

INCIDENCIA DE LA UTILIZACIÓN DE LA NUEVA GENERACIÓN DE ECUACIONES DE
ATENUACIÓN (NGA) EN LOS VALORES MÁXIMOS DE ACELERACIÓN SÍSMICA PICO
(PGA) EN COLOMBIA.

DIANA MILENA DIAZ HERNANDEZ

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
MAESTRIA DE INGENIERIA CIVIL – ENFASIS EN GEOTECNIA
BOGOTA
2013

INCIDENCIA DE LA UTILIZACIÓN DE LA NUEVA GENERACIÓN DE ECUACIONES DE
ATENUACIÓN (NGA) EN LOS VALORES MÁXIMOS DE ACELERACIÓN SÍSMICA PICO
(PGA) EN COLOMBIA.

DIANA MILENA DIAZ HERNANDEZ

TRABAJO DE GRADO

Director
ANDRES JOSE ALFARO CASTILLO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
MAESTRIA DE INGENIERIA CIVIL – ENFASIS EN GEOTECNIA
BOGOTA
2013

PAGINA DE ACEPTACION

FIRMA DE DIRECTOR DE MAESTRIA DE INGENIERIA CIVIL

FIRMA DE JURADO

FIRMA DE JURADO

FIRMA DE JURADO

Bogotá, Octubre 2013.

PAGINA DE DEDICATORIA

Dedicado a un guía personal, a un amigo y a un modelo a seguir
Andrés Alfaro simplemente gracias por permitir esto.

PAGINA DE AGRADECIMIENTOS

A mi familia, que de manera incondicional me ha brindado su apoyo. A mi madre y padre – Gloria y Gelcy- por brindarme su amor, su apoyo, comprensión y cariño. A ellos que me han enseñado e inculcado sus grandes valores, por enseñarme a conducirme en la vida con responsabilidad, respeto y dedicación. A Rafael quien de alguna u otra manera me ha ayudado a ver la vida llena de alegría y esperanza. A todos ellos GRACIAS.

Institucionalmente a la ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO por el gran apoyo brindado durante este tiempo. A mi tutor Andrés Alfaro quien me brindo su confianza y apoyo para la realización de este trabajo, por compartirme su conocimiento, consejos y experiencias.

A mis amigos y compañeros, por su gran apoyo tanto académico como moral, gracias por su comprensión, apoyo, consejos y paciencia. A todas aquellas personas que han contribuido a mi formación tanto personal como profesional, y que, sin intención, no he nombrado en esta sección, pero saben que su amistad siempre será conservada en la mente y corazón.

Gracias a todos.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1. GENERALIDADES..... | 15 |
| 1.1. OBJETIVOS..... | 15 |
| 1.1.1. Objetivo General | 15 |
| 1.1.2. Objetivos Específicos:..... | 15 |
| 1.2. METODOLOGIA | 15 |
| 2. ESTADO DEL ARTE | 17 |
| 2.1. AMENAZA SISMICA..... | 18 |
| 2.1.1. Métodos Deterministas | 19 |
| 2.1.2. Métodos Probabilistas..... | 20 |
| 3. SISMOS DE COLOMBIA | 22 |
| 3.1. Catálogo de Sismos..... | 22 |
| 3.1.1. Sismicidad Histórica..... | 22 |
| 3.1.2. Sismicidad Instrumental..... | 24 |
| 4. ECUACIONES DE ATENUACIÓN | 33 |
| 4.1. NUEVAS ECUACIONES DE ATENUACIÓN DE ONDA | 33 |
| 4.1.1. Grupo Peer..... | 33 |
| 4.1.2. Nuevas Ecuaciones de Atenuación NGA..... | 34 |
| 5. DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE AMENAZA POR REGIONES PARA CADA ECUACIÓN DE ATENUACIÓN..... | 52 |
| 5.1. LEYES DE RECURRENCIA POR REGIONES SISMOGÉNICAS. (GUTENBERG- RICHTER)..... | 52 |
| 5.1.1. Recurrencia de Magnitudes. | 53 |
| 6. DETERMINACIÓN DE LAS PGA (PEAK GROUND ACCELERATIONS) | 60 |
| 6.1. GENERALIDADES | 60 |
| 6.2. DESVIACION ESTANDAR | 61 |
| 6.2.1. Desviación Estándar Abrahamson & Silva (2008) | 61 |
| 6.2.2. Desviación Estándar Chiou & Youngs (2008)..... | 62 |
| 6.2.3. Desviación Estándar Idriss (2008) | 63 |
| 6.2.4. Curvas de Isoaceleración para Colombia - Modelo AS08 | 67 |

| | | |
|--------|--|----|
| 6.2.5. | Curvas de Isoaceleración para Colombia - Modelo BA08 | 69 |
| 6.2.6. | Curvas de Isoaceleración para Colombia - Modelo CB08 | 71 |
| 6.2.7. | Curvas de Isoaceleración para Colombia - Modelo CY08 | 72 |
| 6.2.8. | Curvas de Isoaceleración para Colombia - Modelo I08 | 73 |
| 7. | ANALISIS DE RESULTADOS | 74 |
| 7.1. | ACELERACIONES MÁXIMAS:..... | 74 |
| 8. | DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES | 83 |
| 9. | REFERENCIAS | 86 |
| 10. | ANEXO 1 | 90 |
| 11 . | ANEXO 2..... | 91 |

CONTENIDO DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1- Esquema del método de cálculo de evaluación de la Amenaza Sísmica empleando métodos deterministas (Kramer, 1996) | 20 |
| Figura 2. Esquema del método de cálculo de evaluación de la Amenaza Sísmica empleando métodos probabilistas (Kramer, 1996) | 21 |
| Figura 3. Variables que intervienen en el modelo (AS08)..... | 35 |
| Figura 4. Bloque levantado o deprimido. (Yeats et al., 1997) | 36 |
| Figura 5. Medidas de distancia a la fuente finita más frecuentemente usadas en relaciones de atenuación..... | 40 |
| Figura 6. Curva de Amenaza Sísmica para Colombia – Modelo AS08 | 54 |
| Figura 7. Curva de Amenaza Sísmica para Colombia – Modelo BA08 | 55 |
| Figura 8. Curva de Amenaza Sísmica para Colombia – Modelo CB08 | 56 |
| Figura 9. Curva de Amenaza Sísmica para Colombia – Modelo CY08 | 57 |
| Figura 10. Curva de Amenaza Sísmica para Colombia – Modelo I08 | 58 |
| Figura 11. Curva de Amenaza Sísmica para Colombia – Modelo ft 2008 | 59 |
| Figura 12. Modelo de Aceleración Pico | 60 |
| Figura 13. Curvas de isoaceleración para Colombia. Modelo de AS08..... | 67 |
| Figura 14. Curvas de isoaceleración para Colombia. Modelo de BA08..... | 69 |
| Figura 15. Curvas de isoaceleración para Colombia. Modelo de CB08 | 71 |
| Figura 16. Curvas de isoaceleración para Colombia. Modelo de CY08 | 72 |
| Figura 17. Curvas de isoaceleración para Colombia. Modelo de I08 | 73 |
| Figura 18. Sismo de ocurrido en Popayan,1983 | 74 |
| Figura 19. Mapa de valores de Aa – Decreto 1400/1984 | 75 |
| Figura 20. Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para Decreto 1400/1984 | 75 |
| Figura 21 Sismo de Pereira,1995..... | 76 |
| Figura 22. Mapa de valores de Aa – NSR-98 | 76 |
| Figura 23. Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-98 | 76 |
| Figura 24. Mapa de valores de Aa – NSR-10 | 77 |
| Figura 25. Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 | 77 |
| Figura 26. División Política de Colombia..... | 78 |

CONTENIDO DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Principales sismos históricos en Colombia | 23 |
| Tabla 2. Magnitud VS Cantidad de Registros - Catalogo SISRA..... | 24 |
| Tabla 3. Magnitud VS Cantidad de Registros - Catalogo PDE | 25 |
| Tabla 4. Año VS Cantidad de Registros – Catalogo SISRA | 26 |
| Tabla 5. Año VS Cantidad de Registros – Catalogo PDE..... | 27 |
| Tabla 6. Año VS Profundidad de Registros – Catalogo SISRA | 29 |
| Tabla 7. Año VS Profundidad de Registros – Catalogo PDE..... | 30 |
| Tabla 8. Valores límites de las variables predictivas en el modelo de Campbell y Bozorgnia | 38 |
| Tabla 9. Valores de V30 para diferentes tipos de terrenos (Programa Nacional de Reducción de la Amenaza Sísmica - USA, NEHRP, 1993) | 49 |
| Tabla 10. Numero de terremotos y grabaciones seleccionados por cada autor | 51 |
| Tabla 11. Variación de la Desviación Estándar como función de la PGA, de la Magnitud y de la Distancia - AS08..... | 61 |
| Tabla 12. Variación de la Desviación Estándar como función de la PGA, de la Magnitud y de la Distancia - CY08..... | 62 |
| Tabla 13. Variación de la Desviación Estándar como función de la PGA, de la Magnitud y de la Distancia - I08..... | 63 |
| Tabla 14. Valores de PGA Incluyendo La Desviación Estándar | 65 |
| Tabla 15. Comparación de los valores de la aceleración pico efectiva para diseño [Aa] incluidos en el Decreto 1400/1984, NSR-98, NSR-10, AS08, BA08, Cb08, CY08 e I08 para ciudades capitales de departamentos de Colombia. | 79 |

CONTENIDO DE GRAFICAS

| | |
|--|----|
| Gráfica 1. Magnitud VS Cantidad de Registros – Catálogos SISRA y PDE | 25 |
| Gráfica 2. Año VS Cantidad de Registros – Catalogo SISRA..... | 27 |
| Gráfica 3. Año VS Cantidad de Registros – Catalogo PDE | 28 |
| Gráfica 4. Año VS Profundidad de Registros – Catalogo SISRA..... | 30 |
| Gráfica 5. Año VS Profundidad de Registros – Catalogo PDE (1981 – 1996)..... | 31 |
| Gráfica 6. Año VS Profundidad de Registros – Catalogo PDE (1997 - 2012) | 31 |
| Gráfica 7. Comportamiento de la aceleración vs distancia a diferentes magnitudes de la ecuación propuesta por Abrahamson & Silva (2008)..... | 37 |
| Gráfica 8. Comportamiento de la aceleración vs distancia a diferentes magnitudes de la ecuación propuesta por Campbell y Bozorgnia (2008). | 41 |
| Gráfica 9. Comportamiento de la aceleración vs distancia a diferentes magnitudes de la ecuación propuesta por Chiou & Youngs (2008). | 43 |
| Gráfica 10. Comportamiento de la aceleración vs distancia a diferentes magnitudes de la ecuación propuesta por Idriss (2008)..... | 44 |
| Gráfica 11. Comportamiento de la aceleración vs distancia a diferentes magnitudes de la ecuación propuesta por Boore & Atkinson (2008). | 45 |
| Gráfica 12. Comparación de ecuaciones de atenuación para M= 5.0. | 46 |
| Gráfica 13. Comparación de ecuaciones de atenuación para M= 8.0. | 46 |
| Gráfica 14. Variación de la Desviación Estándar como función de la PGA, de la Magnitud y de la Distancia - AS08..... | 62 |
| Gráfica 15. Variación de la Desviación Estándar como función de la PGA, de la Magnitud y de la Distancia - CY08..... | 63 |
| Gráfica 16. Variación de la Desviación Estándar como función de la PGA, de la Magnitud y de la Distancia – I08 | 64 |

RESUMEN

Colombia es un país que presenta una sismicidad importante por estar ubicado en el límite entre las placas Caribe, Nazca y Suramérica, generándose, debido a esta condición, un sistema de fallas a lo largo del territorio y por consiguiente ser catalogado con un riesgo sísmico importante. Para el entendimiento y prevención de estos efectos, se realiza la caracterización sísmica de sitio, la cual debería ser una actividad de rigor antes de iniciar la construcción de cualquier estructura. Esta caracterización busca la determinación de los parámetros propios del sismo y la evaluación de éstos mediante la aplicación de las normas sismorresistentes, con el fin de suministrar al ingeniero la información necesaria para el diseño y construcción de cualquier estructura.

En este trabajo de grado se llevó a cabo un análisis de 7986 eventos sísmicas con el objetivo de desarrollar mapas de iso-aceleración a partir de las ecuaciones propuestas por Boore & Atkinson (2008); Campbell y Bozorgnia (2008); Chiou & Youngs (2008); Idriss (2008) y Abrahamson & Silva (2008). El análisis permite conocer la distribución de los valores del movimiento del terreno, propagación de la energía y el comportamiento de los eventos dada su región sismogénica, adicionalmente, permite hacer una caracterización aproximada de la amenaza sísmica de Colombia. Los registros empleados para este análisis fueron obtenidos del catálogo sísmico SISRA para el periodo comprendido entre el 1960 al 1980, además del catálogo PDE para el periodo entre 1981 y 2012, la magnitud de los eventos dentro del catálogo varía de 1,9 a 7.7, sin embargo, las ecuaciones funcionan para magnitudes entre 5 y 8, de tal forma que los catálogos colombianos utilizados se redujeron de manera importante.

Adicionalmente se realiza una comparación de los datos de aceleración (A_a) de las diferentes Normas Sismo-resistentes que han regido en Colombia y las generada por los cinco autores a través de los mapas de isoaceleración. Dichos mapas muestran la distribución de los contornos de los valores máximos que se ve influenciada por: la cantidad de estaciones de registro, la distribución de las estaciones, los parámetros del evento y la zona sismogénica donde ocurren los sismos.

ABSTRACT

Colombia is a country that shows an important seismicity because it is located at the limit between the Caribbean plate, Nazca and South America, due to this condition, it generates a fault system all along the territory, therefore it is cataloged with an important seismic risk. For the understanding and prevention of these effects, it is performed seismic site characterization, which is taken as a rigor activity before the construction of any structure. This characterization looks for the determination of the parameters and the evaluation of the main seism, through the application of the earthquake resistant standards, with the purpose of supplying the necessary information for the design and construction of any structure to the engineer.

This paper grade holds 7986 seismic event analysis with the objective of developing maps of Iso-aceleration from the equations proposed for Boore & Atkinson (2008); Campbell y Bozorgnia (2008); Chiou & Youngs (2008); Idriss (2008) y Abrahamson & Silva (2008). The analysis allows to know the distribution of the ground movements values, propagation of the energy and the behavior of the events depending on their seismogenic region, additionally, it allows to do an aproximated characterization of the colombian seismic threat. The used registers for the analysis were taken from seismic catalog SISRA for the comprehended period between 1960 and 1980, besides the PDE catalog for the period between 1981 and 2012, the magnitude of the events inside the catalog changes from 1,9 to 7,7, however, the equations work for magnitudes between 5 and 8, that way the colombian cataloges used, were reduced in an importat way.

Additionally, it is performed a comparison of the aceleration information (A_a) of the different earthquake resistant standards that have ruled in Colombia and the generated ones for the five authors, through the Iso-aceleration maps. Those maps show the distribution of the boundaries of the maximum values that are influenced by: the register station quantity, the stations distribution, the events parameteres and the seismogenic zone where the seisms happen.

INTRODUCCIÓN

Colombia está situada en una zona propensa a los sismos (Ramírez, 1933, 1971, 1975; Salcedo, 1992), con una compleja tectónica debido a la interacción de cuatro placas: Suramérica, Caribe, Nazca y Cocos que han formado el relieve del territorio.

Este trabajo de grado presenta una evaluación probabilística de la amenaza sísmica del territorio colombiano, esto al emplear metodologías de amenaza y ecuaciones de atenuación robustas correspondientes al NGA (2008), como son Hanks y Cornell (1994) y Abrahamson & Silva (2008) Boore & Atkinson (2008); Campbell y Bozorgnia (2008); Chiou & Youngs (2008) e Idriss (2008) respectivamente. Para evaluar aceleraciones pico en roca se utilizaron datos instrumentales de 1960 a 2012, se analizaron sismos en el área entre latitudes -1°N a 15°N y entre longitudes -80°W y -70°W , con profundidades menores a 100 km y magnitudes MS mayores a 5.0

En el diseño y construcción de estructuras o edificaciones es necesario realizar estudios detallados de factores de riesgos potenciales. Particularmente, los sismos son capaces de generar destrucción de edificios, ciudades y hasta regiones completas afectando directamente la vida del ser humano.

El análisis del terreno donde se construirán las edificaciones, así como sus características de construcción deberían ser imprescindibles ante el planteamiento de realización de cualquier obra de ingeniería. Es claro que los efectos de un sismo dependen de sus características intrínsecas, tales como la magnitud, el tipo de falla generadora, la profundidad del epicentro; pero también dependen en gran medida de las condiciones locales del sitio afectado. Para el análisis de estas condiciones geológicas es necesaria la aplicación de ciertos métodos geofísicos que permitan, primero la construcción de un modelo geológico del subsuelo del sitio de estudio, y segundo la obtención de los parámetros geotécnicos necesarios para clasificar el tipo de suelo y simular así, los efectos del sismo en el sitio.

Colombia se ubica en una de las regiones de mayor actividad sísmica del planeta, lo que supone una constante amenaza de ocurrencia de terremotos. Por esta razón, se hace necesario conocer los efectos que los eventos sísmicos producen en el territorio nacional y evitar posibles catástrofes que involucren tanto pérdidas materiales como de vidas humanas. En este contexto, la obtención de leyes de atenuación es una de las materias de mayor importancia en el cálculo de la amenaza sísmica de Colombia, ya que estas relaciones permiten estimar la amplitud de los movimientos del suelo ante estos fenómenos.

Una curva de atenuación es básicamente una expresión matemática que relaciona el máximo valor de algún parámetro sísmico en estudio, generalmente la aceleración, con la magnitud del evento y la distancia a la fuente. Estas relaciones se obtienen a partir del ajuste de los registros sísmicos de una determinada zona por medio de análisis de regresión. Distintos autores han desarrollado curvas de atenuación, considerando diversos parámetros y a partir de diferentes bases de datos de eventos sísmicos. Douglas (2000, 2001) ha recopilado más de 200 ecuaciones robustas a nivel mundial.

La estimación de leyes de atenuación conlleva incertidumbre, ya que a menudo los datos que se ajustan a una determinada ley presentan una gran dispersión, los resultados son más precisos para una cierta región cuanto mayor es la muestra de datos empleada.

En este trabajo de grado se analizaron datos desde el año 1960 hasta el mes de Septiembre de 2012 de manera de abarcar una amplia muestra de eventos y obtener resultados representativos.

El objetivo principal de este trabajo es realizar un estudio probabilístico de la amenaza sísmica de Colombia utilizando las ecuaciones de atenuación del proyecto "Next Generation of Attenuation Relations Project", el que finalizó una primera fase en el año 2008, NGA para esto es necesario calcular las aceleraciones pico del suelo utilizando las ecuaciones de Abrahamson & Silva (2008) Boore & Atkinson (2008); Campbell y Bozorgnia (2008); Chiou & Youngs (2008) e Idriss (2008) y comparar los valores obtenidos con las Normas NSR-84, NSR-98 y NSR-10.

1. GENERALIDADES

El “Next Generation of Attenuation Relations Project” es un proyecto dedicado a la obtención de ecuaciones de atenuación y de espectros uniformes para una región de Estados Unidos con una base de datos uniforme y una estructura de ecuación similar, producto de esto surgieron cinco nuevas ecuaciones de atenuación a saber:

- Abrahamson & Silva (2008)
- Boore & Atkinson (2008)
- Campbell y Bozorgnia (2008)
- Chiou & Youngs (2008)
- Idriss (2008)

Con estas ecuaciones se calcularon los valores de PGA para Colombia, las cuales son robustas y recientes de la literatura mundial y comparar los resultados con la norma vigente y con datos instrumentales en Colombia.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Realizar un estudio probabilístico de la amenaza sísmica de Colombia utilizando las ecuaciones de atenuación del NGA.

1.1.2. Objetivos Específicos:

- Calcular las aceleraciones pico del suelo utilizando las ecuaciones de Boore & Atkinson (2008); Campbell y Bozorgnia (2008); Chiou & Youngs (2008); Idriss (2008) y Abrahamson & Silva (2008).
- Comparar los valores de A_a obtenidos con las Normas Decreto 1400/1984, NSR-98 y NSR-10 y los autores Boore & Atkinson (2008); Campbell y Bozorgnia (2008); Chiou & Youngs (2008); Idriss (2008) y Abrahamson & Silva (2008).

1.2. METODOLOGIA

La metodología utilizada para desarrollar el trabajo de grado es:

- Recopilación de información.
- Elaboración de un catálogo actualizado y robusto de sismos de Colombia para magnitudes mayores a 4.0
- Determinación de la leyes de recurrencia (Gutenberg-Richter) por regiones sismogénicas
- Determinación de las curvas de amenaza por regiones para cada ecuación de atenuación
- Determinación de las PGA (Peak Ground Accelerations) para un periodo de retorno de 475 años.
- Realizar un análisis de los resultados
- Realizar la comparación con los valores obtenidos en otros estudios

2. ESTADO DEL ARTE

1. ESTUDIOS PREVIOS

A nivel de amenaza sísmica para todo el territorio colombiano se han realizado, entre otros, los estudios de Estrada y Ramírez (1977); de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (1984); Salcedo (1992, 1993); AIS (1996); Ceresis (1996); Aguiar y Haro (2000); Gallego (2000), AIS (2009), Alfaro (2011, 2012); en los cuales Estrada y Ramírez (1974) y Salcedo (1992) presentan valores de magnitudes esperadas, en tanto que los restantes presentan aceleraciones pico esperadas y espectros de diseño.

Los estudios de AIS (1984, 1996) se sustentaron en modelos de línea fuente, asignándole a ciertas fallas una sismicidad en un corredor de 60 km de ancho, de esta manera se caracterizaron las fuentes sismogénicas. En el caso de AIS (1984) se analizaron tres ventanas de tiempo, a saber: 1566-194; 1922-1984 y 1957-1984, determinando los parámetros de recurrencia para cada falla.

Dicha caracterización presenta un inconveniente debido a la gran escasez de datos, por ejemplo la falla de Boconó se caracterizó con nueve sismos, la Bolívar con cuatro; la Bucaramanga-Santa Marta con veintitrés, Cauca con seis; Cimitarra con seis; Cuiza con cuatro; Espíritu Santo con seis; Frontal de la Cordillera Oriental con sólo veintidós; Nátaga con cinco; Oca con cuatro; Palestina con cinco; Romeral con nueve; Salinas con cuatro y Sinú con tres. Por su parte Felzer (2006) dice que se requieren más de 2000 sismos de buena calidad para caracterizar una fuente. El otro gran inconveniente es que solo consideran fuentes en el territorio colombiano, obviando las fuentes localizadas en Panamá, Venezuela, Ecuador y Perú, todas ellas bastante activas.

El estudio de Salcedo (1992, 1993) tiene como ventaja el que incluye otros parámetros geofísicos y no se limita a los sismos registrados. Dichos parámetros son los siguientes: tipo de corteza terrestre (continental, oceánica o de transición); fallas geológicas según su morfología y cinemática (inversas, normales, transcurrentes); módulo del gradiente de las anomalías de Bouguer; Anomalía de la gravedad en la reducción de Bouguer y valores de la altura de la superficie terrestre, este parámetro incluye la información generalizada sobre las deformaciones de la parte superficial de la corteza terrestre.

El mapa de Salcedo (1992, 1993) muestra que los posibles sismos más fuertes con $M_{max} > 7,5$ se esperarían en la región del Chocó. Valores de la $M_{max} > 7,0$ se esperarían al Este de la zona del Chocó en la Cordillera Occidental, en la región de Nariño y en la zona Norte de la Sierra Nevada de Santa Marta. Además, con el valor $M_{max} > 6,0$ Salcedo (1993) lo toma como el nivel de fondo de sismicidad fuerte a largo plazo en todo el territorio de Colombia. Sin embargo, el mapa no muestra las altas magnitudes que ya se han presentado en la zona de Tumaco y en la frontera con Ecuador, con magnitudes M_w

de hasta 8,6 en 1906. También existe el mapa probabilístico para Suramérica realizado por Ceresis (1996), cuyos valores son en general mayores a los de la NSR 10.

Al seguir la recomendación de Stein et ál. (2011) de realizar una mirada retrospectiva y comparar el mapa de aceleraciones de pronóstico con las aceleraciones registradas, en el caso de Colombia se presentan básicamente dos problemas: baja instrumentación de movimiento fuerte y otro tal vez más grave, y es que la mayoría de los acelerógrafos están colocados en suelo, sin que tengan estación de referencia en roca, y sabiendo que los mapas de amenaza regional han sido realizados para la aceleración pico en roca. Los dos sismos fuertes con registros de aceleración mayores a 100 gales han sido el del 25 de enero de 1999 en el eje cafetero y el del 24 de mayo del 2008 en Quetame (Cundinamarca).

El del 25 de enero de 1999 se registraron aceleraciones en suelo de 518 gales a 13 km del epicentro, Sugito y Taniguchi (1999), por lo que se realizaron estimaciones de la aceleración en roca y se obtuvo el valor de 217 gales. De acuerdo con las observaciones de campo y las fotografías aéreas se puede deducir que se presentaron aceleraciones mayores a una gravedad. A pesar de esto los estudios de AIS (2009) no presentan ningún cambio en el valor de aceleración de la ciudad de Armenia.

En el caso del sismo del 24 de mayo del 2008 se registraron aceleraciones de 605 gales en roca a 9 km del epicentro. El estudio de AIS (1998) asignaba 0,30 g para este sitio, en tanto que el estudio AIS (2009) presenta 0,25 g. Este estudio, como se presenta más adelante, muestra un valor de 0,35 al tener en cuenta que la desviación estándar de la ecuación de Fukushima y Tanaka (1990) es de 0,21 g, lo cual significaría un valor de 0,56 g; si se tuviera en cuenta la completitud del catálogo el valor sería de 0,64 g, el cual es solo el 3 % diferente del valor registrado. De ahí la importancia de revisar y actualizar los estudios de amenaza sísmica (Correa y Alfaro, 2011; Stein et ál, 2011).

2.1. AMENAZA SISMICA

La amenaza sísmica es la probabilidad estadística de la ocurrencia de cierta aceleración del suelo en un determinado sitio, durante un periodo de tiempo.

Los métodos para evaluar la amenaza sísmica se clasifican en dos grandes grupos:

- **Deterministas:** se basa en el principio que la sismicidad máxima de una región depende del tamaño y distancia de las fallas geológicas.

- Probabilístico: El objetivo del análisis de la amenaza sísmica es cuantificar la probabilidad de excedencia de un nivel de movimiento del terreno en un sitio debido a todos los posibles sismos.

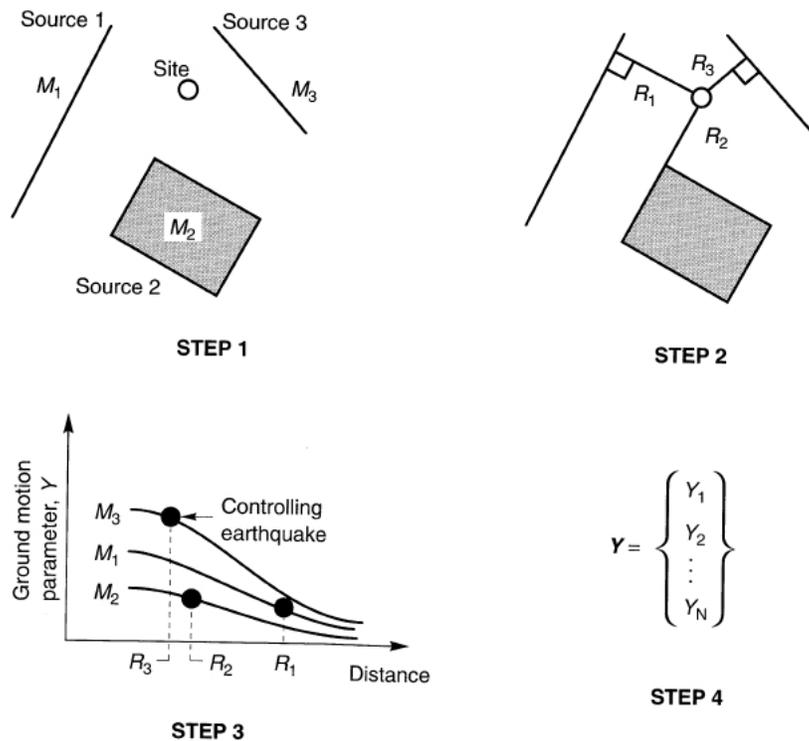
2.1.1. Métodos Deterministas

Los métodos deterministas fueron los primeros desarrollados, y tienen por objetivo obtener valores de aceleración, sin proporcionar información sobre su periodo de retorno. Además, no analizan las incertidumbres introducidas en el proceso de cálculo, ni contienen criterios claros que permitan asegurar que el sismo obtenido sea el máximo esperable, lo cual a veces constituye a estos métodos como conservadores.

En general, el proceso de cálculo con estos métodos se realiza en los pasos que se indican a continuación y que se presentan en la Figura 1.

1. *Definición del área de influencia del sitio a evaluar e identificación de las fuentes sísmicas o fallas incluidas* en el área. Si la sismicidad se puede considerar homogénea en toda el área, se define una única fuente sísmica de influencia global, y el método entonces se denomina no zonificado. Si se identifican zonas con potencial sísmico diferente, se entiende que el método es zonificado.
2. *Estimación de los máximos sismos ocurridos* en el área de influencia o en cada una de las zonas fuente. Determinación de los sismos característicos y definición del máximo sismo potencial que se puede generar, previsiblemente, en cada zona o estructura delimitada.
3. *Estimación de la acción sísmica sitio a evaluar*, causada por los máximos sismos potenciales de cada zona o de toda el área. Por la hipótesis asumida de que la sismicidad es aleatoria en cada zona, el sismo máximo podría tener lugar en cualquier parte de la misma. Por ello, siguiendo un criterio conservador, dicho sismo se sitúa en el punto de la zona más cercano al lugar donde se realiza la predicción. La aplicación de leyes de atenuación con la distancia proporciona entonces valores de la intensidad del movimiento en el emplazamiento, como consecuencia de la actividad de cada zona definida.
4. *Determinación de la amenaza en el sitio a evaluar*, tomando el máximo valor de intensidad del movimiento generado por las diferentes zonas, con lo que la amenaza queda caracterizada por el límite superior del movimiento en el sitio.

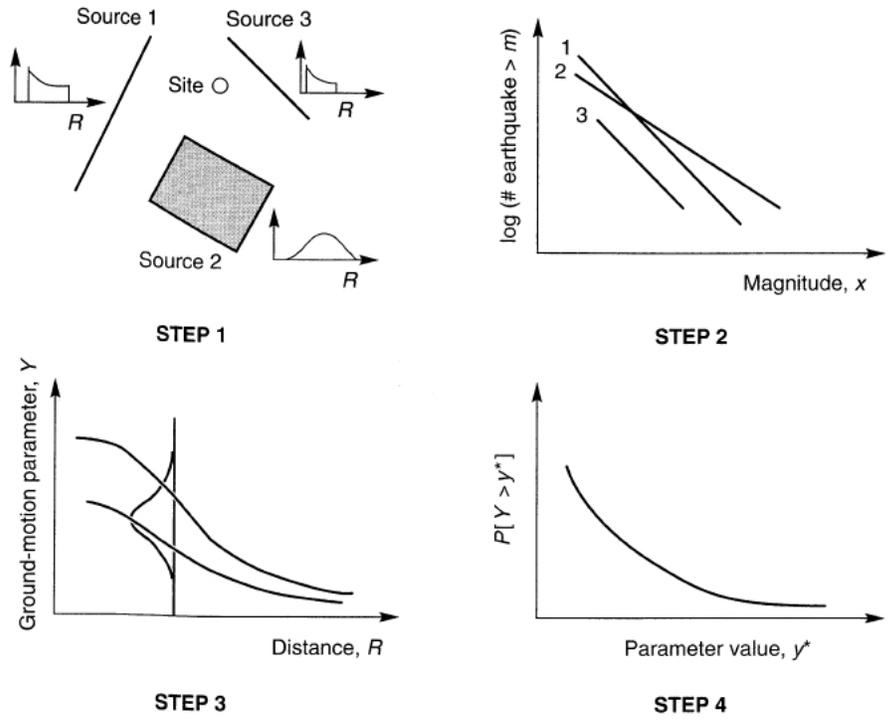
Figura 1- Esquema del método de cálculo de evaluación de la Amenaza Sísmica empleando métodos deterministas (Kramer, 1996)



2.1.2. Métodos Probabilistas

A diferencia de los métodos deterministas, los probabilistas consideran los efectos de todos los sismos que pueden afectar a un sitio dado, y tienen en cuenta la recurrencia de los mismos; se anota además “que los métodos probabilistas se basan en leyes estadísticas obtenidas a partir de la información contenida en los catálogos sísmicos” (Muñoz, 1989). En la Figura 2 se muestra un esquema general de estos métodos. Los métodos probabilistas dan como resultado estimaciones de la probabilidad de excedencia para cada valor de la intensidad del movimiento esperado en el sitio a evaluar, durante un periodo de tiempo dado, quedando así representada la amenaza por curvas de probabilidad. A su vez, estos métodos se clasifican en paramétricos y no paramétricos, existiendo también diferentes versiones dependiendo de la distribución estadística adoptada para caracterizar la sismicidad

Figura 2. Esquema del método de cálculo de evaluación de la Amenaza Sísmica empleando métodos probabilistas (Kramer, 1996)



3. SISMOS DE COLOMBIA

El conocimiento de la sismicidad de una región es primordial para llevar a cabo los estudios que determinan la magnitud de los daños que ocasionan los futuros terremotos. Esa potencialidad de daño denominada la amenaza sísmica, debe ser estudiada y analizada de forma que las edificaciones y obras de ingeniería susceptibles de sufrir pérdidas puedan ser diseñadas y controladas para disminuir así el daño. Asimismo, muchos de los trabajos de investigación geofísica o geológica requieren un buen conocimiento de la sismicidad.

La primera manera de expresarla es mediante los catálogos sísmicos en los cuales se recopila las características de los sismos que han ocurrido en una zona a lo largo de la historia, dichos catálogos actualizados y robustos. Uno de los parámetros característicos de la sismicidad de cada zona, necesarios para el cálculo de la amenaza es la tasa anual acumulada.

3.1. Catálogo de Sismos.

3.1.1. Sismicidad Histórica

Durante los primeros siglos de la colonia solamente los cronistas se ocupaban en narrar lo ocurrido en las ciudades afectadas por temblores, sin embargo desde principios del siglo XIX empezaron a aparecer no solo científicos extranjeros, sino también personas nativas ilustradas en la ciencia y en la historia que se dedicaban a registrar los temblores sentidos en sus ciudades. Estos registros son considerados los primeros catálogos sísmicos en Colombia así fuesen locales y parciales.

Entre los primeros escritos están:

- a) El diario de Don Luis Vargas Jurado, escrito en Santa Fe de Bogotá, con información de 1703 a 1780, publicado hasta 1902.
- b) El catálogo de sismicidad de Don Santiago Pérez de Valencia, que corresponde a Popayán entre 1785 y 1841.
- c) La crónica de Don José María Caballero, escrita en Santa Fe de Bogotá entre 1813 y 1819, aunque fue publicada por primera vez hasta 1902.
- d) La carta de Don Higinio Muñoz sobre las erupciones del volcán Galeras, fechada en Pasto en 1869.

e) La cronología sísmica de Colombia y las áreas vecinas de Ecuador y Venezuela, publicada en 1898 por Don Francisco José Vergara y Velasco.

f) El artículo del jesuita Luis Forero Durán sobre las erupciones del Galeras en el periodo 1924 a 1933, publicado en Bogotá en 1933.

g) La compilación hecha en 1927 por el vulcanólogo Emanuel Friedlaender sobre las erupciones del mismo volcán.

e) La elaboración de un catálogo sísmico confiable con la determinación e inclusión de los principales parámetros se debe al P. Jesús E Ramírez (1933, 1947, 1975)

En la Tabla 1 se presentan algunos de los principales sismos históricos con su fecha y ubicación probable de acuerdo con el trabajo de Jesús Emiliano Ramírez S.J (1933, 1947, 1975).

Tabla 1. Principales sismos históricos en Colombia

| FECHA | UBICACIÓN | DESCRIPCIÓN |
|------------|-------------------|--|
| 1566 | Popayán / Cali | Daños en Cali y Popayán primer sismo registrado en catálogos |
| 1625 | Bogotá | Fuerte sismo sobre la pequeña ciudad |
| 1697 | Honda y Mariquita | Fuertes movimientos de tierra sacudieron las nuevas villas |
| 20-06-1698 | Sur de Colombia | Destruída Ambato, más de 6500 muertos en Ecuador |
| 02-02-1735 | Popayán | Destrucción de gran parte de la ciudad |
| 18-10-1743 | Bogotá | Destrucción de la ciudad, iglesias y monasterios en ruinas |
| 9-07-1766 | Cali/Popayán/Buga | Destrucción de iglesias, casas y otras edificaciones |
| 12-07-1785 | Bogotá | Destrucción todas las iglesias y edificaciones de altura |
| 16-06-1805 | Honda | Destrucción de la ciudad de Mariquita. Cientos de muertos |
| 17-02-1807 | Tame | Destrucción de la población durante el medio día |
| 26-03-1812 | Caracas / Mérida | Destrucción de Caracas. Miles de muertos. Daños en Pamplona |
| 26-02-1825 | Costa Caribe | Destrucción de casas y conventos, muchos muertos |
| 28-06-1826 | Bogotá | Terremoto fuerte que destruyó varios edificios y conventos |
| 16-11-1827 | Bogotá / Neiva | Destrucción de casas y conventos, muchos muertos |
| 20-01-1834 | Pasto | Destrucción de Almaguer, daños en Pasto, sentido en Bogotá |

| FECHA | UBICACIÓN | DESCRIPCIÓN |
|------------|-------------------|--|
| 18-05-1875 | Cúcuta | Destrucción total de la ciudad y daños en otras ciudades del país |
| 09-02-1878 | Manizales | Temblor fuerte, sentido en Bogotá, Cauca y Valle del Cauca |
| 07-09-1882 | Choco / Antioquia | Daños en edificaciones y en el canal de Panamá |
| 31/01/1906 | Tumaco | Evento más grande en Colombia existe registro en Alemania, España y otras partes del mundo |

3.1.2. Sismicidad Instrumental

El primer sismógrafo en territorio colombiano fue puesto en funcionamiento en el año de 1922, lo que dio inicio a una red sismográfica que, con el paso del tiempo, se ha ido mejorando y se ha vuelto más densa. Solamente hasta el año de 1993 se puso en funcionamiento la Red Sismológica Nacional que actualmente cuenta con 18 estaciones de corto periodo y 13 de banda ancha operadas por el INGEOMINAS. El catalogo sísmico utilizado para este trabajo de grado corresponde a eventos del USGS (2012), que incluye datos de SISRA y PDE, del SISRA de 1960 a 1981 y del PDE de 1981 a 2012. Los datos del catálogo del PDE incluyen datos de la Red Sísmica Nacional de Colombia operada por Ingeominas.

Para los catálogos utilizados en este trabajo de grado se analizan los siguientes datos relacionados en la Tabla 2 y más adelante

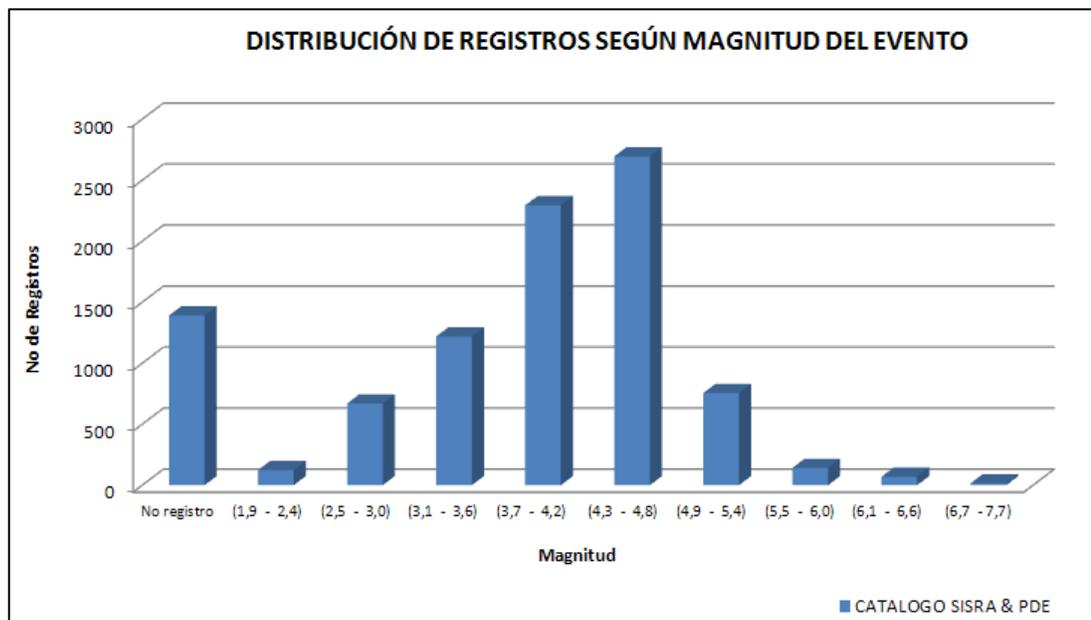
Tabla 2. Magnitud VS Cantidad de Registros - Catalogo SISRA

| CATALOGO SISRA | |
|---------------------------|-----------------------|
| Magnitud | Cantidad de Registros |
| No registro | 635 |
| (1,9 - 2,4) | 82 |
| (2,5 - 3,0) | 494 |
| (3,1 - 3,6) | 883 |
| (3,7 - 4,2) | 960 |
| (4,3 - 4,8) | 920 |
| (4,9 - 5,4) | 269 |
| (5,5 - 6,0) | 58 |
| (6,1 - 6,6) | 35 |
| (6,7 - 7,7) | 4 |
| TOTAL DE REGISTROS | 4.340 |

Tabla 3. Magnitud VS Cantidad de Registros - Catalogo PDE

| CATALOGO PDE | |
|---------------------------|-----------------------|
| Magnitud | Cantidad de Registros |
| No registro | 756 |
| (1,9 - 2,4) | 42 |
| (2,5 - 3,0) | 176 |
| (3,1 - 3,6) | 336 |
| (3,7 - 4,2) | 1334 |
| (4,3 - 4,8) | 1775 |
| (4,9 - 5,4) | 487 |
| (5,5 - 6,0) | 84 |
| (6,1 - 6,6) | 35 |
| (6,7 - 7,7) | 12 |
| TOTAL DE REGISTROS | 5.037 |

Gráfica 1. Magnitud VS Cantidad de Registros – Catálogos SISRA y PDE



Como se puede apreciar en la Gráfica 1, el mayor número de registros se ubican entre eventos de magnitudes de 3.7 hasta 4.8. Esto significa que en el territorio Colombiano se

presentan sismos menores y ligeros, perceptibles pero con daño poco probables a seres vivos y edificaciones

Año:

Las Tabla 4 y Tabla 7 y en las Grafica 2 y Grafica 3 muestra la cantidad de sismos para los catálogos compilados entre 1960 y 2012. Estas gráficas nos permiten encontrar valores promedio de la sismicidad en Colombia durante este período. Por ejemplo los datos más representativos son:

- 406 sismos en el año 1979 con magnitudes entre 2 y 7.7.
- 464 sismos en el año de 1991 entre magnitudes de 1.9 a 7.2.
- 101 sismos con magnitudes iguales o mayores a 6.0
- 1 sismo de magnitud igual o mayor a 7.5 ocurrido el 12 de Diciembre de 1979 con una magnitud de 7.7.

Aunque estos son solo valores promedio para toda Colombia, permite estimar la amenaza sísmica asociada

Tabla 4. Año VS Cantidad de Registros – Catalogo SISRA

| CATALOGO SISRA | | | |
|---------------------------|------------------------------|------------|------------------------------|
| Año | Cantidad de Registros | Año | Cantidad de Registros |
| 1960 | 111 | 1971 | 150 |
| 1961 | 83 | 1972 | 149 |
| 1962 | 101 | 1973 | 208 |
| 1963 | 155 | 1974 | 264 |
| 1964 | 189 | 1975 | 177 |
| 1965 | 188 | 1976 | 286 |
| 1966 | 297 | 1977 | 155 |
| 1967 | 281 | 1978 | 208 |
| 1968 | 271 | 1979 | 406 |
| 1969 | 179 | 1980 | 273 |
| 1970 | 209 | | |
| TOTAL DE REGISTROS | | | 4340 |

Gráfica 2. Año VS Cantidad de Registros – Catalogo SISRA.

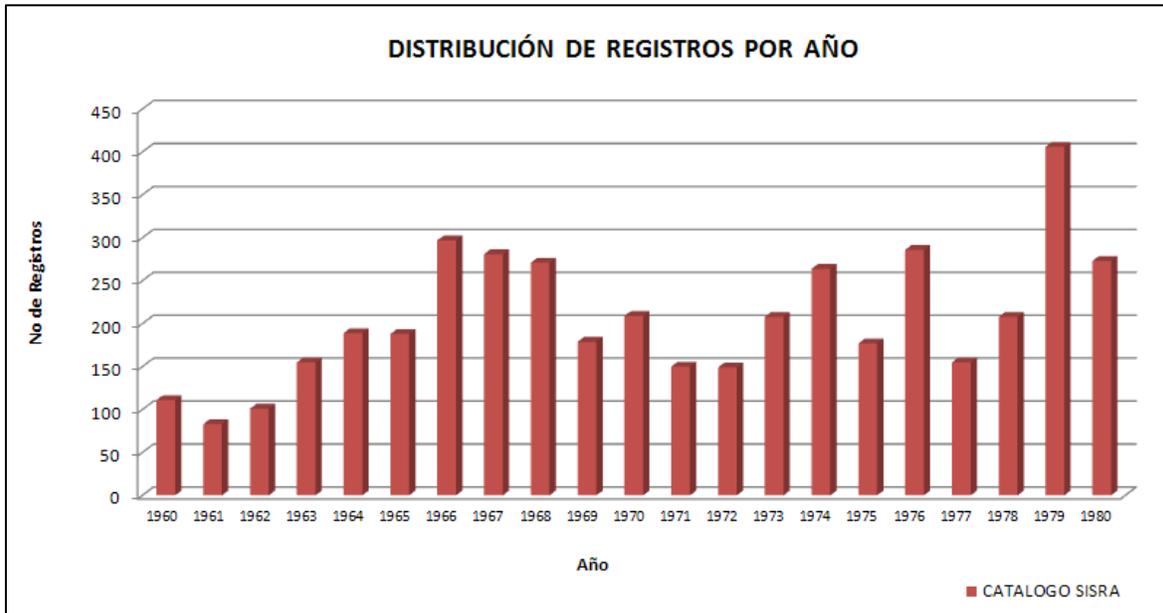
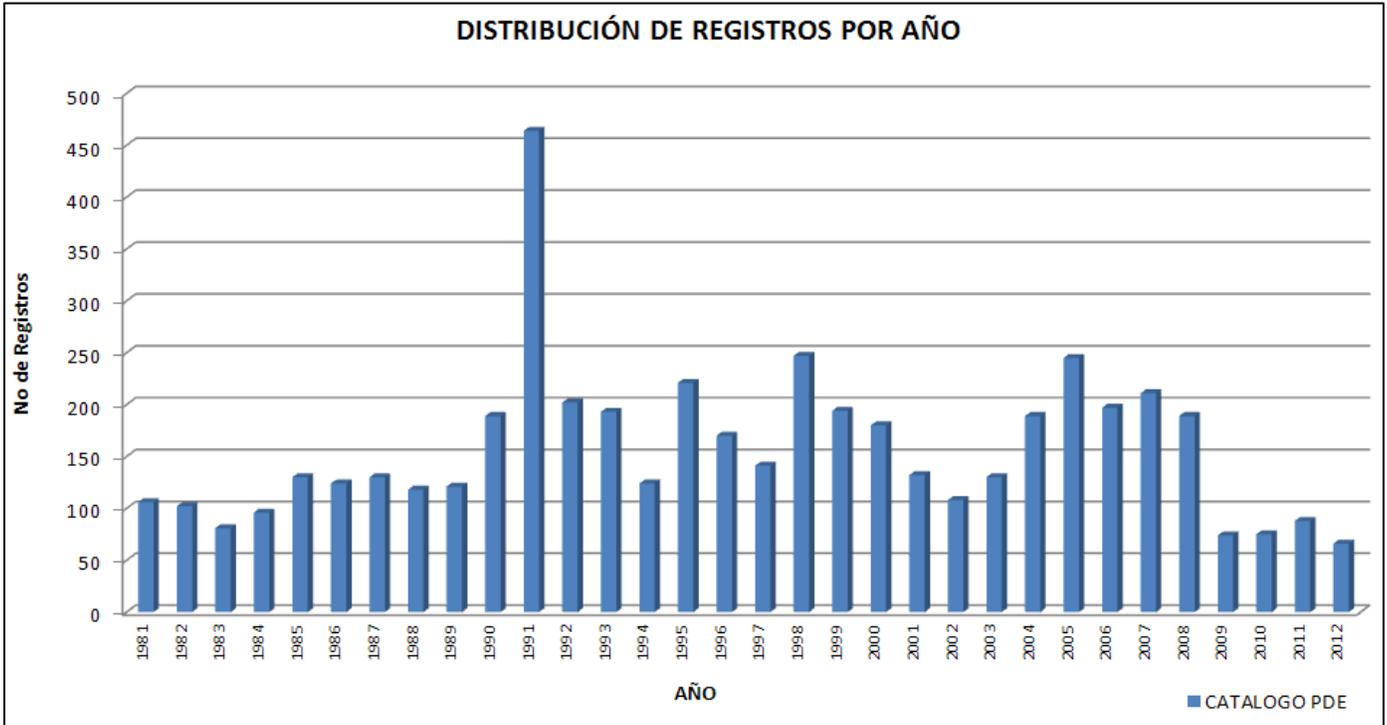


Tabla 5. Año VS Cantidad de Registros – Catalogo PDE

| CATALOGO PDE | | | |
|---------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|
| Año | Cantidad de Registros | Año | Cantidad de Registros |
| 1981 | 106 | 1997 | 141 |
| 1982 | 102 | 1998 | 247 |
| 1983 | 81 | 1999 | 194 |
| 1984 | 96 | 2000 | 180 |
| 1985 | 130 | 2001 | 132 |
| 1986 | 124 | 2002 | 108 |
| 1987 | 130 | 2003 | 130 |
| 1988 | 118 | 2004 | 189 |
| 1989 | 121 | 2005 | 245 |
| 1990 | 189 | 2006 | 197 |
| 1991 | 464 | 2007 | 211 |
| 1992 | 202 | 2008 | 189 |
| 1993 | 193 | 2009 | 74 |
| 1994 | 124 | 2010 | 75 |
| 1995 | 221 | 2011 | 88 |
| 1996 | 170 | 2012 | 66 |
| TOTAL DE REGISTROS | | 5037 | |

Gráfica 3. Año VS Cantidad de Registros – Catalogo PDE



En las Grafica 2 y Grafica 3 muestra un comportamiento constante de eventos por año exceptuando los años de 1979 1991 ya que se registrados 406 y 464 registros respectivamente. Esto debido a que Colombia se encuentra en:

- Zona de Subducción. Es la franja de convergencia de las placas Nazca y Suramérica frente al litoral Colombo-Ecuatoriano, cuya traza superficial corre unos 150 - 200 km paralela a la costa. Es la más importante de las fuentes sísmicas en Colombia, en términos de las magnitudes máximas y recurrencias de sismos grandes, con magnitudes mayores de 8,0. Su sismicidad es superficial, hasta profundidades de 40 km aproximadamente. Esta zona generó los sismos en el año 1979 entre magnitudes de 2 hasta 7.7 y en 1991 sismos con magnitudes entre 2 y 7.2.
- Zona de Wadatti-Benioff. Corresponde a la parte profunda del plano de fricción entre las placas que convergen, es decir, la continuación de la Zona de Subducción. En el SW de Colombia se distribuye entre el centro y norte del Valle del Cauca, SE de Chocó y parte de los territorios del Viejo Caldas, con eventos a profundidades entre 40 y 200 km. A esta zona corresponden, entre otros, el terremoto 23 de noviembre de 1979 (M=7,3)

Profundidad de un sismo

La profundidad de un sismo es la medida desde la superficie de la tierra en el punto llamado epicentro hasta el punto exacto donde se produjo el sismo, llamado hipocentro. Esta medida es muy importante para los sismólogos, pues con ella se pueden determinar las características del sismo y su comportamiento en la superficie. Los sismos se pueden categorizar como cortical (sismos de profundidad superficial menores a 70 km), intermedios (sismos cuya profundidad está entre los 70 y 180 km) y profundos (profundidades mayores a 180 km)

Tabla 6. Año VS Profundidad de Registros – Catalogo SISRA

| CATALOGO SISRA | | | | |
|----------------|-----------------------|------------------|-----|----------|
| Año | Cantidad de Registros | Profundidad (km) | | |
| | | Min | Max | Promedio |
| 1960 | 111 | 21 | 245 | 76 |
| 1961 | 83 | 16 | 221 | 77 |
| 1962 | 101 | 10 | 213 | 79 |
| 1963 | 155 | 8 | 270 | 77 |
| 1964 | 189 | 17 | 418 | 81 |
| 1965 | 188 | 4 | 266 | 91 |
| 1966 | 297 | 1 | 245 | 69 |
| 1967 | 281 | 3 | 221 | 79 |
| 1968 | 271 | 8 | 275 | 63 |
| 1969 | 179 | 16 | 240 | 67 |
| 1970 | 209 | 3 | 653 | 67 |
| 1971 | 150 | 1 | 224 | 73 |
| 1972 | 149 | 5 | 202 | 77 |
| 1973 | 208 | 10 | 192 | 82 |
| 1974 | 264 | 2 | 230 | 70 |
| 1975 | 177 | 1 | 286 | 84 |
| 1976 | 286 | 3 | 355 | 81 |
| 1977 | 155 | 2 | 480 | 90 |
| 1978 | 208 | 9 | 374 | 82 |
| 1979 | 406 | 3 | 329 | 103 |
| 1980 | 273 | 5 | 477 | 99 |

Gráfica 4. Año VS Profundidad de Registros – Catalogo SISRA

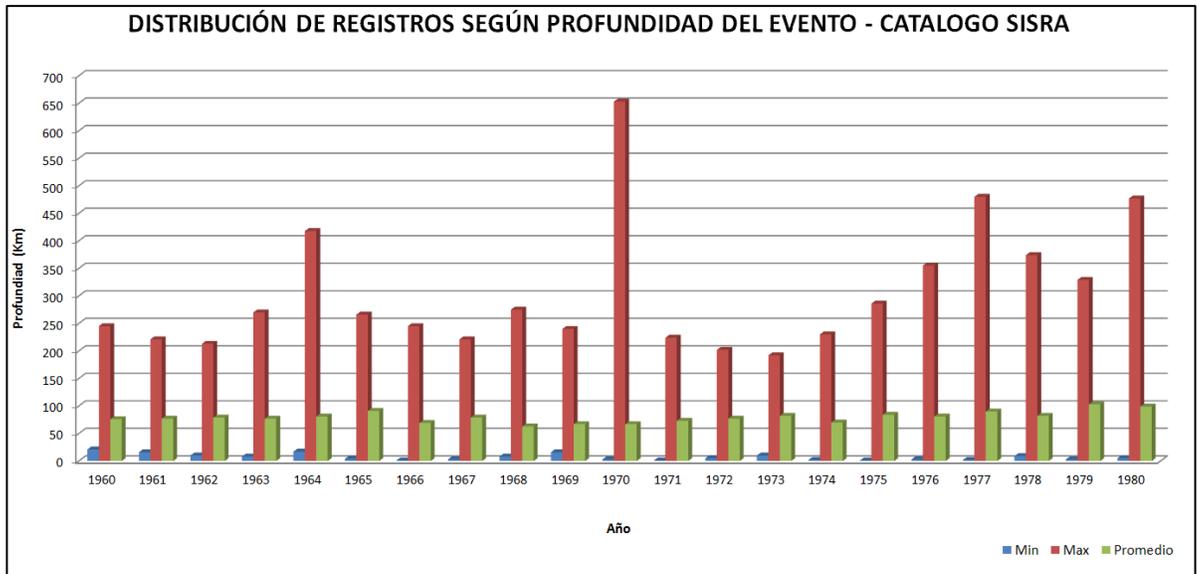
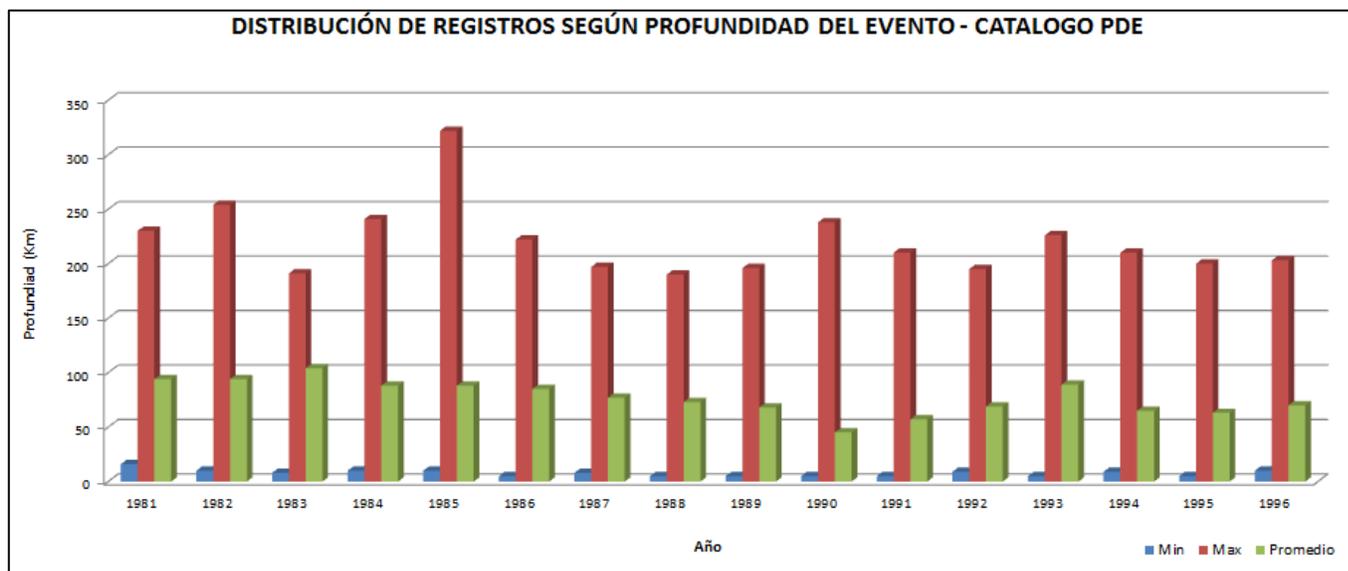


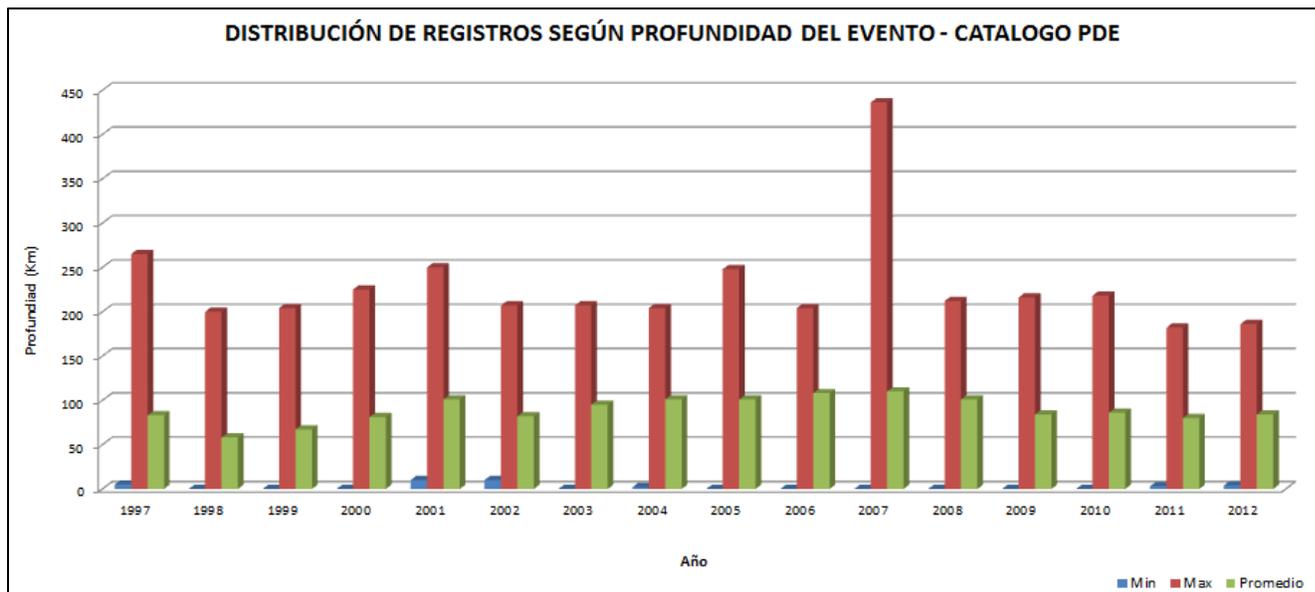
Tabla 7. Año VS Profundidad de Registros – Catalogo PDE

| CATALOGO PDE | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------|------------------|-----|----------|------|-----------------------|------------------|-----|----------|
| Año | Cantidad de Registros | Profundidad (km) | | | Año | Cantidad de Registros | Profundidad (km) | | |
| | | Min | Max | Promedio | | | Min | Max | Promedio |
| 1981 | 106 | 16 | 230 | 94 | 1997 | 141 | 5 | 265 | 83 |
| 1982 | 102 | 10 | 254 | 94 | 1998 | 247 | 0 | 200 | 58 |
| 1983 | 81 | 8 | 191 | 104 | 1999 | 194 | 0 | 204 | 67 |
| 1984 | 96 | 10 | 241 | 88 | 2000 | 180 | 0 | 225 | 81 |
| 1985 | 130 | 10 | 322 | 88 | 2001 | 132 | 10 | 250 | 101 |
| 1986 | 124 | 5 | 222 | 85 | 2002 | 108 | 10 | 207 | 82 |
| 1987 | 130 | 8 | 197 | 77 | 2003 | 130 | 0 | 207 | 95 |
| 1988 | 118 | 5 | 190 | 73 | 2004 | 189 | 2 | 204 | 101 |
| 1989 | 121 | 5 | 196 | 68 | 2005 | 245 | 0 | 248 | 101 |
| 1990 | 189 | 5 | 238 | 45 | 2006 | 197 | 0 | 204 | 108 |
| 1991 | 464 | 5 | 210 | 57 | 2007 | 211 | 0 | 436 | 110 |
| 1992 | 202 | 9 | 195 | 69 | 2008 | 189 | 0 | 212 | 101 |
| 1993 | 193 | 5 | 226 | 89 | 2009 | 74 | 0 | 216 | 84 |
| 1994 | 124 | 9 | 210 | 65 | 2010 | 75 | 0 | 218 | 86 |
| 1995 | 221 | 5 | 200 | 63 | 2011 | 88 | 3 | 182 | 80 |
| 1996 | 170 | 10 | 203 | 70 | 2012 | 66 | 4 | 186 | 84 |

Gráfica 5. Año VS Profundidad de Registros – Catalogo PDE (1981 – 1996)



Gráfica 6. Año VS Profundidad de Registros – Catalogo PDE (1997 - 2012)



- Sismos superficiales - Ocurren en los primeros 10 a 20 Km de profundidad - Se provocan por la extensión de la placa al enfriarse y ser empujada; y por el roce entre ambas placas, en el caso de las fallas transformantes. También hay sismos superficiales llamados corticales o intraplaca que ocurren cerca de la Cordillera y volcanes, debido a la compresión y extensión que sufren al encontrarse ambas placas
- Sismos intermedios - Ocurren aproximadamente entre los 30 y los 100 Km. de profundidad- . Están asociados a la subducción principalmente, y ocurren en el tramo en que la placa aún tiene propiedades rígidas.
- Sismos profundos - Ocurren más allá de los 100 -150 Km. de profundidad - Su origen está asociado, según se cree, a cambios de fases en las rocas de la placa oceánica. Debido a que a esas profundidades, la roca ya no tiene propiedades rígidas y no podría fracturarse.
- La mayoría de los sismos generados pueden considerarse como menores, por lo tanto a menor distancia podrían ocurrir mayores daños debido a que la energía acumulada en el sismo se eleva en menos tiempo

4. ECUACIONES DE ATENUACIÓN

Es la capacidad del terreno para amortiguar el movimiento generado por las ondas sísmicas conforme estas se alejan del foco sísmico. Cuando se produce un sismo, mientras más lejos se está del epicentro la intensidad del movimiento disminuye, a esto se denomina atenuación del movimiento del suelo, algo similar sucede mientras más grande sea la distancia hipocentral (sismos profundos), la amplitud del movimiento sísmico decaerá. La atenuación sísmica ha sido estudiada hace varios años, con inspección cualitativa de los registros sísmicos donde se apreciaba una disminución de amplitudes a mayores distancias de lo esperado.

Conocer este comportamiento permite estimar las amplitudes del movimiento del suelo para una distancia y una fuente sísmica conocidas, por lo que una ecuación de atenuación es empírica que relaciona *la Magnitud, Distancia e Intensidad Sísmica*, es decir, la relación *entre Aceleración, Velocidad y Desplazamiento*.

En general, los procedimientos utilizados para obtener las leyes de atenuación, consiste en ajustar curvas a los datos de movimientos sísmicos ocurridos en diferentes regiones, por lo que las expresiones así obtenidas reflejan las características geotectónicas de la región. Es mala práctica importar leyes de atenuación derivadas de otras regiones para realizar estudios de amenaza sísmica, además porque no es común obtener relaciones de atenuación donde dadas la magnitud y la distancia se obtengan los valores de A_{max} y V_{max} de manera conjunta, así como la correlación entre ellas.

En general, las leyes de atenuación sísmica se construyen para estimar A_{max} en función principalmente de la magnitud y distancia, lo que implica el cálculo de un conjunto de coeficientes a través de métodos de regresiones. En años recientes, se elaboró un proyecto denominado "Next Generation of Attenuation, NGA" para el occidente de los Estados Unidos. Como parte de este proyecto, varios autores estudiaron leyes de atenuación en términos de la velocidad (p.e. Boore y Atkinson, 2008; Campbell y Bozorgnia, 2008, Chiou y Youngs, 2008)

4.1. NUEVAS ECUACIONES DE ATENUACIÓN DE ONDA

4.1.1. Grupo Peer

The Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) es un estudio multi-institucional donde su centro educativo está ubicado en la Universidad de California, Berkeley. Los investigadores de más de 20 universidades y varias empresas de

consultoría contribuyen a los programas de investigación centrados en la ingeniería sísmica basada en disciplinas como la ingeniería estructural, geotécnica, geología, sismología, líneas de vida, transporte, gestión de riesgos y las políticas públicas.

La misión de PEER es desarrollar, validar y difundir tecnologías basadas en el rendimiento de diseño sísmico de edificios y la infraestructura para satisfacer las diversas necesidades económicas y de seguridad de la sociedad, además desarrolla herramientas de ingeniería y criterios que pueden ser utilizados por profesionales en ejercicio para alcanzar objetivos como la seguridad, el costo y la funcionalidad post-terremoto. La difusión de estas investigaciones se realiza con ayuda de la REVISTA EARTHQUAKE SPECTRA.

4.1.2. Nuevas Ecuaciones de Atenuación NGA

La revista Earthquake Spectra en el 2008 dedicó todo un volumen para tratar el tema de leyes de atenuación y espectros, en el que se recoge las investigaciones realizadas por:

- ✓ Pacific Gas & Electric Company (PG&E)
- ✓ California Department of Transportation (CALTRANS)
- ✓ Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)
- ✓ Earthquake Engineering Research Institute (PEER)
- ✓ Earthquake Engineering Research Institute (EERI)
- ✓ U.S. Geological Survey (USGS)
- ✓ Southern California Earthquake Center.

Uno de los artículos más importantes, sobre leyes de atenuación que trae esta revista es el de Campbell y Bozorgnia (2008) que sirve para obtener espectros de amenaza sísmica uniforme. Dentro de los métodos empíricos, existen dos caminos para obtener una ley de atenuación, la primera trabajando con información macrosísmica y la segunda utilizando registros sísmico

Como se mencionó anteriormente las curvas de atenuación representan la relación entre los efectos de un terremoto en un sitio con respecto a la magnitud del sismo y la distancia epicentral. Los efectos del terremoto son cuantificados por medio de los parámetros del movimiento del terreno. Estas relaciones se desarrollan mediante estadísticas realizadas a un gran número de registros, obtenidos en regiones con diferentes características geológicas. Para esta fase, se usan algoritmos desarrollados en el proyecto NGA (Next Generation Attenuation Models) del grupo PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) que, además de los factores característicos de un sismo, como magnitud, distancia y mecanismo de falla, tienen en cuenta los efectos locales de sitio, en base al valor de la V_{s30} .

Los modelos NGA constituyen un avance importante en la predicción de movimientos de tierra, estos han sido posibles por la actualización extensa de la base de datos de movimientos fuertes, de PEER.

Las leyes de atenuación que se estudiarán en este trabajo de grado son las trabajadas por los siguientes autores:

- Abrahamson & Silva (2008)
- Campbell & Bozorgnia (2008)
- Chiou & Youngs (2008)
- Idriss (2008)
- Boore & Akinson (2008)

4.1.2.1. Modelo Abrahamson & Silva (2008)

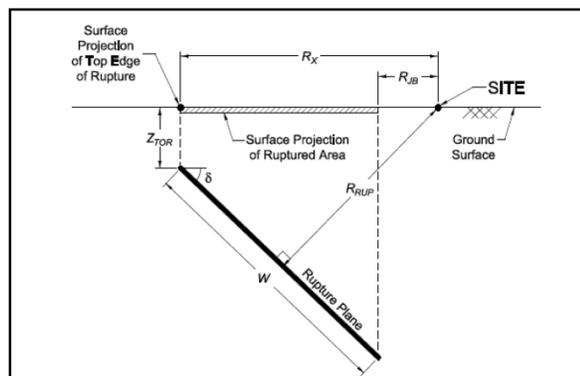
Específicamente este modelo empírico se aplica en sismos que tengan magnitud de 5 a 8,5, distancias entre 0 Km a 200 Km y periodos espectrales de 0-10 s. El sitio se parametriza con la velocidad de corte a 30 m de profundidad (V_{S30}) y la profundidad de la roca, a una V_s de 1000 m/s.

$$\ln Sa(g) = f_1(M, R_{rup}) + a_{12}F_{RV} + a_{13}F_{NM} + a_{15}F_{AS} + f_5(P\hat{G}A_{1100}, V_{S30}) + F_{HW}f_A(R_{jb}, R_{rup}, R_x, W, \delta, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) + f_8(R_{rup}, M) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{S30})$$

- Análisis de la ecuación Abrahamson & Silva (AS08)

$f_1 M$, es una función que depende de la magnitud y la distancia del sismo.

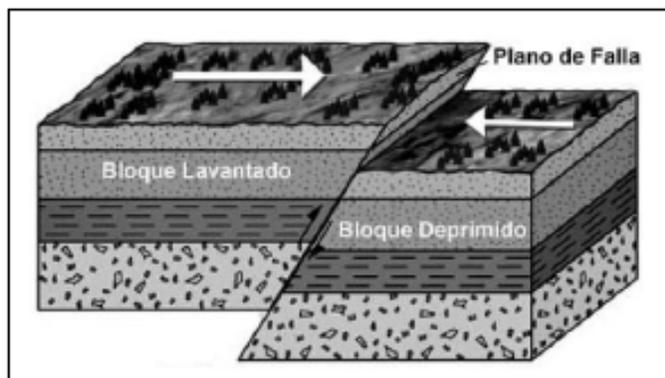
Figura 3. Variables que intervienen en el modelo (AS08)



Las variables que intervienen en el cálculo están descritas en la Figura 3 y son:

- R_{jb} que es la distancia mínima horizontal a la superficie de la proyección de ruptura en km.
- R_{rup} que es la distancia más cercana al plano de ruptura en km.
- R_x es la distancia horizontal desde el borde de la ruptura al sitio de interés.
- Z_{TOR} es la profundidad desde el borde de la ruptura.
- W es la longitud inclinada del ancho de la ruptura.
- M es el Momento de magnitud.
- F_{RV} Variable indicadora que representa fallas inversas e inversas oblicuas
- F_{NM} Variable indicadora para fallas normales y normales oblicuas con ángulo Rake entre -150° y -30° . Si es cualquiera de las dos fallas vale 1.
- F_{AS} Indicador de una réplica o del evento sísmico principal. Si es réplica vale 1 caso contrario vale 0.
- (PGA_{1100}, V_{s30}) es la aceleración máxima del suelo con $V_{s30}=1100m/s$; V_{s30} es la velocidad media de la onda de corte en los primeros 30 metros de profundidad del sitio de interés y expresada en m/s.
- $f_4 (R_{jb}, T_{OR}, M)$ Es una función que toma en cuenta el efecto de *Hanging Wall*.
Hanging Wall es: Bloque levantado, Bloque alzado o Bloque Colgante. Corresponde a la ladera que está por encima de una falla inclinada. En contraste se tiene lo que se denomina Footwall.
Footwall cuya traducción es Bloque deprimido, Bloque Yacente o Bloque Hundido y corresponde a la ladera por debajo de la falla inclinada. En la Figura 4 se ilustran estos dos bloques y habrá que ver la ubicación del sitio de interés si se encuentra en bloque levantado.

Figura 4. Bloque levantado o deprimido. (Yeats et al., 1997)



$f_6 (Z_{TOR})$ Factor que toma en cuenta la profundidad desde el borde hasta la cima.

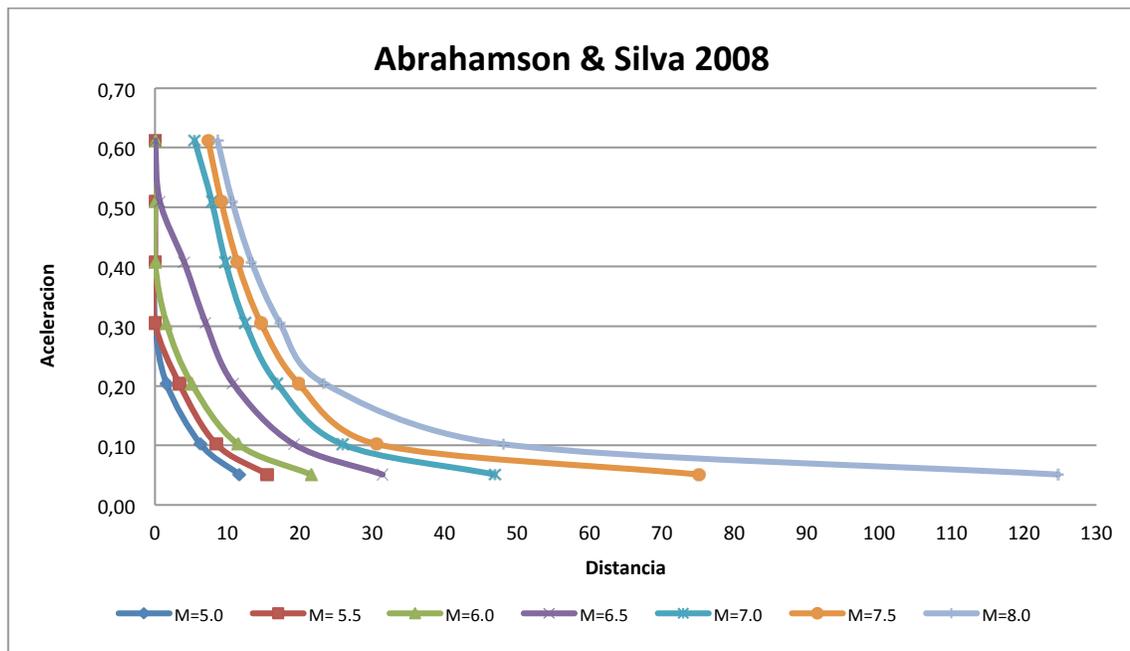
- $f_8 R_{rup}$, es una función de escalamiento, para grandes distancias al lugar de ubicación de la falla.
- $f_{10}(Z_{1.0}, V_{s30})$. Es un factor que toma en cuenta el tipo de suelo del sitio de interés.

Donde $Z_{1.0}$ es la profundidad en la cual se tiene una velocidad de onda de corte de $V_S=1000$ m/s.

V_{s30} es la velocidad media en los primeros 30 m., de profundidad.

En la siguiente grafica presenta el comportamiento de la aceleración vs distancia a diferentes magnitudes de la ecuación propuesta por Abrahamson & Silva

Gráfica 7. Comportamiento de la aceleración vs distancia a diferentes magnitudes de la ecuación propuesta por Abrahamson & Silva (2008).



En la Gráfica 7 se puede apreciar que a mayor magnitud del evento más distancia recorre la onda ya que a M= 8 recorre una distancia aproximada de 125 km viéndose una notoria diferencia con un evento de magnitud 7.5 ya que la distancia recorrida es de 78 km aproximadamente.

4.1.2.2. Modelo de Campbell & Bozorgnia (2008)

El modelo generado por Campbell y Bozorgnia (2008), fue desarrollado como parte del proyecto Next Generation Attenuation of Ground Motion (NGA) del Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Su generación se fundamentó en una base de datos a nivel mundial de registro de movimientos fuertes. Su validez se limita a ambientes con sismicidad somera en régimen de tectónica activa

Los parámetros involucrados en la descripción del modelo son:

- M = Magnitud de momento
- R_{RUP} = Distancia más cercana al plano de ruptura (km)
- R_{JB} = Distancia Joyner-Boore (km)
- F_{HW} = Factor de hanging-wall: 1 para $R_{JB} \geq 0$ y $R_{JB} < 0$
- δ = Angulo de buzamiento de la falla
- Z_{TOR} = Profundidad del tope del plano de ruptura (km)
- F_{RV} = Factor de fallamiento inverso
- F_{NM} = Factor de fallamiento inverso
- F_{AS} = Factor de réplicas: 1 para las réplicas y 0 para las otras
- V_{S30} = Velocidad promedio a una profundidad de 30 m (m/s)
- Z_n = Profundidad en la cual la velocidad de la onda alcanza n km/s (m)
- C_n = Valores de constantes predeterminadas

- Limitaciones del Modelo

La validez del modelo contempla límites en los valores que toman las variables predictivas, estos límites los encontramos Tabla 8 Frau (2009)

Tabla 8. Valores límites de las variables predictivas en el modelo de Campbell y Bozorgnia

| VARIABLE PREDICTIVA | LÍMITE DE APLICACIÓN | OBSERVACIONES |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Magnitud | 4.0 a 8.5 | Fallas transcurrentes |
| | 4.0 a 8.0 | Fallas Inversas |
| | 4.0 a 7.5 | Fallas Normales |
| Distancia al plano de ruptura | 0 a 200 km | R_{rup} o r_{rup} |
| Velocidad de onda de Corte | 180 a 1500 m/s | V_{s30} |
| Profundidad al techo de la ruptura | 0 a 20 km | Z_{TOR} |
| Profundidad horizonte a la roca | 0 a 6 km | $Z_{2.5}$ |
| Inclinación al plano de falla | 15° a 90° | δ |

En términos prácticos las ecuaciones CB08 no son uniformemente válidas para todo el rango propuesto, estadísticamente se incrementan los errores al alejarse de los valores promedios. (Campbell, 2004)

- Análisis de la Ecuación CB08

La ecuación está dada por la siguiente forma

$$\ln Y = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed}$$

Donde f_{mag} es el término en el cual se relaciona a la magnitud, su valor depende del rango de magnitud a ser analizado, así se tiene entonces:

$$f(mag) = \begin{cases} c_0 + c_1 M; & M \leq 5.5 \\ c_0 + c_1 M + c_2(M - 5.5); & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_0 + c_1 M + c_2(M - 5.5) + c_3(M - 6.5); & M > 6.5 \end{cases}$$

El término que depende de la distancia está dado por f_{dist}

$$f_{dis} = (c_4 + c_5 M) \ln \left(\sqrt{R_{RUP}^2 + C_6^2} \right)$$

El término que relaciona el estilo de falla está dado por

$$f_{flt} = c_7 F_{RV} f_{flt,z} + c_8 F_{NM}$$

$$f_{flt,z} = \begin{cases} Z_{TOR}; & Z_{TOR} < 1 \\ 1; & Z_{TOR} \geq 1 \end{cases}$$

Dónde:

$$F_{RV} = 1 \quad \text{si } 30^\circ < \tau < 150^\circ$$

$$F_{RV} = 0 \quad \text{otros valores de } \tau \text{ y}$$

$$F_{MN} = 1 \quad \text{si } -150^\circ < \tau < -30^\circ$$

$$F_{MN} = 0 \quad \text{otros valores de } \tau$$

El factor relacionado con la magnitud esta dado por:

$$f(hng, M) = \begin{cases} 0; & M \leq 6.0 \\ 2(M - 6.0); & 6.0 < M < 6.5 \\ 1; & M \geq 6.5 \end{cases}$$

La profundidad de ruptura esta dada por la siguiente relacion:

$$f(hng, Z) = \begin{cases} 0; & Z_{TOR} \geq 20 \\ \frac{(20 - Z_{TOR})}{20}; & 0 \leq Z_{TOR} < 20 \end{cases}$$

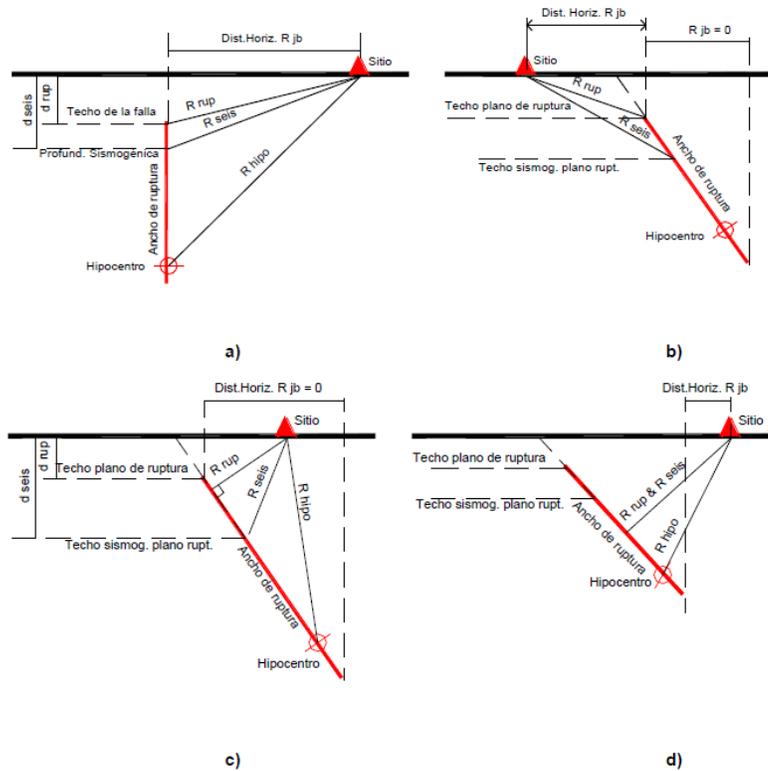
El factor relacionado con el promedio del ángulo de ruptura es:

$$f_{hng, \delta} = \begin{cases} 1, & \delta \leq 70 \\ \frac{(90 - \delta)}{20}, & \delta > 70 \end{cases}$$

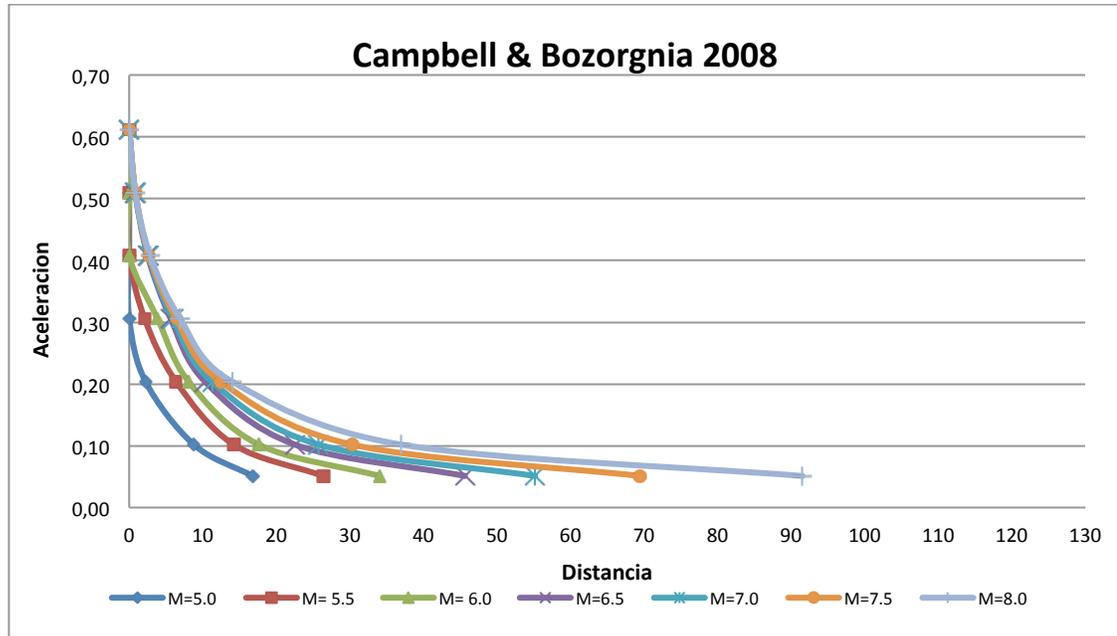
En la Figura 5 se ha denominado *drup* a la variable Z_{TOR} . El δ es el ángulo de inclinación o buzamiento medio del plano de ruptura en grados. Finalmente las distancias consideradas en la Figura 5 son las siguientes:

- Sitio próximo a falla con inclinación de 90° (plano de falla vertical)
- Sitio ubicado en el foot-wall de falla inversa
- Sitio sobre la proyección del plano de falla
- Sitio en el *hanging-wall* de falla inversa y fuera de la proyección del plano de falla.

Figura 5. Medidas de distancia a la fuente finita más frecuentemente usadas en relaciones de atenuación



Gráfica 8. Comportamiento de la aceleración vs distancia a diferentes magnitudes de la ecuación propuesta por Campbell y Bozorgnia (2008).



4.1.2.3. Modelo Chiou & Youngs (2008)

Este modelo empírico válido es para movimientos sísmicos en regiones tectónicas activas. Esta relación provee aceleraciones pico, velocidad pico y 5% de amortiguamiento para periodos espectrales de 0.01 a 10 segundos. La magnitud debe estar comprendida entre 5 y 8,5 para sismos generados en fallas transcurrentes. La V_{s30} debe estar comprendida entre 150 m/s y 1500 m/s y la distancia a la zona de ruptura debe ser menor a 200 kilómetros (PEER, 2009).

Los autores proponen un modelo que involucra los valores promedios de las componentes horizontales de las respuestas espectrales para ambientes tectónicos activos con fuentes de generación superficiales.

El modelo es una actualización de las relaciones desarrolladas por Sadihg et al. (1997), usando los coeficientes de atenuación inelástica, analiza las relaciones de aceleraciones pico, velocidades pico y las respuestas pseudo-espectrales de aceleración con un 5% de amortiguamiento para periodos comprendidos entre 0.01 y 10 s, incluye mejoras en los términos de distancia, magnitudes y los efectos causados por la geometría de la falla (Chiou et al., 2008)

- Limitaciones del Modelo

Las limitaciones bajo las cuales se encuentra esta relación son (Chiou et al, 2008)

1. Magnitud 4.0 a 8.5 para fallas de rumbo
2. Magnitud 4.0 a 8.0 para fallas inversas y normales
3. $R_{RUP} = 0 - 200$ km
4. $V_{S30} = 150 - 1500$ m/s
5. La profundidad promedio del epicentro recomendada es 20 km

- Análisis de la Ecuación

La ecuación del modelo de Chiou & Youngs está planteada de la siguiente manera:

$$\ln(y) = C_2(T) \times M + C_3(T) * (m_c - M)^n$$

Dónde:

- Los coeficientes C_3 y C_2 varían con el periodo espectral T .
- El exponencial n está en el rango de 2 a 3.
- El coeficiente m_c es independiente a T .

Los parámetros involucrados en la descripción del modelo son:

M = Magnitud de momento

R_{RUP} = Distancia más cercana al plano de ruptura (km)

R_{JB} = Distancia Joyner-Boore (km)

F_{HW} = Factor de hanging-wall: 1 para $R_{JB} \geq 0$ y $R_{JB} < 0$

δ = Angulo de buzamiento de la falla

Z_{TOR} = Profundidad del tope del plano de ruptura (km)

F_{RV} = Factor de fallamiento inverso

F_{NM} = Factor de fallamiento inverso

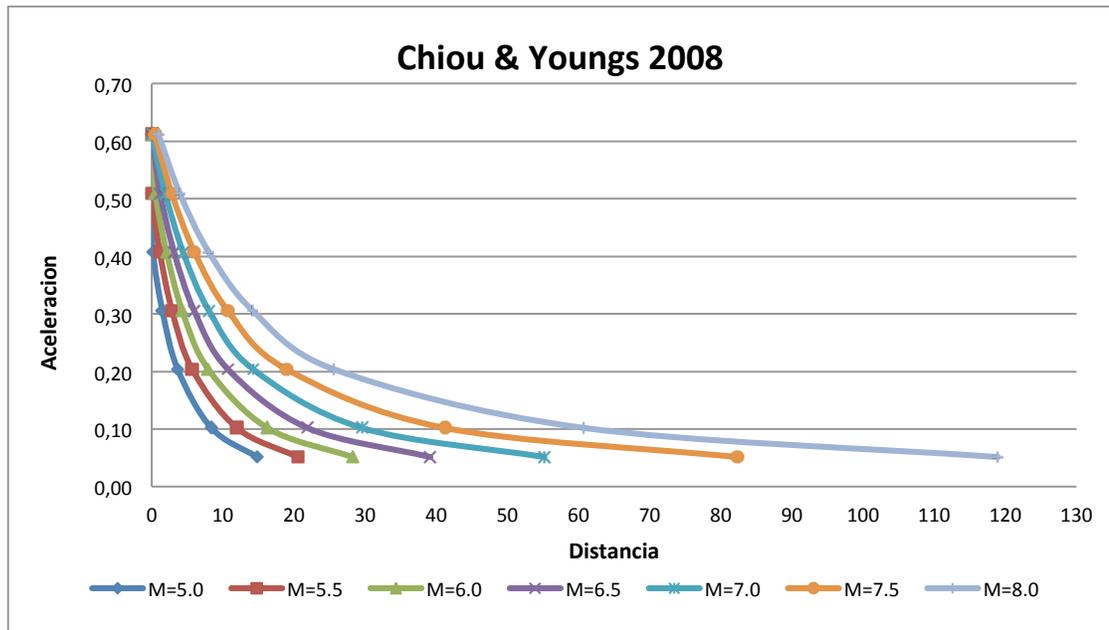
F_{AS} = Factor de réplicas: 1 para las réplicas y 0 para las otras

V_{S30} = Velocidad promedio a una profundidad de 30 m (m/s)

Z_n = Profundidad en la cual la velocidad de la onda alcanza n km/s (m)

C_n = Valores de constantes predeterminadas

Gráfica 9. Comportamiento de la aceleración vs distancia a diferentes magnitudes de la ecuación propuesta por Chiou & Youngs (2008).



Modelo Idriss (2008)

Este modelo empírico, actualizado en el 2007, se basa en estimar la aceleración pico horizontal promedio (PGA) y los valores horizontales promedios de la pseudo-absoluta aceleración para períodos de 0,02; 0,03; 0,04; 0,2; 1 y 3 s. El objetivo de estas curvas NGA es derivar estos estimados para períodos de 0,01 a 0 s. Este modelo toma en cuenta Vs30 en el rango de 450-900 m/s y profundidades en roca. Este modelo empírico utilizado en roca se basa en la aceleración pico promedio y valores medios horizontales para períodos espectrales de 0.01 a 10 segundos. La Vs30 debe estar comprendida entre 450 a 900 m/s (PEER, 2009).

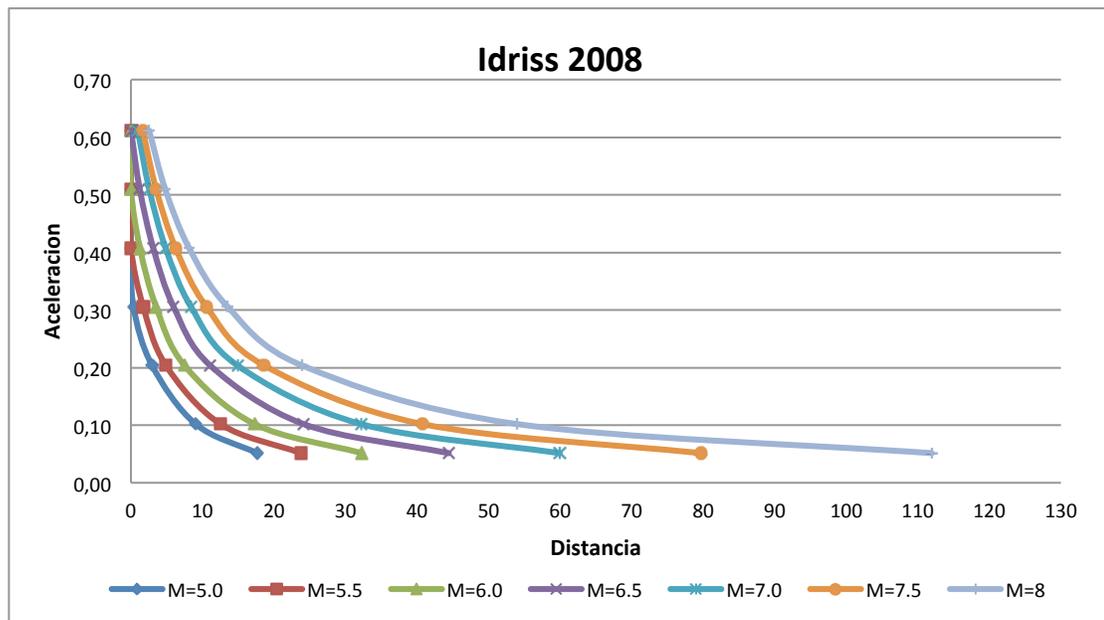
La fórmula adoptada para el estudio de la estimación de los valores medios de aceleración espectral

$$\ln[PAA(T)] = \alpha_1(T) + \alpha_2(T)M - [\beta_1(T) + \beta_2(T)M] \ln(R_{rup} + 10) + \gamma(T)R_{rup} + \varphi(T)F$$

Las variables incluidas en la ecuación anterior son para definir la pseudo aceleración para un periodo T, cuyas variables son:

- M = Magnitud de momento
- R_{RUP} = Distancia más cercana al plano de ruptura (km)
- $\gamma(T)$ = Factor de ajuste de la distancia en función (T)
- $\varphi(T)$ = Factor mecanismo de origen (o tipo de fallas)
- F = Se refiere al mecanismo de falla asignado.
- $\alpha_n(T), \beta_n(T)$ = Parámetros obtenidos de un proceso de regresión.

Gráfica 10. Comportamiento de la aceleración vs distancia a diferentes magnitudes de la ecuación propuesta por Idriss (2008).



Boore & Atkinson (2008)

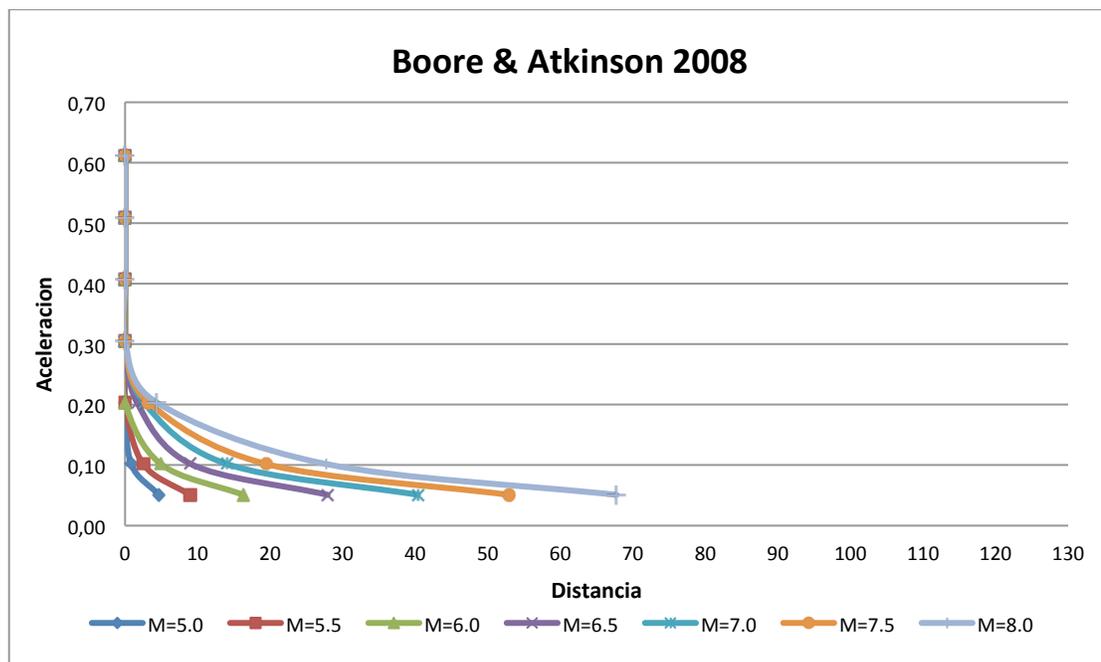
Estas ecuaciones fueron desarrolladas por un análisis de regresión del conjunto de datos PEER-NGA, que contiene datos recopilados por terremotos fuertes someros en regiones tectónicamente activas en todo el mundo. Los datos de movimientos fuertes son relativamente escasos para eventos con magnitud < 5,5. El estudio por separado de las relaciones de movimientos de suelo que ocurren en las zonas de subducción es importante debido a la alta actividad.

$$\ln Y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \varepsilon\sigma_T,$$

Dónde:

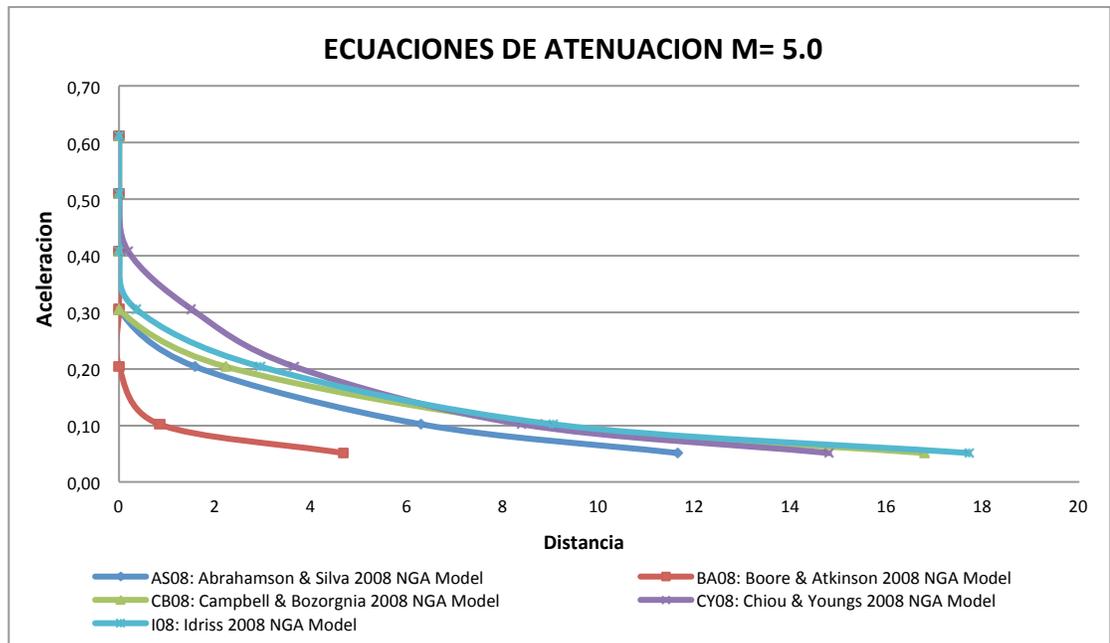
- FM, FD, y FS representan la escala de magnitud, función de distancia, y amplificación sitio, respectivamente.
- M = Magnitud de momento
- R_{JB} = Distancia Joyner-Boore (km) definida como la distancia más cercana a la proyección de la superficie de la falla.
- V_{S30} = Velocidad promedio a una profundidad de 30 m (m/s)
- $\epsilon\sigma_T$ = es el número de desviación estándar dependiendo del periodo

Gráfica 11. Comportamiento de la aceleración vs distancia a diferentes magnitudes de la ecuación propuesta por Boore & Atkinson (2008).

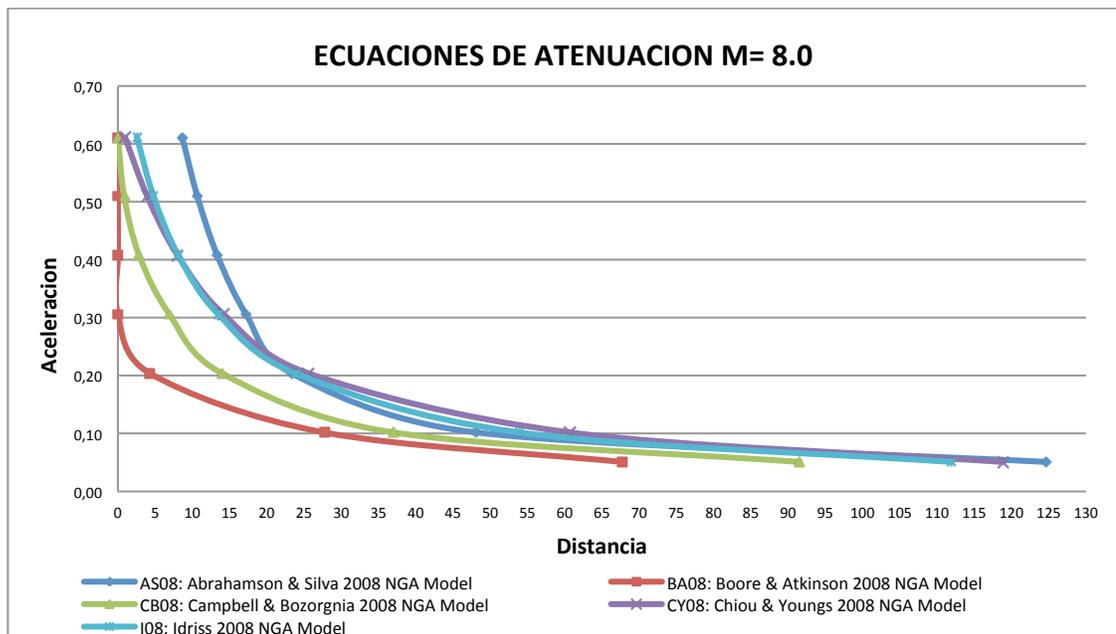


Finalmente a modo comparativo entre las Gráfica 12 y Gráfica 13 se presenta en una misma grafica diferentes relaciones de atenuación para algunas magnitudes, donde se pueden observar con mayor claridad las diferencias entre las mismas

Gráfica 12. Comparación de ecuaciones de atenuación para M= 5.0.



Gráfica 13. Comparación de ecuaciones de atenuación para M= 8.0.



- Los resultados de atenuación obtenidos por Chiou & Youngs (2008) e Idris (2008), presentan una tendencia muy similar en cuanto a curvas de tendencia de atenuación para una misma magnitud de sismo.
- Comparando las curvas de atenuación de los diferentes autores para una misma magnitud de sismo, se observan grandes diferencias en cuanto a valores de aceleración en los primeros 10Kms de distancia a partir del epicentro. Los resultados obtenidos por el Modelo Boore & Atkinson (2008) se alejan bastante de los otros modelos. Como se puede observar en la Gráfica 12.
- Se presenta mayor atenuación sísmica en los modelos presentados por Campbell & Bozorgnia (2008) e Idriss (2008), a medida que aumenta la magnitud del sismo. Por el contrario, el modelo de Boore & Atkinson (2008) presenta una mayor disipación de energía para cortas distancias, esto implica que este modelo tiene una tendencia menos conservadora.
- Analizando las curvas para una magnitud dada, para los primeros kilómetros de distancia desde el epicentro, la disminución de la aceleración se presenta de forma lineal hasta un punto donde empieza a disminuir de forma potencial. Este comportamiento es más evidente en el modelo obtenido por Abrahamson & Silva (2008)
- En todos los modelos se puede observar que a medida que la magnitud del sismo aumenta su atenuación será mayor, esto debido a que va a presentar una mayor duración y propagación de la onda ya que se presenta una disminución de la aceleración con respecto a la distancia.
- Si bien todos los autores muestran como es la tendencia de las curvas de atenuación para una magnitud de sismo específica, todas estas curvas pueden ser calibradas si se cuenta con un mayor número de datos sísmicos.
- Comparando las curvas de los diferentes autores para una misma magnitud, se observa que para los sismos hasta magnitud 6.5 el pico máximo de aceleración se presenta en el epicentro; a partir de dicha magnitud según los modelos de Abrahamson & Silva (2008) e Idriss (2008), el pico máximo de aceleración se presenta a una distancia corta del epicentro pero no exactamente en este punto.
- El Método de Abrahamson & Silva (2008) trabaja con una base de datos que incluye premonitores, réplicas y sismos principales; mientras que el Método de Campbell & Bozorgnia (2008) solo trabaja con sismos principales, siendo más confiable emplear el primer método.

En general los aspectos importantes que estos autores tuvieron en cuenta para desarrollar los modelos de atenuación de onda son:

a) Magnitud

Parámetro introducido por Richter (1935) que indica el tamaño y la energía liberada por el terremoto en forma de ondas sísmicas. La escala de magnitud no tiene límites, aunque no se han observado terremotos de magnitud superiores a nueve grados (Sarria, 2004). Se han generado varios tipos de relaciones para determinar la magnitud, una de las más utilizadas es la magnitud de momento.

- Magnitud Momento (M_w) es la cantidad de energía liberada por un sismo a partir del Momento Sísmico, el cual define así (Hanks y Kanamori, 1979)

$$MO = \mu * D * A$$

MO es el momento sísmico (dinas/cm)

μ es el módulo de deformación (dinas/cm²)

D es el desplazamiento promedio de la falla (cm)

A es el área del segmento que sufrió la ruptura (cm²)

La nueva escala de magnitud, denominada magnitud momento fue desarrollada por Hanks y Kanamori (1979) cuya expresión es

$$M_w = \frac{2}{3} \log MO - 10.7$$

Las magnitudes de los sismos grandes fueron recalculadas usando esta nueva escala ya que se basa en el momento sísmico lo cual no se satura (Kanamori et al. 1974)

b) Distancia Fuente – Sitio

Es el parámetro utilizado para caracterizar la disminución del movimiento del suelo en términos de atenuación geométrica e inelástica. Las medidas de distancia se pueden agrupar en dos grandes categorías, dependiendo de si tratan al terremoto como una fuente puntual o una fuente finita.

La distancia fuente-sitio se puede medir también con el uso de las distancias epicentrales y las distancias hipocentrales. El hipocentro es el punto donde se originó el sismo, es el sitio de mayor liberación de energía. El epicentro es la proyección del hipocentro en la

superficie terrestre, por lo tanto, el lugar donde el sismo se siente con mayor intensidad corresponde al punto en la superficie de la tierra ubicado directamente sobre el hipocentro. Se diferencia mejor estas dos medidas en el caso de sismos pequeños donde se les puede considerar como puntos, para sismos grandes en cambio las zonas de ruptura son muy grandes y es necesario definirlos como fuentes finitas. La distancia epicentral y la hipocentral se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$r_{hypo} = \sqrt{r_{epi}^2 + h_{hypo}^2}$$

Donde h_{hypo} es la profundidad hipocentral, las distancia r_{epi} y r_{hypo} aparecen como parámetros de regresión en algunas relaciones de atenuación que toman en cuenta el incremento del movimiento del suelo con la profundidad.

c) Efectos de Sitio

Las condiciones locales del sitio describen el tipo de depósitos que se encuentran bajo el sitio receptor, se describen en términos de las características geológicas de la superficie o cerca de la ella, la velocidad de las ondas de corte y la profundidad del sedimento. Tanto la velocidad como la profundidad del suelo representan cantidades físicas que están relacionadas con la respuesta dinámica de los depósitos geológicos. Tradicionalmente, las condiciones locales del sitio se han clasificado como suelo o roca, pero el grupo PEER han demostrado la importancia de un sistema de clasificación más refinada del sitio en la predicción del movimiento cercano a la fuente

En la siguiente tabla presenta la clasificación de los suelos de las velocidades promedios V_{30} obtenidas a partir de estudios realizados por el NEHRP, (Programa Nacional de Reducción de la Amenaza Sísmica – USA) y que son utilizadas en la generación de las GMPE's

Tabla 9. Valores de V_{30} para diferentes tipos de terrenos (Programa Nacional de Reducción de la Amenaza Sísmica - USA, NEHRP, 1993)

| PERFIL DE SUELO | V_{30} (m/s) |
|------------------------------|----------------|
| Roca Dura | ≥ 1500 |
| Roca | 760 – 1500 |
| Suelos densos o rocas suaves | 350 – 760 |
| Suelos duros | 180 – 360 |
| Suelos Suaves | < 180 |

Es importante conocer el efecto que sobre el suelo tienen los sismos y que puede ser representado por la aceleración, velocidad o desplazamiento del suelo o comúnmente por la intensidad sentida en dicha zona. Los efectos de sitio por el movimiento del suelo se consideran que son el factor más importante en la zonificación de los movimientos del suelo, ya que estos son primordiales para el análisis del riesgo sísmico. Ya que uno de los mayores problemas en la ingeniería geotécnica es el riesgo de encontrarse con condiciones geológicas inesperadas. Por tanto si no se tiene un adecuado conocimiento del sitio a estudiar puede ocasionar errores en la interpretación geológica de la zona (Bard, 1999).

d) Efectos de Capas Superficiales Blandas

Estudios realizados han demostrado que este efecto es la causa de los principales daños por la ocurrencia de terremotos, donde éstos son más fuertes en zonas donde los sedimentos superficiales se encuentran a grandes profundidades que sobre zonas donde el basamento rocoso aflora o se encuentra muy cercano a la superficie. Esto es de vital importancia, sobre todo en aquellas localidades, ubicadas a lo largo de valles atravesados por ríos, lo que implica que están construidos sobre depósitos superficiales y poco consolidados.

e) Efectos de Topografía

La influencia de la topografía ha sido tomando en cuenta en muchos reportes de terremotos ya que esta influye en la intensidad del movimiento sísmico y puede mostrar un efecto amplificador o atenuador. Los estudios realizados indican que ciertas formas topográficas, especialmente laderas de diferentes pendiente y valles muestran varios grados de amplificación.

En el artículo “Comparisons of the NGA Ground-Motion Relations” escrito por Abrahamson et al realiza una comparación entre los 5 modelos de atenuación de onda donde concluye lo siguiente:

- Aunque todos los desarrolladores NGA comenzaron con la misma base de datos de 3.551 registros de 173 sismos, los datos seleccionados para desarrollar los modelos tienen diferencias importantes.
- El ASO08 y CY08 manejan un conjunto de datos que incluyen réplicas, resultando un número mucho mayor de sismos de los que establece BA08 y CB08.

- Los datos I08 incluye réplicas, pero este modelo tiene el número más pequeño de grabaciones porque sólo incluye sitios de roca ($450 \text{ m/s} < V_{S30} < 900 \text{ m/s}$). El número de sismos y registros seleccionadas por cada uno de los autores se resumen en la Tabla 10

Tabla 10. Numero de terremotos y grabaciones seleccionados por cada autor

| | AS08 | BA08 | CB08 | CY08 | I08 |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Número de Sismos | 135 | 58 | 64 | 125 | 72 |
| Número de Registros | 2754 | 1574 | 1561 | 1950 | 942 |

- Tres modelos (AS08, CB08 y CY08), incluyen los efectos de la profundidad de suelo/sedimento a diferencia del modelo (BA08) que no incluye este efecto.
- Los modelos (AS08, CY08 y I08) tienen desviaciones que dependen de la magnitud, mientras que los modelos (BA08, y CB08) tienen desviaciones estándar no dependiente de la magnitud.
- Los modelos AS08, CB08, and CY08 tiene la parametrización más completa, estos modelos incluyen parámetros adicionales como parte del modelo es decir tienen en cuenta ruptura-profundidad y el efecto de suelo/sedimentos con la profundidad.
- Los cinco modelos son basados en la magnitud del momento e incluyen los factores de fallamiento, pero el modelo I08 no diferencia el tipo de deslizamiento.
- Todos los modelos excepto I08 usan el valor promedio de la velocidad de onda de corte por encima de los 30 m, V_{S30} ya que es un parámetro primario del sitio.
- El delimitar a ciertas características grupos de datos con la finalidad de restringir la variabilidad de coeficientes en función de principios sismológicos como: datos de campo cercano, mecanismos focales, efectos de sitio (roca o suelo blando), etc (García, 2006)

5. DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE AMENAZA POR REGIONES PARA CADA ECUACIÓN DE ATENUACIÓN

5.1. LEYES DE RECURRENCIA POR REGIONES SISMOGÉNICAS. (GUTENBERG-RICHTER)

El máximo sismo potencial es el mayor que puede esperarse en una estructura o zona y para determinarlo debe conocerse el máximo ocurrido en el pasado. Esto es problemático, porque muchas veces el tiempo del registro histórico es más corto que el intervalo de recurrencia de ese terremoto, y puede no haber sido recogido en los catálogos. Por ello, son importantes los estudios de paleosismicidad¹ en las principales estructuras activas, que permiten conocer los movimientos bruscos que han sido producidos por terremotos en intervalos de miles de años, y determinar a partir de ahí las magnitudes asociadas. (Villamor y Berryman, 1999). En la práctica, cuando no se tiene suficiente información geológica, el máximo sismo potencial se estima mayorando ligeramente el máximo histórico, aumentando un grado la intensidad o medio grado su magnitud; aunque esta mayoración depende del potencial sísmico de la zona.

Estos terremotos máximos no son los únicos que tienen lugar dentro de cada estructura o zona; en un amplio intervalo de tiempo se detectan en ellas terremotos de diferentes tamaños o magnitudes, dentro de un cierto rango. Los terremotos más pequeños son siempre más frecuentes que los grandes, y la frecuencia de ocurrencia de los sismos menores tiende a ser relativa a la de los mayores. Por ello, el gráfico que muestra el número de terremotos frente a su tamaño, tiende a tener una forma fija. Basándose en este hecho Gutenberg y Richter (1944) postularon, en base a la estadística de leyes de recurrencia, que la relación entre $\log N$ y M debía ser lineal; donde M es la magnitud y N el número de sismos con magnitud mayor que M . Se definió así la ley de Gutenberg-Richter, que representa la frecuencia de ocurrencia de sismos en la zona, frente a su magnitud.

$$\log N = a - b \cdot M$$

El parámetro b es la pendiente de la relación, que representa la proporción entre el número de sismos grandes y pequeños en la zona; y a es la ordenada en el origen, a partir de la cual se puede estimar la tasa anual de terremotos que superan una magnitud o intensidad de referencia. Esta ley es adoptada generalmente para definir la recurrencia de sismos de una zona y su correcta estimación, requiere disponer de observaciones en

¹ Paleosismicidad: Se trata de buscar evidencias de los efectos de grandes terremotos en cambios de la geomorfología del paisaje y en el registro estratigráfico.

un amplio intervalo de tiempo. Si la relación se establece para cortos periodos de observación, es improbable que recoja los mayores terremotos habidos en la zona, ya que son menos frecuentes.

Podría asumirse que un periodo de recurrencia basado en extrapolación de relaciones lineales desde terremotos más pequeños, pero los resultados que así se obtendría serían muy poco fiables, ya que la extrapolación de relaciones lineales puede conducir a valores de magnitudes extremadamente grandes y muy poco realistas. Para cada región hay un límite en el tamaño del máximo terremoto que puede ocurrir, dependiendo de las características geológicas y del sistema de fallas, en conclusión las leyes de recurrencia de la magnitud o la intensidad de la zona son comúnmente usadas como una forma de definir el patrón esperado de sismicidad en un cierto intervalo de tiempo.

5.1.1. Recurrencia de Magnitudes.

La recurrencia de magnitudes se puede deducir de la sismicidad de una región, con los datos de la actividad sísmica. Para hacer estudios de recurrencia de magnitudes se debe definir una zona de influencia de al menos 200 Km. y seleccionar las fuentes sismogénicas y la sismicidad que estén cubiertos por esta zona.

Pero esto no es una tarea fácil por la falta de completitud en los catalogos sísmicos, según Alfaro en su artículo “Dificultades en los estudios probabilísticos de amenaza en Colombia debido a la escasez de datos instrumentales” indica que para determinar la curva de amenaza sísmica se debe proceder a combinar la tasa anual de ocurrencia de sismos con una magnitud dada por la unidad de área. Finalmente, el total de la tasa media anual de ocurrencia del movimiento sísmico es mayor que una aceleración dada, la cual es la sumatoria de las contribuciones de las diferentes magnitudes.

Los resultados se presentan en función del tiempo de retorno que para labores de diseño estructural comúnmente se utiliza 475 años (Vida útil de la estructura de cincuenta años y a una probabilidad de excedencia del 10 %).

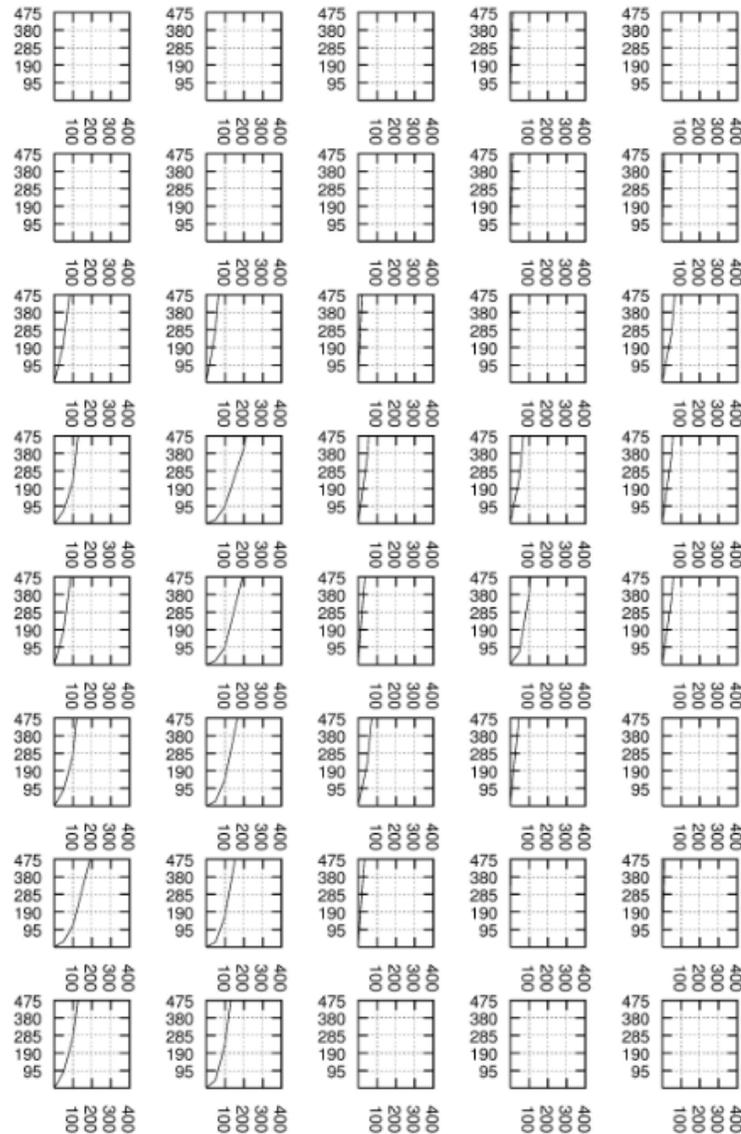
Además se realiza el ejercicio con la ecuación de Fukushima y Tanaka (1990), cumple los siguientes criterios:

- Es relativamente reciente
- Para su desarrollo se utilizó una gran base de datos.
- La magnitud estuviera expresada en MSS
- Es una ecuación robusta

Usando las ecuaciones de atenuación se puede estimar la distancia a la cual se pueden producir aceleraciones dadas para magnitudes dadas. Para determinar la curva de amenaza sísmica se procede a combinar la tasa anual de ocurrencia de sismos con una magnitud dada por unidad de área. Finalmente, el total de la tasa media anual de

ocurrencia del movimiento sísmico mayor que una aceleración a dada es la sumatoria de las contribuciones de las diferentes magnitudes (Bohórquez M., Alfaro A.2008). De la Figura 6 hasta la Figura 11 presenta las Curvas de Amenaza Sísmica de Colombia para los diferentes autores:

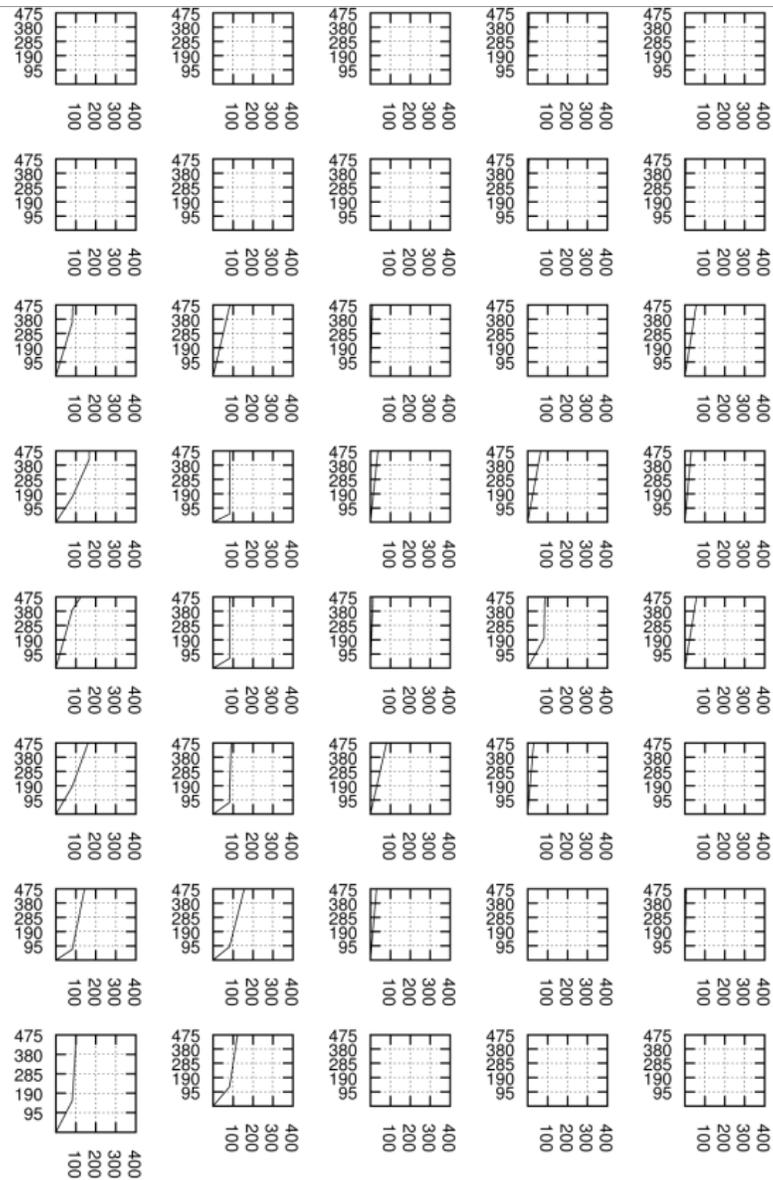
Figura 6. Curva de Amenaza Sísmica para Colombia – Modelo AS08



Periodo entre 1960 y 2012. Profundidad menor de 700 km. Magnitud MS menor o igual a 8.0. De -1 °S a 13 °N y de 80 °W a 72 °W. En las abscisas aceleración en gales, en las ordenadas periodo de retorno en años

Fuente: elaboración propia a través del software Gnuplot (Williams y Kelley, 2007).

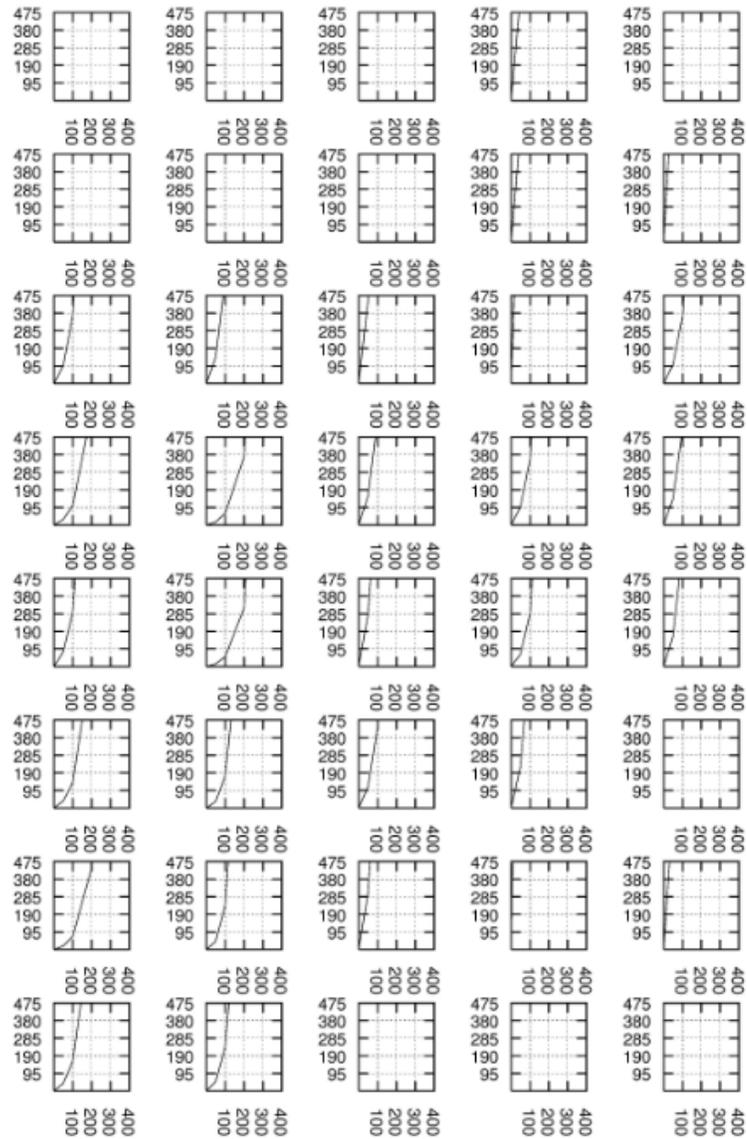
Figura 7. Curva de Amenaza Sísmica para Colombia – Modelo BA08



Periodo entre 1960 y 2012. Profundidad menor de 700 km. Magnitud MS menor o igual a 8.0. De -1 °S a 13 °N y de 80 °W a 72 °W. En las abscisas aceleración en gales, en las ordenadas periodo de retorno en años

Fuente: elaboración propia a través del software Gnuplot (Williams y Kelley, 2007).

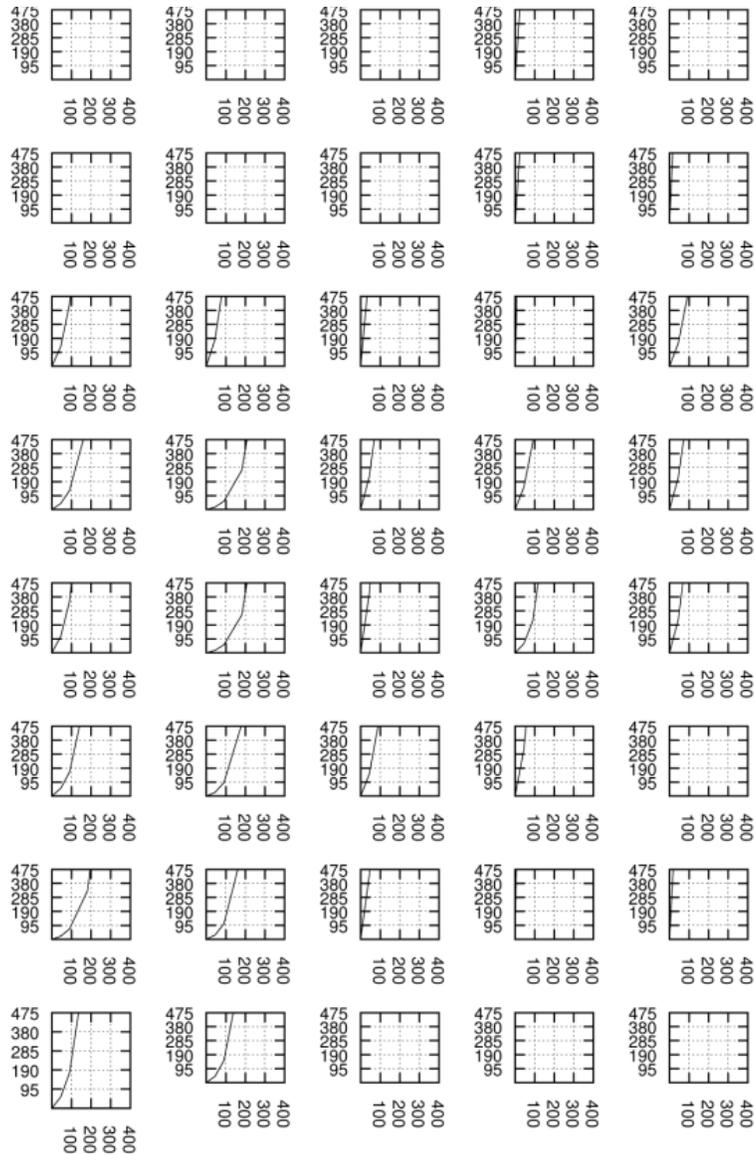
Figura 8. Curva de Amenaza Sísmica para Colombia – Modelo CB08



Periodo entre 1960 y 2012. Profundidad menor de 700 km. Magnitud M_S menor o igual a 8.0. De $-1^\circ S$ a $13^\circ N$ y de $80^\circ W$ a $72^\circ W$. En las abscisas aceleración en gales, en las ordenadas periodo de retorno en años

Fuente: elaboración propia a través del software Gnuplot (Williams y Kelley, 2007).

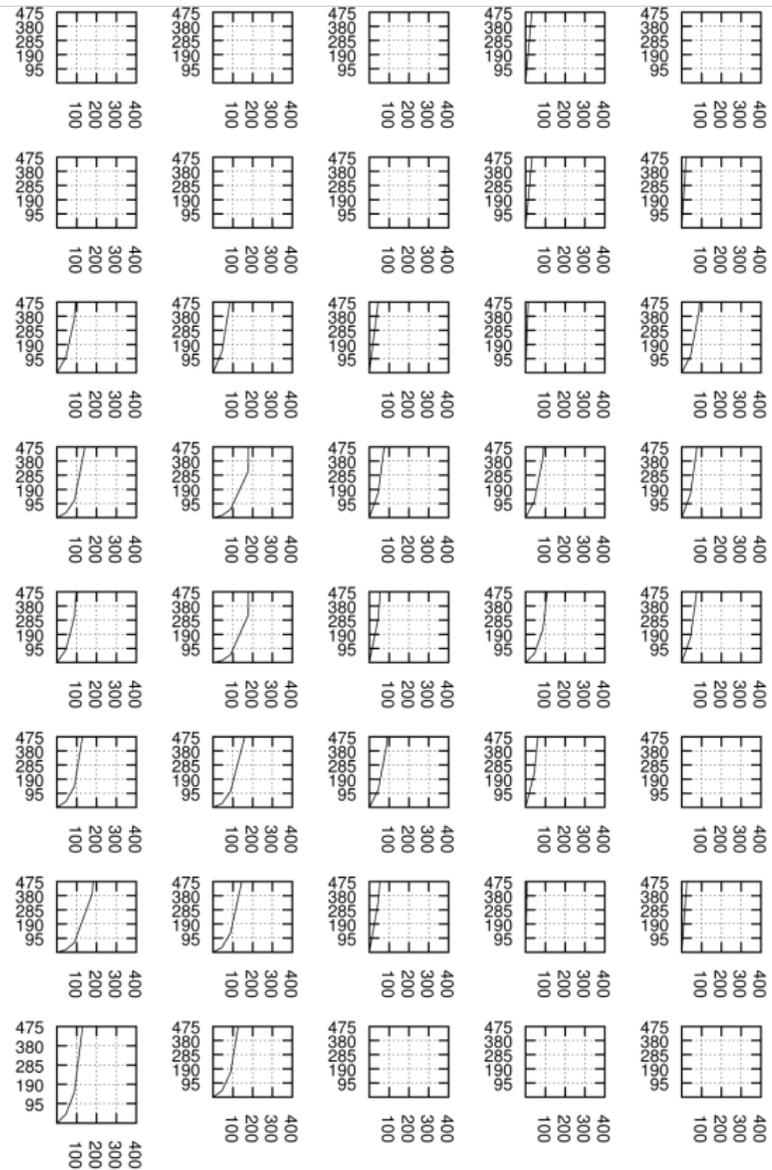
Figura 9. Curva de Amenaza Sísmica para Colombia – Modelo CY08



Periodo entre 1960 y 2012. Profundidad menor de 700 km. Magnitud MS menor o igual a 8.0. De -1 °S a 13 °N y de 80 °W a 72 °W. En las abscisas aceleración en gales, en las ordenadas periodo de retorno en años

Fuente: elaboración propia a través del software Gnuplot (Williams y Kelley, 2007).

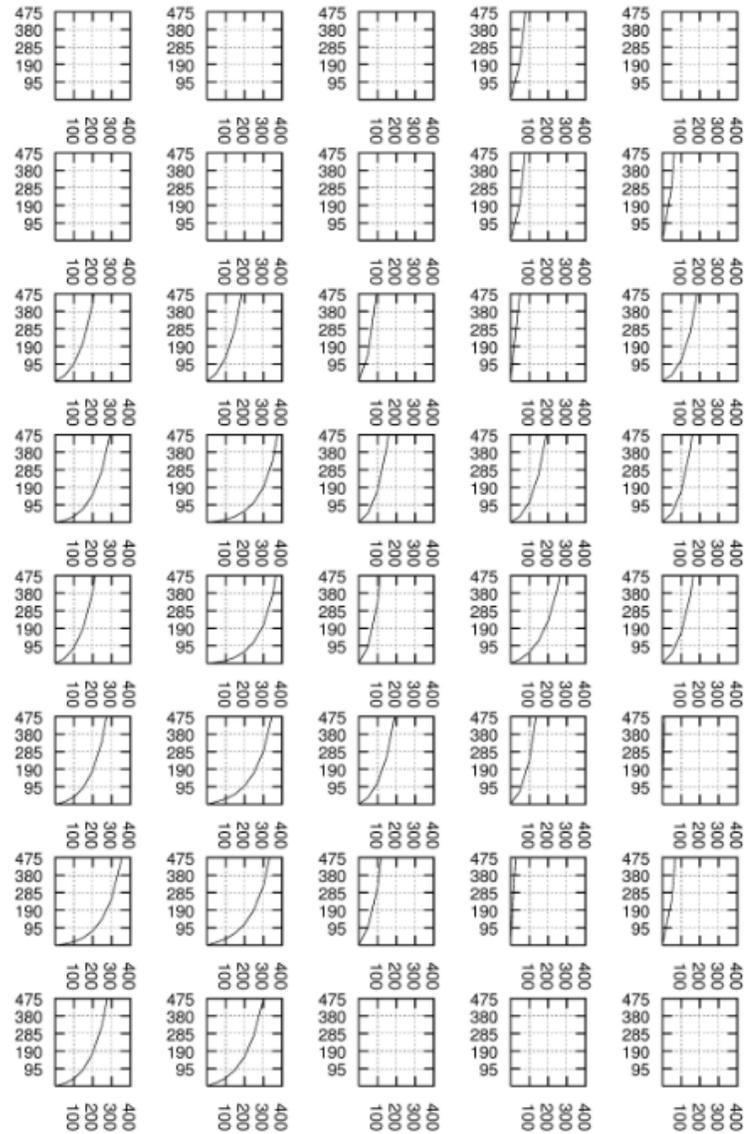
Figura 10. Curva de Amenaza Sísmica para Colombia – Modelo I08



Periodo entre 1960 y 2012. Profundidad menor de 700 km. Magnitud MS menor o igual a 8.0. De -1 °S a 13 °N y de 80 °W a 72 °W. En las abscisas aceleración en gales, en las ordenadas periodo de retorno en años

Fuente: elaboración propia a través del software Gnuplot (Williams y Kelley, 2007).

Figura 11. Curva de Amenaza Sísmica para Colombia – Modelo ft 2008



Periodo entre 1960 y 2012. Profundidad menor de 700 km. Magnitud MS menor o igual a 8.0. De -1 °S a 13 °N y de 80 °W a 72 °W. En las abscisas aceleración en gales, en las ordenadas periodo de retorno en años

Fuente: elaboración propia a través del software Gnuplot (Williams y Kelley, 2007).

6. DETERMINACIÓN DE LAS PGA (PEAK GROUND ACCELERATIONS)

6.1. GENERALIDADES

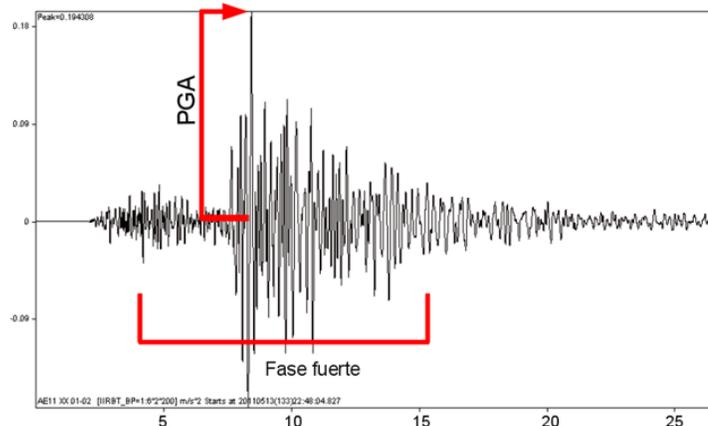
La aceleración máxima del terreno es una medida de la aceleración del terremoto en el suelo y un parámetro de entrada importante para la ingeniería sísmica, también conocida como base un movimiento telúrico de diseño

A diferencia de la de Richter y escalas de magnitud de momento, no es una medida de la energía total de un terremoto, sino de lo difícil tiembla la tierra en un área geográfica determinada. La escala de intensidad de Mercalli utiliza los informes y observaciones personales para medir la intensidad del terremoto, pero PGA se mide con instrumentos, como acelerógrafos, y por lo general se correlaciona bien con la escala de Mercalli. Véase también la escala sísmica.

La aceleración horizontal pico es el tipo de aceleración del terreno en aplicaciones de ingeniería más comúnmente usado, y se utiliza para establecer los códigos de construcción y los riesgos de amenaza de diseño. En un terremoto, los daños a los edificios y la infraestructura está relacionada más estrechamente con el movimiento del suelo, en vez de la magnitud del terremoto. Para sismos moderados, PGA es el mejor determinante del daño, en terremotos severos, el daño es más a menudo correlacionada con la velocidad máxima del terreno.

La aceleración pico o máxima solamente se da en un instante muy corto de tiempo como lo muestra la figura siguiente.

Figura 12. Modelo de Aceleración Pico



6.2. DESVIACION ESTANDAR

La evaluación de la PGA incluye generalmente la evaluación del valor medio más una desviación estándar. Por lo tanto en este estudio se evaluaron las desviaciones estándar para cada una de las ecuaciones de atenuación de la NGA.

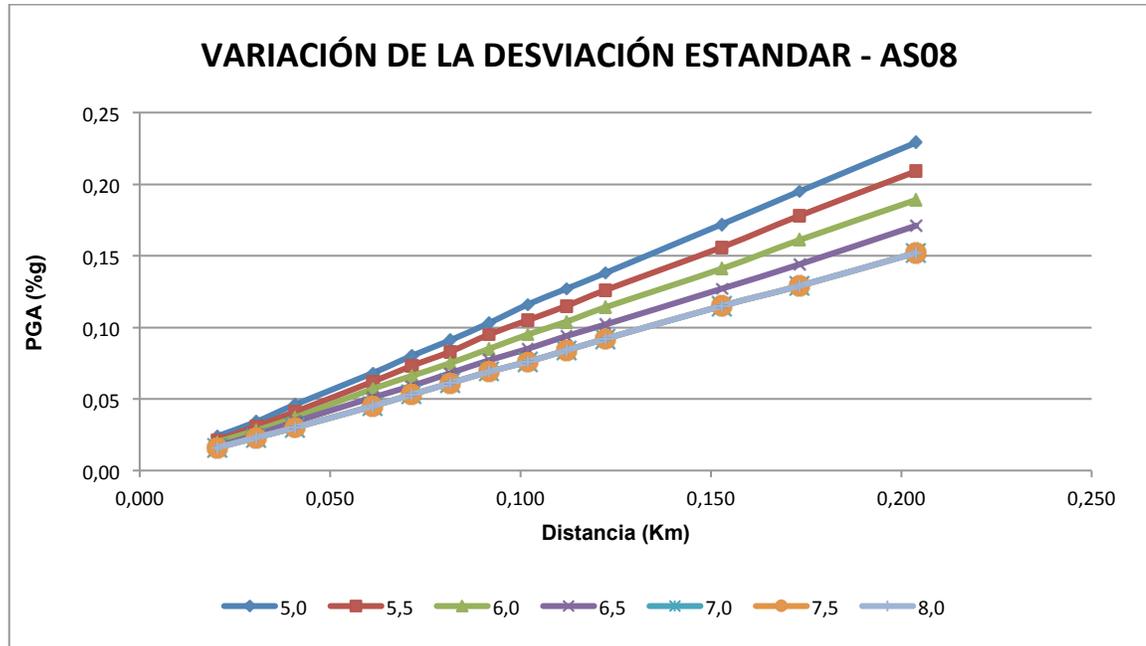
A continuación se presentan las tablas y gráficas que muestran la variación de la desviación estándar como función de la PGA, de la Magnitud y de la Distancia.

6.2.1. Desviación Estándar Abrahamson & Silva (2008)

Tabla 11. Variación de la Desviación Estándar como función de la PGA, de la Magnitud y de la Distancia - AS08

| DISTANCIA (Km) | | MAGNITUD | | | | | | |
|-------------------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 |
| 20 | 0,020 | 0,024 | 0,021 | 0,020 | 0,017 | 0,016 | 0,016 | 0,016 |
| 30 | 0,031 | 0,034 | 0,031 | 0,028 | 0,025 | 0,023 | 0,023 | 0,023 |
| 40 | 0,041 | 0,046 | 0,041 | 0,037 | 0,034 | 0,030 | 0,030 | 0,030 |
| 60 | 0,061 | 0,068 | 0,062 | 0,057 | 0,051 | 0,045 | 0,045 | 0,045 |
| 70 | 0,071 | 0,080 | 0,073 | 0,066 | 0,059 | 0,053 | 0,053 | 0,053 |
| 80 | 0,082 | 0,091 | 0,083 | 0,075 | 0,068 | 0,061 | 0,061 | 0,061 |
| 90 | 0,092 | 0,103 | 0,095 | 0,085 | 0,077 | 0,069 | 0,069 | 0,069 |
| 100 | 0,102 | 0,116 | 0,105 | 0,095 | 0,085 | 0,076 | 0,076 | 0,076 |
| 110 | 0,112 | 0,127 | 0,115 | 0,104 | 0,094 | 0,084 | 0,084 | 0,084 |
| 120 | 0,122 | 0,138 | 0,126 | 0,114 | 0,102 | 0,092 | 0,092 | 0,092 |
| 150 | 0,153 | 0,172 | 0,156 | 0,141 | 0,127 | 0,115 | 0,115 | 0,115 |
| 170 | 0,173 | 0,195 | 0,178 | 0,161 | 0,144 | 0,129 | 0,129 | 0,129 |
| 200 | 0,204 | 0,229 | 0,209 | 0,189 | 0,171 | 0,152 | 0,152 | 0,152 |

Gráfica 14. Variación de la Desviación Estándar como función de la PGA, de la Magnitud y de la Distancia - AS08

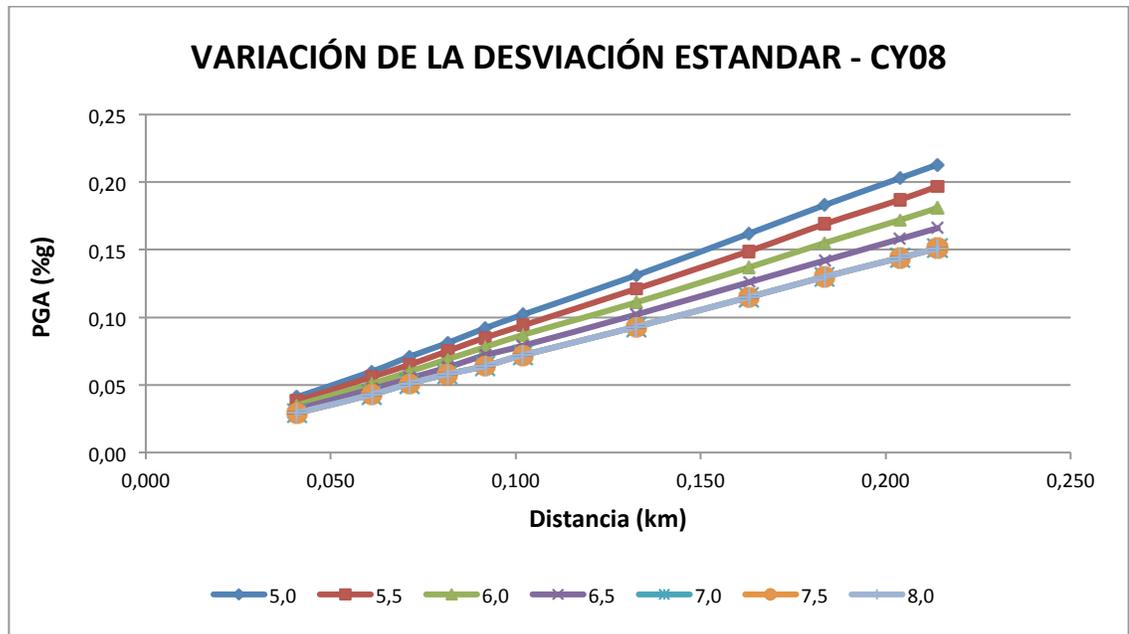


6.2.2. Desviación Estándar Chiou & Youngs (2008)

Tabla 12. Variación de la Desviación Estándar como función de la PGA, de la Magnitud y de la Distancia - CY08

| DISTANCIA (Km) | | MAGNITUD | | | | | | |
|----------------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 |
| 40 | 0,041 | 0,041 | 0,038 | 0,035 | 0,032 | 0,029 | 0,029 | 0,029 |
| 60 | 0,061 | 0,060 | 0,056 | 0,051 | 0,047 | 0,043 | 0,043 | 0,043 |
| 70 | 0,071 | 0,071 | 0,065 | 0,060 | 0,055 | 0,051 | 0,051 | 0,051 |
| 80 | 0,082 | 0,081 | 0,075 | 0,069 | 0,063 | 0,058 | 0,058 | 0,058 |
| 90 | 0,092 | 0,092 | 0,085 | 0,078 | 0,072 | 0,064 | 0,064 | 0,064 |
| 100 | 0,102 | 0,102 | 0,094 | 0,087 | 0,079 | 0,072 | 0,072 | 0,072 |
| 130 | 0,133 | 0,131 | 0,121 | 0,111 | 0,102 | 0,093 | 0,093 | 0,093 |
| 160 | 0,163 | 0,162 | 0,149 | 0,137 | 0,126 | 0,115 | 0,115 | 0,115 |
| 180 | 0,183 | 0,183 | 0,169 | 0,155 | 0,142 | 0,130 | 0,130 | 0,130 |
| 200 | 0,204 | 0,203 | 0,187 | 0,172 | 0,158 | 0,144 | 0,144 | 0,144 |
| 210 | 0,214 | 0,213 | 0,197 | 0,181 | 0,166 | 0,151 | 0,151 | 0,151 |

Gráfica 15. Variación de la Desviación Estándar como función de la PGA, de la Magnitud y de la Distancia - CY08

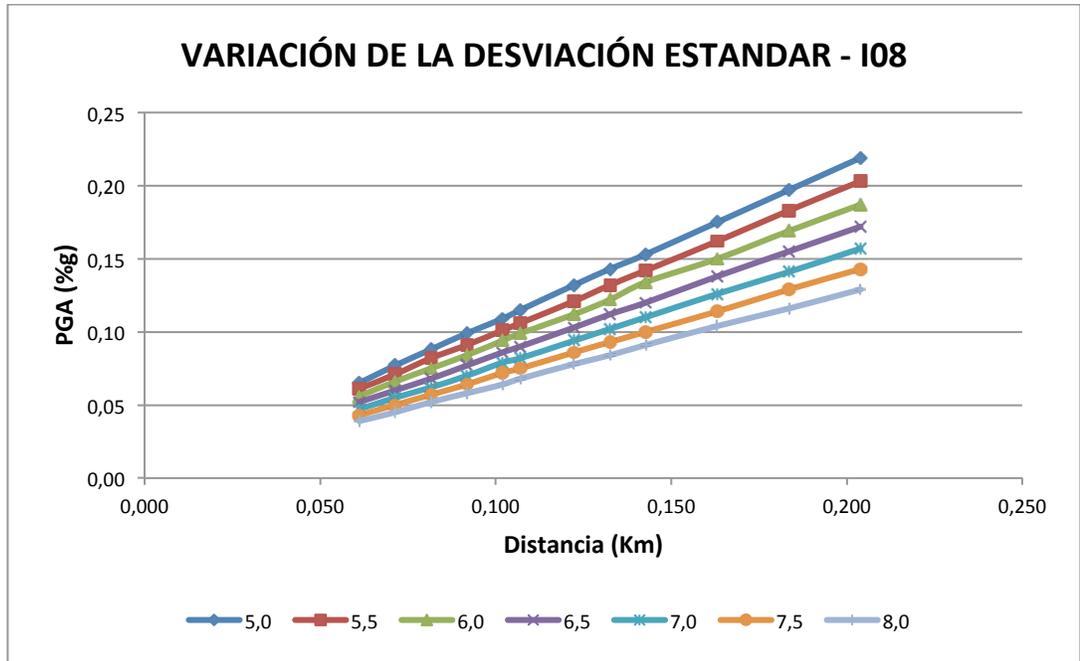


6.2.3. Desviación Estándar Idriss (2008)

Tabla 13. Variación de la Desviación Estándar como función de la PGA, de la Magnitud y de la Distancia - I08

| DISTANCIA (Km) | | MAGNITUD | | | | | | |
|----------------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 |
| 60 | 0,061 | 0,065 | 0,061 | 0,056 | 0,052 | 0,047 | 0,043 | 0,039 |
| 70 | 0,071 | 0,077 | 0,071 | 0,066 | 0,060 | 0,055 | 0,050 | 0,045 |
| 80 | 0,082 | 0,088 | 0,082 | 0,075 | 0,068 | 0,062 | 0,057 | 0,052 |
| 90 | 0,092 | 0,099 | 0,091 | 0,084 | 0,077 | 0,070 | 0,064 | 0,058 |
| 100 | 0,102 | 0,109 | 0,101 | 0,094 | 0,086 | 0,079 | 0,072 | 0,064 |
| 105 | 0,107 | 0,115 | 0,106 | 0,099 | 0,090 | 0,082 | 0,075 | 0,068 |
| 120 | 0,122 | 0,132 | 0,121 | 0,112 | 0,103 | 0,094 | 0,086 | 0,078 |
| 130 | 0,133 | 0,143 | 0,132 | 0,122 | 0,112 | 0,102 | 0,093 | 0,084 |
| 140 | 0,143 | 0,153 | 0,142 | 0,134 | 0,120 | 0,110 | 0,100 | 0,091 |
| 160 | 0,163 | 0,175 | 0,162 | 0,150 | 0,138 | 0,126 | 0,114 | 0,104 |
| 180 | 0,183 | 0,197 | 0,183 | 0,169 | 0,155 | 0,141 | 0,129 | 0,116 |
| 200 | 0,204 | 0,219 | 0,203 | 0,187 | 0,172 | 0,157 | 0,143 | 0,129 |

Gráfica 16. Variación de la Desviación Estándar como función de la PGA, de la Magnitud y de la Distancia – I08



De acuerdo con lo expuesto en la metodología para la evaluación de las curvas de amenaza sísmica (Hanks & Cornell, 1994), los valores corresponden a una sumatoria que depende directamente del número de sismos de cada magnitud, de la distancia al cuadrado, inversamente proporcional del área de estudio e inversamente proporcional de la ventana de tiempo.

En esta investigación se evalúa la desviación estándar para cada aceleración y para cada zona de acuerdo con el número de sismos de cada magnitud de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{\sum n_i \sigma_i}{N}$$

Donde $N = \sum n_i$

Esta evaluación se aplica a las ecuaciones de Abrahamson & Silva (2008); Chiou & Youngs (2008) e Idriss (2008). En los casos de Boore & Atkinson (2008) y Campbell & Bozorgnia (2008) no es necesario hacerla ya que la desviación estándar es independiente de la magnitud.

Tabla 14. Valores de PGA Incluyendo La Desviación Estándar

| VALORES DE AMENAZA SISMICA PARA COLOMBIA | | | | | | |
|--|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ecuación | 80° | 78° | 76° | 74° | 72° | W |
| 9° | AS08 | | | | | |
| | BA08 | 158 | | | | 63 |
| | CB08 | 169 | | | | 169 |
| | CY08 | 190 | | | | 174 |
| | I08 | 276 | | | | |
| | FT90 | 200 | | | | 190 |
| 7° | AS08 | 246 | 142 | 42 | | 144 |
| | BA08 | 299 | 158 | 50 | 105 | 38 |
| | CB08 | 304 | 338 | 152 | 169 | 169 |
| | CY08 | 309 | 404 | 136 | 174 | 136 |
| | I08 | 321 | 299 | 162 | 199 | 192 |
| | FT90 | 300 | 380 | 150 | 200 | 160 |
| 5° | AS08 | 184 | 410 | 62 | 205 | 122 |
| | BA08 | 211 | 141 | 13 | 158 | 105 |
| | CB08 | 186 | 338 | 118 | 186 | 152 |
| | CY08 | 193 | 407 | 137 | 175 | 135 |
| | I08 | 210 | 402 | 122 | 240 | 171 |
| | FT90 | 210 | 370 | 110 | 260 | 170 |
| 3° | AS08 | 225 | 341 | 163 | 82 | |
| | BA08 | 281 | 158 | 141 | 38 | |
| | CB08 | 254 | 203 | 169 | 118 | |
| | CY08 | 250 | 343 | 175 | 117 | |
| | I08 | 252 | 356 | 201 | 143 | |
| | FT90 | 280 | 340 | 200 | 130 | |
| 1° | AS08 | 410 | 297 | | | |
| | BA08 | 246 | 264 | 38 | | |
| | CB08 | 338 | 186 | 101 | | |
| | CY08 | 387 | 301 | 76 | | |
| | I08 | 402 | 314 | 118 | | |
| | FT90 | 350 | 320 | 110 | | |
| -1° | AS08 | 242 | 242 | | | |
| | BA08 | 176 | 211 | | | |
| | CB08 | 237 | 186 | | | |
| | CY08 | 247 | 246 | | | |
| | I08 | 278 | 257 | | | |
| | FT90 | 280 | 300 | | | |

FT90 NO INCLUYE MAS UNA DESV ESTANDAR

De la Figura 13 hasta la Figura 17 muestra los valores de isoaceleración para un periodo de retorno de 475 años obtenidos teniendo en cuenta el valor medio de PGA más una desviación estándar. Hay zonas a las que, desde el punto de vista probabilístico, no se les puede asignar ningún valor, dado que el número de datos es demasiado bajo. Los resultados en cada uno de los nodos representan valores promedios de las aceleraciones predichas por el modelo de sismicidad y las leyes de atenuación aplicadas en cada zona sísmica considerando los valores de la media más una desviación estándar.

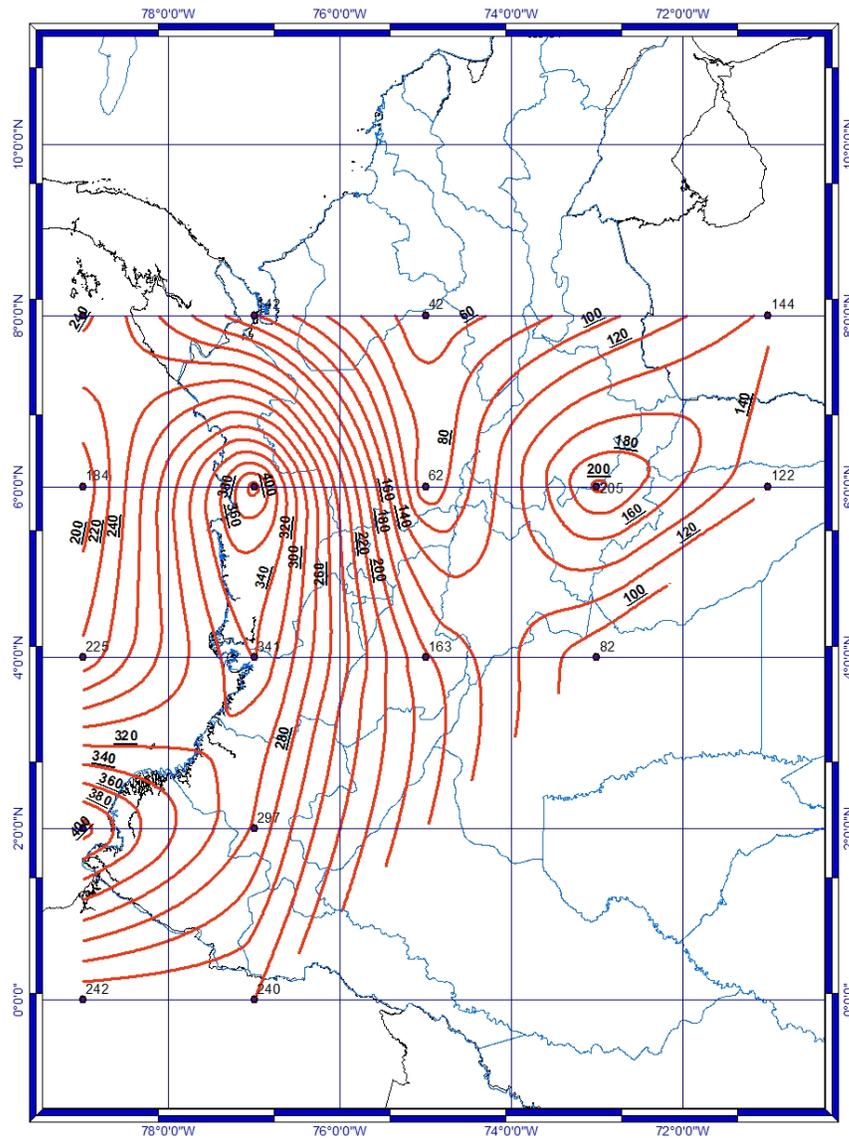
Para la determinación de las aceleraciones para cada magnitud de sismo es necesario estimar la atenuación de la aceleración con la distancia. Se han desarrollado múltiples ecuaciones en todo el mundo. En este estudio se utilizó las ecuaciones de:

- Boore & Atkinson (2008)
- Campbell y Bozorgnia (2008)
- Chiou & Youngs (2008)
- Idriss (2008)
- Abrahamson & Silva (2008)

6.2.4. Curvas de Isoaceleración para Colombia - Modelo AS08

La Figura 13 presenta el mapa con las curvas de isoaceleración para Colombia aplicando el modelo de AS08

Figura 13. Curvas de isoaceleración para Colombia. Modelo de AS08



La Figura 13 muestra la distribución de las aceleraciones máximas obtenidas en el modelo de AS08 elaborado a través del software GMT (Wessel y Smith, 2004). Se

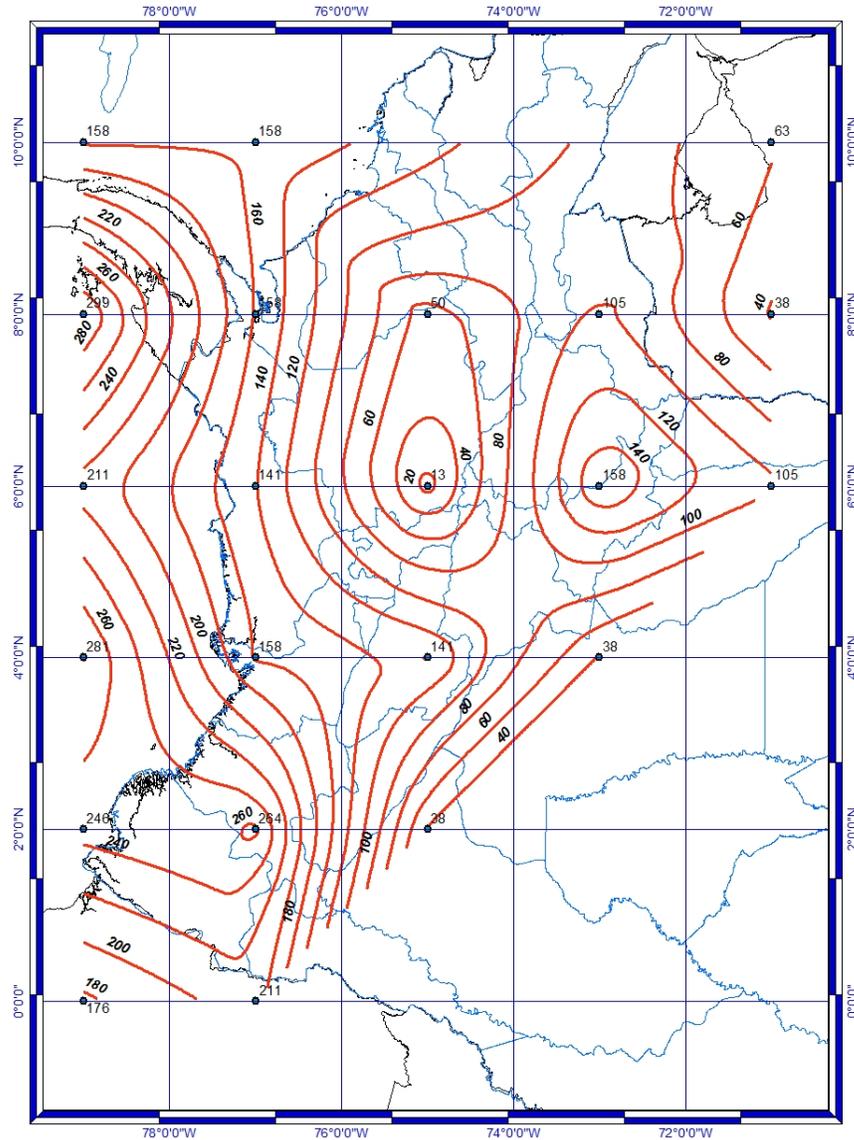
evidencia que el gran valor de aceleración obtenido cerca de la fuente se disminuye con la distancia. En el mapa es posible observar dos puntos de aceleración máxima

1. Ubicado en el departamento del Chocó: Cuya extensión es de 46.530 km² y se halla ubicado en la noroeste de Colombia entre las coordenadas 4°02' y 8°41' de latitud norte y los 76° 00' y 77°54' de longitud al oeste de Greenwich. La aceleración máxima presentada es de 400 gal disminuyendo en dirección N-E.
2. Ubicado en el departamento de Boyacá: Está situado en la región centro-oriental del país hacia el este, entre los 4°39' y 7°08' de latitud norte y los 71°56' y 74°38' de longitud al oeste de Greenwich. La aceleración máxima presentada es de 205 gal atenuándose en dirección oeste.

6.2.5. Curvas de Isoaceleración para Colombia - Modelo BA08

La Figura 14 presenta el mapa con las curvas de isoaceleración para Colombia aplicando el modelo de BA08

Figura 14. Curvas de isoaceleración para Colombia. Modelo de BA08



La Figura 14 muestra la distribución de las aceleraciones máximas obtenidas en el modelo de BA08 elaborado a través del software GMT (Wessel y Smith, 2004), en un periodo entre 1960 y 2010. Profundidad de los eventos menor de 100 km. Magnitud M

menor o igual a 8. Es posible observar el punto de aceleración máxima es de 280 gal en el Oeste atenuándose hacia el Este de Colombia afectando específicamente al departamento de:

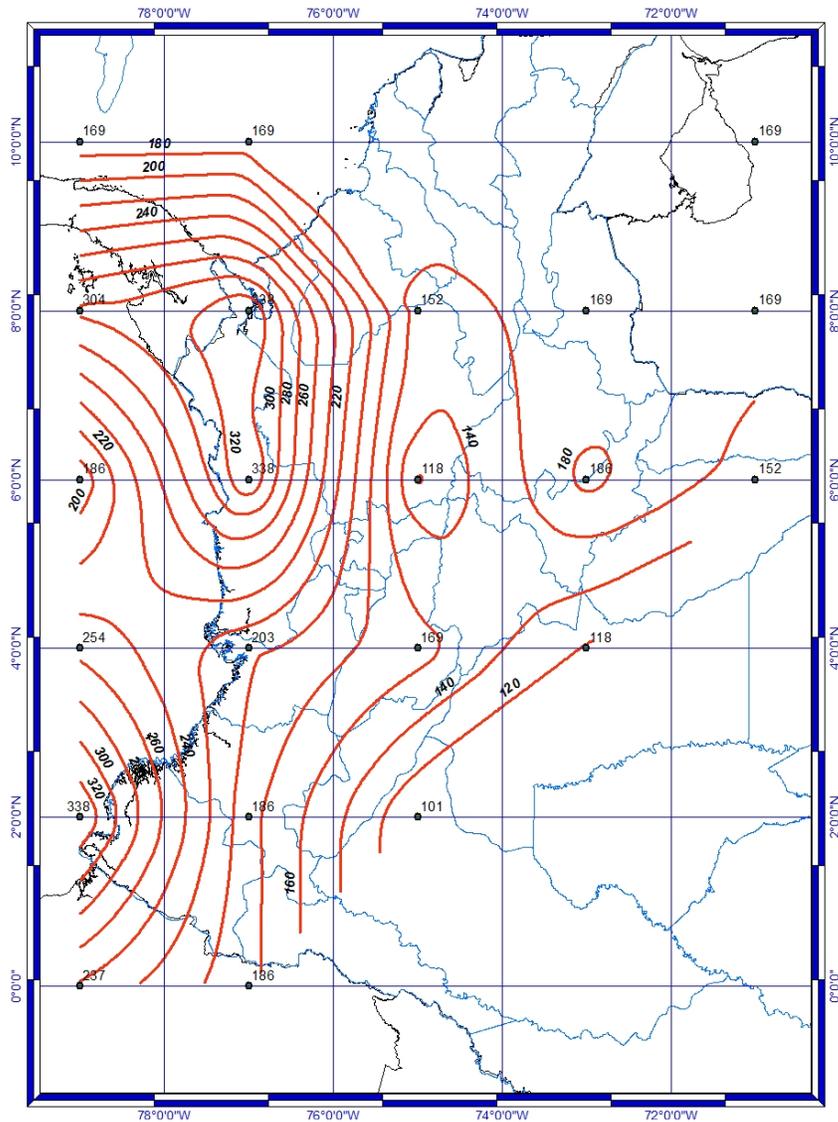
1. Choco: El departamento cuenta con una extensión de 46.530 km², ubicado en la noroeste de Colombia entre las coordenadas 4°02' y 8°41' de latitud norte y los 76°00' y 77°54' de longitud al oeste de Greenwich. Las isoaceleraciones son mayores en los límites de Colombia ya que por el norte limita con el mar Caribe y la República de Panamá y por el occidente con el océano Pacífico presentado valores de isoaceleración de 281 gal.
2. Nariño: Ubicado en el extremo suroeste del país entre los 0°21' y 2°40' de latitud norte y los 76°50' y 79°02' de longitud al oeste de Greenwich cuya isoaceleración tiene un valor de 250 gal y va disminuyendo su valor en sentido N-E de Colombia.
3. Cauca: Se encuentra localizado hacia el suroccidente del país, entre las coordenadas 0°57' y 3°20' de latitud norte y los 75°48' y 77°57' de longitud al oeste de Greenwich, con una extensión de 29.308 km², donde la curva de isoaceleración tiene un valor de 220 gal.

La zona sur y norte de Colombia no se evidencia isoaceleraciones ya que se encuentran ubicada en una zona de amenaza sísmica baja e intermedia.

6.2.6. Curvas de Isoaceleración para Colombia - Modelo CB08

La Figura 15 presenta el mapa con las curvas de isoaceleración para Colombia aplicando el modelo de CB08

Figura 15. Curvas de isoaceleración para Colombia. Modelo de CB08

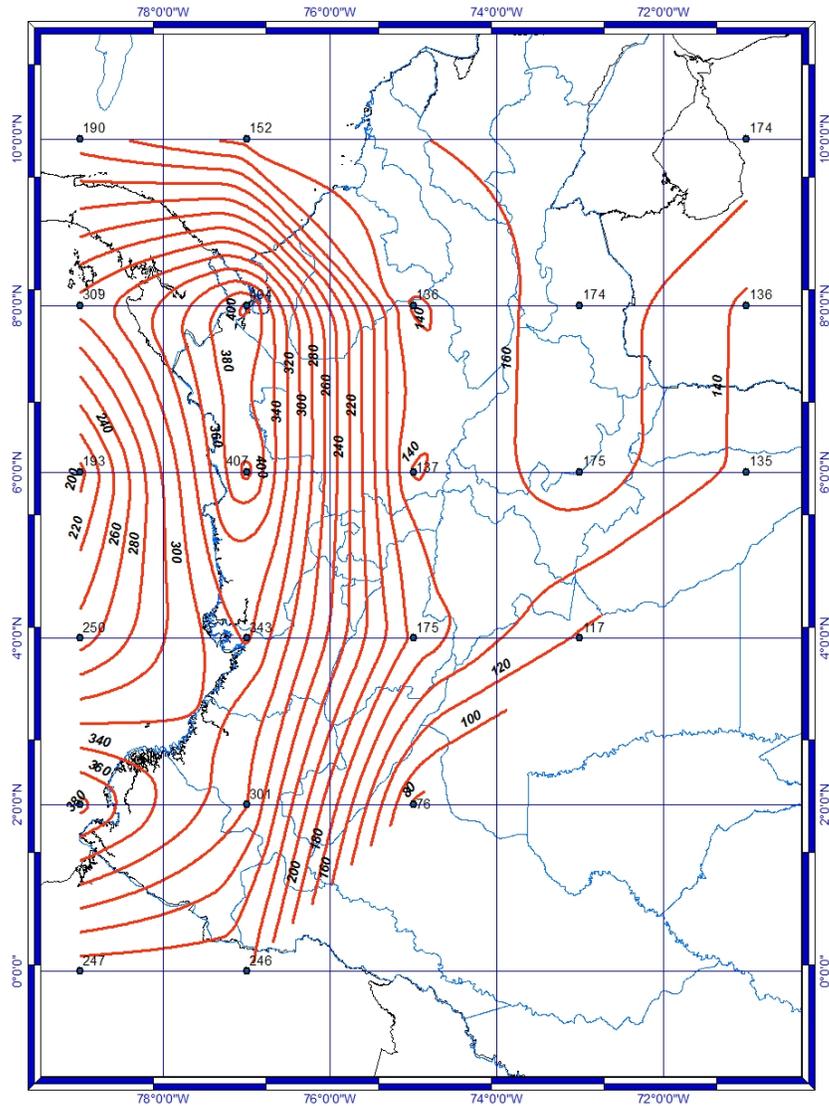


Las curvas de isoceleración generadas por el modelo de CB08 presenta valores menores o iguales a 320 gal ubicados en la zona oeste de Colombia (Choco) atenuándose hacia el centro del País.

6.2.7. Curvas de Isoaceleración para Colombia - Modelo CY08

La Figura 16 presenta el mapa con las curvas de isoaceleración para Colombia aplicando el modelo de CY08

Figura 16. Curvas de isoaceleración para Colombia. Modelo de CY08

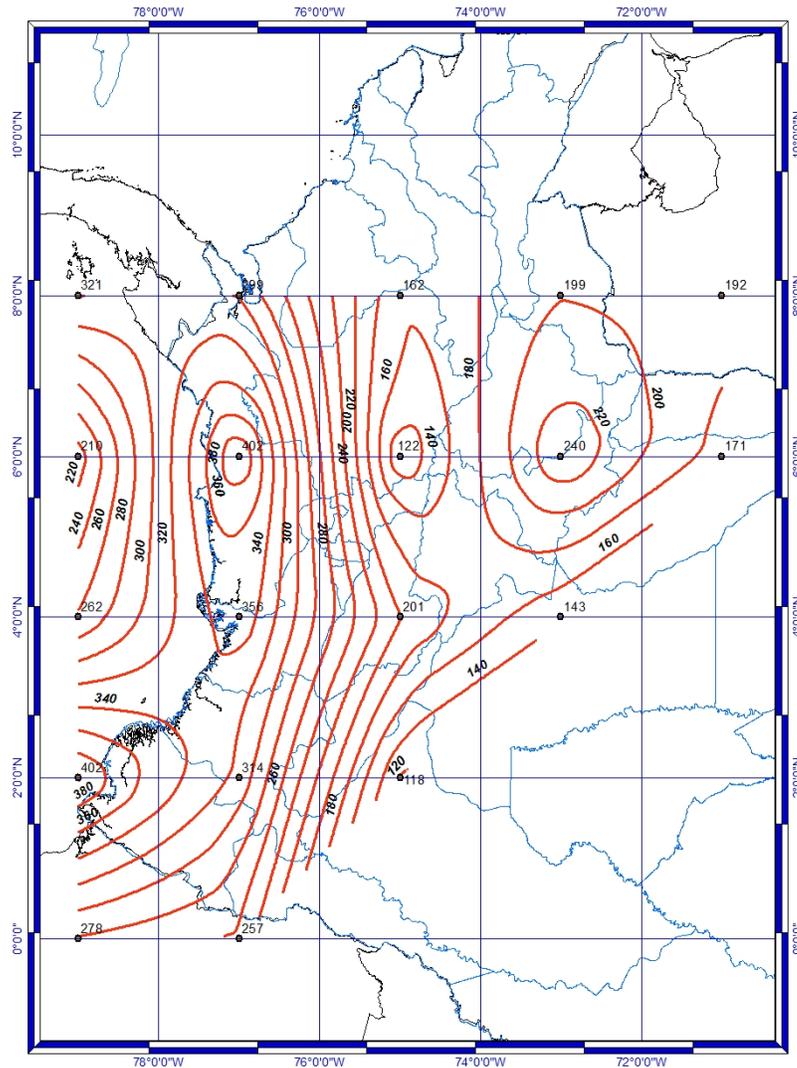


La Figura 16 muestra la distribución de las aceleraciones máximas obtenidas en el modelo de CY08 elaborado a través del software GMT (Wessel y Smith, 2004). Nótese el gran valor de aceleración obtenido cerca de la fuente, el cual disminuye con la distancia en sentido E-SE. El mayor valor de aceleración está ubicado en el departamento del Choco con un valor de 400 gal.

6.2.8. Curvas de Isoaceleración para Colombia - Modelo I08

La Figura 17 presenta el mapa con las curvas de isoaceleración para Colombia aplicando el modelo de I08

Figura 17. Curvas de isoaceleración para Colombia. Modelo de I08



La Figura 17 muestra la distribución de las aceleraciones máximas obtenidas en el modelo de I08 elaborado a través del software GMT (Wessel y Smith, 2004), en un periodo entre 1960 y 2012. Se observa que el punto de aceleración máxima es de 380 gal ubicado en los departamentos de Nariño, Cauca, Valle del Cauca y Chocó.

7. ANALISIS DE RESULTADOS

7.1. ACELERACIONES MÁXIMAS:

La aceleración del suelo y su intensidad en un punto cualquiera, es función del tamaño del terremoto (magnitud o energía liberada), la distancia epicentral y del tipo de material o estructuras en las cuales las ondas sísmicas se propagan. Este último factor es caracterizado por los coeficientes de la ecuación de atenuación, siendo esta utilizada para estimar los valores de aceleración máxima en cualquier punto del área de interés.

Las ciudades que se relacionan en la Tabla 15 muestran la comparación de la Aceleración Máxima A_a entre la Decreto 1400/84, NSR 98, NSR 10 y los autores expuestos a lo largo de este trabajo de grado, donde se resalta lo siguiente:

Decreto 1400/1984: A raíz de la ocurrencia del sismo de Popayán Ver Figura 18 el Congreso de la República expidió la Ley 11 de 1983, por medio de la cual se determinaban las pautas bajo las cuales debía llevarse a cabo la reconstrucción de esta ciudad y las otras zonas afectadas por el sismo. Dentro de uno de los artículos de esta Ley se autorizaba al Gobierno Nacional para emitir una reglamentación de construcción anti sísmica y además lo facultaba para hacerla extensiva al resto del país. Fue la primera expedición de la normativa sismo resistente nacional por medio del Decreto 1400 de Junio 7 de 1984, "Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes". Las Figura 19 y Figura 20 muestran los mapas de valores A_a y las Zonas de Amenaza Sísmica generados dentro de este decreto del 84.

Figura 18. Sismo de ocurrido en Popayan,1983



Figura 19. Mapa de valores de Aa – Decreto 1400/1984

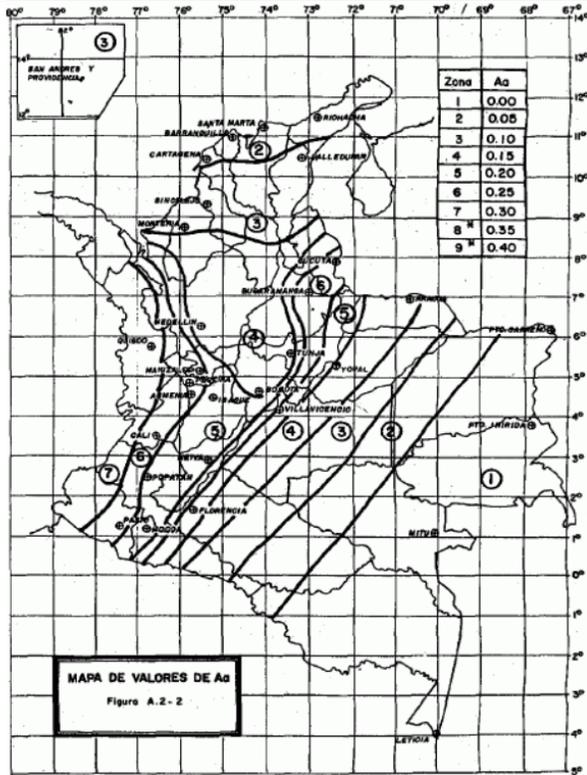
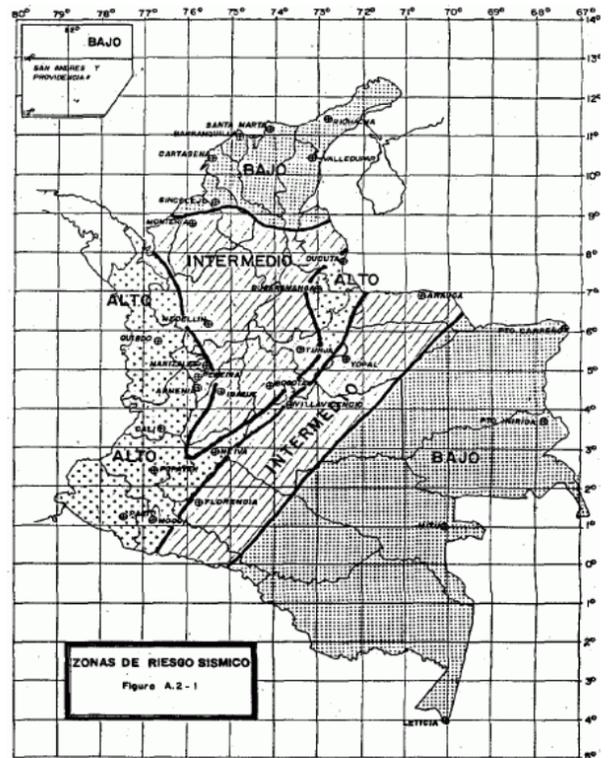


Figura 20. Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para Decreto 1400/1984



Norma Sismoresistente 98:

Dado que la normativa sismo resistente corresponde a un documento tecnológico, ésta debe actualizarse con alguna periodicidad; para plasmar los avances en las técnicas de diseño y construcción, y las experiencias que se haya tenido con sismos recientes. A mediados de la década de 1990 el país se vio sometido a una serie de movimientos sísmicos (Ver Figura 21) que además de producir, lamentablemente, víctimas humanas y daños en edificaciones, revivió la necesidad de revisar toda la problemática de la construcción sismo resistente, actualizándose en la NSR 98.

Figura 21 Sismo de Pereira, 1995



Figura 22. Mapa de valores de A_a – NSR-98

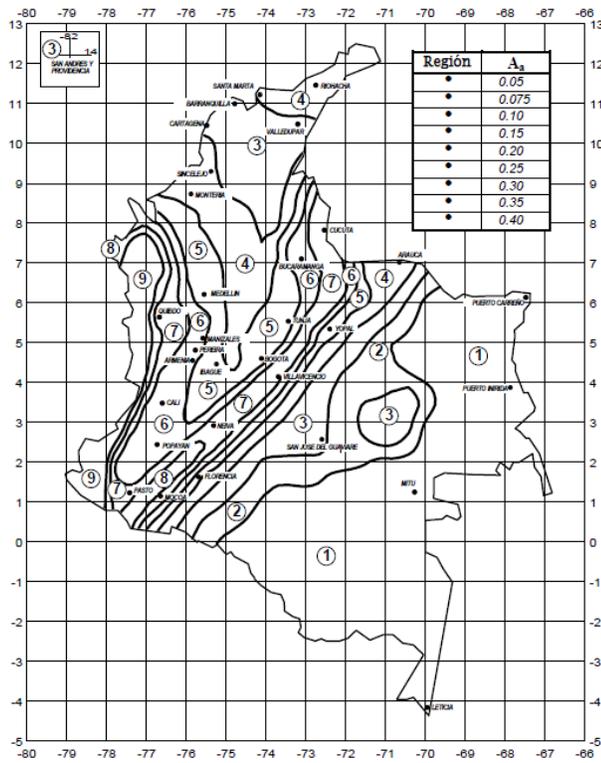
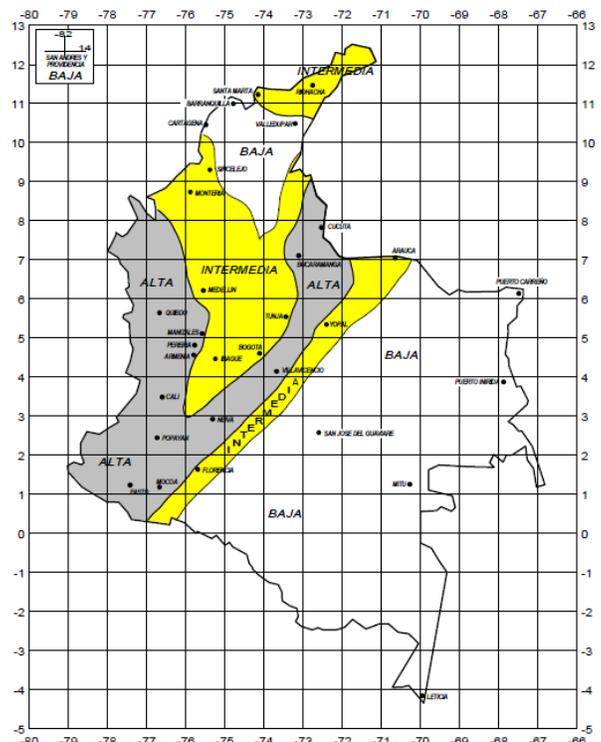


Figura 23. Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-98



- **Norma Sismoresistente 10:**

El Gobierno Colombiano expidió, por medio del Decreto 926 de marzo 19 de 2010, la Norma Sismo Resistente 2010, que se conoce como la NSR-10. Esta norma actualiza el Reglamento Técnico de Construcciones Sismo Resistentes NSR 98. Como uno de los puntos más relevantes de esta versión NSR-10, se encuentra el nuevo mapa de sismicidad elaborado por la Red Sismológica Nacional adscrita al INGEOMINAS, que permite identificar de manera más acertada las zonas de amenaza sísmica a lo largo y ancho de nuestro país, y las cuales permiten variaciones en los diseños estructurales según la zona sea alta, intermedia o baja. Para realizar este mapa de se registraron entre 1995 y 2009 alrededor de 22.000 eventos adicionales (a los 13 mil que crearon la versión NSR-98) que permitieron realizar un mejor estimativo de la amenaza sísmica nacional

Figura 24. Mapa de valores de Aa – NSR-10

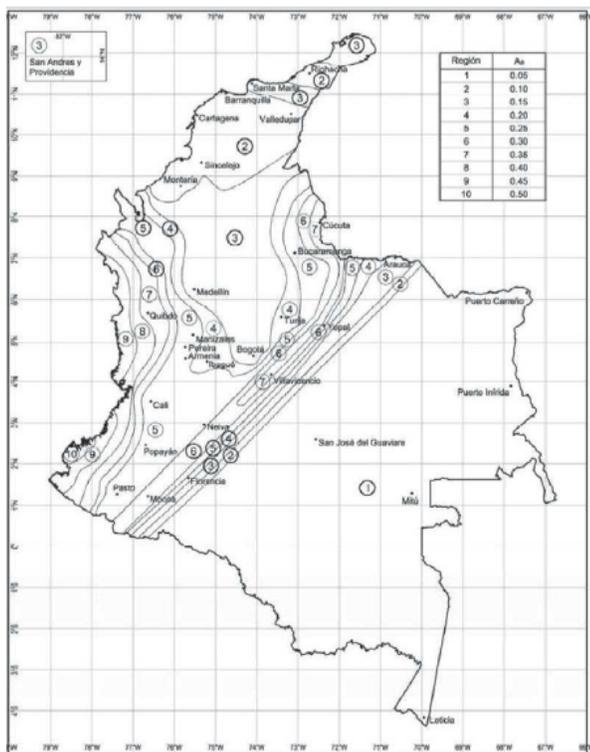


Figura 25. Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10

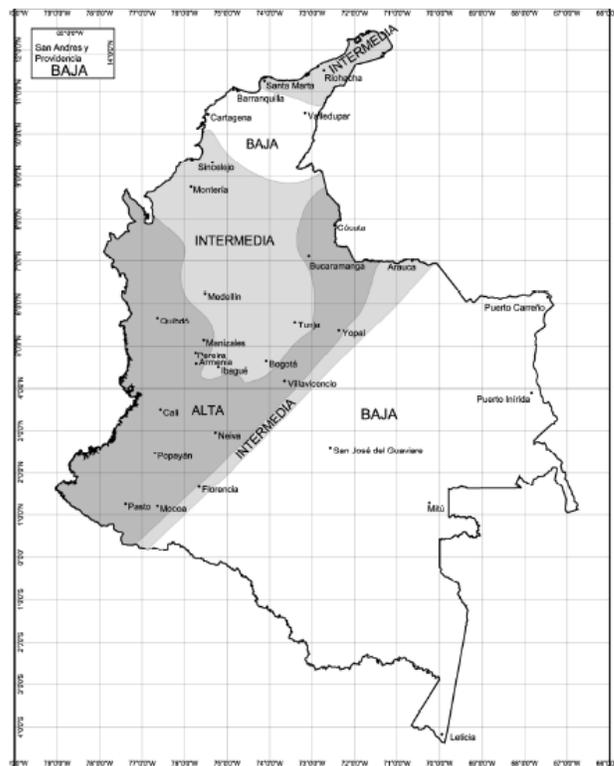
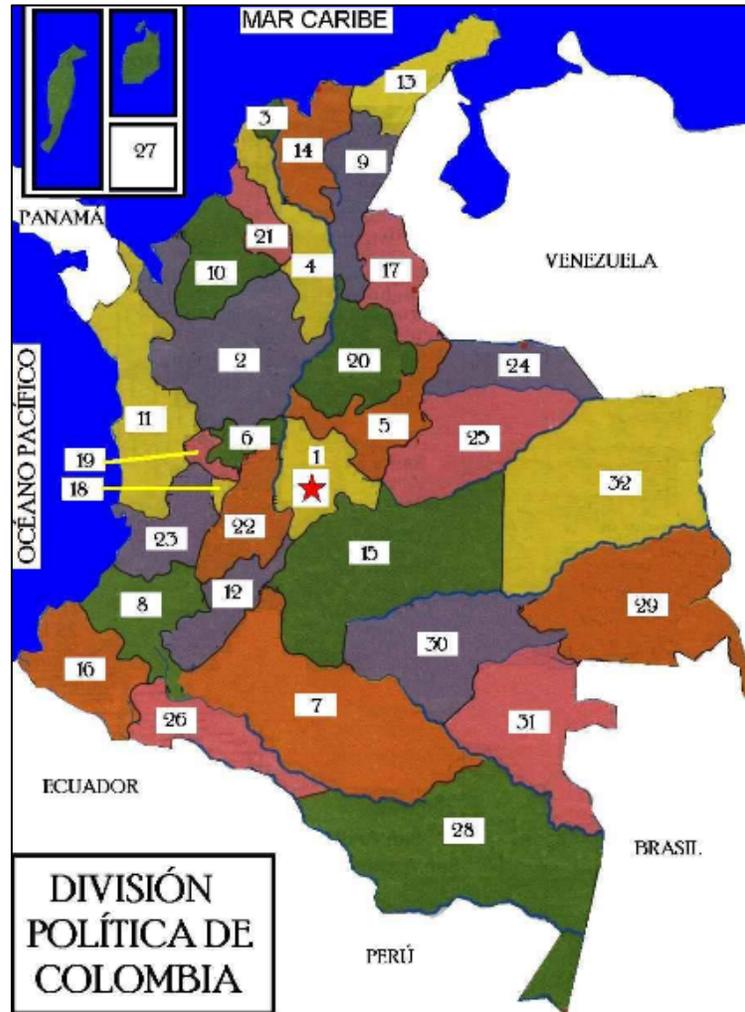


Figura 26. División Política de Colombia.



La Tabla 15 muestra la comparación de los valores de la aceleración pico efectivo para diseño [Aa] incluido el DECRETO 1400/84, NSR-98 y NSR-10 y los 5 autores estudiados a lo largo del trabajo de grado para las ciudades capitales de Colombia, adicional se relaciona el número de cada departamento para mayor ubicación.

Tabla 15. Comparación de los valores de la aceleración pico efectiva para diseño [Aa] incluidos en el Decreto 1400/1984, NSR-98, NSR-10, AS08, BA08, Cb08, CY08 e I08 para ciudades capitales de departamentos de Colombia.

| CIUDAD DE COLOMBIA | NÚM MAPA | CARACTERISTICAS | DECRETO 1400/84 | NSR 98 | NSR 2010 | Este Estudio | | | | |
|--------------------|----------|--|-----------------|--------|----------|--------------|------|------|------|------|
| | | | | | | AS08 | BA08 | CB08 | CY08 | I08 |
| | | | | | | Aa (% g) | | | | |
| Arauca | 24 | Ubicado en la región de la Orinoquía Colombiana al nororiente, entre los 6°02' y 7°06' de latitud norte y 69°27' y 72°22' de longitud al oeste | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,14 | 0,10 | 0,16 | 0,14 | 0,18 |
| Armenia | 18 | Ubicado en el centro-occidental del país, entre los 4°04' y 4°44' de latitud norte y los 75°24' y 75°52' de longitud al oeste | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,22 | 0,12 | 0,18 | 0,20 | 0,26 |
| Bogotá | 1 | Su territorio ocupa una estrecha faja de terreno que se extiende de sur a norte del departamento de Cundinamarca entre los 3°42' y 4°51' de latitud norte y los 73°59' y 74°31' de longitud al oeste | 0,15 | 0,20 | 0,15 | 0,12 | 0,08 | 0,14 | 0,14 | 0,18 |
| Bucaramanga | 20 | Ubicado en la región noreste del país entre los 5°42' y 8°08' de latitud norte y los 72°26' y 74°32' de longitud al oeste | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,20 | 0,14 | 0,18 | 0,16 | 0,22 |
| Cali | 23 | Situado en la región sur occidental del país entre los 3°03' y 5°01' de latitud norte y los 72°42' y 77°33' de longitud al oeste | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,30 | 0,16 | 0,20 | 0,30 | 0,3 |
| Cartagena | 4 | Ubicado en la costa del mar Caribe, entre las coordenadas 7°01' y 10°48' de latitud norte y 73°45' y 75° 43' de longitud al oeste | 0,05 | 0,10 | 0,10 | 0,08 | 0,12 | 0,16 | 0,16 | 0,18 |
| Cúcuta | 17 | Vecino de la República de Venezuela en la parte noroeste del país, se ubica entre las coordenadas 6°58' y 9°18' de latitud norte y los 72°03' y 73°35' de longitud al oeste. | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,14 | 0,10 | 0,16 | 0,17 | 0,20 |
| Florencia | 7 | Ubicado hacia el sur del territorio colombiano entre los 0°40' de latitud sur y 2°58' de latitud norte y los 71°30' y 76°15' de longitud al oeste | 0,2 | 0,20 | 0,20 | 0,22 | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,18 |
| Ibagué | 22 | Ubicado en la región central de Colombia entre las coordenadas 2°59' y 5°18' de latitud norte y los 74°29' y 76°05' de longitud al oeste | 0,2 | 0,20 | 0,20 | 0,22 | 0,14 | 0,16 | 0,20 | 0,26 |
| Manizales | 6 | Se ubica en la parte central de la región andina entre las coordenadas 4°48' y 5°47' de latitud norte y los 74°37' y 75°58' de longitud al oeste | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,20 | 0,08 | 0,18 | 0,22 | 0,26 |

| CIUDAD DE COLOMBIA | NÚM MAPA | CARACTERISTICAS | DECRETO 1400/84 | NSR 98 | NSR 2010 | Este Estudio | | | | |
|--------------------|----------|--|-----------------|--------|----------|--------------|------|------|------|------|
| | | | | | | AS08 | BA08 | CB08 | CY08 | I08 |
| | | | | | | Aa (% g) | | | | |
| Medellín | 2 | Se encuentra hacia el noroccidente del país, entre los 5°25' y 8°55' de latitud norte y los 7°53'y 77°07' de longitud al oeste | 0,15 | 0,20 | 0,15 | 0,30 | 0,14 | 0,28 | 0,34 | 0,34 |
| Mocoa | 26 | ubicado en la parte sur del territorio colombiano entre los 0° 40' de latitud sur y los 1°25' de latitud norte y los 73°50'y 77°10' de longitud al oeste | | 0,30 | 0,30 | 0,24 | 0,22 | 0,18 | 0,26 | 0,28 |
| Montería | 10 | se ubica entre las coordenadas 7°23' y 9°26' de latitud norte y los 74°52' y 76°32' de longitud al oeste | 0,1 | 0,15 | 0,10 | 0,16 | 0,12 | 0,24 | 0,30 | 0,28 |
| Neiva | 12 | Ubicado en la parte central del país entre las coordenadas 1°32' y 3°45' de latitud norte y los 74°28' y 76°37' de longitud al oeste | 0,2 | 0,30 | 0,25 | 0,24 | 0,16 | 0,16 | 0,20 | 0,26 |
| Pasto | 16 | Ubicado en el extremo suroeste del país entre los 0°21' y 2° 40' de latitud norte y los 76°50' y 79°02' de longitud al oeste | 0,25 | 0,30 | 0,25 | 0,38 | 0,24 | 0,30 | 0,36 | 0,36 |
| Pereira | 19 | Situado en la región centro-occidental del país entre las coordenadas 4°39' y 5°32' de latitud norte y los 75°23' y 76°18' de longitud al oeste. | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,26 | 0,10 | 0,18 | 0,26 | 0,28 |
| Popayán | 8 | Localizado hacia el suroccidente del país, entre las coordenadas 0° 57' y 3° 20' de latitud norte y los 75°48' y 77°57' de longitud al oeste. | 0,2 | 0,25 | 0,25 | 0,30 | 0,26 | 0,24 | 0,30 | 0,30 |
| Quibdó | 11 | Ubicado en la noroeste de Colombia entre las coordenadas 4°02' y 8°41' de latitud norte y los 76° 00' y 77°54' de longitud al oeste. | 0,3 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,16 | 0,32 | 0,40 | 0,38 |
| Santa Marta | 14 | Entre 8°58' y 11°21' de latitud norte y los 73°33' y 74°57' de longitud al oeste de Greenwich | 0,05 | 0,15 | 0,15 | | 0,12 | | 0,16 | |
| Sincelejo | 21 | Ubicado al norte del país en la parte septentrional, entre los 8°17' y 10°08' de latitud norte y los 74°32 y 75°43' de longitud al oeste de Greenwich, | 0,1 | 0,15 | 0,10 | | 0,12 | 0,16 | | |
| Tunja | 5 | Está situado en la región centro-oriental del país hacia el este, entre los 4°39' y 7°08' de latitud norte y los 71°56' y 74°38' de longitud al oeste de Greenwich | 0,15 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,14 | 0,18 | 0,16 | 0,22 |

| CIUDAD DE COLOMBIA | NÚM MAPA | CARACTERISTICAS | DECRETO 1400/84 | NSR 98 | NSR 2010 | Este Estudio | | | | |
|--------------------|----------|--|-----------------|--------|----------|--------------|------|------|------|------|
| | | | | | | AS08 | BA08 | CB08 | CY08 | I08 |
| | | | | | | Aa (% g) | | | | |
| Valledupar | 9 | Se encuentra entre los departamentos ubicados en la parte septentrional del país, entre las coordenadas 7°41' y los 10°52' de latitud norte y los 72°53' y 74°08' de longitud al oeste | 0,1 | 0,10 | 0,10 | 0,08 | 0,10 | | 0,16 | |
| Villavicencio | 15 | Ubicado en la región centro-oriental del país entre los 1°39' y 4°53' de latitud norte y los 71°05' y 74°58' de longitud al oeste de Greenwich. | 0,2 | 0,30 | 0,35 | 0,14 | 0,08 | 0,12 | 0,13 | 0,16 |
| Yopal | 25 | Forma parte de la Orinoquía Colombiana y está ubicado entre las coordenadas 4°16' y 6°17' latitud norte y los 67°50' y 71°08' de longitud al oeste de Greenwich | | 0,20 | 0,30 | 0,14 | 0,10 | 0,16 | 0,14 | 0,18 |

- En la NRS-10 realizo un análisis de la máxima aceleración horizontal en cada una de las capitales de departamento inferida de la localización y magnitud de los sismos en el catálogo de eventos empleando la metodología de Gallego (2000). El resultado de este ejercicio fue el establecimiento de unas aceleraciones máximas esperadas para el periodo de retorno promedio que fija el Reglamentos NSR-10 definidas por métodos determinísticos. Estos valores fueron utilizados posteriormente como parte de la información utilizada en la producción de los mapas definitivos que se incluyen en el reglamento NRS-10
- Al comparar los valores de Aa entre NSR 98 y NSR 10, se tiene que para las ciudades como Bogotá, Medellín, Montería, Neiva, Pasto, Riohacha, San José del Guaviare y Sincelejo el valor disminuyo 0.05 g pero sin cambios la zona de amenaza sísmica, en cambio Riohacha y Sincelejo cambiaron de zona de amenaza sísmica de Intermedia a Baja. Mientras para las ciudades de Cúcuta, Quibdó y Yopal, el Aa aumento en 0.05 g exceptuado Yopal que aumento 0.10 g y cambio de Zona de Amenaza Sísmica pasando de Intermedia a Alta
- Es importante recordar que el poder destructivo de los sismos no sólo depende de la aceleración pico, también de la dirección, el tipo de suelo, la duración, los contenidos frecuenciales, entre otros.

- Los cambios generados entre Normas Sismoresistente respecto a los mapas de Aa y de Amenaza Sísmica depende básicamente del número de registros sísmicos y el mejoramiento de instrumentos de medición. A medida que los eventos sísmicos pasan se analizan el impacto que ocasiono en la población y en la infraestructura y así se recopila la suficiente información para ir actualizando las Normas que rigen a Colombia.
- Quibdó está situada en una zona de amenaza sísmica importante, con evidencia de sismos que han causado daños y víctimas. Uno de los más recientes y socializado fue el ocurrido 30 de Septiembre de 2012 cuando un fuerte movimiento telúrico sacudió a Quibdó y varios municipios del Chocó. Según el Instituto Colombiano de Geología y Minería, Ingeominas, el sismo tuvo su epicentro a 22.78 K.M al sureste de la cabecera municipal de La Vega (Cauca), marcando en la escala de Richter 7.1 grados, y una profundidad de 166,4 kilómetros. Mientras que el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), indicó que el temblor tuvo una magnitud de 7.3 grados. En un balance preliminar por parte de los organismos de socorro, no se reportan daños o personas afectadas en el departamento del Chocó. Como se evidencia en los mapas de isoaceleración para los diferentes autores con un valor de Aa mayor en comparación a los demás departamentos

| DECRETO 1400/84 | NSR 98 | NSR 2010 | Este estudio | | | | |
|--------------------|--------|----------|--------------|------|------|------|------|
| | | | AS08 | BA08 | CB08 | CY08 | I08 |
| (% g) | | | | | | | |
| 0,30 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,16 | 0,32 | 0,40 | 0,38 |

Al realizar la comparación de los resultados de este estudio Boore – Atkinson (2008) se puede apreciar que el valor de Aa es menor en comparación a los demás autores y a las Normas Colombianas, ya que este mezcla registros de distintas partes del mundo y se debe realizar correlaciones de magnitudes disminuyendo la confiabilidad de los resultados.

8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Desde los años setenta se han elaborado en Colombia varios mapas de amenaza sísmica con diferentes aproximaciones, como los de Estrada y Ramírez (1977); AIS (1984, 1996, 2009); Salcedo (1992, 1993); Ceresis (1996), Alfaro(2011, 2012) todos ellos con sus fortalezas y debilidades. A la luz de eventos catastróficos recientes, como el sismo de Haití de 2010, y el sismo de Tohoku (Japón) del 2011 y atendiendo la sugerencia de Stein et ál. (2011) de realizar una mirada retrospectiva y objetiva a los pronósticos, resulta importante ver cómo la norma sismorresistente vigente pareciera hacer caso omiso de las evidencias instrumentales e históricas.

La aproximación probabilista de la amenaza presenta limitaciones en Colombia, principalmente por escasez de datos, como se muestra en este estudio, en el cual se analizaron los cuadrantes de 2 ° por 2 ° en el área comprendida entre las longitudes 80 °W y 70 °W y entre las latitudes 1°S y 15 °N, que corresponden al territorio colombiano. Los datos analizados fueron de 1960 al 2012, ya que presentan una distribución temporal aproximadamente de tipo *Poisson*. Los sismos corresponden a profundidades menores de 100 km y magnitudes Ms mayores a 5. La unificación de escalas de magnitud se realizó con los estudios de Utsu (Hung, 2002).

Las aceleraciones pico en roca, para un periodo de retorno de 475 años varían de 0.25 gales en la costa del Pacífico colombiano, tanto en el nido de Urabá, como en la frontera con Ecuador, 0,20 gales en la zona del Magdalena medio.

Debido a la escasez de datos, los valores en el piedemonte llanero se asumen poco realistas, ya que subestiman los niveles de amenaza. Adicionalmente hay un vacío de información en todos los departamentos de la costa Caribe. Los dos sismos fuertes con registros de aceleración mayores a 100 gales han sido los del 25 de enero de 1999 en el eje cafetero y el del 24 de mayo del 2008 en Quetame (Cundinamarca).

En el del 25 de enero de 1999 se registraron aceleraciones en suelo de 518 gales, a 13 km del epicentro. Sugito y Taniguchi (1999) realizaron estimaciones de la aceleración en roca y obtuvieron el valor de 217 gales. De acuerdo con las observaciones de campo y las fotografías aéreas se puede deducir que se presentaron aceleraciones mayores a una gravedad. A pesar de esto los estudios de AIS (2009) no presentan ningún cambio en el valor de aceleración de Armenia.

En el caso del sismo del 24 de mayo del 2008 se registraron aceleraciones de 605 g en roca a 9 km del epicentro. El estudio de AIS (1998) asignaba 0,30 g para este sitio, en tanto que el estudio AIS (2009) presenta 0,25 g. Este estudio presenta un valor de 0,35 g, teniendo en cuenta que la desviación estándar de la ecuación de Fukushima y Tanaka (1990) es de 0,21 g, lo cual significaría un valor de 0,56 g; si se tuviera en cuenta

completitud del catálogo el valor sería de 0,64 g, el cual es solo el 3 % diferente del valor registrado. De ahí la importancia de revisar y actualizar los estudios de amenaza sísmica (Correa y Alfaro, 2011; Stein et ál, 2011, Alfaro, 2011, 2012).

Debe haber una conciencia de las limitaciones en los estudios existentes y complementar estos con información de tipo geológico y geofísico para llenar los vacíos con información determinista. Sin olvidar los antecedentes de los tsunamis que ocurrieron en el siglo XX en la costa Pacífica colombiana. Los mapas que rigen la norma sismorresistente deben responder al contexto geológico, geomorfológico e histórico y ser coherentes con los eventos del pasado, el pronóstico debe ser revisado con los eventos ocurridos.

En la sismicidad instrumental, tomando datos a partir de 1960, la estadística sísmica es de alguna manera homogénea, es decir, cumple con una distribución de Poisson, aunque el período de registros es significativamente menor al de la sismicidad histórica. Se realizó un filtrado del catálogo, eliminando réplicas y premonitores, quedando los sismos como eventos principales para ser modelados como una distribución de Poisson

Debido a la escasez de datos, los valores en el piedemonte llanero se suponen poco realistas, ya que subestiman los grados de amenaza. Adicionalmente hay un vacío de información en los departamentos de la costa Caribe. Los dos sismos fuertes con registros de aceleración mayores a 100 gales han sido los del 25 de enero de 1999 en el eje cafetero y el del 24 de mayo del 2008 en Quetame (Cundinamarca).

Los mapas que rigen la norma sismo resistente deben responder al contexto geológico, geomorfológico e histórico y ser coherentes con los eventos del pasado, el pronóstico debe ser revisado con los eventos ocurridos

Se realizó un análisis de cinco ecuaciones de predicción de movimiento de suelo las cuales fueron elegidas porque se encuentran dentro de proyectos científicos importantes, el catálogo para su generación es muy extenso, se encuentran publicadas en revistas científicas reconocidas y han sido utilizadas para otros estudios a nivel internacional.

Algo que no estaba previsto fue la importancia de la inclusión de la desviación estándar en los resultados y en tres de los cinco casos, esta es función de la magnitud y de la aceleración, lo cual implicó cálculos adicionales. De otra parte las ecuaciones funcionan para magnitudes entre 5 y 8, de tal forma que los catálogos colombianos se redujeron de manera importante.

El modelo de movimientos de tierra presentado en este estudio, al igual que los otros modelos desarrollados para el proyecto NGA, representa un avance significativo en la predicción empírica de movimientos de tierra horizontal para uso en ingeniería y

sismología. Diversos de estos modelos incorporan en una sola ecuación de predicción características importantes tales como magnitud dependiente del período, atenuación dependiente de magnitud, estilo de falla, profundidad de ruptura, respuesta lineal y no lineal superficial en el sitio, respuesta de cuenca, e incertidumbre aleatoria dentro de eventos, dependiente de la amplitud.

Para estructuras de Ingeniería Civil de gran importancia es necesario realizar una evaluación específica de la amenaza sísmica. Las curvas de isoaceleraciones determinadas representan valores medios de la amenaza sísmica en Colombia para cada uno de los autores expuestos.

De los mapas de aceleraciones se puede observar una regionalización de dichos parámetros, concentrándose los máximos valores sobre la parte de la costa Pacífico y que van decreciendo hacia el centro del país, de la misma manera la parte Sur - oeste (Nariño) presenta altos valores y tienden a decrecer hacia la dirección Este.

Mientras se realizaba la tesis se consultó el artículo de Delavaud et al (2012) en el que concluían que las ecuaciones de Kanno et al (2006), Cotton et al (2008) y Chiou et al (2010) son las mas robustas del mundo, se recomienda realizar el análisis con dichas ecuaciones y ver las variaciones que se presentan en los valores de PGA en Colombia

9. REFERENCIAS

- Abrahamson N., Silva W., (2008). "Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion relations", Earthquake Spectra, EERI, 24 (1), 67-97p.
- Aguiar, R. y Haro, A. (2000). Zonificación sísmica en países bolivarianos. Boletín Técnico IMME, 38(3), 27-41.
- Al Atik, L. (2009). Calculation of Weighted Average 2008 NGA Models. Recuperado de: <http://peer.berkeley.edu/>
- Alfaro A. (2011). Dificultades en los estudios probabilísticos de amenaza en Colombia debido a la escasez de datos instrumentales. Revista Epsilon, No 17. Pp 45-59.
- Alfaro, A. (2012). Difficulties on PSHA in Colombia Because of Data Scarcity. Bulletin of International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, 46,145-152.
- Alfaro, A. (2013). Evaluación probabilista y determinista de la amenaza sísmica de Neiva-Colombia utilizando la nueva generación de ecuaciones de atenuación. Remitido a la revista Epsilon, No. 20.
- Alfaro, A. and R. Van Hissenhoven (2010) Sismo de Haití: Aspectos Sismológicos. Revista Épsilon N° 14: 113-120/ Enero-Junio 2010
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1984) Estudio General del Riesgo Sísmico de Colombia. Bogotá, 242 pp.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1984). Estudio general del riesgo sísmico de Colombia. Bogotá.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1996). Estudio general de amenaza sísmica de Colombia. Bogotá.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2009) Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Bogotá, 220 pp
- Benito B., Jiménez, M. "Peligrosidad Sísmica". E.U.I.T. de Topografía (UPM)
- Boore D. M., and Atkinson, G. M., 2008. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s, Earthquake Spectra 24, 99-138.

- Campbell K., Bozorgnia Y., (2008). "NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped linear elastic response spectra for periods ranking from 0.01 to 10 s.", *Earthquake Spectra*, EERI.
- Caneva A., Salcedo E., Van Hissenhoven R., Alfaro Andrés. "Estudio De Sismicidad Regional Para El Análisis De La Amenaza Sísmica De Bogotá". Enero-Junio de 2004
- Ceresis (Centro Regional de Sismología para América del Sur) (1996) Mapa Probabilístico de Peligro Sísmico de Sudamérica. Compilado por J. C. Castaño y M. H. Millán. Escala 1:5 000 000.
- Chiou B. and Youngs, R.2008. "An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra," *Earthq. Spectra* 24, 173-215.
- Correa, M. y Alfaro, A. (2011). Necesidad de la revisión de los estudios de amenaza sísmica a raíz del sismo de Tohoku del 2011. *Revista Tecnura*, 15(30), 82-92.
- Delavaud E., F. Scherbaum, N. Kuehn y T. Allen (2012) Testing the Global Applicability of Ground Motion Prediction Equations for Active Shallow Crustal Regions. *Bull Seism Soc Am*. Vol 102, No 2, pp 707-721, April 2012
- Douglas, J.A. (2001). Comprehensive Worldwide Summary of Strong-Motion Attenuation Relationships for Peak Ground Acceleration and Spectral Ordinates (1969 to 2000). Londres: Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- Douglas, J.A. (2002). Errata and additions to ESEE Report No. 01-1: A comprehensive worldwide for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000). Londres: Imperial College of Science Technology and Medicine.
- Estrada, G. y Ramírez, J.E. (1977). Mapa de riesgo sísmico para Colombia. Bogotá: Instituto Geofísico de los Andes Colombianos - Pontificia Universidad Javeriana.
- Felzer, K. (2006). Calculating the Gutenberg-Richter b value. *Proceedings of American Geophysical Union Meeting*.
- Fukushima, Y. y Tanaka, T. (1990). A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(4), 757-783.
- Gallego, M. (2000). Estimación del riesgo sísmico en la República de Colombia [tesis de maestría]. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Garzón P. "Evaluación de la Amenaza Sísmica de Colombia mediante análisis de valores extremos históricos". Tesis Posgrado Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- Goberna R., "Catalogo de Terremotos - Datos de Hipocentros e intensidades" 2009

- Goberna, J.R. (1988). The Historical Seismograms of Colombia en Historical Seismograms of the World. San Diego: W.H.K. Lee; H. Meyers & K Shimazaki. Academic Press, Inc.
- Gutenberg, B. y Richter, C. (1942). Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. Bull. Seism. Soc. Am, 32,163-191.
- Gutenberg, B. y Richter, C. (1956). Magnitude and Energy of Earthquake. Annali di Geofisica, 9, 1-15.
- Hanks, T.C. y Cornell, C.A. (1994). Probabilistic Seismic Hazard Analysis: A Beginner's Guide. En Proceedings of the. Fifth Symposium on Current Issues Related to Nuclear Power Plant Structures, Equipment and Piping. Carolina del Norte: North Carolina State University, Raleigh.
- Idriss I. (2008). "An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes," Earthq. Spectra 24, 217-242.
- International Seismological Centre (2012). On-line Bulletin. Recuperado de: <http://www.isc.ac.uk>, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom.
- Montes, N. y Sandoval, A. (2001). Base de datos de fallas activas de Colombia - Recopilación Bibliográfica. Bogotá: Ingeominas.
- NSR-10 Normas colombianas de diseño y construcción sismo-resistente NSR-10. Decreto 926 del 19 de marzo de 2010. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia.
- NSR-98 Normas colombianas de diseño y construcción sismo-resistente NSR-98.Ley 400 de 1997.
- Paris, G.; Machette, M.; Dart, R. y Haller, K. (2000). Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. USGS
- PEER Berkeley Database. Disponible en internet: www.peer-berkeley.edu.
- Ramírez, J.E. (1933). Earthquake history of Colombia. Bull. Seism. Soc. Am, 23, 13-22.
- Ramírez, J.E. (1971). The destruction of Bahia Solano, Colombia, on September 26, 1970 and the rejuvenation of a fault. . Bull. Seism. Soc. Am., 61. 1041-1049.
- Ramírez, J. E. (1975). Historia de los terremotos en Colombia. Bogotá: IGAC.
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10. Bogotá 2010

- Salcedo, E. (1992). Sismicidad y amenaza sísmica en Colombia [PhD tesis Doctoral]. Moscú: Universidad Estatal Lomonosov.
- Salcedo, E. (1993). "Mapa de Mmx del territorio de Colombia". En Memorias del Curso Construcción e Interventoría de la Mampostería Estructural de Colombia. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Stein S.; Geller, R. y Liu, M. (2011). Bad Assumptions or Bad Luck: Why Earthquake Hazard Maps Need Objective testing. *Seismological Research Letters*, 82(5), 623-626.
- Stein, S. y Okal, E. (2011). The Size of the 2011 Tohoku Earthquake Need Not Have Been a Surprise. *EOS*, 92(27), 227-228.
- United States Geological Survey (USGS) (2012). Disponible en http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html
- Utsu, T. (2002). "Relationships between magnitude scales" En *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior Committee on Education, International Association for Earthquake Engineering, W.H.K. Lee, H Kanamori y C. Kisslinger Editors, Academic Press, 733-746.
- Wessel, P. y Smith, W. (2004). *The Generic Mapping Tools Version 4 - Technical Reference and Cookbook*. Recuperado de <http://gmt.soest.hawaii.edu>
- Williams, Th. y Kelley, C. (2007). *Gnuplot - An Interactive Plotting Program*. Disponible en www.gnuplot.info

ANEXO 1
CATALOGOS SISMICOS
(ARCHIVO DIGITAL)

ANEXO 2
PROGRAMAS .FOR
(ARCHIVO DIGITAL)