

Modelación probabilista de efectos de sitio en ciudades y su aplicación en Bogotá

G.A. Bernal
O. D. Cardona

Monografías de Ingeniería Sísmica

Editor A.H. Barbat

Modelación probabilista de efectos de sitio en ciudades y su aplicación en Bogotá

G.A. Bernal ⁽¹⁾
O.D. Cardona ⁽²⁾

¹ Scientific Advisor, Institute of Environmental Studies, IDEA, National University of Colombia,
Manizales
Integrated Research of Disaster Risk (IRDR), International Center of Excellence (ICoE) on
Understanding Risk and Safety (UR&S)

² IRDR ICoE on UR&S
Associated Professor, National University of Colombia
Manizales, Colombia

CENTRO INTERNACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA
Edificio C1, Campus Norte UPC
Gran Capitán s/n
08034 Barcelona, España

MONOGRAFÍAS DE INGENIERÍA SÍSMICA
Editor A.H. Barbat

ISSN: 1134-3249

MODELIZACION PROBABILISTA DE EFECTOS DE SITIO EN CIUDADES Y SU APLICACIÓN EN BOGOTÁ

Monografía CIMNE IS 74
© Los autores

ISBN: 978-84-945077-6-2
Depósito legal: B-9680-2016

Agradecimientos

La realización de esta monografía ha sido posible gracias al soporte económico de la beca “Paul C. Bell” de la Florida International University, Miami, FL.

Los autores agradecen de manera muy especial al Dr. Alex Barbat, Dr. Mario Ordaz, Dr. Martha Carreño, Dr. Mabel Marulanda y Mario Salgado por su apoyo incondicional en el desarrollo de este trabajo.

ABSTRACT

A methodology for assessing site effects in cities is presented, which is based on the geometry of the prevailing geological formations and their relation to soft soil deposits. Based on a geological interpretation for the area of the city, the elevation (above sea level) of geological contacts is defined, and a three-dimensional geometric model of the subsoil of the city is obtained. The geotechnical information available is used to map soil types to the geometric model. The static and dynamic characteristics of the soil are defined as random variables and their probability moments are calculated using statistics on the geotechnical data available. A computational rectangular grid must be defined over the city and for each node synthetic stratigraphies are constructed with geotechnical parameters obtained following their probability distributions. The dynamic response is calculated for each node of the grid, by a 1D nonlinear analysis (linear equivalent) using a set of Fourier amplitude spectra generated at bedrock level using a source spectrum model, for different combinations of moment magnitude and rupture distance. Site-specific attenuation functions are generated and used to calculate seismic hazard at surface level. Uniform hazard spectra for 475 years return period are obtained. From these spectra harmonized design spectra to the NSR 10 are generated by random search of F_a and F_v parameters to ensure optimum fit.

Following this methodology a site effects model for the city of Bogotá, Colombia, is constructed. This is used to exemplify three main direct application: i) obtaining transfer functions of the response spectrum for risk assessment, ii) generating Shake-Maps for emergency response purposes, and iii) the seismic microzonation of the city and obtaining elastic seismic-resistant design spectra.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	X
1. ASPECTOS METODOLÓGICOS FUNDAMENTALES	1
1.1 CONSTRUCCIÓN DE ESTRATIGRAFÍAS SINTÉTICAS	1
1.2 INCERTIDUMBRE EN LA RESPUESTA DINÁMICA DEL SUELO	4
1.3 EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA	4
1.4 FUNCIONES DE ATENUACIÓN ESPECÍFICAS DE CADA SITIO	6
1.5 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL ESPECTRO DE RESPUESTA	6
2. CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE EFECTOS DE SITIO PARA BOGOTÁ	7
2.1 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA A NIVEL DE ROCA FIRME	8
2.2 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LOS CONTACTOS GEOLÓGICOS	8
2.3 CONDICIONES DE BORDE	12
2.4 INFORMACIÓN GEOTÉCNICA	14
2.5 DEFINICIÓN DE LOS TIPOS DE SUELO DE ANÁLISIS	22
2.5.1 Suelo tipo 1 (formación Sabana)	23
2.5.2 Suelo tipo 2 (formación Subachoque)	26
2.6 MALLA DE CÁLCULO	28
2.7 CONSTRUCCIÓN DE ESTRATIGRAFÍAS SINTÉTICAS	30
2.8 EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA	32
3. APLICACIONES DEL MODELO DE EFECTOS DE SITIO EN BOGOTÁ	42
3.1 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL ESPECTRO DE RESPUESTA CON FINES DE ANÁLISIS DE RIESGO	42
3.1.1 Evaluación del riesgo en Bogotá incluyendo efectos de sitio	55
3.2 GENERACIÓN DE SHAKEMAPS	61
3.3 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE BOGOTÁ	72
3.3.1 Funciones de atenuación	72
3.3.2 Amenaza sísmica en superficie	73
3.3.3 Armonización a la NSR-10	82
REFERENCIAS	86
Anexo A. Descomposición de Cholesky	64
Anexo B. Matriz propagadora de Thompson-Haskel	73
Anexo C. Programa Seismic Microzonation Studio	84

INTRODUCCIÓN

Las evaluaciones clásicas de amenaza sísmica proveen las tasas de excedencia de parámetros del movimiento fuerte a nivel de roca firme en ubicaciones de interés dentro de un territorio, como consecuencia de la ocurrencia natural de los terremotos. No obstante, la presencia natural de materiales jóvenes no consolidados en forma de depósitos de suelo blando, implica la necesidad de conocer como es el comportamiento dinámico de estos materiales y como se modifica la intensidad de movimiento fuerte, desde la roca firme, hasta la cimentación de las estructuras. La respuesta dinámica de los depósitos blandos de suelo modifica significativamente, en amplitud y contenido frecuencial, las ondas sísmicas incidentes a nivel de roca firme. Este efecto está asociado al cambio de impedancias entre la roca firme y los estratos de suelo generalmente más blandos y menos competentes. La propagación vertical de las ondas de cortante por la estratigrafía local y el comportamiento típicamente no lineal de los estratos de suelo, inducen estas modificaciones en el movimiento fuerte superficial.

Si bien la respuesta dinámica de depósitos de suelo blando ha sido objeto de estudio desde hace más de 70 años, la investigación relacionada tomó fuerza con la ocurrencia del sismo de Michoacán, en México en 1985. En este terremoto se evidenció la importancia de los suelos blandos en la amplificación de las señales sísmicas incidentes en roca firme. Adicionalmente al sismo de México de 1985, varios terremotos han evidenciado la importancia de los efectos de sitio en la demanda sísmica final sobre las edificaciones y componentes de infraestructura. Se destacan los sismos de Kalamata, Grecia 1986; Armenia, URSS 1988; Loma Prieta, USA 1989; Filipinas 1990; Armenia, Colombia 1999; Chi-Chi, Taiwán 1999.

En grandes ciudades, en las cuales se agrupan un gran número de elementos expuestos, y en donde se concentra generalmente buena parte de la población, valor económico y fuerza productiva de los países, es especialmente importante el problema de los efectos de sitio. Es por esto que en las pasadas décadas, se han desarrollado estudios de microzonificación sísmica en varias ciudades alrededor del mundo. Estos estudios cuantifican el efecto de los suelos blandos que conforman la geología superficial de las ciudades, en la amplificación de la intensidad de

movimiento fuerte, y usualmente definen coeficientes sísmicos de diseño para la construcción de edificaciones nuevas y la rehabilitación de las existentes.

La modelación de los efectos de sitio para ciudades, con fines por ejemplo de realizar estudios de microzonificación sísmica, debe considerar, como mínimo, los siguientes aspectos: la geometría de las formaciones geológicas superficiales que dan origen a los suelos blandos, la profundidad total del depósito, las propiedades geotécnicas estáticas y dinámicas de los suelos y su variación en profundidad y la amenaza sísmica a nivel de roca firme. De la operación adecuada de los aspectos mencionados es posible obtener estimaciones de la amenaza sísmica a nivel de superficie del terreno. Es usual calcular la respuesta dinámica en sitios seleccionados dentro de la ciudad, para luego interpolar esos resultados y estimar la amenaza en toda la extensión geográfica de la ciudad. Si bien esta es una práctica adecuada, se presenta en esta monografía una metodología para determinar la respuesta dinámica en cualquier ubicación de la ciudad, sin recurrir a interpolaciones y sin que esto implique multiplicar los esfuerzos de recolección de información geotécnica.

La base de la metodología presentada es un modelo geotécnico de respuesta y un modelo geométrico de la geología superficial, de manera que es posible construir estratigrafías sintéticas en cualquier ubicación y calcular su respuesta dinámica. El modelo de efectos de sitio que resulta de aplicar la metodología planteada, se vuelve particularmente interesante dentro de tres aspectos asociados a la gestión del riesgo sísmico: i) para el cálculo del riesgo, de manera que se incluyan los factores de amplificación del suelo en la evaluación de las pérdidas; ii) para la implementación de sistemas automáticos de estimación de daños post-terremoto, con fines de atención a emergencias, en los cuales se requiere conocer la distribución de las intensidades de movimiento fuerte en toda la ciudad (shakemap); y iii) para adelantar estudios de microzonificación sísmica que regulen el diseño y construcción de edificaciones sismo-resistentes.

La metodología propuesta es resumida en 7 pasos:

1. *Evaluación de la amenaza sísmica a nivel de roca firme:* La amenaza sísmica, a nivel de roca firme, debe evaluarse de manera detallada para la ciudad. Para esta evaluación se emplean funciones de atenuación basadas en formulaciones del espectro de fuente radiado y un modelo de fuentes y sismicidad adecuado para la ciudad.
2. *Definición de la geometría de los contactos geológicos:* Con base en la información geológica y geofísica disponible, se define la topografía de los contactos geológicos, a partir de la cual es posible construir un modelo geométrico tridimensional que permite establecer la profundidad total de los depósitos en cada punto dentro de la ciudad, así como la profundidad de los contactos geológicos que marcan las variaciones en los materiales de los suelos.

3. *Definición de la geometría de las condiciones de borde:* Como condiciones de borde se entienden la topografía y la profundidad del nivel freático. La topografía marca la ubicación espacial de la superficie del terreno, de manera que constituye el límite superior del modelo geométrico. El nivel freático, por su parte, establece la geometría de la tabla de agua en la ciudad, la cual es necesaria para establecer en cada localización las condiciones de saturación y confinamiento del suelo.
4. *Información geotécnica:* Es importante la recolección de información geotécnica por medio de una campaña de estudios de campo que incluya una serie de perforaciones en diferentes ubicaciones de la ciudad bajo análisis. Los estudios geotécnicos deben ser detallados de manera que se cuente con información suficiente para la caracterización de las propiedades índice, estáticas y dinámicas de los suelos.
5. *Definición de tipos de suelo de análisis:* Se define un tipo de suelo único para cada formación geológica. Los tipos de suelo representan la variación en profundidad de los momentos estadísticos de todas las propiedades geotécnicas. Estas propiedades son modeladas como variables aleatorias de distribución normal. Los momentos estadísticos son obtenidos de análisis estadísticos sobre la información geotécnica disponible. Adicionalmente, para cada propiedad geotécnica se calcula la matriz de correlación, la cual da cuenta de la correlación en profundidad de los valores de la propiedad.
6. *Definición de la malla de cálculo:* Una malla de cálculo se define sobre la ciudad. La malla de cálculo debe estar contenida por la extensión de la capa de información geológica más pequeña.
7. *Construcción de estratigrafías sintéticas:* En cada nodo de la malla de cálculo, se construye un conjunto de estratigrafías sintéticas, con base en la geometría de las formaciones geológicas y en la información geotécnica de la ciudad. Cada elemento del conjunto es una estratigrafía simulada del sitio, caracterizada por una secuencia de valores de propiedades geotécnicas generados aleatoriamente. Dado que las propiedades geotécnicas están correlacionadas en profundidad, la secuencia de valores generados aleatoriamente es multiplicada por la matriz triangular resultante de aplicar la descomposición de Cholesky a la matriz de correlación, resultando una secuencia de valores correlacionados.

En función de la aplicación específica que se le dé al modelo, se requiere de pasos complementarios, que se listan a continuación. Las posibles aplicaciones son: i) la obtención de funciones de transferencia del espectro de respuesta para análisis de riesgo (pasos 8 y 9), ii) el desarrollo de un sistema de generación de shakemaps con fines de respuesta a emergencias (paso 8), y iii) la microzonificación sísmica de la ciudad y obtención de espectros elásticos de diseño sismo-resistente (pasos 8 al 12).

8. *Evaluación de la respuesta dinámica:* Se generan EAF¹ teóricos de aceleración para un rango de magnitudes y distancias hipocentrales, haciendo uso de un modelo de espectro de fuente. Luego, para cada estratigrafía sintética se calcula la respuesta dinámica no lineal unidimensional, siguiendo la metodología lineal equivalente. El resultado son los EAF de aceleración a nivel de superficie del terreno, en cada nodo de la malla.
9. *Cálculo de funciones de transferencia:* Para varios niveles de PGA en la base de cada estratigrafía sintética, se calcula la relación entre el espectro de respuesta en superficie y en roca, para diferentes valores de periodo estructural y un coeficiente de amortiguamiento del 5%. Con esto se construye una capa de efectos de sitio para el análisis de riesgo que permite incorporar la respuesta dinámica del suelo en la evaluación de pérdidas económicas.
10. *Cálculo de funciones de atenuación:* Para cada nodo de la malla, se calcula una función de atenuación usando los EAF calculados en el paso anterior. Estos EAF son modificados por la función de transferencia de un oscilador de un grado de libertad, de manera que, usando teoría de vibraciones aleatorias, es posible construir funciones de atenuación en términos del espectro de respuesta de aceleración.
11. *Cálculo de la amenaza sísmica en cada sitio:* Se calcula un espectro de amenaza uniforme en cada nodo de la malla, haciendo uso de las funciones de atenuación particulares para cada sitio, de manera que se obtiene la intensidad de movimiento fuerte asociada a 475 años de periodo de retorno (o para cualquier otro periodo de retorno), para cada diferentes periodos fundamentales de vibración de las estructuras. Para este cálculo se usa el mismo modelo de fuentes y sismicidad que para el paso 1.
12. *Armonización de los espectros:* A partir de los espectros de amenaza uniforme, se definen espectros de diseño compatibles con la normativa aplicable, y se obtienen los valores de los parámetros asociados al suelo de los espectros de diseño, para cada nodo de la malla de cálculo. Esto deriva en una representación espacial de los parámetros que controlan la forma final de los espectros de diseño de edificaciones nuevas.

¹ Espectro de Amplitudes de Fourier

1. ASPECTOS METODOLÓGICOS FUNDAMENTALES

En la aplicación de la metodología propuesta, existen aspectos de carácter fundamental que deben ser tratados con cuidado. Estos aspectos tienen que ver con la construcción de estratigrafías sintéticas, la evaluación de la incertidumbre asociada a la respuesta del suelo, y la construcción de funciones de atenuación específicas de cada sitio.

1.1 CONSTRUCCIÓN DE ESTRATIGRAFÍAS SINTÉTICAS

El modelo de análisis de microzonificaciones sísmicas propuesto en esta monografía se basa principalmente en la construcción de estratigrafías sintéticas. Estas estratigrafías son la base para la evaluación de la respuesta dinámica de los suelos blandos. La correcta aplicación de esta metodología depende en gran medida de la correcta definición de las estratigrafías.

Las estratigrafías se construyen en función del modelo geológico tridimensional y de los tipos de suelo definidos para cada formación geológica. Los tipos de suelo representan la variación en profundidad de los momentos estadísticos de todas las propiedades geotécnicas. Esto quiere decir que las propiedades geotécnicas se modelan como variables aleatorias. Las propiedades geotécnicas incluidas en el modelo son:

- Contenido de humedad
- Límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico)
- Propiedades índice calculadas de los límites de Atterberg (índice de plasticidad e índice de liquidez)
- Peso específico
- Velocidad de onda de cortante

Se definen entonces los siguientes parámetros, en función de la profundidad, para cada una de las propiedades listadas: valor esperado, varianza, límite mínimo y límite máximo. Con estos parámetros se define una distribución de probabilidad normal

truncada para cada propiedad. Esto permite simular estratigrafías en cada sitio de cálculo. La simulación de estratigrafías se realiza bajo tres preceptos fundamentales que se asumen ciertos:

1. Las formaciones geológicas superficiales son las que dan origen a los depósitos de suelo blando.
2. Materiales con el mismo origen geológico tienden a tener propiedades similares, que presentan variaciones importantes en la profundidad, más no con relación a la ubicación geográfica.
3. Las propiedades geotécnicas que caracterizan los suelos tienen incertidumbre. Esta incertidumbre puede ser cuantificada mediante análisis estadísticos sobre los datos de los suelos asociados a la misma formación geológica.

Dado que, siguiendo esta metodología, la gran mayoría de los puntos de cálculo corresponden a sitios no explorados aún, la simulación de estratigrafías permite cuantificar la incertidumbre asociada a los valores asignados a las propiedades geotécnicas.

Ahora bien, se sabe que las propiedades geotécnicas están correlacionadas en profundidad, dado que si bien el depósito de suelo blando se modelo como un medio estratificado, realmente los suelos que pertenecen a la misma formación geológica no presentan estratos marcados, sino variaciones suaves en el valor de sus propiedades en profundidad. Con el fin de cuantificar el nivel de correlación en profundidad, se calcula una matriz de auto correlación C para cada propiedad geotécnica.

$$C = \begin{bmatrix} \rho_{1,1} & \rho_{1,2} & \rho_{1,3} & \cdots & \rho_{1,n} \\ \rho_{2,1} & \rho_{2,2} & \rho_{2,3} & \cdots & \rho_{2,n} \\ \rho_{3,1} & \rho_{3,2} & \rho_{3,3} & \cdots & \rho_{3,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{n,1} & \rho_{n,2} & \rho_{n,3} & \cdots & \rho_{n,n} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

C es una matriz simétrica y definida positiva de $n \times n$, en donde n es el número total de intervalos en profundidad. Los elementos de la matriz son los coeficientes de correlación entre intervalos. El coeficiente de correlación entre los intervalos i y j ($\rho_{i,j}$) se determina como,

$$\rho_{i,j} = \frac{\text{Cov}(X_i, X_j)}{\sigma_{X_i} \cdot \sigma_{X_j}} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

en donde X es el parámetro geotécnico en consideración, $\text{Cov}(X_i, X_j)$ es la covarianza del parámetro entre los intervalos i y j , y σ_{X_i} y σ_{X_j} son las desviaciones estándar del parámetro en los intervalos i y j , respectivamente. La covarianza $\text{Cov}(X_i, X_j)$ se determina como,

$$\text{Cov}(X_i, X_j) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (X_{i_k} - \bar{X}_i) \cdot (X_{j_k} - \bar{X}_j) \quad (\text{Ec. 1.3})$$

en donde N es el número total de muestras (sondeos reales) que tienen datos en ambos intervalos i y j .

De esta manera, una propiedad geotécnica X , queda definida por:

1. Su valor esperado, como función de la profundidad $\mu_X(z)$
2. Su varianza, como función de la profundidad $\sigma_X^2(z)$
3. Sus límites de truncamiento mínimo y máximo, como función de la profundidad $L1_X(z)$, $L2_X(z)$
4. Su matriz de auto correlación C_X

Con esta información, es posible construir estratigrafías sintéticas mediante la simulación de los valores de las propiedades geotécnicas en profundidad. Los pasos para construir una estratigrafía sintética son:

1. Se determina la profundidad total de la estratigrafía según el modelo geológico.
2. Esta profundidad se subdivide en capas de igual espesor h .
3. Para cada capa, se determinan las propiedades geotécnicas mediante la generación de un número aleatorio, siguiendo su distribución de probabilidad.
4. La secuencia de números aleatorios R que definen la variación en profundidad de una propiedad geotécnica en la estratigrafía simulada, es alterada por la matriz triangular inferior L que se define como,

$$C = L \cdot L^T \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Se genera entonces una secuencia de números aleatorios correlacionados R_c , de la siguiente manera,

$$R_c = RL \quad (\text{Ec. 1.5})$$

La matriz L se determina aplicando el método de descomposición de Cholesky a la matriz C . El método de descomposición de Cholesky se detalla en el Anexo A.

Siguiendo los pasos anteriores, puede generarse un conjunto de muchas simulaciones de estratigrafías en cada sitio de cálculo. Esto con el fin de determinar la incertidumbre asociada a la respuesta dinámica del suelo.

1.2 INCERTIDUMBRE EN LA RESPUESTA DINÁMICA DEL SUELO

La evaluación de la incertidumbre en la respuesta dinámica de suelos blandos es un tema que ha sido objeto de estudio desde hace varios años y que a la fecha no ha sido resuelto del todo. En esta monografía, se sigue el enfoque propuesto por Bazurro y Cornell (2004), aplicando la modificación propuesta por Stewart y Goulet (2006), en la cual, la desviación estándar del logaritmo de la aceleración espectral en superficie $Sa^s(T)$ (en donde T es el periodo de vibración estructural) se define como,

$$\sigma_{\ln Sa^s(T)} \approx \sqrt{\sigma_{\ln Sa(T)}^2 + b_1^2 \sigma_{\ln PGA}^2 + \sigma_{\ln AF(T)}^2 + 2b_1 \rho \sigma_{\ln PGA} \sigma_{\ln Sa(T)}} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

en donde $\sigma_{\ln Sa(T)}$ es la desviación estándar de la aceleración espectral en roca (dada por la función de atenuación), $\sigma_{\ln PGA}$ es la desviación estándar de PGA en roca (dada por la función de atenuación), $\sigma_{\ln AF(T)}$ es la desviación estándar asociada a la incertidumbre en la respuesta dinámica del sitio, b_1 es la pendiente de la relación entre $\ln AF(T)$ y $\ln PGA$, y ρ es el coeficiente de correlación entre los términos de aceleración espectral y PGA en roca. De esta manera es posible introducir la incertidumbre asociada a la respuesta dinámica del suelo en la función de atenuación específica de cada sitio.

1.3 EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA

Para cada estratigrafía sintética, se calcula la respuesta dinámica unidimensional, empleando el método de análisis lineal equivalente. Este método, propuesto por Idriss y Seed (1968) y Seed e Idriss (1970) es el más empleado en la actualidad para el cálculo de la respuesta dinámica en el rango no lineal. En este método se calcula la respuesta lineal del estrato de suelo y, por medio de un proceso iterativo, se ajustan las propiedades (rigidez a cortante y amortiguamiento) en función de los modelos constitutivos de comportamiento no lineal del suelo (curvas de degradación de la rigidez y amortiguamiento). En esta monografía la respuesta elástica se calcula haciendo uso del método de la matriz propagadora de Thompson-Haskell (Thompson 1950, Haskell 1953), mediante el cual se calculan las funciones de transferencia lineales del espectro de Fourier para un medio estratificado. Este método provee una solución eficiente computacionalmente en el dominio de la frecuencia. El método de la matriz propagadora de Thompson-Haskell se detalla en el Anexo B.

El modelo lineal equivalente consiste en una modificación del modelo de Kelvin-Voigt para tener en cuenta algunos tipos de no linealidades. La no linealidad y el comportamiento de esfuerzo deformación de los suelos es modelado como el de un material con rigidez degradante descrita por la curva de Ramberg y Osgood (1943) (ver Figura 1.1). El módulo de corte equivalente, G , es tomado como el módulo secante G_{SEC} , que depende de la amplitud de deformación cortante γ . Como se muestra en la Figura 1.1, G_{SEC} para un ciclo histerético simétrico controlado por deformación es,

$$G_{SEC} = \frac{\tau_C}{\gamma_C} \quad (\text{Ec. 1-7})$$

En donde τ_C y γ_C son el esfuerzo y la deformación cortante respectivamente. El amortiguamiento con respecto al crítico en el modelo lineal equivalente β , se calcula para obtener la misma pérdida de energía en un ciclo de carga a la que se presenta en un ciclo de histéresis del suelo.

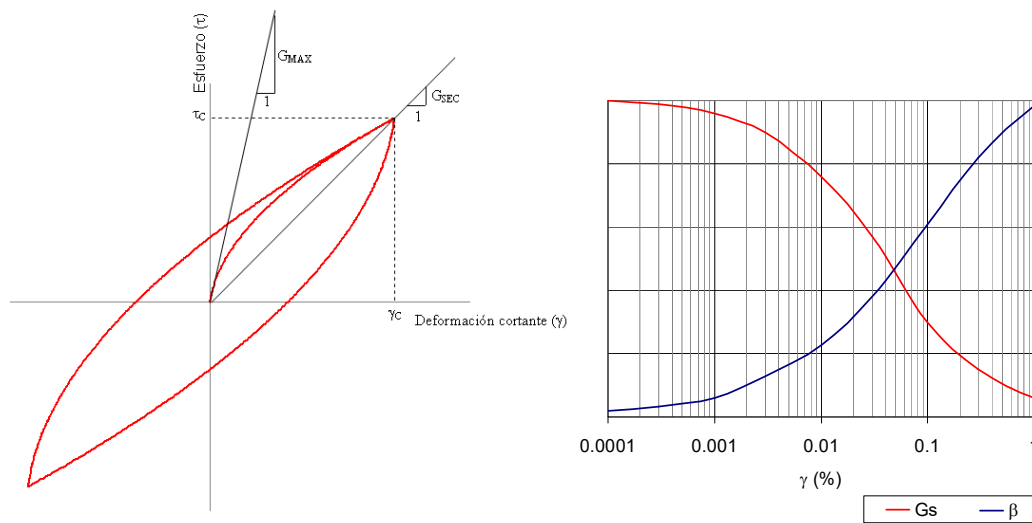


Figura 1.1. Curvas del modelo lineal equivalente

Las hipótesis generales en las que se basa el modelo lineal equivalente son las siguientes:

- Los estratos de suelo se extienden uniformemente y hasta el infinito en dirección horizontal y la capa inferior es el semiespacio infinito.
- La respuesta principal del depósito de suelo es la producida por la propagación vertical de ondas de cortante (SH) provenientes de la formación de roca subyacente.
- Las propiedades no lineales del suelo se modelan a través de sistemas lineales equivalentes. Cada estrato que se modela es homogéneo e isotrópico y se caracteriza por su densidad de masa, espesor, módulo de corte y factor de amortiguamiento y por las características de degradación de estas últimas propiedades con la deformación por cortante.

Mediante el procedimiento descrito, se propagan verticalmente las ondas SH inducidas por el movimiento fuerte (EAF en la base del depósito) por una columna de material estratificado para la cual se conocen todas sus características dinámicas. El resultado es la obtención de los EAF a nivel de superficie del terreno, junto con la

función de transferencia de la columna de suelo, $H_s(f)$. De esta manera se obtienen la respuesta sísmica en cada una de las estratigrafías sintéticas definidas en el modelo.

1.4 FUNCIONES DE ATENUACIÓN ESPECÍFICAS DE CADA SITIO

Una vez calculada la incertidumbre asociada a la respuesta dinámica del suelo en los sitios de cálculo, es posible generar funciones de atenuación que involucren esta incertidumbre junto con las características de amplificación propias del sitio. Esto permitirá realizar un análisis de amenaza sísmica en cada ubicación con el fin de obtener espectros de amenaza uniforme.

Para este fin se emplea el modelo del EAF radiado propuesto por Bernal y Cardona (2015). Este modelo permite establecer el EAF teórico, dados un momento sísmico y una distancia hipocentral. Dicho EAF teórico es entonces empleado para calcular la respuesta dinámica de la columna de suelo del sitio particular, determinando de esta manera el EAF a nivel de superficie del terreno. De este último, empleando teoría de vibraciones aleatorias, se obtiene la aceleración espectral en superficie. Esta operación se repite para todo el juego de magnitudes y distancias que componen la función de atenuación a nivel de roca firme, de manera que se determina una función de atenuación para el sitio. Finalmente, para cada periodo estructural considerado, se le asocia a la función de atenuación su desviación estándar calculada como se indica en la ecuación 1.6.

El procedimiento se repite para todos los sitios de cálculo. Estas funciones de atenuación están definidas entonces en términos de aceleraciones espectrales para varios periodos estructurales, y se debe calcular una por cada mecanismo focal de importancia en el territorio de análisis.

1.5 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL ESPECTRO DE RESPUESTA

Para el análisis de riesgo, es relevante conocer el factor de amplificación que la columna de suelo induce a las aceleraciones espectrales en roca firme. Con este fin, se calculan funciones de transferencia del espectro de respuesta en cada ubicación.

Con los pares magnitud-distancia definidos por las funciones de atenuación específicas de cada sitio, se establecen los espectros de respuesta correspondientes en la base y en la superficie del depósito. La función de transferencia, $AF(T)$, se define entonces como el cociente entre las aceleraciones espectrales en superficie y las aceleraciones espectrales en roca, es decir,

$$AF(T) = \frac{S_a^s(T)}{S_a(T)} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Esto deriva en una función de transferencia del espectro de respuesta, para cada estratigrafía simulada y para cada par magnitud-distancia.

2. CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE EFECTOS DE SITIO PARA BOGOTÁ

Con el fin de implementar y probar la metodología propuesta, se presenta en esta sección la construcción de un modelo de efectos de sitio para la ciudad de Bogotá, capital de Colombia. La ubicación de la ciudad en el contexto nacional se presenta en la Figura 2.1.



Figura 2.1. Ubicación de Bogotá en Colombia

Bogotá es la ciudad más grande y poblada de Colombia, con una población estimada de 7.776.845² habitantes. Tiene una longitud de 33 km de sur a norte, y 16 km de

² Según "Estimación y proyección de población nacional, departamental y municipal total por área 1985-2020". Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE.

oriente a occidente. Está organizada como Distrito Capital, gozando de autonomía para la gestión de sus intereses dentro de los límites de la Constitución colombiana. A diferencia de otros Distritos en Colombia, Bogotá se considera una entidad territorial de primer orden, es decir, tiene las mismas atribuciones administrativas que la ley le confiere a los Departamentos. Está constituida por 20 localidades y es el epicentro político, económico, administrativo, industrial, artístico, cultural, deportivo y turístico del país.

Está ubicada en el centro de Colombia, dentro de la región conocida como la sabana de Bogotá, la cual hace parte del altiplano cundiboyacense, que es una formación montañosa de meseta ubicada en la cordillera Oriental de los Andes, a una altitud promedio de 2625 metros sobre el nivel del mar.

2.1 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA A NIVEL DE ROCA FIRME

Se evaluó la amenaza sísmica a nivel de roca firme para la ciudad de Bogotá, siguiendo el procedimiento clásico de evaluación probabilista de la amenaza sísmica, usando el programa CRISIS 2007 (Ordaz et. al. 2007). El modelo de atenuación es el dado por Bernal y Cardona (2015) y el modelo de fuentes y sismicidad es el definido en Salgado-Gálvez et. al. (2015). La Figura 2.2 presenta el mapa de PGA para 475 años de periodo de retorno en Bogotá.

2.2 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LOS CONTACTOS GEOLÓGICOS

En términos generales, los suelos blandos de Bogotá provienen de depósitos de tipo aluvial y lagunar, en donde se destacan las formaciones Subachoque, Río Tunjuelito, Sabana y Chía. En esta monografía, la geometría del entorno geológico se asocia principalmente a las formaciones Subachoque y Sabana, por ser las de mayor diferenciación de características geotécnicas dentro del área urbana de la ciudad.

Según Helmens y Van der Hammen (1995), la formación Subachoque está constituida por material fino, arcillas arenosas, orgánicas y turbas-lignitas, que se alternan con arenas arcillosas y gravas. Los sedimentos provienen principalmente de un depósito fluvio-glacial, alterado por procesos fluviales y lacustres. La formación Subachoque es suprayacida por la formación Sabana, la cual constituye depósitos lacustres que afloran en toda la Sabana de Bogotá. Según Helmes y Van der Hammen (1995), esta formación está constituida principalmente por arcillas.

La geometría de los contactos geológicos de las formaciones Sabana y Subachoque se obtuvo del Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá, desarrollado por la Sociedad Colombiana de Geotecnia (SCG, 2006). La Figura 2.3 presenta la geometría del contacto con roca firme, mientras que la Figura 2.4 presenta la geometría del contacto geológico Subachoque-Sabana. Por supuesto, la geometría final de la formación Sabana está dada por la topografía de la ciudad.

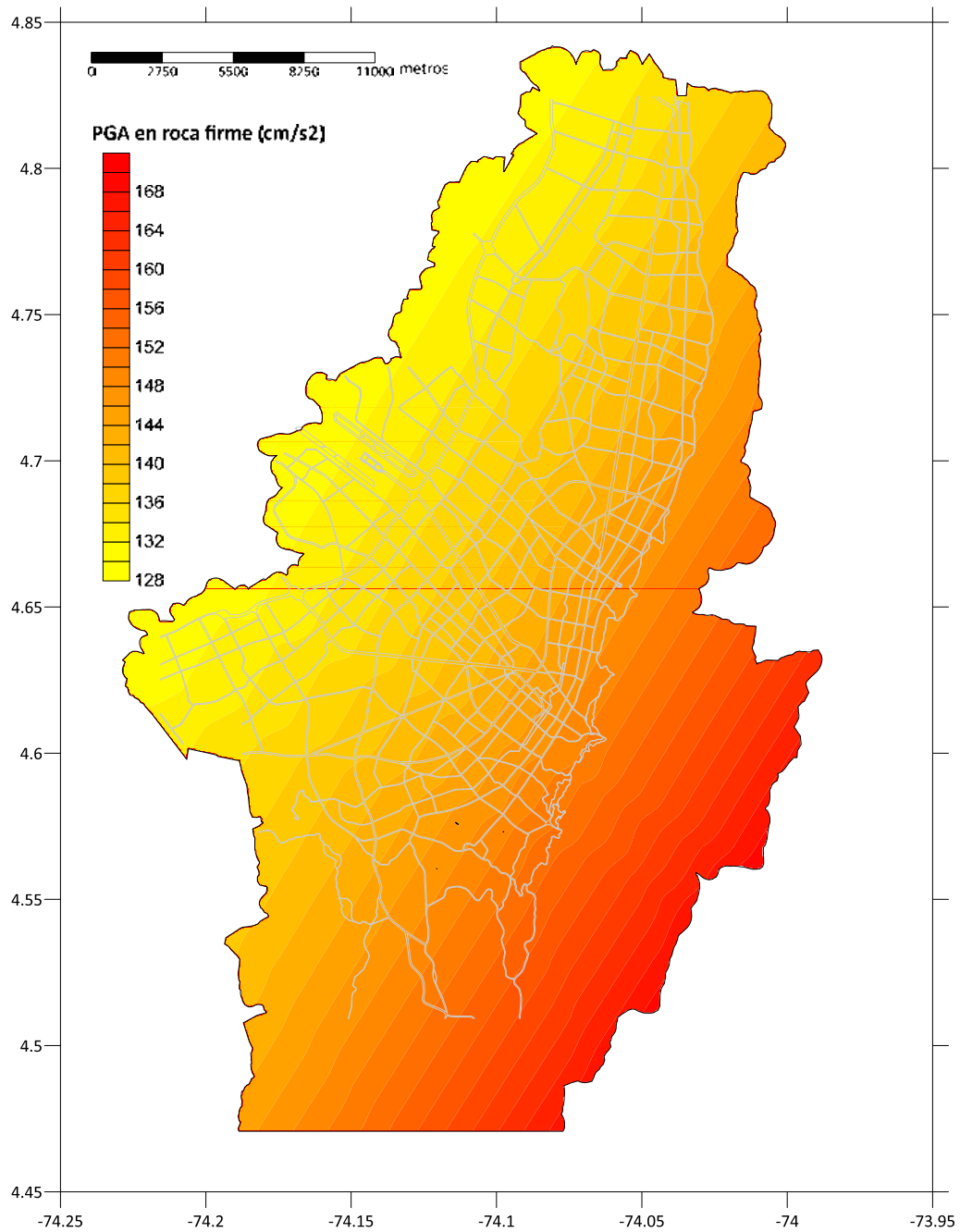


Figura 2.2. Mapa de amenaza uniforme en roca en términos PGA. 475 años de periodo de retorno

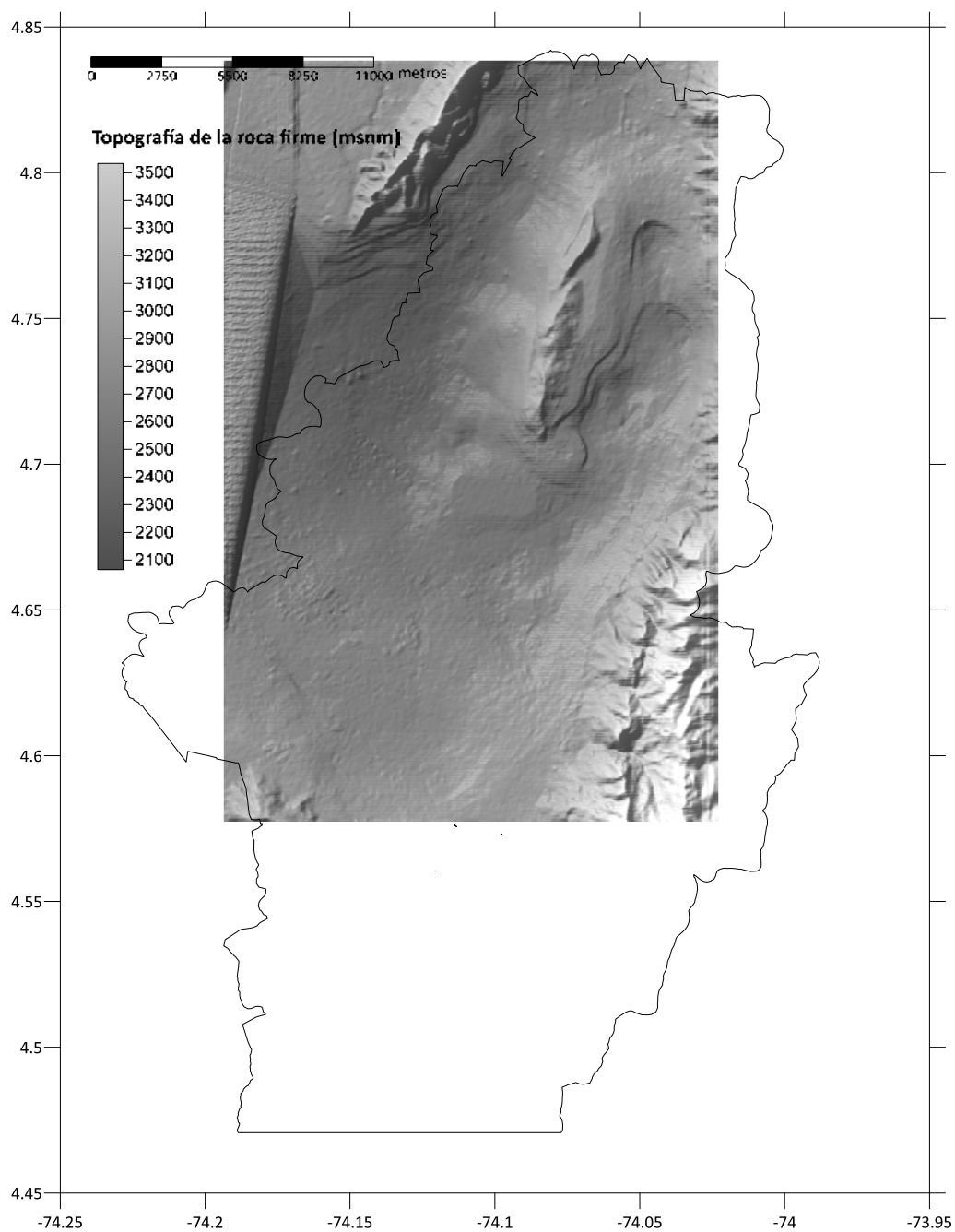


Figura 2.3. Geometría del terreno firme (roca). Escala está dada en metros sobre el nivel del mar

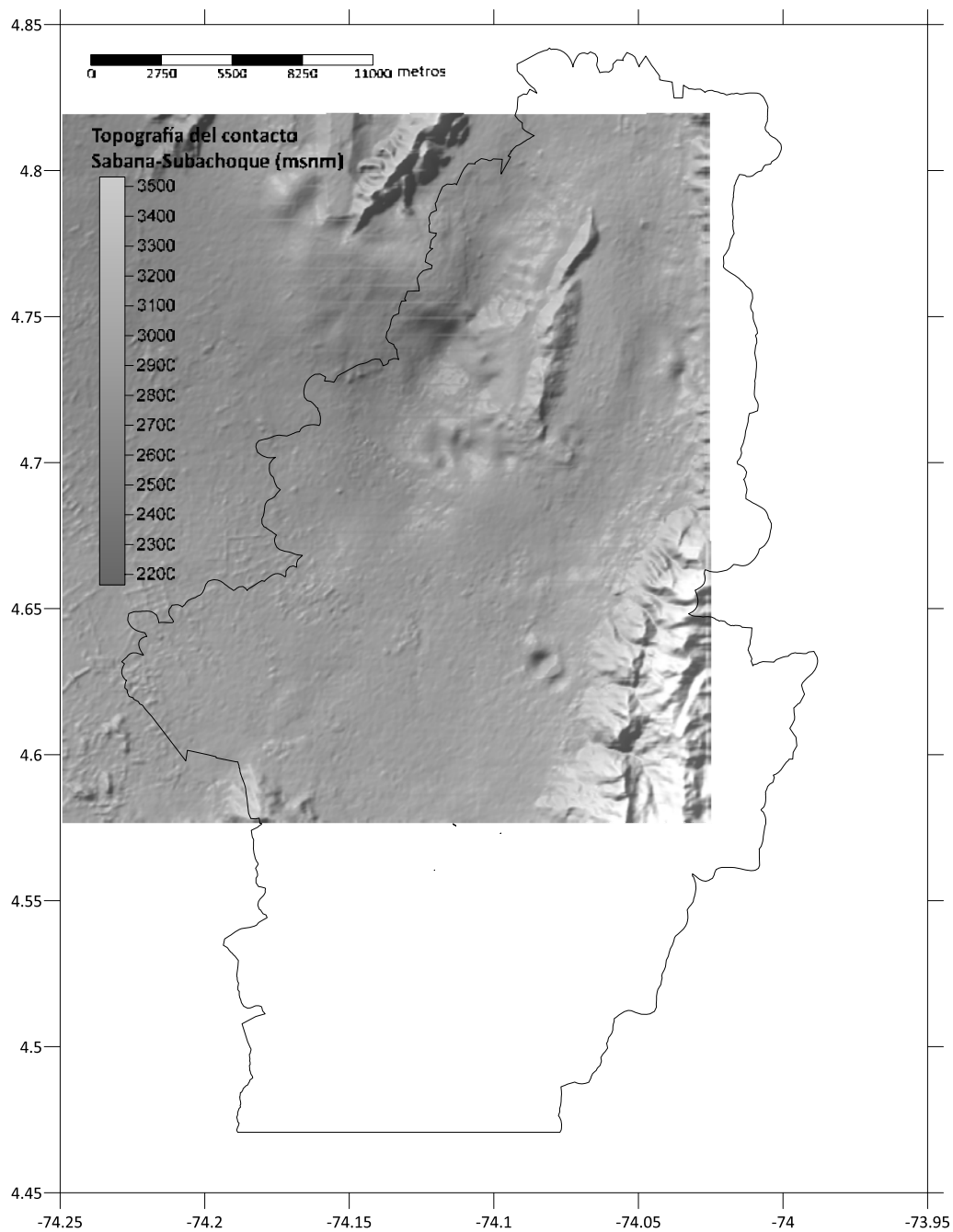


Figura 2.4. Geometría contacto Sabana-Subachoque. Escala está dada en metros sobre el nivel del mar

De la información geométrica empleada se determinó el contorno de afloramiento de roca firme en la ciudad (ver Figura 2.5).

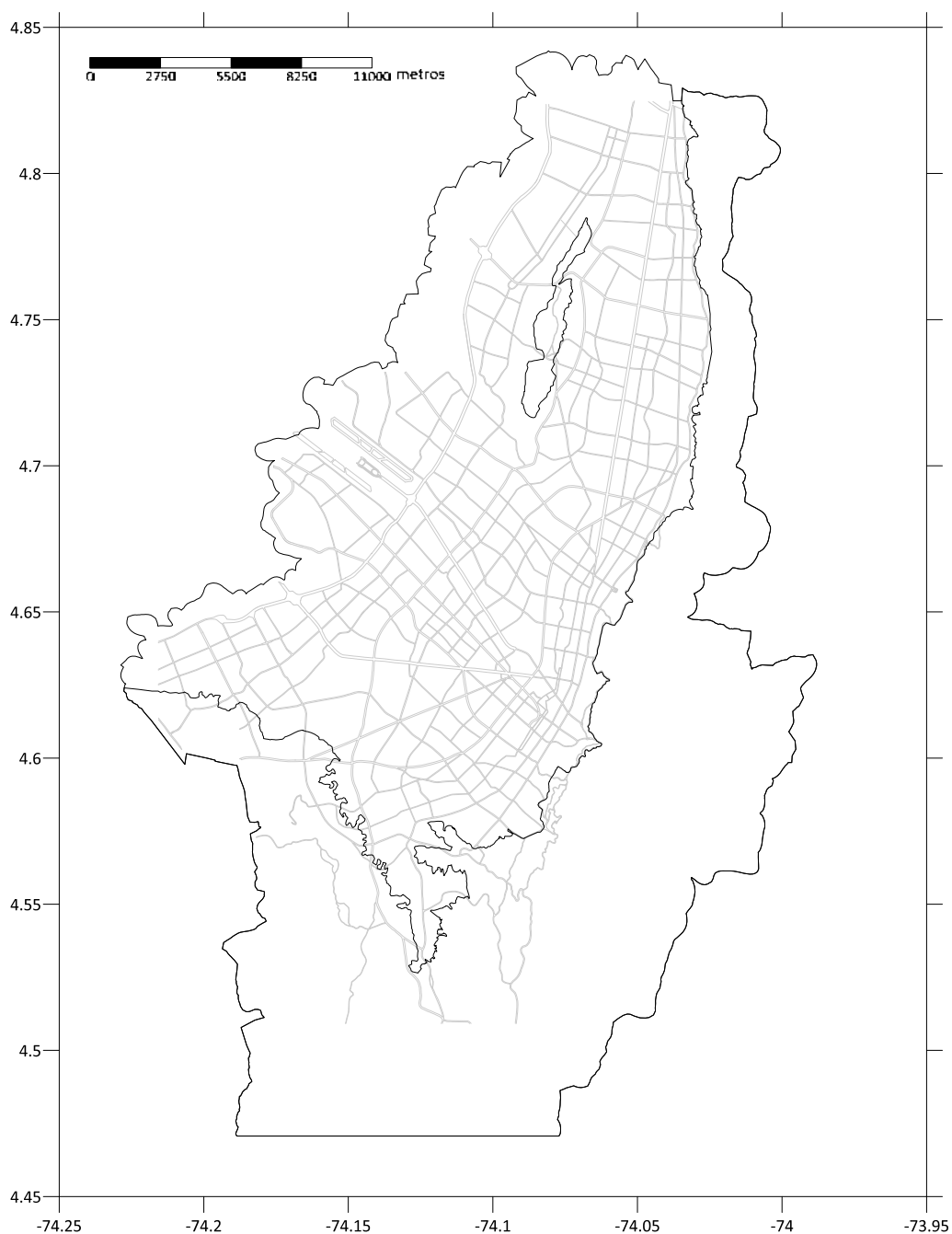


Figura 2.5. Contorno de afloramiento de roca firme.

2.3 CONDICIONES DE BORDE

Las condiciones de borde, como se entienden en esta metodología, corresponden al límite superficial de la geometría del depósito, es decir, la topografía, y a la localización del nivel freático. La Figura 2.6 presenta la topografía empleada en esta

monografía, la cual tiene una resolución espacial de 90 m. Para el caso de la geometría de la tabla de agua, se calculó una malla de valores mediante la interpolación de los datos de profundidad medidos en los sondeos disponibles, siguiendo la metodología Krigging. La Figura 2.7 muestra la profundidad estimada el nivel freático en la ciudad, aplicada solamente a la extensión geográfica en donde hay datos disponibles.

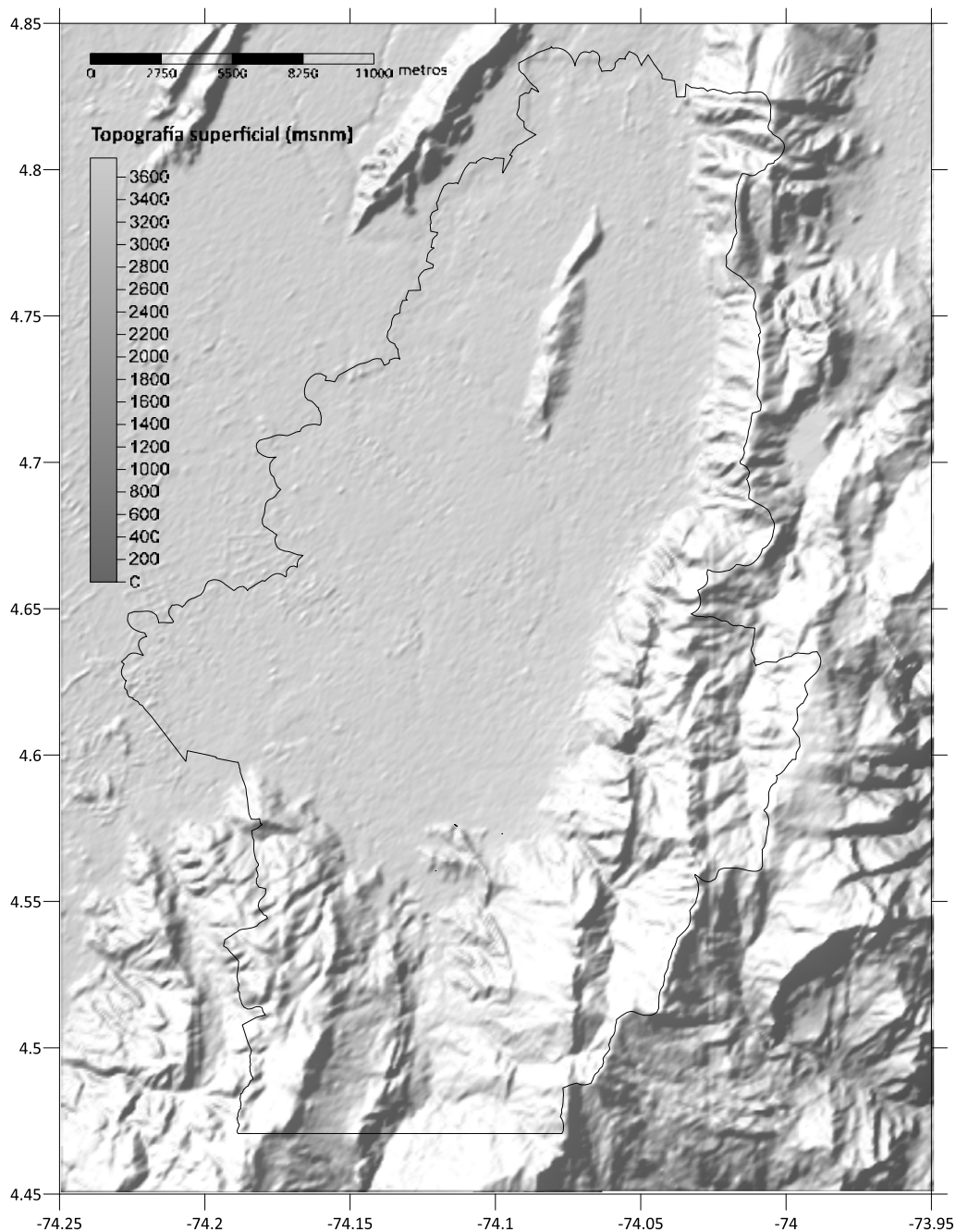


Figura 2.6. Topografía empleada. Escala está dada en metros sobre el nivel del mar.

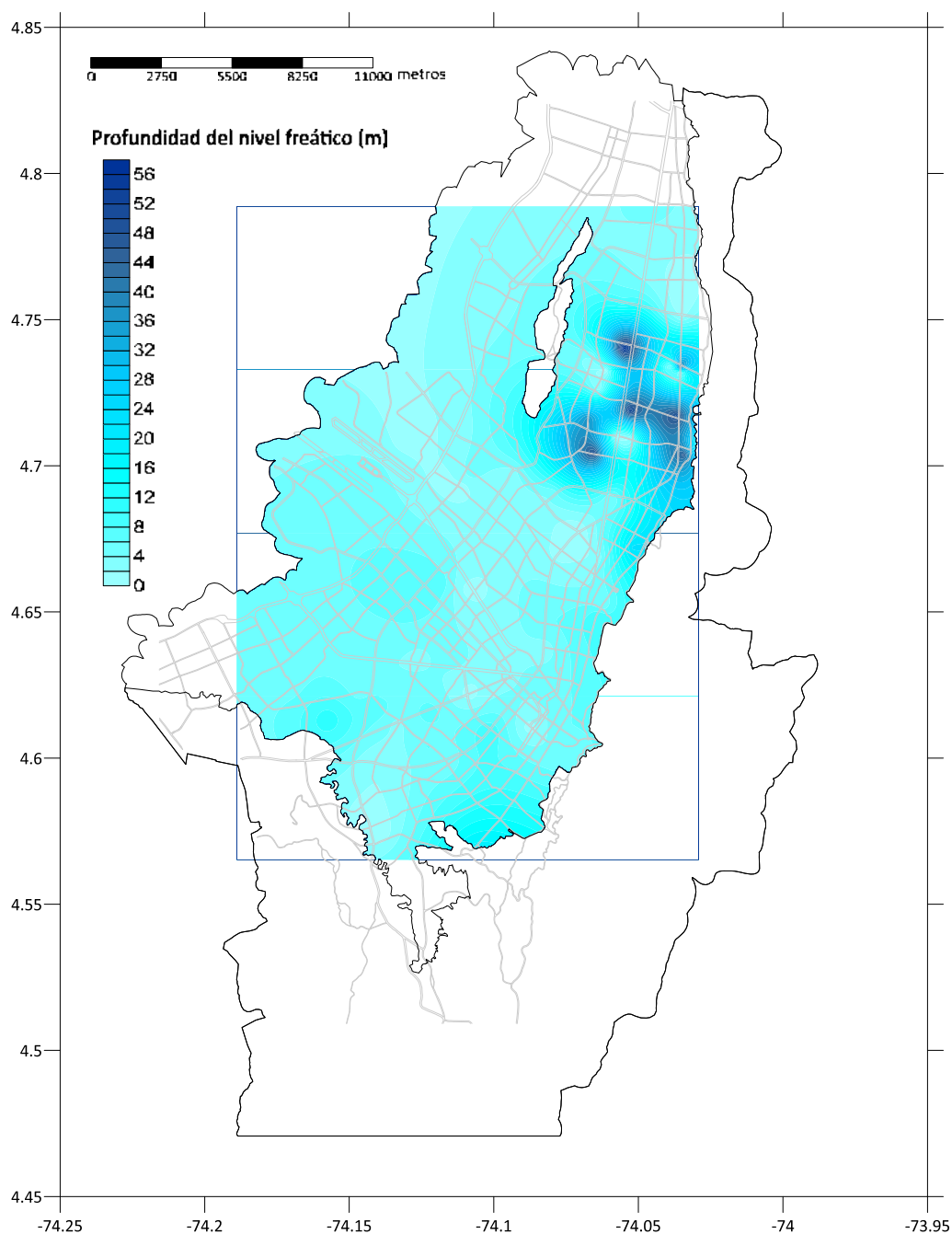


Figura 2.7. Profundidad del nivel freático.

2.4 INFORMACIÓN GEOTÉCNICA

La ciudad de Bogotá cuenta con una serie de estudios geotécnicos detallados, resultantes de campañas de levantamiento de información asociadas a los estudios de microzonificación sísmica, Metro y estudios de respuesta local. Esta información es

centralizada por el IDIGER³ en lo que se conoce como la Base de Datos Geotécnica de Bogotá. Los datos empleados en este estudio corresponden a los utilizados en el Estudio de Actualización de la Microzonificación Sísmica ejecutado por la Universidad de los Andes (2006). De los cerca de 200 sondeos existentes en la ciudad, se seleccionaron 84 debido a la calidad de la información contenida. Para estos 84 sondeos fue posible establecer un perfil en profundidad de propiedades índice, límites de Atterberg, peso específico y velocidad de onda de corte.

La Tabla 2.1 presenta el listado de 84 Sondeos empleados en esta monografía. Los códigos de los sondeos indican la fuente de información: N = Microzonificación Sísmica de Bogotá (1997), O = IDIGER, y PA = Proyecto Metro de Bogotá. La Figura 2.8 presenta la ubicación geográfica de estos sondeos en la ciudad.

Tabla 2.1. Listado de los sondeos empleados.

Código	Nombre	Profundidad (m)	Código	Nombre	Profundidad (m)
N1	Sondeo de la Calle 170 - F.F.N.N.	46	O10	Calle 134 con Cra 46A	46
N2	Sondeo de Jardines de Paz	48	O11	Carrera 9 N° 151-52	40
N4	Sondeo Club Suboficiales	49	O15	Carrera 68B N° 43B-20	50
N5	Sondeo Cll. 100 Autonorte	49	O17	Sondeo Biblioteca UNAL	50
N9	Sondeo Autonorte - Calle 127	26	O20	Urbanización Mazurén	32
N9A	Sondeo Cll. 126 - Cra. 29	182	O22	Urbanización Cerros del Country	12
N13	Sondeo Clínica Corpas	47	O23	Edificios Teusacá	22
N14	Sondeo Av. Cundinamarca	229	O27	Icata	42
N17	Sondeo Bochica Norte	46	O28	Hacienda el Cedro - E 425	96
N19	Sondeo Barrio El Luján	47	O29	Edificio Karon Real	22
N20	Sondeo Cll. 68 Cra. 82	19	O32	Urbanización Lago de Córdoba	48
N21	Sondeo Terminal de Transportes	91	O33	Hotel Cosmos Suites - E 410	20
N22	Cll. 13 Av. Boyacá	23	O34	Edificio EAAB- E 348	48
N23	Av. 68 Av. Americas	46	O37	Padua	50
N24	Centro Comercial Plaza de las Americas	18	O38	Edificio Av.9 con calle 125	45
N25	Plazoleta Banderas Av. Americas	18	O39	Urbanización Atalaya de Iberia	37
N26	Barrio Patio Bonito BOSA	19	O40	Urbanización Mazurén	56
N27	Parque Timiza	120	O41	Country Reservado	49
N28	Autopista Sur Av. 68	48	PA1	Sondeo Cll. 68 Cra. 110	100
N29	Autopista Sur SOACHA	19	PA5	Sondeo Cll. 68 Cra. 91	39
N30	Autopista Sur SOACHA	18	PA7	Sondeo Cll. 68 Cra. 83	46
N31	Barrio Bosa Holanda	19	PA9	Sondeo Av. Cll. 68 Cra. 74 A	51
N33	Monumento Los Heroes	90	PA10	AvCll 68 AvBoyaca	27
N34	Escuela Militar Cll. 80	18	PA11	Sondeo Cll. 68 Cra. 66	27
N36	Cll. 63 Cra. 30	19	PA13	Sondeo Cll. 72 Av. 68	49
N37	Cll. 26 Cra. 50	48	PA14	Cll 72 Cra 50	60
N38	Cra. 53 Cll. 13	18	PA15	Sondeo Cll. 72 Cra. 45 A	50
N39	CAD Av. AmericasCra. 30	19	PA16	Cll 72 No 37-37	97
N42	Sondeo Cra. 30 - Clle. 6	19	PA17	Sondeo Cll. 72 Cra. 30	49
N43	Av. Iero de Mayo Cra. 30	94	PA19	Sondeo Cll.72 Cra. 24	50
N44	Sondeo Cra. 27 - Clle. 44S	18	PA25	Sondeo Cra. 7 Cll. 65	40

³ Instituto Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático.

Código	Nombre	Profundidad (m)	Código	Nombre	Profundidad (m)
N45	Sondeo del Tunal	43	PA26	Cra 7 Cll 61	40
N48	Sondeo Uniagraria	114	PA37	Sondeo Cra. 10 Cll. 18	49
N49	Sondeo Ingeominas	167	PA43	Sondeo Cll. 13 Cra. 19	49
N50	Sondeo Cll. 80 Av. Boyacá	43	PA46	Cll 13 Av. Ciudad de Quito	49
N51	Sondeo Aeropuerto	246	PA49	Sondeo Av. Ferrocarril Cll. 9	48
O01	Parque Central Pontevedra	52	PA52	Av Ferrocarril Cll 2	48
O02	La Candelaria	8	PA55	Sondeo Av. Ferrocarril Av. 1 Mayo	48
O03	Cra 46A N° 135-95	44	PA58	Av 1 Mayo Cra 65	49
O04	Cra 48F N° 95-80	46	PA61	Sondeo Av. 1 Mayo Cra. 74	48
O05	Carrera 46 con calle 140A	30	PA64	Diag 43 S Transv 81	50
O09	Calle 170 N° 31-20	49	PA67	Sondeo Diag. 43 S Cra. 86	49

En algunos casos, los sondeos no cuentan con un perfil completo de velocidad de onda de cortante. Es necesario entonces completar estos perfiles. Para tal fin se aplicó la metodología propuesta por la Sociedad Colombiana de Geotecnia (SCG, 2006).

El perfil de velocidad de onda de corte, se puede establecer a partir de los valores de módulo de rigidez cortante máximo para cada material, a través de la siguiente relación,

$$V_s = \sqrt{\frac{G_o}{\rho}} \quad (\text{Ec. 2-1})$$

en donde V_s es la velocidad de onda de corte medida en el sitio para bajas deformaciones, ρ es la densidad de masa del material y G_o es el módulo de cortante máximo (valor inicial para bajas deformaciones). De acuerdo con el modelo geotécnico propuesto por la SCG (2006), el G_o de los depósitos arcillosos de la ciudad (formación sabana) puede determinarse con la siguiente relación,

$$G_o = \frac{K \cdot F(e) \cdot \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma_{ref}} \right)^m RSC^k}{2(1 + \nu)} \quad (\text{Ec. 2-2})$$

en donde K es una constante que depende del tipo de material, ν es la relación de Poisson, σ'_c es el esfuerzo de confinamiento efectivo, σ_{ref} es un esfuerzo de referencia, m es el exponente de la relación de esfuerzos, RSC es la relación de sobreconsolidación, k es el exponente de la relación de sobreconsolidación, $F(e)$ es la función dada por Hardin y Black (1968). De acuerdo con el modelo geotécnico propuesto por la SCG (2006): $\nu = 0.4$, $\sigma_{ref} = 100$ Kpa, $m = 0.75$, $RSC = 3$,

$$K = \begin{cases} 324500 & \text{para } z < 5m \\ 3056.4 \cdot IP + 31031 & \text{para } z \geq 5m \end{cases} \quad (\text{Ec. 2-3})$$

$$k = \begin{cases} -0.00004 \cdot IP^2 + 0.0145 \cdot IP & \text{para } z < 5m \\ 0 & \text{para } z \geq 5m \end{cases} \quad (\text{Ec. 2-4})$$

$$F(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2} \quad (\text{Ec. 2-5})$$

en donde IP es el índice de plasticidad y e es la relación de vacíos.

Para el caso de depósitos de arenas y suelos granulares (formación Subachoque), se emplea la relación propuesta por Seed e Idriss 1970,

$$G_o = 220 \cdot K_{2max} \cdot (\sigma'_c)^{0.5} \quad (\text{Ec. 2-6})$$

en donde K_{2max} es una constante que depende del material. En esta monografía se asumió un valor de $K_{2max} = 70$, que corresponde a suelos granulares de origen aluvial (Seed e Idriss 1970).

Adicionalmente, los sondeos disponibles no cubren necesariamente toda la profundidad del depósito blando. La Figura 2.9 muestra la profundidad explorada del depósito obtenida de los 84 sondeos disponibles. Es posible observar que, en gran extensión de la ciudad, la profundidad no supera los 40 metros. La Figura 2.10 muestra el porcentaje explorado del depósito blando, calculado a partir de la relación entre la profundidad explorada y la profundidad a la roca en cada sitio de sondeo. Es posible observar que en la gran mayoría del área de la ciudad, el porcentaje explorado no supera el 30%.

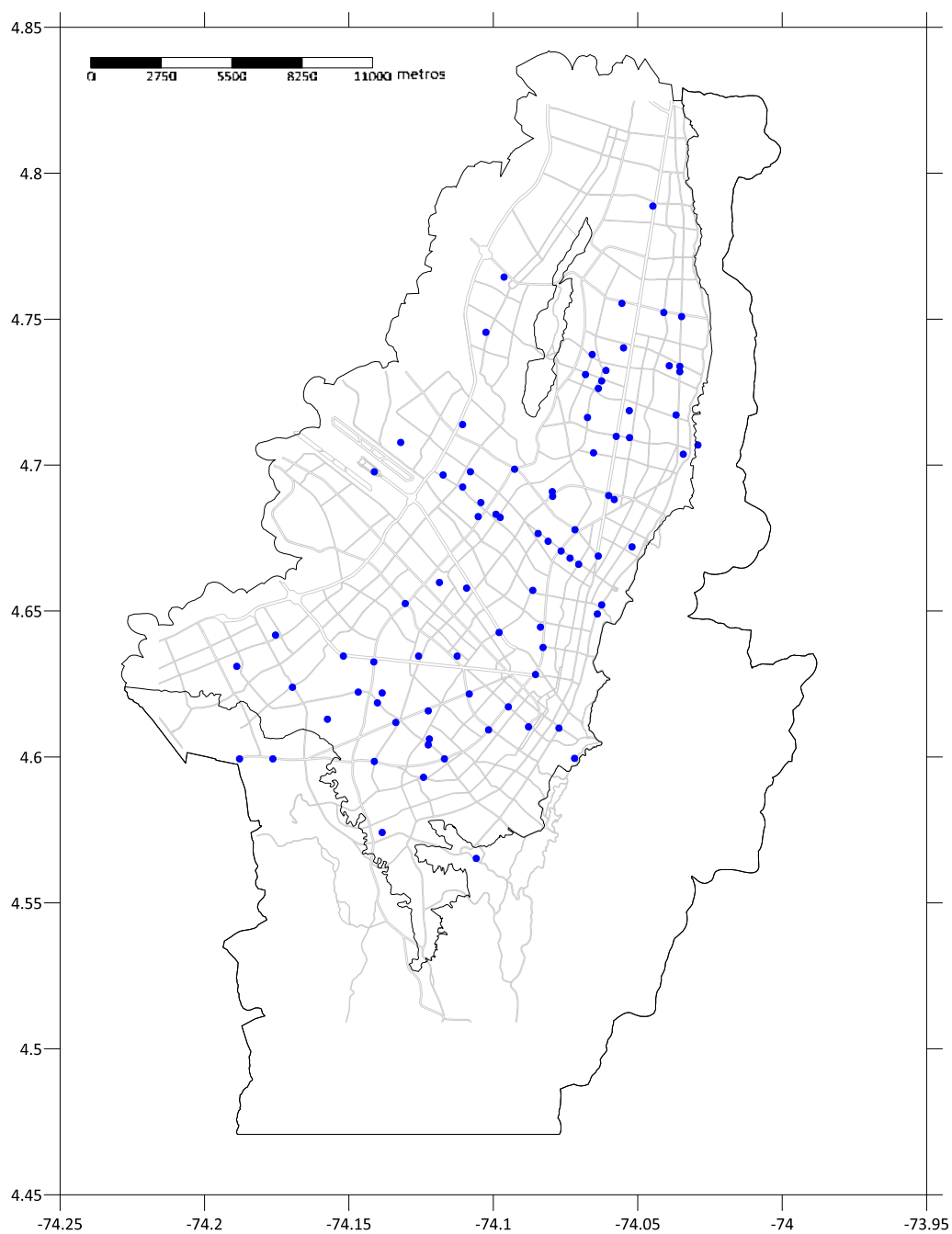


Figura 2.8. Ubicación de los sondeos en Bogotá

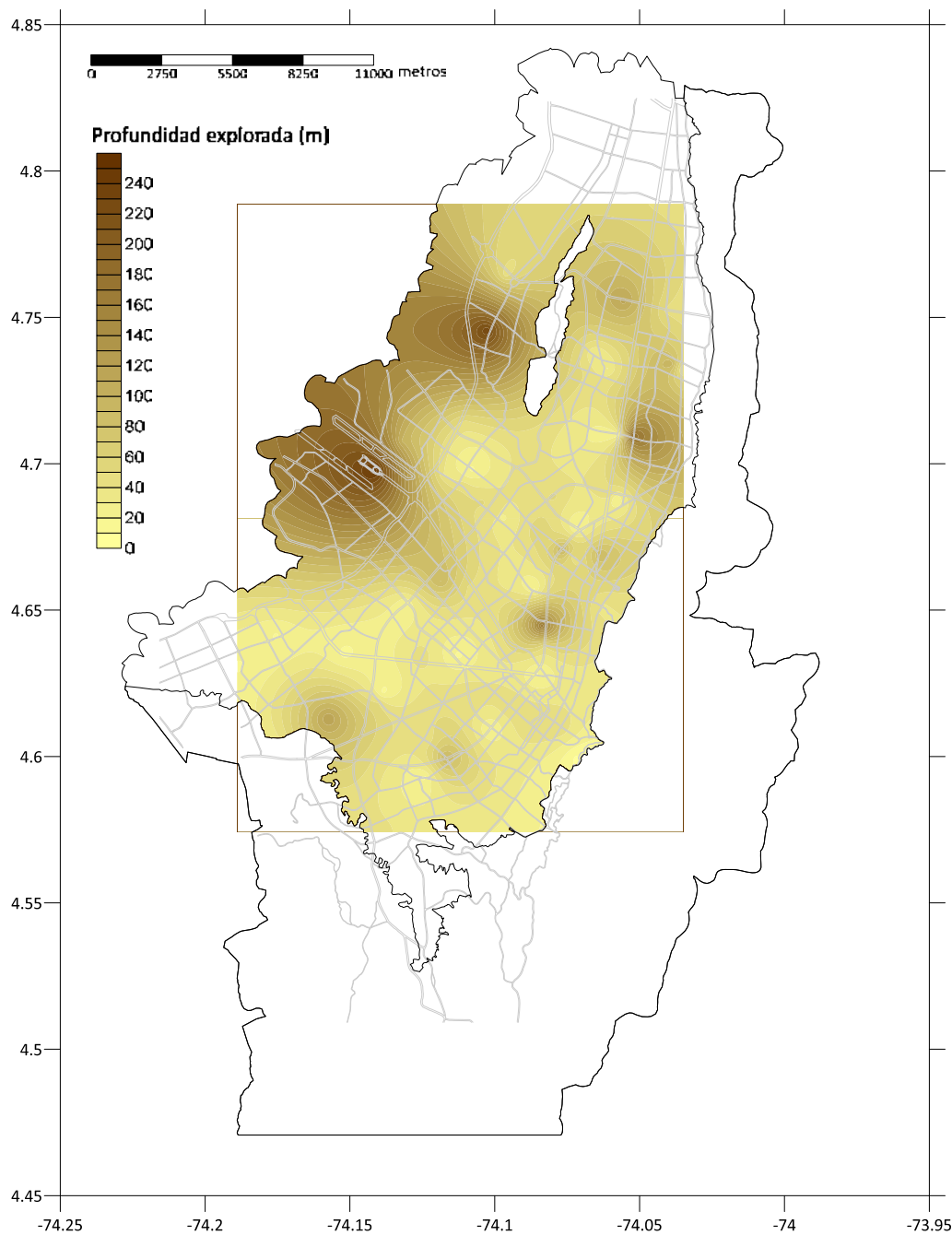


Figura 2.9. Profundidad explorada

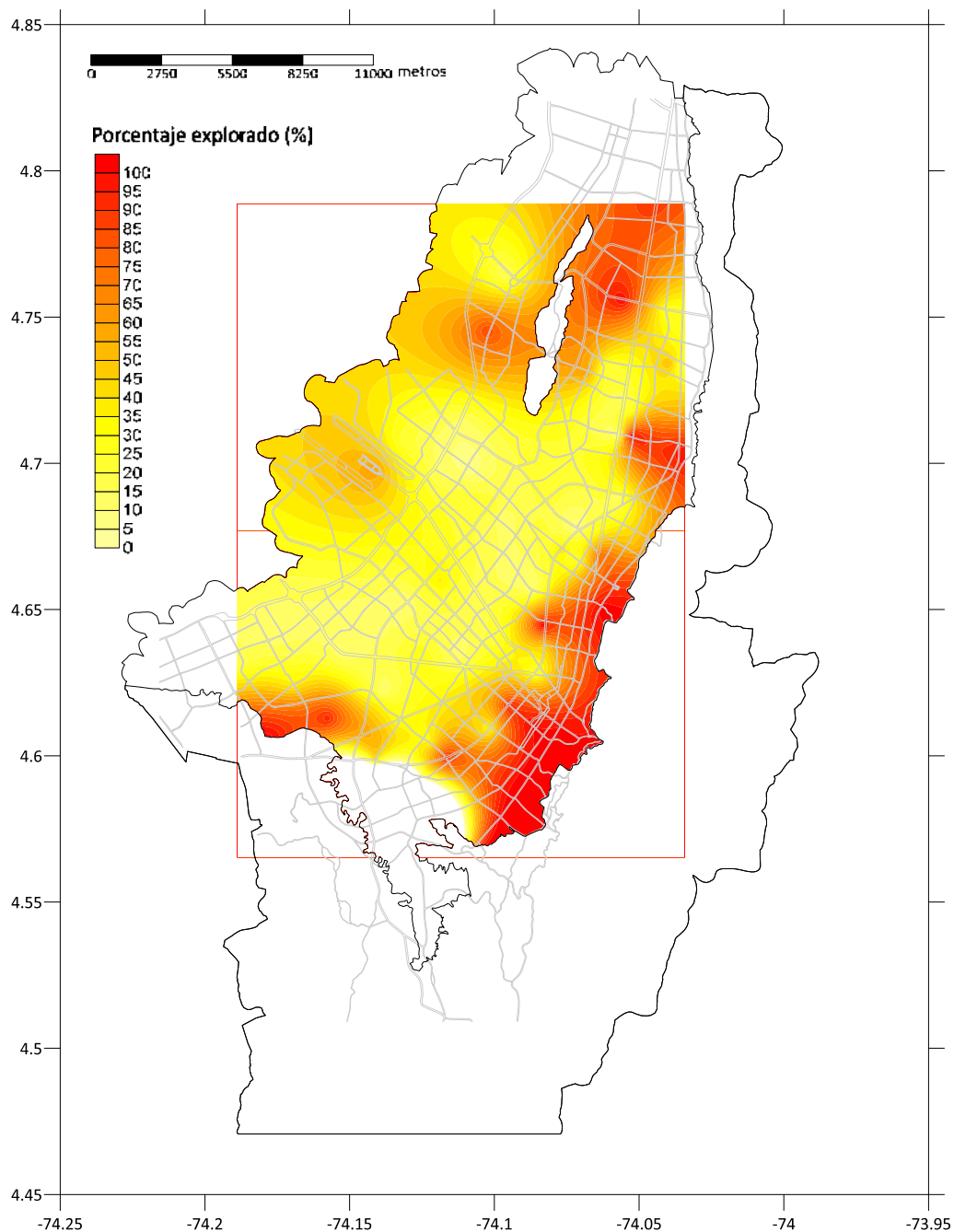


Figura 2.10. Porcentaje explorado del depósito blando

Los sondeos se completaron hasta alcanzar la profundidad de roca firme, con propiedades geotécnicas supuestas o provenientes de sondeos cercanos de mayor profundidad. Se inició con los sondeos que no disponen de otros sondeos cercanos de mayor profundidad, como por ejemplo el sondeo N51, el cual es el más profundo disponible (profundidad explorada = 246 m), y está ubicado sobre la zona de

depósito blando más profunda de Bogotá (profundidad a la roca = 430 m). En este caso, las propiedades básicas (humedad, peso específico e índice de plasticidad) fueron extendidas de manera constante en profundidad desde la profundidad final del sondeo hasta el nivel de roca firme. Las propiedades dinámicas (velocidad de onda de cortante y módulo de cortante) fueron obtenidas usando el procedimiento descrito anteriormente. La Figura 2.11 muestra los perfiles en profundidad del peso específico y la velocidad de onda de cortante para el sondeo N51. El punto rojo marca el final de los datos obtenidos en campo, y la línea punteada indica el resultado de la extrapolación. Puede verse que la extrapolación constante para el peso específico, implica una extrapolación cuasi-lineal para la velocidad de onda de cortante.

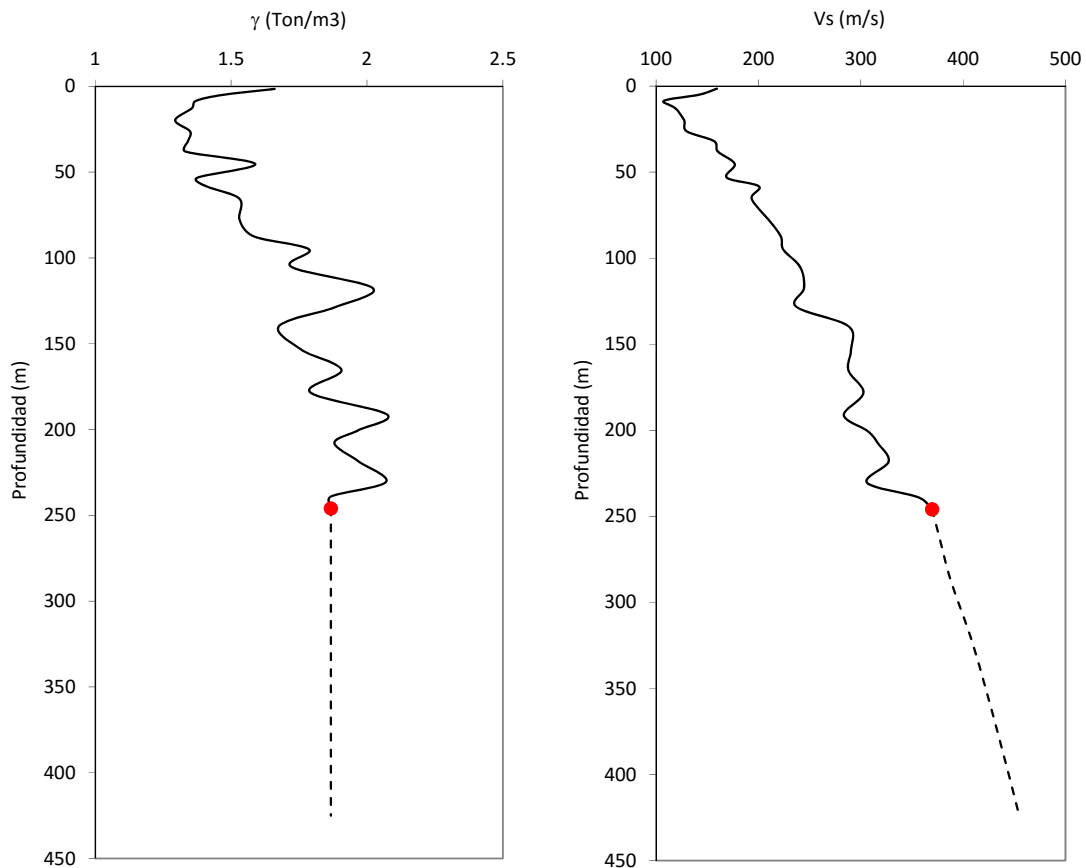


Figura 2.11. Perfiles extrapolados de peso específico y velocidad de onda de cortante para el sondeo N51

Para los sondeos ubicados en cercanías a otros sondeos de mayor profundidad, se completó copiando las propiedades del sondeo de mayor profundidad. Por ejemplo, el sondeo PA1 (profundidad máxima = 100 m; profundidad a la roca = 430 m) se completó con los datos del sondeo N51 extrapolado. La Figura 2.12 muestra los perfiles en profundidad del peso específico y la velocidad de onda de cortante para el sondeo PA1. El punto rojo marca el final de los datos obtenidos en campo, y la línea punteada indica el resultado de la complementación con el sondeo N51.

El procedimiento descrito se ejecutó en todos los sondeos con información incompleta en profundidad, con el fin de tener una base de información adecuada para la definición de tipos de suelo por formaciones geológicas.

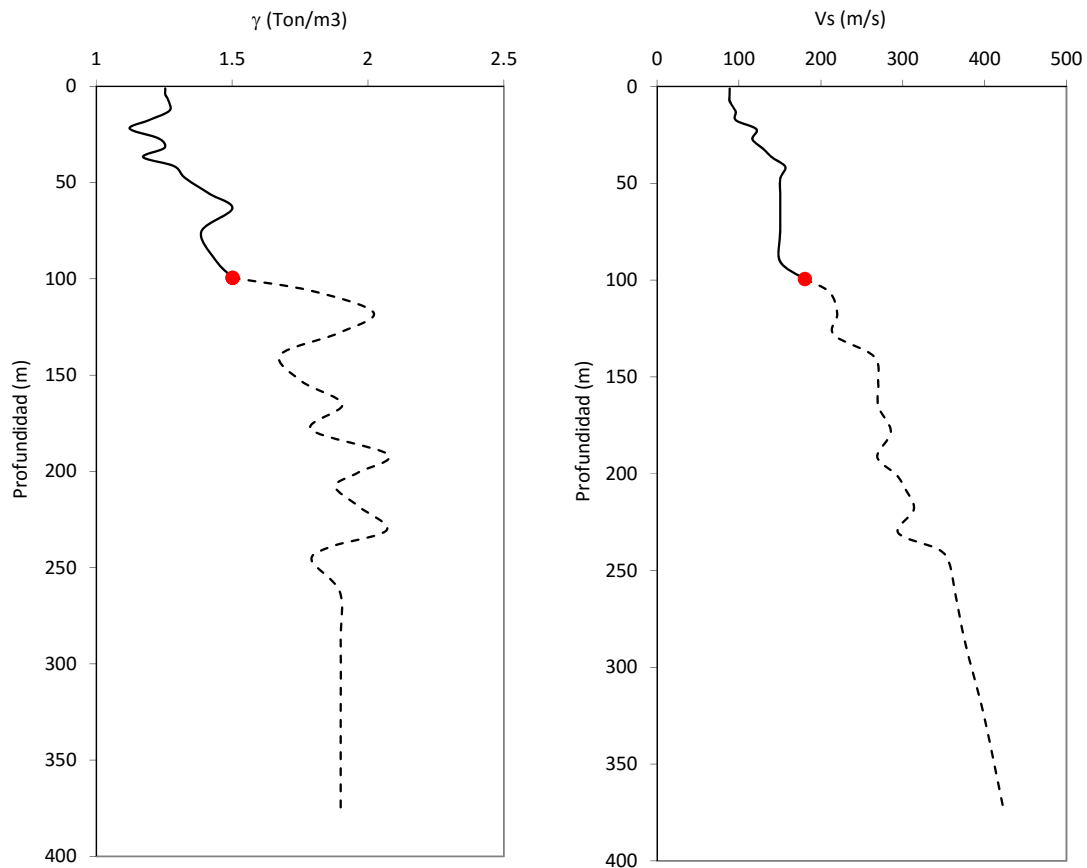


Figura 2.12. Perfiles completados de peso específico y velocidad de onda de cortante para el sondeo PA1

2.5 DEFINICIÓN DE LOS TIPOS DE SUELO DE ANÁLISIS

A partir de la información existente en los 84 sondeos empleados, se realiza un análisis estadístico sobre los datos asociados a cada formación geológica, de manera que se obtienen perfiles de la variación en profundidad de las principales propiedades geotécnicas. Estas propiedades quedan definidas por medio de un valor esperado, varianza, y límites mínimo y máximo, para cada profundidad.

Se definieron 2 tipos de suelo, característicos de las formaciones Subachoque y Sabana respectivamente. Estos tipos de suelo constituyen el conjunto de propiedades geotécnicas que definen las características de los materiales.

2.5.1 Suelo tipo 1 (formación Sabana)

El suelo tipo 1 es un suelo de características arcillosas, asociado a la formación Sabana. La Figura 2.13 presenta los perfiles en profundidad de variación de las principales propiedades geotécnicas. Se presenta el perfil del valor esperado más y menos una desviación estándar.

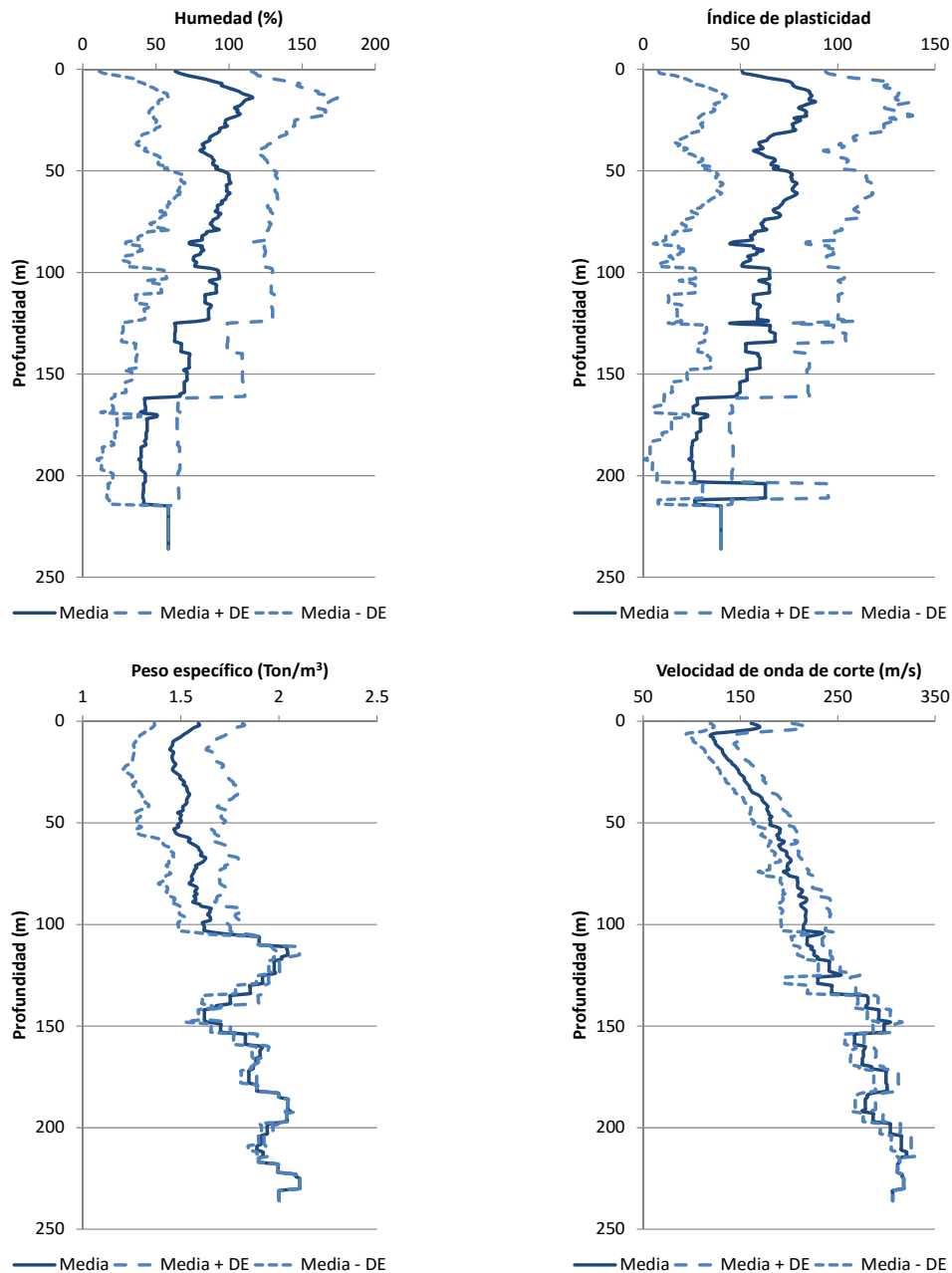


Figura 2.13. Perfiles de algunas propiedades geotécnicas del suelo tipo 1

Las curvas de degradación del módulo dinámico de cortante y de amortiguamiento con la deformación cortante se definen de acuerdo con los resultados del modelo

geotécnico de la ciudad elaborado por la SCG (2006). En dicho estudio se plantean el uso de las relaciones propuestas por Ishibashi y Zhang (1993), para los suelos arcillosos (formación Sabana),

$$\frac{G}{G_o} = K(\gamma, IP)(\sigma'_c)^{m(\gamma, IP) - m_o} \quad (\text{Ec. 2-7})$$

$$\beta = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 \cdot IP^{1.3})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_o} \right)^2 - 1.547 \left(\frac{G}{G_o} \right) + 1 \right] \quad (\text{Ec. 2-8})$$

en donde G es el módulo de cortante dependiente de la deformación, γ es la deformación cortante y los factores $K(\gamma, IP)$, $m(\gamma, IP) - m_o$ y $n(IP)$ están dados por,

$$K(\gamma, IP) = 0.5 \left[1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(IP)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right] \quad (\text{Ec. 2-9})$$

$$m(\gamma, IP) - m_o = 0.272 \left[1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right] \exp(-0.0145 \cdot IP^{1.3}) \quad (\text{Ec. 2-10})$$

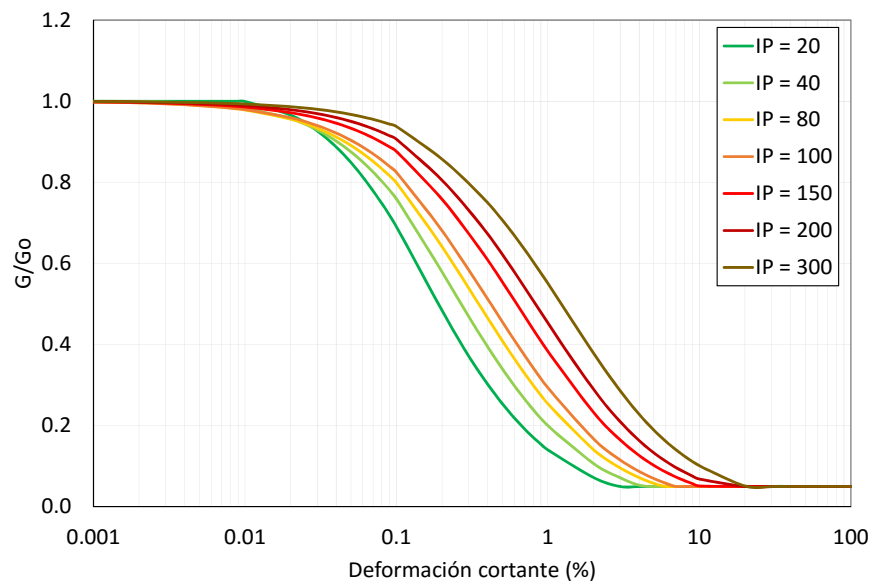
$$n(IP) = \begin{cases} 0.0 & \text{para } IP = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} \cdot IP^{1.404} & \text{para } 0 < IP \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} \cdot IP^{1.976} & \text{para } 15 < IP \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} \cdot IP^{1.115} & \text{para } IP > 70 \end{cases} \quad (\text{Ec. 2-11})$$

Las curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento son modificadas por medio de una corrección propuesta por la SCG (2006) para acomodar los modelos al comportamiento dinámico típico de los suelos de Bogotá. Estos factores de corrección se presentan en la Tabla 2.2.

La Figura 2.14 presenta las curvas de degradación de rigidez para diferentes valores de IP . La Figura 2.15 presenta las correspondientes curvas de amortiguamiento. En ambos casos se definió un esfuerzo efectivo de confinamiento de 100 KPa.

Tabla 2.2. Factores de corrección de G/G_0 para suelos de Bogotá (SCG 2006).

γ [%]	Factor corrección	γ [%]	Factor corrección
0.0001	1.00	0.06	0.77
0.0002	1.00	0.07	0.75
0.0003	1.00	0.08	0.74
0.0004	1.00	0.09	0.73
0.0005	1.00	0.1	0.73
0.0006	1.00	0.2	0.68
0.0007	1.00	0.3	0.65
0.0008	1.00	0.4	0.64
0.0009	1.00	0.5	0.63
0.001	1.00	0.6	0.62
0.002	0.97	0.7	0.61
0.003	0.95	0.8	0.61
0.004	0.95	0.9	0.60
0.005	0.94	1	0.60
0.006	0.93	2	0.59
0.007	0.92	3	0.58
0.008	0.92	4	0.58
0.009	0.91	5	0.58
0.01	0.90	6	0.58
0.02	0.86	7	0.58
0.03	0.83	8	0.58
0.04	0.80	9	0.58
0.05	0.78	10	0.58

**Figura 2.14. Curvas de degradación de rigidez para suelos blandos cohesivos.**

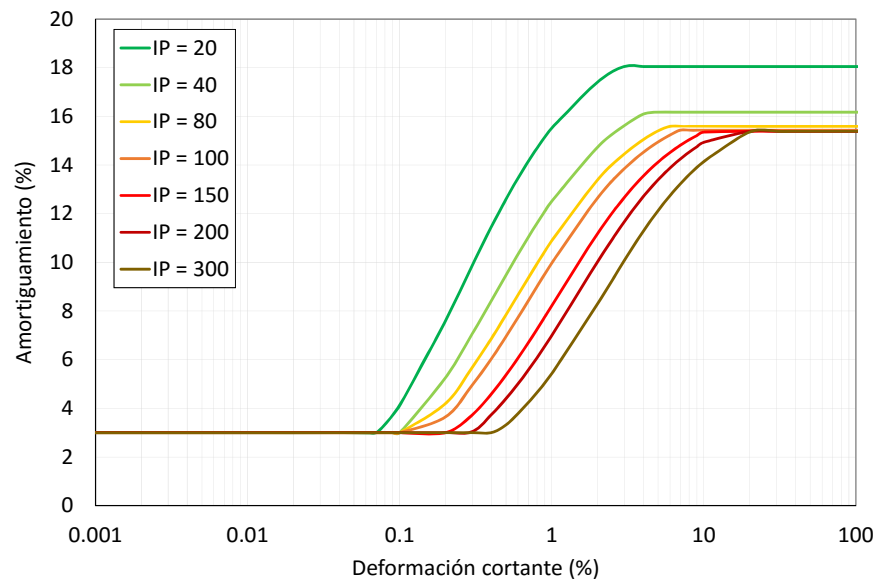
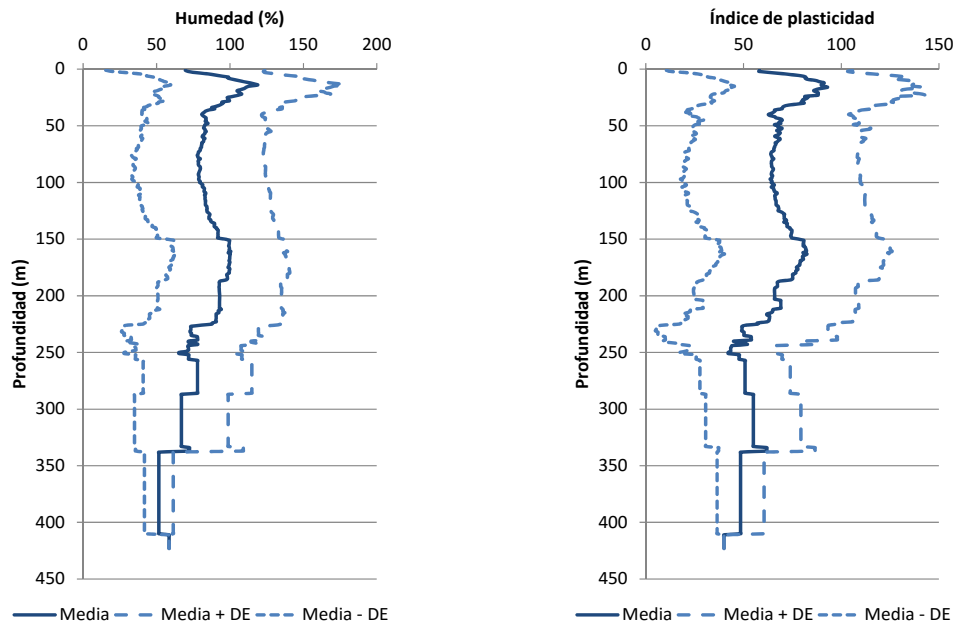


Figura 2.15. Curvas de amortiguamiento para suelos blandos cohesivos.

2.5.2 Suelo tipo 2 (formación Subachoque)

El suelo tipo 2 es un suelo con alto contenido de material grueso, arenas principalmente, asociado a la formación Subachoque. La Figura 2.16 presenta los perfiles en profundidad de variación de las principales propiedades geotécnicas.



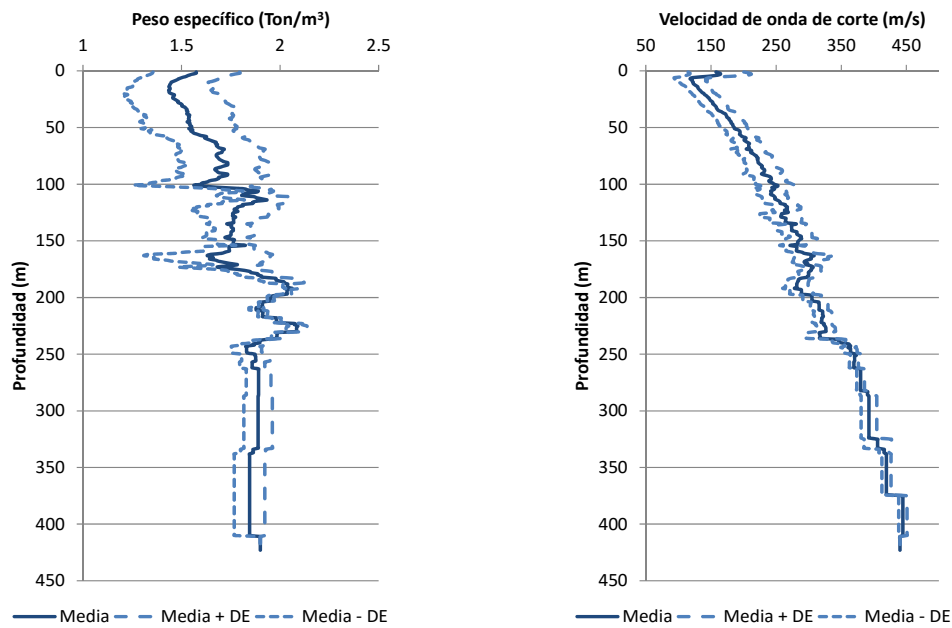


Figura 2.16. Perfiles de algunas propiedades geotécnicas del suelo tipo 2

Como modelo de degradación de rigidez y amortiguamiento, se emplea el valor promedio de la relación propuesta por Seed e Idriss (1970) (ver Figura 2.17 y Figura 2.18).

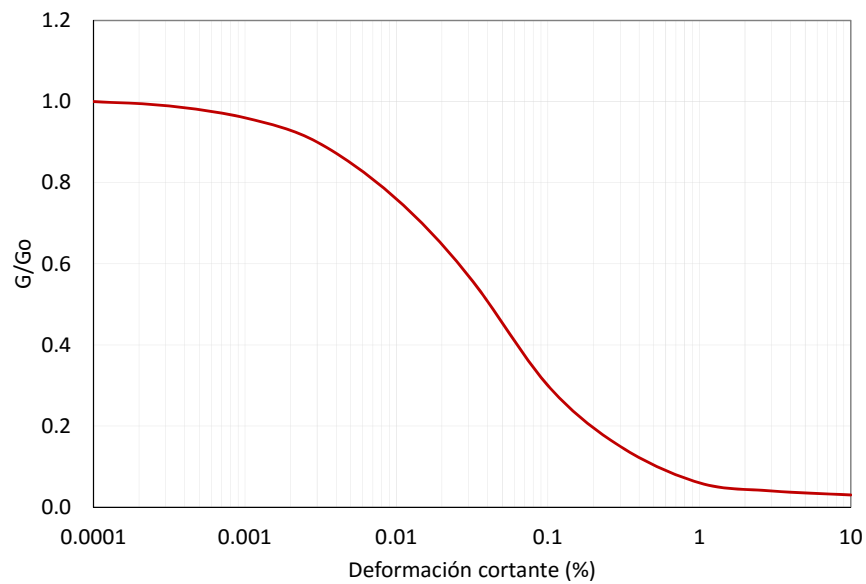


Figura 2.17. Curva de degradación de rigidez para suelos granulares.

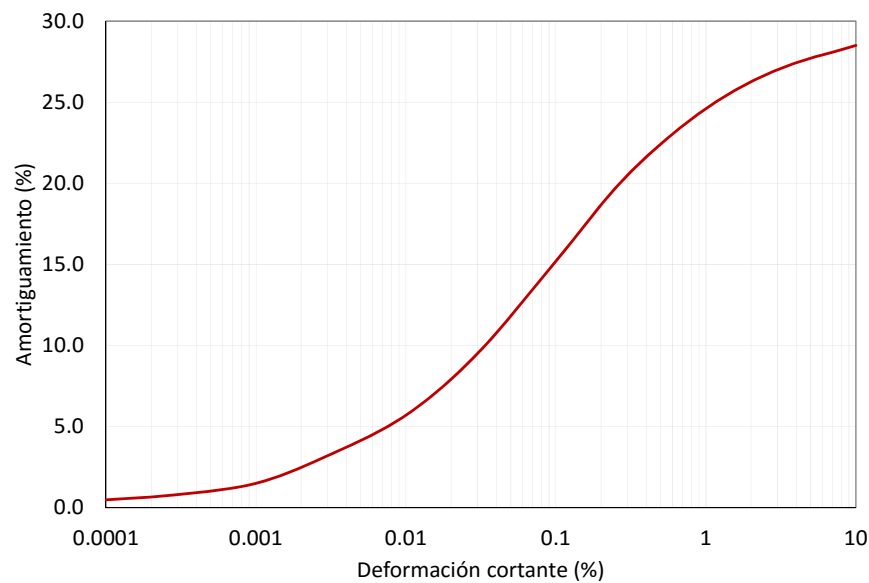


Figura 2.18. Curva de amortiguamiento para suelos granulares.

2.6 MALLA DE CÁLCULO

La malla de cálculo empleada se presenta en la Figura 2.19. Se definió una malla de 25x25 nodos en cada dirección, para un total de 625 sitios de cálculo. El cuadro gris indica la extensión del análisis. La malla de cálculo no cubre toda la extensión del área urbana de Bogotá, debido a que la información geométrica del modelo geológico no está disponible sino dentro de la extensión marcada en la Figura 2.19. El recuadro gris se mantendrá en todos los mapas de resultados presentados en esta monografía como referencia de la extensión geográfica del análisis.

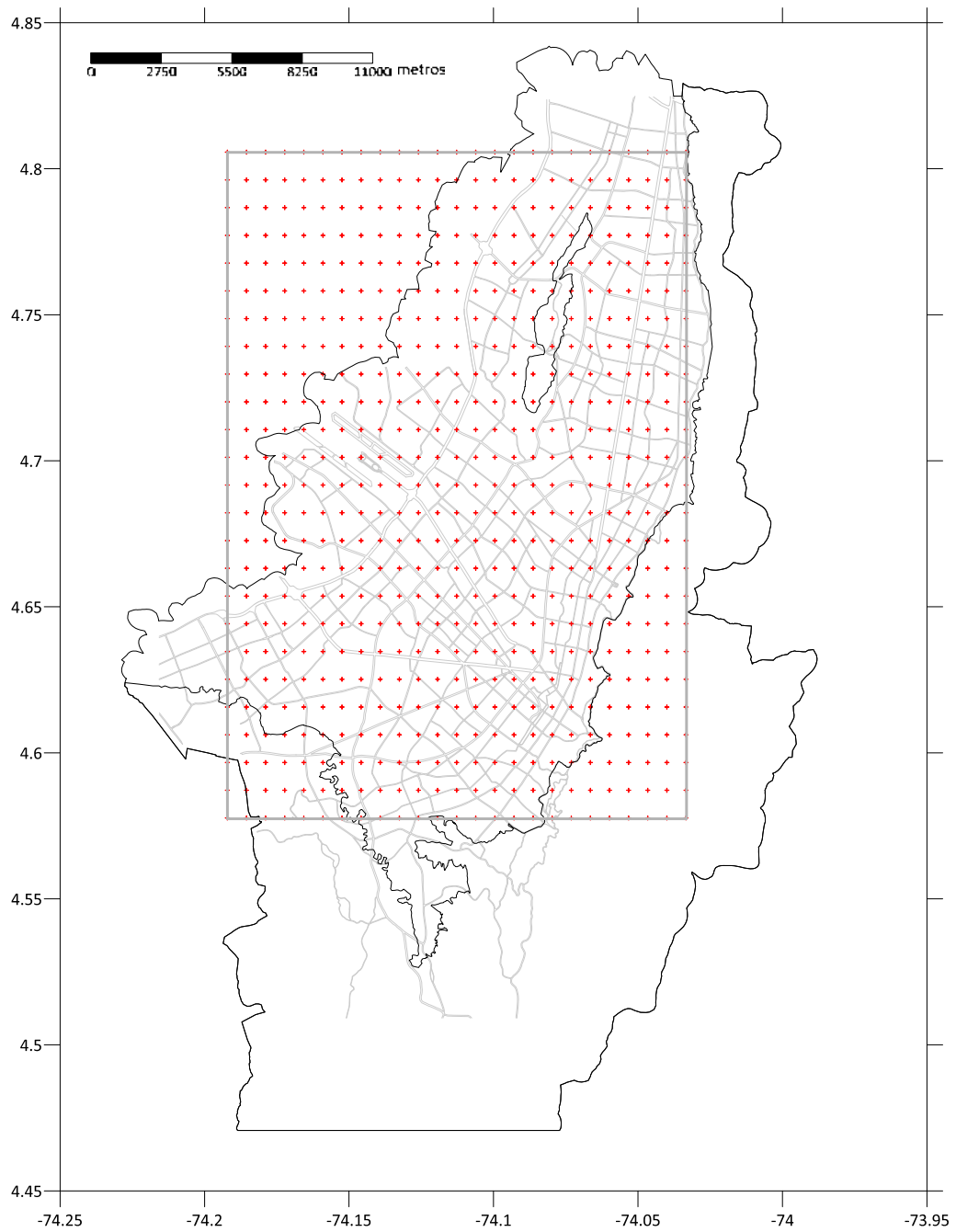


Figura 2.19. Malla de cálculo y extensión total del análisis

2.7 CONSTRUCCIÓN DE ESTRATIGRAFÍAS SINTÉTICAS

En cada nodo de la malla de cálculo se genera un conjunto de estratigrafías sintéticas, con capas de suelo uniforme de 3 metros de espesor, siguiendo la metodología indicada anteriormente en este capítulo. La Tabla 2.3 muestra los valores asignados a las propiedades geotécnicas en una simulación sobre un sitio de cálculo seleccionado al azar dentro de la malla de cálculo (sitio 226, ubicación WGS84: -74.1326, 4.5872, profundidad: 66 m). La Figura 2.20 muestra los perfiles en profundidad del peso específico, índice de plasticidad, velocidad de onda de cortante y módulo de cortante, para un conjunto de 50 simulaciones sobre el sitio 226, junto con el valor promedio de la propiedad correspondiente.

Tabla 2.3. Resultado de la construcción de una estratigrafía sintética.

ID	Prof. (m)	Tipo suelo	γ (T/m ³)	V_s (m/s)	G_0 (KPa)	ω (%)	LL	LP	IP	IL	σ'_c (T/m ²)
1	1.5	Suelo 1	1.30	242.0	7775.5	98.6	199.1	54.3	145	0.31	3.9
2	4.5	Suelo 1	1.48	175.3	4929.4	122.8	132.2	50.3	82	1.30	8.3
3	7.5	Suelo 1	1.51	141.0	3147.8	106.6	126.0	36.7	89	1.32	12.9
4	10.5	Suelo 1	1.46	131.5	2665.4	119.6	141.6	40.2	101	1.15	17.2
5	13.5	Suelo 1	1.48	135.2	2493.0	146.1	171.0	51.2	120	1.14	21.7
6	16.5	Suelo 1	1.65	131.8	2920.5	158.3	179.1	59.5	120	1.34	26.6
7	19.5	Suelo 1	1.56	131.6	3210.0	186.4	122.8	73.4	49	-0.01	31.3
8	22.5	Suelo 1	1.48	141.8	2490.5	139.4	115.6	78.5	37	-1.43	35.8
9	25.5	Suelo 1	1.59	152.3	3911.3	65.6	134.0	81.0	53	-1.34	40.5
10	28.5	Suelo 2	1.53	162.3	4424.7	38.2	172.7	78.0	95	-1.24	45.1
11	31.5	Suelo 2	1.52	153.2	3251.5	57.0	167.1	66.1	101	0.74	49.7
12	34.5	Suelo 2	1.56	156.4	4176.3	92.6	101.0	63.5	38	93.50	54.4
13	37.5	Suelo 2	1.55	180.8	4968.3	82.1	82.3	68.0	14	120.51	59.0
14	40.5	Suelo 2	1.61	193.8	6080.9	79.3	89.4	71.7	18	37.97	63.9
15	43.5	Suelo 2	1.59	195.6	6629.2	100.1	117.3	68.3	49	13.29	68.6
16	46.5	Suelo 2	1.50	178.2	4719.6	81.3	161.4	67.6	94	4.49	73.1
17	49.5	Suelo 2	1.58	175.5	4515.2	62.4	177.1	57.6	119	1.50	77.8
18	52.5	Suelo 2	1.68	190.6	6637.8	80.4	180.7	49.6	131	0.71	82.9
19	55.5	Suelo 2	1.70	195.7	6477.9	86.9	177.6	54.9	123	0.39	88.0
20	58.5	Suelo 2	1.68	195.0	6807.9	67.4	145.4	59.6	86	0.05	93.0
21	61.5	Suelo 2	1.63	198.8	6367.5	81.5	96.2	54.0	42	-8.00	97.9
22	64.5	Suelo 2	1.63	219.9	8051.2	131.7	39.9	43.6	-4	-23.73	102.8

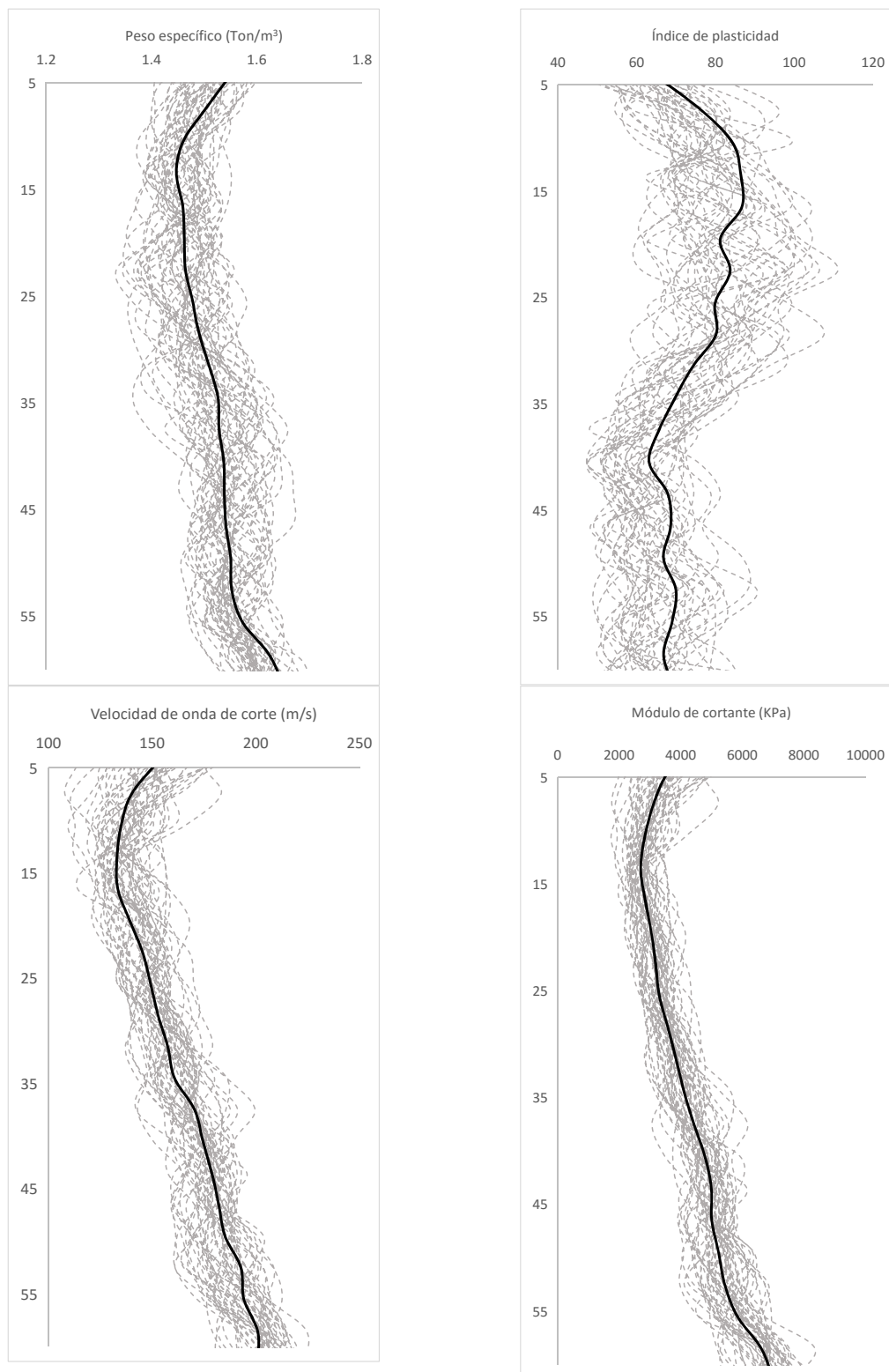


Figura 2.20. Perfiles en profundidad con 50 simulaciones sobre el sitio 226. La línea negra indica el valor promedio de las propiedades.

2.8 EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA

A partir del análisis se obtienen parámetros asociados a la respuesta dinámica de los suelos de Bogotá, y su representación espacial. La Figura 2.21 y Figura 2.22 muestran los mapas de distribución espacial de la velocidad de onda cortante, promediada en profundidad, y la profundidad total del depósito, respectivamente. La Figura 2.23 presenta el mapa de periodos fundamentales de vibración calculados.

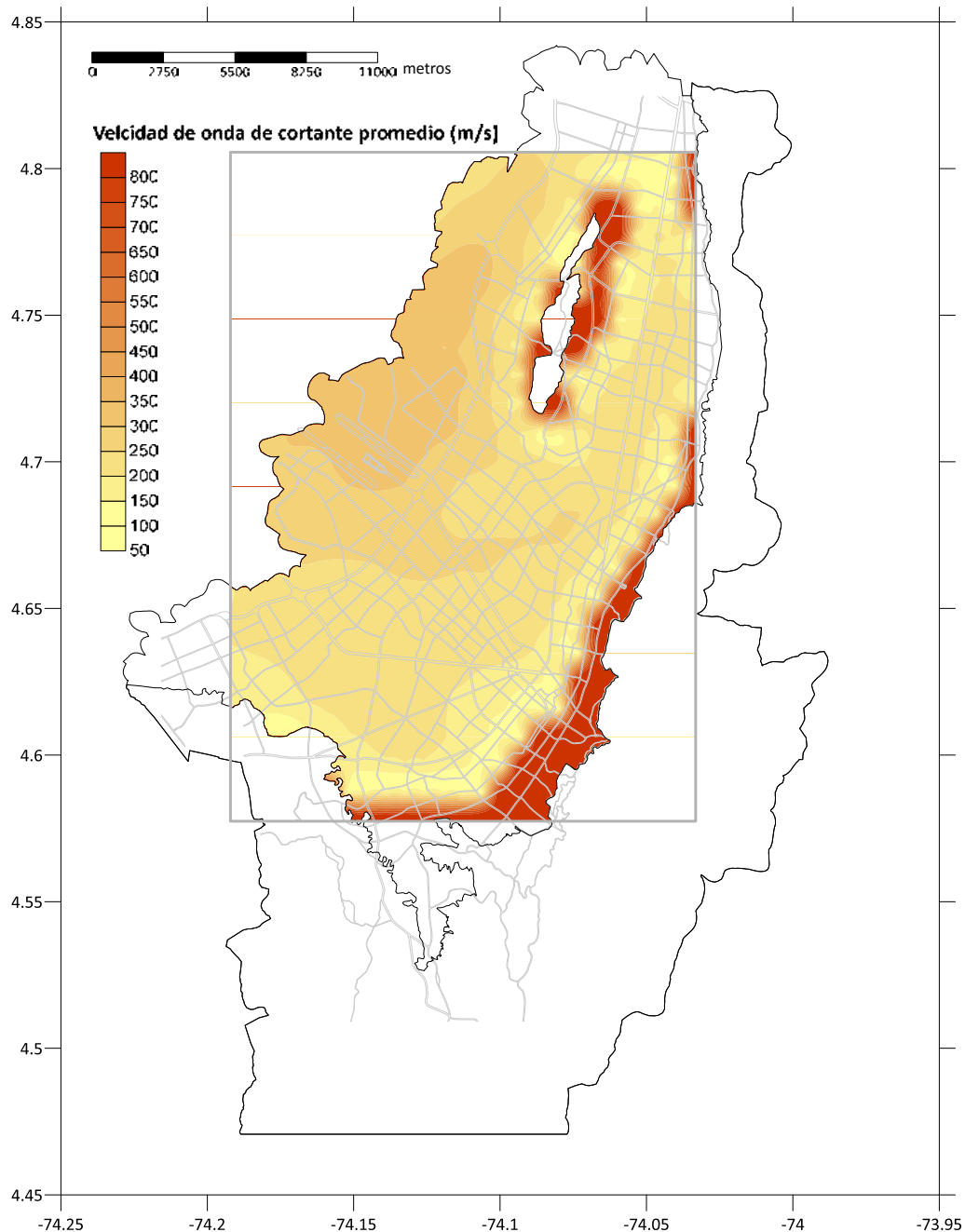


Figura 2.21. Velocidad de onda de cortante promedio.

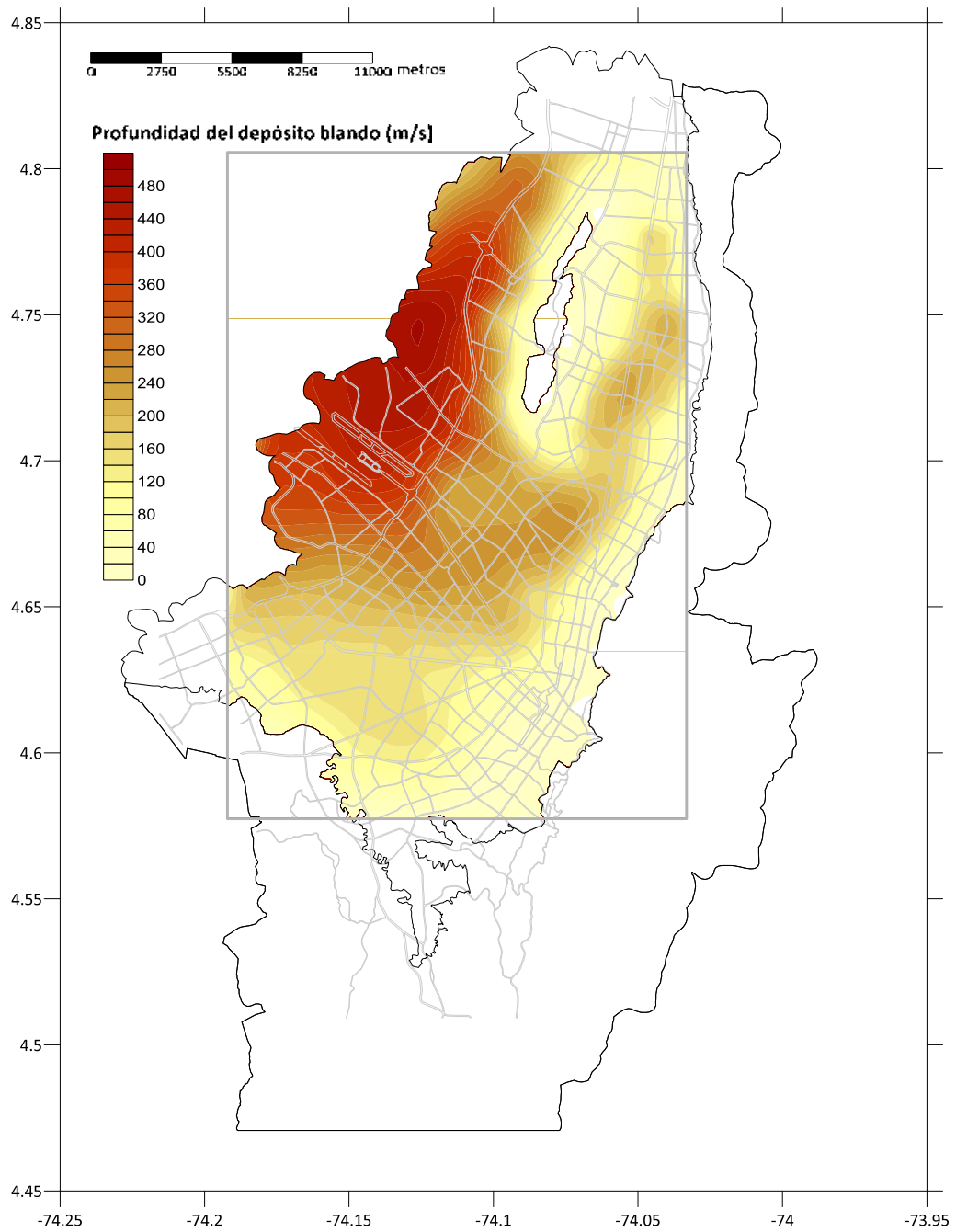


Figura 2.22. Profundidad total del depósito blando.

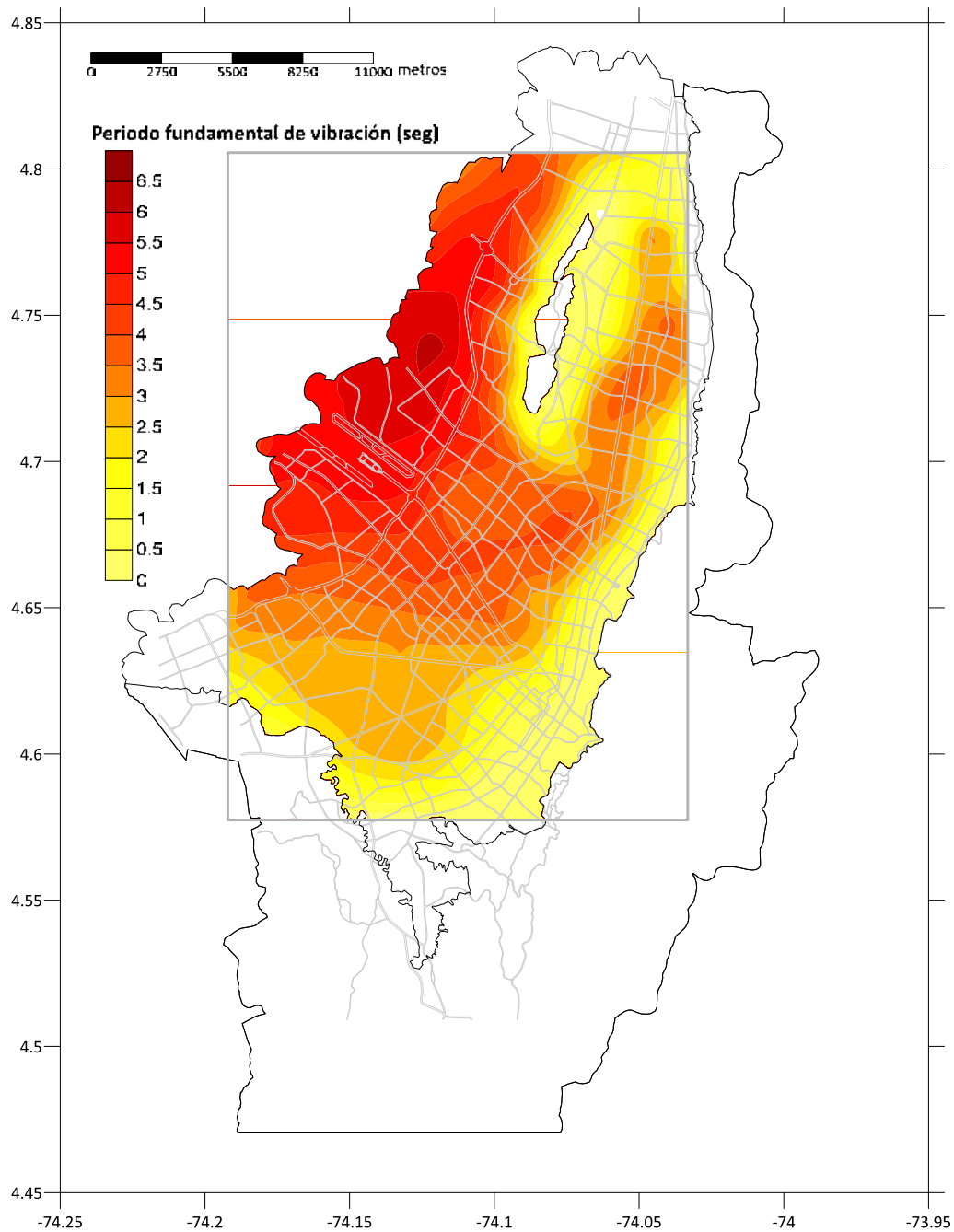


Figura 2.23. Periodos fundamentales de vibración del suelo (seg).

Para cada sitio de cálculo, y para cada estratigrafía simulada, se determina su función de amplificación $AF(T)$, en donde T es el periodo de vibración del O1GDL correspondiente. La Figura 2.24 presenta las funciones de amplificación de 20 simulaciones sobre el sitio 226, junto con el valor promedio de amplificación. De las funciones de amplificación generadas, es posible entonces calcular $\sigma_{\ln AF(T)}$ para

considerar la incertidumbre asociada al desconocimiento de los valores reales de las propiedades geotécnicas. La Figura 2.25 muestra el valor de $\sigma_{\ln AF(T)}$, para diferentes periodos estructurales.

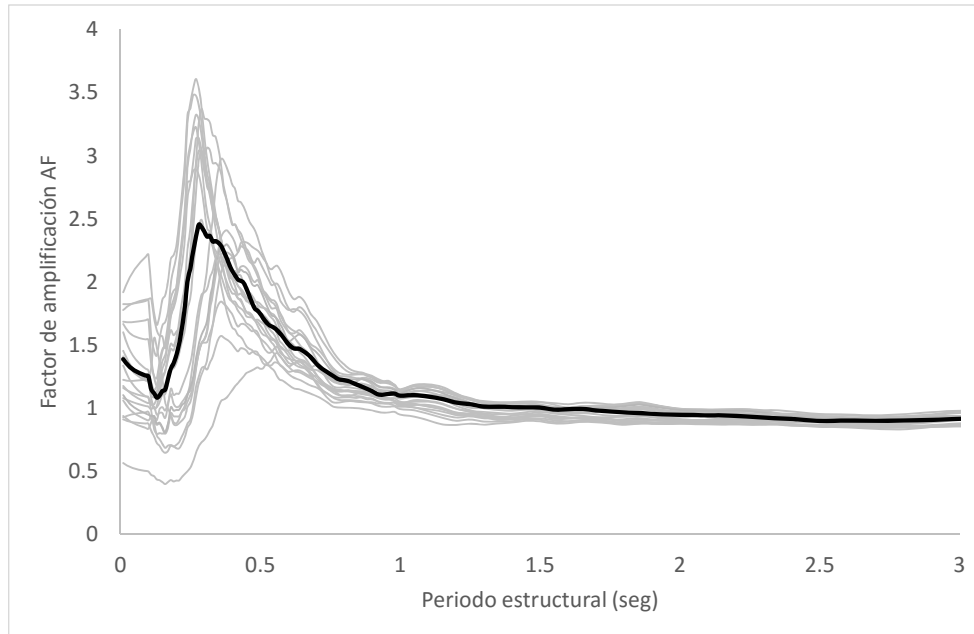


Figura 2.24. Funciones de amplificación de la aceleración espectral para 20 simulaciones en el sitio 226. La línea negra corresponde al valor promedio del factor de amplificación $AF(T)$.

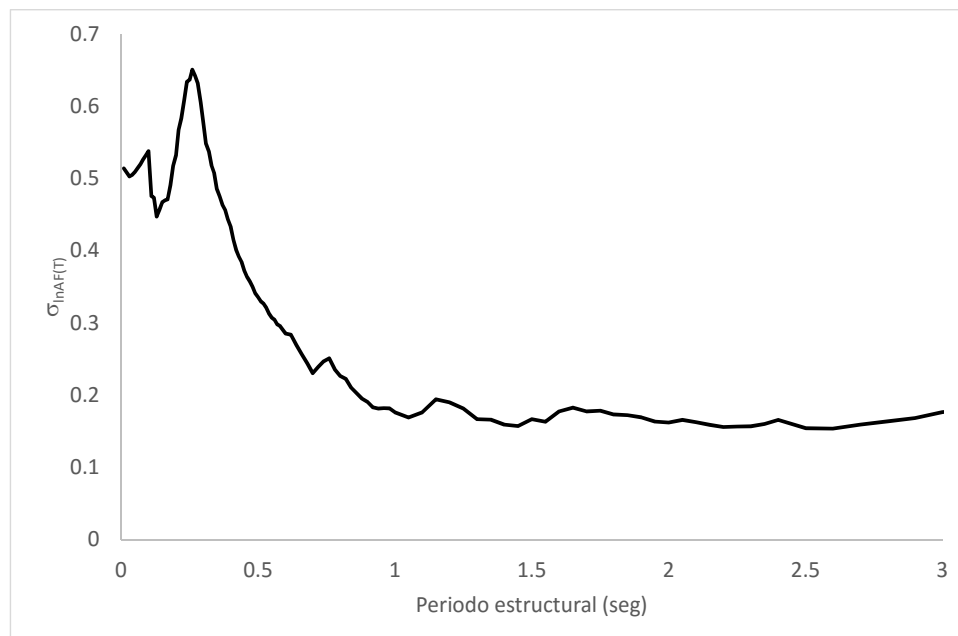


Figura 2.25. Desviación estándar del logaritmo de la función de amplificación $AF(T)$ para el sitio 226.

La distribución espacial de $\sigma_{\ln AF(T)}$ en la ciudad de Bogotá, para diferentes periodos estructurales (0, 0,1, 0,5, 1, 2 y 3 segundos), se presenta en la Figura 2.26 a la Figura

2.31. En general, es posible observar que los valores más altos de $\sigma_{\ln AF(T)}$ ocurren para periodos estructurales bajos, menores a 0.5 segundos. Para periodos más altos, los valores de $\sigma_{\ln AF(T)}$ rara vez superan 0.4.

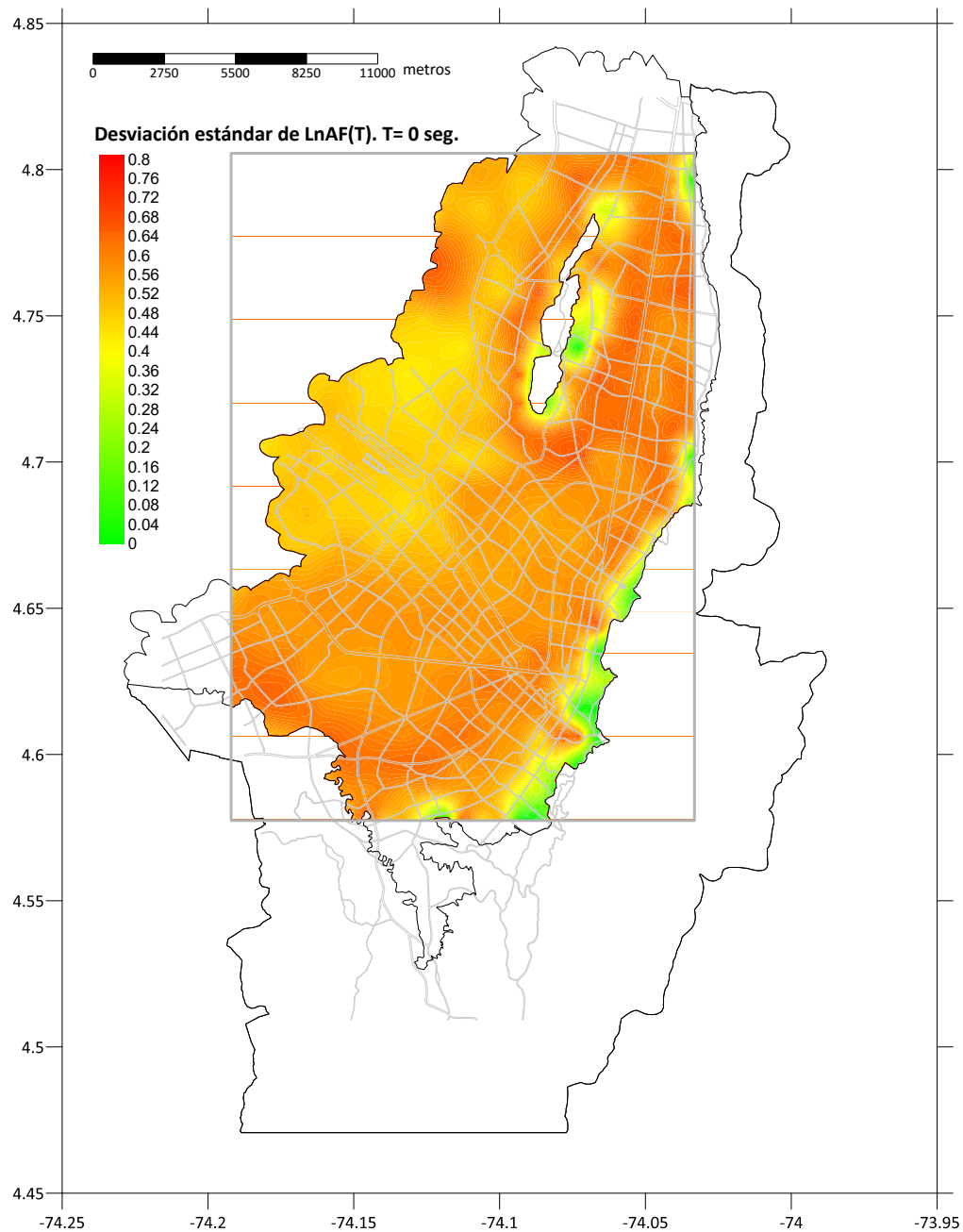


Figura 2.26. Distribución espacial de $\sigma_{\ln AF}$ para PGA

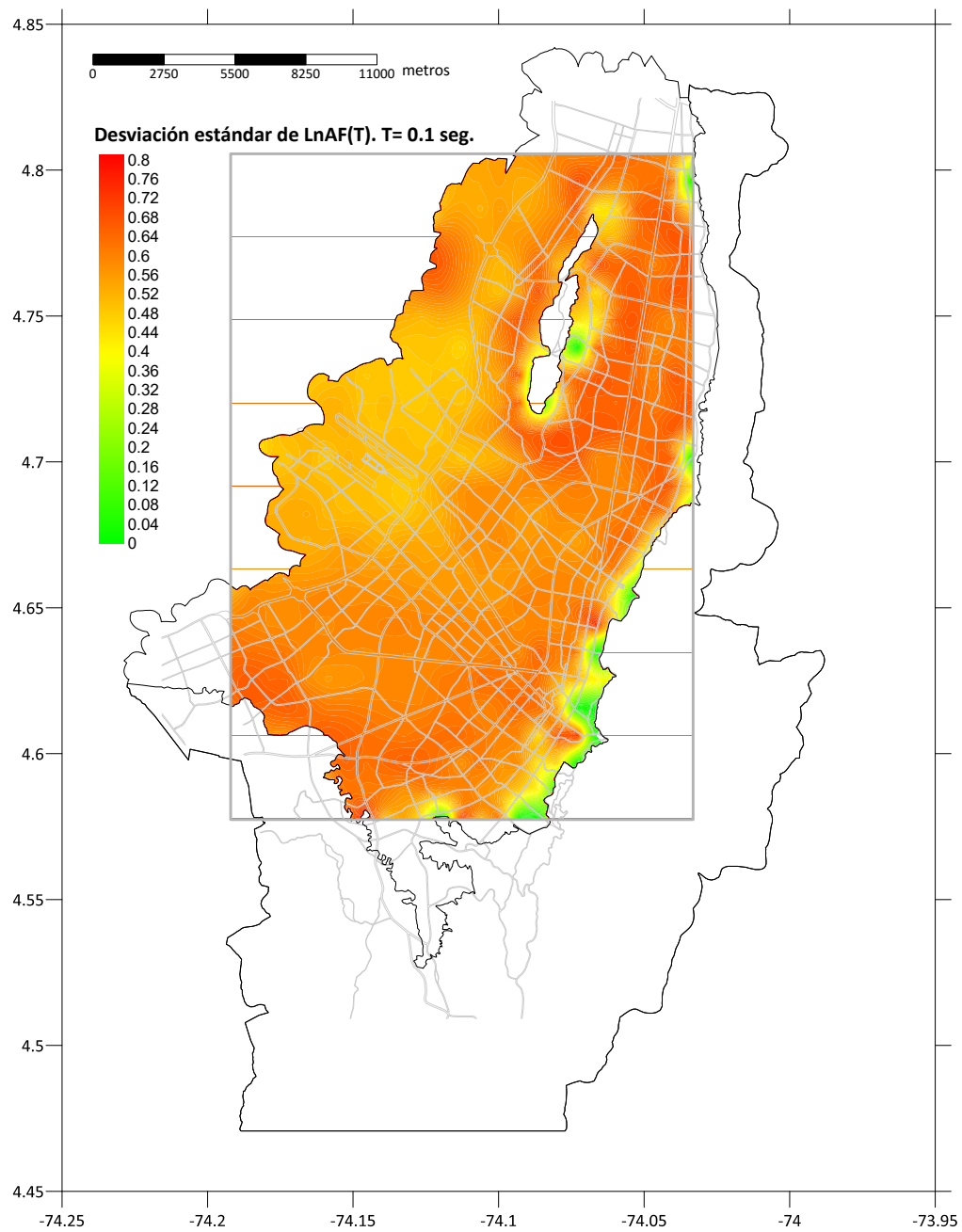


Figura 2.27. Distribución espacial de σ_{LnAF} para $T = 0.1$ seg.

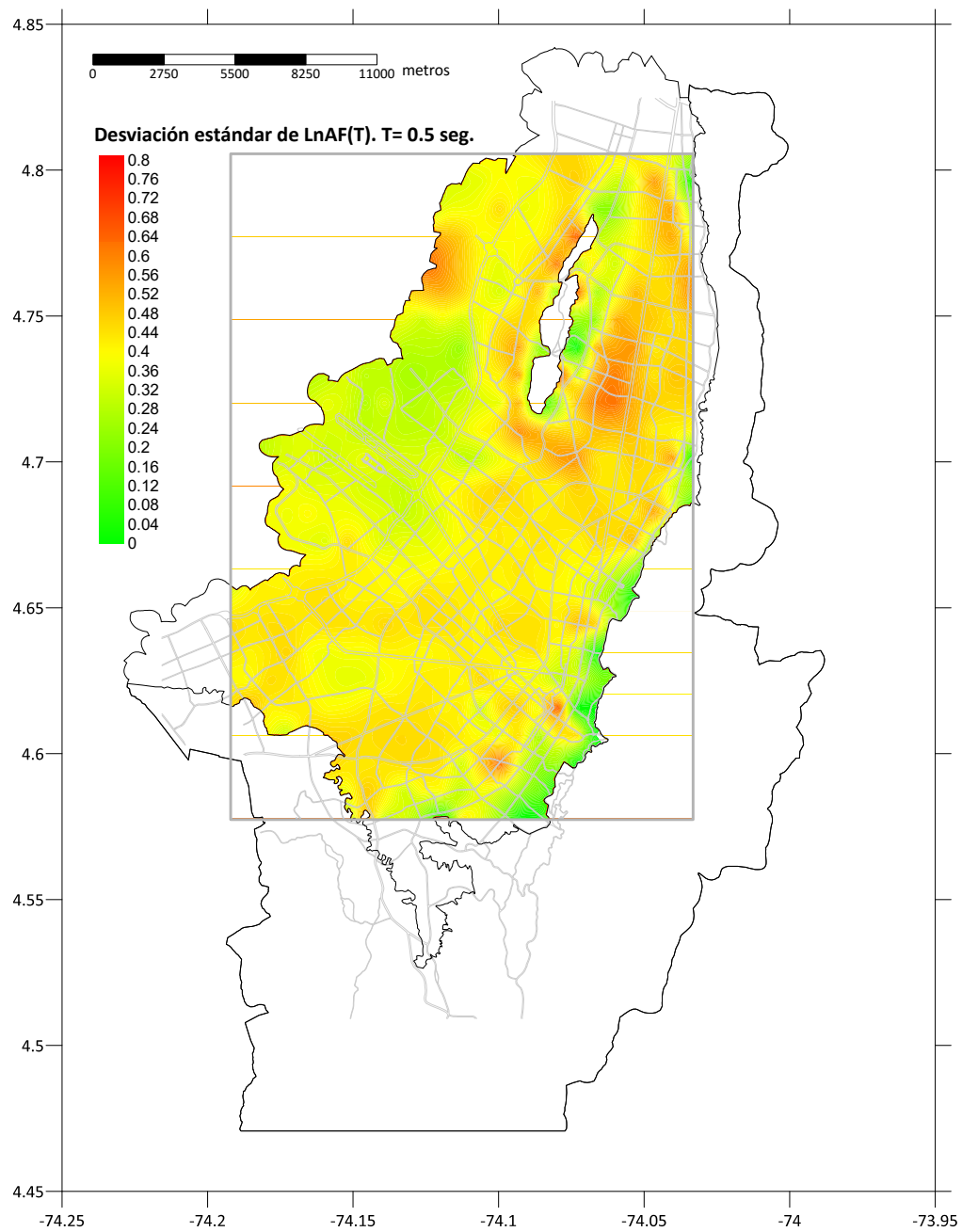


Figura 2.28. Distribución espacial de σ_{LnAF} para $T = 0.5$ seg.

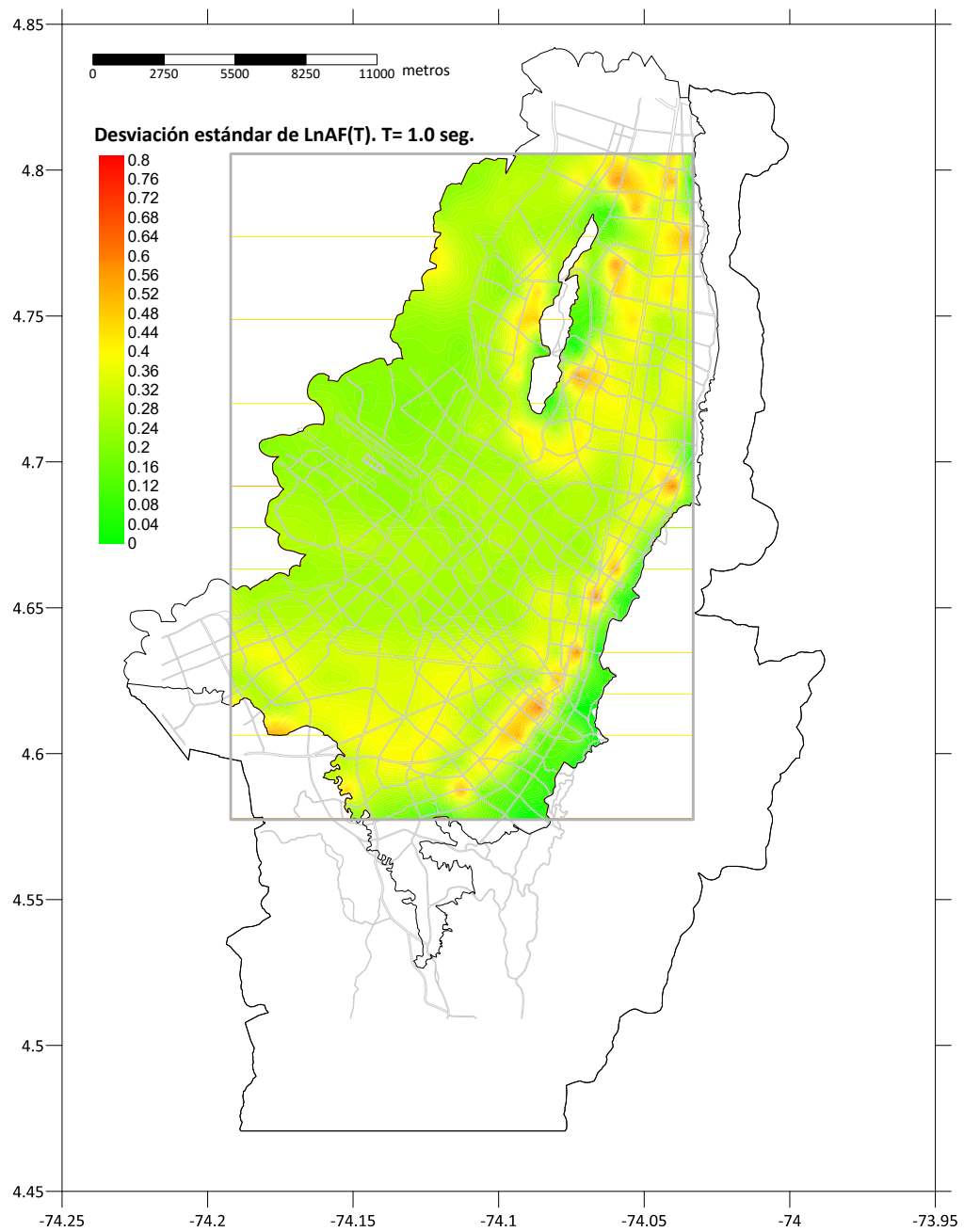


Figura 2.29. Distribución espacial de σ_{LnAF} para $T = 1.0$ seg.

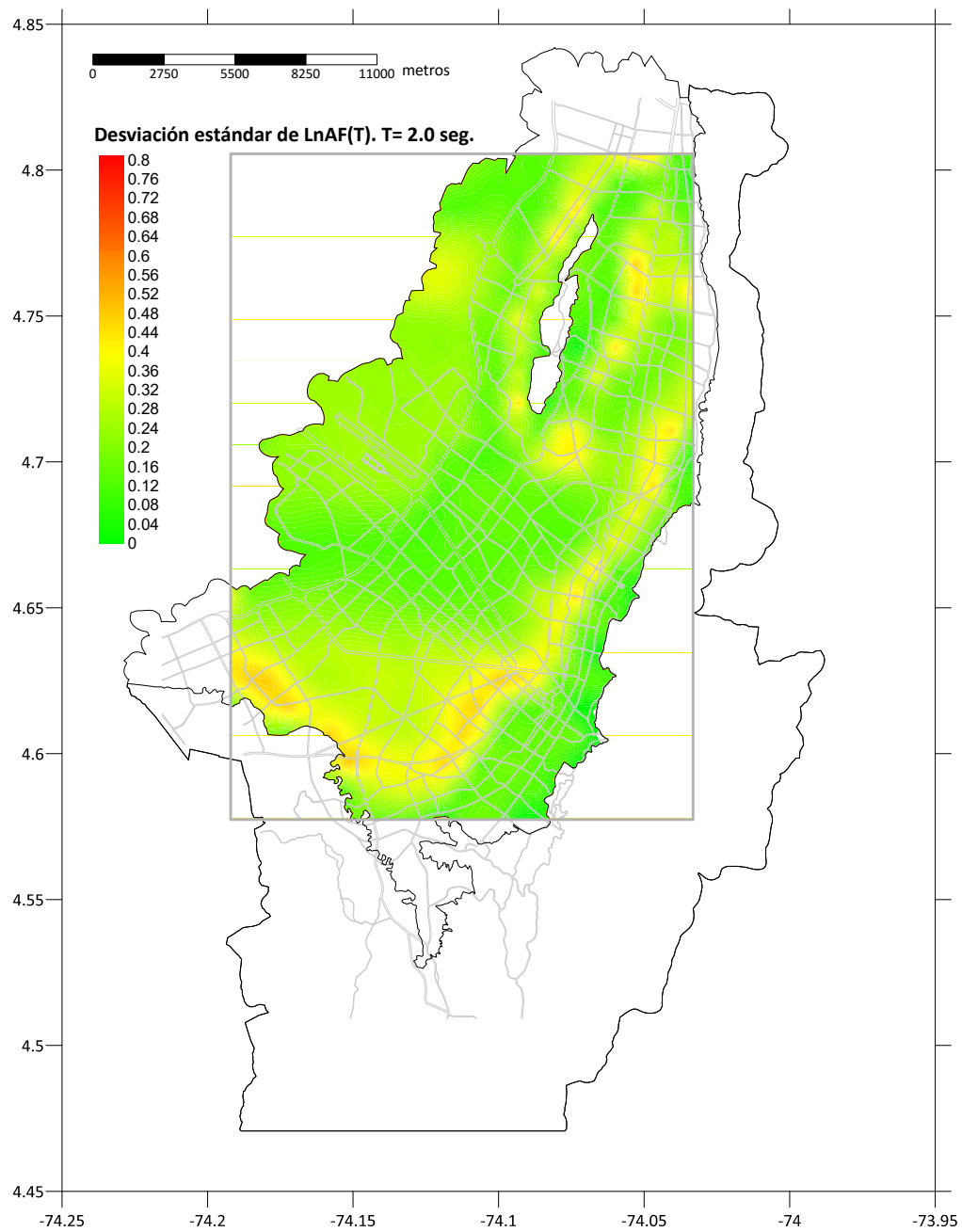


Figura 2.30. Distribución espacial de σ_{LnAF} para $T = 2.0$ seg.

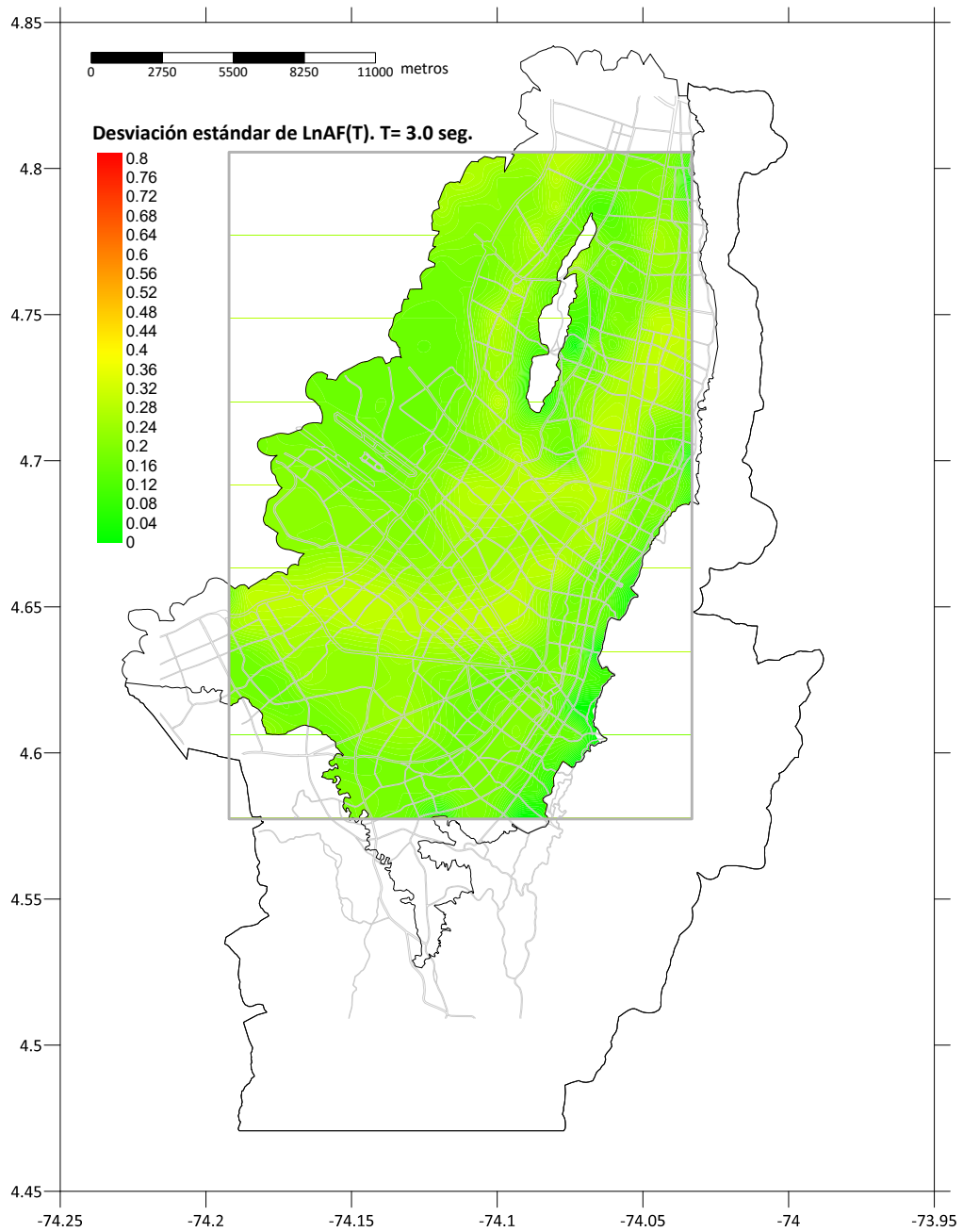


Figura 2.31. Distribución espacial de σ_{LnAF} para $T = 3.0$ seg.

3. APLICACIONES DEL MODELO DE EFECTOS DE SITIO EN BOGOTÁ

Una vez definido el modelo de efectos de sitio, puede aplicarse con diversos fines. En esta sección se presentan tres aplicaciones diferentes del modelo: i) para la obtención de funciones de transferencia del espectro de respuesta con fines de análisis de riesgo, ii) para el cálculo de shakemaps ante acelerogramas reales en roca firme con fines de respuesta a emergencias, y iii) para la microzonificación sísmica de la ciudad y obtención de espectros elásticos de diseño sismo-resistente.

3.1 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL ESPECTRO DE RESPUESTA CON FINES DE ANÁLISIS DE RIESGO

Las funciones de transferencia del espectro de respuesta, $AF(T)$, son un resultado directo de la construcción del modelo, dado que se calculan con el objetivo de determinar $\sigma_{\ln AF(T)}$. Por lo tanto, su inclusión en análisis de riesgo es directa. En la Figura 3.2 a la Figura 3.13 se muestra la distribución espacial de los valores de $AF(T)$ para diferentes periodos estructurales (0, 0,1, 0,5, 1, 2 y 3 segundos), y para dos niveles de PGA en la base del depósito (50 y 400 cm/s²).

Dado que $AF(T)$ puede estar definido por muchos periodos estructurales y para varios niveles de PGA, deben almacenarse cientos o miles de valores para describir los efectos de sitio con fines de análisis de riesgo. Huerta et.al. (2011) proponen un formato computacional especial que permite almacenar de manera organizada toda esta información. La Figura 3.1 muestra de manera esquemática la estructura de este formato, en el cual, para cada nodo de la malla de cálculo, se almacena su correspondiente $AF(T)$. El formato está compuesto de dos archivos:

1. Un archivo raster GRD de Surfer, con los valores del periodo fundamental de vibración del suelo.
2. Un archivo binario de extensión “.ft” que contiene la información de las funciones de amplificación del suelo, para cada ubicación de la malla de periodos.

Este formato fue empleado para el adecuado almacenamiento de las funciones de transferencia para Bogotá, de manera que los resultados de esta monografía pueden ser incorporados directamente en evaluaciones de riesgo.

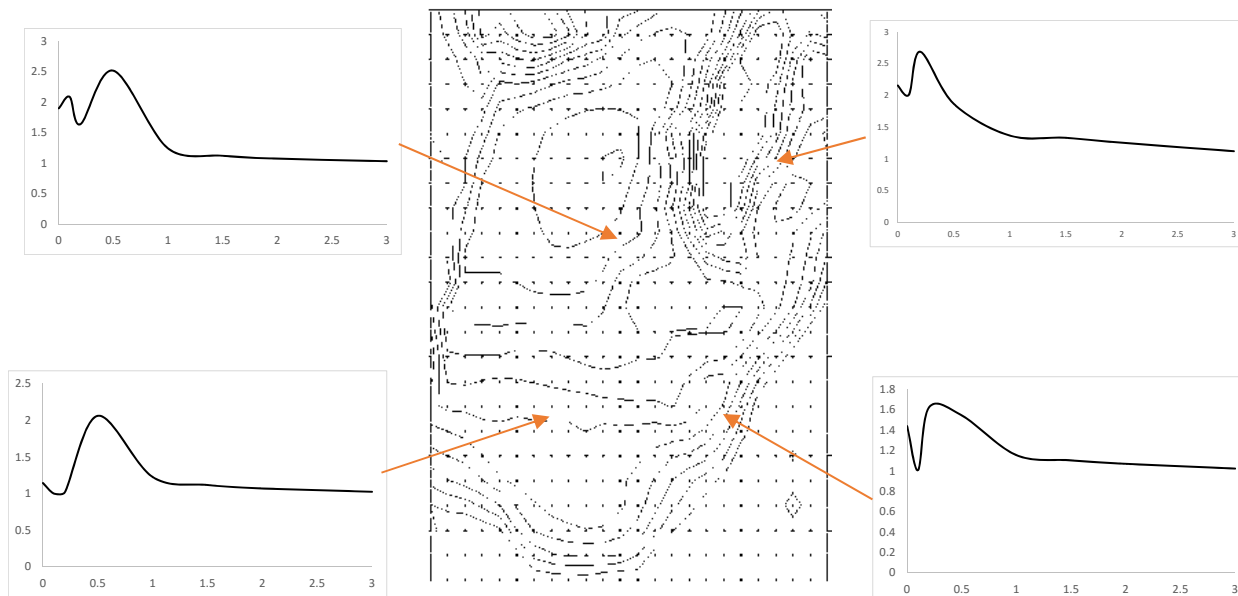


Figura 3.1. Esquema de la estructural del formato de efectos de sitio propuesto por Huerta et.al. 2011.

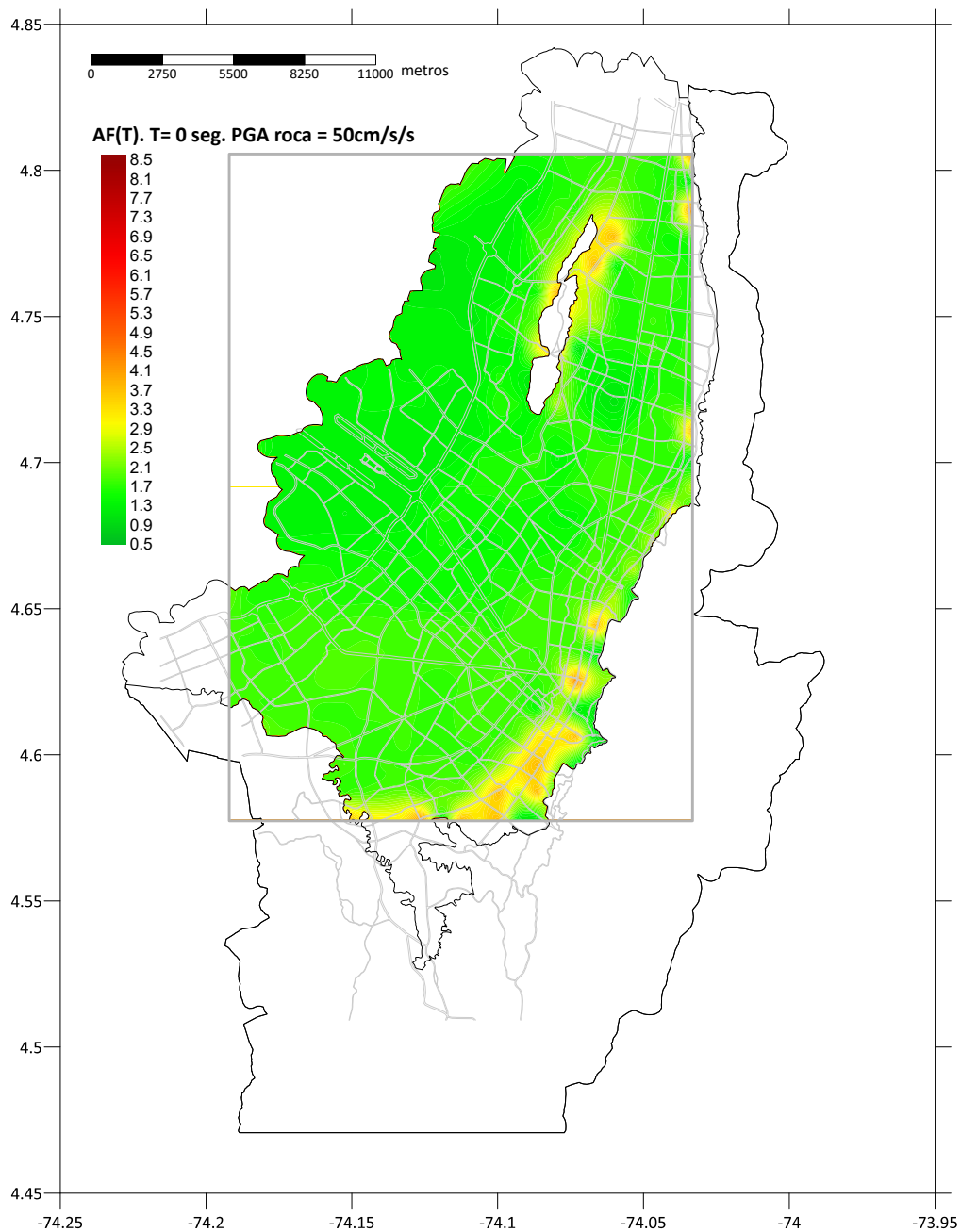


Figura 3.2. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=0$ seg y PGA en roca = 50 cm/s^2 .

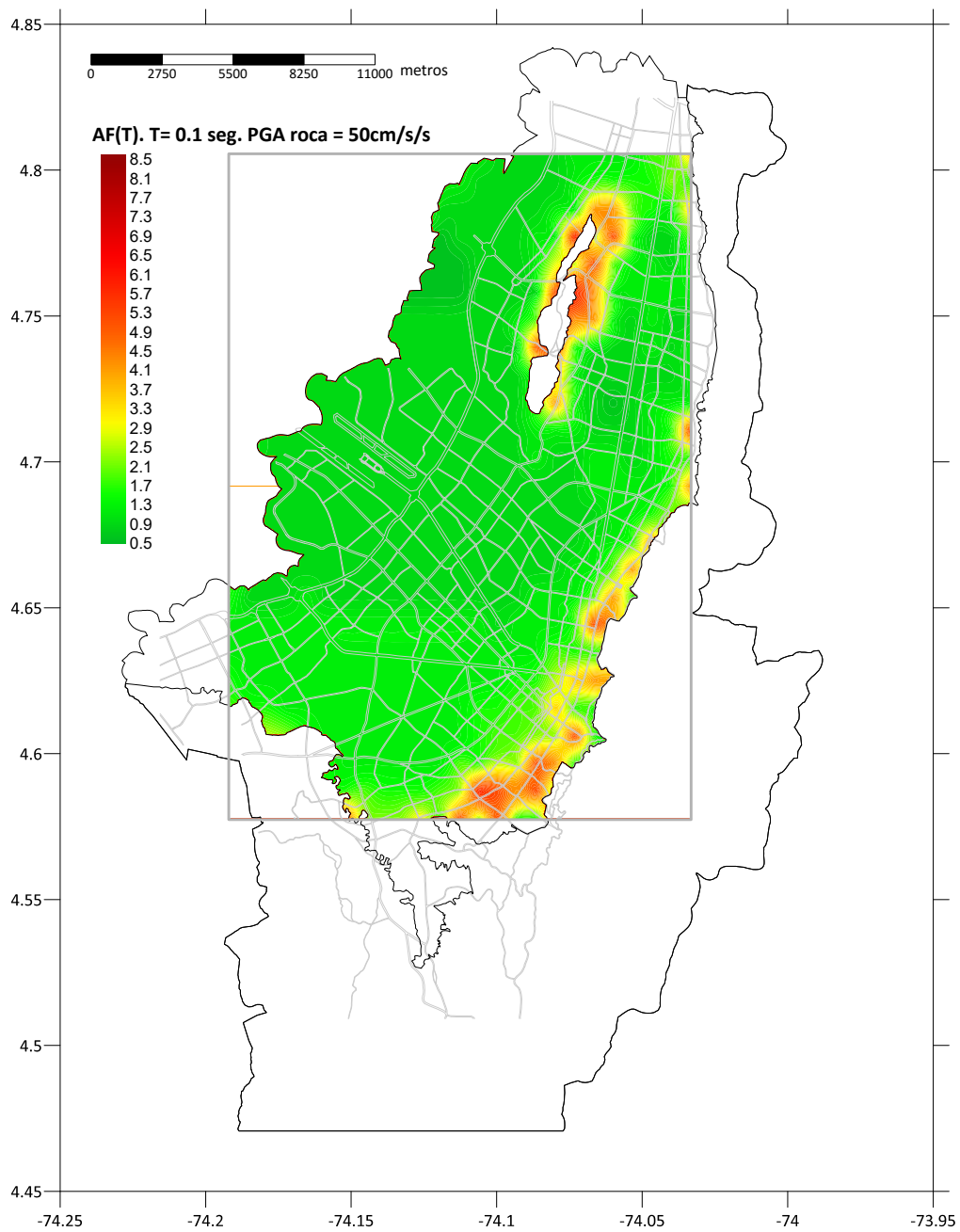


Figura 3.3. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=0.1$ seg y PGA en roca = 50 cm/s^2 .

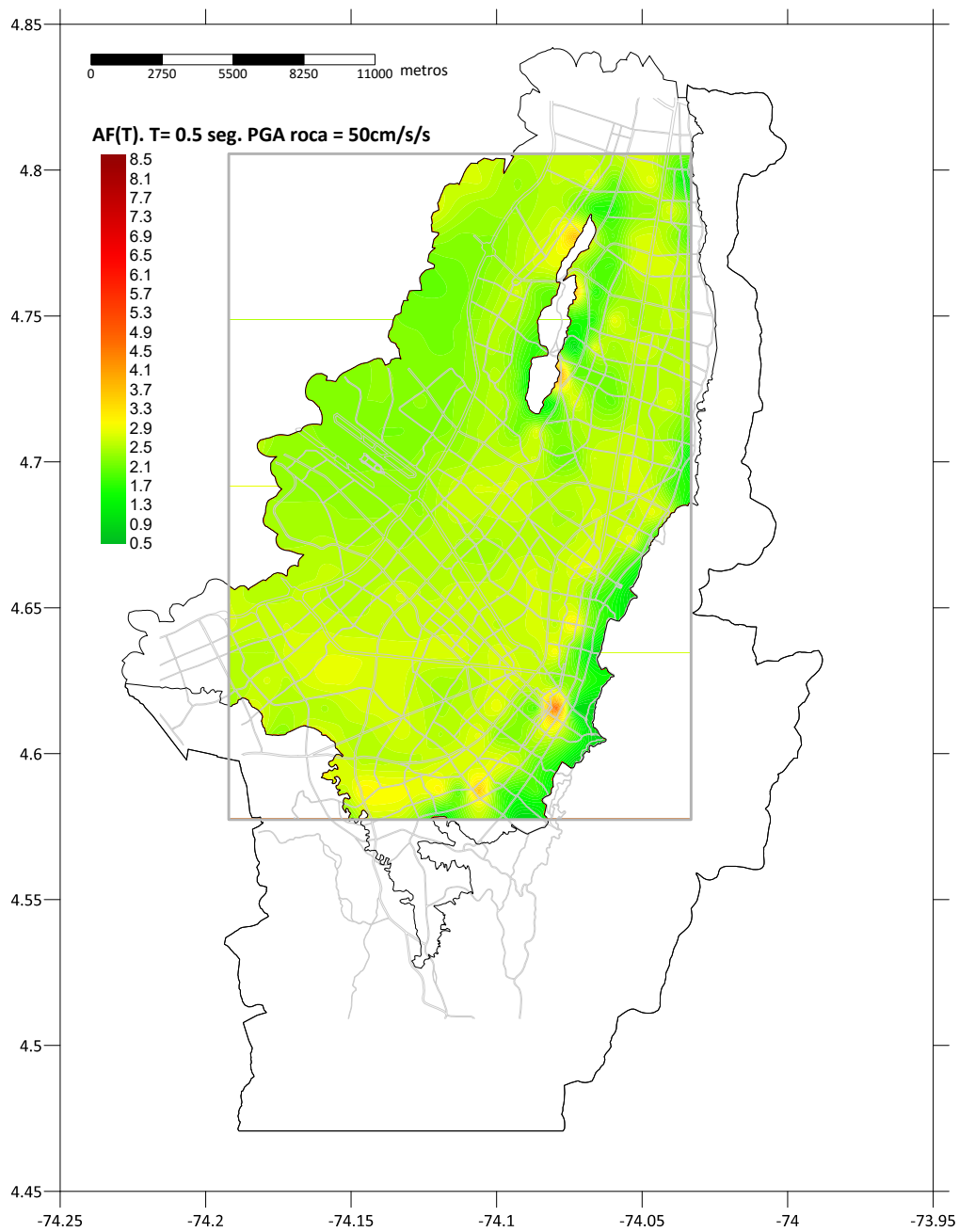


Figura 3.4. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=0.5$ seg y PGA en roca = 50 cm/s^2 .

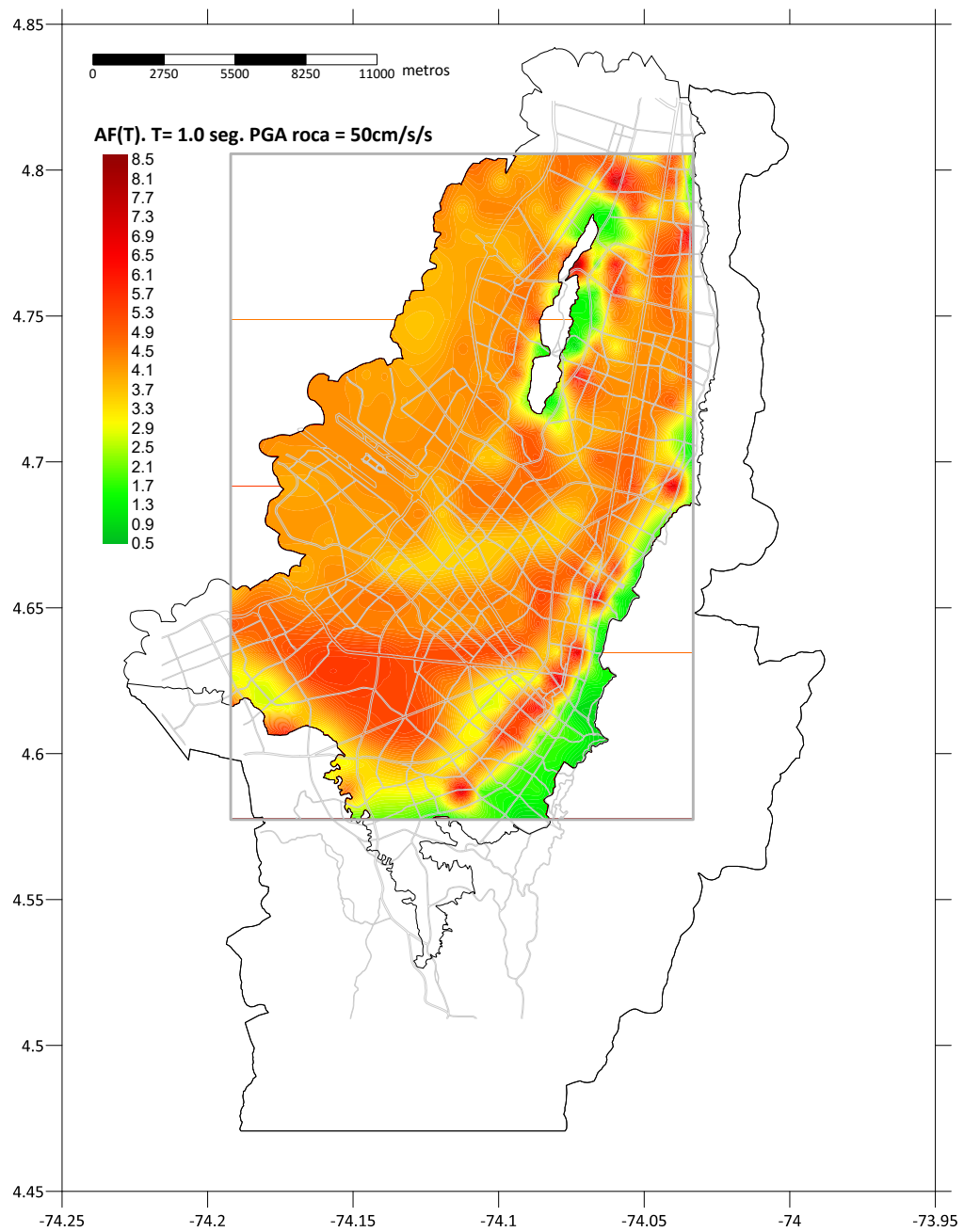


Figura 3.5. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=1$ seg y PGA en roca = 50 cm/s^2 .

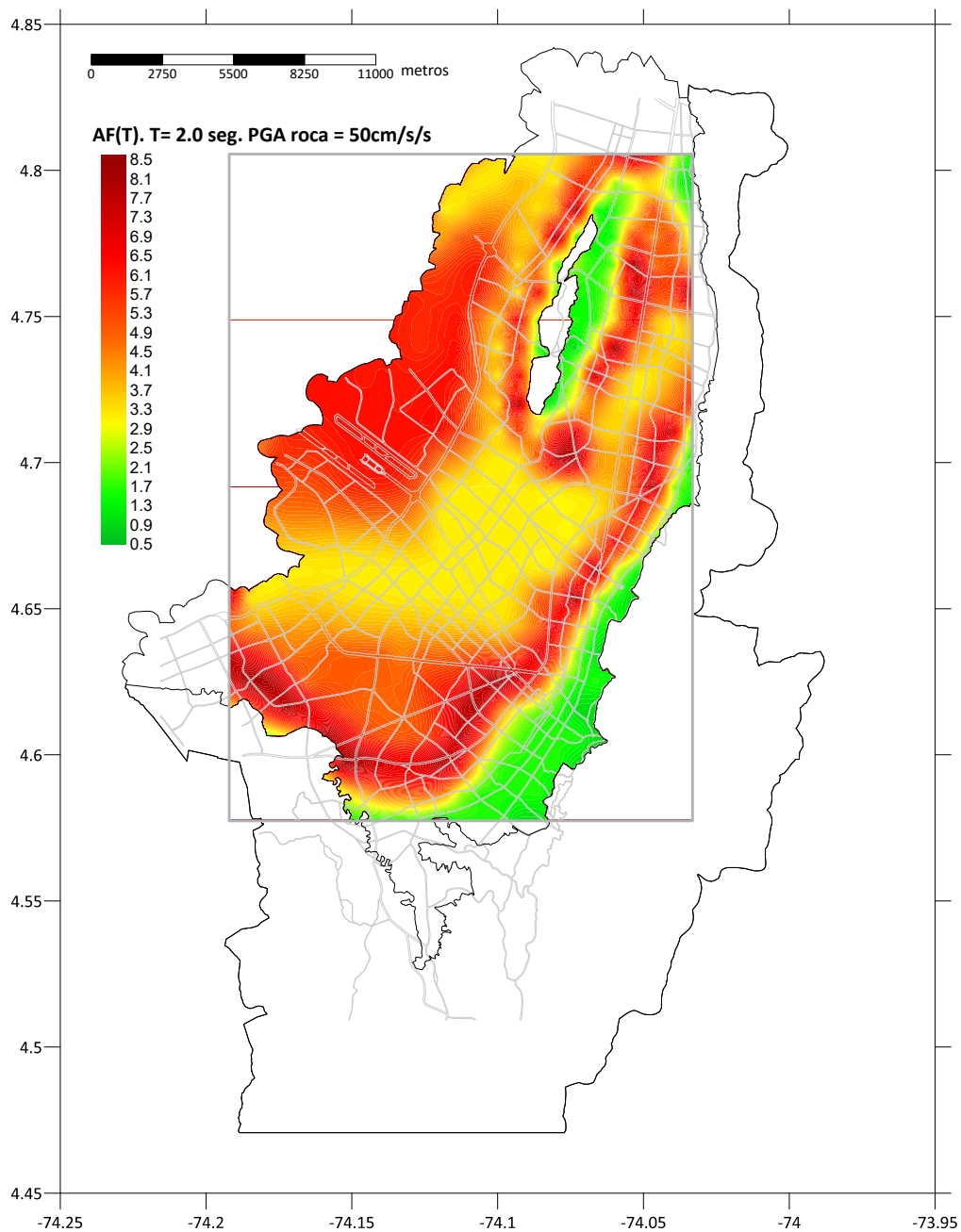


Figura 3.6. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=2$ seg y PGA en roca = 50 cm/s^2 .

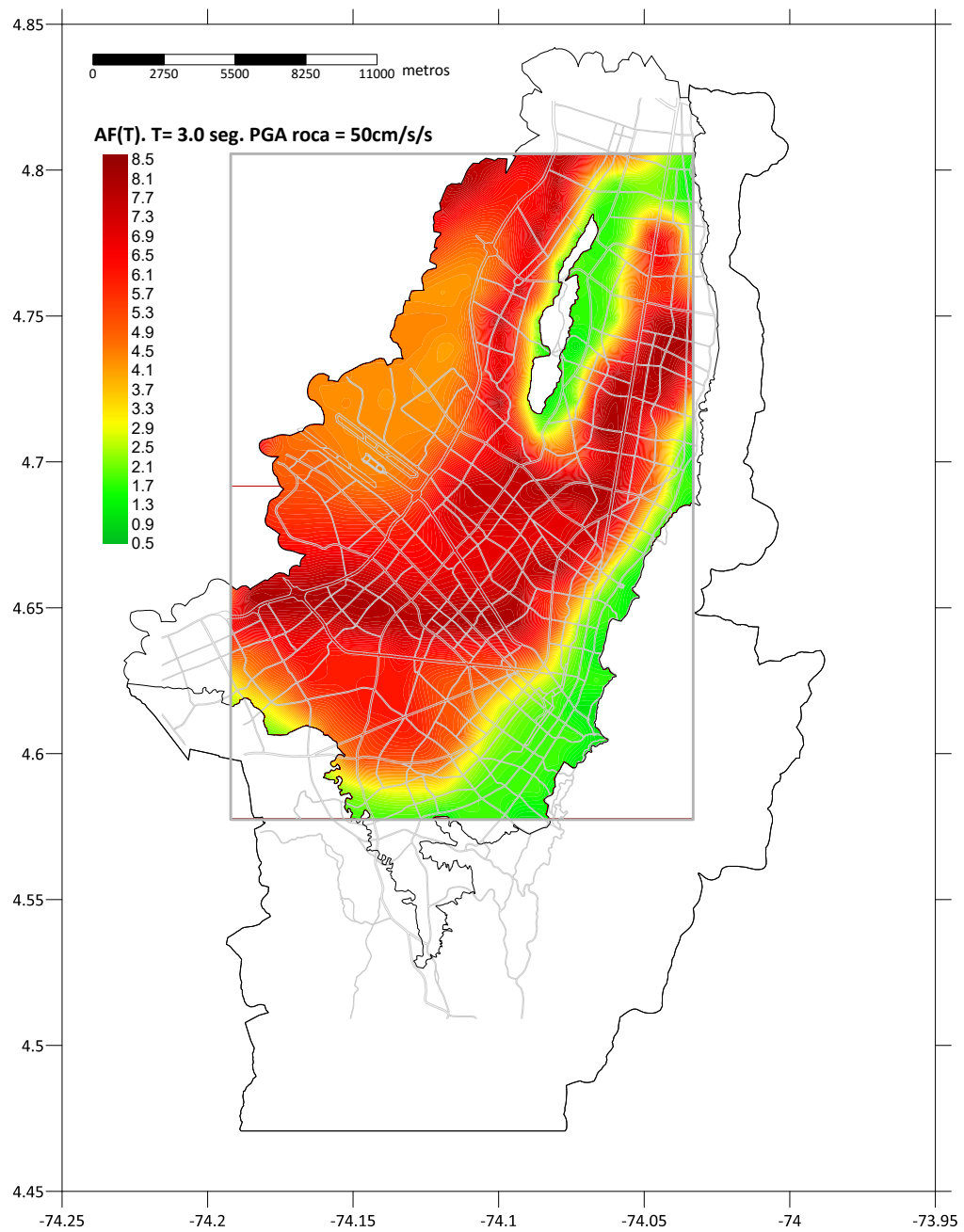


Figura 3.7. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=3$ seg y PGA en roca = 50 cm/s^2 .

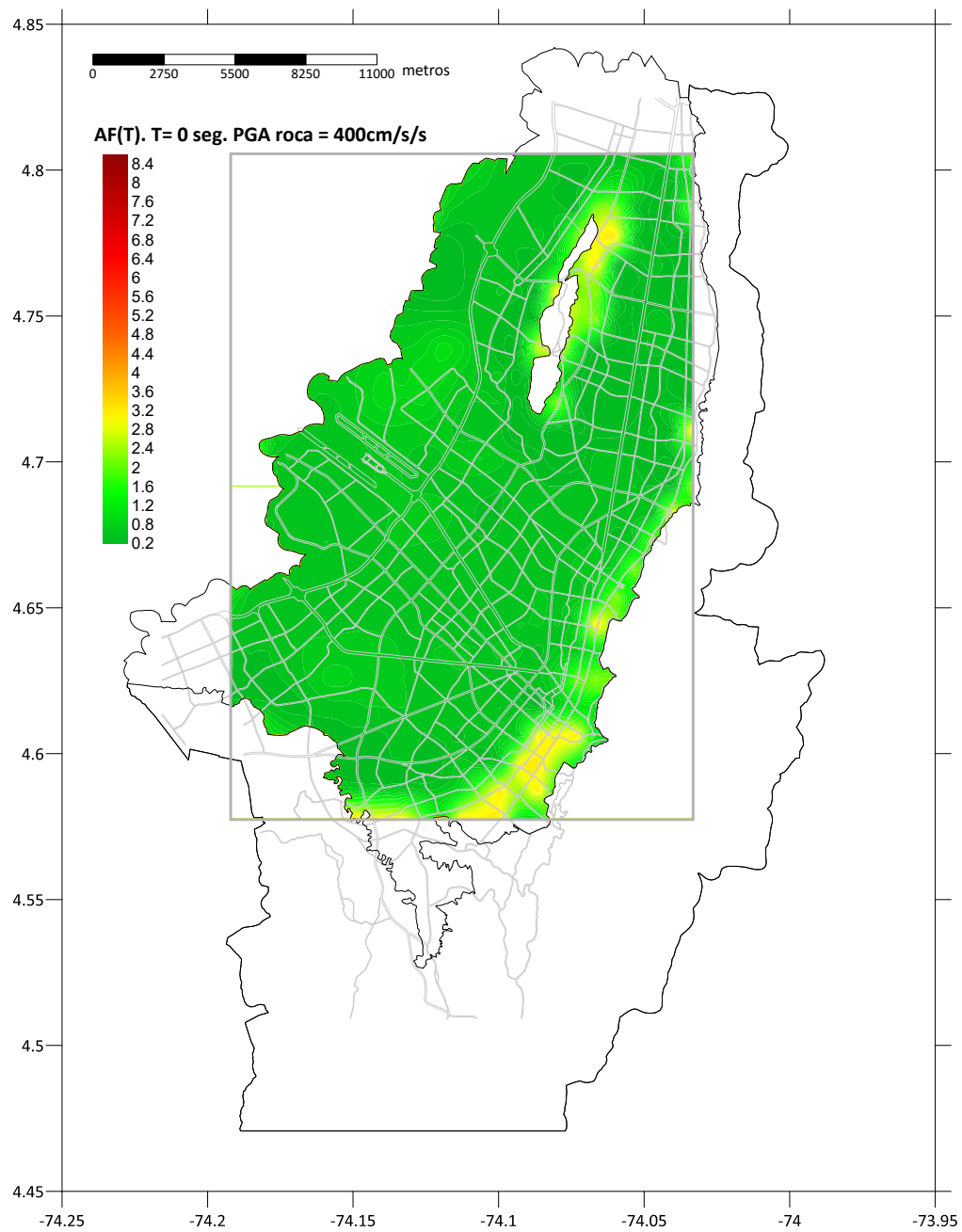


Figura 3.8. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=0$ seg y PGA en roca = 400 cm/s^2 .

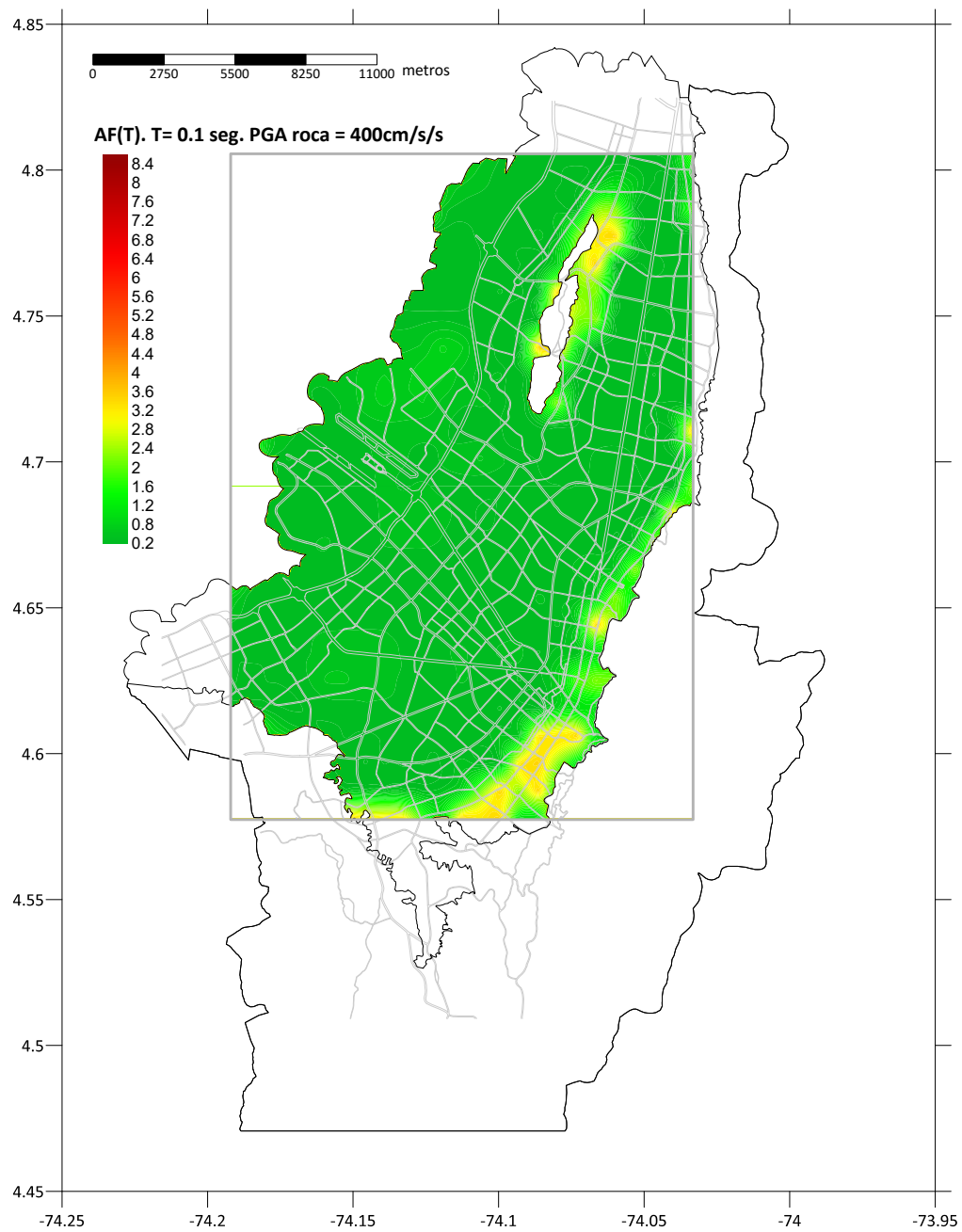


Figura 3.9. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=0.1$ seg y PGA en roca = 400 cm/s^2 .

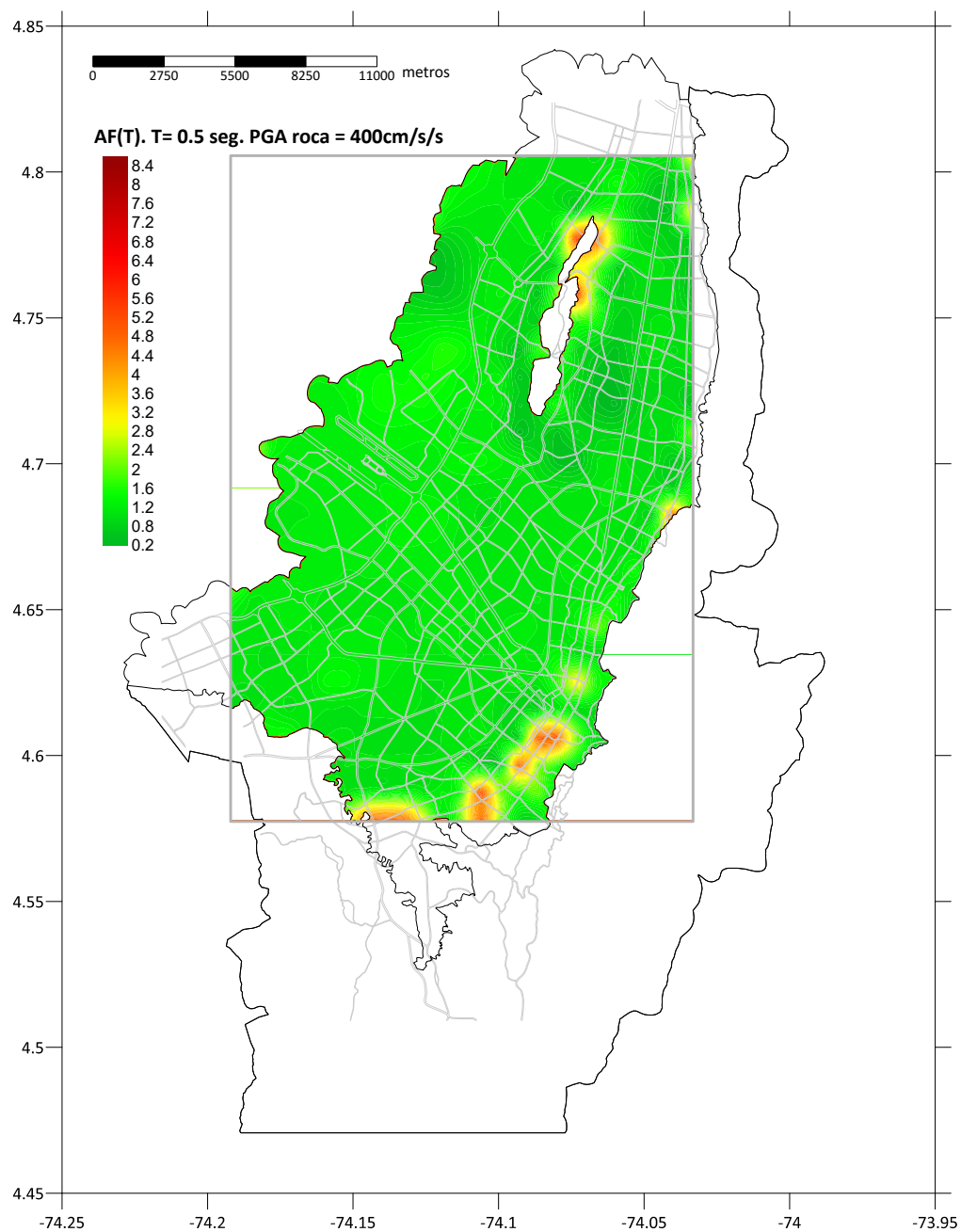


Figura 3.10. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=0.5$ seg y PGA en roca = 400 cm/s^2 .

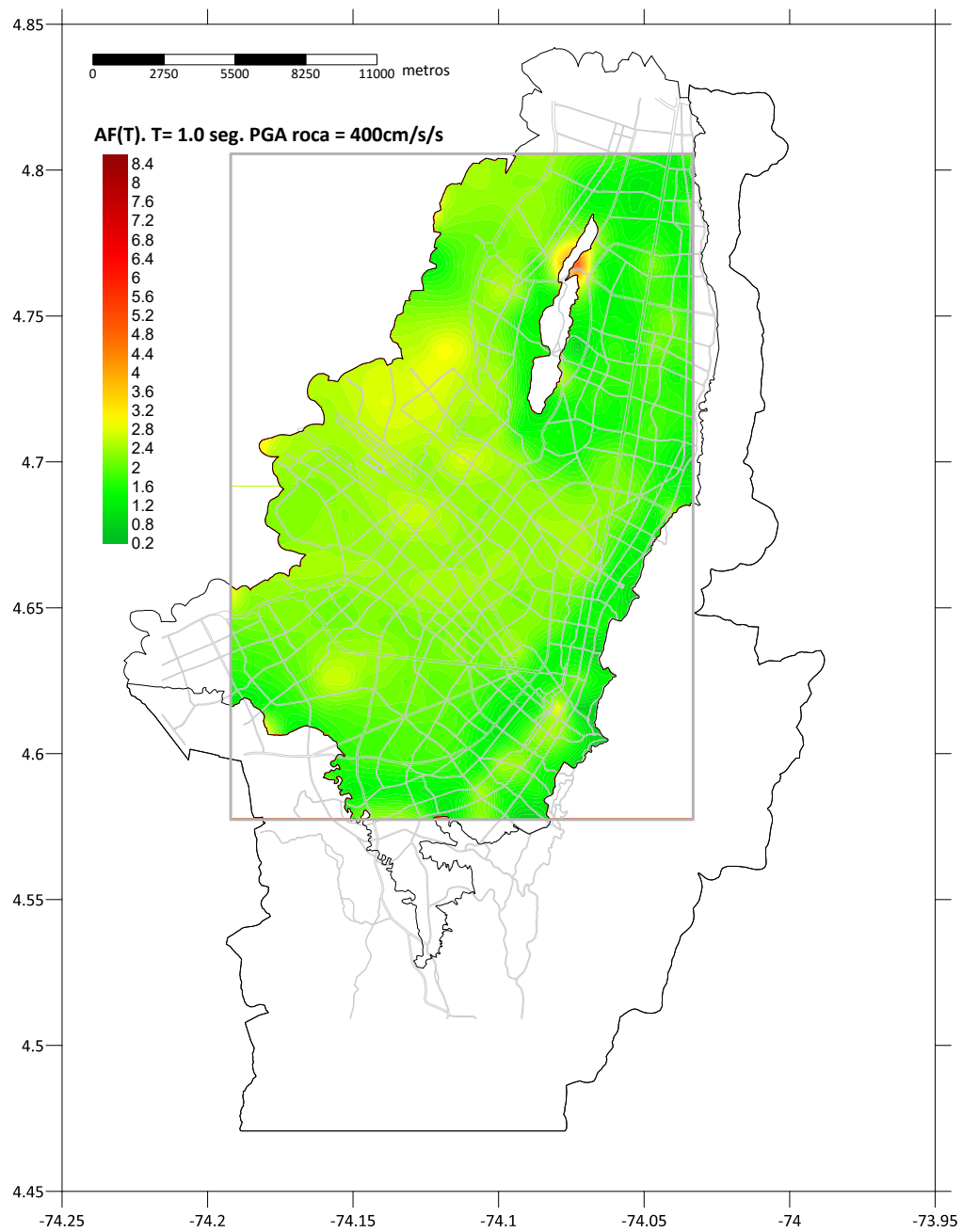


Figura 3.11. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=1$ seg y PGA en roca = 400 cm/s².

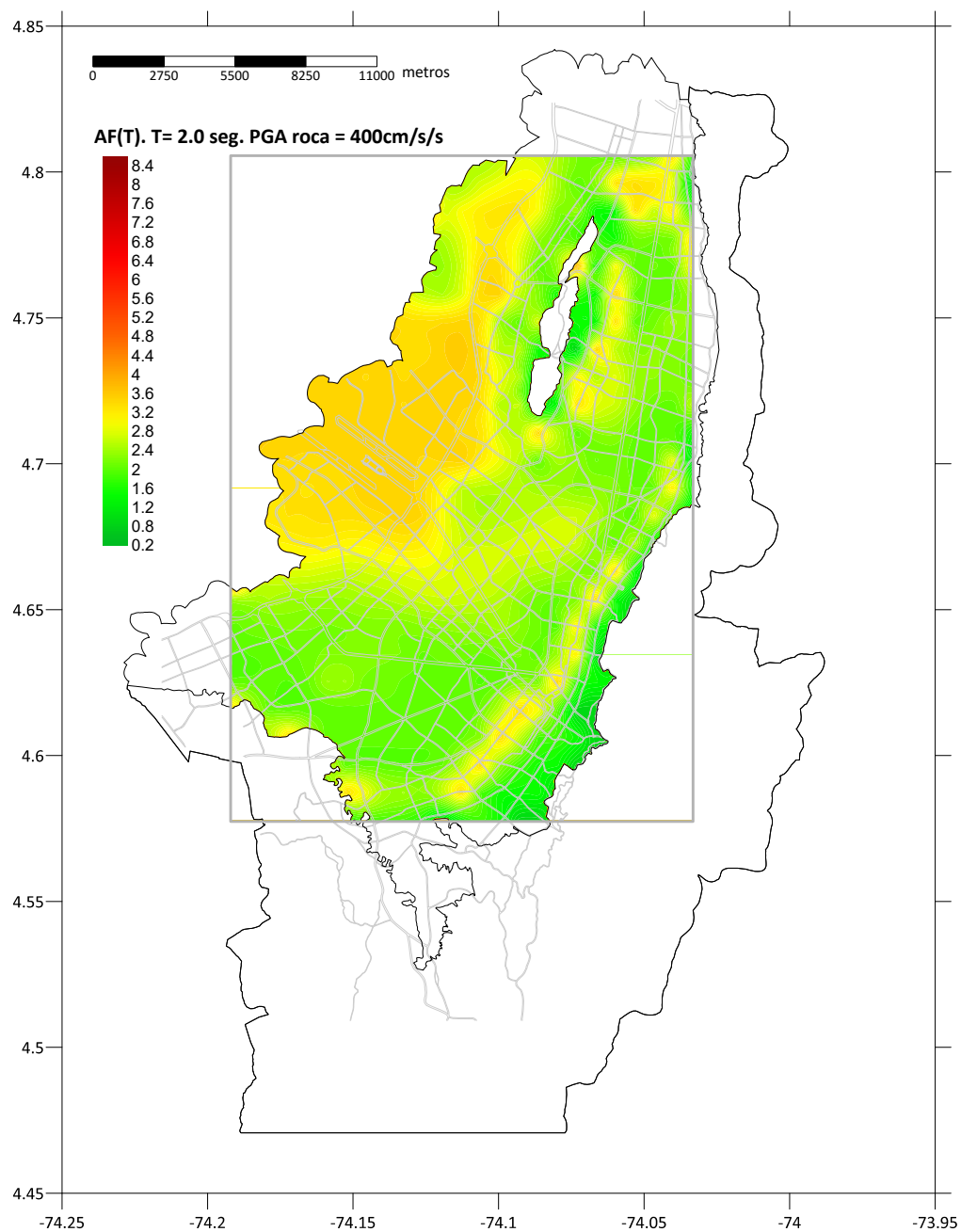


Figura 3.12. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=2$ seg y PGA en roca = 400 cm/s^2 .

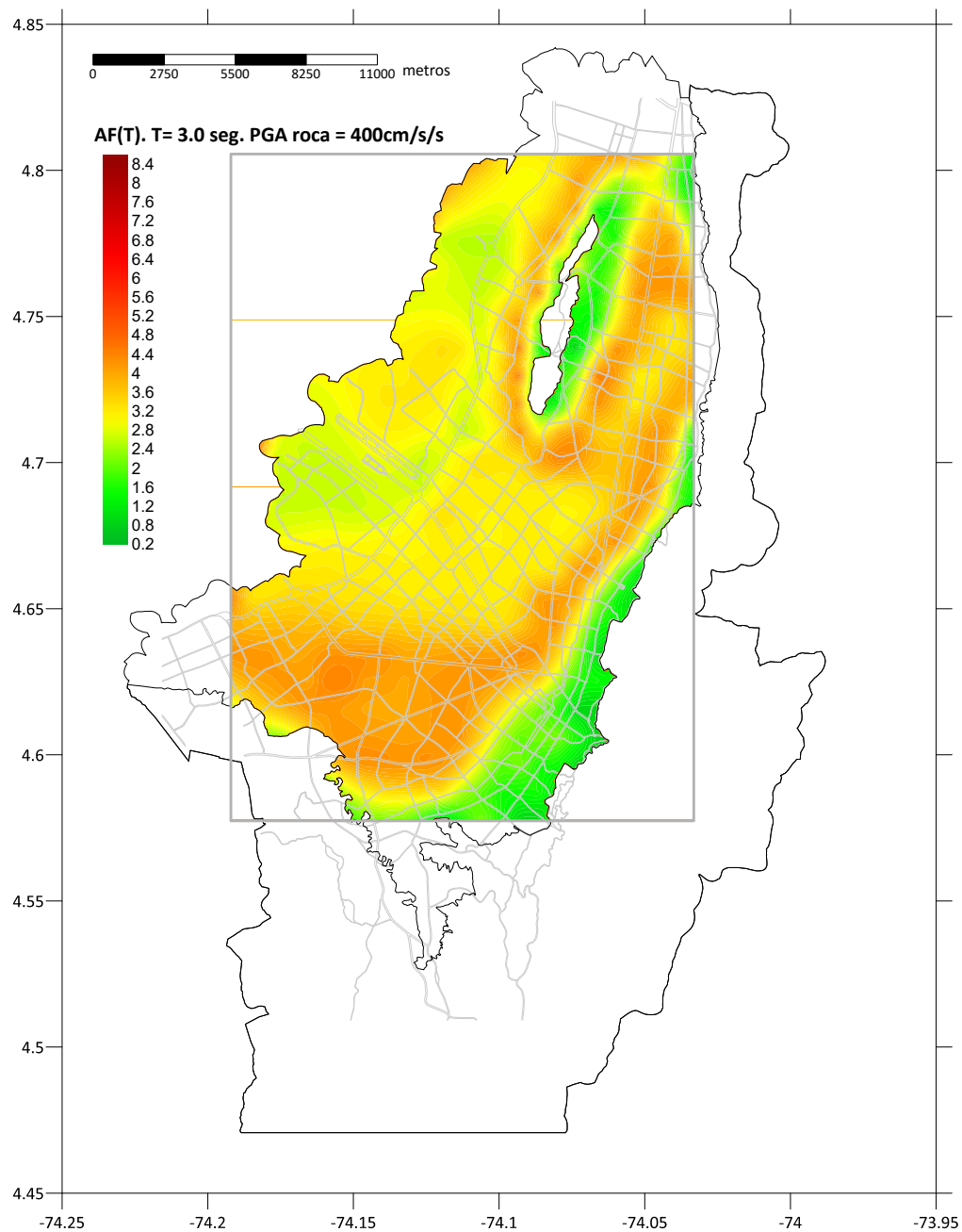


Figura 3.13. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=3$ seg y PGA en roca = 400 cm/s^2 .

3.1.1 Evaluación del riesgo en Bogotá incluyendo efectos de sitio

Con el fin de demostrar la utilidad del modelo de respuesta desarrollado dentro de una evaluación real del riesgo, se presenta en esta sección la evaluación de pérdidas económicas sobre las edificaciones del sector educación de la ciudad de Bogotá. La Figura 3.14 muestra la ubicación de las 3427 edificaciones que componen el

portafolio de educación de Bogotá. Toda la información presentada fue tomada de Zuloaga (2011).

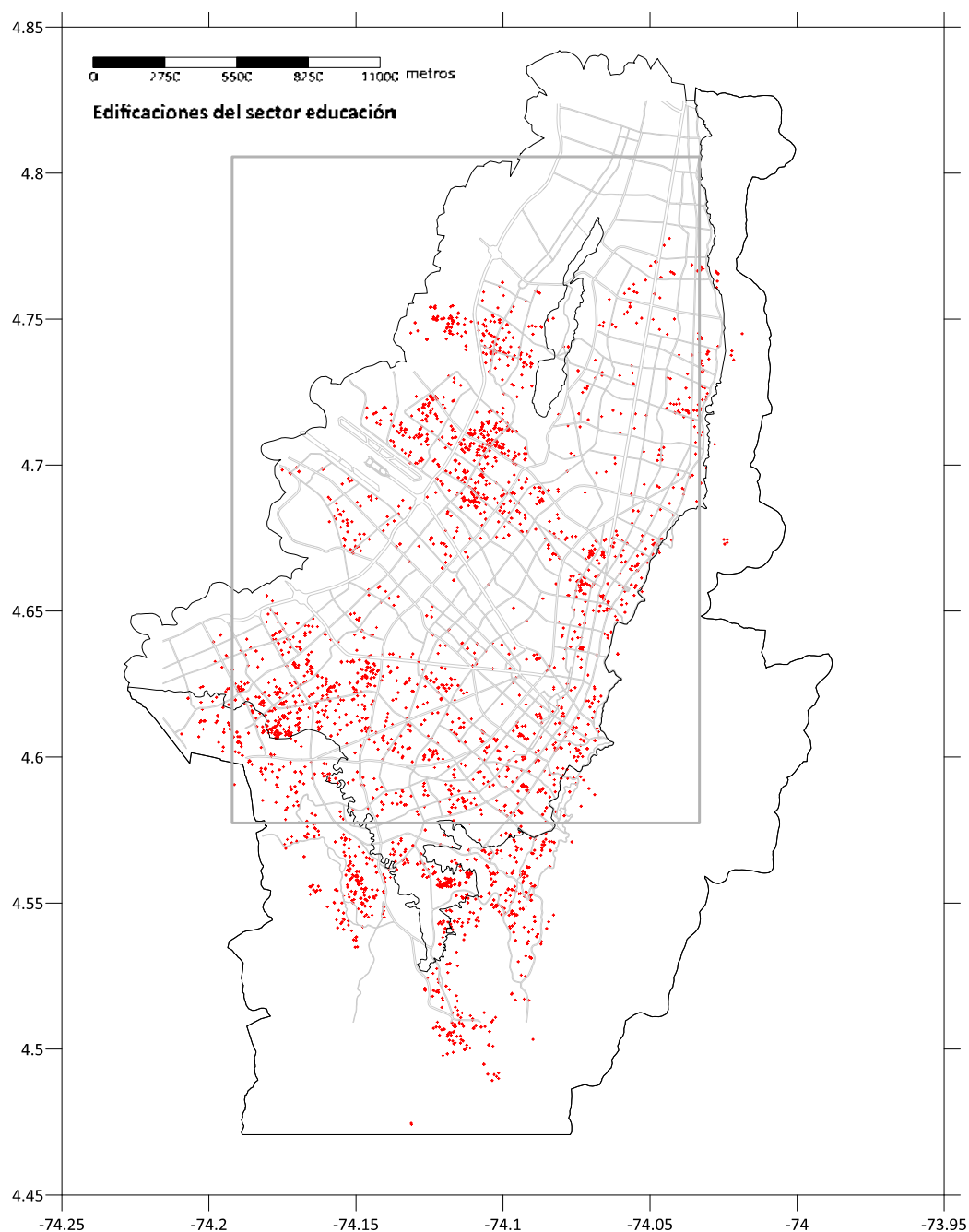


Figura 3.14. Portafolios de edificaciones de educación de Bogotá.

Para la evaluación del riesgo se emplearon las funciones de vulnerabilidad propuestas en Zuloaga (2011). Dichas funciones de vulnerabilidad están asociadas a los sistemas estructurales presentados en la Tabla 3.1, los cuales agrupan todas las edificaciones contenidas en el portafolio de educación de Bogotá. La Figura 3.15 y la Figura 3.16 muestran las funciones de vulnerabilidad de cada uno de los sistemas

listados en la Tabla 3.1, en términos de sus funciones de valor esperado y desviación estándar de la pérdida, para la intensidad de movimiento fuerte correspondiente.

Tabla 3.1. Sistemas estructurales de edificaciones en Bogotá.

Código	Sistema estructural	Diafragma	Cubierta	Fachada	Altura
S_MS-SLSB-1	Mampostería simple	Sin diafragma	Ligera	Frágil sin dilatar	Bajo
S_MS-RLSB-2	Mampostería simple	Diafragma rígido	Ligera	Frágil sin dilatar	Bajo
S_CP-SLSB-1	Concreto prefabricado	Sin diafragma	Ligera	Frágil sin dilatar	Bajo
S_CP-FLSB-2	Concreto prefabricado	Diafragma flexible	Ligera	Frágil sin dilatar	Bajo
S_PAA-SLSB-B	Pórticos en acero arriostrados	Sin diafragma	Ligera	Frágil sin dilatar	Medio
S_A-SLSB-1	Adobe	Sin diafragma	Ligera	Frágil sin dilatar	Bajo
S_A-FPSB-2	Adobe	Diafragma flexible	Pesada	Frágil sin dilatar	Bajo
S_PCR-RLSB-2	Pórticos en concreto resistentes a momentos	Diafragma rígido	Ligera	Frágil sin dilatar	Bajo
S_PCM-RCSB-5	Pórticos y muros en concreto	Diafragma rígido	Concreto	Frágil sin dilatar	Alto
S_PCL-RCSB-2	Pórticos en concreto, losa-columna	Diafragma rígido	Concreto	Frágil sin dilatar	Bajo

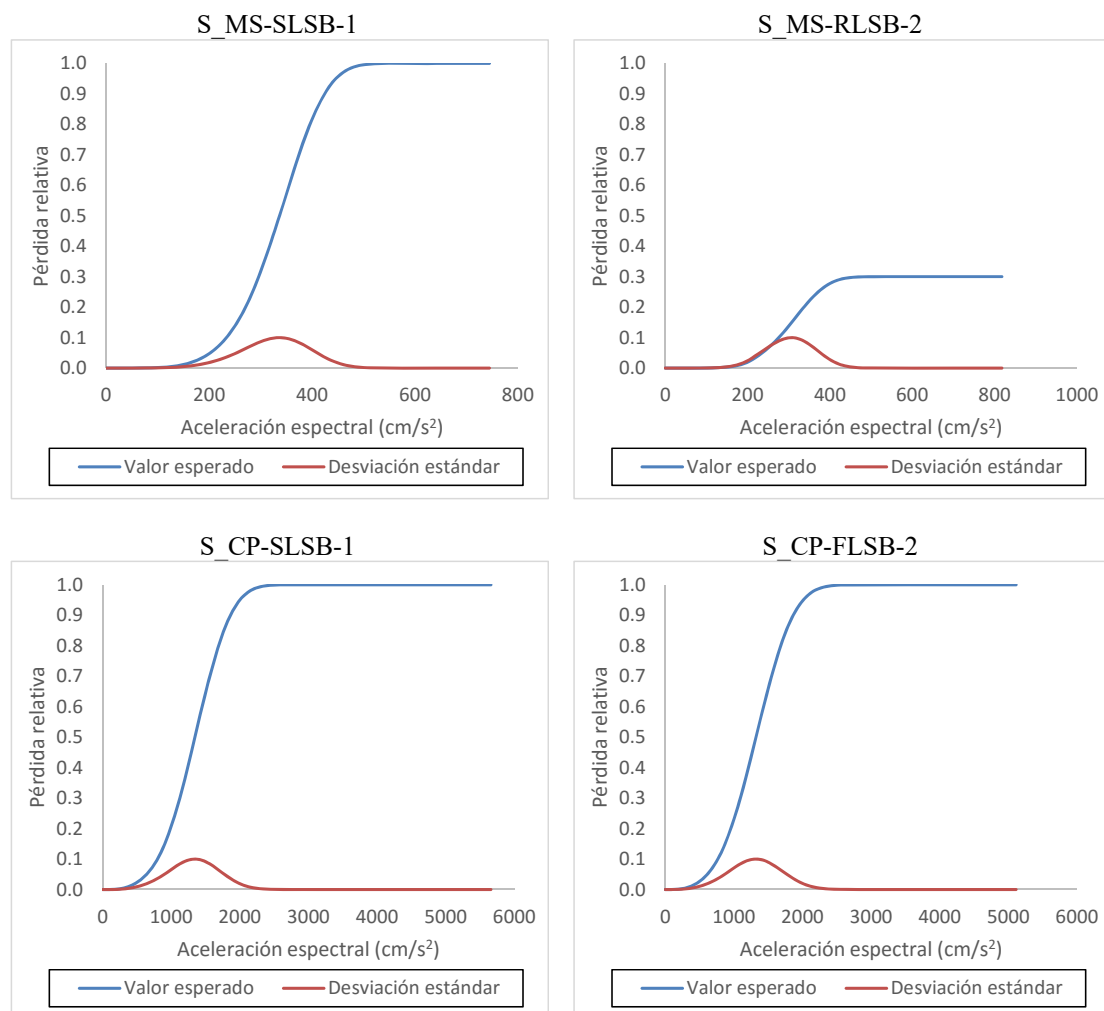


Figura 3.15. Funciones de vulnerabilidad de los sistemas estructurales de Bogotá.

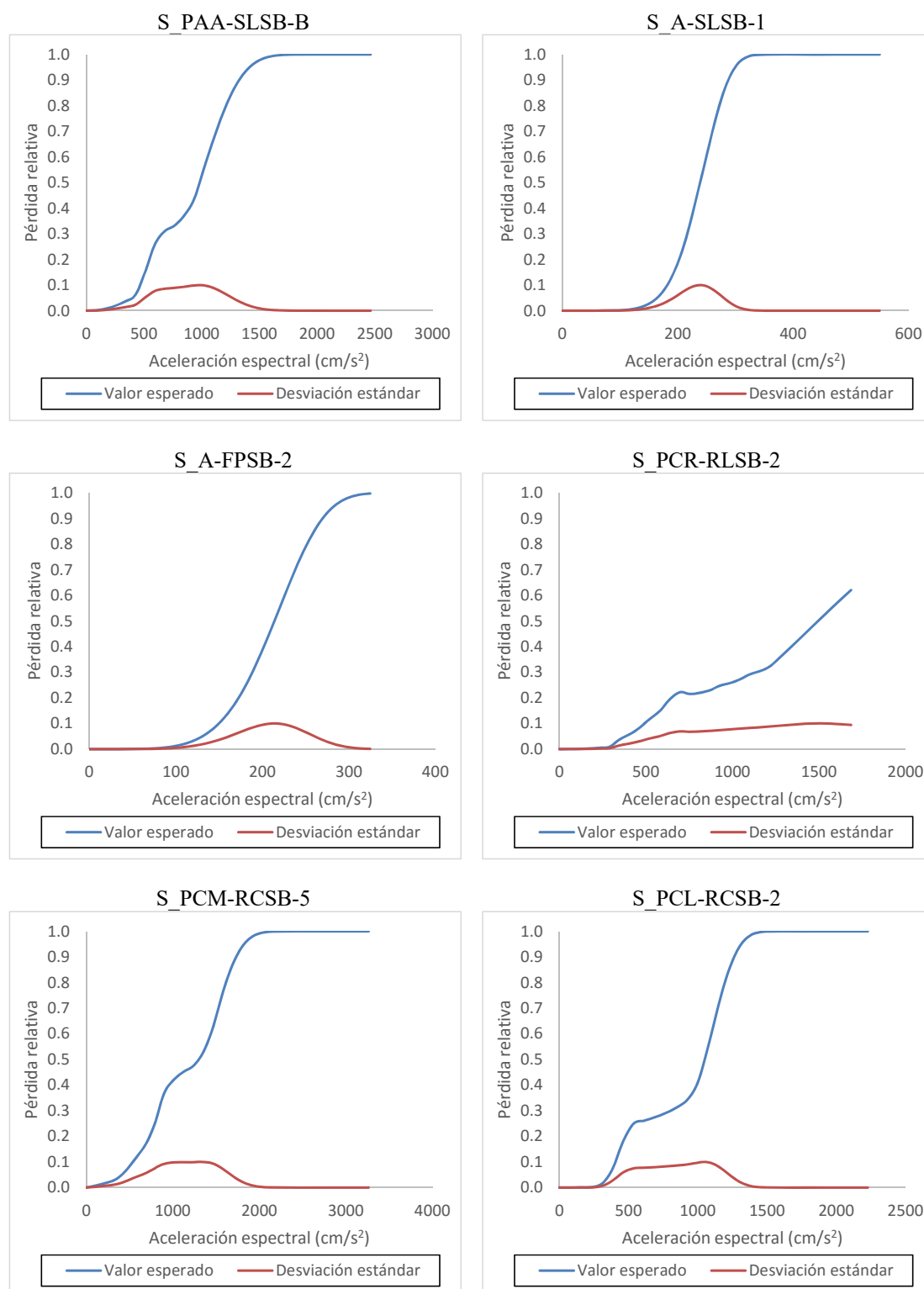


Figura 3.16. Funciones de vulnerabilidad de los sistemas estructurales de Bogotá.

Con la información de exposición y vulnerabilidad presentada, se procedió al cálculo del riesgo sísmico de del portafolio de educación de Bogotá. Con el fin de demostrar la importancia de los efectos de sitio en la evaluación del riesgo, se calcularon las pérdidas en el portafolio de educación, con y sin la capa de amplificación del suelo generada en esta monografía. La Tabla 3.2 muestra de manera comparativa los resultados obtenidos. Se presentan las pérdidas anuales esperadas para ambos casos, así como las pérdidas máximas probables (PML) para cuatro periodos de retorno seleccionados. Se indica también un incremento porcentual en estas métricas, calculado como la diferencia en los valores de pérdida obtenida en cada caso, dividida sobre el valor calculado sin considerar los efectos de sitio.

Tabla 3.2. Resumen de resultados de la evaluación del riesgo.

Con efectos de sitio			Sin efectos de sitio			Incremento
Resultados			Resultados			Pérdida anual esperada
Valor Expuesto	USD\$ x10 ⁶	833.33	Valor Expuesto	USD\$ x10 ⁶	833.33	
Pérdida anual esperada	USD\$ x10 ⁶	3.41	Pérdida anual esperada	USD\$ x10 ⁶	2.14	59.2%
	‰	4.088		‰	2.568	
PML			PML			PML
Periodo retorno	Pérdida		Periodo retorno	Pérdida		
años	USD\$ x10 ⁶	%	años	USD\$ x10 ⁶	%	PML
100	\$48.75	5.85	100	\$36.87	4.42	32.2%
250	\$80.27	9.63	250	\$65.50	7.86	22.6%
500	\$112.63	13.52	500	\$96.89	11.63	16.2%
1000	\$146.70	17.60	1000	\$131.92	15.83	11.2%

La Figura 3.17 muestra la comparación de las curvas de excedencia de pérdidas calculadas con y sin efectos de sitio. Estas curvas dan cuenta de la tasa anual de excedencia de valores de pérdida, la cual indica el número de veces en un año que se espera, en promedio, que se igual o se exceda un valor específico de pérdida. La Figura 3.18 muestra esta misma información pero en términos de la curva de pérdidas máximas probables (PML). Finalmente la Figura 3.19 muestra la probabilidad de excedencia de valores de pérdida (probabilidad de quiebra), para diferentes ventanas de exposición en años, con y sin efectos de sitio.

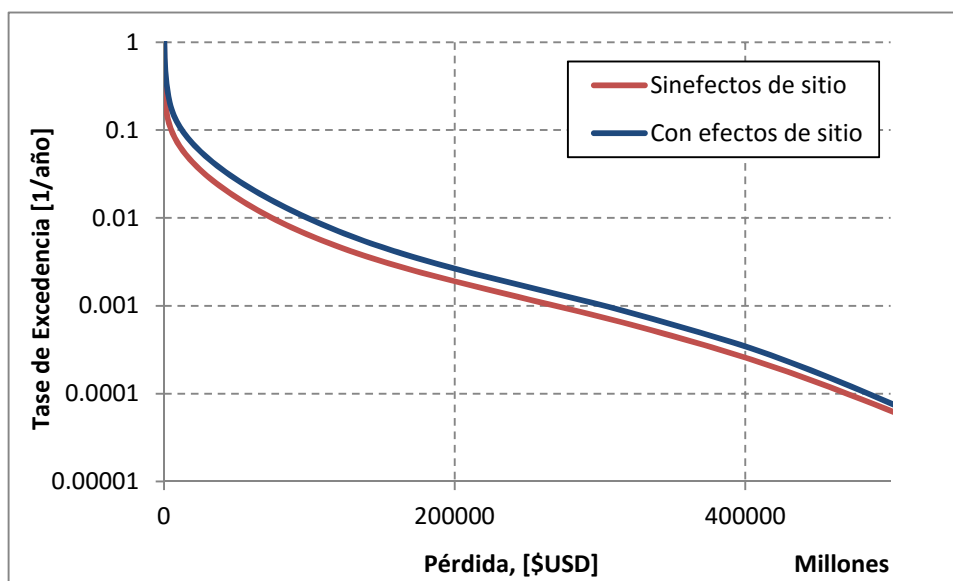


Figura 3.17. Comparación de las curvas de excedencia de pérdidas del portafolio de educación.

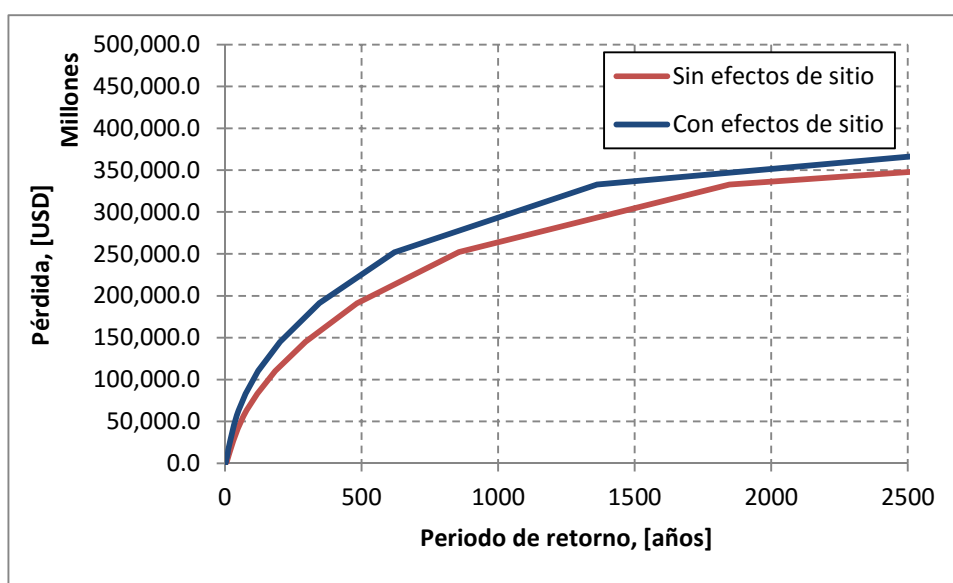


Figura 3.18. Comparación de las curvas de excedencia de PML del portafolio de educación.

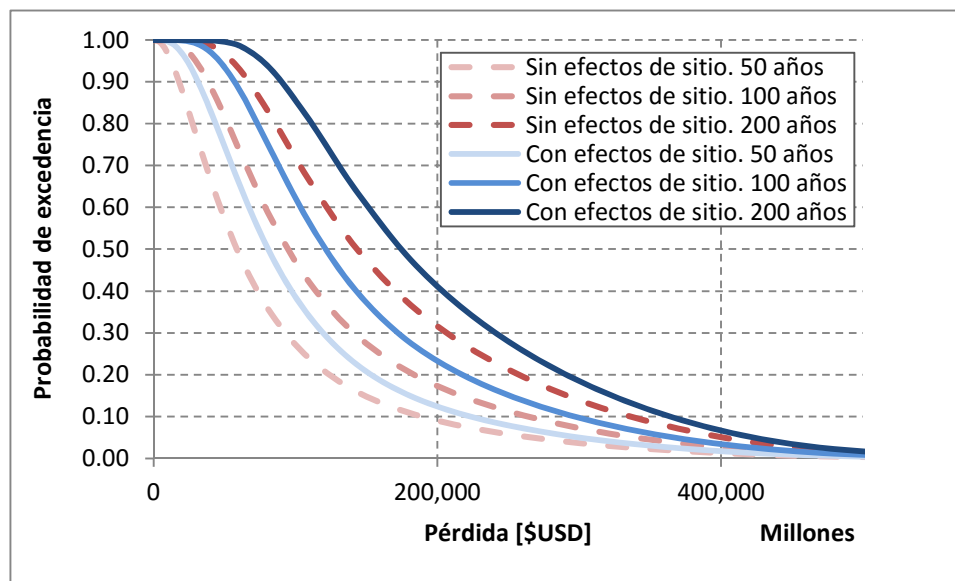


Figura 3.19. Comparación de las curvas de probabilidad de quiebra del portafolio de educación, para diferentes ventanas de exposición.

De las cifras y gráficas mostradas, puede evidenciarse la importancia de los efectos de sitio en la evaluación del riesgo. De no considerarse estos efectos apropiadamente, puede presentarse una subestimación importante en las pérdidas, lo cual conlleva a la generación de estrategias de gestión del riesgo basadas en evaluaciones limitadas, que resultan inadecuadas ante los niveles reales de riesgo existentes. El incremento en la pérdida anual esperada, por ejemplo, al considerar los efectos de sitio en el cálculo es del 59.2%. Para el caso del PML de, por ejemplo, 1000 años, el incremento es del 11.2%. Estas diferencias juegan un papel decisivo a la hora de establecer una política de gestión del riesgo en la ciudad. Si la ciudad quisiera, por ejemplo, asegurar sus edificaciones de educación, podría darse una situación de infra seguro si no se consideran de manera apropiada los efectos de sitio en la evaluación de las pérdidas. Así mismo sucede con otras estrategias de gestión del riesgo. En resumen, es de suma importancia la adecuada caracterización de los efectos de sitio y su adecuada inclusión en los cálculos probabilistas de pérdidas, con el fin de obtener resultados verdaderamente útiles.

3.2 GENERACIÓN DE SHAKEMAPS

Dentro de los sistemas automáticos de evaluación de daños post-terremoto, como el SISBog-LISA de la ciudad de Bogotá (Bernal, 2009), la generación de shakemaps es un paso importante dado que provee la distribución espacial del movimiento fuerte tras la ocurrencia de un terremoto. En resumen, estos sistemas registran un acelerograma de movimiento fuerte en una estación ubicada preferiblemente sobre roca firme y, de manera automática, obtienen la distribución de parámetros de movimiento fuerte (shakemap) en toda la extensión de la ciudad, haciendo uso de funciones de transferencia precalculadas, y en seguida calculan los daños esperados en todas las edificaciones dentro de la ciudad, con base en funciones de

vulnerabilidad predefinidas. La Figura 3.20 presenta de manera esquemática el proceso de funcionamiento del sistema SISBog-LISA (Bernal, 2009).

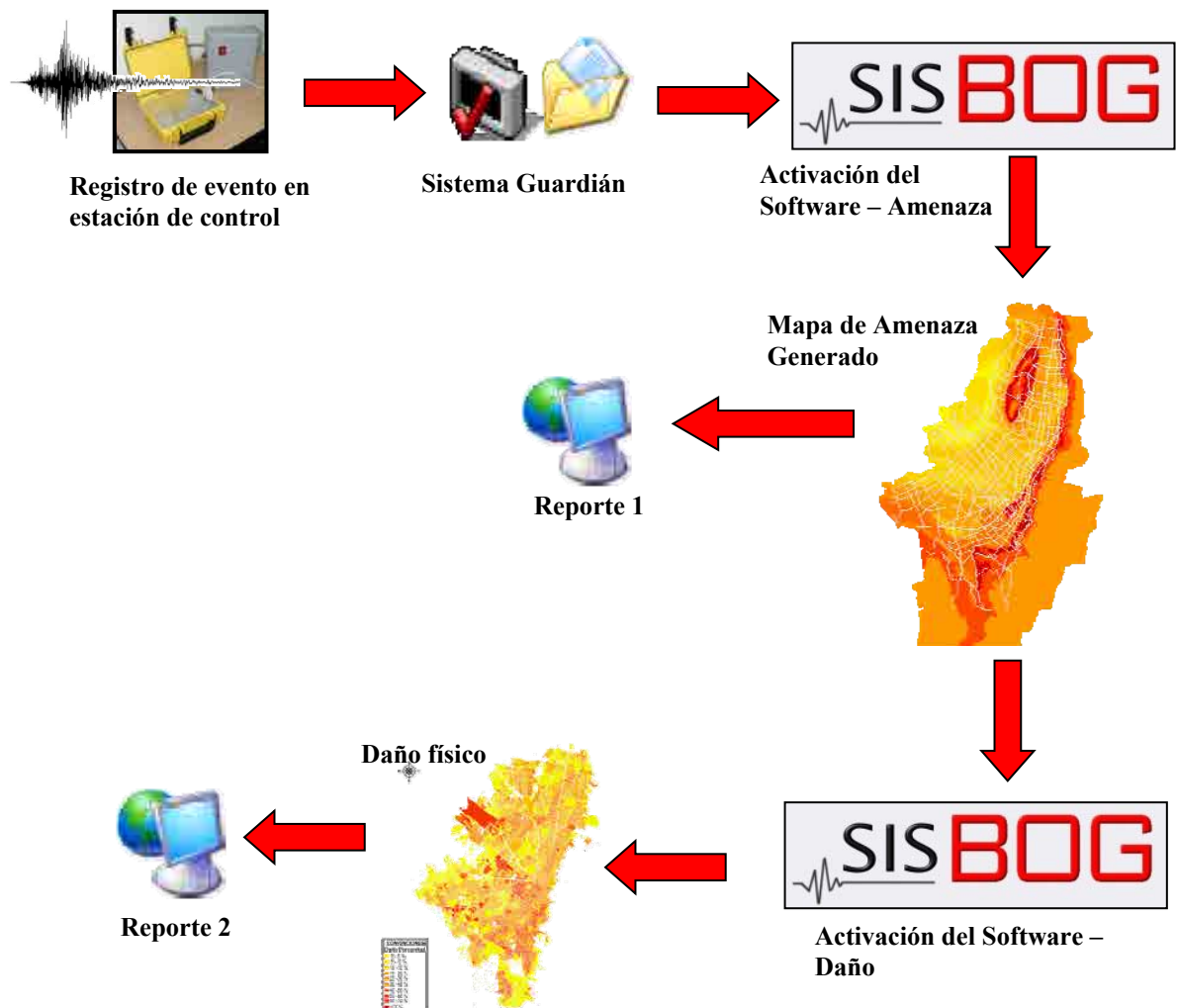


Figura 3.20. Esquema de funcionamiento del software SISBog-LISA (Bernal, 2009).

En particular, el SISBog-LISA está diseñado de manera que pueda enviar reportes a los usuarios autorizados en cuestión de pocos minutos. Si bien la velocidad de cálculo y envío de reportes depende del hardware y de la calidad de la conexión a internet con que se cuente, al momento de su desarrollo el sistema enviaba el primer reporte luego de 2 minutos de registrado el sismo, y el segundo reporte luego de 5 minutos de registrado (Bernal, 2009). Esto provee información de gran valor y en poco tiempo, a las entidades encargadas de la respuesta a la emergencia.

Haciendo uso del modelo desarrollado en esta monografía, si se conoce el acelerograma a nivel de roca firme, el cual puede asumirse como uniforme en toda la extensión de la ciudad, es posible calcular, en cuestión de pocos minutos, los acelerogramas resultantes en superficie, en los 625 sitios de cálculo definidos. Esto

permite por supuesto generar shakemaps en términos de cualquier parámetro de movimiento fuerte.

A modo de ejemplo, se calculó la respuesta dinámica en los 625 sitios del modelo, ante el acelerograma del sismo de Armenia (Eje Cafetero), Colombia, del 19 de enero de 1999, de magnitud Mw 6.2, registrado en la estación Bocatoma. La Figura 3.21 muestra el acelerograma registrado. De la Figura 3.22 a la Figura 3.29 se muestran los mapas de distribución de la aceleración espectral, para periodos estructurales entre 0 y 3 segundos. Estos cálculos fueron realizados con el programa Seismic Microzonation Studio (Anexo C), para la conformación del modelo de efectos de sitio. El cálculo en todos los 625 sitios tardó, en total, 2.3 minutos.

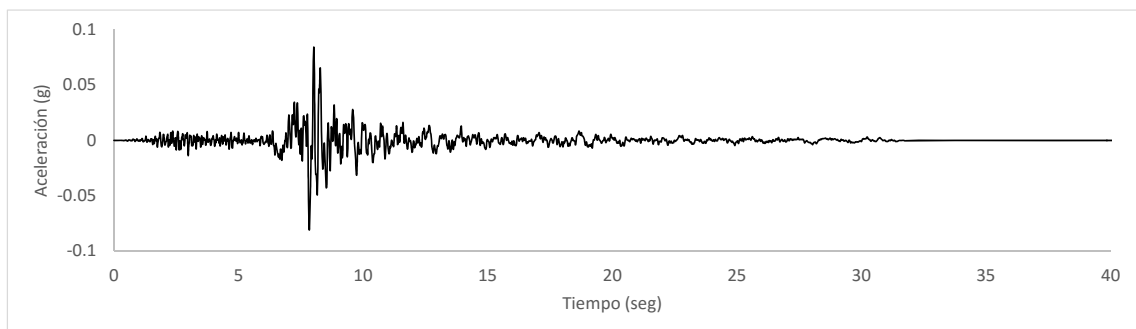


Figura 3.21. Acelerograma del sismo de Armenia (1999) registrado en la estación Bocatoma.

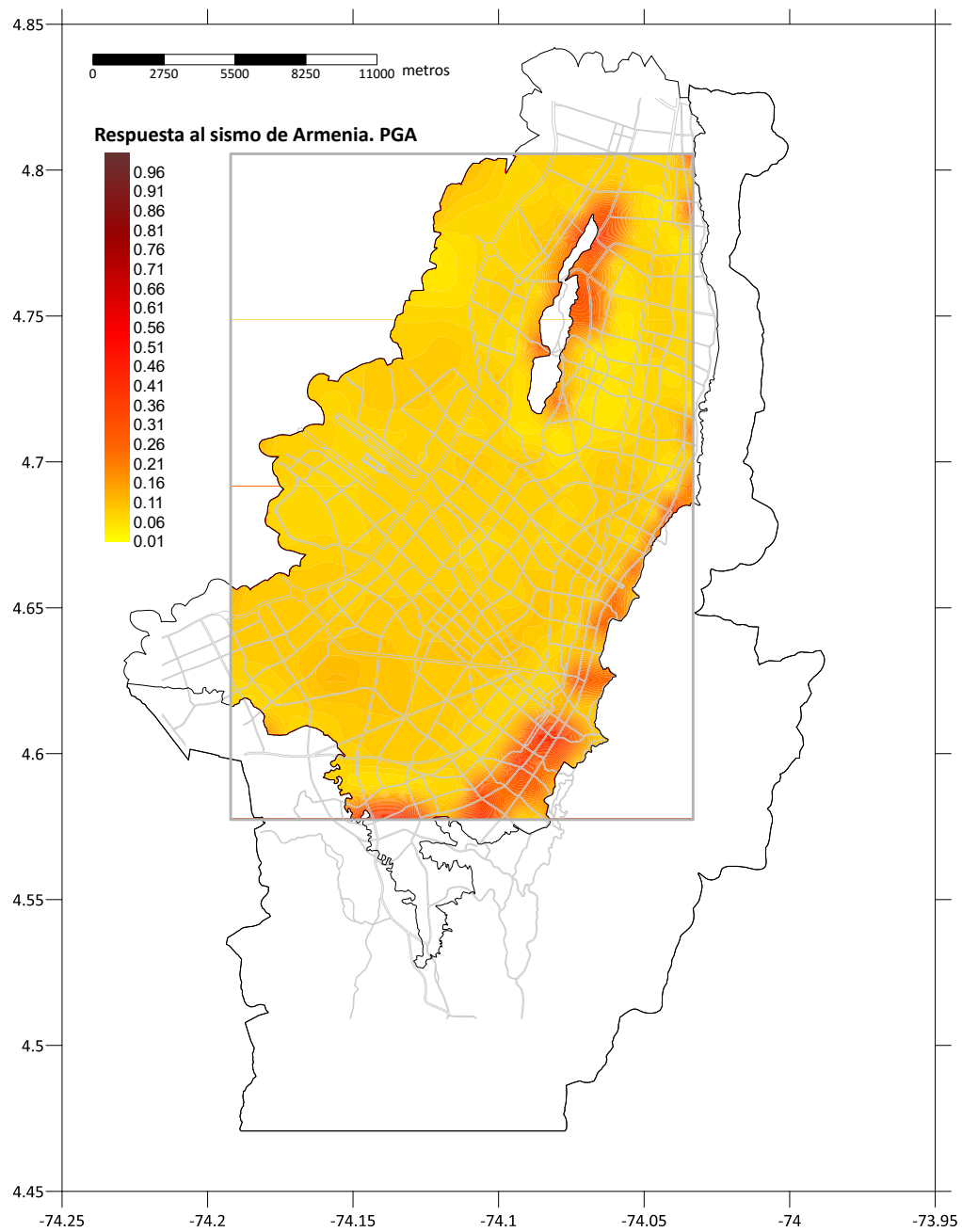


Figura 3.22. Distribución espacial de PGA para el sismo de Armenia (1999).

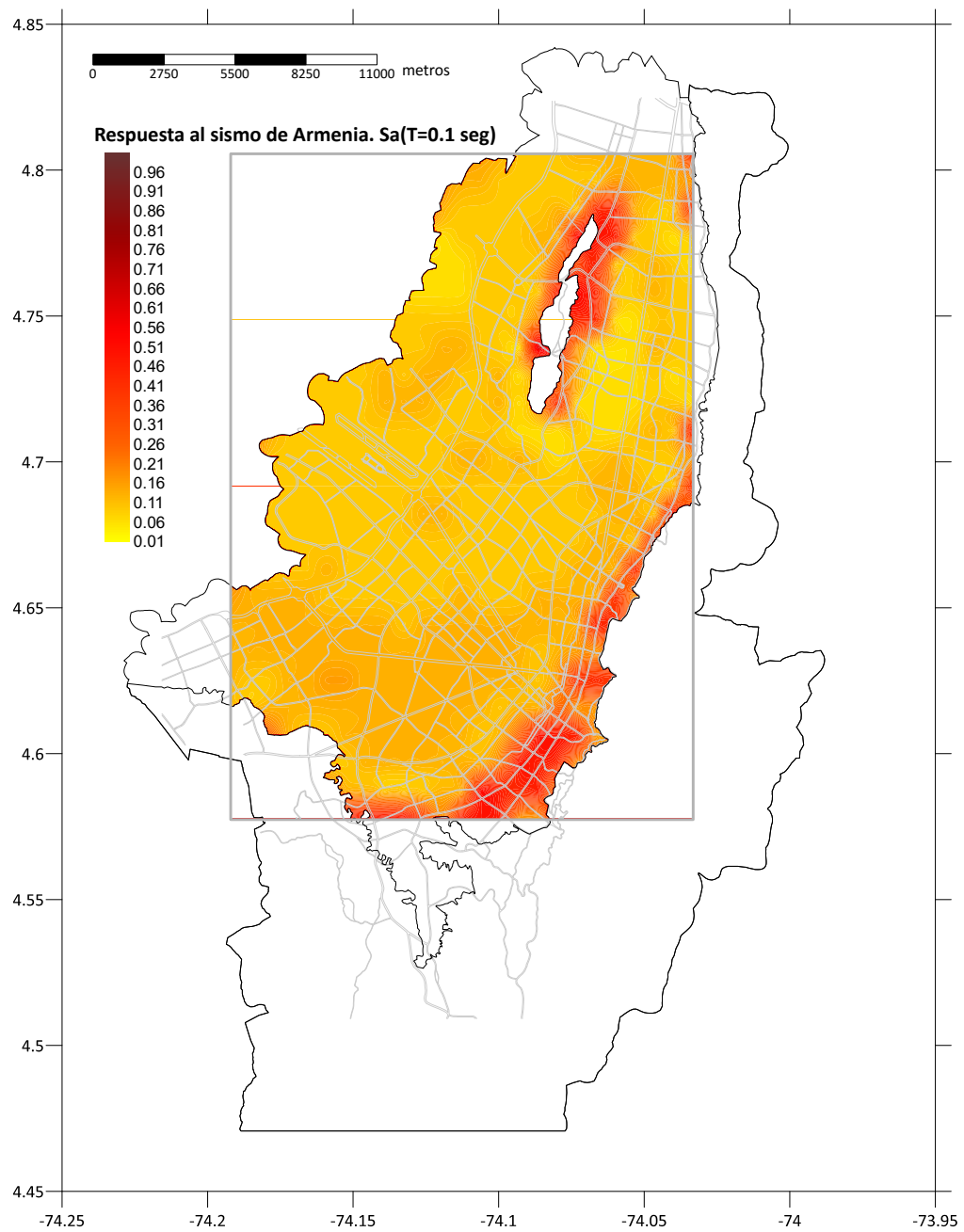


Figura 3.23. Distribución espacial de $S_a(T=0.1 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

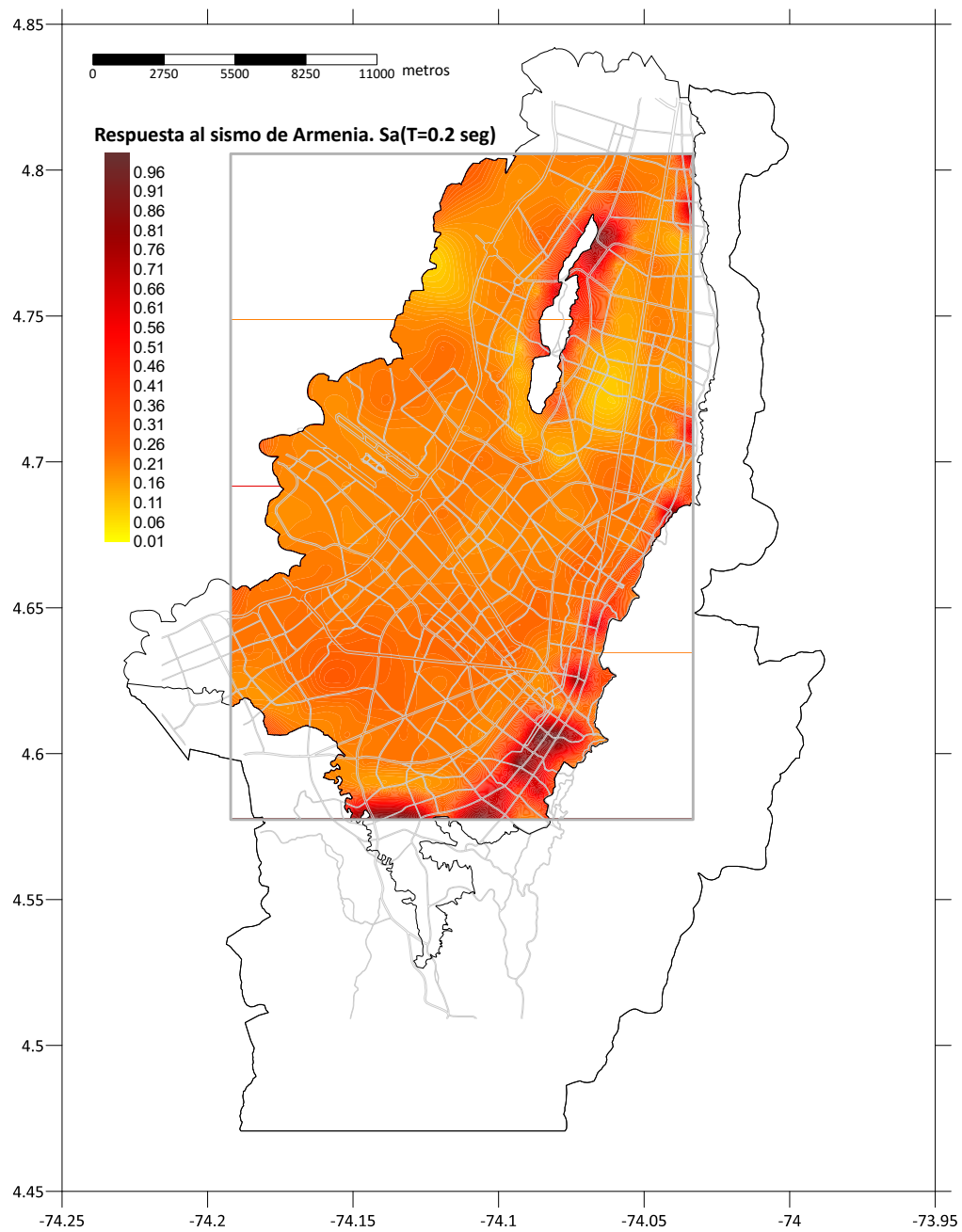


Figura 3.24. Distribución espacial de $S_a(T=0.2 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

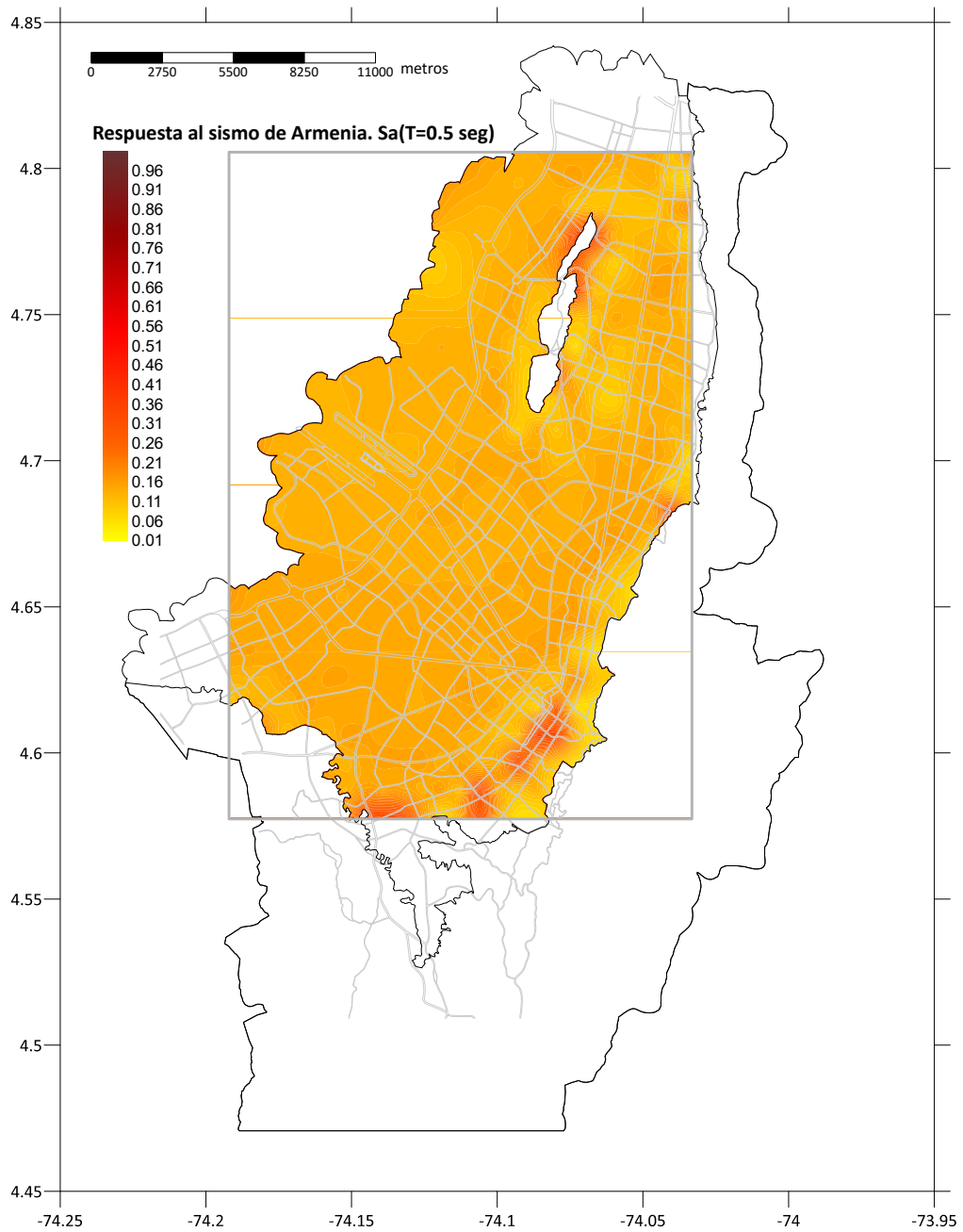


Figura 3.25. Distribución espacial de $S_a(T=0.5 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

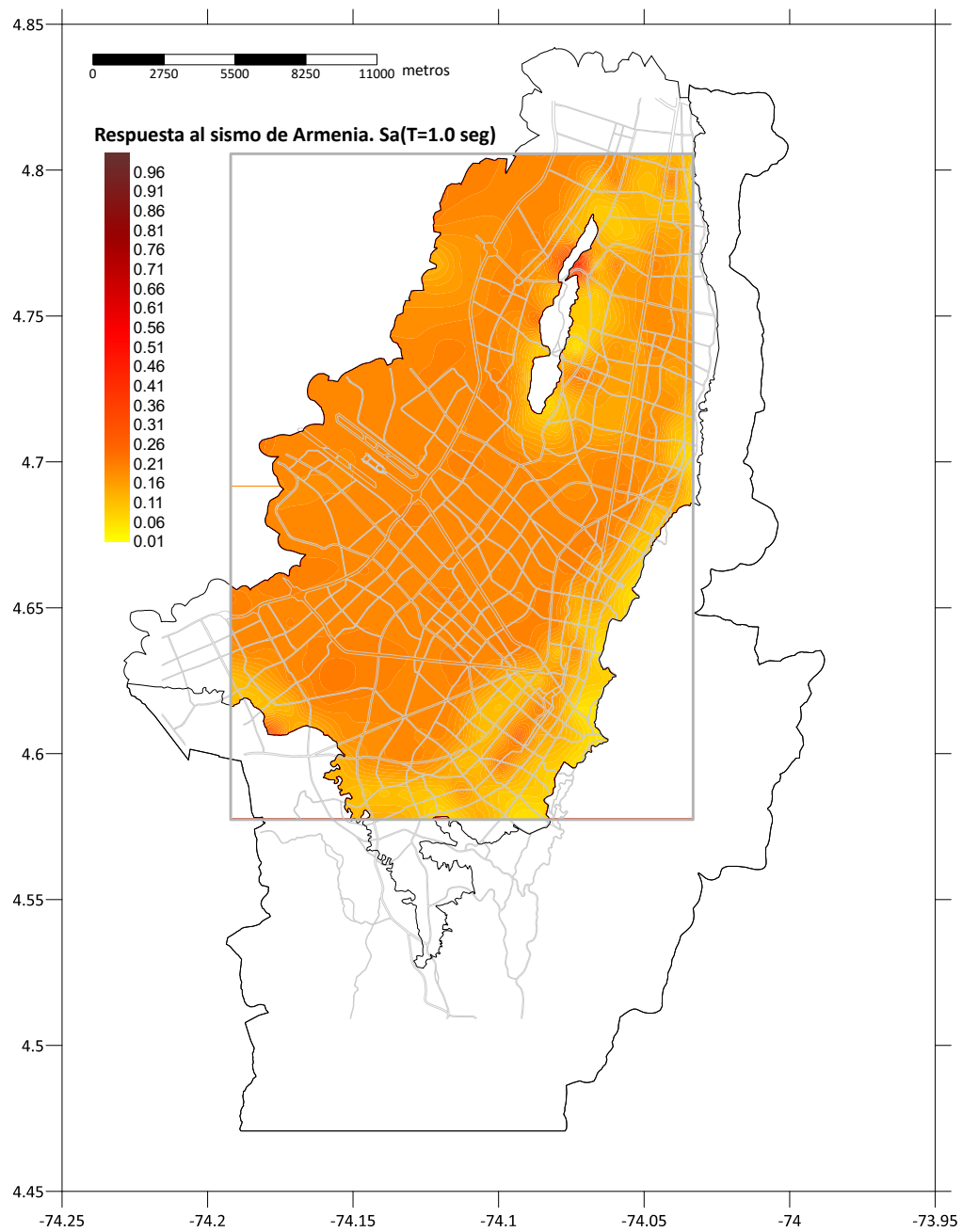


Figura 3.26. Distribución espacial de $S_a(T=1 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

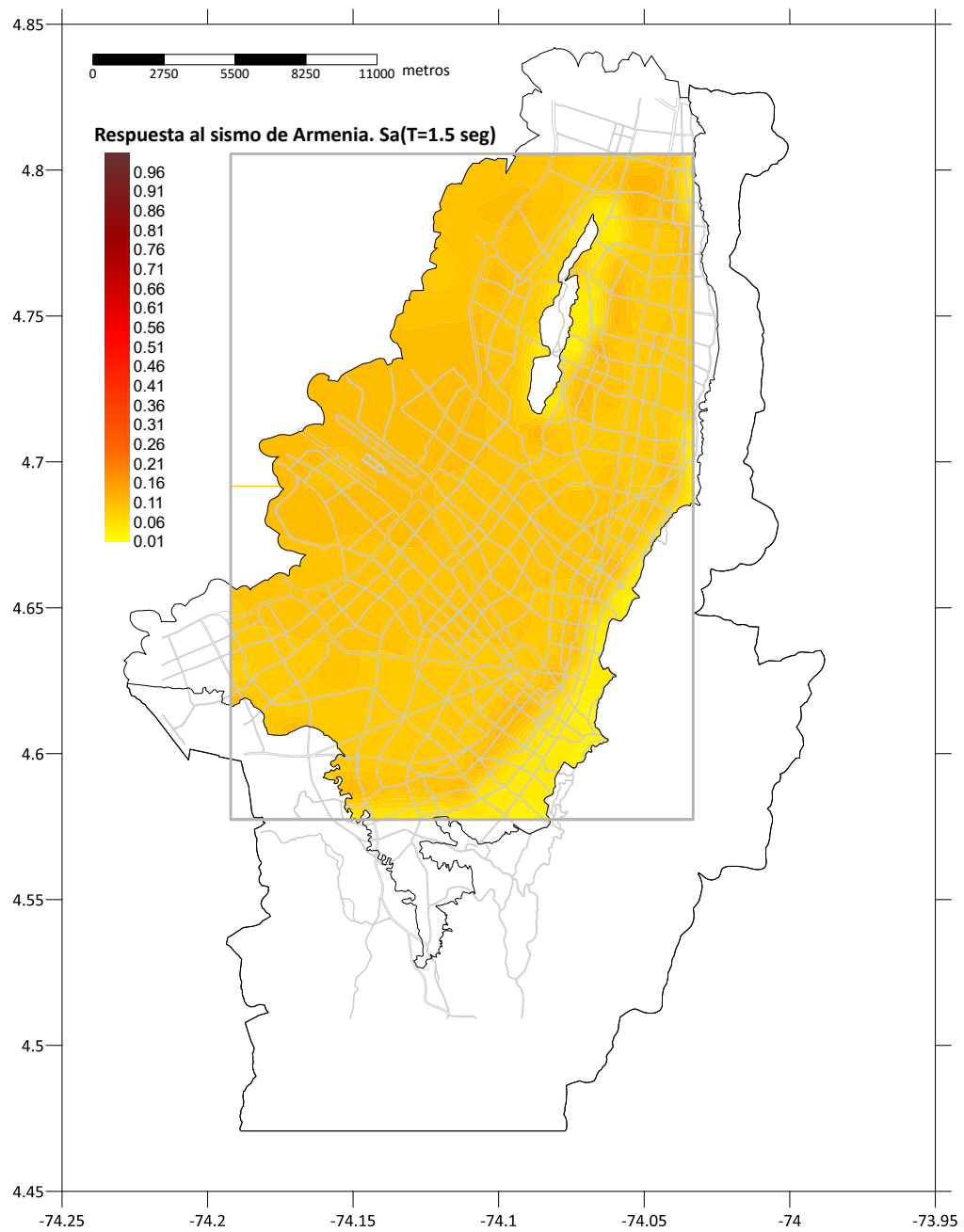


Figura 3.27. Distribución espacial de $S_a(T=1.5 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

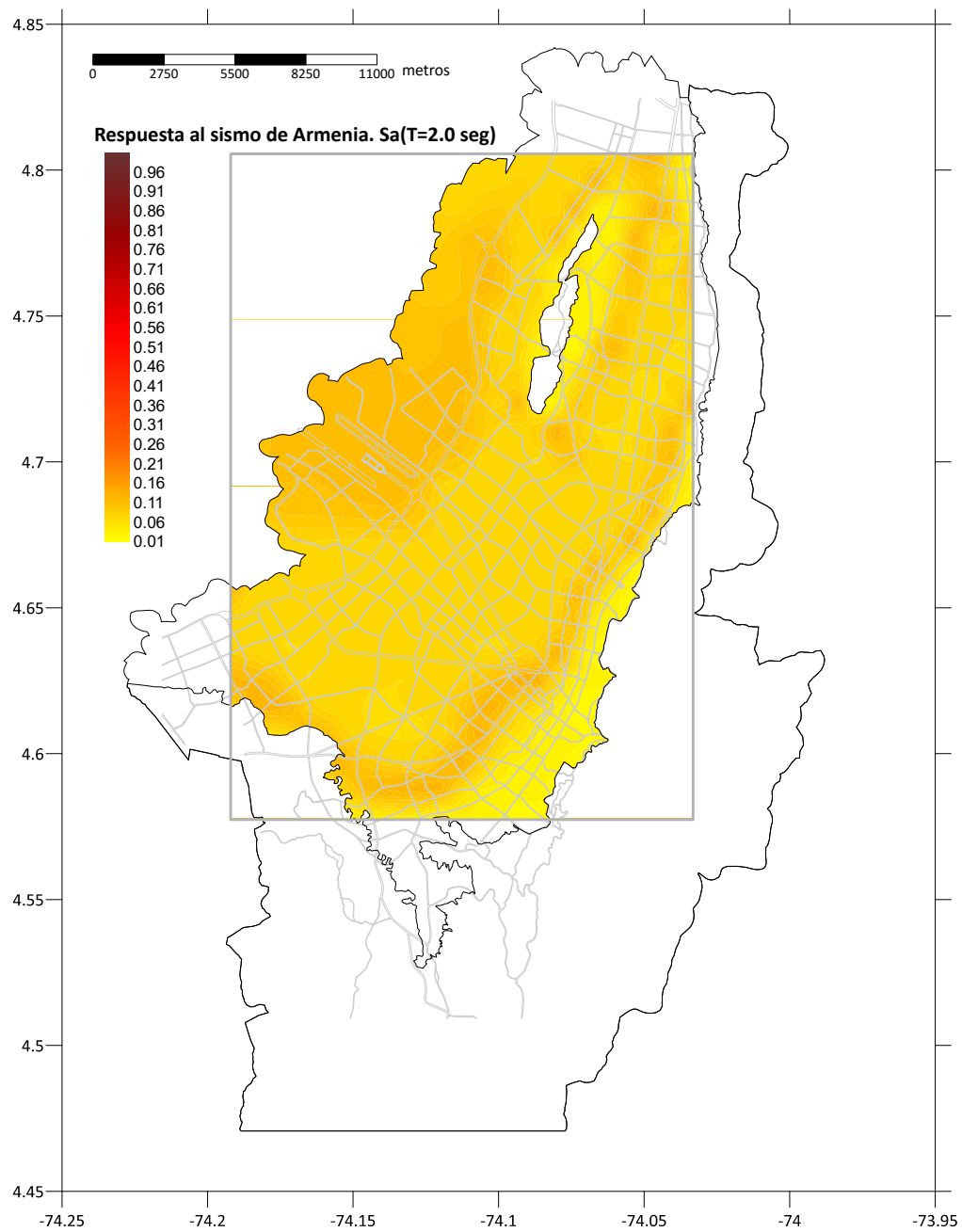


Figura 3.28. Distribución espacial de $S_a(T=2 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

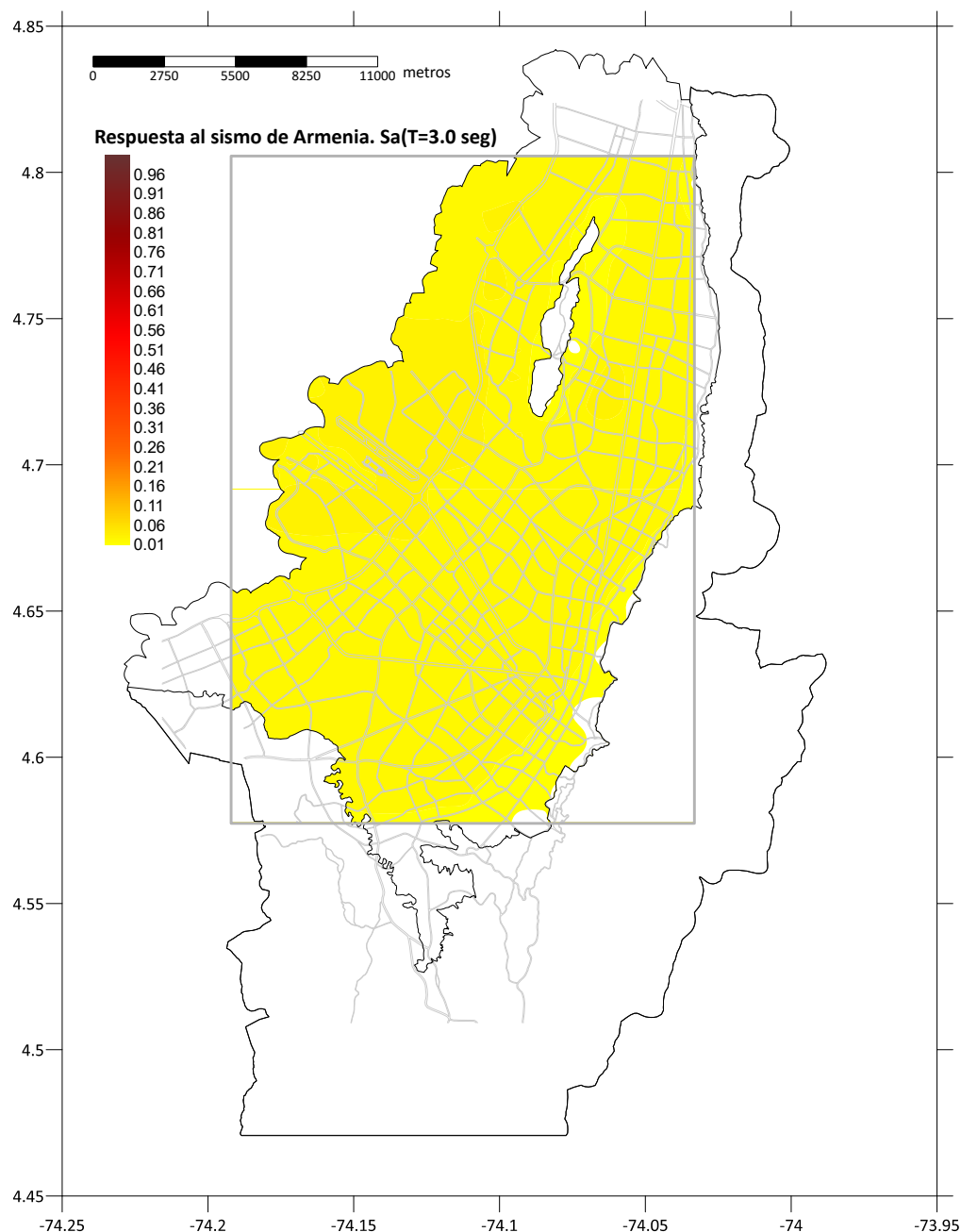


Figura 3.29. Distribución espacial de $S_a(T=3 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

En futuras investigaciones podría pensarse en la vinculación del modelo de respuesta desarrollado en esta monografía, dentro de un sistema como el SISBog-LISA, de manera que sea posible obtener estimativos del nivel de daños en las edificaciones de la ciudad tras la ocurrencia de un terremoto importante. Este sistema deberá ser administrado por las entidades encargadas de la gestión del riesgo en la ciudad, y deberá operar de manera coordinada con la red de acelerógrafos de Bogotá.

Adicionalmente, esta aplicación particular del modelo de respuesta sísmica puede emplearse como base para la evaluación de pérdidas ante escenarios sísmicos específicos, empleando acelerogramas de sismos sintéticos o reales ya ocurridos, de tal manera que puedan identificarse de manera rápida las zonas de la ciudad más afectadas por eventos de determinadas características, y de esta manera dimensionar recursos para la atención de futuras emergencias.

3.3 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE BOGOTÁ

Una aplicación evidente del modelo de respuesta sísmica de los suelos de Bogotá, es la definición de los movimientos sísmicos de diseño de edificaciones. Los estudios de microzonificación sísmica usualmente proveen esta información, tomando en cuenta el efecto de la respuesta dinámica de los suelos blandos en la amplificación o deamplificación del movimiento fuerte a nivel de superficie del terreno.

Con base en un estudio de microzonificación sísmica, una ciudad puede adelantar la planificación de su desarrollo definiendo claramente las políticas de uso de la tierra y las restricciones necesarias a ciertos tipos de construcción. Paralelamente, puede adelantar proyectos de mitigación del riesgo sísmico a través del diseño de construcciones teniendo en cuenta los efectos que un sismo máximo probable pueda producir en determinada ubicación. Como consecuencia, se minimizan los efectos de eventos sísmicos futuros, como las pérdidas de vidas humanas, el número de personas afectadas por el fenómeno natural y las pérdidas económicas asociadas. En esa sección se presenta la aplicación del modelo de respuesta propuesto en esta monografía en la microzonificación sísmica de Bogotá.

3.3.1 Funciones de atenuación

En cada nodo de la malla de cálculo se determina una función de atenuación particular, la cual es empleada para el análisis de amenaza sísmica específica de cada sitio. La Figura 3.30 presenta las funciones de atenuación, para fuente activa y subducción, para 2 sitios seleccionados al azar dentro de la malla de cálculo (uno de ellos es el sitio 226). Si bien la Figura 3.30 presenta los valores de la mediana de la aceleración máxima del terreno, para todas las ordenadas del espectro de respuesta se puede estimar su incertidumbre, haciendo uso de la ecuación 4-6 y empleando los valores calculados de $\sigma_{\ln AF}$ en cada ubicación.

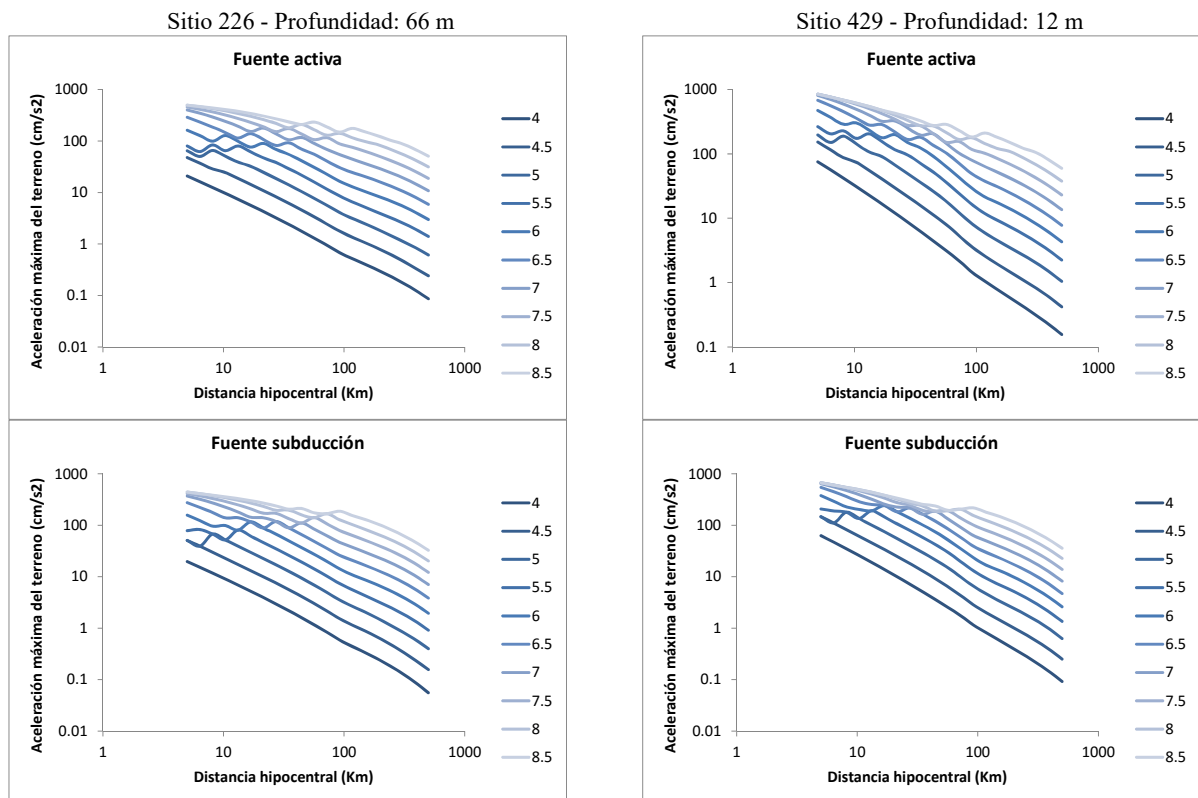


Figura 3.30. Funciones de atenuación de sitios seleccionados.

3.3.2 Amenaza sísmica en superficie

Empleando las funciones de atenuación calculadas, se realiza un análisis de amenaza sísmica particular en cada nodo de la malla de cálculo, empleando el mismo modelo de amenaza sísmica que para la evaluación en roca firme. La Figura 3.31 presenta los espectros de amenaza uniforme para 475 años de periodo de retorno, para los mismos sitios presentados anteriormente.

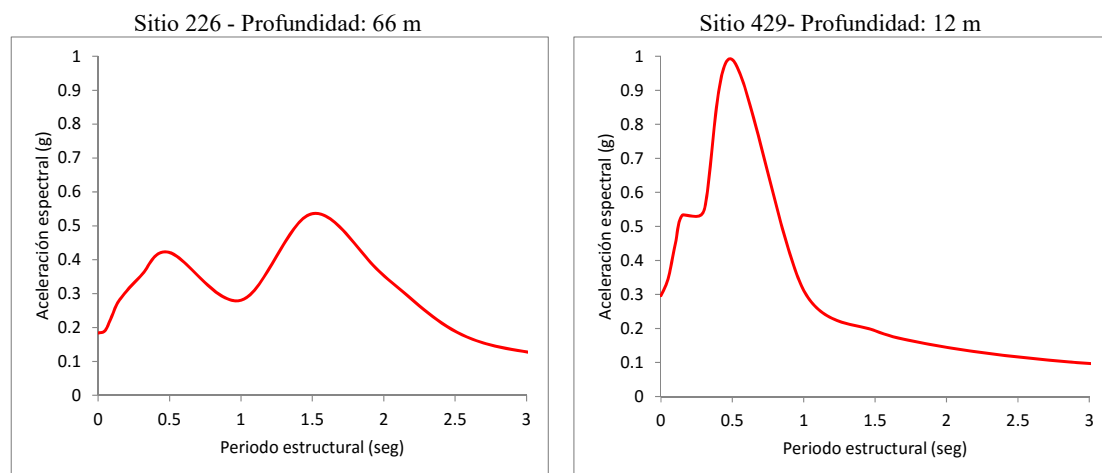


Figura 3.31. Espectros de amenaza uniforme de sitios seleccionados.

A partir del análisis de amenaza sísmica individual para cada nodo de la malla de cálculo, es posible generar mapas de aceleración espectral para 475 años de periodo de retorno, para diferentes periodos de vibración de estructuras. Estos mapas muestran la variabilidad en la respuesta estructural esperada en la ciudad, por cuenta de las condiciones de respuesta sísmica de los suelos blandos. La Figura 3.32 a Figura 3.38 presentan los mapas de distribución espacial de la aceleración espectral para periodos estructurales de 0, 0.05, 0.3, 0.5, 1, 2 y 3 segundos.

De los mapas presentados puede determinarse, para cada punto que se encuentre en el perímetro urbano de la ciudad, su amenaza sísmica a nivel de superficie del terreno en términos del espectro elástico de respuesta para un coeficiente de amortiguamiento del 5% respecto al crítico (es decir, para todas las variaciones posibles de edificaciones dentro de ciertos límites) y un periodo de retorno de 475 años. Dado que el resultado real de la evaluación de la amenaza sísmica en superficie es un conjunto de curvas de amenaza en cada ubicación de la malla de cálculo, una para cada periodo estructural, los resultados pueden presentarse en términos de cualquier otro periodo de retorno.

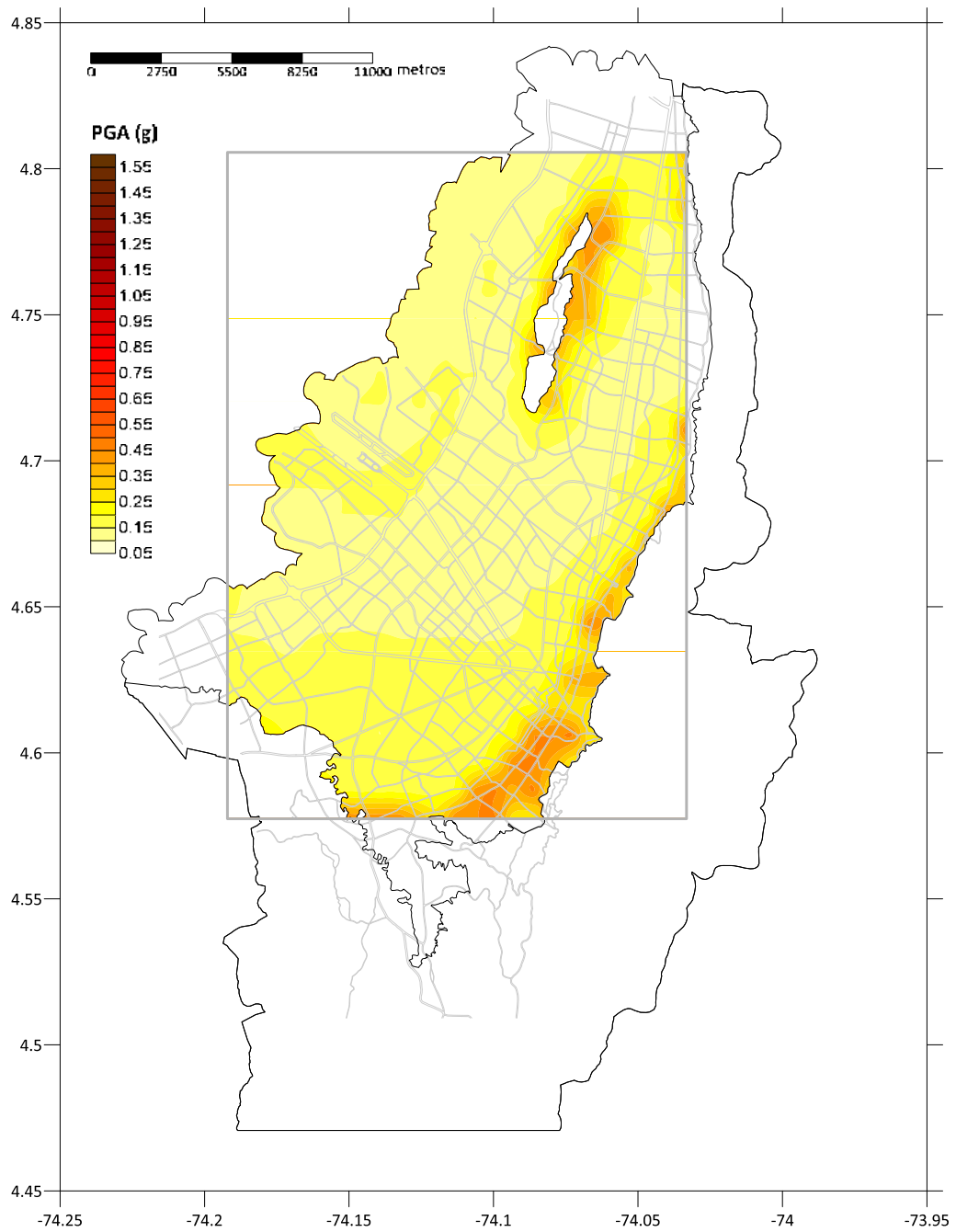


Figura 3.32. Mapa de amenaza uniforme en términos de PGA.

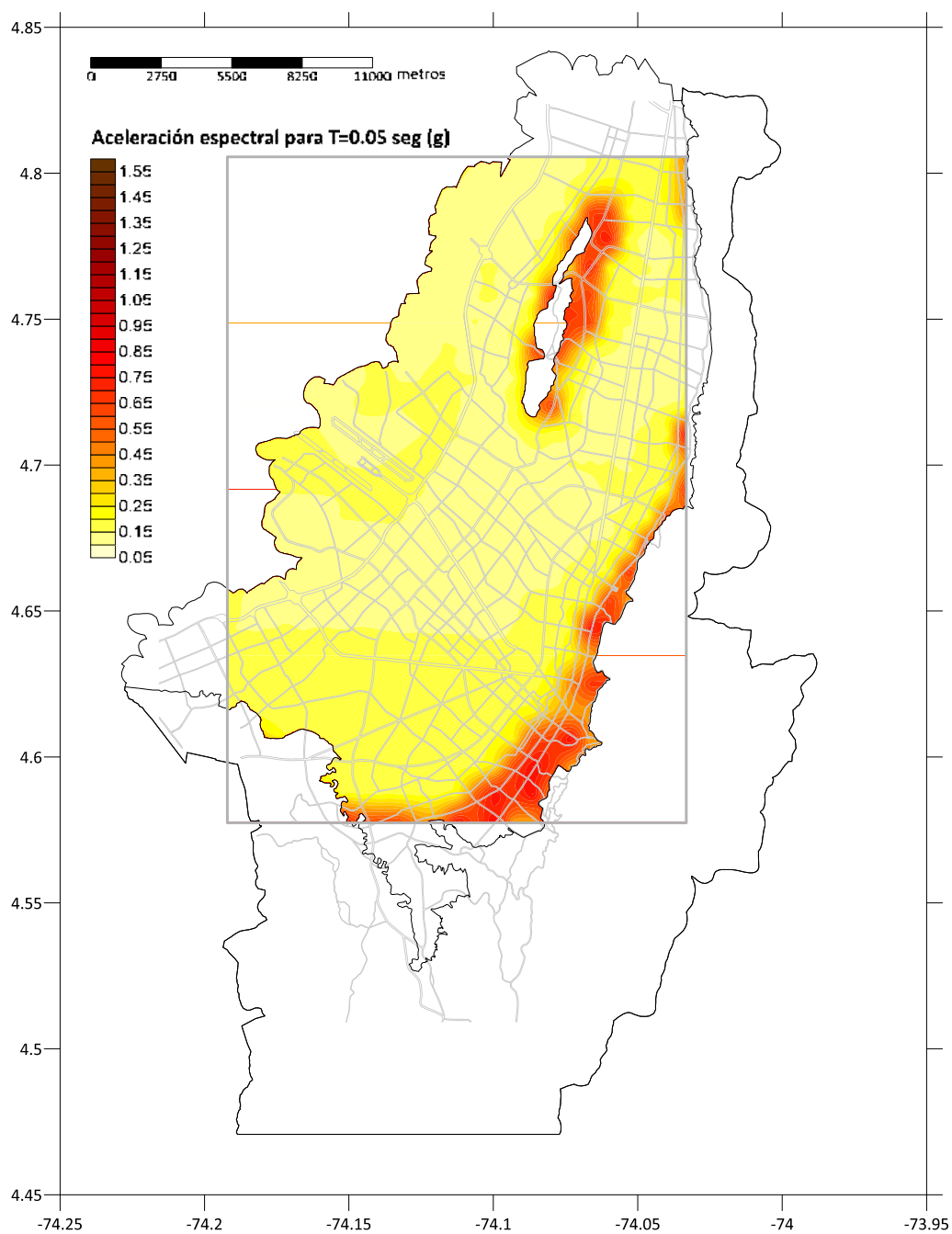


Figura 3.33. Mapa de amenaza uniforme en términos de la aceleración espectral para $T=0.05$ seg.

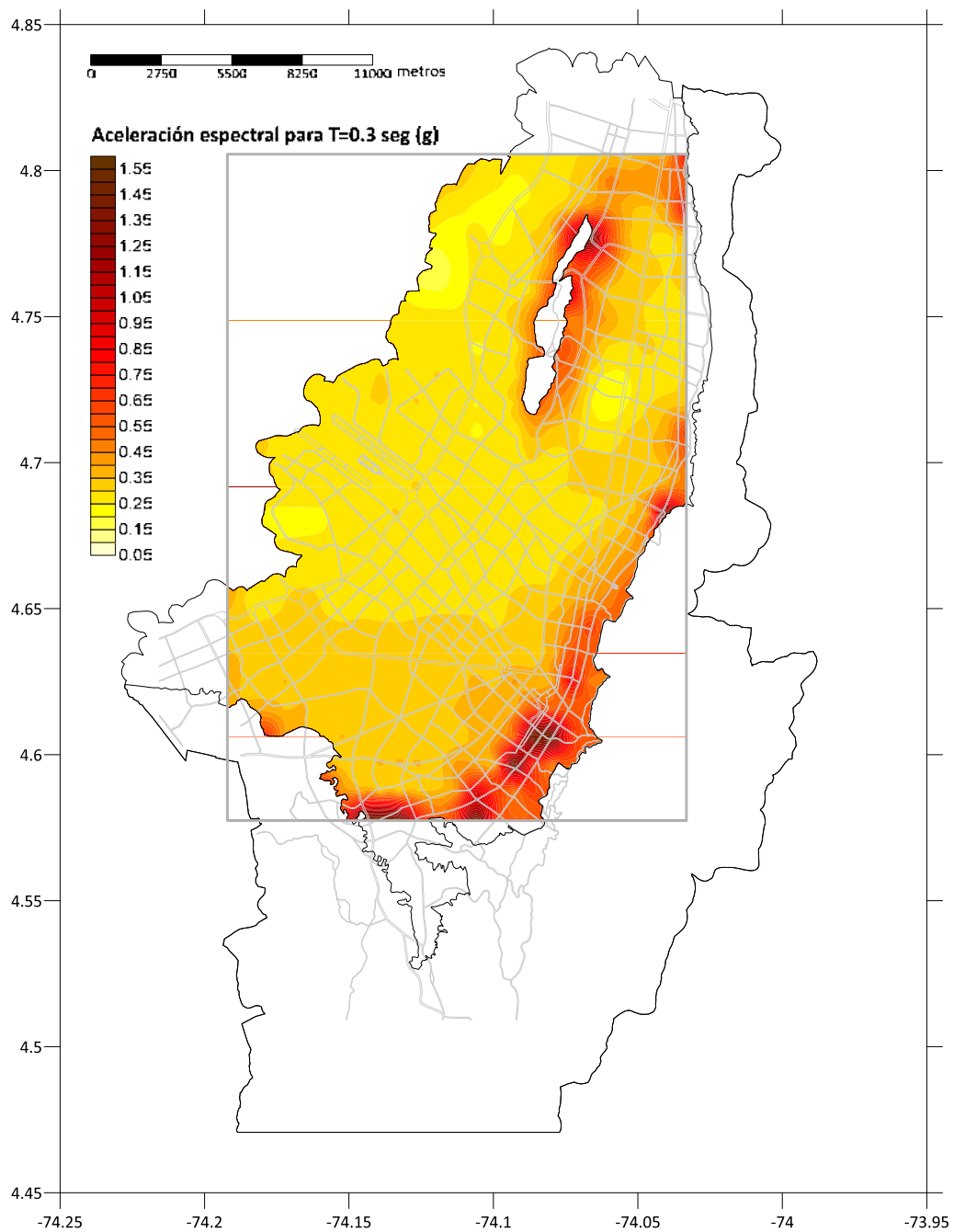


Figura 3.34. Mapa de amenaza uniforme en términos de la aceleración espectral para $T=0.3$ seg.

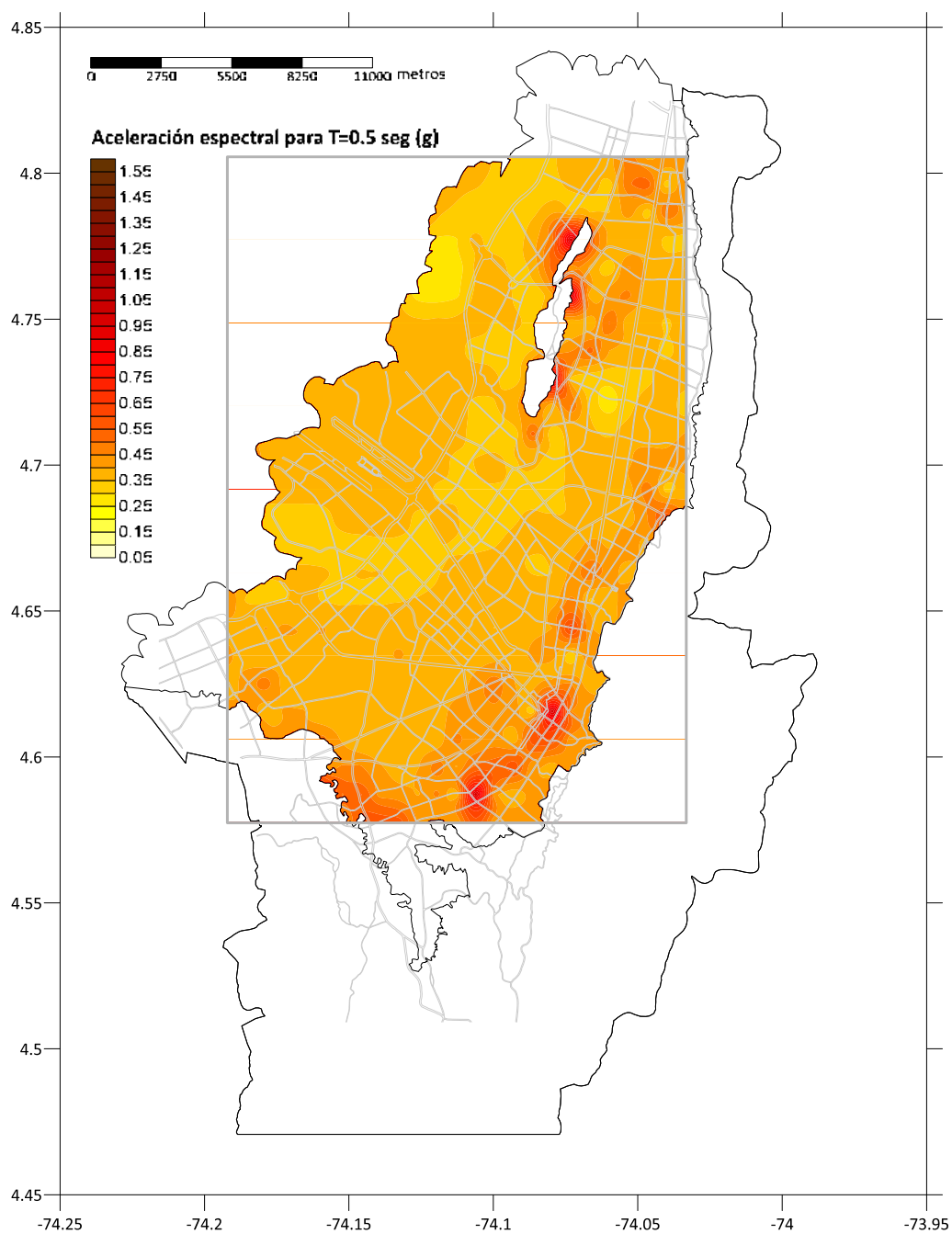


Figura 3.35. Mapa de amenaza uniforme en términos de la aceleración espectral para $T=0.5$ seg.

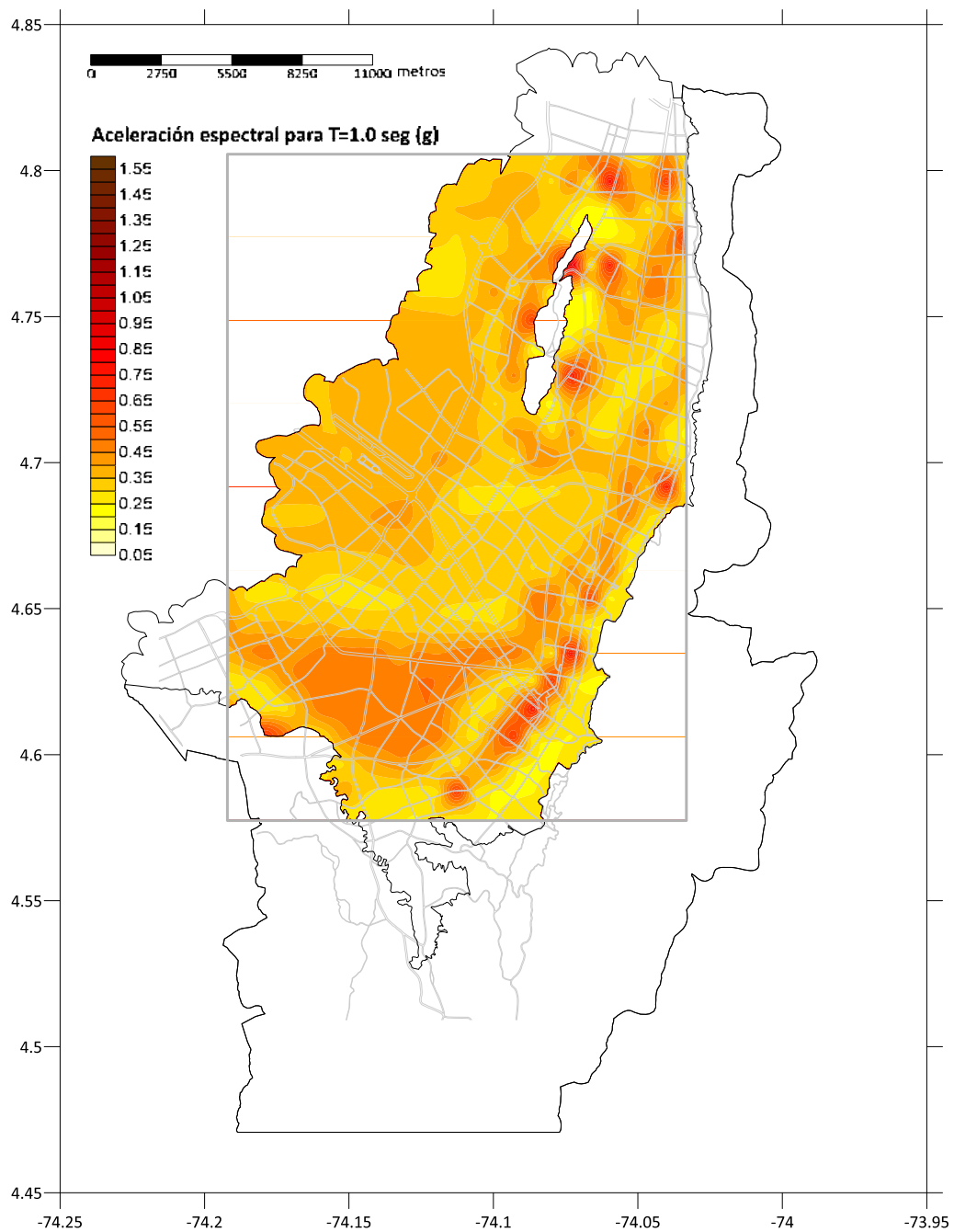


Figura 3.36. Mapa de amenaza uniforme en términos de la aceleración espectral para $T=1.0$ seg.

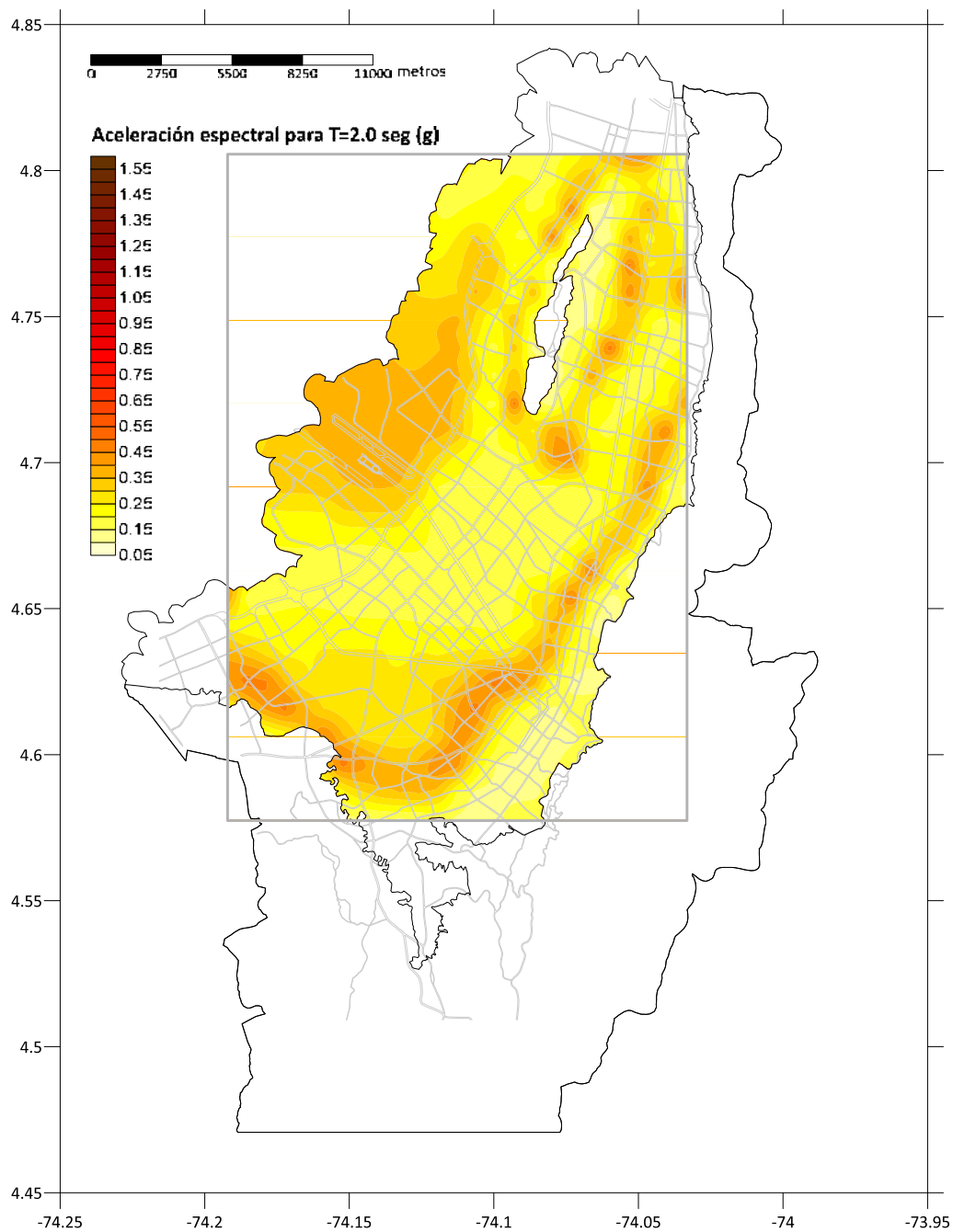


Figura 3.37. Mapa de amenaza uniforme en términos de la aceleración espectral para $T=2.0$ seg.

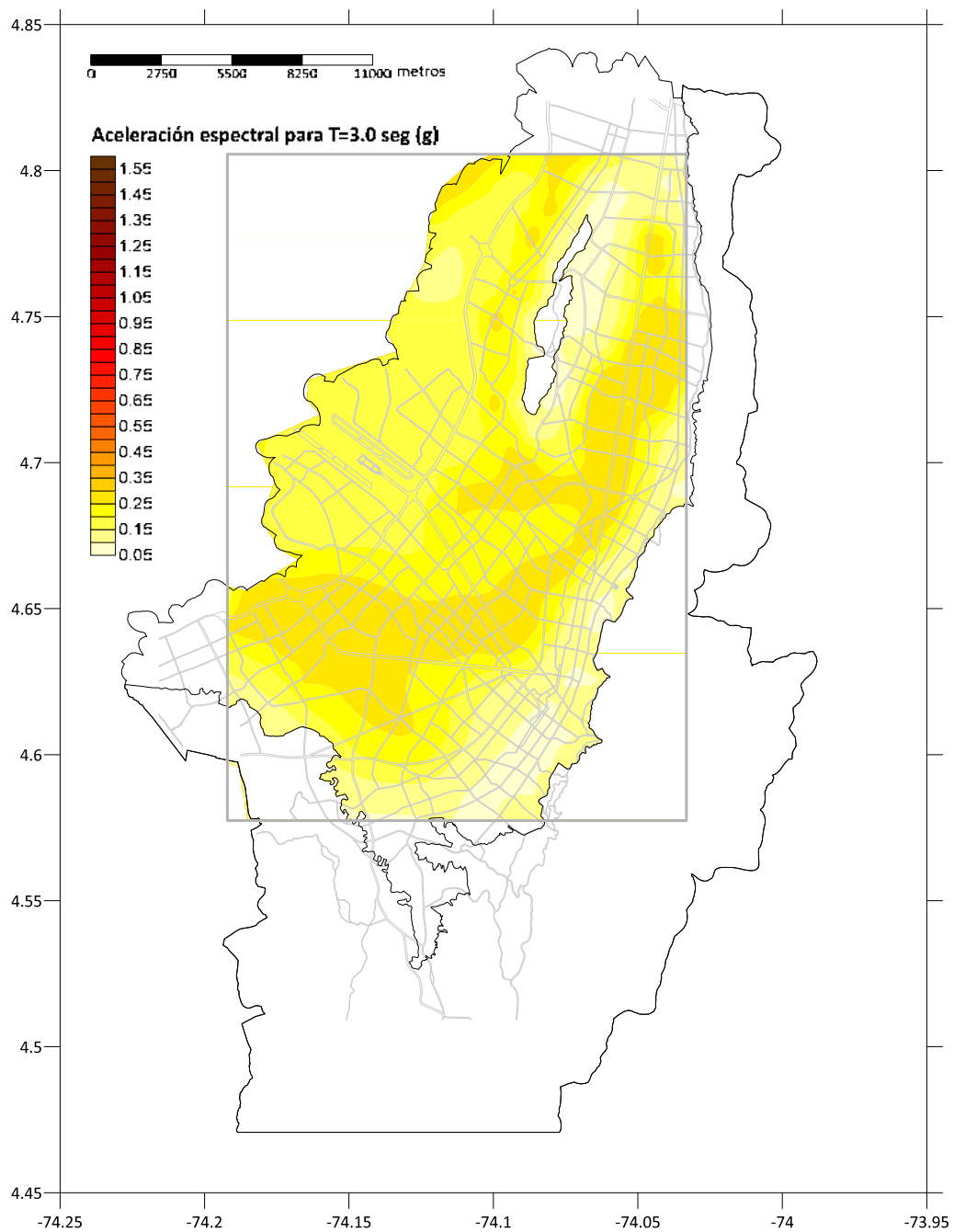


Figura 3.38. Mapa de amenaza uniforme en términos de la aceleración espectral para $T=3.0$ seg.

3.3.3 Armonización a la NSR-10

Los espectros de amenaza uniforme obtenidos en los análisis anteriores se utilizan como base para establecer las formas finales de los espectros de diseño. Para la armonización de las formas espectrales se emplea un procedimiento computacional mediante el cual se ajusta una forma espectral particular al espectro de amenaza uniforme calculado en cada sitio. Para garantizar un buen ajuste se minimizan tres características diferentes: i) la diferencia en el área bajo la curva de los espectros de amenaza y diseño; ii) la diferencia máxima de aceleración espectral para cualquier periodo estructural; y iii) el promedio de las diferencias de aceleración espectral para todos los periodos estructurales. Los espectros de diseño se calculan por medio de la definición de 5 parámetros: A_a , A_v , I , F_a y F_v . La Figura 3.39 muestra la forma funcional de los espectros de diseño dados por la NSR-10.

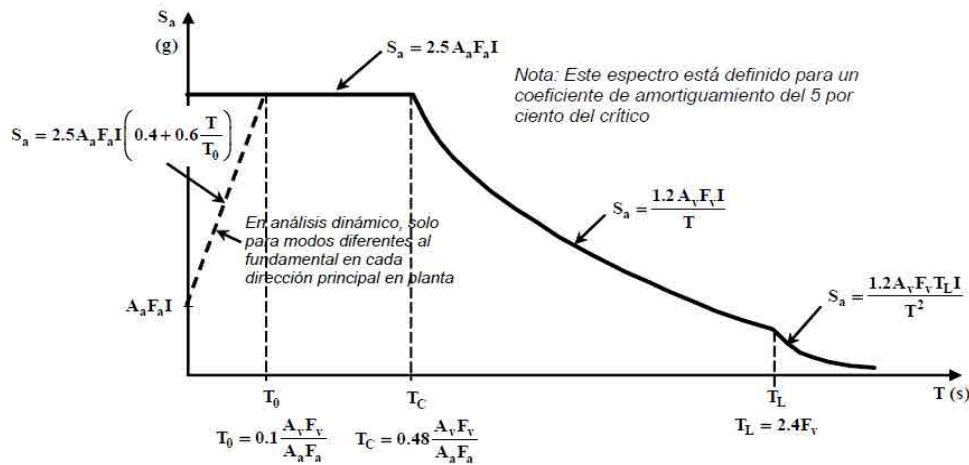


Figura 3.39. Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g. (Tomado de la NSR-10)

Con el fin de armonizar los espectros de diseño resultantes a la NSR-10, se fijan los parámetros de amenaza en roca a los especificados para la ciudad de Bogotá: $A_a = 0.15$ g y $A_v = 0.2$ g. El factor de importancia se asume como $I = 1$, dado que es un factor que puede asignarse posteriormente en función del tipo de edificación a diseñar. Por último, se establecen como parámetros libres los asociados al efecto del suelo blando: F_a y F_v . Dado que se trata de un problema no lineal, no resulta factible emplear métodos estadísticos clásicos para ajustar el valor óptimo de los parámetros del espectro de diseño. Por lo tanto, el procedimiento de ajuste corresponde a una iteración sobre valores de los parámetros asociados al efecto del suelo, siguiendo un algoritmo genético, con el fin de garantizar la convergencia a la solución de la iteración realizada. Los individuos corresponden a diferentes espectros de diseño, por lo cual su genotipo es una combinación de F_a y F_v .

La aplicación del procedimiento de ajuste resulta en la definición de un espectro elástico de diseño sismo resistente, para cada punto de la malla de cálculo, el cual cumple con los parámetros establecidos por la norma NSR-10 para edificaciones. La Figura 3.40 muestra los espectros de diseño ajustados en comparación con los

espectros de amenaza uniforme para los sitios 226 y 429. La distribución espacial de los parámetros F_a y F_v se presenta en la Figura 3.41 y Figura 3.42, respectivamente. Es posible entonces, para cualquier localización dentro de la ciudad, definir un espectro de diseño en función de los parámetros F_a y F_v .

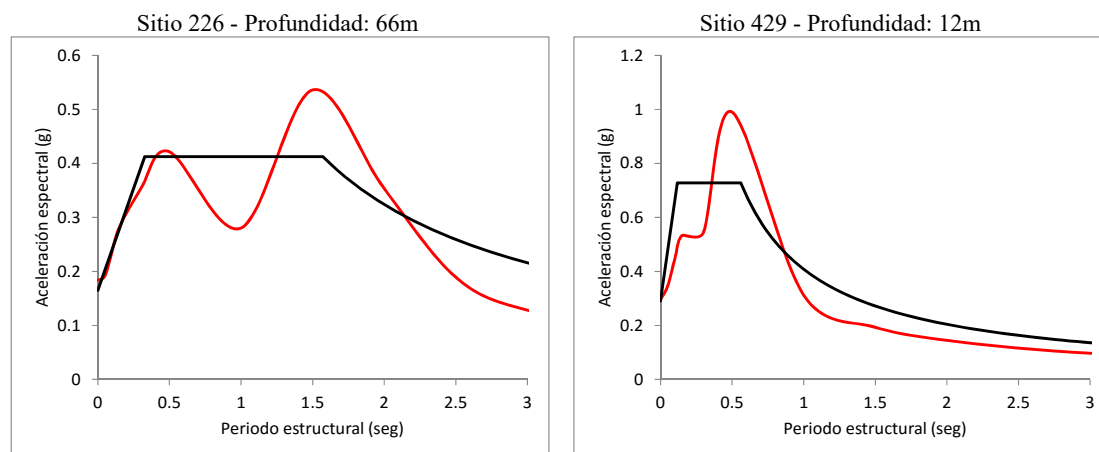


Figura 3.40. Espectros de diseño ajustados para sitios seleccionados.

De esta manera se obtienen los movimientos sísmicos de diseño de edificaciones nuevas en toda la extensión de la ciudad, lo cual es el objetivo último de un estudio de microzonificación sísmica. El trabajo presentado constituye un punto de partida en la investigación de nuevas maneras de abordar el problema de los efectos de sitio en ciudades, al abarcar todas las características relevantes en la problemática, desde la evaluación de la amenaza sísmica en roca, pasando por la geometría de las formaciones geológicas, las características de los suelos y la respuesta de los depósitos blandos, hasta la evaluación de la amenaza sísmica a nivel de superficie del terreno y su armonización con la normativa aplicable.

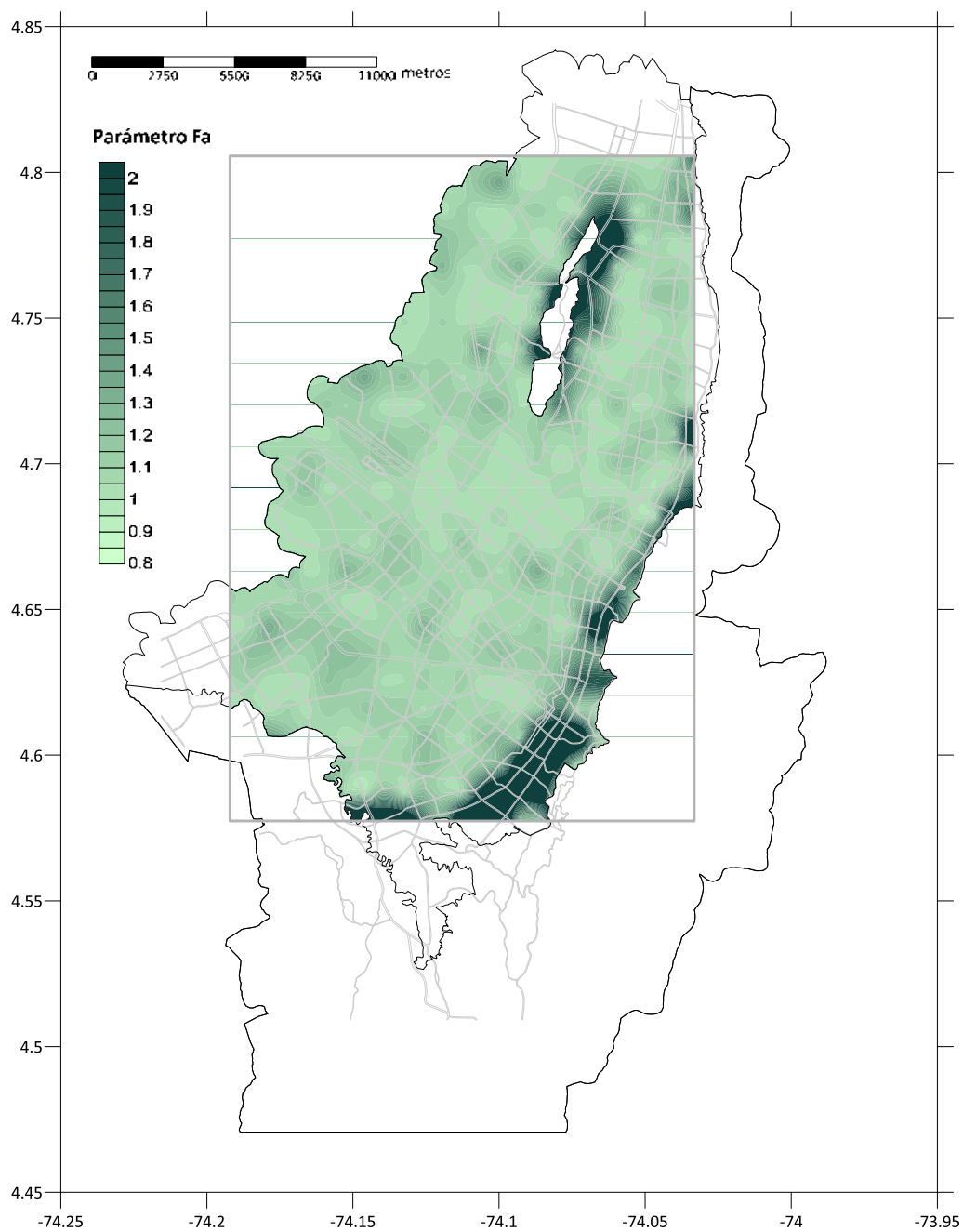


Figura 3.41. Mapa de distribución geográfica del parámetro F_a .

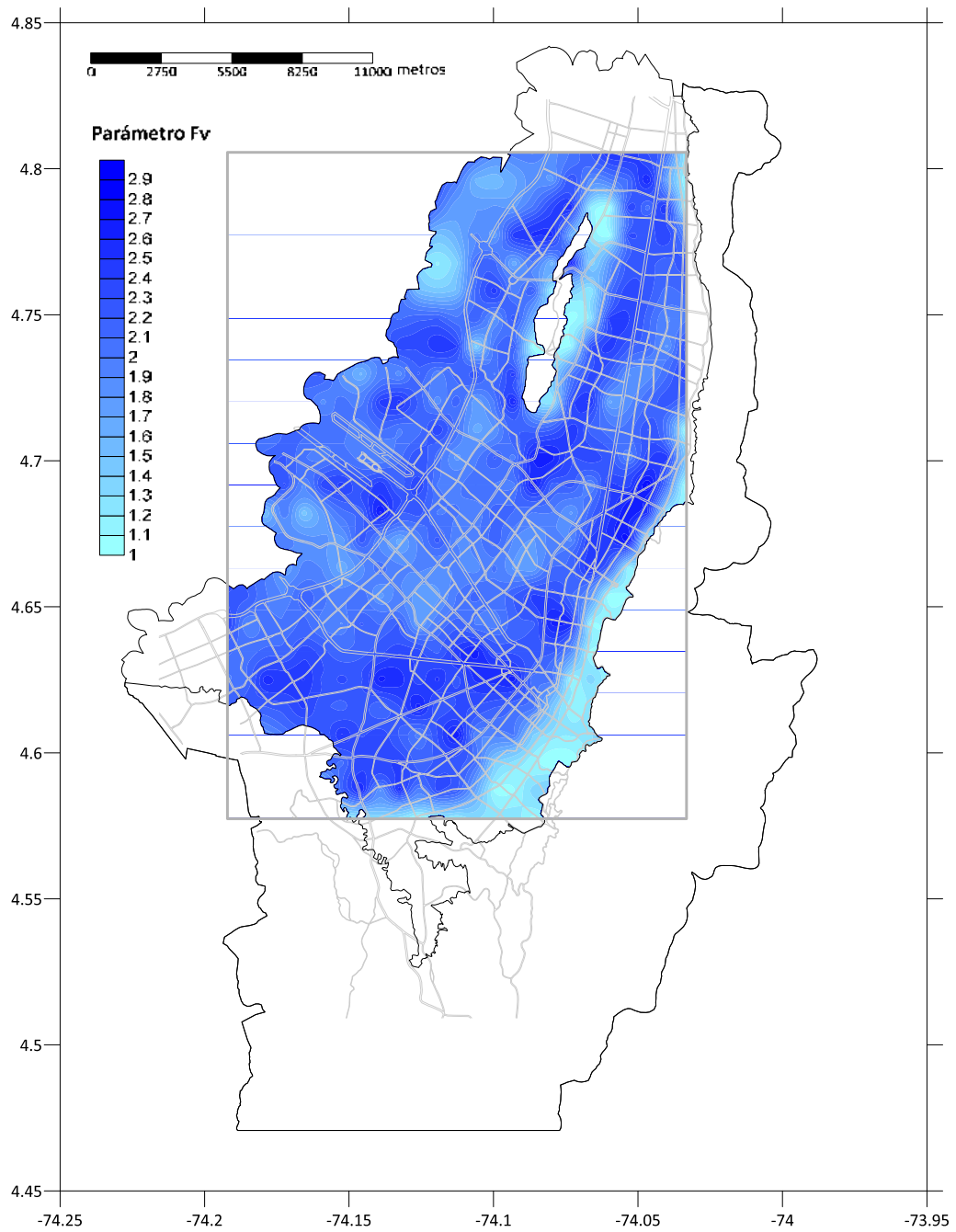


Figura 3.42. Mapa de distribución geográfica del parámetro F_v .

REFERENCIAS

- Aki, K., Richards, P.G. 2002. Quantitative Seismology, Second Ed. University Science Books, Sausalito, CA.
- Bardet, J. P., Ichii, K. y Lin, C. H. 2000. EERA: A Computer Program for Equivalent-Linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. Department of Civil Engineering, University of Southern California.
- Bazurro, P., y Cornell, A. C. 2004. Nonlinear Soil-Site Effects in Probabilistic Seismic-Hazard Analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, 94-6, pp. 2110-2123.
- Bernal, G. 2009. Sistema automático de evaluación del daño post-terremoto para la ciudad de Bogotá. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes, Bogotá.
- Bernal, G. y Cardona, O. D. 2015. Calibración de funciones de atenuación basadas en el espectro de fuente radiado y su aplicación en Colombia. Serie Monografías de Ingeniería Sísmica. Editor Alex H. Barbat. Monografía CIMNE IS 71. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería
- Castro, R. R., Anderson, J. G. and Singh, S. K. 1990. Site response, attenuation and source spectra of S waves along the Guerrero, Mexico, subduction zone. Bull. Seism. Soc. Am, Vol. 80, No. 6, pp. 1481-1503
- ERN-América Latina. 2009. CAPRA: Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment. World Bank, IADB, UN-ISDR, CEPREDENAC.
- Gilbert, F. y Backus, G. 1966. Propagator Matrices in Elastic Wave and Vibration Problems. Geophysics, 31, pp. 326-332
- Hardin, B.O., y Black W.L. 1968. Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay. Journal of the Soil Mechanics Foundations Division, ASCE. 94 SM2.
- Haskell, N. A. 1953. The Dispersion of Surface Waves in Multilayered Media. Bulletin of the Seismological Society of America, 43, pp. 17-34

- Helmens K. y Van der Hammen T. 1995. Memoria explicativa de los mapas del Neógeno y Cuaternario de la Sabana de Bogotá-cuenca alta del río Bogotá. IGAG. Análisis Geográficos. 24:91-142 p. Bogotá.
- Hermann, R B. 1985. An extension of random vibration theory estimates of strong ground motion to large distances, Bull. Seism. Soc. Am, 73, pp. 157-171.
- Huerta, A., Sarrate, J., Rodríguez-Ferran, A. 1998. Métodos numéricos: Introducción, aplicaciones y programación. Edicions UPC. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Huerta, B., Ordaz, M., Reinoso, E. 2011. Propuesta de un formato estándar para estudios de microzonificación sísmica y la experiencia de su aplicación en sistemas computacionales. Memorias del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, Agosto 2011.
- Idriss, M. I. y Seed, H. B. 1968. Seismic Response of Horizontal Soil Layers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 94, N° SM4, Julio 1968.
- Idriss, M. I. y Sun, J. I. 1992. SHAKE91: A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analysis of Horizontally Layered Soil Deposits. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis.
- Idriss, M. I. 2008. An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated By Shallow Crustal Earthquakes. Earthquake Spectra, Vol 24, N° 1, pp 217-242. Febrero 2008.
- Ishibashi, I. y Zhang, X. 1993. "Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay". Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol 33, No 1. 1993. pp 182-191.
- Kanai, k. 1951. Relation between the Nature of Surface Layer and the Amplitude of Earthquake Motions. Bulletin, Tokyo Earthquake Research Institute.
- Lysmer, J., Seed, H. B. y Schnabel, P. B. 1971. Influence of Base-Rock Characteristics on Ground Response. Bulletin of the Seismological Society of America, 61, pp 1213-1232
- Matthiesen, R. B., Duke, C. M., Leeds, D. J. y Fraser, J. C. 1964. Site Characteristics of Southern California Strong-Motion Earthquake Stations, Part Two. Report N° 64-15, Department of Engineering, University of California, Los Angeles, Agosto 1964.
- NSR-10. 2010. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Ordaz, M., Aguilar, A. y Arboleda, J. 2007. CRISIS2007: Program for Computing Seismic Hazard. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Salgado-Gálvez M.A., Bernal G.A. and Cardona O.D. (2015). Evaluación probabilista de la amenaza sísmica de Colombia con fines de actualización de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14. Revista int. de métodos numér. para calc. y diseño en ing. In press.
- Sociedad Colombiana de Geotecnia - SCG. 2006. Modelo geotécnico de la Sabana de Bogotá.
- Stewart, P., y Goulet, C. A. (2006). Comment on “Nonlinear Soil-Site Effects in Probabilistic Seismic-Hazard Analysis” by Paolo Bazzurro and C. Allin Cornell. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 2, pp. 745–747
- Ramberg, W. y Osgood, W. T. 1943. Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters. Technical Note 902, NACA
- Roesset, J. M. y Whitman, R. V. 1969. Theoretical Background for Amplification Studies. Research Report N° R69-15, Soils Publications N° 231, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J. y Seed, H. B. 1972. SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. Report N° UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Diciembre de 1972.
- Seed H. B. e Idriss I. M. 1969. Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 95, No. SM1, Proceedings Paper 6347, January 1969, pp. 99-137.
- Seed, H. B. e Idriss, M. I. 1970. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis. Report N° UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Diciembre de 1970.
- Streeter, V. L., Wylie, E. B. y Richart, F. E., Jr. 1973. Soil Motion Computations by Characteristics Method. ASCE National Structural Engineering Meeting, San Francisco
- Streeter, V. L., Wylie, E. B., y Richart, F. E., Jr. 1974. CHARSOIL: Characteristics Method Applied to Soils. NISEE, University of California, Berkeley.
- Thompson, W. T. 1950. Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid. Journal of Applied Physics, 21, pp. 89-93
- Universidad de los Andes. 2006. Actualización de la Microzonificación Sísmica de Bogotá. CEDERI - Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos.
- Zuloaga, D. 2011. Implicaciones en la estimación del riesgo sísmico de Bogotá como resultado de una nueva interpretación sismo-tectónica. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes, Bogotá.

Anexo A. Descomposición de Cholesky

El método de Cholesky es un método gaussiano de descomposición para la solución de sistemas lineales de ecuaciones. Está fundamentado en el hecho que toda matriz regular A puede descomponerse en el producto de una matriz triangular inferior L por una matriz triangular superior U . Si definimos el sistema lineal de ecuaciones como $Ax=b$, en donde b es el término independiente y x es el vector solución del problema, entonces dicho sistema puede escribirse como:

$$\begin{aligned} L \cdot y &= b \\ U \cdot x &= y \end{aligned} \quad (\text{Ec.A.1})$$

Ahora bien, cuando A es una matriz simétrica y definida positiva, es particularmente útil la aplicación de este método. El método se fundamenta en la descomposición sucesiva de los menores principales de A y en donde el objetivo es encontrar una matriz triangular inferior L tal que $A = LL^T$, en donde L^T hace de matriz triangular superior.

El menor de orden 1 se determina de manera directa como:

$$l_{11} = \sqrt{a_{11}} \quad (\text{Ec. A.2})$$

Ahora bien, asumiendo como descompuesto el menor de orden k , $A_{[k]}$, el menor de orden $k+1$, $A_{[k+1]}$, se descompone como:

$$\begin{aligned} A_{[k+1]} &= L_{[k+1]} L_{[k+1]}^T \\ \begin{pmatrix} A_{[k]} & f_{[k+1]} \\ f_{[k+1]}^T & a_{k+1,k+1} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} L_{[k]} & 0 \\ l_{[k+1]}^T & l_{k+1,k+1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_{[k]}^T & l_{[k+1]} \\ 0^T & l_{k+1,k+1} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{Ec. A.3})$$

en donde

$$f_{[k+1]} = \begin{pmatrix} a_{k+1,1} \\ a_{k+1,2} \\ \vdots \\ a_{k+1,k} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. A.4})$$

$$l_{[k+1]} = \begin{pmatrix} l_{k+1,1} \\ l_{k+1,2} \\ \vdots \\ l_{k+1,k} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. A.5})$$

Con base en lo indicado en la ecuación C-3, y siguiendo una sustitución hacia adelante para el cálculo de $l_{[k+1]}$, se obtiene el siguiente algoritmo (Huerta et.al. 1998):

$$l_{11} = \sqrt{a_{11}} \\ k = 1, \dots, n-1 \quad (\text{Ec. A.6})$$

$$\begin{cases} l_{k+1,1} = a_{k+1,1}/l_{11} \\ l_{k+1,i} = \frac{a_{k+1,i} - \sum_{j=1}^{i-1} l_{ij} l_{k+1,j}}{l_{ii}} \quad i = 2, \dots, k \\ l_{k+1,k+1} = \sqrt{a_{k+1,k+1} - \sum_{i=1}^k l_{k+1,i}^2} \end{cases}$$

De esta manera es posible determinar la matriz la triangular inferior L que cumple con $A = LL^T$.

Anexo B. Matriz propagadora de Thompson-Haskell

El método de la matriz propagadora, desarrollado originalmente por Thompson (1950) y corregido por Haskell (1953), ha sido ampliamente usado en el análisis de ondas superficiales en medios estratificados, tanto para la evaluación de la respuesta dinámica de suelos blandos, como para sismología en general. Este método (conocido en sismología como el método de Thompson-Haskell) es un caso especial del método de matriz propagadora introducido por Gilbert y Backus (1966). Conceptualmente el método de la matriz propagadora es muy simple. El medio verticalmente heterogéneo se reemplaza por una serie de capas de materiales homogéneos, con características mecánicas conocidas. El movimiento se propaga verticalmente mediante la combinación de las propiedades de todos los estratos en la matriz propagadora. Dado que se trata de operaciones matriciales simples, el método es computacionalmente muy eficiente.

Si definimos un semi-espacio infinito estratificado en donde la profundidad z es positiva hacia abajo, la ecuación de movimiento para el tránsito de ondas SH es,

$$\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \mu(z)^{-1} \\ k^2 \mu(z) - \omega^2 \rho(z) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \end{pmatrix} \quad (\text{Ec.B.1})$$

en donde k es el número de onda, ω es la frecuencia angular, $\mu(z)$ es el módulo de rigidez al corte (como función de z) y $\rho(z)$ es la densidad del medio de tránsito (como función de z). El vector (l_1, l_2) se conoce en sismología como el vector *desplazamiento-esfuerzo* para ondas SH.

La ecuación D-1 puede escribirse en forma matricial como,

$$\frac{d\mathbf{f}(z)}{dz} = \mathbf{A}(z)\mathbf{f}(z) \quad (\text{Ec. B.2})$$

en donde $\mathbf{f}(z)$ es un vector de $n \times 1$, y $\mathbf{A}(z)$ es una matriz de $n \times n$. Por supuesto, el tamaño n depende del tipo de ondas que se estén trabajando. En esta sección se hará referencia a un tamaño $n = 2$ (ondas de Love), por la naturaleza de la aplicación dada al método. No obstante, la matriz propagadora puede también obtenerse para $n = 4$ (ondas de Rayleigh). La matriz propagadora $\mathbf{P}(z, z_0)$ se define entonces como,

$$\mathbf{P}(z, z_0) = \mathbf{I} + \int_{z_0}^z \mathbf{A}(\zeta_1) d\zeta_1 + \int_{z_0}^z \mathbf{A}(\zeta_1) \int_{z_0}^{\zeta_1} \mathbf{A}(\zeta_2) d\zeta_2 d\zeta_1 + \dots \quad (\text{Ec. B.3})$$

en donde $\mathbf{I}$ es la matriz identidad de tamaño 2×2 . Nótese que $\mathbf{P}(z, z_0)$ satisface la ecuación diferencial

$$\frac{d\mathbf{P}(z, z_0)}{dz} = \mathbf{A}(z)\mathbf{P}(z, z_0) \quad (\text{Ec. B.4})$$

Adicionalmente, de la ecuación B.3 podemos deducir que $\mathbf{P}(z_0, z_0) = \mathbf{I}$. Obtenemos así la propiedad más importante de la matriz propagadora,

$$\mathbf{f}(z) = \mathbf{P}(z, z_0)\mathbf{f}(z_0) \quad (\text{Ec. B.5})$$

Mediante el uso de esta propiedad es posible determinar el vector desplazamiento-esfuerzo a cualquier profundidad operando con el vector en z_0 .

Cuando $\mathbf{A}(z)$ es una constante en z , como puede asumirse dentro de una de las capas que componen en semi-espacio infinito, la matriz propagadora toma una forma simple,

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(z, z_0) &= \mathbf{I} + (z - z_0)\mathbf{A} + \frac{1}{2}(z - z_0)^2 \mathbf{A}\mathbf{A} + \dots \\ &= \exp[(z - z_0)\mathbf{A}] \end{aligned} \quad (\text{Ec. B.6})$$

Para una matriz cuadrada $\mathbf{A}$ con valores propios λ , una función de la matriz $\mathbf{A}$ puede expandirse usando la fórmula de Sylvester como,

$$F(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^n F(\lambda_i) \frac{\prod_{r \neq i} (\mathbf{A} - \lambda_r \mathbf{I})}{\prod_{r \neq i} (\lambda_i - \lambda_r)} \quad (\text{Ec. B.7})$$

Los valores propios de $\mathbf{A}$ se determinan de la operación

$$|\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}| = \begin{vmatrix} -\lambda & \mu^{-1} \\ k^2 \mu - \omega^2 \rho & -\lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{Ec. B.8})$$

de donde se obtiene

$$\lambda = \pm \eta = \pm \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{\beta^2}} \quad (\text{Ec. B.9})$$

Reemplazando los valores propios en la ecuación B.7 obtenemos

$$\mathbf{P}(z, z_0) = \exp[(z - z_0)\mathbf{A}] = \begin{pmatrix} \cosh \eta(z - z_0) & (\eta\mu)^{-1} \sinh \eta(z - z_0) \\ \eta\mu \sinh \eta(z - z_0) & \cosh \eta(z - z_0) \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. B.10})$$

Esta matriz genera el vector desplazamiento-esfuerzo $\mathbf{f}(z)$ como una función del vector $\mathbf{f}(z_0)$, cuando z y z_0 pertenecen a la misma capa. Para un medio estratificado de m capas, el vector $\mathbf{f}(z)$ se determina mediante la multiplicación sucesiva de las matrices de los estratos individuales, es decir

$$\mathbf{f}(z) = \mathbf{P}(z, z_{m-1})\mathbf{P}(z_{m-1}, z_{m-2}) \cdots \mathbf{P}(z_1, z_0)\mathbf{f}(z_0) \quad (\text{Ec. B.11})$$

para $z_{m-1} < z < z_m$. Por lo tanto, la matriz propagadora final que satisface $\mathbf{f}(z) = \mathbf{P}(z, z_0)\mathbf{f}(z_0)$ para el medio estratificado de m capas puede determinarse como,

$$\mathbf{P}(z, z_0) = \exp[(z - z_{m-1})\mathbf{A}_m] \prod_{l=1}^{m-1} \exp[(z_l - z_{l-1})\mathbf{A}_l] \quad (\text{Ec. B.12})$$

Aplicando este método a la respuesta dinámica de depósitos de suelo blando, es posible determinar vector desplazamiento-esfuerzo inducido por el movimiento sísmico, como función del incidente en la base del depósito, solamente conociendo la señal incidente y las propiedades mecánicas elásticas de los estratos que conforman el medio de tránsito.

Anexo C. Programa Seismic Microzonation Studio

Seismic Microzonation Studio (SMS) es un programa de computador cuyo objetivo es la construcción de modelos geotécnicos de respuesta sísmica con fines de evaluación de efectos de sitio en ciudades. SMS implementa la metodología de evaluación de efectos de sitio propuesta en esta monografía.

SMS ha sido desarrollado en su totalidad en inglés, con el fin de permitir su uso y aplicación por parte de investigadores de todas partes del mundo. SMS está disponible para descarga por internet en el siguiente enlace:

<http://www.engsoftwaresolutions.com/downloads/SMS.zip>

Requerimientos e instalación

SMS es un programa desarrollado en Visual Basic .NET para sistema operativo Windows 7 o superior. La compatibilidad del programa con versiones anteriores de Windows es limitada o nula. Los requerimientos de hardware mínimos para la instalación de SMS en los computadores personales (PC) son los siguientes:

- Procesador Dual Core (o superior) y velocidad del procesador superior a 2.0 GHz.
- Una capacidad libre en disco duro de 5.0 Gb.
- 2048 Mb de memoria RAM.
- Tarjeta de video 16Mb.

En términos de software, SMS requiere de la instalación previa de los siguientes programas:

- Microsoft .NET Framework 4.0.
- Microsoft Office 2007 o superior. SMS permite exportar alguna información a Excel.
- Strong Motion Analyst. Se requiere de SMA para algunos procesamiento dentro del procedimiento para la construcción del modelo de efectos de sitio.

- CRISIS 2007. Se requiere de CRISIS (versión 2007) para algunos procesamiento dentro del procedimiento para la construcción del modelo de efectos de sitio.

SMS se distribuye como freeware, mediante un paquete instalador secuencial el cual se encarga de manera automática de copiar los archivos del programa a la ubicación determinada en el computador y de dar los accesos al usuario. Para ejecutar el instalador, debe hacerse doble clic sobre el paquete de instalación **SetupMZS.msi** y seguir de manera cuidadosa todos los pasos.

Interfaz de usuario

Al ejecutar el programa, este se inicia por defecto en la pantalla de inicio, la cual da acceso a la creación de nuevos proyectos, abrir un proyecto existente, así como al listado de proyectos recientes. Los proyectos de SMS se almacenan en formato XML en archivos de extensión .mzp.

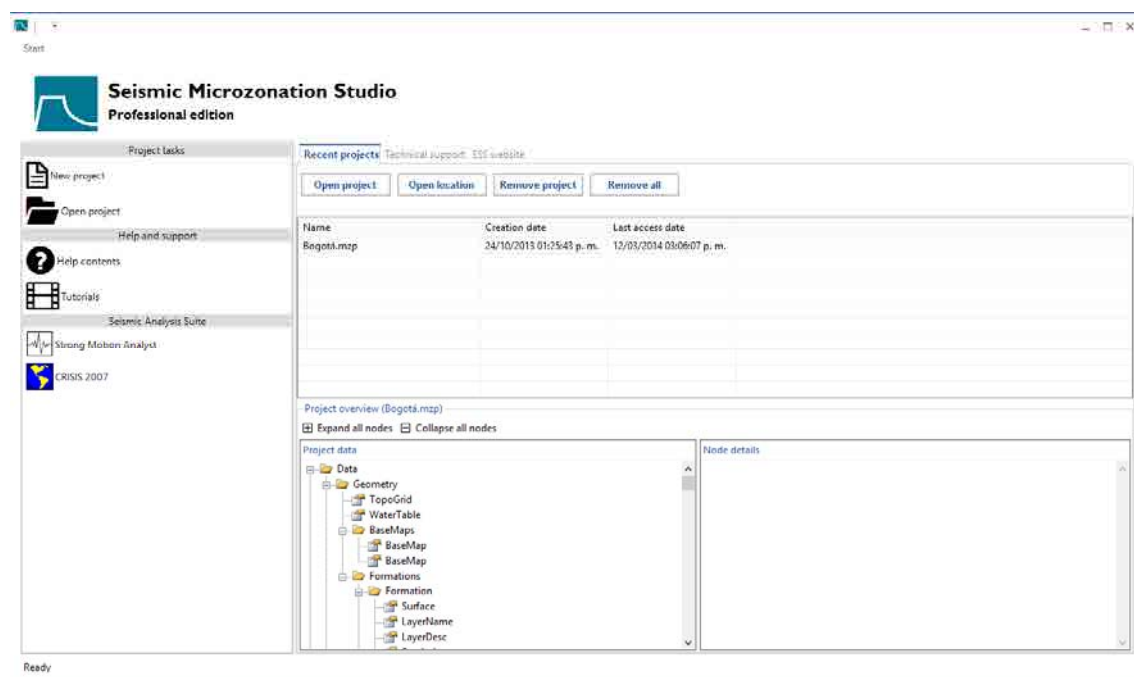


Figura C.1. Pantalla de inicio de SMS.

El programa ha sido diseñado de manera que el desarrollo del modelo de respuesta sísmica es secuencial y ordenado de izquierda a derecha por las pestañas que se muestran en la cinta de herramientas. Los pasos para la conformación del modelo, cada uno asociado a una pestaña son:

- *Geometry*. Ingreso de la información geométrica de las formaciones geológicas superficiales.
- *Field data*. Ingreso de datos de exploración en campo con información geotécnica recopilada mediante ensayos de laboratorio.
- *Geotechnical properties*. Definición de las propiedades geotécnicas asociadas a las formaciones geológicas.

- *Seismic records.* Definición del movimiento sísmico en la base del depósito blando a ser usadas en la evaluación de la respuesta dinámica. Pueden definirse acelerogramas reales o espectros de amplitudes de Fourier mediante un modelo de espectro de fuente.
- *Computation sites.* Definición de los sitios de cálculo de la respuesta dinámica. Las estratigrafías sintéticas serán generadas en estas ubicaciones.
- *Response analysis.* Configuración y cálculo de la respuesta dinámica del suelo en las ubicaciones definidas, con base en toda la información previamente ingresada.
- *Export.* Herramienta de exportación de información a otras plataformas.
- *Postprocessing.* Herramienta de post procesamiento para la definición de espectros elásticos de diseño sismo resistente a partir de espectros de amenaza uniforme resultantes de una evaluación probabilista de la amenaza sísmica en superficie del terreno.

Con el fin de demostrar el funcionamiento del programa, se presentarán las diferentes opciones usando la información de un modelo de efectos de sitio generado por los autores para la ciudad de Manizales.

Geometría

En la ventana de geometría, se definen las capas que conforman el modelo geométrico tridimensional de la ciudad. Debe definirse entonces la topografía, la tabla de agua (nivel freático) y la geometría de todos los contactos geológicos de relevancia en la ciudad. En el caso de Manizales, solamente se tiene un contacto geológico importante, el cual marca el límite con la roca firme.

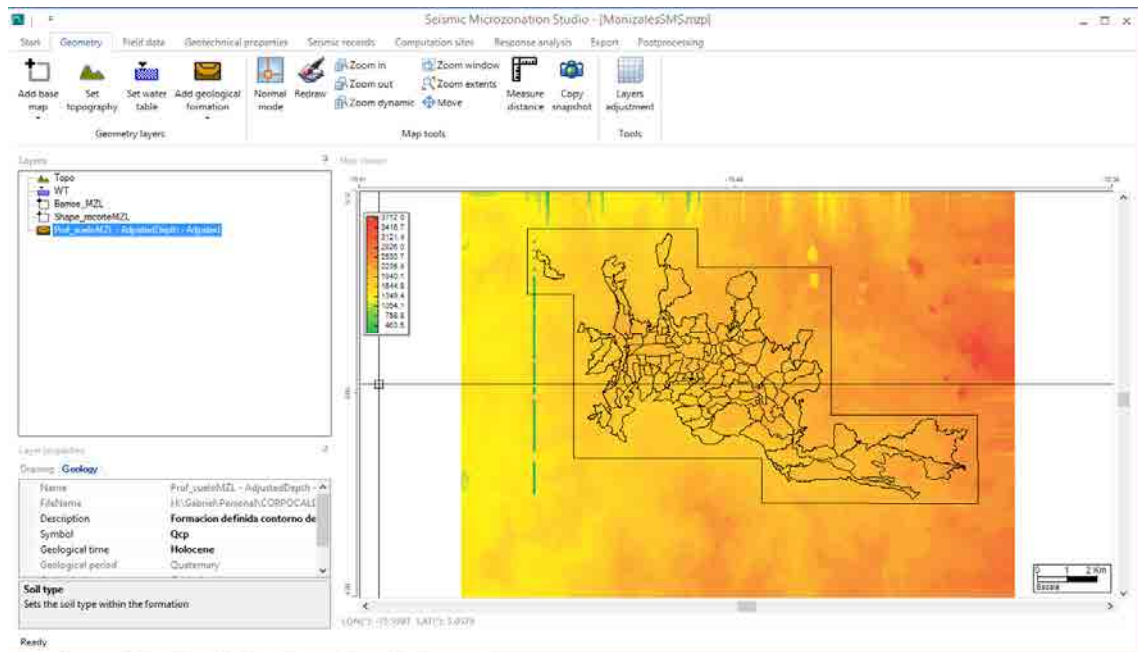


Figura C.2. Pantalla de geometría.

SMS presenta propiedades especiales para las capas asociadas a formaciones geológicas.

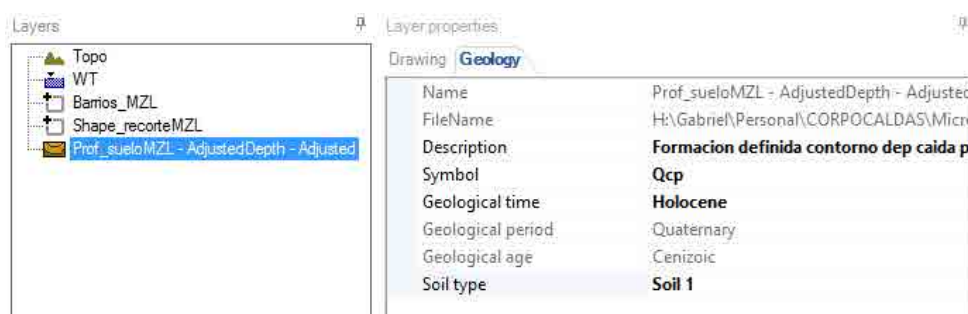


Figura C.3. Propiedades de las capas de contacto geológico.

Pueden adicionarse capas base en formato ESRI Shapefile a la visualización. En el caso de este ejemplo, la Figura C.2 muestra, además de la topografía de la ciudad, la capa de polígonos de barrios y un polígono de recorte para la malla de cálculo (el cual es definido más adelante).

Datos de campo

La pestaña *Field data* da acceso a la pantalla de datos de campo, en la cual el usuario debe ingresar toda la información geotécnica que tenga disponible en diferentes ubicaciones en la ciudad. Para el caso de Manizales, se cuenta con 12 sondeos con información geotécnica de buena calidad, los cuales aparecen listados. Al seleccionar cualquiera de ellos, el programa genera las gráficas en profundidad de las propiedades dinámicas medidas en dicho sitio.

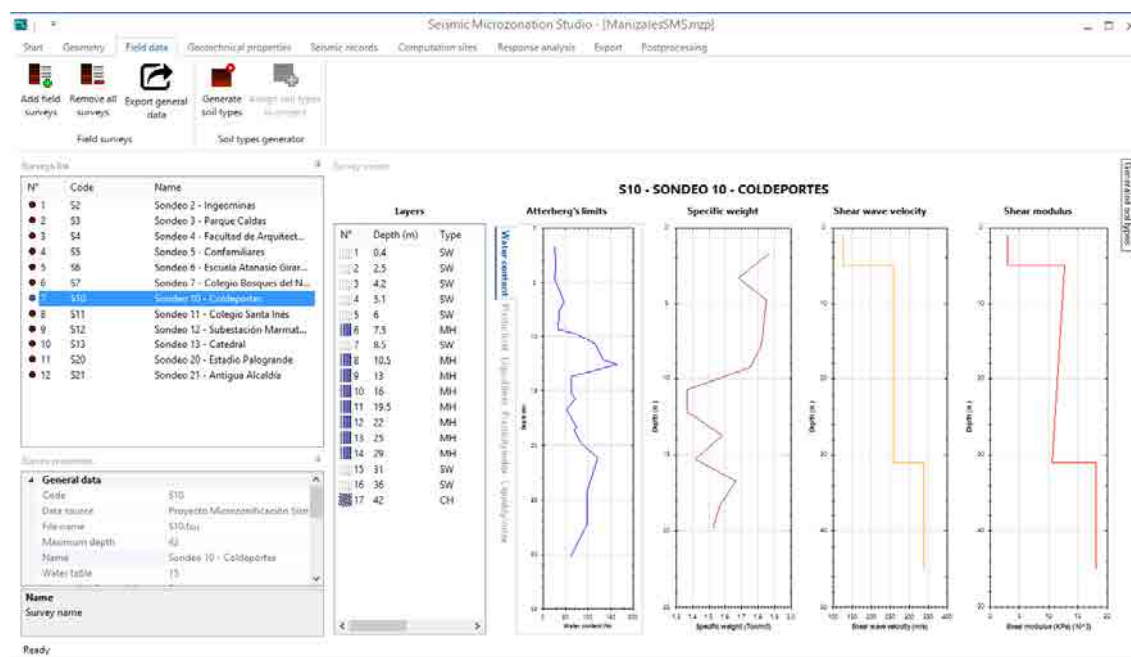


Figura C.4. Pantalla de datos de campo.

En esta pantalla es posible generar tipos de suelo en función de las formaciones geológicas cargadas en la geometría. Mediante el botón *Generate soil types*, el programa realiza la estadística sobre los sondeos disponibles y determina las propiedades geotécnicas en profundidad como variables aleatorias, a la vez que asigna ese tipo de suelo generado a las formaciones geológicas correspondientes, en función de la profundidad del contacto.

Propiedades geotécnicas

En esta pantalla deben definirse por completo la totalidad de las propiedades geotécnicas requeridas por el modelo. En caso de haber generado un tipo de suelo desde la pantalla de datos de campo, este aparecerá listado aquí. Es posible también generar nuevos tipos de suelo sin pasar por la generación automática. Es necesario también definir las propiedades geotécnicas de la roca firme.

Las propiedades geotécnicas en SMS se modelan como perfiles aleatorios, es decir, como la variación en profundidad de los momentos de probabilidad de estas propiedades. Por ejemplo, así es como se ve la propiedad Velocidad de onda de corte, para el suelo de la ciudad de Manizales.

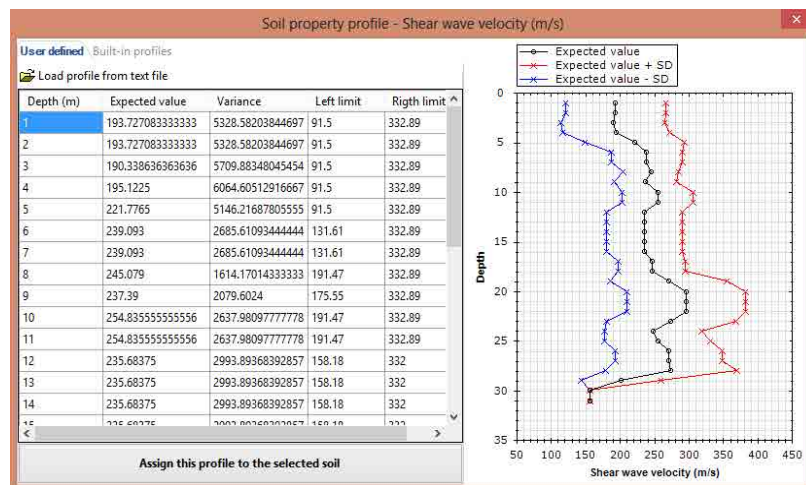


Figura C.5. Perfil en profundidad de la velocidad de onda de corte.

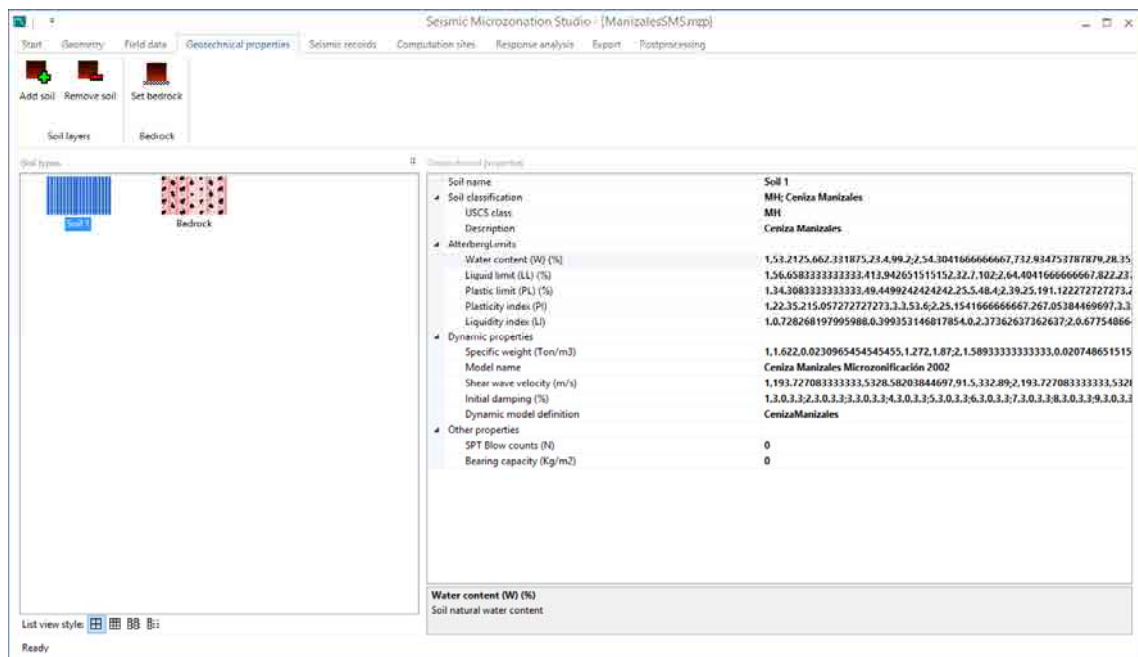
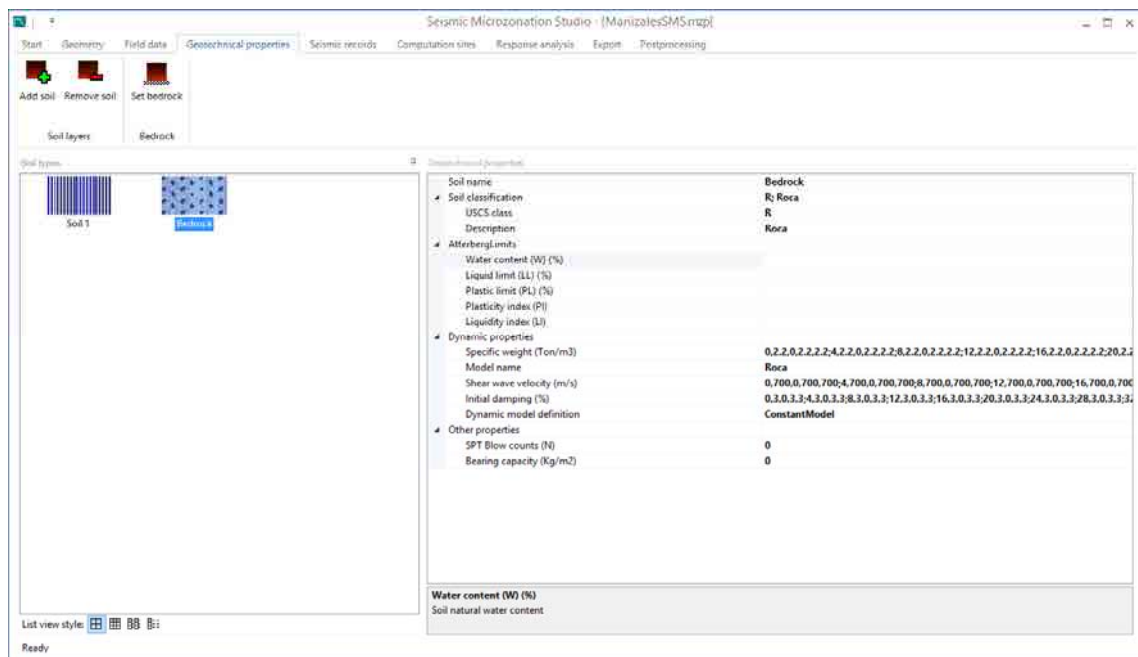


Figura C.6. Pantalla de propiedades geotécnicas – Propiedades del suelo 1.



El usuario debe configurar algunas de las propiedades listadas de cada registro antes de continuar al siguiente paso. Adicionalmente puede realizar algunos procesamiento básicos a estas señales.

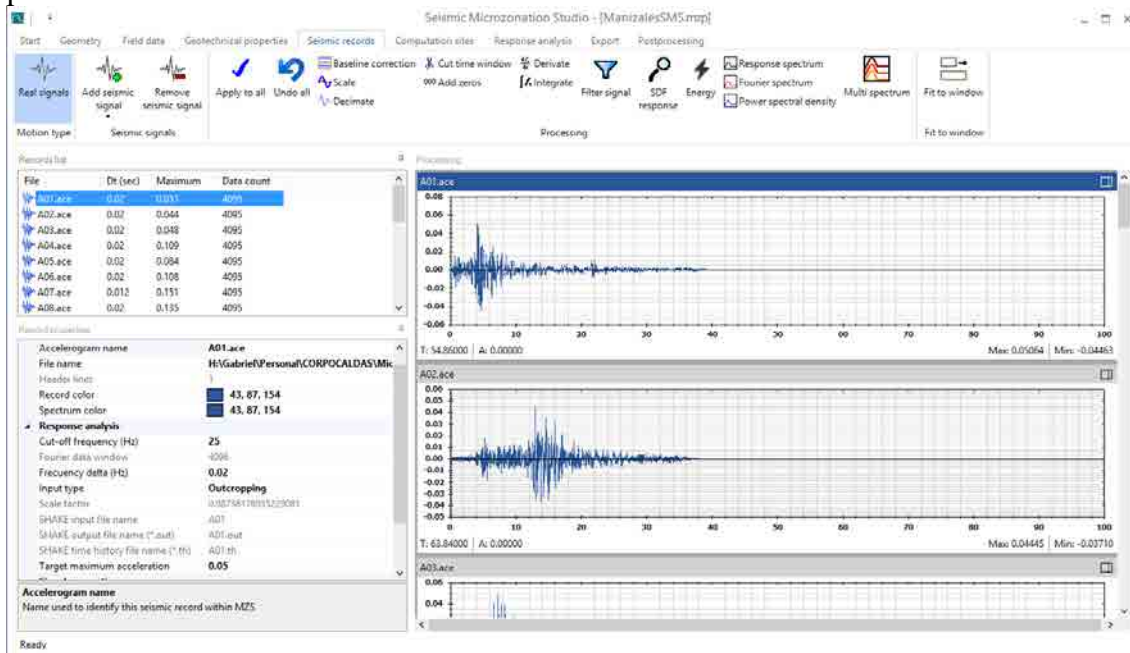


Figura C.8. Pantalla de señales sísmicas.

Sitios de cálculo

En este paso el usuario debe definir cuáles son los sitios sobre los que se va a calcular la respuesta dinámica. Se puede definir una lista de sitios sin ningún orden especial, o una malla de cálculo rectangular. Es posible también definir un polígono de recorte para la malla de cálculo, con el fin de evitar realizar cálculos en ubicaciones que no sean de interés. El programa muestra la malla de cálculo configurada con el mapa base de fondo.

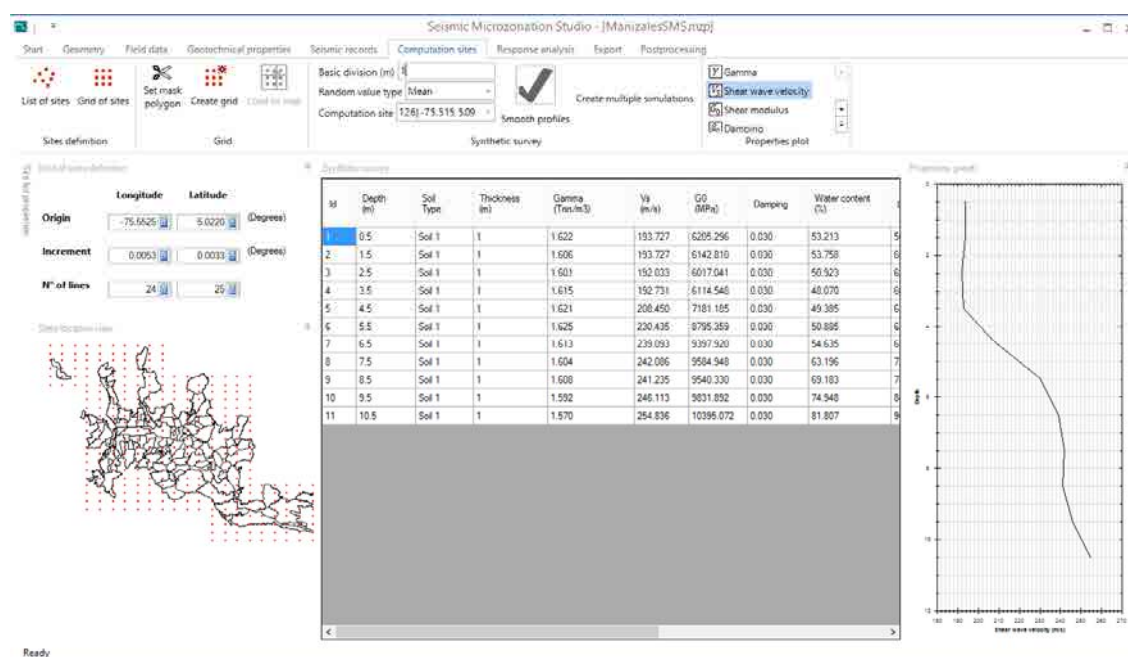


Figura C.9. Pantalla de sitios de cálculo.

Una vez definidos los sitios de cálculo, el programa permite previsualizar las estratigrafías sintéticas generadas en cada ubicación. Se construye entonces la tabla de la estratigrafía sintética y se pueden visualizar las propiedades en profundidad en la gráfica a la derecha.

Respuesta dinámica

En esta pantalla, el usuario debe configurar los últimos parámetros para el cálculo de la respuesta dinámica. Una vez configurados, el programa procede a la generación de estratigrafías en cada ubicación y al cálculo de la respuesta unidimensional en dichas ubicaciones. Los resultados son almacenados en archivos binarios independientes dentro del directorio del proyecto, pero pueden visualizarse desde el programa.

SMS provee modelos propios de respuesta dinámica, como se ha mencionado anteriormente. Sin embargo, el programa provee también compatibilidad con el software SHAKE 91 (Schnabel et. al. 1991), en caso que el usuario prefiera usar este núcleo de cálculo. De cualquier manera, los resultados son muy similares.

Durante el proceso de cálculo, SMS genera un registro que se presenta al usuario con el detalle del procedimiento que se está ejecutando a cada instante.

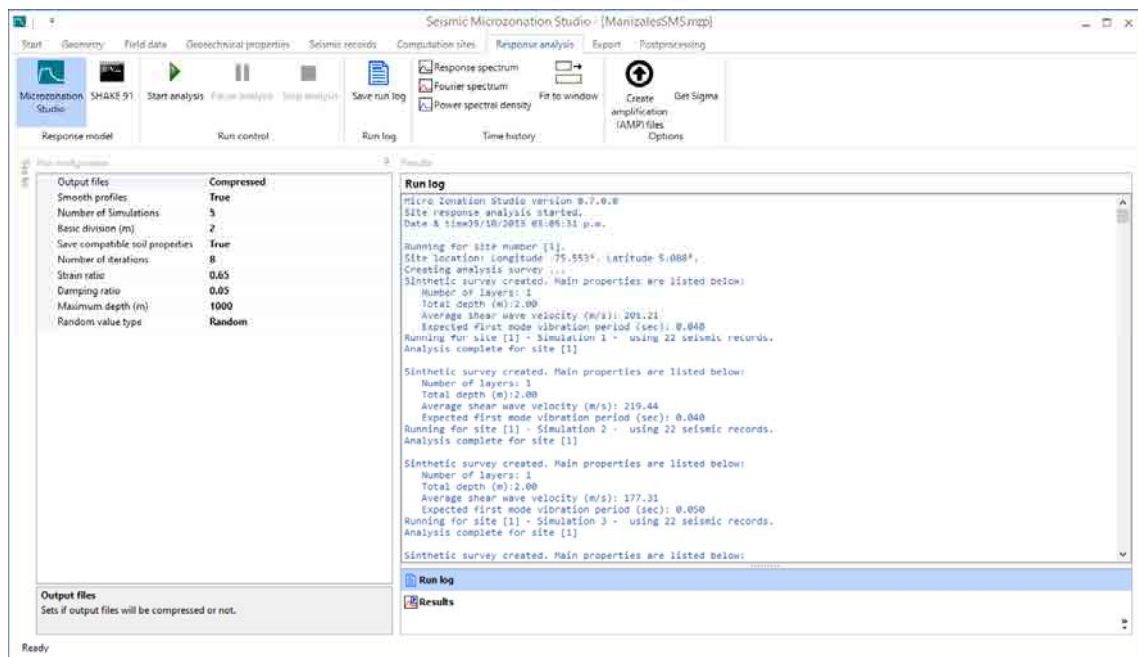


Figura C.10. Pantalla de respuesta dinámica.

Una vez finaliza el cálculo, SMS construye el árbol de sitios de cálculo con todas sus simulaciones, y muestra al usuario los resultados en diferentes categorías: resultados por capa, espectros de respuesta, funciones de transferencia y señales en superficie.

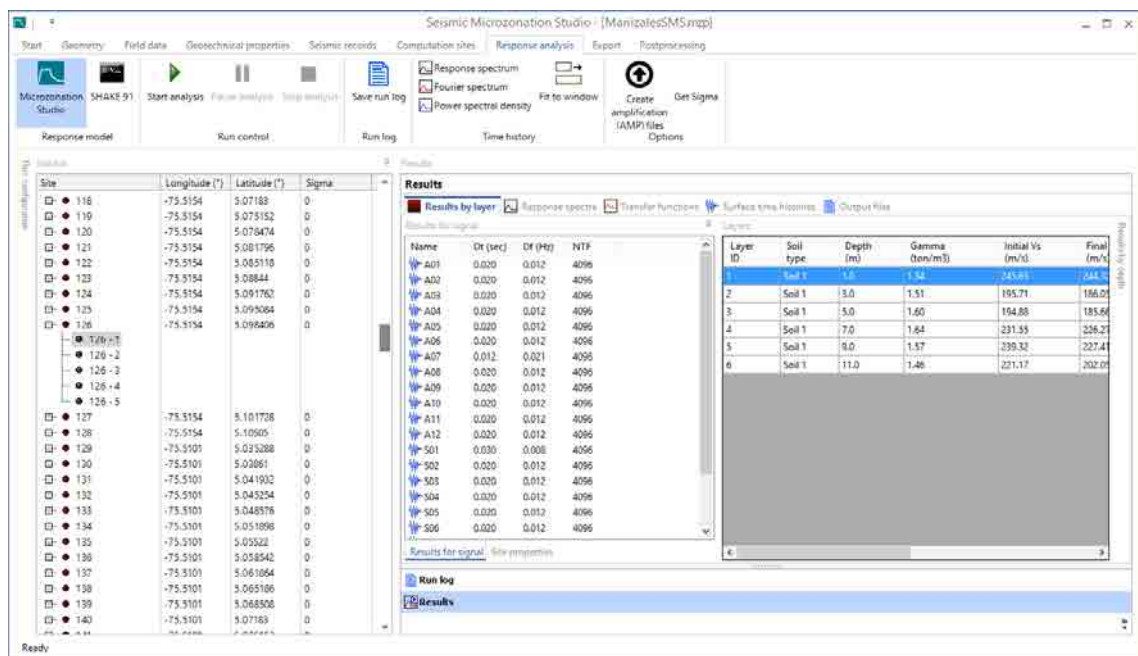


Figura C.11. Pantalla de respuesta dinámica – Resultados por capa.

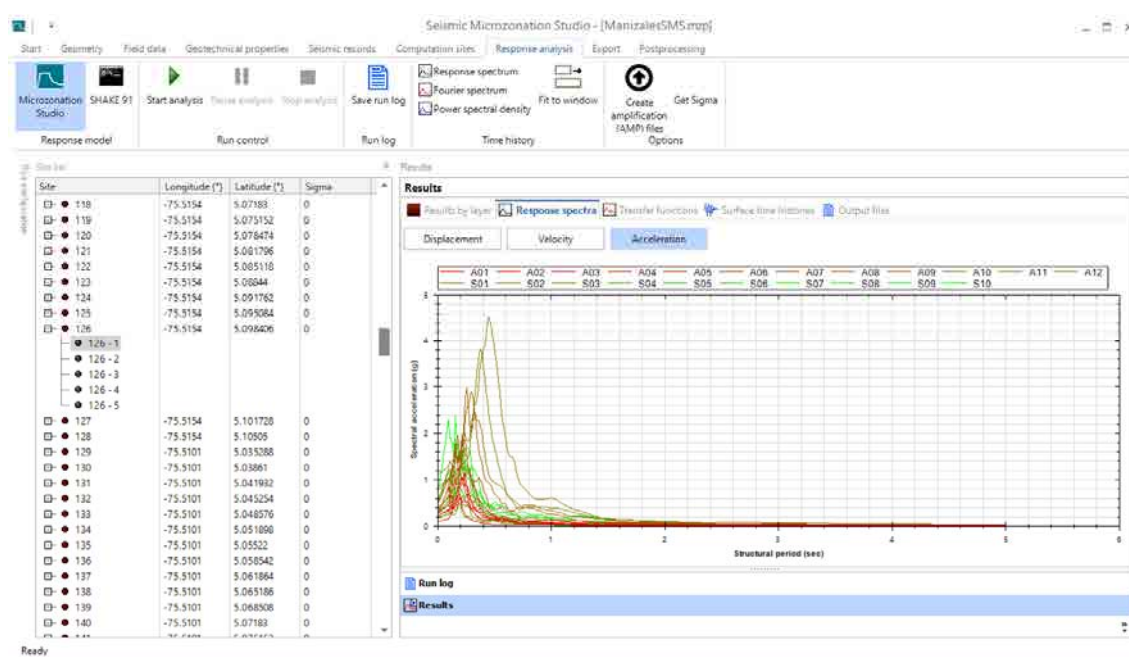


Figura C.12. Pantalla de respuesta dinámica – Espectros de respuesta.

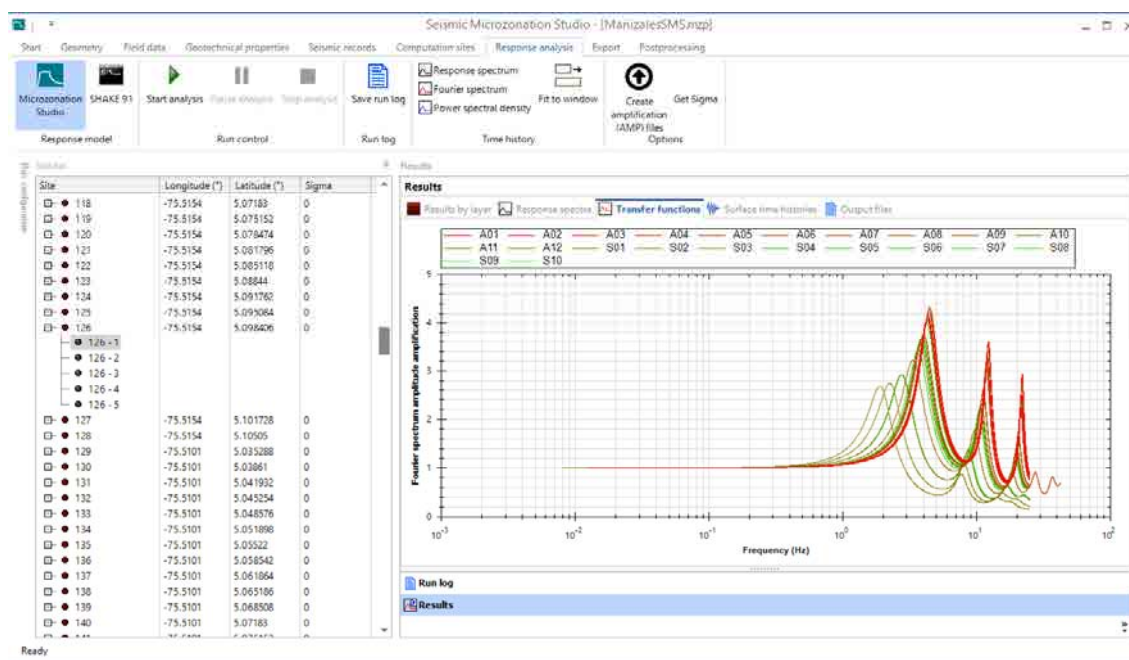
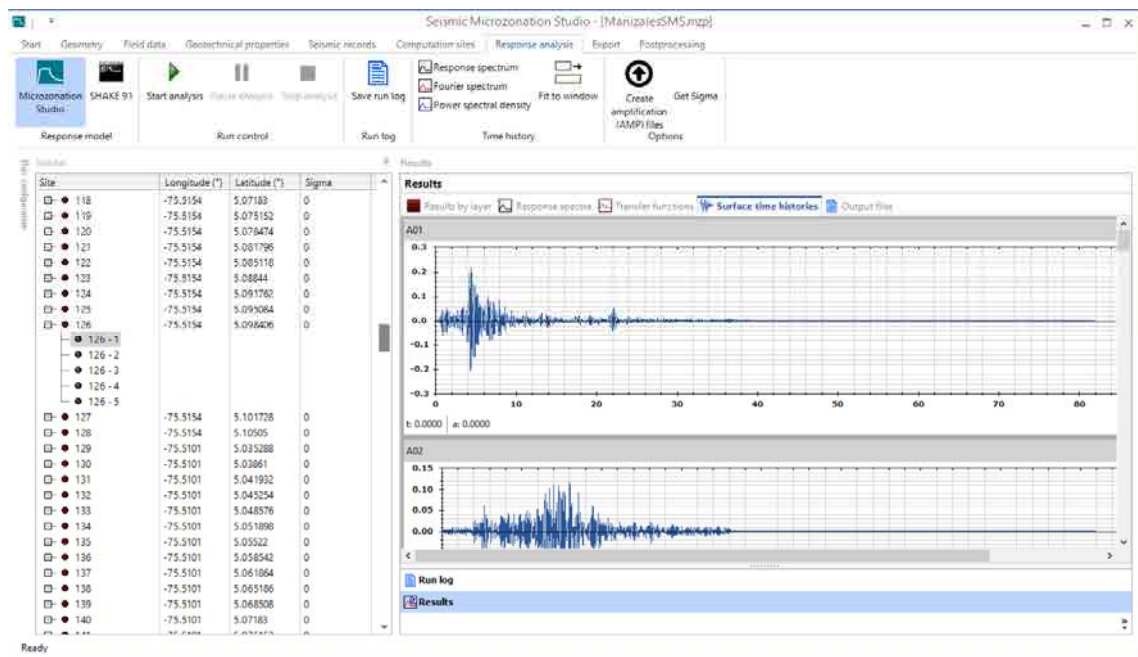


Figura C.13. Pantalla de respuesta dinámica – Funciones de transferencia.



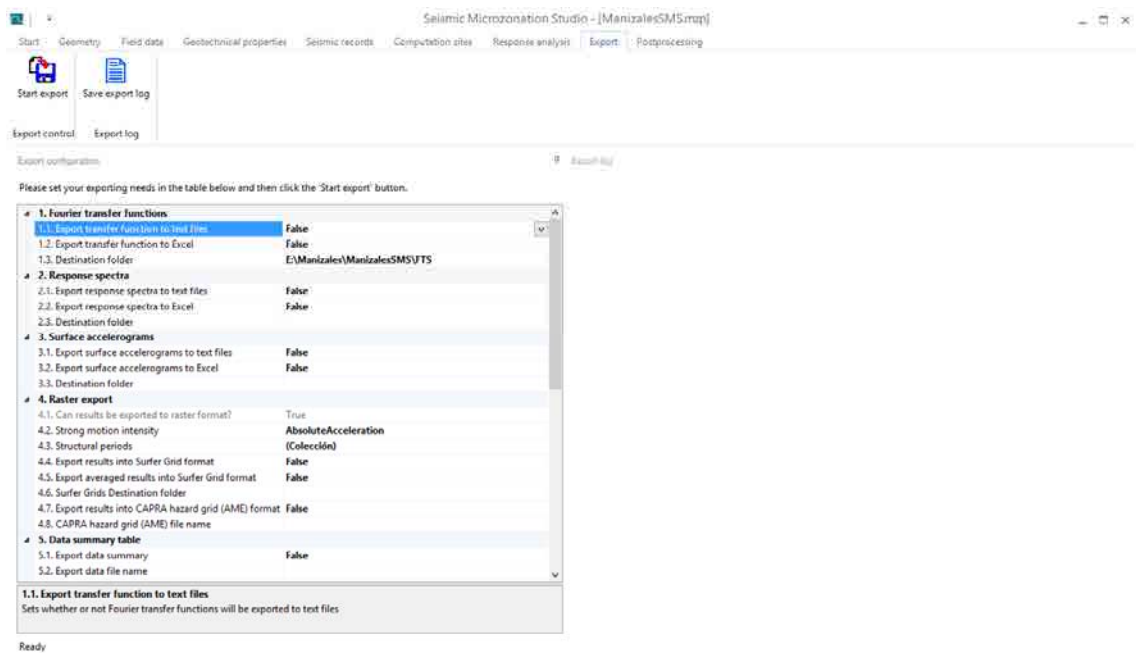


Figura C.15. Pantalla de exportación.

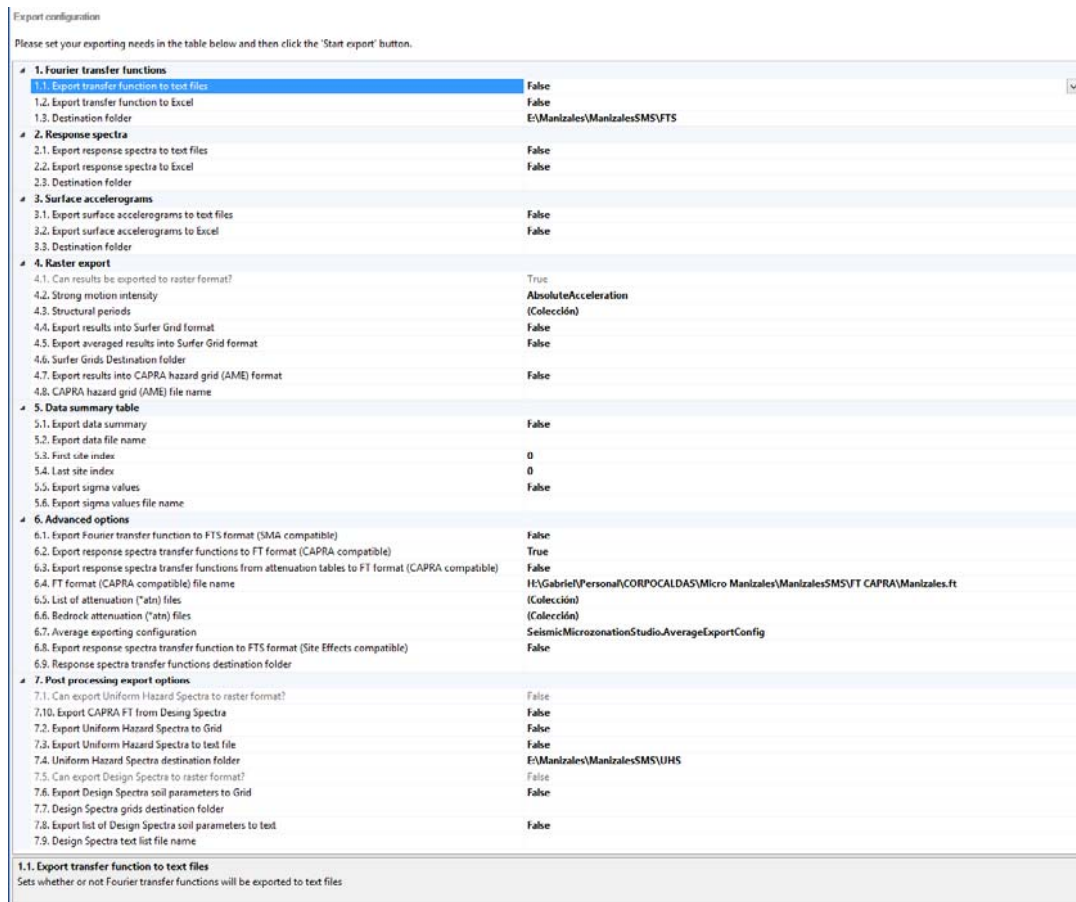


Figura C.16. Listado de opciones de la pantalla exportación.

Dentro de las opciones de exportación más interesantes están:

- La exportación de las funciones de transferencia del espectro de amplitudes de Fourier a formato de texto .fts, compatible con Strong Motion Analyst, las cuales son usadas en este último para la generación de funciones de atenuación individuales para cada ubicación.
- La exportación de las funciones de transferencia del espectro de respuesta a formato binario FT compatible con la plataforma CAPRA para la evaluación probabilista del riesgo sísmico.

Post procesamiento

En la pantalla de post procesamiento el usuario puede realizar las siguientes tareas:

- Construcción de archivos DAT de proyecto de CRISIS 2007 para la evaluación de la amenaza sísmica en cada ubicación. SMS provee las herramientas para la generación automática de los archivos de proyecto de CRISIS 2007 y de un archivo especial de ejecución por lotes, de manera que el usuario solamente debe ingresar este último a CRISIS 2007 y ejecutar el cálculo de la amenaza.
- Lectura de los resultados de la amenaza sísmica, en términos de espectros de amenaza uniforme para un periodo de retorno particular. esta información se almacena en los archivos MAP que genera CRISIS 2007, de manera que deben cargarse dichos archivos a SMS para la lectura de los espectros de amenaza uniforme.
- Generación de espectros elásticos de diseño sismo resistente. Para esto debe definir el código base, mediante el cual SM determina la forma de los espectros de diseño. Actualmente SMS es compatible con la NSR 10 de Colombia y la NEC de Ecuador. Una vez definidos los parámetros base, el programa ajusta los parámetros del suelo a la forma de los espectros de amenaza uniforme en superficie y obtiene el espectro de diseño más ajustado.

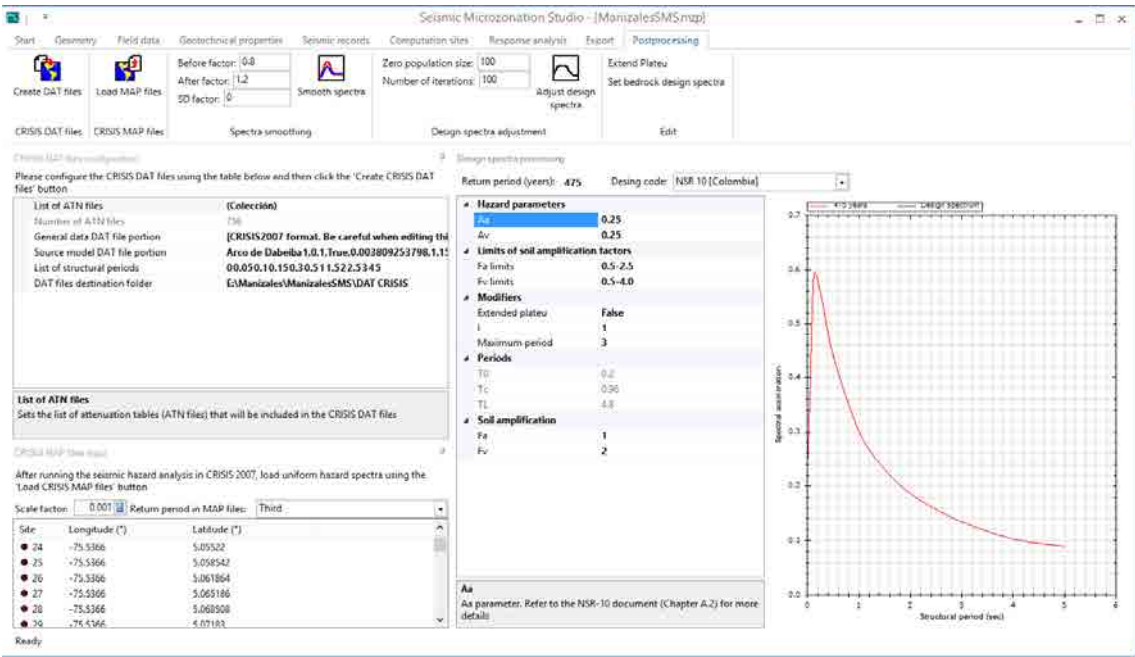


Figura C.17. Pantalla de post procesamiento.

Los resultados del post procesamiento pueden también exportarse desde la pantalla de exportación.

CENTRO INTERNACIONAL DE METODOS NUMERICOS EN INGENIERIA
Lista de monografías publicadas en la Serie de Ingeniería Sísmica

Las monografías pueden adquirirse dirigiéndose al Departamento de Publicaciones del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Edificio C1, Campus Norte UPC, c/ Gran Capitán s/n, 08034 Barcelona, teléfono: 93-401.60.37, Fax: 93-401-65-17.

- IS-1 *Qualitative Reasoning for Earthquake Resistant Buildings*, Luís M. Bozzo, 149 pp., ISBN 84-87867-36-7, 1993.
- IS-2 *Control predictivo en sistemas de protección sísmica de estructuras*, R. Andrade Cascante, J. Rodellar, F. López Almansa, 143 pp., ISBN 84-87867-37-5, 1993.
- IS-3 *Simulación numérica del comportamiento no lineal de presas de hormigón ante acciones sísmicas*, M. Galindo, J. Oliver, M. Cervera, 255 pp., ISBN 84-87867-38-3, 1994.
- IS-4 *Simulación del daño sísmico en edificios de hormigón armado*, A. Hanganu, A.H. Barbat, S. Oller, E. Oñate, 96 pp., ISBN 84-87867-40-5, 1994.
- IS-5 *Edificios con aislamiento de base no lineal*, N. Molinares, A.H. Barbat, 96 pp., ISBN: 84-87867-41-3, 1994.
- IS-6 *Vulnerabilidad sísmica de edificios*, C. Caicedo, A.H. Barbat, J.A. Canas, R. Aguiar, 100 pp., ISBN 84-87867-43-X, 1994.
- IS-7 *Análisis de terremotos históricos por sus efectos*, J. R. Arango González, 119 pp., ISBN 84-87867-44-8, 1994.
- IS-8 *Control activo no lineal de edificios con aislamiento de base*, A.H. Barbat, N. Molinares, J. Rodellar, 124 pp., ISBN 84-87867-46-4, 1994.
- IS-9 *Análise estocástica da resposta sísmica nao-linear de estruturas*, A.M. F. Cunha, 199 pp., ISBN: 84-87867-47-2, 1994
- IS-10 *Definición de la acción sísmica*, A.H. Barbat, L. Orosco, J.E. Hurtado, M. Galindo, 122 pp., ISBN: 84-87867-448-0, 1994
- IS-11 *Sismología y peligrosidad sísmica*, J.A. Canas Torres, C. Pujades Beneit, E. Banda Tarradellas, 87 pp., ISBN: 84-87867-49-9, 1994
- IS-12 *Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería*, F. Yépez, A.H. Barbat, J.A. Canas, 104 pp., ISBN: 84-87867-50-2, 1999

- IS-13 *Estudios de ingeniería sismológica y sísmica*, J.A. Canas, ISBN: 84-87867-57-X, 13 pp., 1995
- IS-14 *Simulación de escenarios de daño para estudios de riesgo sísmico*, F. Yépez, A.H. Barbat y J.A. Canas, ISBN: 84-87867-58-8, 103 pp., 1995
- IS-15 *Diseño sismorresistente de edificios de hormigón armado*, L. Bozzo, A.H. Barbat, ISBN: 84-87867-59-6, 185 pp., 1995
- IS-16 *Modelo tridimensional de atenuación anelástica de las ondas sísmicas en la Península Ibérica*, J.O. Caselles, J. A. Canas, Ll. G. Pujades, R.B. Herrmann, ISBN: 84-87867-60-X, 119 pp., 1995
- IS-17 *Índices de daño sísmico en edificios de hormigón armado*, R. Aguiar, ISBN: 84-87867-43-X, 99 pp., 1996
- IS-18 *Experimental study of a reduced scale model seismically base isolated with Rubber-Layer Roller Bearings (RLRB)*, D. Foti, J.M. Kelly, ISBN: 84-87867-82-0, 112 pp., 1996
- IS-19 *Modelos de evaluación del comportamiento sísmico no lineal de estructuras de hormigón armado*, F. Yépez Moya, ISBN: 84-87867-80-4., 96pp., 1996
- IS-20 *Evaluación probabilista de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras de hormigón armado por medio de simulación*, F. Yépez Moya, A.H. Barbat, J.A. Canas, ISBN: 84-87867-81-2, 1996
- IS-21 *Modelización de la peligrosidad sísmica. Aplicación a Cataluña*, J.A. Canas, J.J. Egozcue, J. Miquel Canet y A.H. Barbat, ISBN: 84-87867-83-9, 101pp., 1996
- IS-22 *Evaluación del daño sísmico global en edificios porticados de hormigón armado*, R. Aguiar, A.H. Barbat and J. Canas, ISBN: 84-87867-96-0, 173pp., 1997
- IS-23 *Daño sísmico global en edificios con muros de cortante*, R. Aguiar, ISBN: 84-89925-00-3, 101 pp., 1997
- IS-24 *Conceptos de cálculo de estructuras en las normativas de diseño sismorresistente*, A.H. Barbat y S. Oller, ISBN: 84-89925-10-0, 107pp., 1997
- IS-25 *Stochastic dynamics of hysteretic structures*, J.E. Hurtado, ISBN: 84-89925-09-7, 205pp., 1998

- IS-26 *Análisis de los acelerogramas de la serie de Adra (Almería). Diciembre 1993 a Enero 1994*, R. Blázquez, A. Suárez, E. Carreño y A.J. Martín, ISBN: 84-89925-11-9, 1998
- IS-27 *Respuesta de puentes frente a acciones sísmicas*, E. Maldonado, J.A. Canas, J.R. Casas, L.G. Pujades, ISBN: 84-89925-23-2, 107pp., 1998
- IS-28 *Estudio de parámetros en la vulnerabilidad sísmica de puentes*, E. Maldonado, J.A. Canas y J.R. Casas, ISBN: 84-89925-16-X, 97pp., 1998
- IS-29 *Metodologías para o cálculo sísmico não-linear de barragens de betão*, R. Faria ISBN: 84-89925-25-9, 113pp., 1998
- IS-30 *Acciones para el diseño sísmico de estructuras*, R. Aguiar, ISBN: 84-89925-27-5, 122pp., 1998
- IS-31 *Avaliação do comportamento sísmico de barragens de betão*, R. Faria, ISBN: 84-89925-28-3, 88pp., 1998
- IS-32 *Vulnerabilidad sísmica de hospitales. Fundamentos para ingenieros y arquitectos*, O.D. Cardona, ISBN:84-89925-33-X, 165pp., 1999
- IS-33 *Modelación estocástica de la acción sísmica*, J. E. Hurtado, ISBN:84-8925-34-8, 93pp., 1999
- IS-34 *Earthquake simulator testing of a steel model seismically protected with friction energy dissipators*, D. Foti and J. Canas, ISBN: 84-89925-40-2, 110pp., 1999
- IS-35 *Plasticidad y fractura en estructuras aporticadas*, J. Flórez López, ISBN: 84-89925-46-1, 90pp., 1999
- IS-36 *Estimación de efectos locales con movimientos sísmicos y microtemblores*, V. Giraldo, A. Alfaro, L. G. Pujades, J. A. Canas, ISBN: 84-89925-54-2, 83pp., 1999
- IS-37 *Modelo numérico de elastómeros multi-fase y su aplicación al análisis de estructuras con aislamiento sísmico*, O. Salomón, S. Oller y A. H. Barbat, ISBN: 84-89925-54-2, 239pp.,1999
- IS-38 *Dinámica de estructuras. Aplicaciones a la Ingeniería Sísmica*, J.E. Hurtado, ISBN:84-89925-59-3,177pp., 2000

- IS-39 *Utilización de los conjuntos difusos en modelos de vulnerabilidad sísmica*, E. Maldonado Rondón, J.R. Casas Rius y J.A. Canas, ISBN:84-89925-61-5, 2000
- IS-40 *Modelo de vulnerabilidad sísmica de puentes basado en " Conjuntos Difusos "*, E. Maldonado Rondón, J.R. Casas Rius, J. A.Canas, ISBN: 84-89925-64-X, 110pp, 2000
- IS-41 *Vulnerabilidad de puentes de autopista. Un estado del arte*, C. Gómez Soberón, A. Barbat, S. Oller, ISBN: 84-89925-64-X, 168pp, 2000
- IS-42 *Fuerzas sísmicas en los Países Bolivarianos*, R. Aguiar Falconí, ISBN: 84-89925-74-7, 101pp., 2000
- IS-43 *Espectros de input de energía de aplicación en el proyecto sismorresistente estructuras en regiones de sismicidad moderada*, A. Benavent-Climent, L.G. Pujades, F. López-Almansa, ISBN: 84-89925-86-0, 85 pp., 2001
- IS-44 *Capacidad límite última de disipación de energía de estructuras de hormigón Armado sometidas a acciones sísmicas*, A. Benavent- Climent, F. López-Almansa, L. G. Pujades, ISBN: 84-89925-88-7, 2001
- IS-45 *Evaluación del daño en edificios y desempeño sísmico. Programa de ordenador CEINCI3*, R. Aguiar Falconí, ISBN: 84-89925-87-9, 107pp., 2001
- IS-46 *Estudio analítico sobre el comportamiento sísmico de muros de mampostería confinada con aberturas*, J. J. Álvarez, S.M. Alcocer, ISBN: 84-89925-90-9, 119pp., 2002
- IS-47 *Seismic vulnerability of bridges using simplified models*, C. Gómez Soberón, S. Oller, A. H. Barbat, ISBN: 84-89925-96-8, 135pp., 2002
- IS-48 *Control de vibraciones en puentes. Un estado del arte y de la práctica*, M. Jara, J. R. Casas, ISBN: 84-95999-01-3, 120pp., 2002
- IS-49 *Criterio de diseño de puentes con aisladores y disipadores de energía*, M. Jara, J. R. Casas, ISBN: 84-955999-02-1, 115pp., 2002
- IS-50 *Ferrocemento: Un acercamiento al diseño sísmico*, D. A. Bedoya, J. Farbiarz, J. E. Hurtado, Ll. G. Pujades, ISBN: 84-95999-23-4, 76pp., 2002
- IS-51 *Metodología para la evaluación del desempeño de la gestión del riego*, M. L. Carreño, O. D. Cardona, A. H. Barbat, ISBN: 84-95999-66-8, 2004

- IS-52 *Sistema de indicadores para la evaluación de riesgos*, M. L. Carreño, O. D. Cardona, A. H. Barbat, ISBN: 84-95999-70-6, 200
- IS-53 *Evaluación "ex-post" del estado de daño en los edificios afectados por un terremoto*, M. L. Carreño, O. D. Cardona, A. H. Barbat, ISBN: 84-95999-76-5, 2005
- IS-54 *Identificação modal estocástica de estruturas de engenharia civil*, F. Magalhães, A. Cunha, E. Caetano, ISBN: 84-95999-89-7, 2005
- IS-55 *Comportamiento sísmico de puentes articulados y disipación de energía adicional: Un estado del crecimiento*, G. E. Valdebenito, A. C. Aparicio, ISBN: 84-95999-87-0, 2005
- IS-56 *Cálculo y diseño sismorresistente de edificios. Aplicación de la norma NCSE-02*, A.H. Barbat, S. Oller and J.C. Vielma, 2005
- IS-57 *Evaluación rápida de la deriva máxima de piso para calcular la vulnerabilidad sísmica de estructuras*, R. Aguiar, ISBN: 84-95999-91-9, 2006
- IS-58 *Factor de reducción de las fuerzas sísmicas en edificios de hormigón armado sin muros de corte*, R. Aguiar, ISBN: 978-84-96736-40-7, 2007
- IS-59 *Herramientas necesarias para la evaluación sísmica de edificios*, R. Moreno, L. Pujades, A.C. Aparicio, A.H. Barbat, ISBN: 978-84-96736-53-5, 2007
- IS-60 *Inelastic Analysis of Geometrically Exact Rods*, P. L. Mata, A.H. Barbat, S. Oller, R. Boroschek, ISBN: 978-84-96736-59-7, 2007
- IS-61 *La gestión financiera del riesgo desde la perspectiva de los desastres*, M.C.Marulanda, O.D. Cardona, M.G. Ordaz, A.H.Barbat, ISBN:978-84-96736-60-3, 2008
- IS-62 *Seismic protection of cable-stayed bridges applying fluid viscous dampers*, G.E. Valdebenito, A.C. Aparicio, ISBN:978-84-96736-84-9, 2010
- IS-63 *Reliability problems in earthquake engineering*, J.E. Hurtado, ISBN: 978-84-96736-86-3, 2010

- IS-64 *Theoretical and experimental analysis of dissipative buckling restrained braces*, G. Perazzo, F. López-Almansa, X. Cahís, F. Crisafulli, ISBN: 978-84-96736-98-6, 2011
- IS-65 *Proyecto sismorresistente de estructuras porticadas*, J. C. Vielma, A.H. Barbat, S. Oller, ISBN: 978-84-95999-60-3, 2011
- IS-66 *Modelización numérica del comportamiento estructural de barras de pandeo restringido* J. C. Castro, F. López, S. Oller, ISBN: 978-84-95999-12-2, 2011
- IS-67 *Respuesta dinámica de un edificio considerando el efecto de interacción suelo-estructura*, F. D. Díaz F. Espinoza, R. Sánchez, C.I. Huerta, ISBN: 978-84-939640-1-6, 2012
- IS-68 *Contribuciones a la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios*, J.C. Vielma, ISBN: 978-84-941686-9-7, 2014
- IS-69 *Probabilistic seismic hazard and risk assessment in Spain*, M.A. Salgado-Gálvez, O.D. Cardona, M.L. Carreño, A.H. Barbat, ISBN: 978-84-943307-7-3, 2015
- IS-70 *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras de acero residenciales del Ecuador* J.C. Vielma, M. A. Cando, ISBN: 978-84-943928-1-8, 2015
- IS-71 *Calibración de funciones de atenuación basadas en espectro de fuente radiado y su aplicación en Colombia*, G.A. Bernal, O.D. Cardona, ISBN: 978-84-944244-2-7, 2015
- IS-72 *Espectros de control para ciudad de Quito-Ecuador*, R. Aguiar, ISBN: 978-84-944244-3-4, 2015
- IS-73 *Caracterización probabilista de efectos de sitio en ciudades y su aplicación en Bogotá*, G.A. Bernal, O.D. Cardona, ISBN: 978-84-945077-4-8, 2016

Los autores interesados en publicar monografías en esta serie deben contactar con el editor para concretar las normas de preparación del texto.
