

# Correlación entre el Valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de Ondas de Corte para Arcillas en Bogotá - Colombia

Andrés José Alfaro Castillo\*

## RESUMEN

La velocidad de ondas de corte  $V_s$  es uno de los parámetros más importantes para la clasificación de suelos y rocas, ya que describe confiablemente las características estáticas y dinámicas de los materiales. La realización de los ensayos para su determinación es relativamente fácil y los costos son marginales comparados con las perforaciones. A pesar de esto, su ejecución no se ha extendido en Colombia. Debido a ello, en muchas oportunidades se requiere la utilización de correlaciones desarrolladas en suelos con otras características. Este artículo presenta correlaciones entre el valor de N del Ensayo de Penetración Estándar, ampliamente utilizado en Colombia y en el mundo, y la velocidad de ondas de corte  $V_s$  obtenidos en ensayos *down hole* en la ciudad de Bogotá. Los resultados obtenidos  $V_s = 91.44h^{0.291} N^{0.298}$  y  $V_s = 99.783 N^{0.383}$ , se comparan con otras correlaciones reportadas por la literatura. Dichos resultados obtenidos son satisfactorios y útiles en el campo de la Ingeniería Sísmica.

**Palabras clave:** Ensayo de Penetración Estándar, Velocidad de Ondas de Corte, correlación, arcilla, Bogotá, Colombia,

## CORRELATION BETWEEN N-VALUE OF STANDARD PENETRATION TEST AND SHEAR-WAVE VELOCITY FOR CLAYS IN BOGOTA - COLOMBIA

### ABSTRACT

Shear wave velocity  $V_s$  is one of the most important parameters for soil and rock classification, because it can describe accurately static and dynamic characteristics of materials. Testing is relatively easy and costs are marginal compared with the drills. However, these tests are not extended in Colombia. For that reason, many times it is necessary to use correlations developed for soils with different characteristics. This paper presents correlations of N-value from a Standard Penetration Test, which is widely used in Colombia and all over the world, with S-Wave Velocity from down-hole tests. Equations obtained  $V_s = 91.44h^{0.291} N^{0.298}$  and  $V_s = 99.783 N^{0.383}$  are comparable with reported equations from references. Such results are acceptable and useful in Earthquake Engineering field.

**Key words:** Standard Penetration Test, Shear Wave Velocity, Correlation, clays, Bogotá, Colombia.

\* Ingeniero Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Master en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural de la Universidad Politécnica de Cataluña. Especialista en Sismología del *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering* en Tsukuba- Japón. Profesor de la Universidad de La Salle. Investigador del CIEES, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: alfaro@ciees.org

Fecha de envío: 2 de marzo 2007

Fecha de aceptación: 9 de abril de 2007

## INTRODUCCIÓN

El artículo presenta las características geotécnicas de los materiales de los cuales provinieron los datos; después se presentan las correlaciones obtenidas. Finalmente, la discusión y las conclusiones. La caracterización del subsuelo se realiza desde los puntos de vista estático y dinámico, la parte dinámica se hace principalmente para estructuras que van a estar sometidas a cargas de este tipo, comúnmente maquinaria y cargas de viento y sismo. Colombia está localizada en una región propensa a la actividad sísmica, con un largo historial de sismos de gran magnitud y otros con magnitudes intermedias pero que causaron gran cantidad de daños y víctimas (Ramírez, 1975).

En Colombia, las regulaciones para el diseño sismo-resistente son de obligatorio cumplimiento (Congreso de la República, 1997); estas incluyen en los títulos A y H la caracterización de los suelos dependiendo de la velocidad de ondas de corte de la siguiente manera:

Perfil de suelo S1 – Es un perfil que tiene las siguientes propiedades:

- a) Está compuesto, hasta la superficie, por roca de cualquier característica, que tiene una velocidad de la onda cortante mayor o igual a 750 metros por segundo, o
- b) perfiles que entre la roca y la superficie están conformados por suelos duros, o densos, con un espesor menor de 60 m, compuestos por depósitos estables de arenas, gravas o arcillas duras, con una velocidad de la onda de cortante mayor o igual a 400 m/seg.

Perfil de suelo S2 – Es un perfil que tiene las siguientes propiedades:

- a) Perfiles en donde entre la roca y la superficie existen más de 60 m de depósitos estables de suelos duros o densos, compuestos por depósitos estables de arcillas duras o suelos no cohesivos, con una velocidad de la onda de cortante mayor o igual a 400 m/s, o
- b) perfiles en donde entre la roca y la superficie existen menos de 60 m de depósitos estables de suelos de consistencia media compuestos por materiales con una velocidad de la onda de cortante cuyo valor está entre 270 y 400 m/seg.

Perfil de suelo S3 – Es un perfil en donde entre la roca y la superficie hay más de 20 m de suelo que contiene depósitos estables de arcillas cuya dureza varía entre mediana y blanda, con una velocidad de la onda de cortante entre 150 y 270 m/s y que dentro de ellos, en conjunto, hay menos de 12 m de arcillas blandas.

Perfil de suelo S4 – Es un perfil en donde, dentro de los depósitos existentes entre la roca y la superficie, hay más de 12 m de arcillas blandas, caracterizadas por una velocidad de la onda de cortante menor de 150 m/seg.

De otra parte, el Título H de la norma sismorresistente presenta una clasificación diferente como se muestra en las tablas 1 y 2.

**TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES DE SUELO (CONGRESO DE LA REPÚBLICA, 1997)**

Tipo de Perfil	Descripción	Definición
<b>A</b>	Perfil de roca Competente	$V_s > 1500 \text{ m/s}$
<b>B</b>	Perfil de roca de cualquier espesor	$1500 \text{ m/s} > V_s > 760 \text{ m/s}$
<b>C</b>	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, de cualquier espesor que cumpla con el criterio de velocidad de la onda cortante	$760 \text{ m/s} > V_s > 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, de cualquier espesor que cumpla con cualquiera de los dos criterios	$N > 50$ , o $S_u > 100 \text{ kPa}$ ( $\sim 1 \text{ kgf/cm}^2$ )
<b>D</b>	Perfiles de suelos rígidos de cualquier espesor que cumpla con el criterio de velocidad de la onda cortante	$360 \text{ m/s} > V_s > 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos de cualquier espesor que cumpla cualquiera de las dos condiciones	$50 > N > 15$ , o $100 \text{ kPa}$ ( $\sim 1 \text{ kgf/cm}^2$ ) $> S_u > 50 \text{ kPa}$ ( $\sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ )
<b>E</b>	Perfil de cualquier espesor que cumpla el criterio de velocidad de la onda cortante	$180 \text{ m/s} > V_s$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $W > 40\%$ $25 \text{ kPa}$ ( $\sim 0.25 \text{ kgf/cm}^2$ ) $> S_u$
<b>F</b>	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases. F1 – Suelos vulnerables a la falla o colapso causado por una excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F2 – Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F3 – Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con índice de Plasticidad IP > 75) F4 – Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

**TABLA 2. CRITERIOS PARA CLASIFICAR SUELOS DENTRO DE LOS PERFILES DE SUELO C, D O E.**

Tipo de Perfil	$V_s$	$N$ o $N_{ch}$	$S_u$
<b>C</b>	Entre 360 y 760 m/s	Mayor que 50	Mayor que 100 Kpa ( $\sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ )
<b>D</b>	Entre 180 y 360 m/s	Entre 15 y 50	Entre 100 y 50 Kpa ( $\sim 0.5$ a $1.0 \text{ kgf/cm}^2$ )
<b>E</b>	Menor de 180 m/s	Menor de 15	Menor de 50 Kpa ( $\sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ )

Fuente: Congreso de la República, 1997

Donde N es el número medio de golpes del ensayo de penetración estándar en cualquier perfil de suelo.

A pesar de la importancia de la medición de la velocidad de ondas de corte, es poco común la realización de dichos ensayos, excepto en proyectos especiales. Por lo tanto, se recurre a correlaciones desarrolladas en diferentes partes del mundo (Imai y Yoshimura,

1970; Ohba y Toriumi, 1970; Hara *et al.*, 1974; Imai, 1977; Ohta y Goto, 1978; Wroth *et al.*, 1979; Imai y Tonouchi, 1982; Okamoto *et al.*, 1989; Japan Road Association, 2002, entre otras). La caracterización dinámica del subsuelo se puede realizar en campo o en laboratorio, toda una serie de ensayos se puede consultar en Alfaro (2006). La Tabla 3 presenta algunas de las ecuaciones mencionadas.

**TABLA 3.** ECUACIONES EMPÍRICAS DE CORRELACIÓN N DEL SPT CON LA VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE  $V_s$

Investigadores	Ecuación	Observaciones
Imai y Yoshimura (1970)	$V_s = 76N^{0.33}$	
Ohba y Toriumi (1970)	$V_s = 84N^{0.31}$	
Imai (1977)	$V_s = aN^b$	a=102, b=0.29 Arcilla Holoceno a= 81, b=0.33 Arena Holoceno a=114, b=0.29 Arcilla Pleistoceno a= 97, b=0.32 Arena Pleistoceno
Ohta y Goto (1978)	$V_s = 85.34N^{0.348}$	Para todo tipo de suelo
Okamoto <i>et al.</i> (1989)	$V_s = 125N^{0.3}$	Arena del Pleistoceno
Japan Road Association (2002)	$V_s = 80N^{1/3}$ $V_s = 100N^{1/3}$	Arenas Arcilla
Vs=velocidad de ondas de corte en m/s; N=numero de golpes del SPT		

## PROSPECCIÓN GEOFÍSICA Y GEOTÉCNICA

Los 108 conjuntos de datos analizados provienen de dos campañas: una geotécnica (Geotecnia y Cimentaciones, 2002) y otra geofísica (Ulloa, 2002), de las perforaciones se extrajeron muestras alteradas e inalteradas (Alfaro *et al.*, 2002a). Las perforaciones fueron revestidas lo que permitió realizar ensayos geofísicos tipo *Down-Hole*, para determinar la velocidad a la que se pueden transmitir las ondas sísmicas en el subsuelo (Ulloa, 2002).

Para los ensayos tipo *Down Hole* se empleó una sonda triaxial *Geometrics* compuesta por dos geófonos horizontales y uno vertical. La interpretación de datos se realizó mediante el empleo del programa SIP (*Seismic Interpretation Program*); el método de interpretación fue el de tiempos de retraso.

De acuerdo con Kramer (1996) el ensayo de penetración estándar (SPT) es de lejos el ensayo de campo más antiguo y más usado en la ingeniería geotécnica en todo el mundo. Es además el más comúnmente utilizado en un número de aplicaciones de Ingeniería

Sísmica Geotécnica. El valor de N, que resulta de hincar 12 pulgadas en el suelo un muestreador cilíndrico, con un martillo de 140 libras desde una altura de 18 pulgadas, depende del tipo de suelo, de la presión de confinamiento y de la densidad del suelo; pero también está influenciado por el equipo de ensayo y los procedimientos utilizados. Esto genera cambios significativos en la energía suministrada al martillo en cada golpe. Aunque en términos generales se le denomina ensayo SPT hay ligeras variaciones en la realización del ensayo y es necesario normalizar los resultados obtenidos en campo; en este estudio, por desconocerse el porcentaje de energía que suministran los dos equipos utilizados se utilizó el valor de N sin ningún tipo de normalización.

## ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LA ZONA ESTUDIADA

De acuerdo con Giraldo *et al.* (2002) y Alfaro *et al.* (2002a; 2002b) los suelos analizados se dividen principalmente en tres zonas.

**Zona I. Zona de Coluviones y Aluviones Antiguos:** es un depósito no consolidado de cantos rodados,

bloques y trozos angulares, grava, arena, limo y arcilla. El espesor de dicho depósito alcanza valores máximos de 18 m, a esta profundidad se presenta el contacto con la Formación Bogotá (*Teb*).

**Zona II: Zona de arcillas de baja plasticidad:** esta zona está conformada principalmente por sucesión de horizontes de arcillas de baja plasticidad y algunos lentes ocasionales de limos, con espesores que varían desde algunos centímetros hasta 10 m. Subyaciendo los anteriores materiales se encuentra el perfil de meteorización de la Formación Bogotá (*Teb*), constituida por arcillas rojizas y grises de baja plasticidad, que se detectó a profundidades variables desde 1.0 m hasta 5.0 m. De acuerdo con los resultados de los ensayos de laboratorio, este horizonte posee resistencia mecánica alta. Una vez pasado este horizonte, se encuentran arcillolitas abigarradas (grises, violáceas, moradas y rojas) de la Formación Bogotá (*Teb*).

De acuerdo con la profundidad a la que se encuentra el basamento rocoso, dentro la zona II se puede ubicar una subzona IIA, a saber:

**Zona IIA.** Se diferencia ésta zona por encontrarse el basamento rocoso a profundidades mayores a 10 m.

**Zona III. Formación Cacho.** El basamento rocoso de ésta zona está constituido por el conjunto de arcillolitas y limolitas grises, rojizas y abigarradas que hacen parte de la Formación Cacho (*Tpc*). Se destaca en esta zona la presencia de un depósito Fluvioglacial no consolidado compuesto por bloques y cantos de arenisca y limolita silíceas en una matriz limoarcillosa.

La Tabla 4 presenta el resumen de los datos utilizados en las regresiones: número de golpes *N* del Ensayo de Penetración Estándar, la velocidad de ondas de corte y la desviación estándar de la misma. Se asume que los errores en profundidad y en *N* son muy pequeños, en tanto que pueden ser importantes en *Vs*, ya que es una medida indirecta, producto de un modelo matemático.

**TABLA 4. DATOS UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS**

<i>N</i>	<i>Vs</i> promedio m/s	Desviación estándar de <i>Vs</i> m/s	Número de datos
2	177	49.33	3
3	120	No aplicable	1
5	210	No aplicable	1
6	190	26.46	3
8	200	No aplicable	1
9	260	113.43	4
10	200	No aplicable	1
12	200	No aplicable	1
13	490	375.10	3
17	230	No aplicable	1
19	440	219.32	3
20	140	0.00	2
21	575	77.78	2

<b>N</b>	<b>Vs promedio m/s</b>	<b>Desviación estándar de Vs m/s</b>	<b>Número de datos</b>
22	230	No aplicable	1
25	330	No aplicable	1
27	390	No aplicable	1
28	390	No aplicable	1
29	390	No aplicable	1
31	330	No aplicable	1
32	285	106.07	2
36	360	No aplicable	1
37	630	No aplicable	1
38	180	No aplicable	1
43	700	707.11	2
44	230	No aplicable	1
45	540	424.26	2
48	735	346.48	2
49	360	42.43	2
51	293	176.2	3
52	530	70.71	2
53	705	700.04	2
53	210	No aplicable	1
56	540	No aplicable	1
57	380	No aplicable	1
58	750	475.82	4
59	240	No aplicable	1
60	726	325.78	3
61	680	664.68	2
73	460	No aplicable	1
76	430	No aplicable	1
77	860	No aplicable	1
79	360	No aplicable	1
80	603	205.02	3
86	380	No aplicable	1
88	1050	No aplicable	1
95	360	No aplicable	1
100	553	282.75	6
104	835	445.48	2

La nota de No Aplicable significa que sólo había un dato disponible, a pesar de que hay algunos valores altos de desviación estándar no se descartó ningún dato por la escasa cantidad de los mismos.

## ANÁLISIS DE DATOS

El análisis de datos se realizó por regresión simple para las relaciones  $V_s = f(h)$  y  $V_s = f(N)$  y regresión múltiple para  $V_s = f(h, N)$ . Adicionalmente, se incluyó un análisis incorporando los datos de la varian-

za de la velocidad de ondas  $V_s$  de acuerdo con Hara (2004), dicho programa incluye la subrutina *gaussj.f* de Press *et al.* (2003).

La Tabla 5 resume los resultados obtenidos en este estudio y los compara con Ohta y Goto (1978).

**TABLA 5.** RESULTADOS OBTENIDOS

Ohta y Goto (1978)			Este estudio	
Ecuación	Coefficiente de Correlación	Observaciones	Ecuación	Coefficiente de Correlación
$V_s = 85.34 N^{0.348}$	0.719	Para todo tipo de suelo	$V_s = 99.783 N^{0.383}$	0.676
$V_s = 85.6 N^{0.340}$	0.726	Para Arcillas		
$V_s = 92.12 H^{0.339}$	0.670	Para todo tipo de suelo	$V_s = 1.4038 H^{0.3053}$	0.385
$V_s = 78.98 H^{0.312}$	0.765	Para Arcillas		
$V_s = 61.62 h^{0.222} N^{0.254}$	0.820	Para todo tipo de suelo	$V_s = 91.44 h^{0.291} N^{0.298}$	0.460
$V_s = 62.14 N^{0.219} H^{0.230}$	0.830	Para Arcillas		

Los datos utilizados en este estudio corresponden a arcillas producto de meteorización de arcillolitas de la Formación Bogotá (Alfaro y Monroy, 2004; Alfaro *et al.*, 2005). El estudio de Ohta y Goto (1978) incluye los siguientes tipos de suelo: Arcilla, Arena Fina, Arena Media, Arena Gruesa, Arena mezclada con Grava y Grava.

La Figura 1 presenta el valor promedio de los datos, más o menos la desviación estándar y compara el ajuste obtenido con las ecuaciones de Ohta y Goto (1978), la de Okamoto *et al.* (1989) y la del Título H del Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes (Congreso de la República, 1997). El resultado obtenido es bastante cercano a la ecuación propuesta por Okamoto *et al.* (1989). La Figura 2 presenta un análisis comparativo de las ecuaciones de la Tabla 3 con los resultados obtenidos en este estudio

y la recomendación del Código Colombiano, dichas ecuaciones son las correspondientes a la velocidad como función del numero de golpes N.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos generan valores ligeramente mayores que los reportados por las referencias, lo cual implicaría mejores características estáticas y dinámicas de los materiales. Sin embargo, estos resultados están restringidos a arcillas producto de la meteorización de arcillolitas. Dichas arcillas por proceso de secado presentan valores altos de N cerca de la superficie, pero valores relativamente bajos de velocidad de ondas de corte. Sería recomendable incluir más conjuntos de datos para tener unas ecuaciones más robustas; en este estudio se analizaron 108 conjuntos de datos (N,  $V_s$ , h). Si bien las corre-

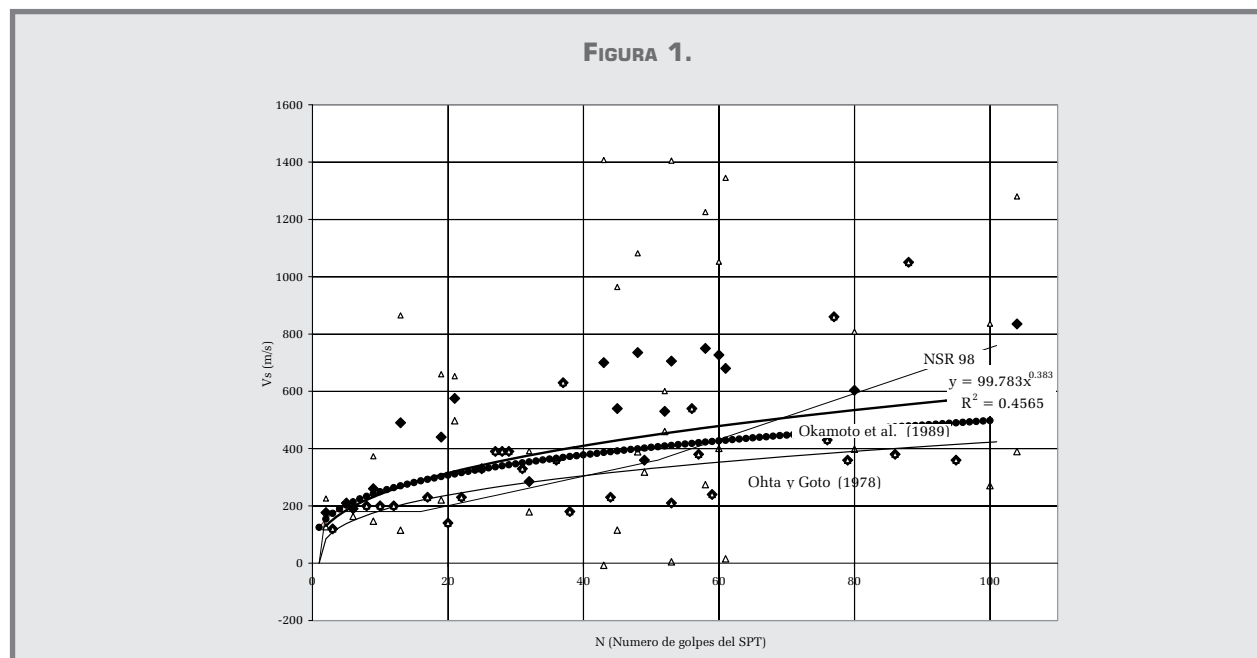
laciones  $V_s = f(N)$  y  $V_s = f(N, h)$  son consistentes con las reportadas por la literatura, la ecuación  $V_s = f(h)$  se considera no aceptable, posiblemente debido al endurecimiento de la parte superior del subsuelo debido a procesos de secado de este tipo de arcillas.

Los análisis acerca de la estimación del comportamiento dinámico de diferentes tipos de suelo (García, 2001; Díaz-Granados, 2001; García y Alfaro, 2001; Calpa *et al.*, 2001; Alfaro *et al.*, 2001; García *et al.*, 2001) fueron realizados con las relaciones de Ohta y Goto (1978); se recomienda actualizar dichos estudios teniendo en cuenta las otras ecuaciones y los resultados obtenidos en esta investigación, en el caso de tener presencia de arcillas y observar las variaciones que se pueden presentar en los valores de períodos predominantes del suelo y las amplificaciones asociadas.

Los resultados obtenidos son satisfactorios; sin embargo, son mayores que los reportados por Ohba y Toriumi (1970); Imai (1977); Ohta y Goto (1978); Okamoto *et al.* (1989) y la Japan Road Association

(2002). Esto se puede deber a los siguientes hechos: arcillas endurecidas por proceso de secado superficial; en segundo término los valores de N no fueron normalizados por desconocimiento de las características técnicas de los dos equipos que realizaron las perforaciones; en tercer lugar, existe la limitación del número del conjunto de datos, el cual fue de 108. De otra parte, los valores que sugiere el título H del Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes (Congreso de La República, 1997) resultan mayores que las correlaciones de las referencias anteriores para valores de N mayores a 58 y de los resultados de este estudio mayores a 68, pudiendo inferir mejores calidades del suelo que no se compadecen con la realidad.

Se recomienda utilizar la ecuación  $V_s = 99.783 N^{0.383}$  ya que tiene un coeficiente de correlación aceptable y comparable con las ecuaciones equivalentes de Ohta y Goto (1978). En el caso de  $V_s = 91.44h^{0.291} N^{0.298}$  su relativamente bajo coeficiente de correlación sugiere que es mejor utilizar las ecuaciones de Ohta y Goto (1978) en caso de no contar con datos de campo.



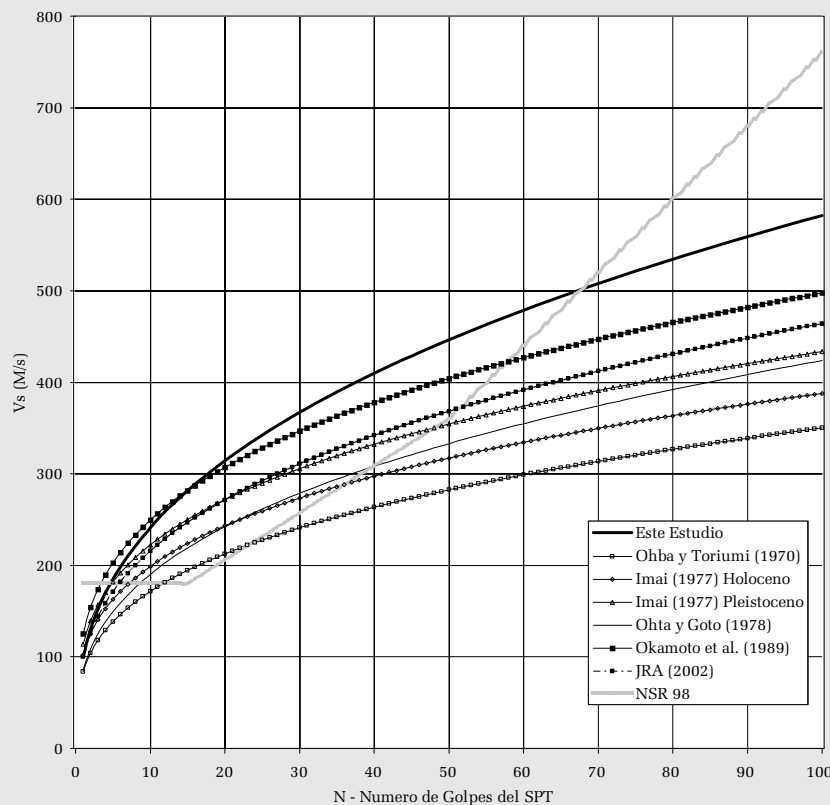


Los rombos negros representan el valor promedio de los datos; los triángulos blancos representan la media más o menos la desviación estándar; la línea continua inferior es la ecuación de Ohta y Goto (1978); la línea con círculos corresponde a Okamoto *et al.* (1989) y la función discontinua es la recomendación del Título H del Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes (Congreso de la República, 1997).

## AGRADECIMIENTOS

Las campañas de exploración del 2002 fueron financiadas por la Rectoría de la Pontificia Universidad Javeriana. El estudio fue dirigido por el autor. Prospección Geofísica: Ingeniero Alejandro Ulloa; Prospección Geotécnica: Geotecnia y Cimentaciones Compañía Ltda.

**FIGURA 2.** ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ECUACIONES DE LA TABLA 3 CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN ESTE ESTUDIO Y LA RECOMENDACIÓN DEL CÓDIGO COLOMBIANO, LAS ECUACIONES SON DE LA FORMA  $V_s = aN^b$ .



## BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, A. *Caracterización Dinámica de Suelos Mediante Microtemblores - HVSR y Arreglos*. Bogotá: Ediciones Unisalle, 2006.
- Alfaro, A y Monroy, P. "Caracterización Dinámica de Arcillas Sobre la Formación Bogotá". *Revista de Investigación* 4. (2004): 173 - 180.
- Alfaro, A., Martínez, L., Díaz-Granados, K. y Escobar, P. "Aportes para la Microzonificación Sísmica de Ibagué". *Red Sismológica Regional Eje Cafetero Viejo Caldas y Tolima* 6. 1. (2001): 32 - 37.
- Alfaro A., Giraldo, V. Ramos, M. y García D. *Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá. Caracterización Geotécnica del Campus Universitario*. Bogotá: Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002.
- Alfaro, A., Giraldo, V., Ramos, M. y García, D. *Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá. Modelación Numérica de Efectos Locales*. Bogotá: Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002.
- Alfaro, A., et al. "Modelación 1D y 2D de efectos locales en algunas arcillolitas de la formación Bogotá al centro-oriente de la ciudad". *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* 58. (2005): 25 - 30.
- Calpa C., Pantoja, J., Alfaro, A. y Van Hissenhoven, R. "Evidencias de efectos locales y Mapa de Susceptibilidad Sísmica en la ciudad de Pasto". Memorias de las XI Jornadas Geotécnicas De La Ingeniería Colombiana y IV Foro Sobre Geotecnia de la Sabana de Bogotá, 2001.
- Congreso de Colombia. *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente 1998*. Ley 400 de 1997.
- Díaz-Granados, A. "Modelación Numérica de Efectos Locales en Ibagué". Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de Grado. Bogotá, 2001.
- García, D. "Estimación de efectos locales en el Campus de la Universidad Javeriana Mediante Modelación Numérica". Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de Grado. Bogotá, 2001.
- García, D. y Alfaro, A. "Estimación de Efectos Locales en el Campus de la Universidad Javeriana Mediante Modelación Numérica". *Memorias del Segundo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, 16 al 19 de Octubre de 2001 Madrid - España*. 2001: 181 - 191. Doc 100.6.pdf.
- García, D., Alfaro, A. y Giraldo V. "Estimación de los Efectos Locales para la Reducción del Riesgo Sísmico en el Campus de la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá". *Memorias de las XIV Jornadas Estructurales de la Ingeniería en Colombia*. Bogotá, 2001.
- Geotecnia y Cimentaciones. *Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana - Sede Bogotá. Exploración Geotécnica*. Bogotá, 2002.
- Giraldo, V., Alfaro, A. y García, D. *Estimación de Efectos Locales en el Campus de la Universidad Javeriana Mediante Modelación Numérica*. Proyecto VA-913, Bogotá: Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002.
- Hara, T. *Data Processing. IISEE. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Lecture Notes*. Tsukuba. Japan, 2004.
- Hara, A. , Ohta, T., Niwa, M., Tanaka, S. y Banno, T. "Shear modulus and shear strength of cohesive soils". *Soil and Foundations* 14. (1974): 1 - 12.

- Imai, T. "P and S wave velocities of the ground in Japan". *Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Tokio, 2, (1977): 257 - 260.
- . y Yoshimura, Y. Elastic Wave Velocity and Soil Properties in Sofá Soil, *Tsuchi-to-Kiso*, 18, 1, (1970): 17 - 22.
- . Tonouchi y K. "Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus". *Proc. 2<sup>nd</sup> European Sym. Penetration Testing*, Amsterdam. (1982): 57 - 72.
- Japan Road Association. Specifications for Highway Bridges, Part V, Seismic Design, 2002.
- Kramer, S.L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc. 1996.
- Ohba, S. y Toriumi, I. *Dynamic Response Characteristics of Osaka Plain*. Proc. Annual Meeting A.I.J., 1970.
- Ohta, Y. y Goto, N. "Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristics soil indexes" *Earthq. Eng. Struc. Dyn* 6. (1978): 167 - 187.
- Okamoto, T., Kokusho, T., Yoshida, Y. y Kusunoki, K. "Comparison of surface vs. Subsurface Wave Source Wave Source for P-S Logging in Sand layer". *Proc. 44<sup>th</sup> Annual Conf. JSCE* 3. (1989): 996 - 997.
- Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B. P. Flannery. *Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing*. Code CDROM v 2.11. Cambridge University Press, 2003.
- Ramírez, J.E. *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC, 1975.
- Ulloa, A. *Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana – Sede Bogotá*. Prospección Geosísmica. Bogota: 2002.
- Wroth, C.P., Randolph, M.F., Houlsby, G.T. and Fahey, M. A review of the engineering properties of soils with particular reference to the shear modulus, CUED/D-SOILS TR 75, University of Cambridge, 1979.