

ECUACIONES DE ATENUACIÓN VS DATOS ACELEROGRÁFICOS

Samuel Martínez, Ingeniero Civil, INGEOMINAS. smartine@ingeomin.gov.co

Samuel Pachón, Ingeniero Civil, INGEOMINAS. spachon@ingeomin.gov.co

Anibal Ojeda, Ing. Civil, MIC, MPhil, Ph.D., INGEOMINAS. aojeda@ingeomin.gov.co

1. RESUMEN

La Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC), está funcionando continuamente desde 1993 y en la actualidad cuenta con noventa estaciones distribuidas en todo el país. Los acelerógrafos que componen esta red son todos del tipo digital y triaxiales. Como producto de esta instrumentación se han registrado aproximadamente dos mil acelerogramas, correspondientes a sismos de diferentes fuentes y magnitudes, en especial se destacan los sismos de Tauramena (19/01/95 ML=6.5), Calima (08/02/95 ML=6.6), Risaralda (19/08/95 ML=6.6), Sípi (19/02/97 ML=6.1), Cubarral (17/07/97 ML=5.4), Génova (02/09/97 ML=6.8), Landázuri (08/03/98 ML=5.4), Cimitarra (08/03/98 ML=5.5), Córdoba (25/01/99 ML=6.2), entre otros. El presente artículo compara la atenuación instrumental de la aceleración máxima, durante sismos intensos registrados por la RNAC, contra las diferentes ecuaciones de atenuación, como son las usadas en Colombia para el Estudio General de Amenaza Sísmica (INGEOMINAS et al 1997), las propuestas por algunos investigadores para Colombia y las usadas actualmente en diferentes partes del mundo con características tectónicas parecidas a las Colombianas. Como conclusión de estas comparaciones se puede decir que las atenuaciones instrumentales no presentan un patrón de atenuación radial como el propuesto por la mayoría de ecuaciones. Además de esto los picos de aceleración instrumentales son inferiores a los pronosticados por las ecuaciones. Con estas comparaciones se pueden deducir cuales ecuaciones funcionan mejor para las diferentes fuentes sísmicas estudiadas.

Palabras Claves: Atenuación de la energía sísmica, Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC), Ecuaciones de Atenuación.

2. INTRODUCCIÓN

La atenuación de la energía sísmica es una relación entre las propiedades del sismo, características de la respuesta y otros parámetros como son: la distancia al hipocentro o al epicentro del sismo, la magnitud del evento, el medio en que se propaga la onda, etc. Generalmente un sismo se puede representar por las siguientes características: magnitud, mecanismo de ruptura de la falla que lo produce, aceleración y frecuencia del movimiento ondulatorio. Estos dos últimos son de vital importancia para la ingeniería, ya que se utilizan en el cálculo de las fuerzas sísmicas que actúan sobre una estructura. La gran complejidad del proceso de desplazamiento de los trenes de onda y la disipación de la energía asociada, han obligado a los ingenieros que deben manejar el problema, a realizar estudios de regresión sobre muestras de aceleraciones pico, en función de la distancia y la magnitud del sismo que lo originó, con el fin de estimar los parámetros de aceleración, velocidad y desplazamiento máximos del suelo esperados en un sitio, ante un sismo de cierta magnitud y distancia conocida.

Las expresiones de atenuación cobran gran importancia al permitir estimar los valores máximos de movimiento del suelo en un sitio dado. Su utilidad se hace más evidente al efectuar estudios de riesgo sísmico, orientados a satisfacer las necesidades del ingeniero que debe proporcionar coeficientes o espectros para el diseño sísmico, en función de la importancia y del tipo de estructura, así como del lugar donde se proyecte construir.

En épocas anteriores, debido a la escasez de datos, los ingenieros debían recurrir a estudios de atenuación con base en datos de países que tuvieron redes de acelerógrafos funcionando desde tiempo atrás, o remitirse a las ecuaciones de atenuación de la aceleración que abundan en la bibliografía técnica internacional, corriendo el riesgo de utilizar alguna que tuviera un carácter demasiado local.

Fue así como la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) entró en funcionamiento en 1993 con unos cuantos equipos y solo hasta 1997 se terminó de instalar para llegar a una cifra de noventa acelerógrafos principalmente en la zona Andina y la costa Atlántica y Pacífica. Hoy en día la red tiene una base de datos amplia que abarca sismos desde 1993 hasta 2002, con los cuales se han llevado a cabo varios estudios de atenuación, para conocer la forma como ésta actúa en el territorio nacional.

3. ESTUDIOS DE ATENUACIÓN PARA COLOMBIA

3.1. Pulido, 1995

Pulido en 1995, realizó un estudio preliminar sobre la atenuación de la energía, usando los sismos de Tauramena (19/01/95; ML=6.5), registrado en dieciséis estaciones de la RNAC y el sismo de Calima (08/02/95; ML=6.6), registrado en veinticuatro estaciones de la RNAC. Este estudio fue muy superficial, ya que comparaba las aceleraciones máximas registradas durante los sismos por diferentes estaciones contra la distancia epicentral. Debido a la alta dispersión de los datos no se pudo apreciar la forma de la atenuación, por lo cual no se estableció una ecuación.

A pesar de la pobreza de los resultados, se hizo una evaluación de las intensidades (isosistas) del sismo de Calima, para tener una idea sobre la atenuación de la energía sísmica. Usualmente dicha evaluación se realiza con base en encuestas con las cuales se trata de cuantificar el grado de intensidad en la escala de Mercalli Modificada para diferentes lugares. Esta evaluación se basa en aspectos cualitativos respecto a la manera como el sismo es percibido por las personas. En este caso, y a manera de ejercicio, se realizó un gráfico de isosistas, con base en correlaciones realizadas por la Agencia Meteorológica de Japón, entre la aceleración máxima del terreno y la intensidad.

3.2 Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS, 1997)

Debido a la carencia de ecuaciones dentro del contexto nacional, en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia se emplearon las ecuaciones de atenuación de otras latitudes: Donovan1, Donovan2, McGuire y Promedio.

$$\begin{aligned} a &= 1320 e^{0.580M} (R + 25)^{-1.520} && \text{Donova 1} \\ a &= 1080 e^{0.500M} (R + 25)^{-1.320} && \text{Donova 2} \\ a &= 472.3 e^{0.640M} (R + 25)^{-1.301} && \text{Mac Guire} \\ a &= 957.43 e^{0.573M} (R + 25)^{-1.380} && \text{Promedio} \end{aligned}$$

Se debe tener presente que la aplicabilidad de los resultados de estas ecuaciones de atenuación, está restringida a las zonas donde se obtuvieron los datos, por lo anterior, es necesario contar con expresiones de atenuación propias de cada región, las cuales incluyan las características sismotectónicas de cada lugar.

3.3 Martínez y Chica, 1997

Martínez y Chica en 1997, realizaron ecuaciones de atenuación para diferentes parámetros: como aceleraciones este-oeste, norte-sur, la suma vectorial de las aceleraciones, las distancias epicentrales e hipocentrales y la magnitud local. Para la evaluación de las ecuaciones propuestas, se emplearon sismos ocurridos durante 1993 a 1995 en el territorio nacional y registrados por la RNAC. Una de las ecuaciones más representativas de este estudio por fue:

$$a = 260.26 e^{0.964M} (R + 25)^{-1.5828}$$

Esta ecuación es el resultado de sumar vectorialmente los cuadrados de las aceleraciones horizontales (N-S y E-O) y radicalizarlos al cuadrado, obteniéndose resultados de mayor confiabilidad, ya que no deja por fuera del estudio ninguna de las aceleraciones y a su vez le da un peso más grande a la aceleración mayor. Esta ecuación es válida para los siguientes parámetros de magnitud y distancia:.

Magnitud ML entre 4.1 y 6.6
Distancia Hipocentral entre 100 y 350 Km.

El estudio de Martínez y Chica fue un primer paso en el desarrollo de expresiones de atenuación para el territorio Colombiano. La principal limitante de estas ecuaciones se basa en no discriminar los datos según los criterios de profundidad del sismo y fuentes sismogénicas. Por otro lado, los datos se sometieron a procesos de descarte y pesaje a criterio de los autores, lo cual puede llevar a otros investigadores a obtener distintos resultados con la misma base de datos. Estas expresiones son representativas solo de la región Andina Colombiana, puesto que la mayoría de los datos fueron registrados en esa parte del territorio, contando con pocos datos en el borde Llanero y en la costa Atlántica.

3.4 Ojeda y Martínez, 1997

Ojeda y Martínez en 1997, desarrollaron dos modelos empíricos para la atenuación del pico de la aceleración horizontal en el terreno, producidos por sismos fuertes que afectan el territorio nacional de Colombia. Para ello se correlacionaron algunas variables de los sismos tales como: aceleración pico del terreno, magnitud Ms del sismo, distancia hipocentral, epicentral y profundidad. Los datos utilizados fueron los registrados por la RNAC y RSNC durante junio de 1993 a octubre de 1996.

Debido a las complejidades tectónicas que se presentan en el país, el estudio se dividió en dos partes, la primera considerando datos de regiones tectónicas (región tectónica activa: sistemas de fallas de la zona andina) y la segunda de datos obtenidos para la parte de Subducción. La ecuación propuesta para la zona Activa tiene validez para magnitudes Ms que van de 3.1 a 6.6 y distancias hipocentrales que van entre 20 y 400 Km. La ecuación correspondiente a la región de Subducción es válida para valores de Ms de 3.7 a 5.7, distancias hipocentrales de 100 a 500 Km. y profundidades entre los 100 y 170 Km.

$$\ln (PGA) = 5.3318 + 0.4779 Ms - 1.157 \ln (Rh+25) \text{ Zona Activa}$$

$$\ln (PGA) = 9.2487 + 0.4724 Ms - 1.696 \ln (Rh+25) \text{ Zona de Subducción}$$

Los resultados de esta investigación demostraron que en Colombia se presentan por lo menos dos regiones con comportamiento sismológico diferentes, por lo cual, futuros estudios de amenaza sísmica que se adelanten, deberán incluir consideraciones de este tipo.

3.5 Gallego y Ordaz, 1999.

En este estudio se desarrollaron procedimientos para estimar las aceleraciones máximas del suelo con base en modelos sismológicos del espectro radiado. Esto se repite para diversas distancias y magnitudes y las aceleraciones calculadas se comparan con las registradas por la RNAC, con el fin de determinar los parámetros relevantes del modelo sismológico del espectro y así poder llegar a ecuaciones de atenuación de la aceleración máxima del suelo, que cumplen con los requisitos de desviación y error medio mínimos. Con este método se pueden generar leyes de atenuación para sitios específicos, incluyendo los efectos locales.

3. 6. Otros estudios

En la actualidad se están desarrollando proyectos, los cuales estudian la atenuación del movimiento sísmico para Colombia mediante dos procedimientos. El primero a través de un modelo sismológico de radiación sísmica en el campo lejano y considerando un espacio físico anisotrópico; y el segundo empleando los dispositivos de inteligencia artificial específicamente la metodología conocida como redes neuronales artificiales.

En simulaciones realizadas para algunos eventos sísmicos de relevancia para el país, como: el sismo de Armenia - Quindío (25 de enero de 1999), sismo de Tauramena - Casanare (19 de enero de 1995), sismo de Calima - Valle (2 de agosto de 1995), sismo de Risaralda - Caldas (19 de agosto de 1995), etc, se puede observar un patrón de radiación que disminuye con la distancia, pero la forma de la atenuación varía de evento a evento reflejando la anisotropía de la atenuación, que coincide con la forma irregular de los contornos observados de isosistas.