

# Efecto de la meteorización en las propiedades dinámicas de un Suelo Gabróico

## Iván Fernando Otálvaro Calle

Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia. Aspirante a  
Maestro en Ingeniería Geotécnica.  
sismogeo@epm.net.co

## Carlos Andrés Cano Martínez

MSc. En Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Asistente de  
investigación de la Universidad EAFIT.  
carloses@eafit.edu.co

## Rodrigo Iván Osorio Mora

Ingeniero Civil de la Universidad de Medellín. Profesor del  
Departamento de Ingeniería Civil en la Universidad EAFIT.  
riosorio@eafit.edu.co

## Jaime Eduardo Hincapié Aguilar

Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín  
Socio y fundador de la firma JEH y Cía. Ltda.  
jehcia@epm.net.co



Recepción: 20 de enero de 2003 | Aceptación: 10 de septiembre de 2003

## Resumen

El presente trabajo muestra la variación del módulo de rigidez a cortante ( $G$ ) y de la fracción de amortiguamiento ( $\beta$ ) de acuerdo con el nivel de confinamiento y el grado de meteorización valorado en campo en un perfil de suelo compuesto fundamentalmente por un saprolito de gabro, perteneciente a la unidad *Gabro de San Diego* que aflora en el valle de Aburrá al oriente de la ciudad de Medellín (Colombia). Para dicho estudio se utilizaron muestras inalteradas extraídas de un pozo de prueba excavado manualmente a 18,0 m de profundidad, las cuales se evaluaron mediante pruebas de compresión triaxial cíclica y columna resonante en condición no drenada. Finalmente, se concluye el estudio ejecutando un análisis de la respuesta sísmica del terreno mediante un modelo de propagación unidimensional de ondas.

## Palabras Claves

Suelos tropicales  
Saprolito  
Gabro  
Fracción de amortiguamiento  
Módulo de rigidez a cortante  
Espectro de respuesta

## Effect of weathering in the dynamic properties of gabbro soil

### Abstract

This work shows the variation of the shear modulus ( $G$ ) and the damping fraction ( $\beta$ ) in accordance with the confinement level and the degree of weathering valued in field in a soil profile made up basically by gabbro saprolite, that belongs to the Gabbro of San Diego unit that outcrops in the Aburra valley towards the east of the city of Medellín, (Colombia). For such study unaltered samples extracted from a manual excavation of 18,0 meters were used, these were evaluated through cyclic triaxial compression tests and resonant column in non drained condition. Finally, the study is concluded carrying out an analysis of the seismic response of the terrain through a uni-dimensional wave propagation model.

### Key Words

Tropical soils  
Saprolite  
Gabbro  
Fraction of damping  
Shear modulus  
Response spectrum

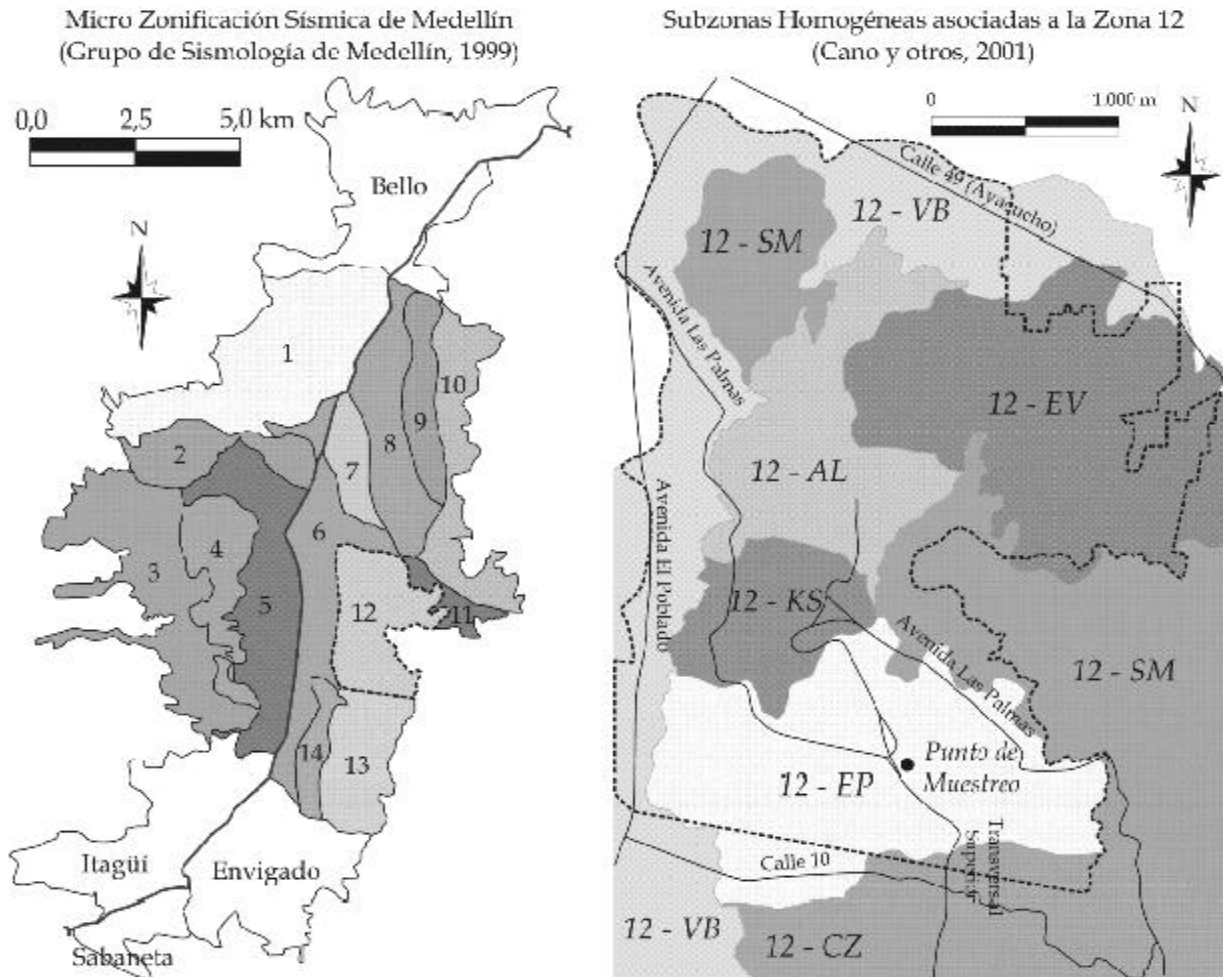
### Introducción



a ciudad de Medellín se encuentra situada en el interior de un ambiente tectónico activo y complejo, el cual está sometido, fundamentalmente, a la amenaza de dos sismo fuentes: *Viejo Caldas* y *el sistema de fallas intraplaca Murrí – Mutatá – Murindó*, las cuales el 23 de noviembre de 1979 y el 17 y 18 de octubre de 1992 produjeron daños considerables en la infraestructura de la ciudad. Esta razón, a lo cual se le suma que en los últimos veinte años el desarrollo urbano se ha concentrado en las laderas en el valle de Aburrá, sector donde se encuentran las condiciones de mayor complejidad desde el punto de vista geotécnico, generan la necesidad de caracterizar con mayor detalle el comportamiento de los suelos bajo condiciones dinámicas con el propósito de disminuir la vulnerabilidad ante eventos sísmicos de las construcciones civiles que se proyectan, en donde se destacan los trabajos de zonificación en laderas ejecutados por autores como: Grupo de Sismología de Medellín – GSM – (1999), Cano y otros (2001), Arenas y García (2001), entre otros; avanzando de esta manera en el estado del conocimiento del comportamiento dinámico de los diferentes perfiles geotécnicos de la ciudad de Medellín y mejorando la información acerca del comportamiento de los suelos en ambientes de ladera y pie de monte. No obstante, aún es escasa la información acerca de la respuesta en campo de estos suelos bajo sollicitaciones que involucren un nivel de deformaciones superiores a

$10^{-3}\%$ , orden de magnitud estimada a partir de análisis simplificados para una amenaza de 0,2 g definida para Medellín por la NSR-98; por lo cual resulta razonable, como primera aproximación, estimar la respuesta del sitio a partir de una caracterización en detalle de las propiedades dinámicas de cada formación de suelo bajo diferentes condiciones.

De acuerdo con lo anterior y con los resultados de zonificación y caracterización obtenidos por el GSM (1999) y por Cano, et al (2001), la Universidad EAFIT ejecutó una investigación con el fin de caracterizar el comportamiento tensión deformación, tanto en condiciones estáticas como dinámicas, y mejorar el nivel de detalle en lo referente a la respuesta dinámica de los suelos de Medellín, tomando como punto de partida el estudio de la subzona homogénea 12–EP definida por Cano y otros (2001), delimitada en la Figura 1, la cual contiene perfiles de geomateriales, in situ y transportados, de gabro, por medio de la ejecución de un pozo de prueba excavado manualmente y un muestreo continuo a través de éste, estudiando los efectos del nivel de confinamiento y la intensidad de meteorización. El trabajo de laboratorio contempló no sólo las pruebas índice convencionales, como el tamaño y distribución de las partículas, los límites de consistencia, y las relaciones peso – volumen, sino ensayos de conteos de minerales no alterados sobre las fracciones retenidas en la mallas No.100 y No.200; además de las pruebas mecánicas de compresión confinada, compresión triaxial, columna resonante (CR), y triaxial cíclico (TC).

**Figura 1.** Mapa de zonas y subzonas homogéneas

## 1. Clasificación

La clasificación de los materiales efectuados partió del sistema de valoración cualitativa de las zonas e intensidades de meteorización propuesto por la Oficina de Control Geotécnico de Hong Kong (1988), GCO por sus sigla en inglés, y mejorada en términos de símbolos y grupos de suelos por Cano y otros (2001b), cuya metodología identifica el tipo de formación del material parental (in situ o transportado), el material parental y los rasgos heredados al suelo, y finaliza con la valoración de la intensidad de meteorización en el perfil, la cual está basada en la propuesta original de la GCO (1988) para suelos tropicales originados a partir de la meteorización in situ de la roca, como se ve en la Figura 2, el cual corresponde a un esquema zonal basado

en el contenido de fragmentos de roca en cada zona. En el caso de los materiales considerados como roca se les asigna su calidad de acuerdo a una escala de seis grados de meteorización, la cual se muestra en la Tabla 1.

## 2. Naturaleza de los suelos

Los horizontes de suelo evaluados corresponden a tres intensidades diferentes de meteorización en el interior de la zona de Saprolito, clasificada como PW 0-30 de acuerdo con el esquema de clasificación propuesto por la GCO (1988), originados a partir de un avanzado proceso de meteorización in situ de rocas gabroides pertenecientes al cuerpo conocido como el Stock de San Diego. La roca aflorante en la zona estudiada es ígnea, maciza, masiva, de

Figura 2. Esquema de zonación adoptado por GCO (1988)

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA	SIMBOLO DE LA ZONA	TIPO DE ROCA		CARACTERÍSTICA DE LA ZONA
		METAMÓRFICA	IGNEA	
SUELO RESIDUAL	RS			<i>Suelo residual</i> Derivado de la meteorización in situ, donde la textura y estructura del material parental está totalmente destruido
ROCA PARCIALMENTE METEORIZADA	DF 0% a 30% DE ROCA	PW 0-30		<i>Menos del 30% es Roca (Saprolito)</i> El suelo conserva la textura y estructura de material original. El comportamiento mecánico no se ve afectado por el contenido de roca, pero los rastros de discontinuidades se lo afectan
	DF 30% a 50% DE ROCA	PW 30-50		<i>30% a 50% es Roca</i> Tanto el contenido de roca como las discontinuidades heredadas pueden afectar el comportamiento mecánico del conjunto
	DE 50% a 90% DE ROCA	PW 50-90		<i>50% a 90% es Roca</i> Presenta una estructura interconectada
	DE 90% a 100% DE ROCA	PW 90-100		<i>Más del 90% es Roca</i> Una pequeña cantidad de material está convertido en suelo a lo largo de las discontinuidades
ROCA NO METEORIZADA	NW			<i>100% Roca</i> Puede mostrar una decoración a lo largo de las discontinuidades

Tabla 1. Escala de grados de meteorización, modificado de Cano y otros (2001b)

Término Descriptivo	Grado	Características
<b>Suelo Residual</b>	VI	Suelo, meteorización completa, no aparece textura reconocible del material original
<b>Completamente descompuesta</b>	V	Suelo que preserva la estructura y textura de la roca original
<b>Altamente descompuesta</b>	IV	Apariencia de roca, meteorización profunda, se puede fragmentar con las manos
<b>Moderadamente descompuesta</b>	III	Roca alterada, comienza la aparición de minerales secundarios, se puede fragmentar con el martillo geológico
<b>Levemente descompuesta</b>	II	Roca con cambio de color y manchas por alteraciones, resistencia de roca sana, difíciles de fragmentar aun con el martillo geológico
<b>Fresca</b>	I	Roca sana, sólo exhibe decoloración a través de las discontinuidades

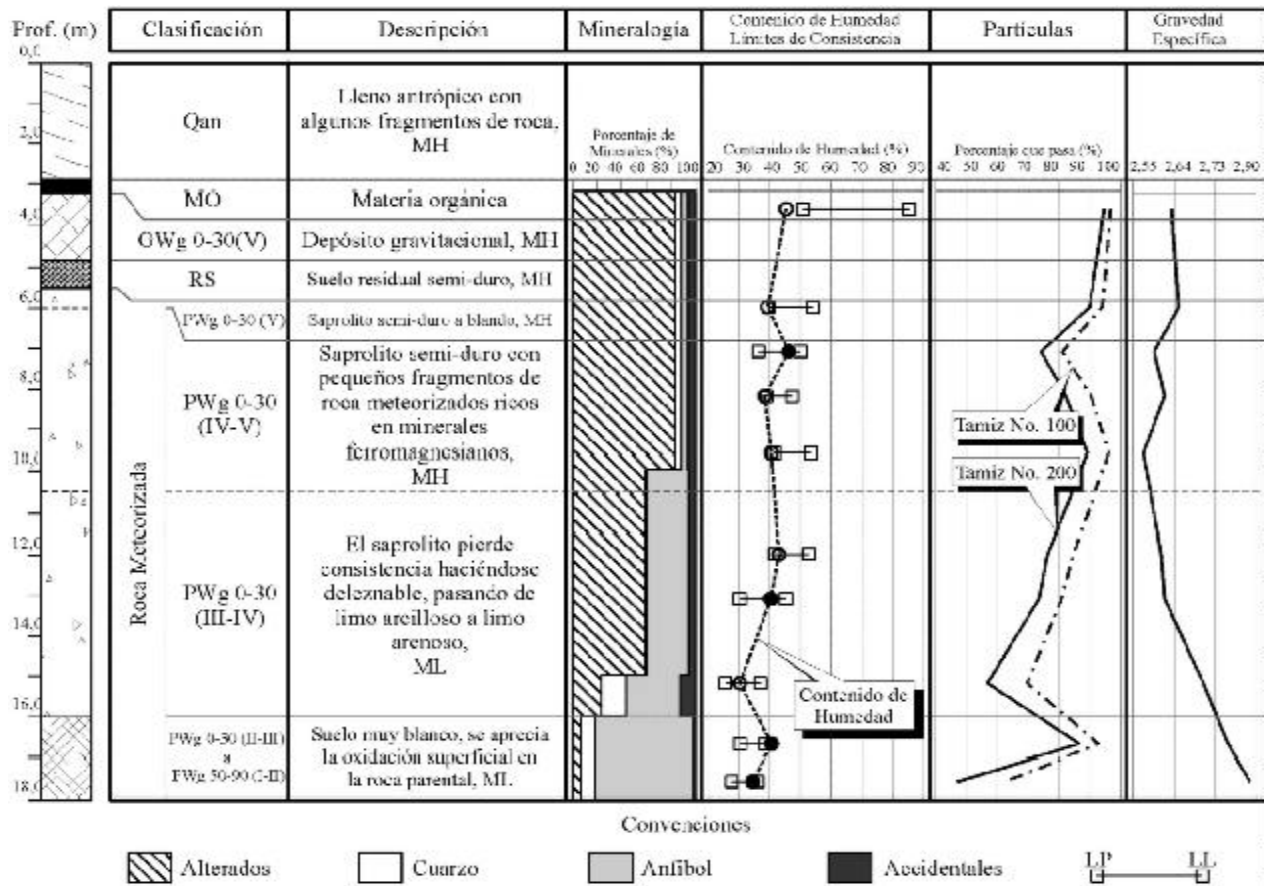
grano grueso, compuesta, aproximadamente, por un 45% de plagioclasa, un 54% de anfíbol y un 1% de piritita. El perfil geotécnico del Pozo No.1 descrito de acuerdo con la metodología propuesta por Cano y otros (2001b), se muestra en la Figura 3.

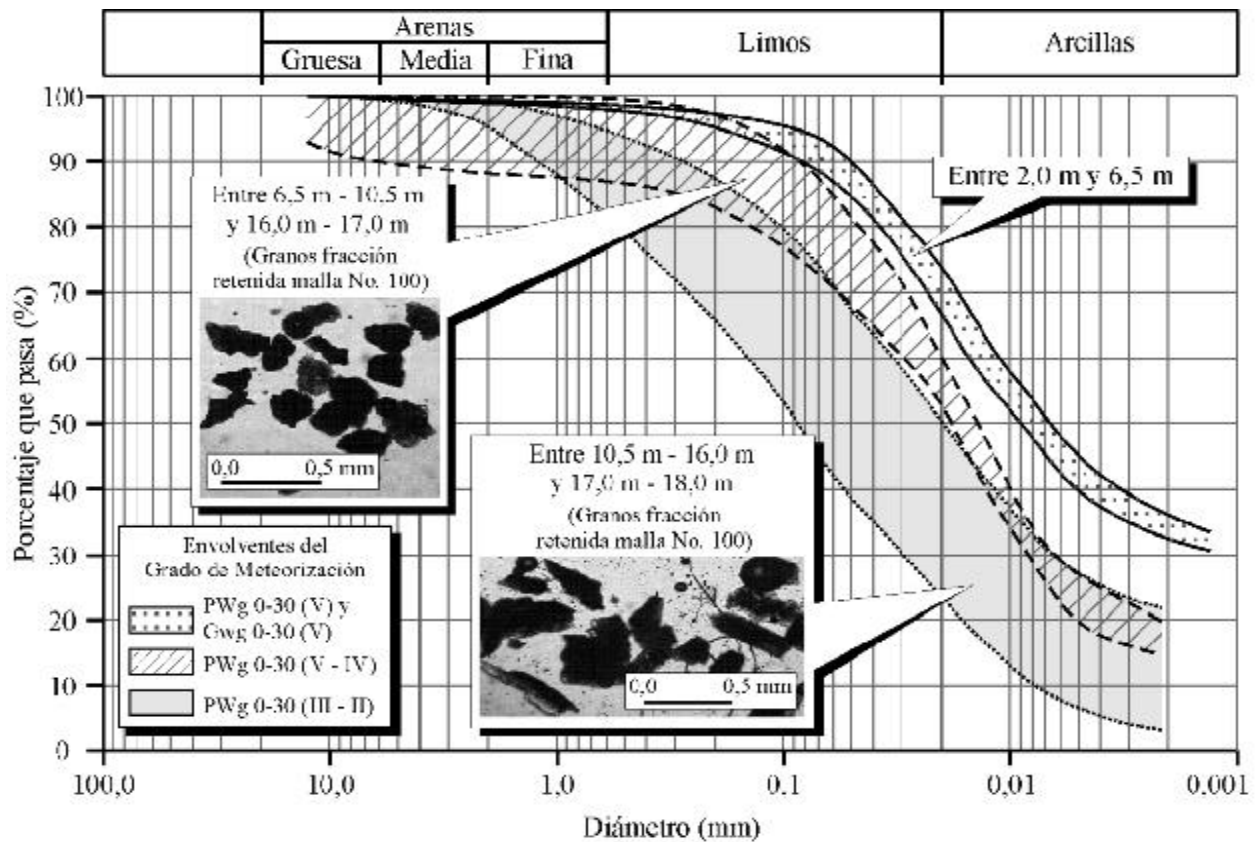
### 3. Metodología de exploración y evaluación

Previa a la excavación manual del pozo de prueba se ejecutaron dos perforaciones con barreno manual de 6,0 m y 8,5 m, con el objeto de verificar la continuidad del material y la posible presencia de fragmentos de roca. La exploración mediante el pozo se efectuó anillando cada metro excavado hasta una profundidad de 18,0 m, que corresponde a la profundidad media del basamento rocoso para la Subzona 12-EP según Cano y otros (2001a), donde el muestreo se efectuó de manera continua en el

perfil extrayendo un total de 158 probetas en tubos de pared delgada tipo Shelby, 11 bloques inalterados de suelo, 20 muestras alteradas de bolsa y un fragmento de roca. En la primera etapa de laboratorio se efectuaron pruebas índice de tamaño y distribución de partículas, límites de consistencia, contenido de humedad natural, peso específico de los sólidos y conteos de minerales no alterados, las cuales corroboraron el grado de meteorización valorado en campo mediante las pruebas cualitativas antes mencionadas; pues, por ejemplo, la tendencia de las curvas granulométricas, expuestas en la Figura 4, mostraron que para los grados IV y V la trayectoria es empinada, mientras que para los grados II y III ésta es suave, lo cual se debe a la presencia de algunos minerales de la roca parental como se apreció en los resultados de las pruebas de conteos de minerales no alterados expuestos en la Figura 3.

Figura 3. Perfil geotécnico promedio



**Figura 4.** Tendencias de las curvas granulométricas

La segunda etapa de laboratorio consistió en la ejecución de pruebas de compresión confinada y triaxial consolidados no drenados, las cuales se ejecutaron en los suelos ubicados en la zona del perfil que presentó el contenido más bajo de minerales alterados. Los resultados obtenidos muestran que las tendencias de las trayectorias tensión deformación, mostradas en la Figura 5, exhiben algunos quiebres en la pendiente de la curva, puntos que en la representación semi-logarítmica de la curva de compresibilidad, fueron denominados por Vargas (1953) como presiones de pseudo consolidación, los cuales corresponden a cambios irreversibles en la estructura del suelo (Vargas, 1953; Leuroiel y Vaughan, 1990); éstos, además, en el caso de los suelos tropicales, se pueden determinar con mayor precisión en un gráfico a escala aritmética, como el mostrado en la Figura 5. En el caso de las pruebas de compresión triaxial CU se nota como el efecto que ejerce la presión de confinamiento afecta de forma sensible el comportamiento tensión deforma-

ción, como se ve en la Figura 6, sobre todo en el caso cuando ésta tiene un alto valor (ver la tendencia cuando  $\sigma_3 = 200$  kPa). En general, de acuerdo con las trayectorias de tensiones, el comportamiento del suelo es compresivo para la presión de confinamiento de 30 kPa en todas las muestras; además, el comportamiento tensión deformación es lineal para tensiones desviadoras menores de 40 kPa, hecho que sugiere que ese nivel de confinamiento no altera la estructura del suelo el cual puede estar cercano a la tensión lateral in situ, ya que, según Vaughan y Kwan (1984), suelen ser bajos en los suelos tropicales in situ.

La tercera etapa de laboratorio se concentró en la evaluación del módulo de rigidez a cortante ( $G$ ) y la fracción de amortiguamiento ( $\beta$ ), efectuando 10 pruebas de columna resonante y 9 triaxiales cíclicos en probetas con el contenido natural de humedad del suelo, las cuales presentaron grados de saturación entre 79% y 92%, y que fueron efectuadas en



Figura 5. Trayectorias tensión deformación en las pruebas de compresión confinada

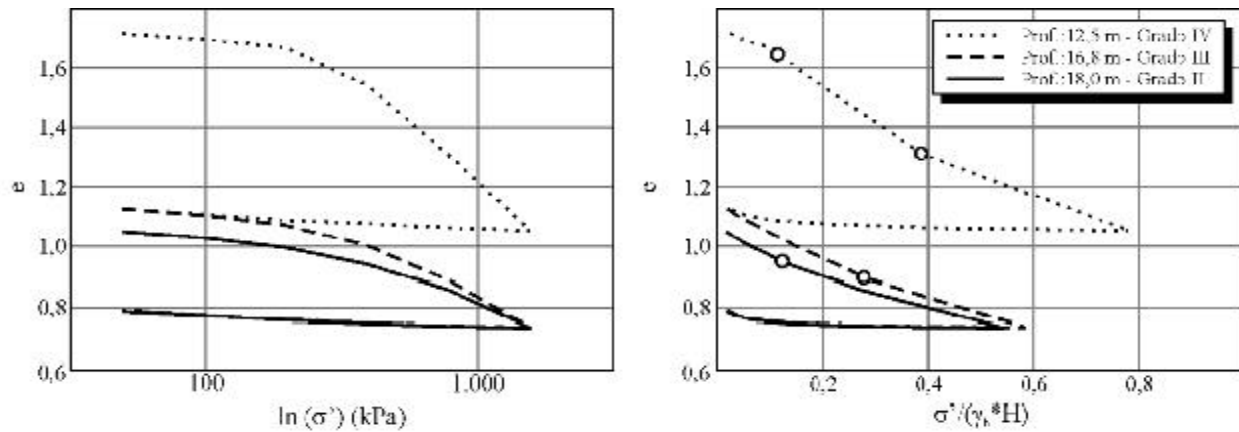
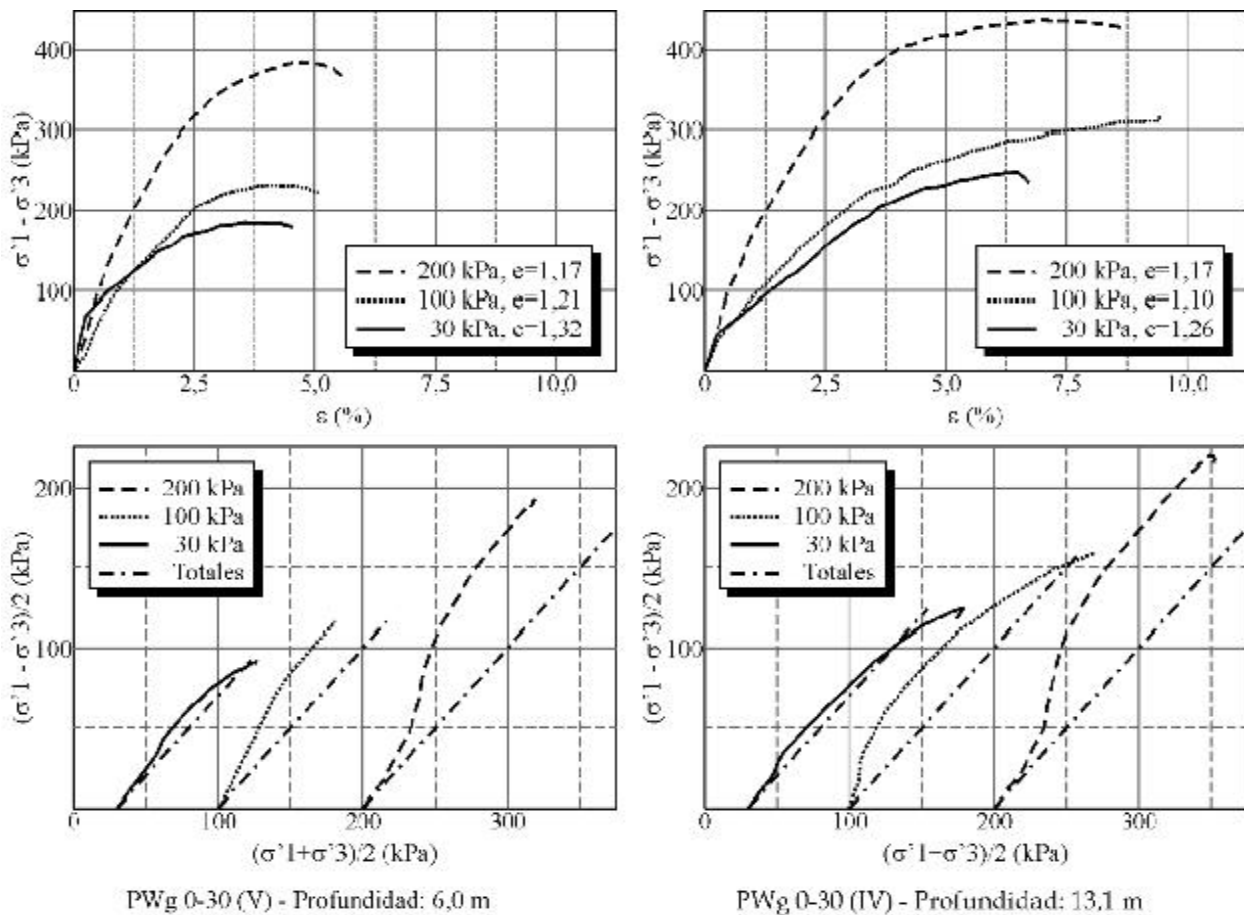


Figura 6. Resultados obtenidos en la Prueba de Compresión Triaxial cu



$$\frac{G}{G_{max}} = 1 - \frac{\gamma}{a + b \frac{\gamma}{\gamma_{cs}}} \quad (1)$$

$$\beta = \beta_{min} + \frac{\frac{\gamma}{\gamma_{cs}}}{\frac{1}{\beta_{min}} - \frac{\gamma}{\gamma_{cs}} - \beta_{min}} \quad (2)$$

muestras homólogas variando el nivel de confinamiento en tensiones efectivas 30 kPa, 100 kPa y 200 kPa, llevando la muestra de menor grado de meteorización hasta una presión de 300 kPa. Las tendencias y curvas de ajuste para modelar el comportamiento no lineal del suelo se realizaron por medio de un ajuste de mínimos cuadrados mediante un modelo hiperbólico (Villarraga, 1987; Sanín, 1999), por medio de la expresión normalizada para el módulo de rigidez expuesta como ecuación (1), donde  $\gamma$  es la deformación por cortante,  $\gamma_m$  es la deformación para el 50% de  $G/G_{MAX}$ , y  $a$  y  $b$  son constantes inherentes del tipo de suelo. En cuanto a la fracción de amortiguamiento se introduce  $\beta_{min}$  para deformaciones por cortante del orden de  $10^{-40\%}$ , diferente de cero, obteniendo la ecuación (2).

#### 4. Tendencias de las propiedades dinámicas

La evaluación de las propiedades físicas en los suelos tropicales in situ presenta una serie de dificultades, ya que, en general, éstos son extremadamente heterogéneos debido a que son el producto de procesos de meteorización que actúan de forma aleatoria y a que la zona de fluctuación del frente húmedo tiene una incidencia significativa en su resistencia; por tanto, su estimación debe realizarse basada en un adecuado esquema de clasificación que permita diferenciar entre la "homogeneidad" de las probetas y los resultados de los ensayos.

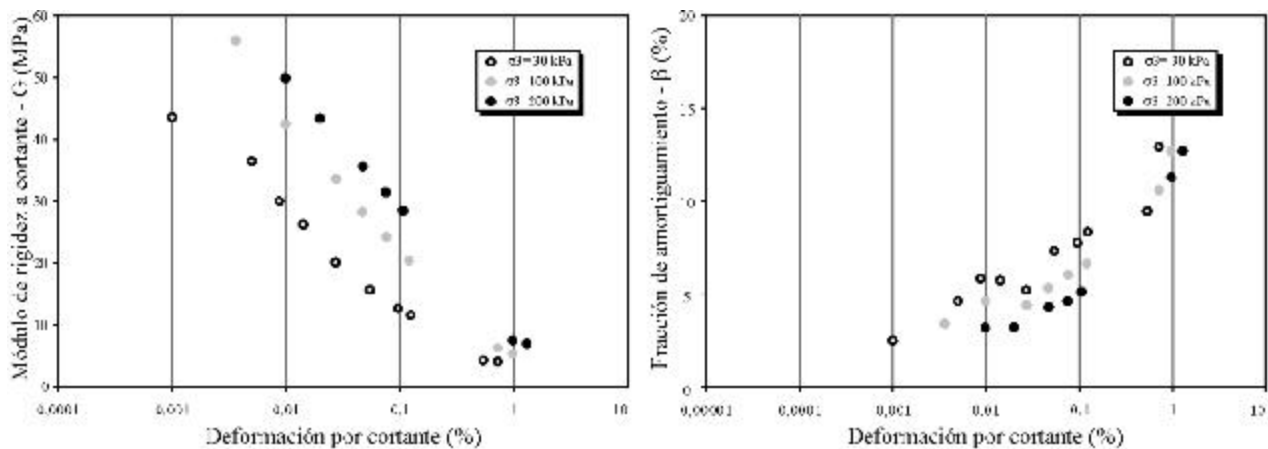
#### 4.1 Efecto de la presión de confinamiento

El módulo de rigidez a cortante ( $G$ ) se incrementa de manera no lineal con el nivel de confinamiento, similar a lo encontrado por Macari y Hoyos (1996) para diferentes suelos residuales de Puerto Rico; por otro lado, la fracción de amortiguamiento ( $\beta$ ) se reduce conforme se incrementa la presión de confinamiento. Ambos efectos se muestran en la Figura 7.

#### 4.2 Efecto de la meteorización

Generalmente en los perfiles de los suelos tropicales in situ el grado de meteorización suele disminuir con la profundidad, y a su vez la velocidad de propagación de ondas de corte aumenta con ésta, hecho que induce a pensar que el módulo  $G$  aumenta con la profundidad; sin embargo, en el Sapolito de gabro esto no es del todo cierto; y el efecto de la meteorización, aunque este disminuye con la profundidad, está más relacionado con la variación de los parámetros ante la tensión lateral efectiva, como se muestra en la Figura 8. Así, para los Sapolitos de menor grado de meteorización, II a III, se tiene un cambio sustancial en la respuesta del suelo al aumentar la presión de confinamiento, distinguiéndose dos bandas: en los grados de meteorización intermedios, III a IV, se obtiene la variación con menor dispersión, en contraste con la alta variación de la rigidez en los grados de meteorización más altos IV a V.

Figura 7. Efecto de la presión de confinamiento sobre los parámetros dinámicos



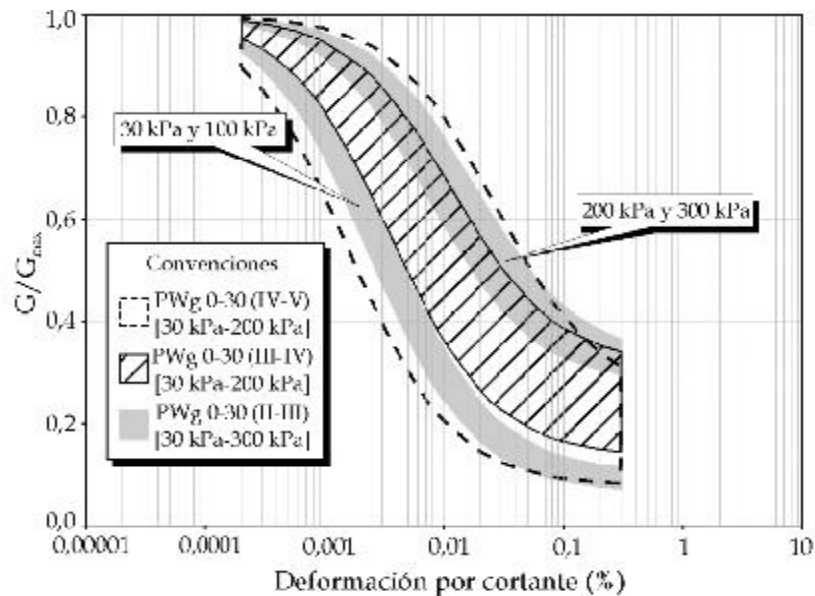


El efecto combinado de la presión de confinamiento y la intensidad de meteorización sobre la rigidez a cortante en las probetas de suelo, como se aprecia en la Figura 9, exhibe un comportamiento no lineal y diferenciable de acuerdo con la intensidad de meteorización, según la trayectoria seguida por las deformaciones de acuerdo con el incremento en la presión de confinamiento para una relación de  $G/G_{max} = 0,5$ .

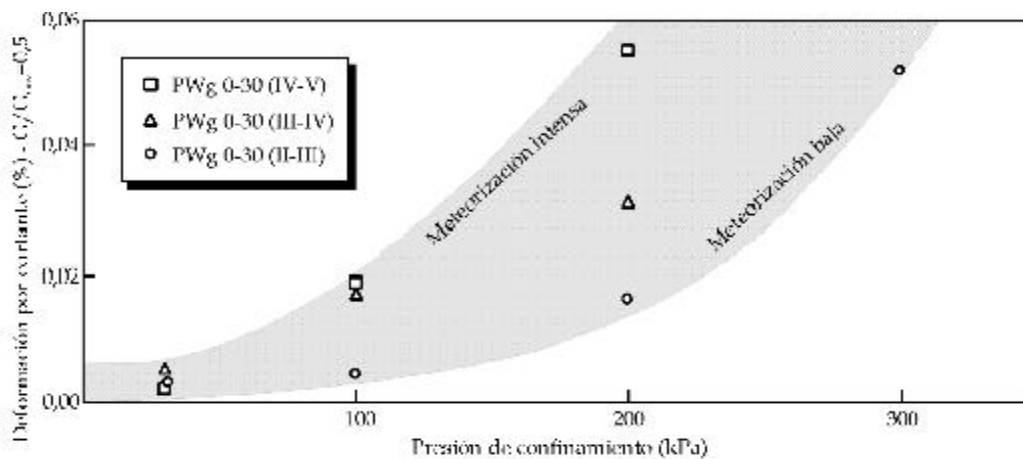
## 5. Influencia en la respuesta del suelo

Definido el comportamiento, en lo referente a la reducción del módulo  $G$  y el comportamiento de la fracción de amortiguamiento con el nivel de deformación  $\beta$ , se estimaron los efectos locales mediante el algoritmo de modos de vibración de Zeevaert (1972), para la amenaza sísmica de Medellín, cuyo coeficiente de aceleración pico efectiva es de 0,2 g

**Figura 8.** Comportamiento de la rigidez a cortante en el saprolito de gabro



**Figura 9.** Efectos de la presión de confinamiento y la meteorización en la rigidez

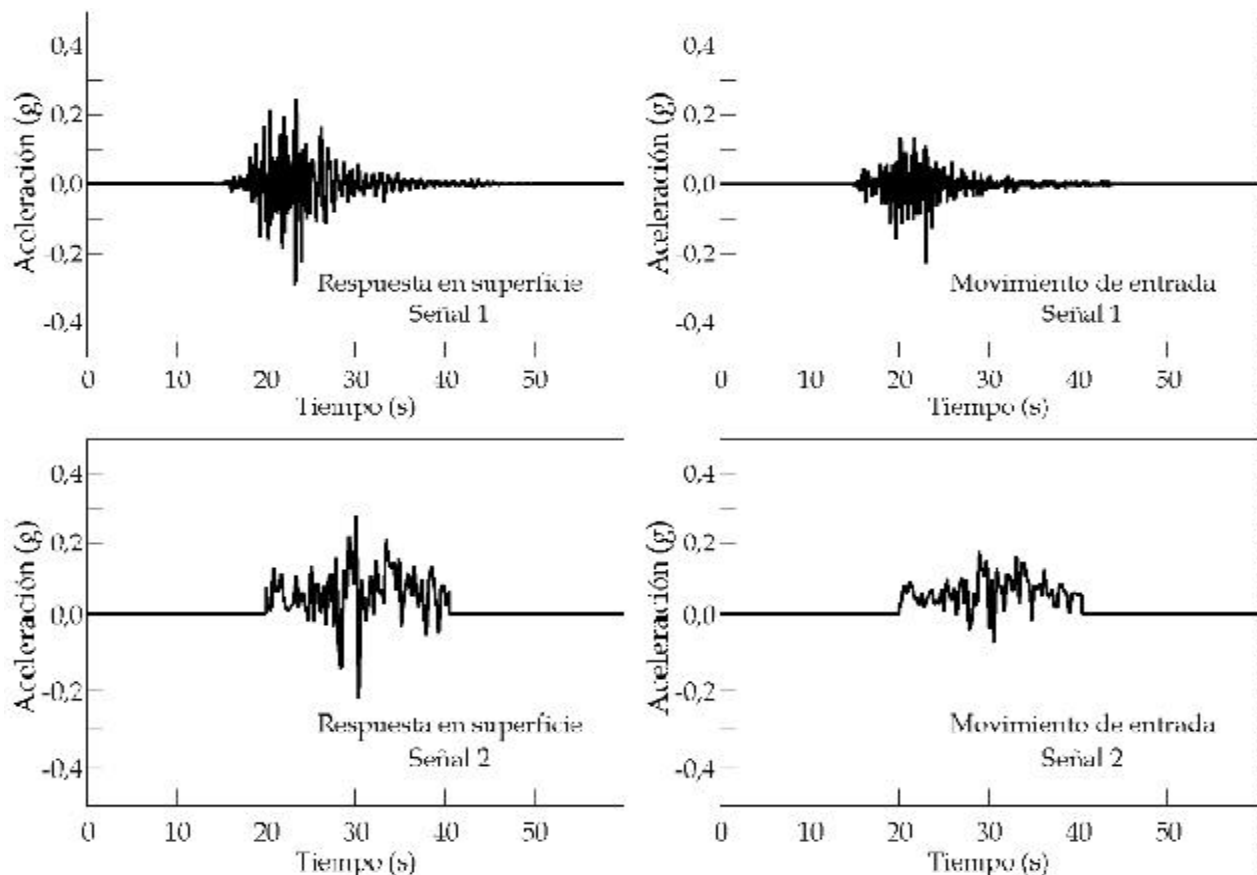


de acuerdo con las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente de 1998, *NSR-98*, con el cual se obtuvieron períodos fundamentales de vibración de 0,511 s. La estimación del espectro de respuesta se efectuó con un análisis unidimensional de ondas, mediante el programa de ordenador ProShake®, el cual evalúa la respuesta del suelo cuando es sometido a la propagación de ondas de cizalladura que ascienden verticalmente desde una base rígida (ProShake, 1998), usando dos acelerogramas sintéticos con aceleraciones máximas iguales al nivel de amenaza definido para Medellín, generados al escalar dos registros de sismos reales, como se ve en la Figura 10, el primero en Northridge de 1994, estación Topanga (señal 1) y el segundo en Medellín de 1979, estación Facultad de Minas (señal 2); obteniendo períodos fundamentales de vibración del orden de 0,498 s, con una diferencia relativa del 3% respecto al algoritmo de Zeevaert.

Las secuencias de análisis de la respuesta en superficie fueron efectuadas de acuerdo con las condiciones topográficas y ambientales de la subzona 12-EP; sin embargo, los espectros de respuesta generados a partir de estas tienen las siguientes limitaciones:

- No utilizar señales reales, que tiene intrínsecamente todo espectro, y de recurrir a señales registradas en otras condiciones geotécnicas.
- La respuesta espectral puede no ser única en la subzona debido a la alta heterogeneidad en la secuencia y espesor de los horizontes de suelo presentes.
- No obstante estas limitaciones, el espectro generado presenta las siguientes fortalezas:
  - La exploración y modelación del suelo cuenta con alto nivel de detalle, siendo pionero en la

**Figura 10.** Historia de aceleraciones de entrada y respuesta del suelo



ciudad de Medellín, por tanto, la estimación de la respuesta del terreno es compatible con la caracterización geotécnica de los geomateriales presentes.

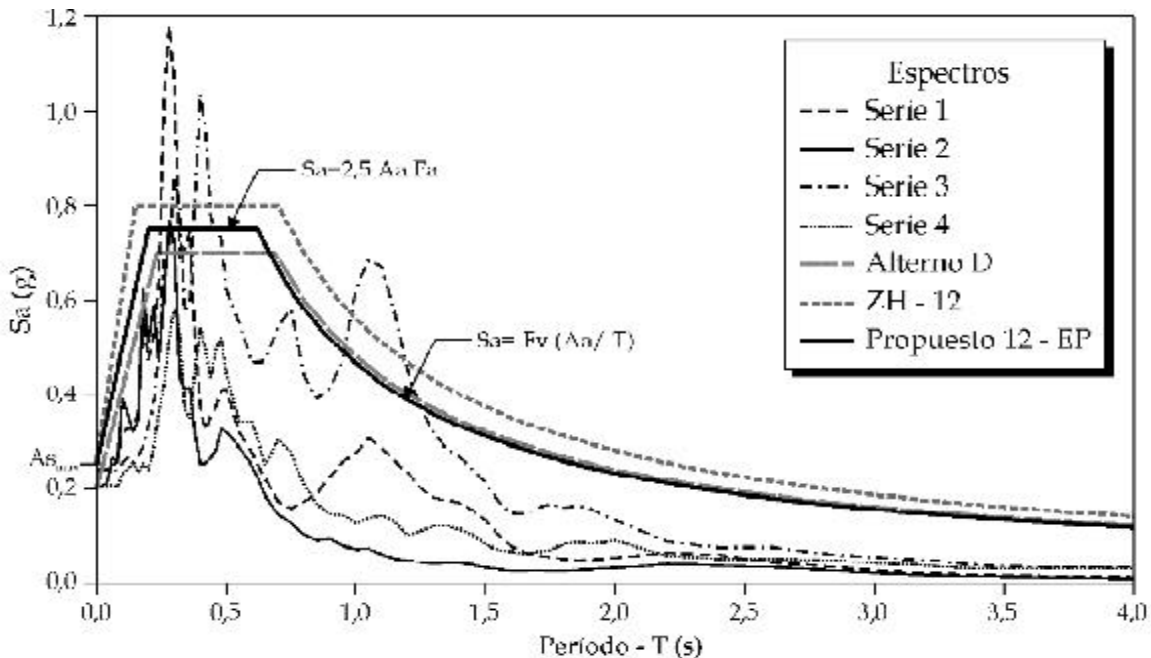
- El perfil de suelo estudiado es representativo para la subzona homogénea 12-EP, de acuerdo con el perfil geotécnico promedio propuesto por Cano y otros (2001a).

La forma espectral y los parámetros propuestos, así como la comparación con los espectros de res-

puesta conocidos es mostrada en la Figura 11. Es importante resaltar que la forma espectral propuesta por el Grupo de Sismología de Medellín para la ZH-12 está basada en una amenaza de 0,15 g, a diferencia de este análisis que se efectuó para una amenaza de 0,2 g; no obstante, el espectro propuesto está un 6% por debajo de la aceleración máxima propuesta para la ZH - 12.



**Figura 11.** Espectros de respuesta para la Subzona 12 – EP para el 5% de amortiguamiento



Parámetros del espectro propuesto 12 - EP

$A_a$	$A_{s_{iso}}$	$T_H$	$T_C$	$T_L$	$F_a$	$F_v$
0,20g	0,25g	0,2 s	0,7 s	4,5 s	1,50	2,33

## Conclusiones

El comportamiento geotécnico de los suelos originados de gabro está controlado por el proceso de formación así como por la intensidad de meteorización; demostrando, nuevamente, que los suelos que presentan meteorización de tipo químico presentes en el Valle de Aburrá deben ser estudiados con los postulados de la geomecánica de suelos tropicales.

La forma y tendencia de la curva obtenida en el ensayo de distribución y tamaño de partículas en el interior de una zona del esquema de clasificación de suelos tropicales es un indicativo de la intensidad de meteorización en los suelos estudiados.

El módulo de rigidez a cortante de los suelos tropicales in situ es función de la intensidad de meteorización y la presión lateral efectiva, así como del proceso de formación.

A bajas amplitudes de corte, en la prueba de columna resonante, el módulo de rigidez  $G$  se incrementa siguiendo una trayectoria no lineal conforme aumenta la tensión isotrópica efectiva.

No obstante al trabajar con una amenaza de 0,2 g, superior a la de 0,15 g utilizada para el estudio de Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (1999), la respuesta espectral resulta, en su punto máximo, un 6% menor que la propuesta para la Zona Homogénea 12.

## Bibliografía

Arenas, S. y García, D. (2001). Clasificación, caracterización y respuesta sísmica al interior de la Zona 13 de la Microzonificación Sísmica de Medellín. Medellín, Tesis Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 123 p.

Cano, C.A., Otálvaro, I.F. y Salazar, I.C. (2001a). Clasificación y caracterización de suelos tropicales originados a partir del Stock Gabróico de San Diego. Medellín, Tesis Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 123 p.

Cano, C.A., Hincapié, J.E., Otálvaro, I.F. y Salazar, I.C. (2001b). Hacia una propuesta metodológica de clasificación integral de suelos tropicales. Bogotá. En: Memorias XI Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana, pp. 151-165.

Geotechnical Control Office. (1988). Guide to rock and soil descriptions (Geoguide 3). Hong Kong. 189 p.

Grupo de Sismología de Medellín (1999). Instrumentación y Microzonificación sísmica del área urbana de Medellín. Medellín: Alcaldía de Medellín.

Ishibashi, I. (1992). Discusión: effect of soil plasticity on cyclic response by Mladem Vucetic and Ricardo Dobry (paper 25418). Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 5, pp. 830 - 832.

Leroueil, S. y Vaughan, P.R. (1990). Degeneral and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. London, Géotechnique, Vol. 40, No. 3, pp 467 - 488.

Macari, E. y Hoyos, L. (1996). Effect of degree of weathering on dynamics properties of residual soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 12, pp. 988 - 997.

Proshake User's Manual. (1998). EduPro Civil Systems. Inc. Redmond, Wash.

Sanín, M. (1999). Comportamiento dinámico de algunos suelos del área urbana de Medellín. Medellín. Tesis Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 126 p.

Vargas, M. (1953). Some Engineering Properties of Clay Soils Occurring in Southern Brazil. Proceedings of 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering. pp. 259 – 268.

Vaughan, P.R. y Kwan, C.W. (1984). Weathering, structure and in situ stress in residual soils. London, Géotechnique, Vol. 34, No. 1, pp. 43 - 59.

Villarraga, M. (1987). Respuesta aleatoria tridimensional de presas de tierra. Ciudad de México. Tesis de Maestría Universidad Nacional Autónoma de México.

The Geological Society (1997). Geological Society Professional Handbooks: Tropical Residual Soils. London: Geological Society.

Zeevaert, L. (1972). Foundation engineering in difficult subsoil conditions, 1st. edition. New York: Van Nostrand – Reinhold Company.

\_\_\_\_\_ (1984). Séptima conferencia Nabor Carrillo: condiciones ambientales en el diseño de la cimentación de edificios. Queretaro, México, en: XII Reunión Nacional de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.