
ANÁLISIS DE ECUACIONES DE ATENUACIÓN PARA EL PROYECTO AMENAZA SÍSMICA DEL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA

ATTENUATION EQUATIONS ANALYSIS FOR SEISMIC PROJECT THREATENS THE DEPARTMENT OF ANTIOQUIA

Luis Hernán Sánchez Arredondo,¹ Orlando Giraldo Bolívar² & Julian Múnera D³

*1. Ingeniero Geólogo, Esp., M.Sc. Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia
Grupo de Investigación, Centro Nacional de Geoestadística (CNG)*

*2. Ingeniero Civil, Esp. En Estructuras, Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia
Grupo de Investigación, Centro Nacional de Geoestadística (CNG)*

3. Estudiante Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín

Recibido para evaluación: 4 de Septiembre de 2011 / Aceptación: 11 de Mayo de 2012 / Recibida versión final: 10 de Junio de 2012

RESUMEN

En esta investigación se eligieron las ecuaciones de atenuación de acuerdo a la relación entre la aceleración del terreno y la Magnitud y distancia focal del sitio considerado al epicentro. Bajo estas dos condiciones y partiendo de las expresiones recopiladas por Douglas[1] y Mesa y Toro[2], se clasificaron un total de 18 ecuaciones de atenuación consistentes con la información y características deseadas. Adicionalmente se utilizaron los métodos gráficos, del coeficiente de variación y de la diferencia absoluta para seleccionar la expresión que más se ajustara a las condiciones geológicas de la región en estudio. De las comparaciones realizadas con los métodos anteriores se observa, que los modelos consultados en las referencias, reflejan una baja correlación con los resultados de aceleración obtenidos instrumentalmente a raíz del sismo de Armenia de enero 25 de 1999. Al observar los resultados y las divergencias obtenidas se optó por acudir a un método adicional denominado de comparación instrumental múltiple y observar sus resultados teniendo en cuenta, además del sismo de Armenia[3] (1999), los sismos de Murindó[5] (1992) y Mistrató[4] (1979) con sus respectivas distancias a la ciudad de Medellín. Se opta finalmente por usar la ecuación de Kawashima[1] (1984) para suelo blando, ya que fue la expresión que mejor se ajustó en general a la atenuación sísmica en el departamento de Antioquia.

PALABRAS CLAVE: Atenuación, aceleración, geoestadística, modelos, correlación.

ABSTRACT

In this research we chose the attenuation equations based on the relationship between ground acceleration and the magnitude and focal distance of the site considered the epicenter. Under these conditions and based on the expressions and compiled by Douglas[1], Mesa y Toro[2], is classified a total of 18 attenuation equations consistent with the information and characteristics desired. Additionally, graphical methods were used, the coefficient of variation and the absolute difference to select the expression that best fits the geological conditions of the region under study. From comparisons with previous methods shows that the models in the references consulted, reflect a low correlation with the results obtained instrumentally acceleration following the earthquake in Armenia in January 25, 1999. Looking at the results and the differences obtained were chosen to attend an additional method called multi-instrumental comparison and see the results taking into account also the earthquake in Armenia[3] (1999), Murindo quakes (1979) and Mistrato (1992) with their respective distances to the city of Medellin. Finally decide to use the equation of Kawashima[1] (1984) for soft soil, as was the expression that best fits the overall seismic attenuation in the department of Antioquia.

KEYWORDS: Attenuation, acceleration, geostatistics, models, correlation

1. INTRODUCCIÓN

El departamento de Antioquia está situado en el extremo noroccidental de Suramérica, lugar en el cual confluyen tres placas tectónicas (placa Nazca, placa de Suramérica y placa Caribe), lo que lo convierte en un lugar de alta complejidad tectónica.

La interacción de estas placas ha generado un complicado estado geodinámico de la región, que ha repercutido en la generación importante de sismos en cuatro de las nueve subregiones en que está dividido el departamento (Urabá, Occidente, Nordeste y Suroeste).

La actividad macrosísmica superficial más importante en los últimos veinte años la representan la región de Murindó y Vigía del Fuerte en la zona limítrofe con el departamento del Chocó[6]. El 17 y 18 de octubre de 1992 se presentaron dos sismos de magnitud 6.7 y 7.3 respectivamente que afectaron gran parte del territorio Antioqueño[5].

Paralelo a lo anterior, la falta de una red departamental de acelerógrafos que permitan visualizar el comportamiento sísmico regional y sus efectos en la población, dificultan aun más el problema e influyen decisivamente en la elaboración de mejores y reales especificaciones de diseño y construcción sísmica.

Esta carencia de instrumentación dificulta también la obtención de ecuaciones de atenuación más confiables y al mismo tiempo mejor ajustadas a la geología regional. El proceso de filtrado de las ondas sísmicas cuando pasan de un medio rocoso a otro se puede modelar más certeramente cuando se dispone de suficientes registros de aceleraciones.

En nuestro país, actualmente, no se cuenta con ecuaciones de atenuación apropiadas a cada región, para emplear en los estudios de amenaza sísmica. Es por esto que surge la necesidad de utilizar ecuaciones propuestas en otros sitios con el fin de modelar la variación de la aceleración producida por los sismos a diferentes distancias del epicentro y en diferentes regiones.

Por lo anterior, ha sido tradición en Colombia, utilizar ecuaciones de otros sitios que aun sin tener características geológicas similares a la nuestra, como por ejemplo California, México, Chile, se aplican indiscriminadamente lo que equivale a trabajar con un nivel alto de incertidumbre por haber sido desarrolladas en lugares con procesos tectónicos y geologías diferentes a la nuestra[6].

2. CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE ECUACIONES

Las ecuaciones de atenuación utilizadas se eligieron de acuerdo a los siguientes parámetros: que el cálculo de la aceleración utilizara la Magnitud Local y que el cálculo de la aceleración empleara la Distancia Focal. Bajo estas condiciones y partiendo de las expresiones recopiladas por Douglas[1] y por Mesa y Toro[2], se clasificaron un total de 18 ecuaciones de atenuación (Tabla 1). Además se incluyeron en el estudio dos ecuaciones obtenidas a partir de las regresiones exponencial y potencial realizadas con los datos de distancia epicentral y aceleración sísmica, obtenidos por los 16 instrumentos de la red de acelerógrafos nacional que registraron el sismo de Armenia el 25 de enero de 1999 (Figura 1 y Figura 2).

Tabla 1 Ecuaciones de la Atenuación utilizadas en este proyecto^[1]

| REFERENCIA | ECUACIÓN |
|--------------------------|--|
| Esteva -1967: | $\alpha = \frac{2000e^{0,8M}}{R^2}$ |
| Milne y Davenport -1969: | $\alpha = \frac{0,69e^{1,64M}}{1,1e^{1,10M} + \Delta^2}$ |
| Esteva - 1970: | $\alpha = \frac{1230e^{0,8M}}{(R + 25)^2}$ |

| REFERENCIA | ECUACIÓN |
|---|---|
| Davenport -1972: | $\alpha = \frac{273,4e^{0,8M}}{R^{1,64}}$ |
| Esteva-Villaverde -1973: | $\alpha = \frac{5600e^{0,8M}}{(R + 40)^2}$ |
| Donovan -1973: | $\alpha = \frac{1080e^{0,5M}}{(R + 25)^{1,32}}$ |
| McGuire -1974: | $\alpha = \frac{472,3e^{0,64M}}{(R + 25)^{1,301}}$ |
| Goldsack -1976: | $\alpha = \frac{4290e^{0,8M}}{\{[(R^2 + 20^2)]^{0,5} + 25\}^2}$ |
| Donovan y Bornstein -1978: | $\alpha = \frac{2154000R^{-2,1}e^{(0,046+0,445 \cdot \text{Log} R)M}}{(R + 25)^{(2,515-0,486 \cdot \text{Log} R)}}$ |
| Ohsaki -1980: | $\alpha = 10^{0,440M-1,331\text{Log}R+1,04}$ |
| Kawashima y otros -1984: (suelos blandos) | $\alpha = \frac{403,8 \times 10^{0,265M}}{(\Delta + 30)^{1,218}}$ |
| Kawashima y otros -1984: (suelos medianos) | $\alpha = \frac{232,5 \times 10^{0,313M}}{(\Delta + 30)^{1,218}}$ |
| Kawashima y otros -1984: (suelos firmes) | $\alpha = \frac{987,4 \times 10^{0,216M}}{(\Delta + 30)^{1,218}}$ |
| Crouse -1991: | $\text{Ln}(\alpha) = 6,36 + 1,76M - 2,73\text{Ln}(R + 1,58e^0,608M) + 0,00916 * 30$ |
| Huo&Hu -1991: | $\text{Log}(\alpha) = 1,135 + 0,462M - 1,322\text{Log}(R + 0,231e^0,626M)$ |
| Taylor -1992: | $\alpha = e^{0,339+0,455M-0,67\text{Ln}(R)-0,00207R} \times 100$ |
| Rinaldis -1998: | $\alpha = e^{5,57+0,82M-1,59\text{Ln}(R+15)-0,14-0,18}$ |
| Smit -2000: | $\alpha = 10^{0,72+0,44M-\text{Log}(R)-0,00231R}$ |

Figura 1. Modelo de atenuación con regresión exponencial

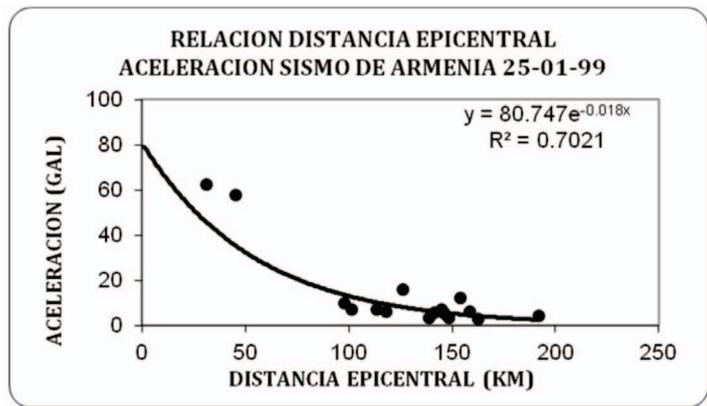
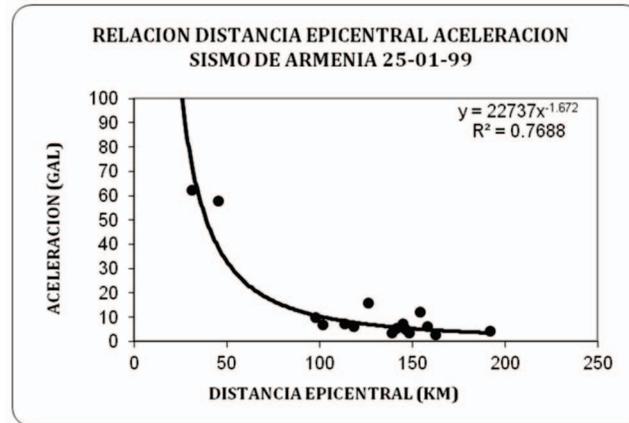


Figura 2. Modelo de atenuación con regresión exponencial

3. METODOLOGÍA

Con las ecuaciones indicadas en la Tabla 1 y los registros obtenidos para el sismo de Armenia[3] del 25 de enero de 1999 de magnitud 5,9 y profundidad focal de 35 km, se calcularon las aceleraciones respectivas para cada expresión. Los resultados fueron comparados con los registros obtenidos por medio de los 16 instrumentos ubicados a diferentes distancias focales (Anexo 1). A continuación se revisó la aproximación sobre cuál de las ecuaciones puede estar más cerca a los valores obtenidos con los instrumentos y finalmente cuál de estas es la que mejor se ajusta a las características del territorio Colombiano y pueden ser usadas en el estudio de amenaza sísmica para el departamento de Antioquia (ASDA).

Para hacer la comparación entre las aceleraciones obtenidas por medio de las ecuaciones de atenuación y los registros obtenidos mediante instrumentación se utilizaron los siguientes tres métodos:

3.1. El coeficiente de variación (Anexo 2)

Consiste en comparar el coeficiente de variación de las relaciones entre los valores calculados por cada ecuación y el valor registrado instrumentalmente por cada una de las 16 distancias a las cuales estaban ubicados los acelerógrafos. La expresión que indique el menor coeficiente de variación es la que mejor representa las condiciones de filtrado de las ondas sísmicas en la región considerada.

3.2. La diferencia absoluta (Anexo 3)

En este método se determinan diferencias entre los valores encontrados por cada una de las ecuaciones y las aceleraciones registradas instrumentalmente. A continuación se realiza la sumatoria de estos valores considerando como mejor estimación aquella ecuación que registre el valor mínimo de la sumatoria.

3.3. El método gráfico (Anexo 4)

En este método se grafican las ecuaciones consideradas en este informe y las ecuaciones de correlación obtenidas con la información instrumental. Luego se realiza una inspección gráfica para visualizar cual ecuación se ajusta mejor a los valores registrados con los equipos.

3.4. Registros instrumentales (Tabla 2)

Considerando los sismos de los cuales se tienen registros de aceleración en la región (Mistrató 1979, Murindó 1992 y Armenia 1999), se comparan los resultados instrumentales de los valores obtenidos con las diferentes ecuaciones.

La tabla 2 muestra como la ecuación de Kawashima (1984)¹, para suelo blando, es la que mejor se ajusta a los valores reportados por los acelerógrafos.

Tabla 2. Comparación de la aceleración en Gales de las ecuaciones con los registros instrumentales

| REFERENCIA | Murindó (ML= 7.2, R=149 km.) | Mistrató (ML= 6.3, R=120 Km.) | Armenia (ML= 5.9, R= 220 km.) |
|------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Esteva -1967: | 28.59 | 21.45 | 4.64 |
| Milne y Davenport -1969: | 3.67 | 1.36 | 0.22 |
| Esteva – 1970: | 12.89 | 9.04 | 2.30 |
| Davenport -1972: | 23.68 | 16.44 | 4.42 |
| Esteva-Villaverde -1973: | 49.75 | 33.79 | 9.29 |
| Donovan -1973: | 43.59 | 35.35 | 14.48 |
| McGuire -1974: | 57.61 | 41.05 | 16.06 |
| Goldsack -1976: | 44.28 | 30.81 | 7.96 |
| Donovan y Bornstein -1978: | 46.64 | 23.58 | 8.20 |
| Ohsaki -1980: | 16.10 | 8.72 | 2.52 |
| Kawashima y otros -1984: (B) | 58.91 | 42.19 | 17.74 |
| Kawashima y otros -1984:(M) | 75.17 | 48.74 | 19.61 |
| Kawashima y otros -1984:(F) | 63.93 | 50.68 | 22.29 |
| Crouse -1991: | 53.23 | 28.74 | 5.28 |
| Huo&Hu -1991: | 4.54 | 3.46 | 2.10 |
| Taylor -1992: | 95.50 | 77.84 | 35.15 |
| Rinaldis -1998: | 21.01 | 13.69 | 4.08 |
| Smit -2000: | 23.48 | 13.67 | 2.92 |

Donde “ML” es Magnitud Local y “R” es la distancia epicentral en kilómetros.

El sismo de Mistrató (1979), generó una aceleración pico de 0.055g en el registro de aceleraciones obtenido del acelerógrafo ubicado en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. Si se aplica la ecuación de Kawashima (1984) para este sismo la aceleración máxima horizontal en suelo blando es de 0.042g, es decir un 76% de la reportada por el equipo, mientras que para suelo firme es de 0.051g, o sea un 93 % del valor obtenido instrumentalmente.

Para el sismo del 18 de octubre de 1992 en Murindó, el acelerógrafo localizado en la sede de ISA de la ciudad de Medellín, registro una aceleración máxima horizontal de 0.030g el cual es un valor muy bajo si se tiene en cuenta los daños registrados. Si se aplica la ecuación de Kawashima (1984) para suelo blando se obtiene una aceleración máxima horizontal de 0.059g (97% por encima del registro en ISA) y para suelo firme de 0.064g, es decir un equivalente al 210%.

El sismo de Armenia (1999), fue registrado en 12 estaciones de la ciudad de Medellín. La aceleración máxima horizontal fue reportada en la estación El Tesoro con 0.013g y la mínima en la estación Facultad de Minas 0.027g. Aplicando Kawashima (1984)¹, para suelo blando se obtiene una aceleración máxima de 0.018g (36 % superior a la máxima) y para suelo firme 0.022g (69 % mayor a la máxima).

Como se puede notar la función de Kawashima (1984) es la que inicialmente mejor se adapta a las condiciones de atenuación en el departamento de Antioquia. Es importante anotar que el proyecto “Amenaza Sísmica del Departamento de Antioquia, Fase I”, corresponde a una valoración global y debido a que las zonas urbanas de la mayoría de los municipios antioqueños están localizados en zonas de llanura aluvial o en zonas de movimientos en masa, se optó por adoptar como fórmula de atenuación general la de Kawashima (1984) para suelo blando.

4. CONCLUSIONES

Del primer análisis realizado comparando los resultados de las ecuaciones de atenuación y las aceleraciones registradas con el sismo de Armenia (1999), se observa una baja correlación entre estos y los registros instrumentales. A este nivel, es evidente por tanto, que ninguna de las ecuaciones puede considerarse confiable para ser utilizada como modelo de atenuación para nuestra región, sin embargo, según el método del coeficiente de variación la ecuación que mejor se ajusta a los valores observados es la Milne & Davenport (1969). A pesar de dar un coeficiente de variación alto (39%) representa una aproximación aceptable a este nivel de la investigación. Según el método de las diferencias absolutas, la ecuación que muestra la mejor correlación con los datos observados es la propuesta por Luis Esteva en 1970^[1]. En el método gráfico, se puede apreciar como la ecuación de Milne & Davenport es la que mejor se ajusta a los valores obtenidos por los acelerógrafos.

Finalmente, las aproximaciones obtenidas se basan en el estado actual sobre atenuación sísmica en la región. La poca información disponible para tratar el tema es por ahora un obstáculo para la formulación de una ecuación de atenuación estadística confiable que refleje la geología regional. En ésta fase de la investigación, se muestra evidencia de la probable relación de los datos observados con los valores modelados matemáticamente usando aproximaciones de otras regiones.

REFERENCIAS

- [1] DOUGLAS, J. A., (2001) Comprehensive Worldwide Summary of Strong-Motion Attenuation Relationships for Peak Ground Acceleration and Spectral Ordinates (1969 to 2000). London: Imperial College of Science, Technology and Medicine. 239 p.
- [2] MESA, OSCAR, TORO GABRIEL, (1979). Algunas Consideraciones Acerca de la Estimación de las Fuerzas para el Diseño Sismo Resistente en la Ciudad de Medellín. Proyecto de grado. Universidad Nacional. Facultad de Minas. 134 p.
- [3] INGEOMINAS, (1999). Informe Terremoto del Quindío (Enero 25 de 1999) Informe Técnico-Científico. Vol II, Zonificación Sismo-Geotécnica para la Reconstrucción de Armenia. Ingeominas, Universidad del Quindío. 27 p.
- [4] NOHRA EMMA MONTES, ASTRID SANDOVAL, (2001). “Fuentes Sismogénicas que Contribuyen a la Amenaza Sísmica en el Eje Cafetero”. Monografía Ingeominas, Bogotá. 87 p.
- [5] MARTINEZ, J., PARRA, E., PARÍS, G., FORERO, C., BUSTAMANTE, M., CARDONA O. Y JARAMILLO, J., (1994). Los Sismos del Atrato Medio 17 y 18 de Octubre de 1992: Revista Ingeominas (Nº2), Bogotá, pp. 35-76.
- [6] ALFARO, A. (2007) “Incertidumbre de la Evaluación de la Amenaza Sísmica para Bogotá - Colombia”. Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia. pp. 73-87.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUIAR FALCONÍ ROBERTO, GARCÍA EDWIN, VILLAMARÍN JAVIER. Leyes de atenuación para sismos corticales y de subducción para el ecuador. Centro de investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército.
- ALFARO ANDRÉS J. Incertidumbres en la evaluación de la amenaza sísmica para Bogotá-Colombia. Revista Épsilon, julio-diciembre, numero 009. Universidad de la Salle. Bogotá Colombia. pp73-87. 2007
- FRANCO ENRIQUE, et al, (2002). Sismicidad registrada por la red sismológica nacional de Colombia durante el tiempo de operación. INGEOMINAS, Subdirección de Amenazas Geoambientales.
- GOMEZ COPERA AUGUSTO A., SALCEDO HURTADO ELKIN. Leyes de atenuación de la intensidad macrosísmica en Colombia.
- MCCORMAC JACK C. Structural Analysis Using classical and Matrix Methods. 4ta ed. (2007). Ed. Jhon wiley and Sons, Inc. New Jersey. 584 p.
- SARRIA, ALBERTO, (1995). Ingeniería sísmica. Ediciones Uniandes. Segunda edición.

ANEXOS 1

RESULTADOS DE LAS ACELERACIONES CALCULADAS POR MEDIO DE LAS ECUACIONES DE ATENUACIÓN

| Estación | R | Registrada | Regresión exponencial | Regresión Potencial | Esteva 1970 | Donovan 1973 | McGuire 1974 | Goldsack 1976 | Crouse 1991 |
|-----------|---------------|------------|-----------------------|---------------------|---|--------------|--------------|---------------|--------------|
| | Km | | | | Aceleración estimada (cm/s ²) | | | | |
| 1 | 30.99 | 62.17 | 45.80 | 72.94 | 44.01 | 128.61 | 109.60 | 125.66 | 138.39 |
| 2 | 45.33 | 57.83 | 35.23 | 38.62 | 27.89 | 90.94 | 81.47 | 86.59 | 90.50 |
| 3 | 98.05 | 9.65 | 13.42 | 10.63 | 9.11 | 38.86 | 39.35 | 30.76 | 28.36 |
| 4 | 101.62 | 6.95 | 12.57 | 10.01 | 8.61 | 37.20 | 37.91 | 29.11 | 26.62 |
| 5 | 113.39 | 7.13 | 10.14 | 8.33 | 7.20 | 32.50 | 33.77 | 24.50 | 21.82 |
| 6 | 118.25 | 6.11 | 9.28 | 7.77 | 6.72 | 30.84 | 32.29 | 22.91 | 20.18 |
| 7 | 126.44 | 15.75 | 7.98 | 6.95 | 6.02 | 28.34 | 30.03 | 20.55 | 17.78 |
| 8 | 138.91 | 3.31 | 6.36 | 5.94 | 5.14 | 25.13 | 27.10 | 17.60 | 14.82 |
| 9 | 141.37 | 5.5 | 6.08 | 5.76 | 4.98 | 24.57 | 26.58 | 17.09 | 14.32 |
| 10 | 144.92 | 7.22 | 5.69 | 5.53 | 4.78 | 23.79 | 25.86 | 16.40 | 13.63 |
| 11 | 146.25 | 4.99 | 5.56 | 5.45 | 4.70 | 23.51 | 25.60 | 16.15 | 13.38 |
| 12 | 148.44 | 3.3 | 5.34 | 5.31 | 4.59 | 23.06 | 25.18 | 15.75 | 12.99 |
| 13 | 154.24 | 11.93 | 4.80 | 4.98 | 4.29 | 21.94 | 24.12 | 14.76 | 12.03 |
| 14 | 158.34 | 5.89 | 4.45 | 4.77 | 4.10 | 21.20 | 23.42 | 14.12 | 11.41 |
| 15 | 162.73 | 2.57 | 4.11 | 4.56 | 3.91 | 20.45 | 22.71 | 13.48 | 10.79 |
| 16 | 192.18 | 4.26 | 2.40 | 3.45 | 2.93 | 16.38 | 18.79 | 10.11 | 7.62 |
| 17 | 100.00 | | 12.95 | 10.28 | 8.83 | 37.94 | 38.55 | 29.84 | 27.39 |

CONTINUACIÓN

RESULTADOS DE LAS ACELERACIONES CALCULADAS POR MEDIO DE LAS ECUACIONES DE ATENUACIÓN

| Estación | R | Registrada | esteva 1967 | esteva-Villaverde 1973 | Davenport 1972 | Kawashima suelo duro 1984 | Kawashima suelo medio 1984 | Kawashima suelo blando 1984 |
|-----------|---------------|---------------|---------------|------------------------|----------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| | Km | A estim.(gal) | A estim.(gal) | | | | | |
| 1 | 30.99 | 62.17 | 233.59 | 124.33 | 109.92 | 98.91 | 111.58 | 124.29 |
| 2 | 45.33 | 57.83 | 109.18 | 86.05 | 58.91 | 76.47 | 86.37 | 96.11 |
| 3 | 98.05 | 9.65 | 23.33 | 32.88 | 16.62 | 40.08 | 45.38 | 50.36 |
| 4 | 101.62 | 6.95 | 21.72 | 31.24 | 15.68 | 38.76 | 43.89 | 48.70 |
| 5 | 113.39 | 7.13 | 17.45 | 26.63 | 13.10 | 34.92 | 39.56 | 43.88 |
| 6 | 118.25 | 6.11 | 16.04 | 25.02 | 12.23 | 33.53 | 37.99 | 42.13 |
| 7 | 126.44 | 15.75 | 14.03 | 22.62 | 10.95 | 31.40 | 35.59 | 39.46 |
| 8 | 138.91 | 3.31 | 11.63 | 19.57 | 9.39 | 28.60 | 32.43 | 35.94 |
| 9 | 141.37 | 5.5 | 11.22 | 19.05 | 9.12 | 28.10 | 31.87 | 35.32 |
| 10 | 144.92 | 7.22 | 10.68 | 18.32 | 8.76 | 27.41 | 31.09 | 34.44 |
| 11 | 146.25 | 4.99 | 10.49 | 18.06 | 8.63 | 27.16 | 30.80 | 34.13 |
| 12 | 148.44 | 3.3 | 10.18 | 17.65 | 8.42 | 26.75 | 30.34 | 33.62 |
| 13 | 154.24 | 11.93 | 9.43 | 16.61 | 7.91 | 25.73 | 29.19 | 32.33 |
| 14 | 158.34 | 5.89 | 8.95 | 15.93 | 7.57 | 25.05 | 28.42 | 31.48 |
| 15 | 162.73 | 2.57 | 8.47 | 15.25 | 7.24 | 24.36 | 27.64 | 30.61 |
| 16 | 192.18 | 4.26 | 6.07 | 11.62 | 5.51 | 20.48 | 23.26 | 25.74 |
| 17 | 100.00 | | 22.43 | 31.97 | 16.09 | 16.09 | 44.56 | 49.44 |

| Estación | R | Registrada | Milne y Davenport 1969 | Donovan y Bornstein 1978 | OHSAKI 1980 | Huo&Hu 1991 | Rinaldis 1998 | Smit 2000 | Taylor 1992 |
|----------|--------|------------|------------------------|--------------------------|---------------|-------------|---------------|-----------|-------------|
| | Km | | | | A estim.(gal) | | | | |
| 1 | 30.99 | 62.17 | 6.52 | 77.68 | 37.72 | 5.69 | 54.64 | 0.83 | 193.25 |
| 2 | 45.33 | 57.83 | 3.96 | 50.44 | 22.31 | 4.78 | 35.49 | 0.55 | 145.40 |
| 3 | 98.05 | 9.65 | 1.06 | 20.24 | 7.69 | 3.24 | 13.08 | 0.22 | 77.75 |
| 4 | 101.62 | 6.95 | 0.99 | 19.40 | 7.32 | 3.18 | 12.44 | 0.21 | 75.35 |
| 5 | 113.39 | 7.13 | 0.81 | 17.07 | 6.29 | 3.00 | 10.68 | 0.19 | 68.33 |
| 6 | 118.25 | 6.11 | 0.75 | 16.26 | 5.94 | 2.94 | 10.07 | 0.18 | 65.77 |
| 7 | 126.44 | 15.75 | 0.66 | 15.05 | 5.41 | 2.83 | 9.16 | 0.16 | 61.82 |
| 8 | 138.91 | 3.31 | 0.55 | 13.52 | 4.75 | 2.69 | 8.01 | 0.14 | 56.57 |
| 9 | 141.37 | 5.5 | 0.53 | 13.26 | 4.64 | 2.67 | 7.81 | 0.14 | 55.62 |
| 10 | 144.92 | 7.22 | 0.51 | 12.89 | 4.48 | 2.63 | 7.53 | 0.14 | 54.31 |
| 11 | 146.25 | 4.99 | 0.50 | 12.76 | 4.43 | 2.62 | 7.43 | 0.13 | 53.83 |
| 12 | 148.44 | 3.3 | 0.48 | 12.55 | 4.34 | 2.60 | 7.28 | 0.13 | 53.05 |

| Estación | R | Registrada | Milne y Davenport 1969 | Donovan y Bornstein 1978 | OHSAKI 1980 | Huo&Hu 1991 | Rinaldis 1998 | Smit 2000 | Taylor 1992 |
|-----------|---------------|------------|---------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|--------------|----------------|
| | Km | | A estim.(gal) | | | | | | |
| 13 | 154.24 | 11.93 | 0.45 | 12.02 | 4.11 | 2.55 | 6.88 | 0.13 | 51.09 |
| 14 | 158.34 | 5.89 | 0.43 | 11.68 | 3.97 | 2.51 | 6.63 | 0.12 | 49.78 |
| 15 | 162.73 | 2.57 | 0.40 | 11.33 | 3.82 | 2.47 | 6.37 | 0.12 | 48.43 |
| 16 | 192.18 | 4.26 | 0.29 | 9.46 | 3.04 | 2.26 | 4.99 | 0.09 | 40.76 |
| 17 | 100.00 | | 1.02 | 19.77 | 7.48 | 3.21 | 12.72 | 0.22 | 76.42 |

ANEXO 2 RESULTADOS MÉTODO DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN

| | Esteva 1970 | Donovan 1973 | McGuire 1974 | Goldsack 1976 | Crouse 1991 | Taylor 1992 | Esteva 1967 |
|---------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
| Aceleración estimada/aceleración real | | | | | | | |
| | 0.7 | 2.1 | 1.8 | 2.0 | 2.2 | 3.1 | 3.8 |
| | 0.5 | 1.6 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 2.5 | 1.9 |
| | 0.9 | 4.0 | 4.1 | 3.2 | 2.9 | 8.1 | 2.4 |
| | 1.2 | 5.4 | 5.5 | 4.2 | 3.8 | 10.8 | 3.1 |
| | 1.0 | 4.6 | 4.7 | 3.4 | 3.1 | 9.6 | 2.4 |
| | 1.1 | 5.0 | 5.3 | 3.7 | 3.3 | 10.8 | 2.6 |
| | 0.4 | 1.8 | 1.9 | 1.3 | 1.1 | 3.9 | 0.9 |
| | 1.6 | 7.6 | 8.2 | 5.3 | 4.5 | 17.1 | 3.5 |
| | 0.9 | 4.5 | 4.8 | 3.1 | 2.6 | 10.1 | 2.0 |
| | 0.7 | 3.3 | 3.6 | 2.3 | 1.9 | 7.5 | 1.5 |
| | 0.9 | 4.7 | 5.1 | 3.2 | 2.7 | 10.8 | 2.1 |
| | 1.4 | 7.0 | 7.6 | 4.8 | 3.9 | 16.1 | 3.1 |
| | 0.4 | 1.8 | 2.0 | 1.2 | 1.0 | 4.3 | 0.8 |
| | 0.7 | 3.6 | 4.0 | 2.4 | 1.9 | 8.5 | 1.5 |
| | 1.5 | 8.0 | 8.8 | 5.2 | 4.2 | 18.8 | 3.3 |
| | 0.7 | 3.8 | 4.4 | 2.4 | 1.8 | 9.6 | 1.4 |
| PROM | 0.91 | 4.29 | 4.58 | 3.08 | 2.66 | 9.47 | 2.28 |
| DESVEST | 0.4 | 2.0 | 2.2 | 1.3 | 1.1 | 4.8 | 0.9 |
| COEFICIENTE VARIACION | 41.4 | 46.5 | 49.0 | 42.8 | 40.8 | 50.9 | 40.3 |

CONTINUACIÓN RESULTADOS MÉTODO DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN

| Regresión Potencial | Kawashima y otros 1984 | Kawashima y otros 1984 | Kawashima y otros 1984 | Milne y Davenport 1969 | Donovan y Bornstein 1978 | OHSAKI 1980 |
|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------|
| Aceleración estimada/aceleración real | | | | | | |
| 1.2 | 1.6 | 1.8 | 2.0 | 0.1 | 1.25 | 0.6 |
| 0.7 | 1.3 | 1.5 | 1.7 | 0.1 | 0.87 | 0.4 |
| 1.1 | 4.2 | 4.7 | 5.2 | 0.1 | 2.10 | 0.8 |
| 1.4 | 5.6 | 6.3 | 7.0 | 0.1 | 2.79 | 1.1 |
| 1.2 | 4.9 | 5.5 | 6.2 | 0.1 | 2.39 | 0.9 |
| 1.3 | 5.5 | 6.2 | 6.9 | 0.1 | 2.66 | 1.0 |
| 0.4 | 2.0 | 2.3 | 2.5 | 0.0 | 0.96 | 0.3 |
| 1.8 | 8.6 | 9.8 | 10.9 | 0.2 | 4.09 | 1.4 |
| 1.0 | 5.1 | 5.8 | 6.4 | 0.1 | 2.41 | 0.8 |
| 0.8 | 3.8 | 4.3 | 4.8 | 0.1 | 1.79 | 0.6 |
| 1.1 | 5.4 | 6.2 | 6.8 | 0.1 | 2.56 | 0.9 |
| 1.6 | 8.1 | 9.2 | 10.2 | 0.1 | 3.80 | 1.3 |
| 0.4 | 2.2 | 2.4 | 2.7 | 0.0 | 1.01 | 0.3 |
| 0.8 | 4.3 | 4.8 | 5.3 | 0.1 | 1.98 | 0.7 |

| | Regresión Potencial | Kawashima y otros 1984 | Kawashima y otros 1984 | Kawashima y otros 1984 | Milne y Davenport 1969 | Donovan y Bornstein 1978 | OHSAKI 1980 |
|----------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------|
| | 1.8 | 9.5 | 10.8 | 11.9 | 0.2 | 4.41 | 1.5 |
| | 0.8 | 4.8 | 5.5 | 6.0 | 0.1 | 2.22 | 0.7 |
| PROM | 1.09 | 4.80 | 5.44 | 6.03 | 0.10 | 2.33 | 0.83 |
| DESVEST | 0.4 | 2.4 | 2.8 | 3.0 | 0.0 | 1.1 | 0.4 |
| COEFICIENTE VARIACION | 39.2 | 50.5 | 50.5 | 50.5 | 39.0 | 46.2 | 42.7 |

CONTINUACIÓN RESULTADOS MÉTODO DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN

| | Huo&Hu 1991 | Rinaldis 1998 | Smit 2000 | esteva- Villaverde 1973 | Davenport 1972 | Regresión exponencial |
|---------------------------------------|----------------|------------------|--------------|----------------------------|-------------------|--------------------------|
| Aceleración estimada/aceleración real | | | | | | |
| | 0.1 | 0.9 | 0.01 | 2.0 | 1.8 | 0.7 |
| | 0.1 | 0.6 | 0.01 | 1.5 | 1.0 | 0.6 |
| | 0.3 | 1.4 | 0.02 | 3.4 | 1.7 | 1.4 |
| | 0.5 | 1.8 | 0.03 | 4.5 | 2.3 | 1.8 |
| | 0.4 | 1.5 | 0.03 | 3.7 | 1.8 | 1.4 |
| | 0.5 | 1.6 | 0.03 | 4.1 | 2.0 | 1.5 |
| | 0.2 | 0.6 | 0.01 | 1.4 | 0.7 | 0.5 |
| | 0.8 | 2.4 | 0.04 | 5.9 | 2.8 | 1.9 |
| | 0.5 | 1.4 | 0.03 | 3.5 | 1.7 | 1.1 |
| | 0.4 | 1.0 | 0.02 | 2.5 | 1.2 | 0.8 |
| | 0.5 | 1.5 | 0.03 | 3.6 | 1.7 | 1.1 |
| | 0.8 | 2.2 | 0.04 | 5.3 | 2.6 | 1.6 |
| | 0.2 | 0.6 | 0.01 | 1.4 | 0.7 | 0.4 |
| | 0.4 | 1.1 | 0.02 | 2.7 | 1.3 | 0.8 |
| | 1.0 | 2.5 | 0.05 | 5.9 | 2.8 | 1.6 |
| | 0.5 | 1.2 | 0.02 | 2.7 | 1.3 | 0.6 |
| PROM | 0.45 | 1.4 | 0.0 | 3.39 | 1.71 | 1.12 |
| DESVEST | 0.2 | 0.6 | 0.0 | 1.5 | 0.7 | 0.5 |
| COEFICIENTE VARIACION | 55.9 | 43.7 | 45.6 | 44.1 | 39.4 | 44.9 |

ANEXO 3 RESULTADOS METODO DE LA DIFERENCIA ABSOLUTA

| Esteva-70 | Donovan-73 | McGuire-74 | Goldsack-76 ae/ar | Crouse-91 | Taylor-92 | esteva-67 |
|--------------|---------------|---------------|----------------------|---------------|----------------|---------------|
| 18.16 | 66.44 | 47.43 | 63.49 | 76.22 | 131.08 | 171.42 |
| 29.94 | 33.11 | 23.64 | 28.76 | 32.67 | 87.57 | 51.35 |
| 0.54 | 29.21 | 29.70 | 21.11 | 18.71 | 68.10 | 13.68 |
| 1.66 | 30.25 | 30.96 | 22.16 | 19.67 | 68.40 | 14.77 |
| 0.07 | 25.37 | 26.64 | 17.37 | 14.69 | 61.20 | 10.32 |
| 0.61 | 24.73 | 26.18 | 16.80 | 14.07 | 59.66 | 9.93 |
| 9.73 | 12.59 | 14.28 | 4.80 | 2.03 | 46.07 | 1.72 |
| 1.83 | 21.82 | 23.79 | 14.29 | 11.51 | 53.26 | 8.32 |
| 0.52 | 19.07 | 21.08 | 11.59 | 8.82 | 50.12 | 5.72 |
| 2.44 | 16.57 | 18.64 | 9.18 | 6.41 | 47.09 | 3.46 |
| 0.29 | 18.52 | 20.61 | 11.16 | 8.39 | 48.84 | 5.50 |
| 1.29 | 19.76 | 21.88 | 12.45 | 9.69 | 49.75 | 6.88 |
| 7.64 | 10.01 | 12.19 | 2.83 | 0.10 | 39.16 | 2.50 |
| 1.79 | 15.31 | 17.53 | 8.23 | 5.52 | 43.89 | 3.06 |
| 1.34 | 17.88 | 20.14 | 10.91 | 8.22 | 45.86 | 5.90 |
| 1.33 | 12.12 | 14.53 | 5.85 | 3.36 | 36.50 | 1.81 |
| 8.83 | 37.94 | 38.55 | 29.84 | 27.39 | 76.42 | 22.43 |
| 88.00 | 410.69 | 407.76 | 290.84 | 267.47 | 1012.94 | 338.79 |

CONTINUACIÓN

RESULTADOS METODO DE LA DIFERENCIA ABSOLUTA

| Regresión Potencial | Kawashima 1984 suelo duro | Kawashima 1984 suelo medio | Kawashima 1984 suelo blando | Milne y Davenport-69 | Donovan y Bornstein-78 | OHSAKI-80 |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------|-----------|
| | | | ae/ar | | | |
| 10.77 | 36.74 | 49.41 | 62.12 | 55.65 | 15.51 | 24.45 |
| 19.21 | 18.64 | 28.54 | 38.28 | 53.87 | 7.39 | 35.52 |
| 0.98 | 30.43 | 35.73 | 40.71 | 8.59 | 10.59 | 1.96 |
| 3.06 | 31.81 | 36.94 | 41.75 | 5.96 | 12.45 | 0.37 |
| 1.20 | 27.79 | 32.43 | 36.75 | 6.32 | 9.94 | 0.84 |
| 1.66 | 27.42 | 31.88 | 36.02 | 5.36 | 10.15 | 0.17 |
| 8.80 | 15.65 | 19.84 | 23.71 | 15.09 | 0.70 | 10.34 |
| 2.63 | 25.29 | 29.12 | 32.63 | 2.76 | 10.21 | 1.44 |
| 0.26 | 22.60 | 26.37 | 29.82 | 4.97 | 7.76 | 0.86 |
| 1.69 | 20.19 | 23.87 | 27.22 | 6.71 | 5.67 | 2.74 |
| 0.46 | 22.17 | 25.81 | 29.14 | 4.49 | 7.77 | 0.56 |
| 2.01 | 23.45 | 27.04 | 30.32 | 2.82 | 9.25 | 1.04 |
| 6.95 | 13.80 | 17.26 | 20.40 | 11.48 | 0.09 | 7.82 |
| 1.12 | 19.16 | 22.53 | 25.59 | 5.46 | 5.79 | 1.92 |
| 1.99 | 21.79 | 25.07 | 28.04 | 2.17 | 8.76 | 1.25 |
| 0.81 | 16.22 | 19.00 | 21.48 | 3.97 | 5.20 | 1.22 |
| 10.28 | 16.09 | 44.56 | 49.44 | 1.02 | 19.77 | 7.48 |
| 73.89 | 389.23 | 495.40 | 573.43 | 196.70 | 147.00 | 99.99 |

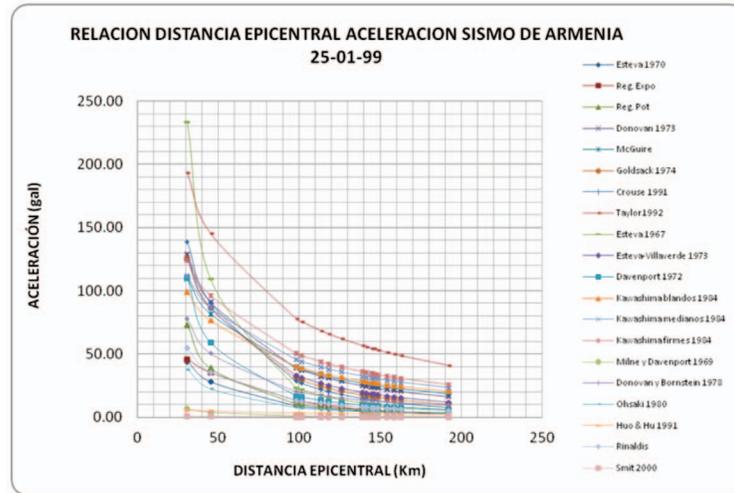
CONTINUACIÓN

RESULTADOS METODO DE LA DIFERENCIA ABSOLUTA

| esteva-villaverde-73 | Davenport-72 | Regresión Exponencial | Huo& Hu-91 | Rinaldis-98 | Smit-00 |
|----------------------|--------------|-----------------------|------------|-------------|---------|
| | | | ae/ar | | |
| 62.16 | 47.75 | 16.37 | 56.48 | 7.53 | 61.34 |
| 28.22 | 1.08 | 22.60 | 53.05 | 22.34 | 57.28 |
| 23.23 | 6.97 | 3.77 | 6.41 | 3.43 | 9.43 |
| 24.29 | 8.73 | 5.62 | 3.77 | 5.49 | 6.74 |
| 19.50 | 5.97 | 3.01 | 4.13 | 3.55 | 6.94 |
| 18.91 | 6.12 | 3.17 | 3.17 | 3.96 | 5.93 |
| 6.87 | 4.80 | 7.77 | 12.92 | 6.59 | 15.59 |
| 16.26 | 6.08 | 3.05 | 0.62 | 4.70 | 3.17 |
| 13.55 | 3.62 | 0.58 | 2.83 | 2.31 | 5.36 |
| 11.10 | 1.54 | 1.53 | 4.59 | 0.31 | 7.08 |
| 13.07 | 3.64 | 0.57 | 2.37 | 2.44 | 4.86 |
| 14.35 | 5.12 | 2.04 | 0.70 | 3.98 | 3.17 |
| 4.68 | 4.02 | 7.13 | 9.38 | 5.05 | 11.80 |
| 10.04 | 1.68 | 1.44 | 3.38 | 0.74 | 5.77 |
| 12.68 | 4.67 | 1.54 | 0.10 | 3.80 | 2.45 |
| 7.36 | 1.25 | 1.86 | 2.00 | 0.73 | 4.17 |
| 31.97 | 16.09 | 12.95 | 3.21 | 12.72 | 0.22 |
| 318.23 | 129.13 | 94.99 | 169.10 | 89.66 | 211.30 |

ANEXO 4

RESULTADOS METODO GRÁFICO



AGRADECIMIENTOS: Este artículo es una contribución al proyecto 9536 de la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (DIME).

