

Determinación de la correlación entre el coeficiente de compresión y propiedades índice en suelos de expansión urbana de Pereira

Determination of the correlation between the compression ratio in soil and index properties on soils of urban expansion in Pereira

Ing. Gloria Milena Molina Vinasco^{1*}, Estefanía Hernández López^{2*} y Christian Camilo Castillo Restrepo^{3*}

¹*Docente facultad de ingenierías, Universidad Libre de Pereira, Colombia. *gmmolina@unilibrepereira.edu.co*

²*Semestre 10 – Ingeniería Civil, Universidad Libre de Pereira, Colombia. *teja.bernandez91@hotmail.com*

³*Semestre 10 – Ingeniería Civil, Universidad Libre de Pereira, Colombia. *christian-castillo@hotmail.es*

Fecha de recepción del artículo: 28/12/2012 Fecha de aceptación del artículo: 28/12/2012

Resumen

Los suelos de la ciudad de Pereira se encuentran conformados por depósitos producto de la meteorización de cenizas volcánicas que tienen espesores entre 6 y 20 m que sobreyacen a la roca parental; la caracterización de este tipo de material es ampliamente estudiada, en lo que atañe a su proceso de formación, sus características y la potencia de sus estratos. En esta investigación se realiza el análisis de la compresión (comportamiento esfuerzo deformación unidimensional) y su relación con parámetros físicos como el Límite Líquido, Gravedad Específica y peso unitario del suelo, en diferentes sitios de la zona de expansión urbana de la ciudad de Pereira, como un aporte al conocimiento geotécnico de estos suelos residuales.

Palabras clave

Consolidación, Límites de Atterberg, Coeficiente de compresión, Cenizas Volcánicas

Abstract

Soils in Pereira city are formed by deposits product the weathering of volcanic ashes that have thick-

ness between 6 and 20 m overlying the parent rock; characterization of this material is widely studied with respect to its formation process, features and power of its layers. In this research is made the analysis of the compression (behavior effort deformation unidimensional) and its relevance with physical parameters such as liquid limit, specific gravity and unit weight of soil, in different places on the urban expansion area in the city of Pereira, as an input to the geotechnical knowledge of these residual soils.

Key words

Consolidation, Atterberg limits, compression index, volcanic ash

Introducción

En el municipio de Pereira, los suelos derivados de cenizas volcánicas, sobreyacen las unidades de roca consolidada y no consolidada, excepto en laderas de alta pendiente donde han sido erosionadas o en llanuras de inundación donde han sido removidas por la dinámica de las corrientes, se ha determinado valores máximos para sus espesores hasta de 20 m

(Vásquez et al, 2000). Estos depósitos en Colombia ocupan cerca del 11,6% del territorio, estos suelos se extienden desde el Eje Cafetero en el centro del país, hasta los departamentos de Tolima, Cauca y Nariño (Lizcano et al 2006).

El estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas ha sido ampliamente realizado (Wesley, 2003, Lizcano et al, 2006, Stoops, 2007, Verdugo, 2008), dichas investigaciones presentan un completo análisis del comportamiento y composición de los mismos, presentando intervalos característicos para valores índices como la gravedad específica (G_s), límite líquido (LL) y Humedad Natural (w), Relación de Vacíos (e) y Densidad Seca (ρ_s), como también para parámetros mecánicos como Coeficiente de Compresión (C_c), Coeficiente de Consolidación (C_v) y Velocidad de Onda Corte (V_s).

Uno de los parámetros mecánicos relevantes del suelo, se evalúa mediante la teoría de consolidación, que representa en un suelo cohesivo el resultado de la disipación del exceso de presión de poros, generada en él, durante la aplicación de una carga externa (Terzaghi 1925). Este proceso genera asentamientos que representan un problema importante en la ingeniería civil (Conte, 2004). Los asentamientos se calculan a través de la determinación del coeficiente de compresión en un ensayo de consolidación unidimensional.

De acuerdo con Lambe y Whitman, 1979 no analizar el asentamiento del suelo al proyectar una estructura sobre él, puede llevar a consecuencias catastróficas tales como la inclinación, fisuración e incluso el colapso de la misma. Frecuentemente durante la consolidación la posición relativa de las partículas sólidas sobre un mismo plano horizontal permanece igual. Así, el movimiento de las partículas de suelo puede ocurrir sólo en la dirección vertical, proceso denominado consolidación unidimensional (Lambe y Whitman, 1979). El ensayo de consolidación unidimensional ha sido ampliamente usado para obtener el asentamiento y los parámetros del mismo (Bowles 1997).

De acuerdo con Coduto, 2001 durante esta etapa, el método de consolidación unidimensional permite construir una interpolación entre la deformación y la tensión efectiva en una escala logarítmica. La pendiente de la interpolación es el Coeficiente de compresión (ec 1).

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)}$$

En investigaciones para suelos derivados de cenizas volcánicas a través del ensayo de consolidación, se determinaron relaciones de vacíos muy elevadas, variando típicamente entre $e = 2,5$ y $e = 7$ (Rants et al., 2002; Wesley, 2001; So, 1998), en Colombia se han encontrado relaciones de vacíos variando entre $e = 2$ hasta valores muy altos $e = 7$ de acuerdo con Forero et al. 1999.

A pesar de las relaciones de vacíos altas Lizcano et al 2006, encontró para suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia Coeficientes de Compresión (C_c) bajos variando desde 0.35 hasta 0.19 para a esfuerzos verticales efectivos (σ_v') entre 200 y 300 kPa, y mayores variando desde 0,85 hasta 1,40, una vez se supera el nivel de esfuerzos. Verdugo, 2008, encuentra valores hasta de 1.53 para C_c en éste tipo de suelos en Chile.

La determinación del coeficiente de compresión, a través del ensayo de consolidación unidimensional, resulta larga y costosa (Bowles, 1997), frecuentemente se utilizan ecuaciones empíricas para estimar C_c , algunas de ellas se presentan en la tabla 1. La aplicación de las ecuaciones citadas debe realizarse siempre y cuando los suelos en estudio, tengan propiedades índices similares a los que se usaron para obtener las ecuaciones, razón por la cual no son aplicables en los suelos de la zona.

Existen ya estudios realizados en la ciudad de Pereira que han buscado determinar correlaciones. En el año 2001 la Universidad Tecnológica de Pereira publicó un proyecto sobre los suelos del eje cafetero realizado por la Universidad de Los Andes, en

Tabla 1. Correlaciones de Coeficiente entre Coeficiente de Compresión y Límite Líquido. Fuente: Braja Das, 2001, Jiménez, 1998 y Bowles 1997.

Ecuación	Autor	Año	Tipo de suelo
$Cc = 0.009(LL - 10)$	Terzaghi y Peck	1967	Arcillas Inalteradas
$Cc = 0.007(LL - 10)$	Terzaghi y Peck	1967	Arcillas Remoldeadas
$Cc = 0.141 G_s^{1.2} \left(\frac{1 + e_n}{G_s} \right)^{2.38}$	Rendon - Herrero	1983	Arcillas Naturales
$Cc = 0.2343 \left(\frac{LL(\%)}{100} \right) G_s$	Nagaraj y Murty	1985	Arcillas Naturales
$Cc = 0.0097(LL - 16,4)$	Skempton	-	Suelos Españoles
$Cc = 0.99w^{1.315}$	Skempton	-	Suelos Españoles
$Cc = 0.37(e_0 + 0.003LL + 0.0004w_N - 0.34)$	Azzouz	1976	-
$Cc = 0.0093w_N$	Koppula	1981	-
$Cc = 0.046 + 0.0104IP$	Nakase	1988	-
$Cc = 0.0023 \cdot LL \cdot G_s$	Nagaraj y Murty	1985 - 1986	-
$Cc = 1.15 (e_0 - 0.35)$	Nishida	1956	-
$Cc = 0.009 w_N + 0.005 LL$	Koppula	1986	-
$Cc = -0.156 + 0.411 e_0 + 0.00058 LL$	Al-Khafaji and Andersland	1992	-

donde se plantea una ecuación que correlaciona el coeficiente de compresión con el Límite Líquido, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Determinación de Cc para cenizas volcánicas en la zona urbana de Pereira.

Ecuación	Autor	Año	Tipo de suelo
$Cc = 0.0091(LL - 15)$	Universidad de los Andes	2001	Cenizas Volcánicas (Zona Urbana)

En este artículo se pretende verificar los resultados en el cálculo del asentamiento con la ecuación propuesta por la Universidad de Los Andes y realizar ensayos de laboratorio que nos permitan obtener correlaciones entre Coeficiente de Compresión y

valores índices en suelos derivados de cenizas volcánicas en la ciudad de Pereira, como un aporte a la caracterización de los suelos de la zona.

Metodología

A continuación se realiza la explicación de las fases, criterios y consideraciones que se tuvieron en cuenta para el avance de la investigación.

Fase I: Delimitación geográfica de estudio. De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial, el municipio se encuentra dividido en zona urbana y de expansión urbana. La investigación se limitó al análisis de suelos derivados de cenizas volcánicas en

la zona de expansión urbana, en donde se realizaron sondeos para recuperación de muestras inalteradas del suelo de acuerdo con la norma Icontec NTC 2121 (Obtención de Muestras con Tubos de Pared Delgada), hasta una profundidad máxima de 10.0 m.

Los resultados obtenidos en la investigación, se asociaron con los resultados de los análisis de consolidación para suelos de la ciudad de Pereira, encontrados en el estudio de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Pereira, 1998, elaborados por la Universidad de Los Andes, como una validación para la nueva información.

La tabla 3 presenta la localización de los sondeos realizados hasta la fecha, los sitios perforados se nombran como Villa Verde, Unilibre, Galicia y la Virginia, todos se encuentran en la zona de expansión urbana y corresponden a suelos producto de la meteorización de cenizas volcánicas, otros lugares se encuentran establecidos, pero aún no se han realizado perforaciones.

Fase II: Ensayos de laboratorio: A las muestras extraídas se les realizaron ensayos de consolidación unidimensional de acuerdo con la norma NTC-1967, con saturación inicial de la muestra y aplicación de esfuerzos entre 100 kPa y 1600 kPa, límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico), siguiendo los lineamientos de la norma NTC 4630 sometiendo a la

muestra a un secado previo al aire, Gravedad Específica de acuerdo con la norma NTC 1974, y Humedad natural NTC 1495. Se aclara que la investigación se encuentra en proceso y hasta la fecha solamente se han realizado los ensayos correspondientes a uno de los sitios perforados. En la Tabla 4 se describen los ensayos realizados y los ensayos reportados en el estudio de Microzonificación Sísmica de Pereira, 1998.

Fase III: Análisis de Resultados. Correlación entre los datos obtenidos en las pruebas de consolidación y límite de Atterberg realizadas en los suelos de la zona de expansión urbana.

Resultados

Los suelos derivados de cenizas volcánicas se clasificaron de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, como MH (limo de alta compresibilidad), su contenido de humedad natural vario desde 58% hasta 182%, con un valor promedio de 93.29%, resultados similares a los obtenidos para éste tipo de suelos por diferentes autores (Sudhakar, 1995, Lizcano et al 2006).

El peso unitario húmedo promedio obtenido para las muestras de suelo fue de 1.46 g/cm³ y el peso unitario seco promedio fue de 0.80 g/cm³, valores correspondientes a los obtenidos por M. Hürliemann et al, 2001 en trabajos sobre estos suelos en las islas canarias.

Tabla 3. Coordenadas IGAC de Ubicación Perforaciones

Sector	Sondeos		Muestras		Altura (m.sn.m)	Coordenadas				
	Cantidad	Profundidad (m)	Profundidad (m)	Cantidad		Grados	Minutos	Segundos		
Villa Verde	3	5	1.5	9	1410	Latitud	4	47	35.53	N
						Longitud	75	42	9.23	O
Unilibre	1	10	1.5	6	1242	Latitud	4	48	19.69	N
						Longitud	75	45	38.71	O
Galicia	1	10	1.5	6	1215	Latitud	4	48	40.8	N
						Longitud	75	47	44.34	O
Virginia	1	10	1.5	6	1189	Latitud	4	49	20.71	N
						Longitud	75	50	36.83	O

Tabla 4. Perforaciones y ensayos de laboratorio realizados.

Localización	Sondeo N°	Muestra N°	Profundidad (m)	Prop. Físicas		Prop. Mecánicas
				Límites de Atterberg NTC-4630	Gravedad Específica NTC-1974	Consolidación NTC-1967
Villa Verde	1	2	1.0 - 1.5	X	X	X
		3	3.0 - 3.5	X	X	X
	2	1	1.0 - 1.5	X	X	X
		2	3.0 - 3.5	X	X	X
		3	4.5 - 5.0	X	X	X
	3	1	1.0 - 1.7	X	X	X
		2	3.0 - 3.7	X	X	X
		3	4.5 - 5.2	X	X	X
	UTP (Microzonificación Sísmica M.S. 1998)	1	7	10.5 - 11.0	X	X
1		13	19.5 - 20.0	X	X	X
Guadal canal (M.S.1998)	1	4	5.5 - 6.0	X		X
	1	7	10.0 - 10.5	X		X
	1	11	16.0 - 16.5	X		X
	1	15	22.0 - 22.5	X		X
	1	17	25.0 - 25.5	X		X
	1	20	29.5 - 30.0	X		X
Galicia (M.S.1998)	1	2	2.5 - 3.0	X		X
	1	5	7.0 - 7.5	X		X
Iglesia Gamma (M.S.1998)	4	6	9.0 - 9.5	X		X
Parque Cuba (M.S. 1998)	1	5	9.5 - 10.0	X	X	X

El valor de la relación de vacíos inicial para las muestras de suelo analizadas se encontró entre 1.82 y 5.39 resultados similares presentan Rants et al., 2002; Wesley, 2001y So, 1998 en sus investigaciones. Se aclara que para muestras de suelo a profundidades de extracción de 1.5 m se encontraron valores de relaciones de vacíos superiores a 2.5, mientras que para las muestras extraídas a mayores profundidades los valores no superaron éste límite.

Correlación entre Cc y valores índices

En la figura 1 se puede observar que los valores del límite líquido LL obtenido se encuentran en un intervalo entre 47.5% y 136.0%, con un valor promedio de 78.3%, se observa una desviación estándar igual a 20%, al considerar, todos los valores y solo una desviación estándar de 6%, cuando solo se

toman los valores correspondientes a un mismo sitio de perforación, Sudhakar, 1995 obtiene valores de Límite Líquido hasta de 213%, posicionando los resultados obtenidos dentro de los valores estándares de los suelos derivados de cenizas volcánicas. Debido al bajo número de muestras analizadas se infiere que no es posible encontrar aún una adecuada correlación entre los valores analizados. Es posible observar una tendencia entre los valores que refleja que a mayor Límite Líquido mayor Coeficiente de Compresión.

El valor de la Gravedad Específica de los Sólidos Gs, exhibe valores desde 2.62 hasta 3.15, con un valor promedio de 2.80, como se observa en la figura 2. En los datos obtenidos no se encuentra una buena correlación. Según Lizcano et al 2006, las cenizas volcánicas están compuestas en una menor

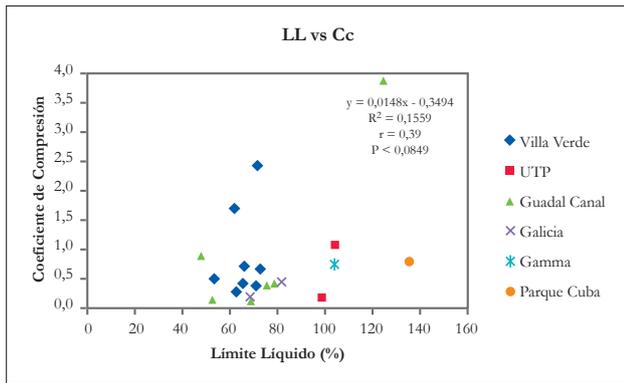


Figura 1. Correlación Límite Líquido LL / Coeficiente de Compresión Cc

proporción por minerales pesados ($G_s > 2,8$) que incluyen feldspatos ($G_s = 2.2 - 2.4$), hornblenda ($G_s = 3.0 - 3.4$), hiperestena ($G_s = 3.2 - 3.9$), augita ($G_s = 3.2 - 3.6$), magnetita ($G_s = 4.5 - 5.0$), biotita ($G_s = 2.9 - 3.4$), apatita ($G_s = 3.1 - 3.2$) y principalmente vidrio volcánico ($G_s = 2.2 - 2.4$) los cuales respaldan las altas gravedades obtenidas en este estudio.

Contrario a lo que sucede en las figuras que relacionan Límite Líquido y Gravedad específica con Coeficiente de Compresión en las cuales no se refleja una buena correlación, en la figura 3 en donde se gráfica peso unitario húmedo contra coeficiente de compresión, se observa una clara correlación, con un valor de coeficiente de correlación de 0.91, cer-

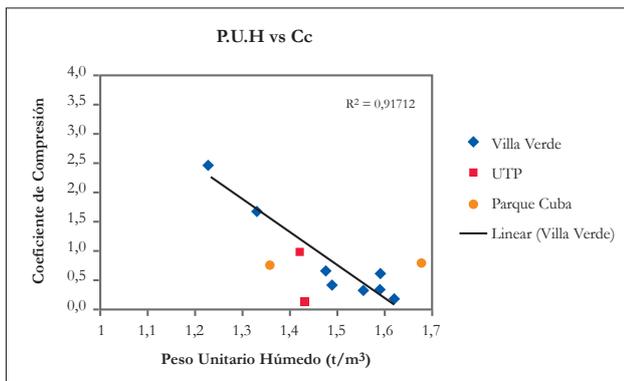


Figura 3. Correlación Peso Unitario Húmedo / Coeficiente de Compresión.

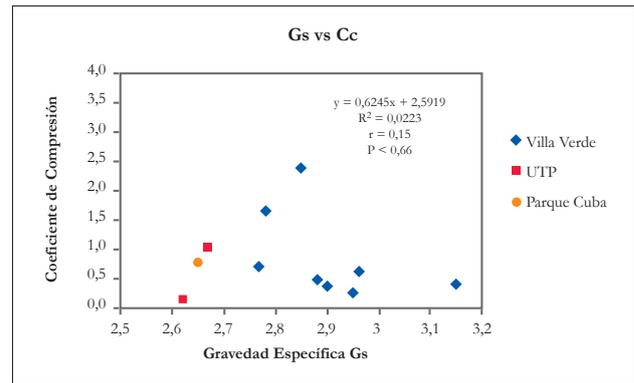


Figura 2. Correlación Gravedad Específica Gs / Coeficiente de Compresión Cc

cano a 1, sin embargo, como es necesario continuar con la ejecución de la metodología en la ejecución de ensayos para llegar a resultados con una mayor confiabilidad.

Así mismo en la figura 4 se presenta una aceptable correlación entre los resultados del Coeficiente de Compresión y el valor de la humedad natural del suelo.

Conclusiones

Las mejores correlaciones entre los valores índices y el coeficiente de compresión del suelo se presentaron entre los variables contenido de humedad natural, peso unitario húmedo del suelo y relación de vacíos. Aunque en los antecedentes de investigación se

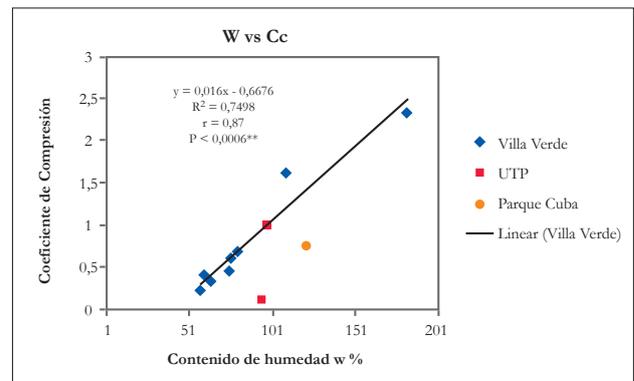


Figura 4. Correlación Peso Unitario Húmedo / Coeficiente de Compresión.

presenta una tendencia general a relacionar el límite líquido y el coeficiente de compresión, dicha relación no fue representativa en esta investigación.

Las relaciones de vacíos en las muestras de suelo variaron desde 1.55 hasta 3.36 con un valor promedio de 2.29 y una varianza del 22.55%. El coeficiente de correlación obtenido entre el coeficiente de compresión y la variable en mención fue de r^2 0.92, el coeficiente de correlación obtenido para el peso unitario húmedo fue de r^2 0.91, de acuerdo con estos resultados se plantea una mayor confiabilidad en estimaciones del coeficiente de compresibilidad y estas dos variables.

Con la ecuación propuesta para la determinación de C_c por la Universidad de los Andes en 2001, es posible obtener resultados que subestiman en un 30% su valor. Se concluye entonces, necesario continuar con el desarrollo de la investigación para lograr resultados que correlacionen en forma confiable los valores índices con el coeficiente de compresión y validar la ecuación propuesta por la universidad de los Andes.

Se registraron valores de límite líquido superiores al 100%, para los suelos derivados de cenizas volcánicas este comportamiento se atribuye a la tendencia de los minerales alofónicos a conglomerarse formando minerales de mayor tamaño, que pueden comportarse como limos.

El Coeficiente de Compresibilidad C_c para los ensayos realizados dentro de la investigación, registro valores superiores a 1.5 en muestras obtenidas a escasos 1.5 m de profundidad, y valores comprendidos 0.28 y 0.72 para esfuerzos efectivos entre 300 kPa y 1600 kPa. Se encuentra una alta dispersión entre los valores de C_c obtenidos para suelos de expansión urbana y valores de C_c encontrados dentro de los estudios realizados para la microzonificación de Pereira.

En la totalidad de las muestras analizadas en laboratorio se obtuvo un coeficiente de compresión promedio de 0.84, valor base para el cálculo de

asentamiento del suelo obteniendo un valor de 0.07 m que representa el cambio en el volumen del suelo cuando es sometido a una carga de 1.2 ton/m².

Referencias

1. Bowles, J. 1976. Foundations Analysis and Design. 5 Edición 1997.
2. CARDER, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES y DNPDA. 1999. Exploración geotécnica, investigación de laboratorio y zonificación sísmica de Pereira, Dosquebradas y santa Rosa de Cabal.
3. Coduto, D.2001. Foundation Design. Prentice-Hall.
4. Conte E. 2004. Consolidation analysis for unsaturated soils. Can. Geotech. J. 41: 599–612
5. Das, B M. 2001 Índice de compresión. En: Fundamentos de ingeniería geotécnica. México: Thomson
6. Jimenez, J.A. 1976. Geotecnia y Cimientos. Tomo I. Editorial Rueda Madrid.
7. Juarez, B.E y Rico R. 2005. Mecánica de Suelos. México: Editorial Limusa,
8. Koizumi, y., Ito, K., 1963. Compressibility of a certain volcanic clay. Soils and Foundations 3 (2), 37±48
9. Lambe, T.W. and Whitman, R.V., 1979. Soil Mechanics, SI, version. Wiley, New York, 553 p.
10. Lizcano, A., Herrera M.C. y Santamarina J.C. 2006. Suelos Derivados De Cenizas Volcánicas En Colombia. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2) 167
11. Hürlimann M., Ledesma A.,y Martí J. 2001. Characterization of a volcanic residual soil and its implications for large landslide phenomena: application to Tenerife, Canary Islands. Engineering Geology 59 (2001) 115±132
12. NTC 1964.2004. “Método de ensayo para determinar las propiedades de consolidación unidimensional de los suelos. Norma Técnica Colombiana.
13. NTC 4630. 1999. Método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos. Norma Técnica Colombiana.

14. NTC 2121. 1999. Obtención de muestras con tubos de pared delgada. Norma Técnica Colombiana.
15. NTC 1974.2004. Gravedad Específica. Norma Técnica Colombiana.
16. NTC 1495.2004. Humedad natural. Norma Técnica Colombiana.
17. Rants E. Van, Utami, S.R. y Shamshuddin J. (2002). "Andisols on volcanic ash from Java Island, Indonesia: Physicochemical properties and classification". *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 167, No. 1, pp. 68-79.
18. Stoops, G. 2007. Micromorphology of soils derived from volcanic ash in Europe: a review and synthesis. *European Journal of Soil Science*, April 58, 356–377
19. Sudhakar M. R. 1995. *Engineering Geology* 40, 215-221
20. So Ei-Kon. (1998). "Statistical correlation between allophane content and index properties for volcanic cohesive soil". *Soils and Foundations*. Vol. 38, No. 4, pp. 85-93
21. UTP.2001. Suelos del eje cafetero. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. p 88.
22. Vaughan, P.R., Maccarini, M., y Mokhtar, S.M., 1988. Indexing the engineering properties of residual soil. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 21, 69±84.
23. Vasquez,M,J., Campos, A.G, Cardozo P,D y Osorio R,G. 2000. Base Ambiental con énfasis en riesgo. CARDER FOREC.
24. Verdugo, R. Singularities of Geotechnical Properties of Complex Soils in Seismic Regions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, No. 7, July 1, 2008.
25. Wesley, L.D. (2001). "Consolidation behavior of allophane clays". *Géotechnique*, Vol. 51, No. 10, pp. 901-904.
26. Wesley L.D. (2003). Geotechnical properties of two volcanic soils. *Geotechnics on the volcanic edge*. Tauranga, March 2003. New Zealand Geotechnical Society Symposium. The Institution of Professional Engineers New Zealand.