

# CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE SITIO EN EL GABRO DE MEDELLÍN

Iván Fernando Otálvaro Calle<sup>1</sup>  
Manuel Roberto Villarraga Herrera<sup>2</sup>  
Francisco Javier Nanclares<sup>3</sup>

Recibido: 05/09/2007

Aceptado: 31/10/2008

## RESUMEN

Cerca del 90% de la población colombiana ocupa la región Andina del país, zona donde se localiza casi la totalidad de la industria, que se caracteriza por una amenaza sísmica intermedia y alta, en la cual se pueden presentar aceleraciones en roca superiores a 0.25 g, de acuerdo con el estudio general de amenaza sísmica (AIS 300, 1998). Sumado a esto la ciudad de Medellín desde el punto de vista geotécnico es caracterizada por la variedad de materiales parentales y tipos de suelo originados por procesos geomorfológicos diferenciados; además es común encontrar diferentes accidentes topográficos denotados por las laderas, lomos y cerros, haciendo de Medellín un ambiente sismo-geotécnico complejo. Esta variedad genera múltiples contrastes de materiales geotécnicos y propiedades que modifican la propagación de las ondas sísmicas, generando un nivel de amenaza alto en la superficie del terreno. Este trabajo es motivado por las condiciones descritas y por el desarrollo vertiginoso de la Ciudad hacia las laderas. En este trabajo es revisada la respuesta dinámica de sitio al interior de la zona homogénea 12 de la Microzonificación Sísmica de Medellín (GSM, 1999), a partir de modelos de propagación en una dimensión.

**Palabras clave:** respuesta de sitio, dinámica de suelos, suelos tropicales, gabro.

- 1 Profesor Asistente Departamento de Ciencias de la Ingeniería y la Producción, Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali. Ingeniero civil, magister en Ingeniería - Geotecnia. Dirección: calle 17 No. 86-96 apartamento 701F. Teléfono residencia (2) 333 97 06, teléfono oficina, (2) 321 82 00 ext. 665, teléfono móvil 313 733 71 78, e-mail: ifotalvaro@puj.edu.co
- 2 Gerente INTEINSA S.A. Ingeniero civil, maestro en Ingeniería. Dirección: carrera 43ª No. 14-109 oficina 504 Teléfono oficina 2681284, teléfono móvil 310 449 81 50, e-mail: mrvillarraga@inteinsa.com.co
- 3 Egresado de la Universidad de Medellín. Ingeniero Civil, master of Sciences, aspirante a doctor de la Universidad Nacional de Colombia. Dirección: Teléfono residencia 2507961, teléfono móvil 316 404 74 58, e-mail: fjanclara@unalmed.edu.co

## CHARACTERIZATION OF THE DYNAMIC RESPONSE OF SITE ON MEDELLIN 'S GABBRO

### ABSTRACT

About 90% of Colombian population occupies the Andean region, where most of the country's industry is located; it is characterized by medium and high seismic hazard in which rock acceleration can occur over 0.25 g, according to the 1984 General Seismic Hazard Study (AIS 300, 1998). Additionally, Medellin city, from a geotechnical point of view, is characterized by the variety of parental materials and types of soils originated by distinctive geomorphologic processes; besides, it is common to find different topographic features in slopes, ridges, and hills, which make of Medellin a complex seismic geotechnical environment. This variety of features generates multiple contrasts of geotechnical materials which modify propagation of seismic waves, thus generating a high hazard level in the land surface. This research was motivated by above described conditions and by the growing development of the city up the hills. This research makes a review of dynamic response of site in the homogeneous zone No. 12 of Medellin Seismic Microzoning (GSM, 1999).

**Keywords:** Site response, dynamics of soils, tropical soils, gabbro.

## INTRODUCCIÓN

La importancia de la respuesta del terreno ante sollicitaciones cíclicas y los efectos de modificación de las ondas sísmicas han sido advertidas tiempo atrás, y como respuesta a ello se ha adelantado un número importante de investigaciones que, a su vez, son el insumo de las disposiciones y normativas para el diseño sísmo-resistente de las obras civiles. Es de conocimiento general que sismos como el de Ciudad de México de 1985, Loma Prieta de 1989, Northridge de 1994 y Kobe de 1995, en el nivel mundial; y Viejo Caldas y Tumaco de 1979, Popayán de 1983, Murindó de 1992, Tauramena de 1995 y Armenia de 1999, en el nivel nacional, han producido daños considerables a la infraestructura civil y pérdida de vidas debido a la combinación de las condiciones geológico-geotécnicas locales con prácticas inadecuadas de diseño y construcción.

Zeevaert (1984) afirma que para el análisis del comportamiento sísmico del suelo se requiere conocer:

- El período de vibración del depósito de suelo.
- La amplitud del desplazamiento sísmico en la superficie del terreno.
- La magnitud del esfuerzo cortante inducido al suelo.
- La aceleración máxima del terreno.
- El espectro del diseño sísmico.

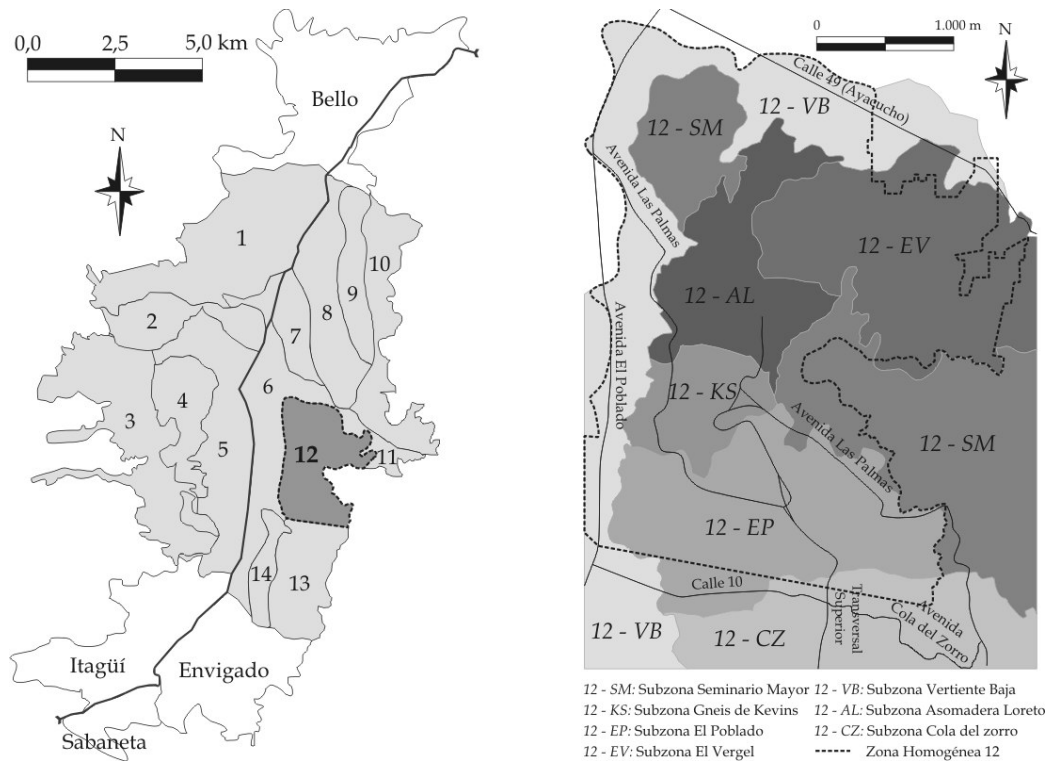
El mismo autor anota que los dos últimos requieren registros de temblores ocurridos en la zona u observaciones del comportamiento de las estructuras o el suelo durante movimientos fuertes, mientras que los primeros pueden estimarse a partir de las propiedades dinámicas de los suelos. De la reflexión anterior se puede concluir que se requiere, por un lado, la caracterización de los materiales de suelo involucrados, y por otro, el efecto de las sacudidas sísmicas en los movimientos del terreno. Las propiedades dinámicas del suelo dependen fundamentalmente del estado de esfuerzos del suelo y del nivel de deformación inducido; por otro lado, el fenómeno

de propagación de ondas es controlado por la rigidez, el amortiguamiento, la relación de Poisson y el peso unitario del suelo (Kramer, 1996).

En este trabajo se presenta la modelación de la respuesta de sitio, en los suelos de gabro *in situ* y transportados, originados a partir del Stock de San Diego, en el interior de la zona homogénea 12, ZH-12, transición anfíbolita-gabro de Medellín de la instrumentación y microzonificación sísmica de Medellín (GSM, 1999). La generación de las secuencias de suelos, necesarias para la modelación de la respuesta de sitio, fue obtenida a través de la actualización de la base de datos geotécnicos recopilada por Cano et al. (2001) en la ZH-12, teniendo en cuenta los diferentes materiales geotécnicos en profundidad, clasificados a partir del origen geológico y la intensidad de meteorización, agrupados de acuerdo con la subdivisión preliminar de la ZH-12 mostrada en la figura 1. Los análisis de la respuesta de sitio se efectuaron teniendo en cuenta la variabilidad de las propiedades de los materiales y sus espesores.

## 1. CONDICIONES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

La ZH-12 se caracteriza por la cobertura de depósitos de vertiente sobre suelos y transiciones suelo-roca *in situ*, derivados fundamentalmente de gabro, aunque es posible encontrar localmente materiales *in situ* de gabro aflorando como ventanas erosivas de tope redondeado, sobre algunos de los depósitos de vertiente. El gabro corresponde a una roca de tipo ígneo, plutónico, formada por cristalización; es maciza, masiva, de grano grueso, isogranular y holocristalina, presenta contactos gradacionales con anfíbolitas y dunitas. En el sector tanto la roca como el suelo presentan discontinuidades rellenas de cuarzo, poco alteradas y de color blanco lechoso; los minerales principales, en la roca, son plagioclasa, hornblenda y pirita; Otálvaro (2005) indica que los minerales presentes en el suelo corresponden a los minerales de la roca y algunos productos de la alteración de éstos, y pertenecen principalmente a caolinita y goetita.



Fuente: Cano *et al.* (2001)

**Figura 1.** Izquierda, zonas homogéneas de la Instrumentación y Microzonificación Sísmica de Medellín; Derecha, subdivisión de acuerdo con el perfil geotécnico de la ZH-12.

## 2. PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO

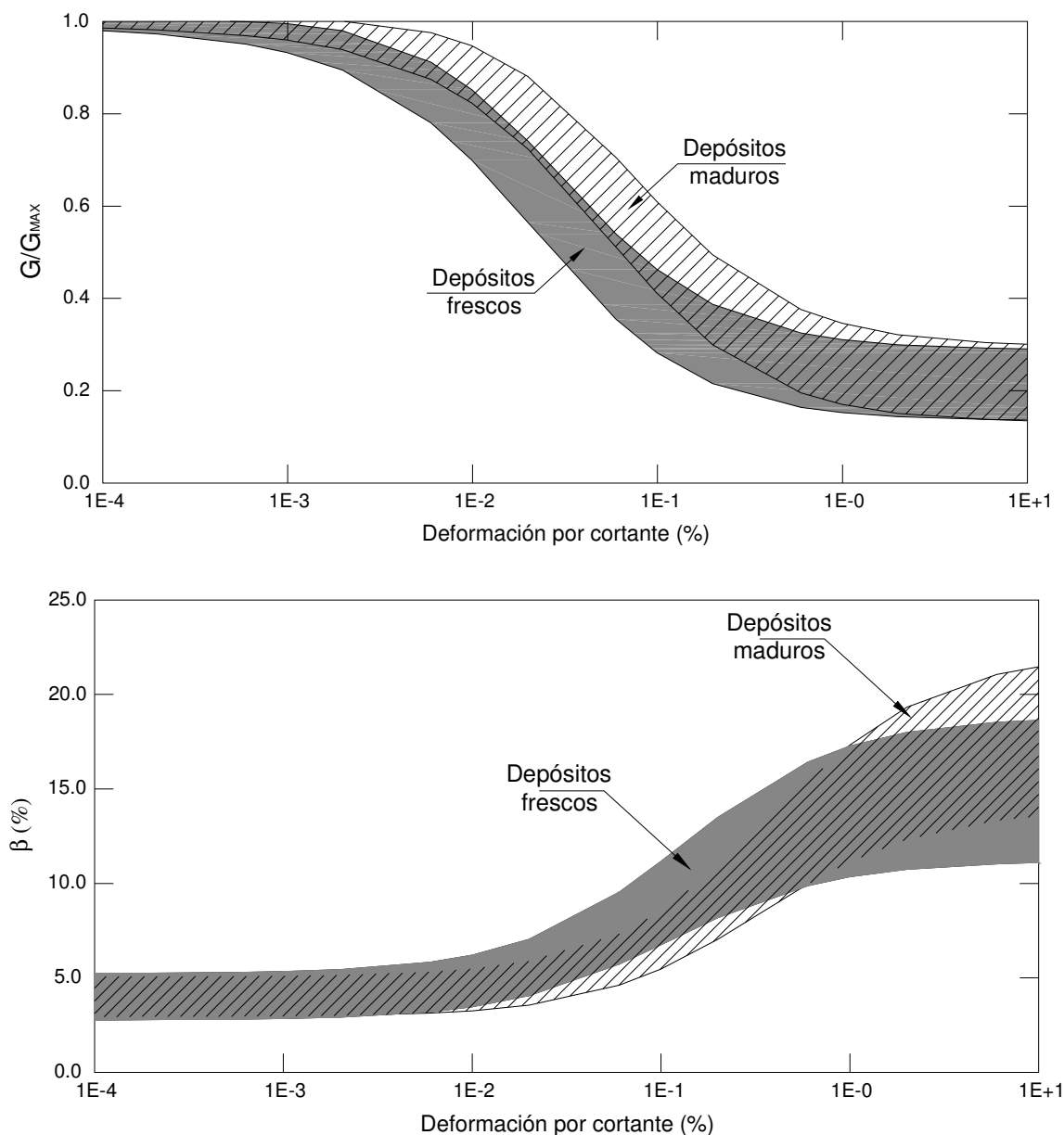
Las propiedades dinámicas del suelo fueron definidas a partir de los ensayos de campo y laboratorio efectuados por diferentes autores en la ZH-12 (GSM, 1999; Otálvaro *et al.*, 2004; Osorio *et al.*, 2004; Otálvaro, 2005). En general el comportamiento dinámico de los suelos originados a partir de la meteorización del gabro es influenciado por la mineralogía, la estructura, la presión de confinamiento, el nivel de deformación y el grado de saturación, entre los factores más relevantes. Debido a este número importante de elementos, en el comportamiento se definió una serie de bandas teniendo en cuenta ensayos dinámicos efectuados bajo diferentes condiciones de confinamiento y saturación, para niveles de meteorización desde

transición suelo roca, grado IV según la escala propuesta por The Geological Society (Fookes, 1997), hasta suelo residual, grado VI. En la figura 2 se presentan las bandas obtenidas para la degradación del módulo de rigidez a cortante y amortiguamiento para los depósitos de gabro, que ocasionalmente suelen tener bloques de anfíbolita o dunita. En la figura 3 se presentan las bandas obtenidas para la degradación del módulo de rigidez a cortante y amortiguamiento para los suelos *in situ* de gabro. En la figura se observa que la banda de mayor rigidez corresponde al nivel de meteorización V, y la de menor rigidez al nivel VI, muestra con mayor intensidad de meteorización.

Adicionalmente, en las pruebas dinámicas recopiladas los ensayos sobre el nivel V se efectuaron en promedio con un nivel de confinamiento superior a

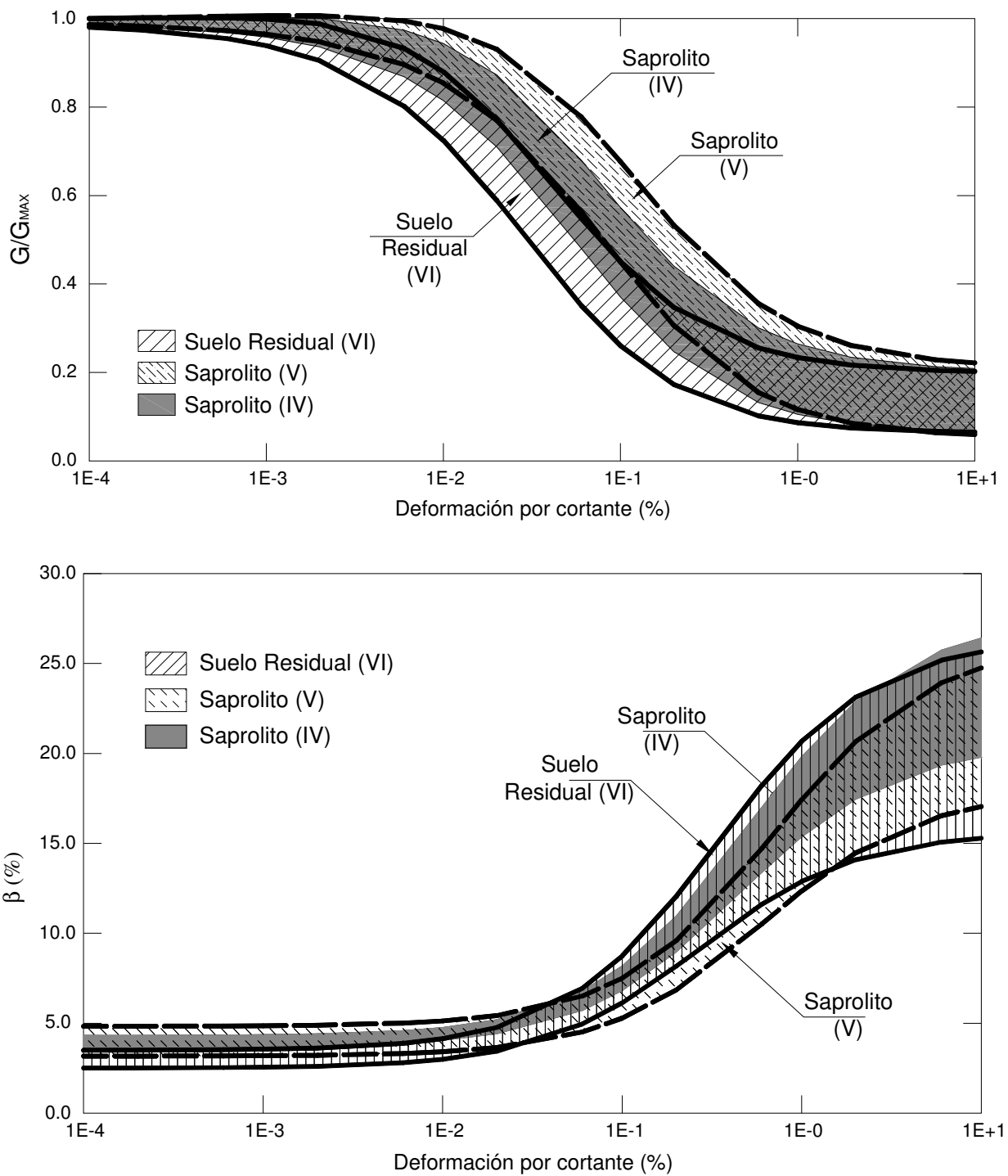
las del nivel VI, lo que aporta a la mayor rigidez observada en el nivel V, comportamiento consistente con los resultados reportados en la literatura (Ishihara, 1996; Ishibashi y Zhang, 1993), ya que el índice de plasticidad de estos suelos oscila entre 8 y 16, y para estos suelos de baja plasticidad lo que predomina en la curva de degradación y amortiguamiento es el

confinamiento. En general, se puede observar en las figuras 2 y 3 que las curvas de degradación para los suelos in situ y transportados de gabro presentan una inclinación similar, y la única diferencia radica en que el horizonte V para el suelo in situ es ligeramente más rígido que los suelos transportados, tal como se aprecia en la figura 4.



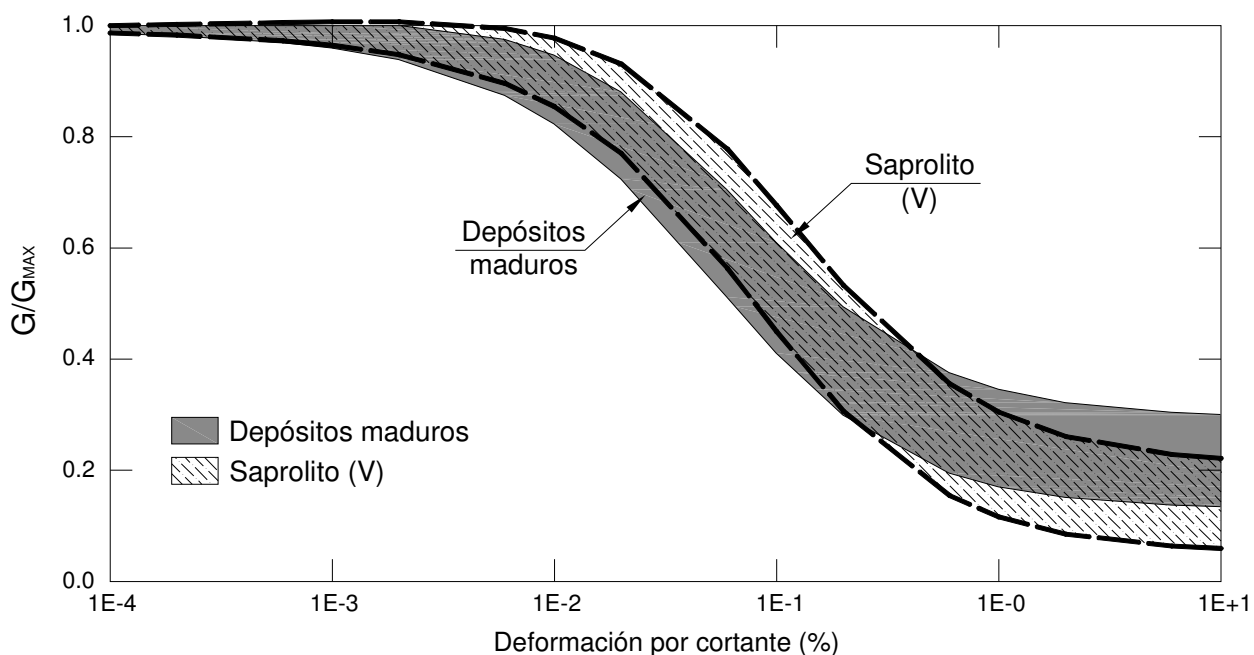
Fuente: elaboración propia

**Figura 2.** Bandas propuestas para la degradación del módulo de rigidez a cortante y amortiguamiento en los suelos trasportados de Gabro.



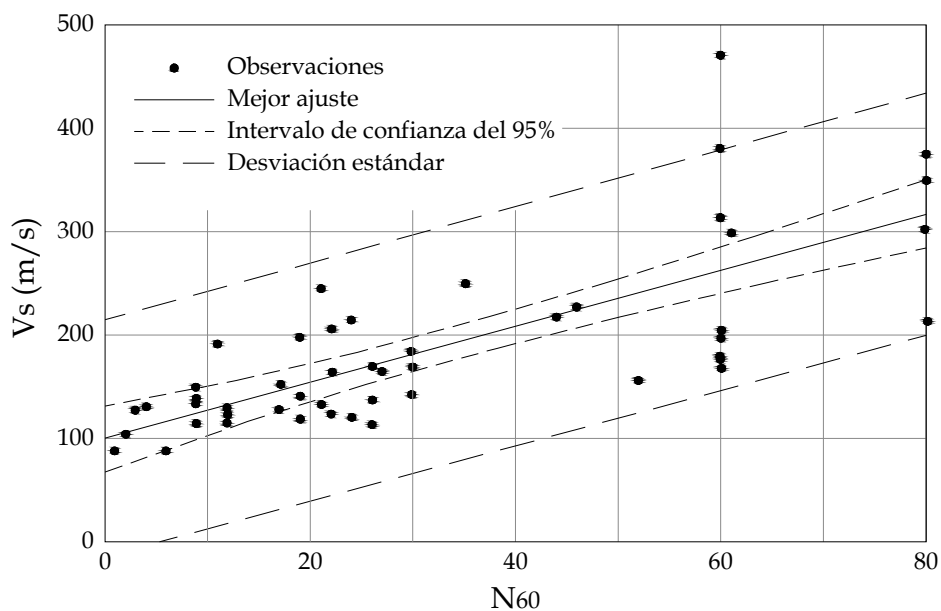
Fuente: elaboración propia

**Figura 3.** Bandas propuestas para la degradación del modulo de rigidez a cortante y el amortiguamiento en los suelos in situ de Gabro.



Fuente: elaboración propia

**Figura 4.** Comparación entre las curvas de degradación del módulo de rigidez para suelos in situ y transportados de gabro.



Fuente: elaboración propia

**Figura 5.** Relación entre la resistencia a la penetración estándar corregida  $N_{60}$  y la velocidad de propagación de ondas de corte.

Al comparar la resistencia a la penetración estándar corregida,  $N_{60}$ , y la velocidad de propagación de ondas de corte,  $V_s$ , para los sitios de gabro (ver figura 5), se insinúa una correlación entre ambas propiedades. Al efectuar una regresión lineal, con un total de 53 datos provenientes de suelos originados de gabro, mediante el método de mínimos cuadrados se obtuvo la siguiente expresión:

$$V_{S_{GABRO}} = 95.5397 + 2.88853 \cdot N_{60}$$

La expresión anterior corresponde a la línea denominada mejor ajuste, en la figura 5. En la tabla 1 se presentan los valores estadísticos de la regresión, incluyendo los valores t para las pruebas de hipótesis unilaterales y el análisis de varianza. Del análisis de estos valores puede concluirse que la ecuación presenta una relación de significancia entre  $V_s$  y  $N_{60}$  con un nivel de confianza del 99%, ya que el valor de probabilidad de la ANOVA es menor que 0.01, y que la estimación de  $V_s$  sólo contempla el 84% de la variabilidad de las observaciones directas.

**Tabla 1.** Resumen estadístico del mejor ajuste para  $V_s$  en función del  $N_{60}$ .

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico t	Valor P	
Intercepto	95.5397	10.4437	9.14808	0.0000	
Pendiente	2.88853	0.262587	11.0003	0.0000	
Análisis de varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Media	Razón F	Valor de prob.
Modelo	263081.0	1	263081.0	121.01	0.0000
Residual	110880.0	51	2174.12		
Total (Corr.)	373961.0	52			
Coeficiente de correlación = 0.838748 R cuadrado = 70.35% Error estándar de la estimación = 46.6275					

Fuente: elaboración propia

### 3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

La metodología empleada en el modelamiento de la propagación unidimensional de ondas sísmicas se desarrolló de acuerdo con la siguiente secuencia:

1. Generación de 30 secuencias para cada subzona homogénea, correspondiente a gabro, que representaran la variabilidad de los parámetros, con valores numéricos aleatorios dentro del intervalo de confianza del 95%, para el espesor, el peso unitario y el  $N_{60}$  de cada horizonte, de acuerdo con los valores

consignados en la Tabla 2. La generación de los números aleatorios se efectuó con el programa ZRandom 1.2 (licencia de evaluación disponible en el sitio <http://www.zrandom.com/zrand/>). La estimación de la velocidad de onda de corte para cada horizonte se efectuó a través la correlación propuesta en el numeral anterior.

2. Selección aleatoria de la curva de degradación del módulo de rigidez a cortante y el amortiguamiento para cada horizonte, de tal manera que estuviera contenida en la banda propuesta.



**Tabla 2.** Intervalos de confianza para las propiedades de los perfiles analizados por cada subzona.

Subzona	Profundidad (m)	Descripción	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	NSPT
12-EP	3±0.9	Depósito maduro	16.9±0.5	28±15
	4.7±1.4	Depósito fresco	18.3±0.5	14±9
	8.6±0.8	Suelo residual (VI)	17.1±0.5	22±10
	17±1.6	Saprolito (V)	18.7±1.2	35±4
	21.8±2.9	Saprolito (IV)	18.5±0.5	27±5
	33.7±4.5	Transición suelo roca	18.5±0.5	42±29
12-EV	2.1±1.3	Depósito maduro	14.2±2.6	12±4
	9.7±0.9	Depósito fresco	19±0.6	17±4
	11.9±0.3	Suelo residual (VI)	17.9±2.7	16±6
	21.9±2.5	Saprolito (V)	18±0.8	29±8
	23.8±2.9	Saprolito (IV)	18.5±0.5	27±5
	35.7±4.5	Transición suelo roca	18.5±0.5	42±29
12-KS	2.1±0.1	Depósito maduro	16±0.5	10±5
	3.3±0.8	Depósito fresco	16.7±1	18±17
	5.2±0.6	Suelo residual (VI)	18.7±1.5	24±11
	7.9±0.6	Saprolito (V)	18.1±0.6	42±6
	14.8±2.2	Saprolito (IV)	18±0.7	42±9
	26±16.3	Transición suelo roca	18.3±0.1	35±20
12-SM	2.8±1.2	Suelo residual (VI)	17.2±2.1	20±9
	7.6±5.6	Saprolito (V)	17.8±2	36±10
	26.6±14.4	Saprolito (IV)	18.5±0.5	37±15
	34.1±4.5	Transición suelo roca	18.5±0.5	42±29
12-VB	3.3±2	Depósito maduro	16.8±0.5	25±12
	8.1±2.4	Depósito fresco 1	17.9±1.2	17±10
	10.6±1.7	Depósito fresco 2	15.6±0.5	73±20
	14.5±2.4	Saprolito (V)	17.8±2	35±8
	27.3±4.5	Saprolito (IV)	18.5±0.5	40±3

Fuente: elaboración propia

3. Selección aleatoria de la señal de entrada para cada secuencia, entre registros reales compatibles con el escenario sísmico esperado, los cuales fueron escalados linealmente de acuerdo con el nivel de amenaza para Medellín incluido en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente de 1998, NSR-98, equivalente a 0.2 g en roca, y de 0.15 g en

roca, de acuerdo con el GSM (1999). El escalamiento de señales en amplitud es una práctica aceptable, particularmente si los registros han sido seleccionados de sismos con magnitudes similares a las del escenario sísmico de diseño (Acevedo-Jaramillo, 2003).

4. Análisis numérico de la propagación unidimensional con el programa Shake91 (Schnabel

et al., 1972), que se basa en el método lineal equivalente para resolver el problema de la propagación de ondas a través de la columna de suelo considerando la respuesta asociada a la propagación vertical de ondas de cortante a través de un medio viscoelástico lineal. El modelo lineal equivalente busca fundamentalmente una correspondencia entre los parámetros de rigidez y amortiguamiento con el nivel de deformación inducido por la propagación de las ondas de cortante a través de un proceso de linealización.

5. Cálculo de las historias de aceleraciones y espectros de respuesta para el 5% del amortiguamiento en la base rígida y en superficie.
6. Cálculo de la relación de respuesta espectral, RRS, definida como el cociente entre el espectro de respuesta en superficie y el espectro del sismo en roca, para cada una de las 30 secuencias en las 5 subzonas. Cálculo de la media y la desviación estándar en cada subzona.
7. Obtención del espectro de pseudo aceleración para cada subzona, multiplicando la RRS por el espectro de amenaza uniforme en roca de la NSR-98, para los niveles de 0.15 g y 0.20 g, a partir de los valores medios, más una vez la desviación estándar.
8. Estimación del espectro suavizado de amenaza uniforme en superficie, de acuerdo con una metodología similar a la utilizada por el GSM (2002).

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

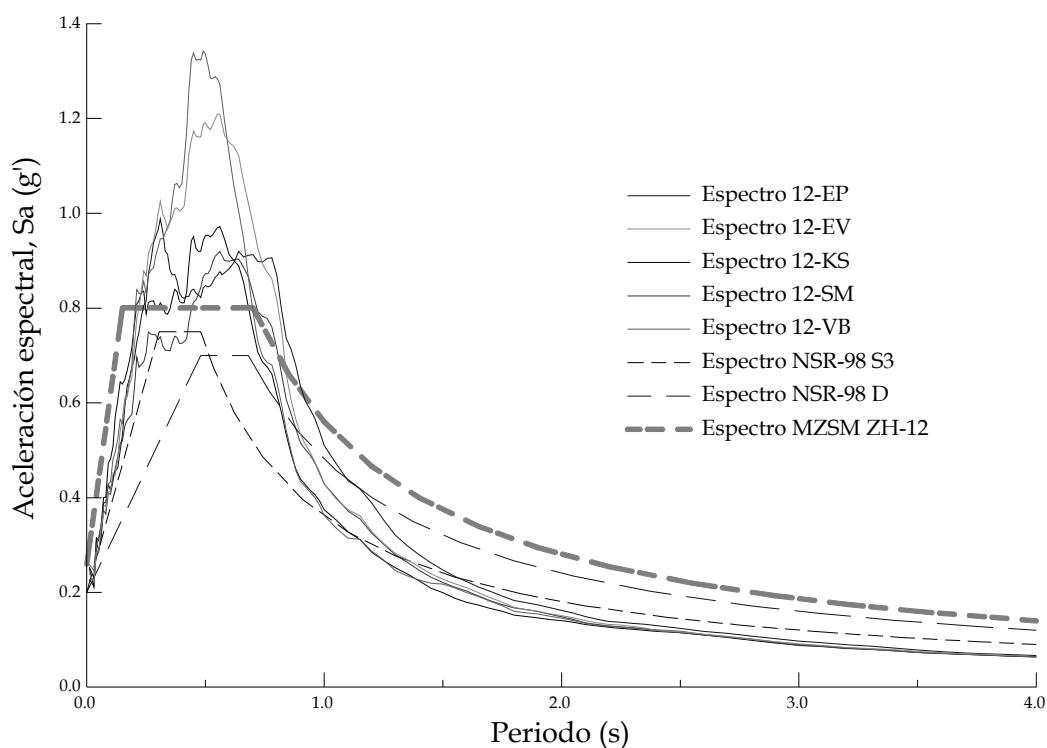
De acuerdo con la metodología descrita para la modelación de la propagación unidimensional se obtuvieron los espectros de respuesta que se presentan en la figura 6; los espectros S3 y D corresponden a los definidos en el título A método obligatorio y título H método alterno, respectivamente, de las NSR-98. Los espectros de las subzonas 12-EV y 12-VB son los que presentan mayores aceleraciones, alcanzando niveles cercanos a 1.0 g en el espectro suavizado. En general, los espectros suavizados para el nivel de amenaza de 0.2 g presentan una aceleración máxima,  $2.5 \cdot F_a \cdot A_s$ , superior a la de los espectros del reglamento NSR-98. Los espectros suavizados de las subzonas 12-EV, 12-KS y 12-SM para un nivel de amenaza en roca de 0.15 g alcanzan niveles similares a los espectros del reglamento NSR-98 (ver figura 7).

De acuerdo con lo anterior, en la zona homogénea 12, transición anfíbolita-gabro de Medellín, de la MZSM se presentan dos tipos de perfiles para la definición de los efectos locales, definidos de acuerdo con la tabla 3, producto de la modelación 1D. En el perfil ZH-12A se incluyen las subzonas 12-EV y 12-VB; y en el perfil ZH-12B están incluidas las subzonas 12-EP, 12-KS y 12-SM. En la figura 8 se presenta la forma del espectro propuesto para los dos perfiles típicos. La diferencia en la identificación de los dos perfiles se fundamenta en el espesor de suelos correspondientes a depósitos de vertiente.

**Tabla 3.** Clasificación de perfiles para la definición de efectos locales en la ZH-12 de la MZSM.

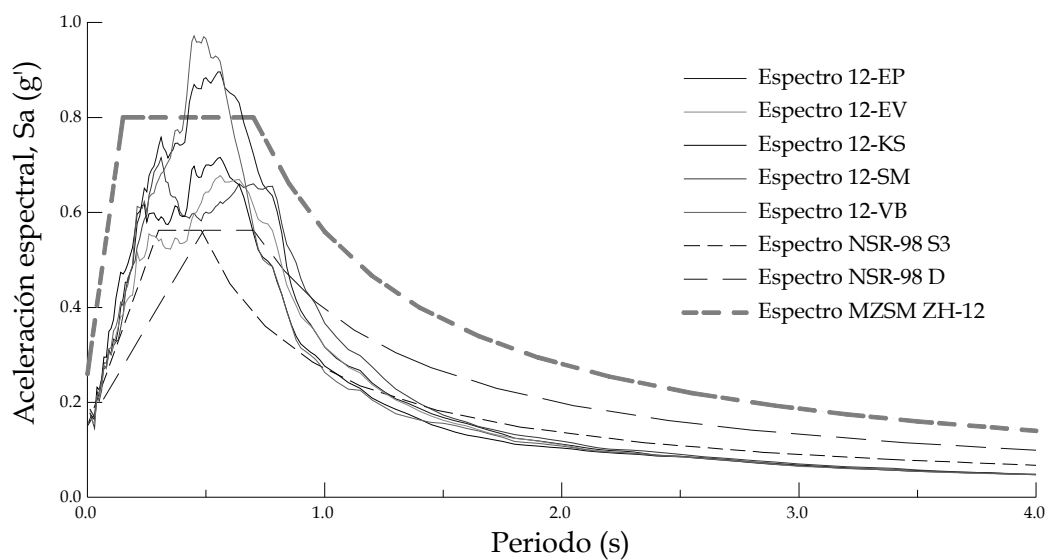
Perfil	Descripción del perfil	Parámetros de clasificación		
		$V_{s30}$ (m/s)	$N_{SPT}$	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )
ZH-12A	Perfil de suelo in situ de gabro con un espesor no mayor de 30 m cubierto por depósitos de vertiente con espesores mayores a 10 m correspondientes más de dos eventos diferenciables.	180-225	25-35	17-18
ZH-12B	Perfil de suelo in situ de gabro con un espesor no mayor de 32 m cubierto eventualmente por depósitos de vertiente con espesores inferiores a 5 m.	190-220	28-35	17-19

Fuente: elaboración propia



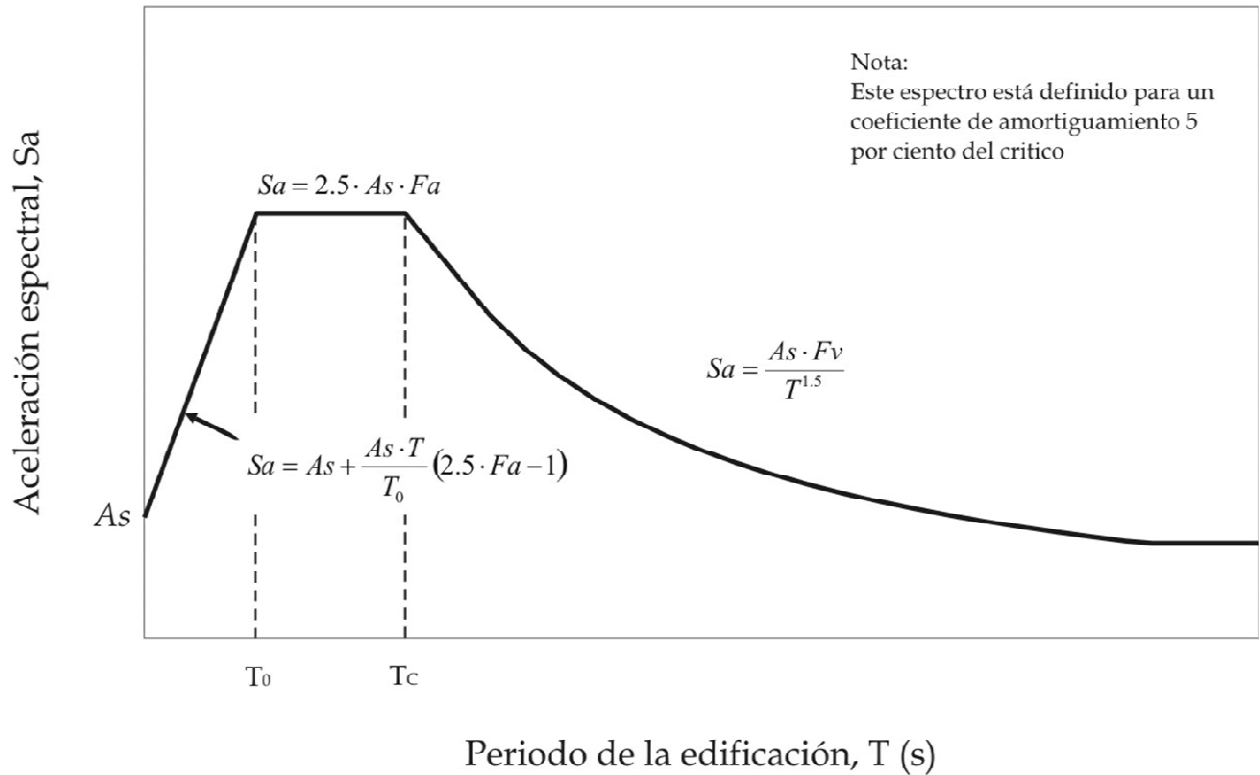
Fuente: elaboración propia

**Figura 6.** Espectros de respuesta para una amenaza de 0.2 g en roca y el 5% de amortiguamiento, valores medios mas una desviación estándar.



Fuente: elaboración propia

**Figura 7.** Espectros de respuesta para una amenaza de 0.15 g en roca y el 5% de amortiguamiento, valores medios mas una desviación estándar.



Perfil	As		T0	TC	Fa	Fv
	Aa = 0.20 g	Aa = 0.15 g				
ZH-12A	0.26	0.19	0.29	0.70	1.6	2.2
ZH-12B	0.25	0.18	0.20	0.80	1.3	2.3

Fuente: elaboración propia

Figura 8. Espectros de respuesta propuestos para la zona homogénea 12 de la MZSM.

### 5. CONCLUSIONES

La velocidad de propagación de ondas de corte en los suelos del Stock de San Diego es correlacionable con el número de golpes corregido  $N_{60}$ . Este comportamiento es consistente con otras relaciones reportadas en la literatura, puesto que dicho valor es una medida relativa de la rigidez del suelo que es controlada por aspectos composicionales como el tipo de minerales presentes y el tamaño y distribución de las partículas, y por factores ambientales como el estado de esfuerzos in situ.

Las amplificaciones máximas, para  $T=0$ , debidas a la presencia de suelo no exceden el valor de 1.4, similar a las encontradas en la calibración efectuada por el GSM (1999) para la zona homogénea 12 verificada en registros reales de pequeña amplitud.

La zona homogénea 12, transición anfibolitagabro de Medellín, de la MZSM presenta dos tipos de perfiles típicos de suelo, en lo que respecta a la respuesta en superficie. Y la diferencia entre éstos es el espesor de suelo correspondiente a depósitos de vertiente. La subzona ZH-12A es caracterizada

por presentar un perfil de suelo in situ de gabro con un espesor no mayor de 30 m cubierto por depósitos de vertiente con espesores mayores a 10 m correspondientes a uno o más de dos eventos diferenciables. Y la subzona ZH-12B presenta un perfil de suelo in situ de gabro con un espesor no mayor de 32 m cubierto por depósitos de vertiente con espesores con inferiores a 5 m.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al DIME, Dirección de Investigación Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, y al ingeniero Luis Felipe Salazar Ferro por subsidiar la ejecución de los ensayos de Down Hole empleados en la definición de los perfiles de velocidad de onda de corte,  $V_s$ .

## REFERENCIAS

- ACEVEDO JARAMILLO A.B., (2003). Seismological criteria for selecting and scaling real accelerograms for use in engineering analysis and design. Dissertation for Master in Earthquake Engineering, European School of Advanced Studies in Reduction on Seismic Risk, ROSE SCHOOL, Instituto Universitario di Studi Superiori di, 139 pp.
- AIS 300. (1998). Estudio general de amenaza sísmica de Colombia. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS. Comité AIS 300. Premio Lorenzo Codazzi 1997. Segunda Edición INGEOMINAS. 252 pp.
- CANO C., OTÁLVARO I. & SALAZAR I. C. (2001). Clasificación y caracterización de suelos tropicales originados del Stock Gabroico de San Diego. TDG, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 134 p.
- GSM, Grupo de Sismología de Medellín. (1999). Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín. Sistema Municipal Para la Prevención y Atención de Desastres, Alcaldía de Medellín.
- GSM, Grupo de Sismología de Medellín, (2002). Microzonificación Sísmica de los Municipios del Valle de Aburrá y Definición de Zonas de Riesgo por Movimientos en Masa e Inundación en el Valle de Aburrá. Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- FOOKES, 1997. Tropical residuals soils, professional handbook. The Geological Society. The Geological Society Publishing House, London.
- ISHIBASHI I. & ZHANG X., (1993). Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay. In: Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 33, (1), 182-191 pp.
- ISIHARA K., (1996). Soil behaviour in earthquake geotechnics. The Oxford University Press; The Oxford Engineering Science Series, 350 pp.
- KRAMER S. L., (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice-Hall civil engineering and engineering mechanics series. 653 pp.
- SHNABEL P., LYSMER J. and SEED H.B., 1972. SHAKE : A computer program for earthquake response analysis of horizontal layer sites. Report No. EERC 72-12. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 38 p.
- OSORIO R.I., MESA J.F., GONZÁLEZ R. y CANO C.A., (2004). Propuesta de una metodología para la obtención de parámetros dinámicos de suelos en zonas de condiciones difíciles (laderas). Dirección de Investigación y Docencia, Departamento de Ingeniería Civil, Medellín.
- OTÁLVARO I., CANO C., OSORIO R. e HINCAPIÉ J. E., (2004). Efecto de la meteorización en las propiedades dinámicas de un suelo gabroico. Revista Universidad EAFIT; 40, (133), 120-132 pp.
- OTÁLVARO I. F., (2005). Caracterización de la respuesta dinámica del sitio del gabro de Medellín. Tesis de maestría, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 117 pp.
- ZEEVAERT L., (1984). Condiciones ambientales en el diseño de la cimentación de edificios. Querétaro (México), Séptima Conferencia Nabor Carrillo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.