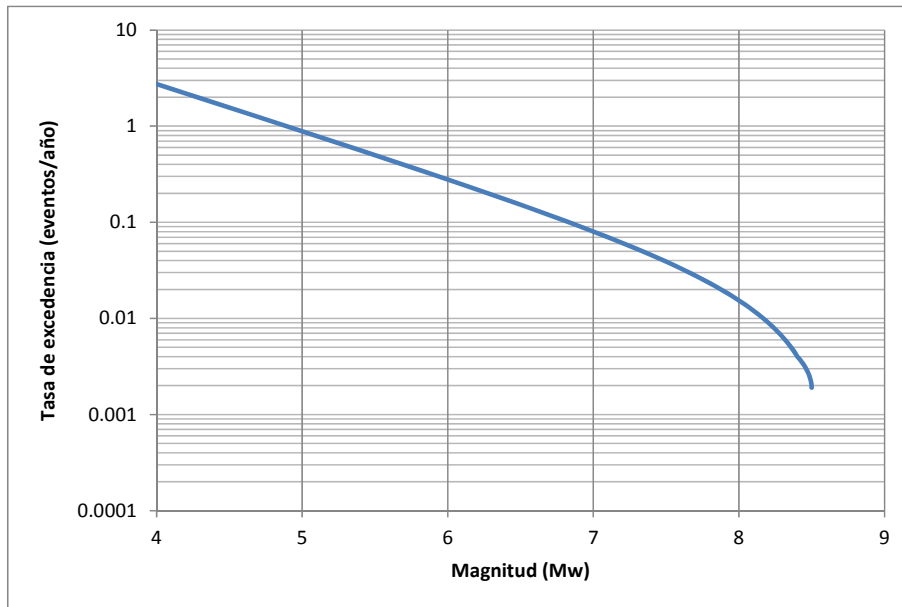
**Figura 78**  
*Curva de recurrencia para la fuente Salinas*



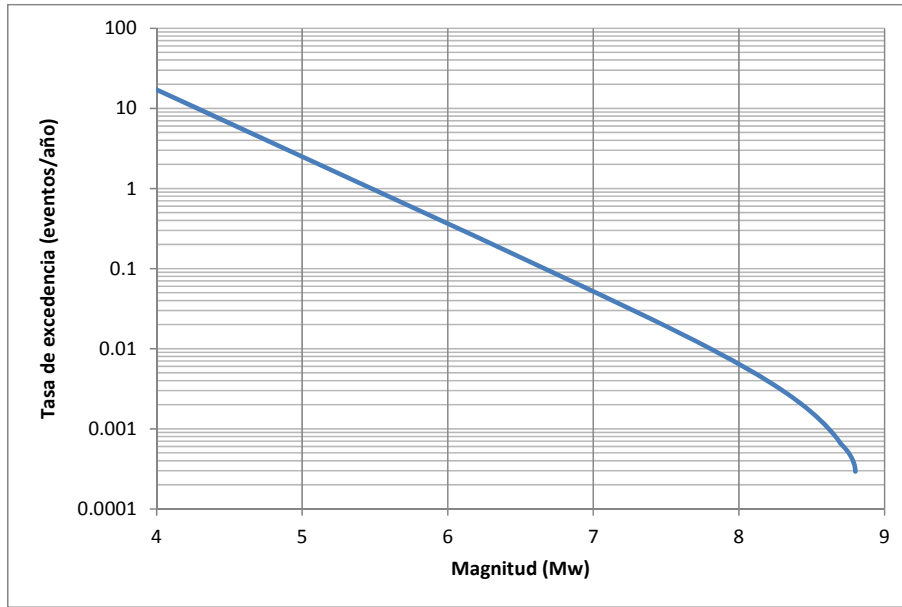
**Figura 79**  
*Curva de recurrencia para la fuente Suárez*



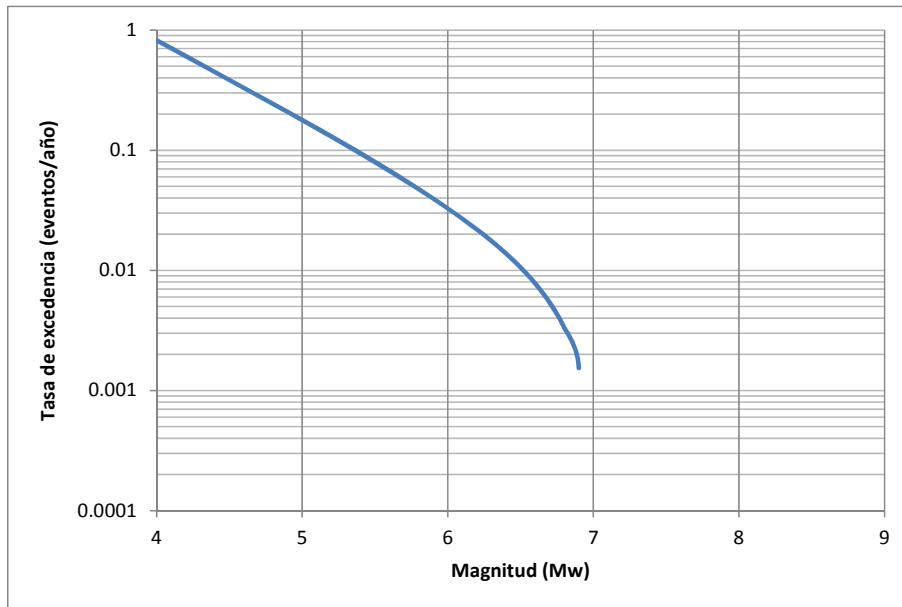
**Figura 80**  
*Curva de recurrencia para la fuente Subducción Norte*



**Figura 81**  
*Curva de recurrencia para la fuente Subducción Centro*



**Figura 82**  
*Curva de recurrencia para la fuente Subducción Sur*



**Figura 83**  
*Curva de recurrencia para la fuente Uribante-Caparro*