

EVALUACIÓN DE LA COMPRESIBILIDAD Y AMPLIFICACIÓN DE LA ONDA DE CORTE EN DEPÓSITOS DE SUELOS ANTRÓPICOS CON CONTENIDOS DE MATERIA ORGÁNICA

Gloria M. Molina Vinasco¹,
Lina M. Buriticá Morales²,
Ángela Echeverri Londoño²,
Jennifer Cortés Henao²,
Laura Calvo Duque²

Espíritu
Ingenieril

Fecha de Recepción: 1 de junio de 2012
Fecha de Aceptación: 15 de agosto de 2012
1 (1) 3 - 21
Julio - Diciembre 2012

¹ Ingeniera Civil. Magister en Ciencias en Ingeniería Civil. Profesor del Programa de Ingeniería Civil Universidad Libre Seccional Pereira. Investigador del grupo GICIVIL Pereira. Correo electrónico: gmmolina@unilibrepereira.edu.co

² Estudiante de Ingeniería Civil Universidad Libre Seccional Pereira.

RESUMEN

Entre las unidades geomorfológicas encontradas en la ciudad de Pereira, predomina la existencia de suelos derivados de la meteorización de las cenizas volcánicas, las cuales están presentes como la capa superior que subyacen, suelos residuales, suelos aluviales o la roca de basamento según el caso, así como también depósitos antrópicos de distinta naturaleza. Este tipo de geoformación presenta problemas como la heterogeneidad en su composición, altos contenidos de materia orgánica y baja compactación, que los hace susceptibles de sufrir altos asentamientos primarios y secundarios. La presente investigación explora los suelos de dos depósitos antrópicos de la ciudad de Pereira. En ellos se realizaron perforaciones hasta una profundidad máxima de 8 m con extracción de muestras alteradas e inalteradas para el reconocimiento de las características físicas y principalmente las características de compresibilidad del suelo y su influencia en la amplificación de la onda sísmica. Se encontró que el Coeficiente de compresibilidad del C_c en dichos depósitos es del orden de 0.42 a 0.72 para el Depósito 1 y de 0.15-0.54 para el depósito 2. Se compara el espectro de diseño estructural propuesto por la microzonificación sísmica con el obtenido por métodos de simulación de onda de corte unidimensional.

Palabras clave

Depósitos antrópicos, materia orgánica, compresibilidad, espectro de diseño.

ABSTRACT

Among the geomorphological units were found in the city of Pereira, predominantly the existence of soils derived from the weathering of volcanic ash, which are present as the upper layer underlying, residual soils, alluvial soils or basement rock, depending on the case, and the other hand also deposits anthropic of different nature, this type of profile presents problems like heterogeneity in its composition, high content of organic matter and low compaction, which makes them susceptible to suffer high primary and secondary settlements. This research explores the soils of two anthropogenic deposits of the city of Pereira, therein were perforations to a depth 8 m with extraction of altered and unaltered samples for the recognition of the physical characteristics and mainly characteristics of compressibility of soil and its influence on the amplification of the seismic wave. Was found that the coefficient of compressibility C_c in these deposits is 0.42 to 0.72 for deposit 1 and 0.15-0.54 for deposit 2. Was Compared the spectrum of structural design proposed by the seismic microzoning with results of the one-dimensional simulation methods.

Keywords

Organic matter; soil consolidation; compression, spectrum of structural design

1. INTRODUCCIÓN

Los llenos antrópicos han sido utilizados como una solución para desechar los residuos sólidos y a su vez para nivelar los terrenos a la hora de llevar a cabo una construcción. Esta práctica crea áreas con estratos de suelos que sufren altos asentamientos. De acuerdo con Vásquez, *et.al.*, 2000, se entiende por llenos antrópicos, todos aquellos materiales que han sido depositados por el hombre, también llamados rellenos o llenos; están integrados por: basuras y/o escombros y/o suelos removidos o por la mezcla de estos. Dichos materiales son depositados en laderas y/o depresiones naturales por las que transitan corrientes intermitentes o permanentes. De acuerdo con el método utilizado para depositar los materiales que conforman el lleno, estos se clasifican en: llenos hidráulicos, llenos mecánicos; botaderos y rellenos sanitarios.

Es común encontrar en todo el territorio nacional, zonas cuyo perfil estratigráfico está compuesto por estos depósitos; específicamente en el municipio de Pereira, se encuentran diversos sitios con dicha problemática entre los cuales pueden citarse:

- i) No urbanizados: el depósito de Montelíbano situado sobre la vía Altagracia-Arabia, compuesto por escombros y material orgánico; el depósito de Villa de Leyva (Cuba), cuya extensión es de 120m con espesores hasta de 24m, construido con ceniza volcánica; el relleno sanitario San Joaquín compuesto por escombros, materia orgánica y basura; y el relleno sanitario La Glorita ubicado en Combia
- ii) Urbanizados: el depósito ubicado entre la Avenida Juan B. Gutiérrez y la vía La Julita sobre el cual están construidos conjuntos residenciales y edificios; el depósito ubicado en la calle 12 (sector centro), en el cual hoy día se encuentra ubicada una de las vías con mayor tráfico de la ciudad, así como también el Centro Comercial y Regional Ciudad Victoria, entre otros.

De acuerdo con el decreto 386 de 2000 en el cual se adopta la Zonificación Sísmica del municipio de Pereira, estos depósitos son considerados como la zona sísmica 6. Llenos Antrópicos caracterizados como geomorfologías compuestas por relieves semiplanos, dispuestos en depresiones de diversas geometrías y constituidos por materiales blandos a muy blandos, de espesores entre 6 y 15 metros. Se encuentran en algunas ocasiones sobre cenizas volcánicas con profundidades hasta de 20 metros, y en otras sobre conglomerados de buena rigidez, los cuales continúan hasta profundidades mayores a 150 metros. De acuerdo con el mecanismo de construcción o proceso de conformación, se han dividido en rellenos de vertimiento libre, hidráulicos, mecánicos de compactación rudimentaria y mecánicos de compactación tecnificada.

La dinámica actual de los estudios de suelos en la ciudad consiste en recomendar el retiro de este material, su sustitución y, en la mayoría de los casos, la utilización de los estratos que se encuentran subyaciendo estos llenos, como estructura de soporte, siguiendo las recomendaciones de la Norma Sismo Resistente NSR-10 en el Título H.4.1 que especifica: “Toda edificación debe soportarse sobre el terreno en forma adecuada para sus fines de diseño, construcción y funcionamiento. En ningún caso puede apoyarse sobre la capa vegetal, rellenos sueltos, materiales degradables o inestables, susceptibles a erosión, socavación, licuación o arrastre por aguas subterráneas”.

De acuerdo con esto, la cimentación de cualquier edificación se debe construir sobre materiales que presenten propiedades mecánicas adecuadas en términos de resistencia y rigidez, o sobre rellenos artificiales que no incluyan materiales degradables y sean debidamente compactados.

Con el crecimiento y expansión de la ciudad, surge la necesidad de construir en terrenos que dentro de su perfil estratigráfico presenten llenos con espesores superiores a 8.0 m, como es el caso de la finca La María Vereda el Cóngolo de la Ciudad de Pereira, cuyo lote pertenece a la alcaldía del municipio y sobre el cual se proyecta la construcción de viviendas de interés social, o reconfigurar geomorfológicamente sectores de la ciudad para la construcción de parques como es el caso de la urbanización AltaVista Parque Residencial ubicada en el barrio Cuba, vía a San Joaquín.

Estos sitios consisten en llenos antrópicos compuestos por cenizas volcánicas mezclados con material orgánico (5%- 16%), lo que hace que el suelo en ellos sea blando y, por consiguiente, sufra una mayor deformación si fuera sometido al esfuerzo generado por una estructura. Para suelos con esta problemática se han utilizado cimentaciones profundas como caisson y pilotes, o aligerado la edificación utilizando para ello perfilera metálica, sistemas drywall y steel-deck; sin embargo, no existen investigaciones que permitan evaluar cómo será la compresibilidad de estos suelos cuando estén sometidos a cargas, y cómo será su respuesta ante eventos sísmicos.

Debido a la poca información acerca de este tipo de suelo (Calderón, *et. al.*, 2003), la presente investigación tiene como objetivo evaluar la compresibilidad y respuesta a los eventos sísmicos de suelos inorgánicos con bajos contenidos de suelos orgánicos, brindando al ingeniero consultor al momento de calcular la cimentación, información para poder evaluar los asentamientos en este tipo de suelos, y al ingeniero estructural espectros de diseño específicos para los mismos.

1.1 Fundamentos teóricos

De acuerdo con Betancurth y Hermelin, 2007, el subsuelo de Pereira tiene su origen

en los fenómenos volcánicos, fluviovolcánicos y laháricos asociados a la actividad del complejo volcánico Ruiz –Tolima, ubicado en el eje de la cordillera Central, en especial del volcán nevado Santa Isabel, así como en la cuenca media del Río Otún.

La ciudad se asienta sobre varias formaciones, una secuencia heterogénea de materiales con un espesor cercano a 700 m, que incluye depósitos de flujos piroclásticos y de escombros, conglomerados, arenas y limos fluviales con aporte volcánico, tobas de caída y localmente arcillolitas y limolitas, cubierta por un manto de cenizas volcánicas, secuencia conocida como Glacis del Quindío; se encuentra sobre la Formación Pereira, conformada por unidades de rocas intrusivas al oriente (gabros) y volcánicas al noroccidente (diabasas y basaltos); la principal formación superficial la constituyen las cenizas volcánicas con espesores que alcanzan 30 m. Otra unidad importante, son los llenos antrópicos conformados sin especificaciones técnicas con escombros, material de excavaciones y basuras, realizados especialmente sobre antiguos drenajes en el centro de la ciudad. Existen otros rellenos hechos con técnicas hidráulicas, al norte del río Otún y al occidente de la ciudad.

De acuerdo con la microzonificación sísmica de Pereira (CARDER, *et. al.*, 1999), los depósitos antrópicos se encuentran distribuidos en toda el área urbana, sectores que ya se encuentran urbanizados y sectores que aún se encuentran en expansión. En la figura 1 se muestran los llenos antrópicos en color amarillo claro clasificados como zona 6.

Según Vásquez *et. al.*, 2000, los llenos hidráulicos son aquellos conformados con técnicas hidráulicas; específicamente, en el área de estudio se han utilizado como material de lleno las cenizas volcánicas. En el casco urbano de Pereira se encuentran al occidente

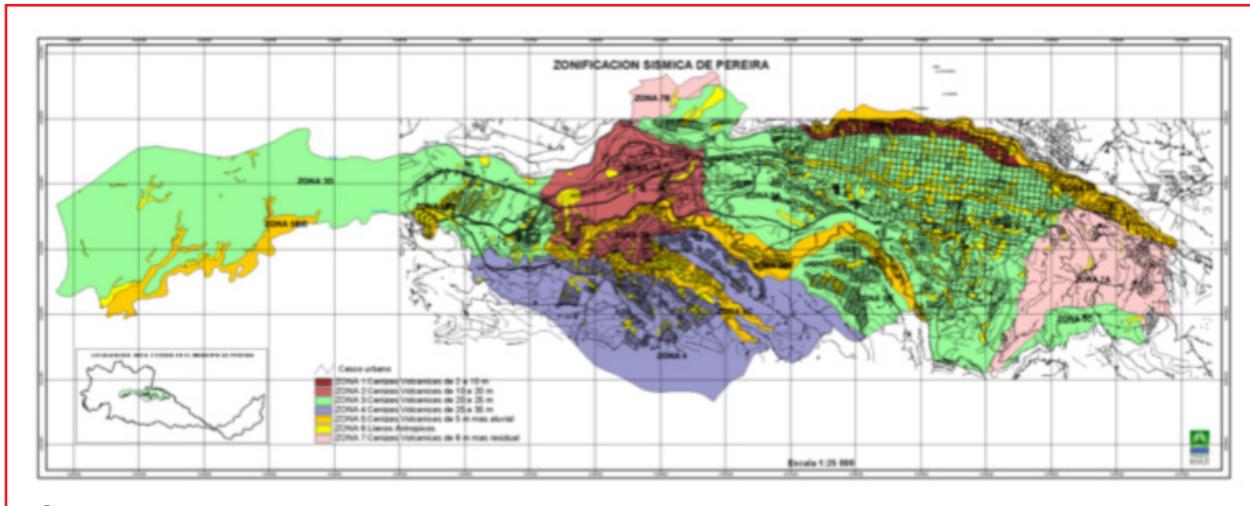


Figura 1. Mapa de Microzonificación Sísmica de Pereira (Depósitos antrópicos en color amarillo). Fuente Carder, 1999.

y norte, sobre ellos construyeron barrios como Gamma y Ciudadela del Café.

Los llenos mecánicos corresponden a materiales de cortes de cimas de colinas empleados para llenar depresiones y cauces y para ganar áreas en laderas de alta pendiente. Este tipo de rellenos son los que se presentan en mayor cantidad en el casco urbano, algunos sobresalientes se ubican en algunos sectores de: Belmonte, Corales, Ciudadela Comfamiliar, Cuba y Samaria.

El relleno sanitario La Glorita es el sitio donde se disponen los residuos sólidos de la Ciudad de Pereira. Se encuentra ubicado en la parte norte de la ciudad, en la Vereda Combia, aledaño a la quebrada La Suecia. Antes del año 1997, el relleno sanitario funcionaba en el sector de San Joaquín, en donde se presentó una serie de problemas de tipo ambiental por la mala disposición de los residuos; en la actualidad, dicho sitio es utilizado como Escombrera Municipal.

Los botaderos, tal como se mencionó anteriormente, se forman con una mezcla

de basuras, escombros, desechos orgánicos y suelos removidos. En el casco urbano del Municipio se encuentran en el antiguo cauce de la Quebrada Egoyá, alcanzando espesores hasta de 25m (Carrera 12bis con calle 9) y en tramos de los antiguos cauces de las quebradas Arenosa, Dulcera y Bedoya, entre otras.

De acuerdo con Cortés, 1976, se han distinguido tres clases fundamentales de materiales de suelos orgánicos, según el grado de descomposición de los materiales originales de plantas: i) Materiales de suelo fibricos: son los menos descompuestos de todos los materiales de los suelos orgánicos. Tienen alto contenido de fibra, de ahí su nombre, también altos niveles de agua cuando están saturados y muy baja densidad aparente. Los colores de estos horizontes son generalmente pardo amarillentos, pardo oscuros y pardo oscuros a pardo rojizos. ii) Materiales de suelo Hémicos: su grado de descomposición es medio. Los colores son usualmente pardo grisáceo oscuros a pardo rojizo oscuros. iii) Materiales de suelo Sáprico: estos materiales son los más

altamente descompuestos. Presentan colores por lo general gris muy oscuro a negros. Son relativamente estables por lo que cambian muy poco física y químicamente con el tiempo. Comúnmente ocurren en las superficies de muchas áreas de suelos orgánicos que han sido drenados y cultivados

Santagata, *et. al.*, 2008, afirman que “los suelos orgánicos son normalmente vistos como “problema”, indicando que sus propiedades físicas son inferiores al compararlos con suelos inorgánicos. Estos son asociados con alta compresibilidad, alta fluencia, y/o fallas en la fundación”. De acuerdo con lo anterior, los convierte en suelos inadecuados para la construcción de obras civiles.

A continuación se presenta un breve resumen de los fundamentos básicos relacionados con consolidación primaria y secundaria de suelos, objeto de la presente investigación.

La Consolidación

De acuerdo con Das, 2001, la consolidación se refiere a la relación directa entre la aplicación del esfuerzo y la disipación de la presión en los poros. Para suelos cohesivos que presentan baja permeabilidad, el asentamiento por consolidación depende del tiempo. Debido a que el suelo cohesivo tiene muy baja permeabilidad y el agua es incompresible comparada con el suelo, en el tiempo $t=0$, el esfuerzo incrementado total $\Delta\sigma$, será tomado por el agua ($\Delta\sigma=\Delta\mu$) a toda profundidad. Ningún esfuerzo será tomado por el esqueleto del suelo (es decir, el esfuerzo efectivo incrementado $\Delta\sigma'=0$).

Después de la aplicación del esfuerzo incrementado $\Delta\sigma$ al estrato de arcilla, el agua en los espacios vacíos empezará a ser expulsada y se drenará en ambas direcciones hacia los estratos de arena. Por medio de este proceso, el exceso de presión de poro

del agua en cualquier profundidad sobre el estrato de arcilla decrecerá gradualmente y el esfuerzo tomado por los sólidos del suelo (esfuerzo efectivo) se incrementará.

Sin embargo, las magnitudes de $\Delta\sigma$ y $\Delta\mu$ a diversas profundidades cambiará dependiendo de la distancia mínima de la trayectoria de drenaje a cualquiera de los estratos permeables, superior o inferior. Teóricamente, en el tiempo $t= \alpha$, la presión de poro en exceso se disipará por drenaje desde todos los puntos del estrato de arcilla, dando $\Delta\mu=0$. El incremento de esfuerzo total $\Delta\sigma$ se tomará entonces por la estructura del suelo por lo que $\Delta\sigma=\Delta\sigma'$. Este proceso estará conformado por la etapa de consolidación primaria, disipación del exceso de presión de agua en los poros y por la etapa de consolidación secundaria, que ocurre después de la total disipación del exceso de presión de poro del agua cuando alguna deformación del espécimen tiene lugar, debido al reajuste plástico de la estructura.

Consolidación primaria. Es el resultado de un cambio de volumen en suelos saturados cohesivos debido al drenaje del agua que ocupa los espacios vacíos. El ensayo usado para determinar el comportamiento del suelo cuando está sometido a carga se llama consolidación unidimensional, en el cual se toma una muestra de suelo inalterado, se somete a carga, se toman lecturas en el dial de deformación a tiempos determinados, para la determinación de la variación de la relación de vacíos del suelo versus el esfuerzo efectivo al cual está sometido, como se muestra en la figura 2.

En la figura 1 se observa una zona de mayor linealidad durante la carga, por medio de la cual se halla el coeficiente de compresión C_c , como se muestra en la ecuación 1, previa construcción de la curva virgen de consolidación, e igualmente una zona de

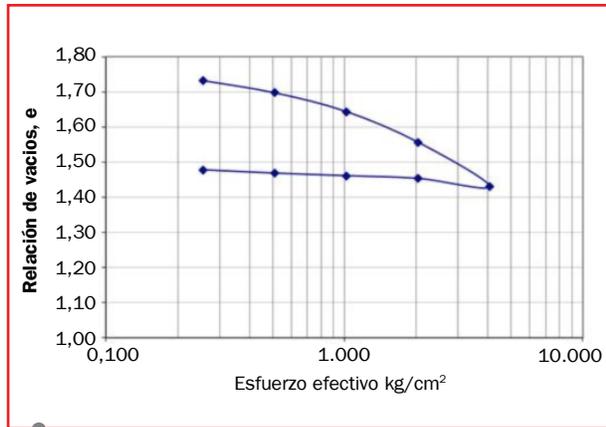


Figura 2. Curva típica de esfuerzo deformación.

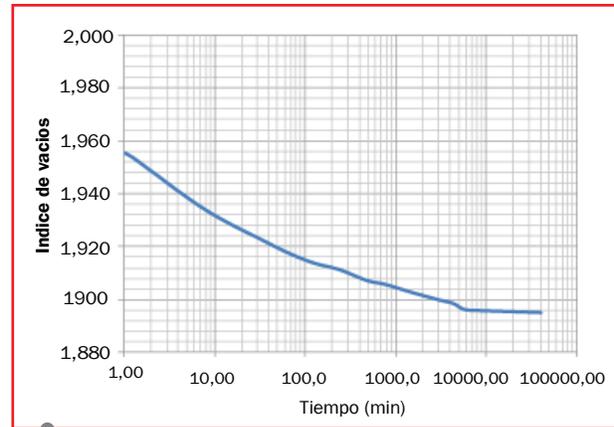


Figura 3. Curva típica relación de vacíos contra logaritmo del tiempo.

mayor linealidad durante la descarga, de donde se obtiene el coeficiente de expansión C_s , como se muestra en la ecuación 2.

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}\right)} \quad \text{Ecuación 1.}$$

$$C_s = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}\right)} \quad \text{Ecuación 2.}$$

De acuerdo con estudios realizados por la Universidad de los Andes, la compresibilidad de las cenizas volcánicas libres de material orgánico presenta una correlación entre el límite líquido y el coeficiente de compresión, dada por la expresión $C_c = 0.0091 \cdot (LL - 15)$, con un coeficiente de correlación de 0.521 (Campos y Guzmán 1999).

Consolidación secundaria. Ocurre después de la total disipación del exceso de presión de poro del agua cuando alguna deformación del espécimen tiene lugar, debido al reajuste plástico de la estructura. Durante el ensayo de consolidación unidimensional es posible evaluar esta consolidación al graficar la deformación sufrida por el espécimen versus

el logaritmo del tiempo, como se muestra en la figura 3.

Pruebas de laboratorio han demostrado que el asentamiento sufrido en suelos orgánicos está directamente relacionado con la deformación secundaria (Das, 2001)

2. METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolló en tres fases principales que involucran:

- i) Fase I. Localización y realización de sondeos para extracción de muestras alteradas e inalteradas.
- ii) Fase II. Análisis de laboratorio para determinar las características físicas y mecánicas del suelo.
- iii) Fase III. Simulación, usando el algoritmo SHAKE91 para obtener la amplificación del sismo de acuerdo con las consideraciones de la microzonificación sísmica de Pereira.

A continuación se explica de forma detallada el trabajo realizado, los criterios y

consideraciones que se tuvieron en cuenta para llegar al resultado final.

2.1 Fase I

Localización y descripción de los sitios de estudio: se analizaron dos sitios en los cuales se encontraron llenos antrópicos de distinto carácter, el primero de ellos caracterizado como un Botadero que será denominado en adelante como el Depósito 1; el segundo, caracterizado como un lleno mecánico que será denominado en adelante como el Depósito 2. Su localización se muestra en la figura 4.

Depósito 1. Localizado en la Vereda el Cónzolo. Coordenadas: 4° 47'14.84" N- 75° 43'49.30" E y cuyas vías de acceso son la Avenida Las Américas y vía al corregimiento de Altagracia; el lugar se encuentra localizado a 2.15 Km de la estación de servicio de Corales.

Depósito 2. Ubicado dentro de la urbanización AltaVista Parque Residencial, en la zona occidental de la ciudad de Pereira,

sobre la vía que conduce al corregimiento de Altagracia, a 400 metros de la Glorieta de Corales, Comuna San Joaquín; el proyecto tiene un área total de 7.762 m² aproximadamente, en el cual se van a construir 850 unidades de vivienda.

En ambos llenos se realizaron sondeos exploratorios con el objeto de determinar las características físicas y mecánicas de los mismos. En la tabla 1 y en la tabla 2 se presenta la información de los sondeos, en la cual se incluye número de sondeo, muestra extraída y ensayos hechos en las muestras. La exploración se llevó con barreno helicoidal de 4" hasta una profundidad máxima de 8 m con extracción de muestras alteradas e inalteradas para el reconocimiento físico y mecánico de las capas de suelo, y estimación del coeficiente de compresibilidad del suelo.

2.2 Fase II

A las muestras alteradas e inalteradas que se recuperaron durante la etapa de



Figura 4. Localización del Lleno 1 y 2. Fuente Imagen Google Earth. 2005.

Tabla 1. Perforaciones y ensayos realizados Depósito 1.

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	Propiedades Físicas					Propiedades Mecánicas	
			Contenido de Humedad	Lavado Tamiz 200	Límites de Atterberg	Contenido de Materia Orgánica	Gravedad Específica	Compresión no confinada	Consolidación
1	2	2,00-2,50	x	x				x	x
	3	3,00-3,50	x		x				
	4	4,00-4,70	x		x	x		x	x
2	1	1,00-1,50	x	x				x	x
	2	2,00-2,50	x			x		x	x
	3	3,00-3,50	x	x		x		x	x
	4	4,00-4,50	x	x	x	x		x	
	5	5,50-6,00	x		x	x		x	x
	6	7,50- 8,00	x			x	x	x	x
3	1	1,50-2,00	x	x				x	
	2	3,50-4,00	x					x	x
	3	5,50-6,00	x			x			

Tabla 2. Perforaciones y ensayos realizados Depósito 2

Sondeo	Muestra	Profundidad	Propiedades Físicas				Propiedades Mecánicas	
			Límites de Atterberg	Contenido de Materia Orgánica	Lavado Tamiz 200	Gravedad específica	Compresión no confinada	Consolidación
1	1	3,5-4,10					X	X
	3	5,5-6,10					X	
	4	7,5-8,10		X			X	
2	1	1,5-2,10						X
	2	3.3-4.1					X	
	3	5,5-6,10	X	X	X			X
	4	7,5-8	X		X		X	X
3	1	1,5-2	X	X	X	X	X	
	2	3,50-4	X	X	X		X	X
	3	5,5-6					X	X
	4	7,5-8						X
4	1	1,5-2					X	X
	2	3,5-4					X	X
	3	5,5-6					X	X

exploración, se les practicaron los siguientes ensayos: determinación del contenido natural de humedad en porcentaje (ASTM D 2216- Norma NTC 1886), Granulometría por tamizado y lavado sobre tamiz # 200 y #4, para establecer los porcentajes de gravas, arenas y finos, en porcentaje (ASTM D 2487); límites de Atterberg o límites de plasticidad (límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad) (ASTM D 4318); determinación del peso unitario (total y seco) del suelo; clasificación mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos S.U.C.S (ASTM D 2487); determinación de la resistencia a la compresión no confinada (Norma NTC 1527- ASTM D 2166); determinación de la resistencia al corte directo (ASTM D 3080- Norma NTC 1917); Método de ensayo para determinar las propiedades de consolidación unidimensional de los suelos (Norma NTC 1964). Los ensayos realizados a cada una de las muestras se presentan en las tablas 1 y 2.

De acuerdo con los resultados de los ensayos, se realizó una caracterización mecánica y física de los depósitos de suelos analizados, a diferentes profundidades, determinando la textura y clasificación de suelo, límite líquido, límite plástico, y determinación del coeficiente de compresión, expansión y coeficiente de compresión secundaria.

2.3 Fase III

Se utilizaron señales sísmicas para conocer el comportamiento de los depósitos antrópicos de fuente cercana, intermedia y lejana. Las características dinámicas de este tipo de suelo fueron tomadas del estudio de Microzonificación sísmica de Pereira, para estimar mediante la propagación de las señales en roca hasta la superficie del terreno, las respuestas de amplificación de la onda sísmica. De acuerdo con esto, cada uno de los modelos de depósitos planteados con cada una del conjunto de señales indicadas se corrió con el programa unidimensional

SHAKE91 (Idriss y Sun, 1993), el cual se basa en la propagación vertical de ondas de cortante en un medio semiinfinito y utiliza un procedimiento iterativo lineal equivalente para las propiedades dinámicas del suelo, de tal forma que sean compatibles con el nivel de deformación por cortante impuesto por el sismo.

Las principales consideraciones del programa son:

- a) Los estratos considerados para cada modelo son infinitos horizontalmente.
- b) El registro de aceleración obtenido corresponde a la propagación vertical de la onda sísmica proveniente de la roca de basamento.
- c) El estrato simulado es homogéneo, isotrópico y visco elástico caracterizado por su peso unitario, espesor, módulo de corte y factor de amortiguamiento.

Debido a la ausencia de amplios registros de señales en roca dentro de la ciudad de Pereira, así como de señales sísmicas representativas para sismos de diseño, en los registros de los acelerógrafos instalados en la ciudad, la selección de las señales equivalentes correspondientes a la fuente cercana, intermedia y lejana, se basó en las consideraciones definidas en el Estudio de la Amenaza Sísmica del Eje Cafetero 1999 (Cano, *et. al.*, 1999).

De acuerdo con este estudio, los tres escenarios sísmicos de mayor influencia en la zona son: Falla Romeral (Magnitud 6.9+0.1 Ms, distancia hipocentral 20 a 30 km); Falla Cauca (Magnitud 6.5+0.1 Ms, distancia hipocentral 50 a 60 km) y la zona de subducción (Magnitud 7.7+0.1 Ms, distancia hipocentral 90 a 120 km).

Los parámetros dinámicos se asignaron de acuerdo con ensayos tipo Cros Hole realizados por la Universidad de los Andes en

1999, en lleno antrópico “Gamma” y “Egoyá”, se generaron tres modelos del suelo con la construcción de perfiles para la zona sísmica. A continuación se presentan los espesores y la asignación de parámetros geotécnicos (Véase Tabla 3).

En la tabla 4 se presenta la matriz de simulaciones, realizadas para el presente proyecto, de determinación de funciones de transferencia para depósitos antrópicos, zona sísmica 6. Depósitos antrópicos.

Tabla 3. Modelos Zona Sísmica 6.

Modelo 1	Zona 6	Gamma egoyá				
Z	Espesor	Peso unitario t/m ³	Vs m/s	G7gmax	β	Material
10	10	14.85	156	G3	β1	5
15	5	16.63	230	G3	β1	5
20	5	16.63	200	G3	β1	5
Espesor		20				
Modelo 2	Zona 6	Gamma egoyá				
Z	Espesor	Peso unitario t/m ³	Vs m/s	G7gmax	β	Material
5	5	14.85	156	G3	β1	5
15	10	16.63	230	G3	β1	5
20	5	16.63	200	G3	β1	5
Espesor		20				
Modelo 3	Zona 6	Gamma egoyá				
Z	Espesor	Peso unitario t/m ³	Vs m/s	G7gmax	β	Material
7	7	14.67	96	G3	β1	5
12	5	18.64	130	G3	β1	5
16	4	16.68	160.3	G3	β1	5
Espesor		16				

Fuente: Valores de G y β tomados de Carder 1999.

Tabla 4. Simulaciones realizadas Zona Sísmica 6.

Zona	Modelo	Sismo para cada modelo	Escala de la aceleración para cada sismo	Total de simulaciones
6	Modelo1 Modelo2 Modelo 3	Romeral 1	0.05g	90
		Romeral 2	0.10g	
		Romeral 3	0.20g	
		Cauca 1	0.40g	
		Cauca 2	0.50g	
		Cauca 3		

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados de la caracterización física de los suelos, la evaluación de los coeficientes de compresibilidad de los suelos de los depósitos relacionados con los pesos unitarios del suelo, su relación de vacíos inicial y su contenido de materia orgánica, y por último los espectros de respuesta obtenidos.

3.1 Caracterización de los depósitos

Las Tablas 5 y 6 muestran los resultados de los parámetros físicos de los depósitos de suelos analizados, a continuación se presenta un breve resumen de los aspectos más relevantes para ambos depósitos.

Depósito 1. Se encontró que el mayor valor de contenido de humedad fue de 91,67% a una profundidad de 6m y que el menor valor fue 39,67% a una profundidad de 2m. El contenido de humedad promedio del suelo fue de 69,85%, el valor del límite líquido se encuentran entre 51,4 y 87,88 lo que indica que tiene una alta plasticidad y poca resistencia a la hora de sufrir deformaciones; el valor de límite plástico promedio fue de 57,19, el material corresponde a un limo de alta de plasticidad (MH) con un intervalo para los valores de contenido de materia orgánica entre 4,98 y 8,35.

Depósito 2. Se encontró un intervalo de valores para el contenido de humedad entre el 58.94% y el 71.06%. Se observó, según los resultados obtenidos por los límites de

Tabla 5. Parámetros físicos de las muestras extraídas en el depósito 1

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	Contenido de humedad (%)	Porcentaje que pasa tamiz #200	Límite Líquido (%)	Límite plástico (%)	Límite plasticidad (%)	Clasificación SUCS	Porcentaje de materia orgánica	Gravedad específica
2	6	7.50 - 8.00	61.43						4.9781	2.66
1	4	4.00 - 4.70	54.21		51.4	46.96	4.44	MH	7.8009	
2	5	5.50 - 6.00	75		68	54.22	13.79	MH	5.9752	
2	4	4.00 - 4.50	78.85	25	62.2	49.3	12.9	MH	6.0376	
2	2	2.00 - 2.50	70.74						5.868	
2	3	3.00 - 3.50	71.83	16					5.6429	
1	3	3.00 - 3.50	67.62		87.8	78.3	9.5	MH		
3	2	3.50 - 4.00	81.12							
3	3	5.50 - 6.00	91.67						8.3479	
1	2	2.00 - 2.50	84.71	37						
3	1	1.50 - 2.00	39.67	59						
2	1	1.00 - 1.50	61.42	26						
Promedio			69.85	32.6	67.35	57.19	10.16	MH	6.38	
Desviación Estándar			13.66	14.79	13.22	12.46	3.67	MH	1.13	
Valor Máximo			91.67	59	87.8	78.3	13.79	MH	8.35	
Valor mínimo			39.67	16	51.4	46.96	4.44	MH	4.98	

Tabla 6. Parámetros físicos de las muestras extraídas en el depósito 2

Sondeo	Muestra	Prof (m)	Prof Promedio (m)	W (%)	L.L (%)	L.P (%)	I.P (%)	Pasante Tamiz 200	SUCS	Gravedad Especifica	Contenido de Materia Orgánica
1	1	3,5 - 4,10	3,5	56,8							
4	2	3,5-4	3,8	73,91							
2	4	7,5-8	7,5	53,03	72,83	64,92	7,91	70,00	MH		
2	1	1,5-2,10	1,5	67,78							
4	3	5,5-6	5,5	65,55							
4	1	1,5-2	1,8	68,61							16,10
1	4	7,5-8,10	7,8	59,54							15,37
3	2	3,50-4	4	62,14				22,00			5,81
2	3	5,5-6,10	6	67	46,57	35,14	11,43	61,00	ML		3,57
3	4	7,5-8	7,6	60,66							
1	3	5,5-6,10	5,7	73,68							
3	3	5,5-6	5,9	68,57							
3	1	1,5-2	1,7	71,19	56,1	31,42	24,68	36,00	MH		4,26
1	2	3,5-4,1	3,9	60,47							
2	2	3.3-4.1	3,3	59							
Promedio				65	58,50	43,83	14,67	55,67			
Desviación estándar				6,06	10,854	14,992	7,22	14,38		2,5619	
Máximo v/r				73,91	72,83	64,92	24,68	70,00			
Mínimo v/r				53,03	46,57	31,42	7,91	36,00			

Atterberg, que el terreno en su mayoría está compuesto por limos de alta plasticidad con un límite líquido promedio de 58.50% y plástico promedio de 43.83%. Entre las muestras ensayadas se observó un contenido de materia orgánica promedio del 9%, y una desviación del 5.5%, lo que indica que el suelo tiene contenidos que oscilan entre el 3.5% y el 14.5%.

3.2 Coeficientes de Compresibilidad del suelo Cc

El coeficiente de compresibilidad del suelo, como se esperaba, presenta valores

mínimos con el incremento del valor del peso unitario y con la disminución de la relación de vacíos del suelo; de igual manera, se observa cómo en el Depósito 1 en donde el vertido de los materiales se realizó sin controles de compactación Cc, es más alto que para el depósito 2 en donde se realizaron controles de compactación, como se muestra en la figura 5. El valor del Coeficiente de Compresión presentó un intervalo entre 0.42 y 0.72 para el depósito 1 y entre 0.15 y 0.54 para el depósito 2, menores a los registrados en la literatura para suelos orgánicos valores desde 0.85 hasta 4 (Calderón, *et. al.*, 2003).

Se pudo determinar que la compactación del suelo tiene una mayor incidencia en el valor de los índices de compresibilidad C_c y de expansión C_s ; de este modo, a mayor compactación se observó una disminución en sus valores a pesar de que los valores de contenido de materia orgánica fueran mayores (Véase figura 6). Por el contrario, la consolidación secundaria se ve afectada por el contenido de materia orgánica observándose mayores valores en el coeficiente de consolidación secundaria, cuando se presentan en el suelo mayores contenidos de materia orgánica. Los valores de coeficientes de consolidación secundaria se encontraron en un

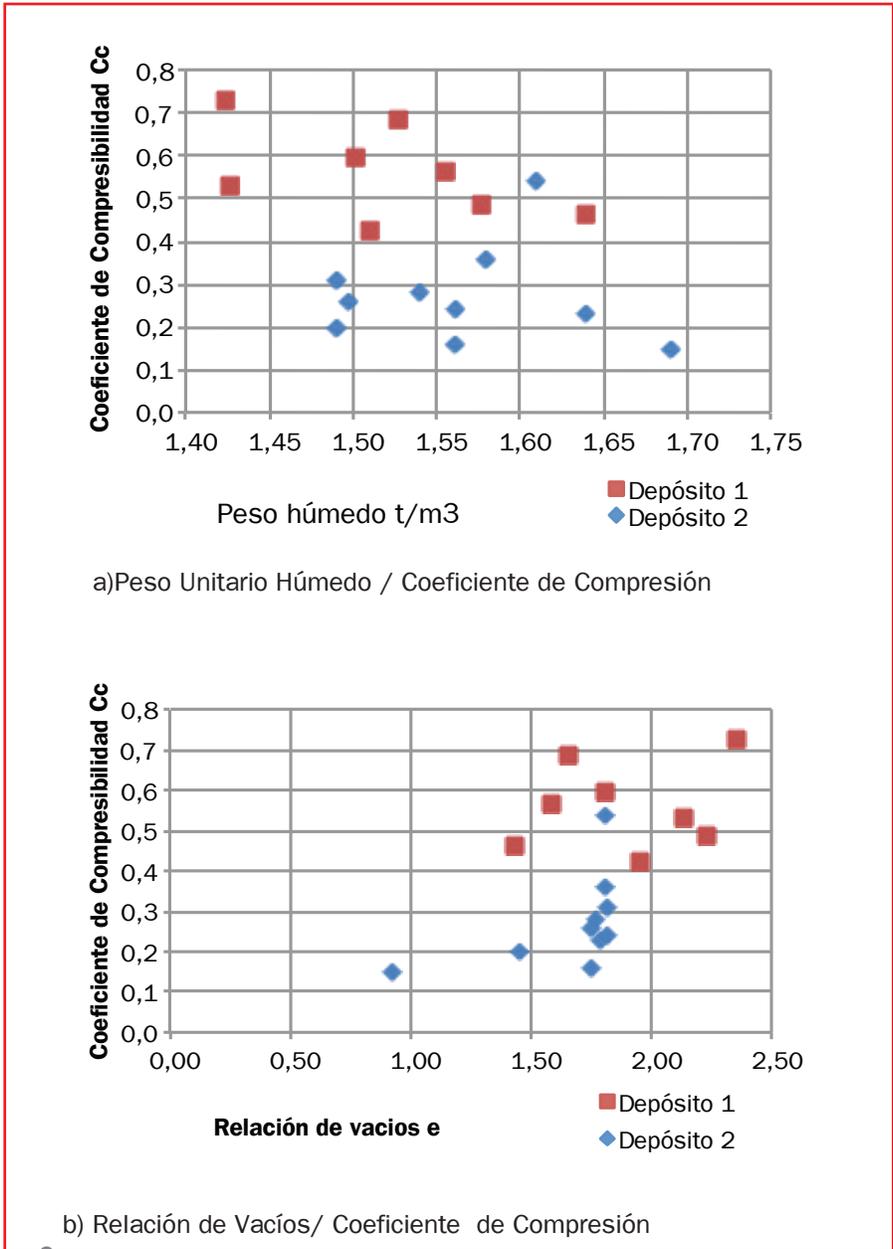
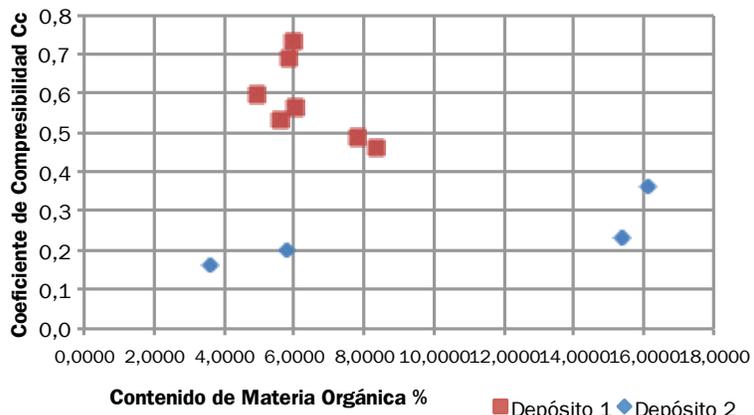
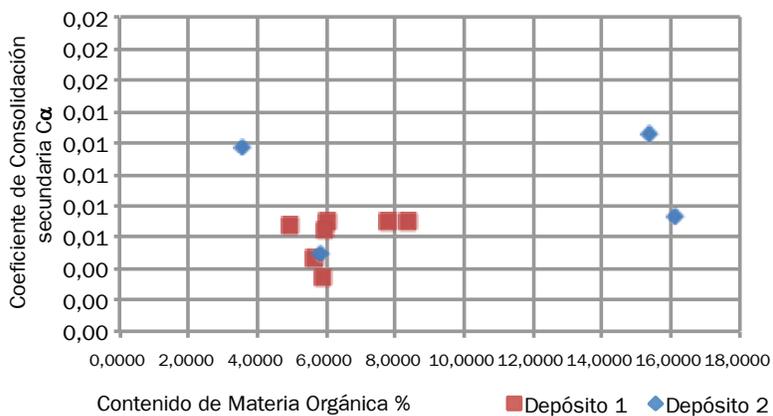


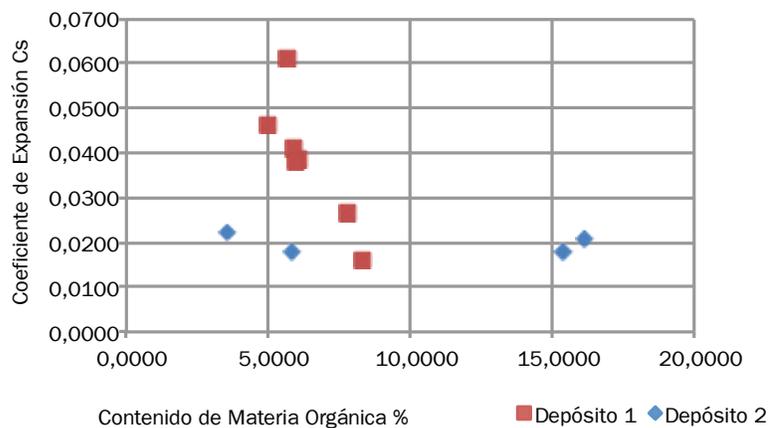
Figura 5. Relación entre coeficiente de compresibilidad C_c y a) Peso Unitario húmedo del suelo, b) Relación de vacíos inicial del suelo e. Fuente: Elaboración propia.



a) Contenido de materia Orgánica / Coeficiente de Compresión



b) Contenido de Materia Orgánica/ Coeficiente de Con. Secundaria



c) Contenido de Materia Orgánica/ Coeficiente de Expansión

Figura 6. Relación entre el contenido de Materia Orgánica y a) Coeficiente de Compresión, b) Coeficiente de Consolidación Secundaria c) Coeficiente de Expansión.

intervalo de 0.003 (CMO 5%) y 0.007 (CMO 8%) para el depósito 1 y entre un intervalo de 0.001 (CMO 5%) y 0.018 (CMO 15%) para el depósito 2, valores inferiores comparados con los valores encontrados en la literatura para Coeficiente de consolidación secundaria en suelos orgánicos del orden de 0.12 y 0.034 (Calderón, *et. al.*, 2003)

Se observa un comportamiento creciente en la relación coeficiente de compresión,

coeficiente de expansión a mayor valor de C_c , mayor valor de C_s . Al realizar la relación C_s/C_c , se encuentra que para el depósito 1 se obtiene una relación promedio de $C_s = 1/11 C_c$ y para el depósito 2 se obtiene una relación promedio de $C_s = 1/14 C_c$, como se observa en la figura 7. Se presenta una tendencia de crecimiento en el depósito 2, en su consolidación secundaria, posiblemente generada por el aumento en el contenido de materia orgánica.

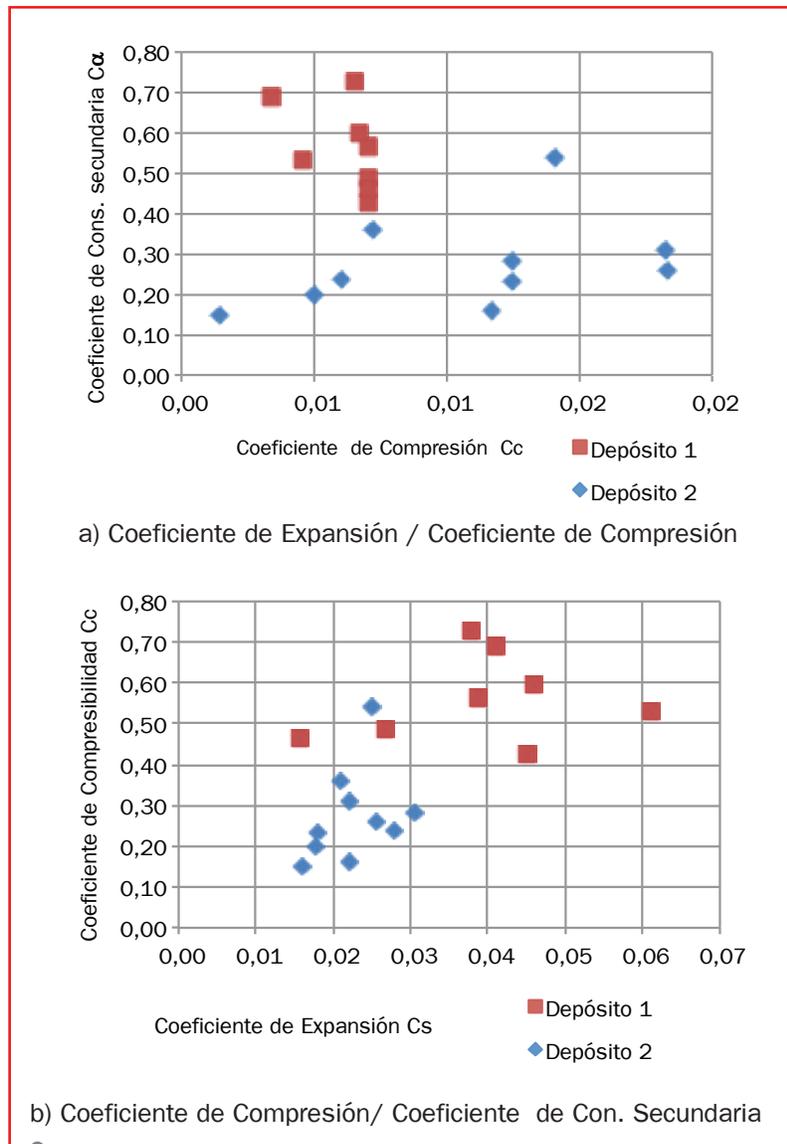


Figura 7. Relación entre el Coeficiente de Compresión, el Coeficiente de Expansión, y Coeficiente de Compresión secundaria.

El comportamiento encontrado entre el coeficiente de compresibilidad y el coeficiente de consolidación secundaria difiere del mostrado por Santagata, *et. al.*, 2008, quienes determinaron una relación de $C\alpha/Cc$ igual a 0.095, para suelos con contenidos de materia orgánica entre 40 a 60% en el ensayo de pérdida por ignición, mientras que para el depósito 1 se encontró un valor promedio de 0.01 y para el depósito 2 0.04, mas similar a los valores reportados para arcillas inorgánicas 0.04 ± 0.01 , y con mayor distancia de los valores reportados para esta condición por Mesri, *et. al.*, 1997 $C\alpha/Cc$ de 0.10, con valores típicos entre 0.05–0.07.

3.3 Espectro de diseño

En este numeral se presentan los resultados del espectro de amplificación suelo/roca para cada una de las zonas sísmicas; estos

resultados se comparan con el espectro recomendado por la Microzonificación sísmica para la zona.

Espectros de amplificación. En cada uno de los análisis se calculó la relación entre el espectro de respuesta en superficie con respecto al espectro de respuesta de la señal de entrada. En la figura 8 se presentan los promedios resultantes del análisis por aceleración y por sismo analizado.

Al realizar la normalización de los resultados obtenidos y compararlos con los espectros planteados en la zonificación sísmica de Pereira, construidos con los coeficientes espectrales definidos en la misma se encontró que la escala de aceleración 0.40g presenta una mayor similitud con la zona final del espectro (Véase figura 9)

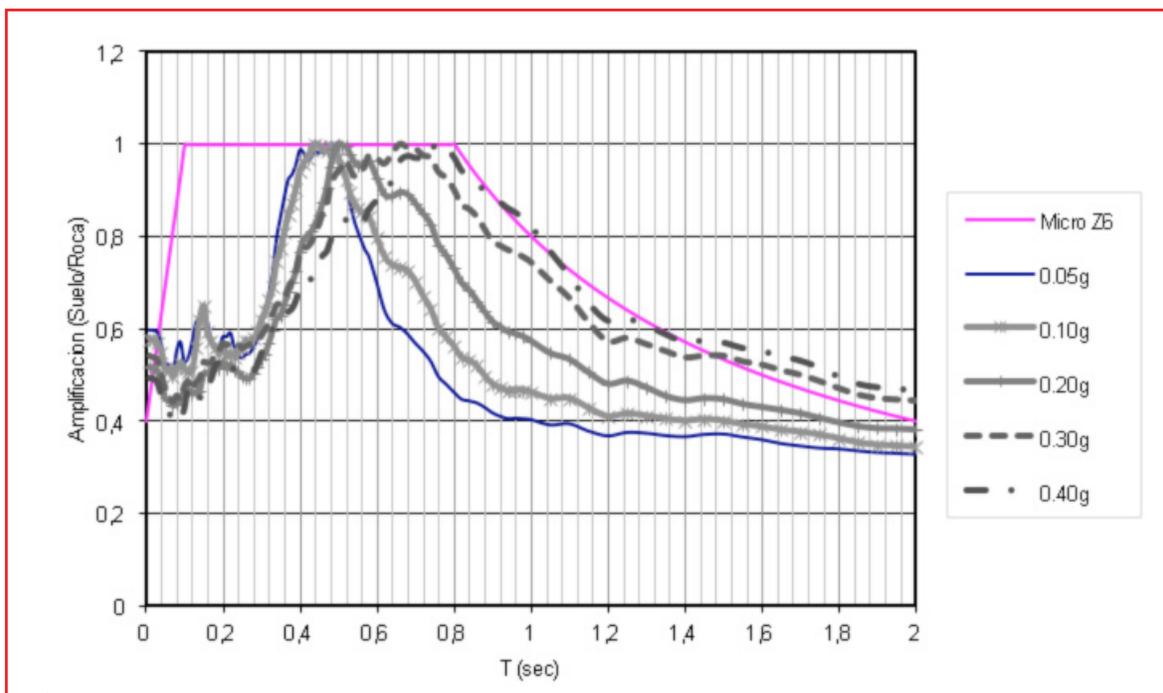


Figura 8. Espectros de amplificación para diferentes escalas de aceleración en la zona 6.

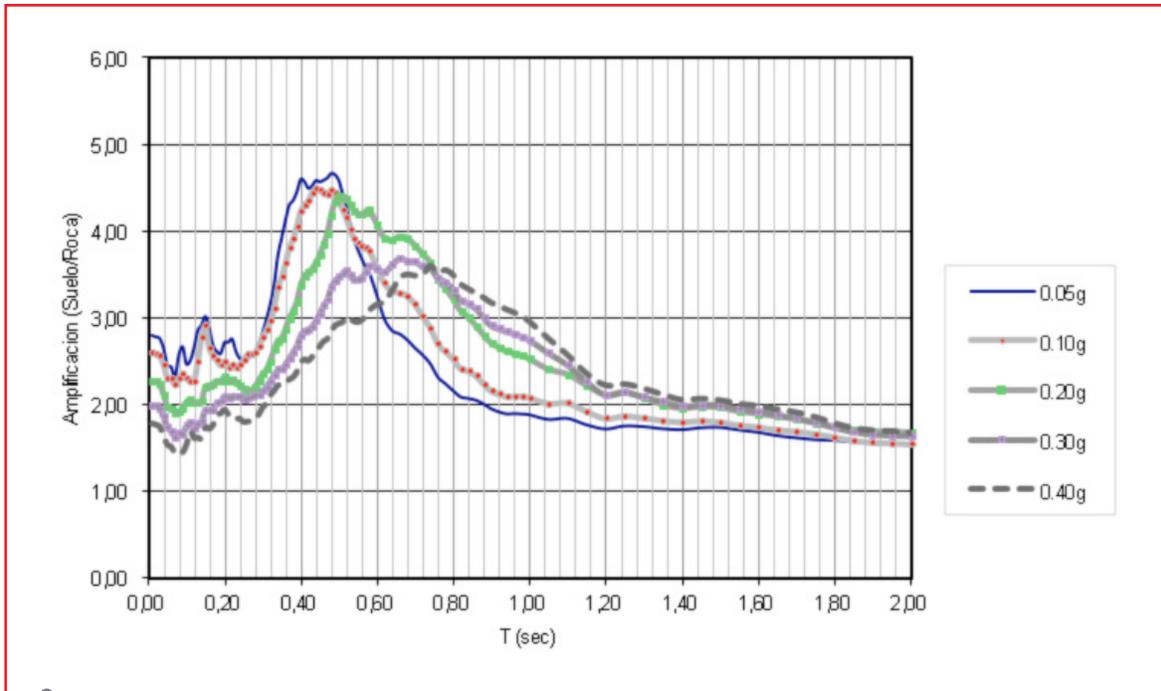


Figura 9. Espectros de amplificación normalizados para diferentes escalas de aceleración en la zona 6.

4. CONCLUSIONES

- Se encontró que tiene una mayor influencia el método de construcción de un depósito antrópico en su compresibilidad, independientemente de su contenido de materia orgánica; contenidos de materia orgánica superiores al 10% incrementaron el nivel de consolidación secundaria del depósito.
- Es evidente la variabilidad de los datos en el depósito 1, que como ya se mencionó, se generó por vertimientos sin control; se observan altos coeficientes de compresibilidad que pueden ser reducidos con mejoramiento de tipo mecánico, mientras que en el depósito 2, construido con control de compactación, debido a sus contenidos de materia orgánica superiores a 10% se incrementa el valor del coeficiente de consolidación secundaria.
- Se encontró que la relación de C_s/C_c , para el depósito 1 su promedio fue de $C_s = 1/11 C_c$, y para el depósito 2 fue de $C_s = 1/14 C_c$.
- Suelos con contenidos de materia orgánica superiores al 15% tienen una mayor tendencia a sufrir “Creep”, mostrando una relación cercana a uno entre C_c y C_α , comportamiento característico de los suelos con alto contenido de material orgánico.
- Con la finalidad de obtener la respuesta sísmica de los suelos compuestos por depósitos antrópicos de la ciudad de Pereira, se calcularon espectros de diseño empírico para la zona 6. Se encontró una mejor correspondencia entre el espectro propuesto en la microzonificación sísmica y el espectro escalado a una aceleración de 0.40g.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asociación de Ingeniería Sísmica. 2010. Normas Sismo Resistentes.
- ASTM. _2006b_. "Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using controlled-strain loading." Annual book of ASTM standards, D4186, Vol. 4.08.
- ASTM. _2006a_. "Classification of soils for engineering purposes _unified soil classification system_." Annual book of ASTM standards, D2487, Vol. 4.08.
- ASTM. _2007_. "Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils." Annual book of ASTM standards, D2974, Vol. 4.08
- Das B. 2001 Fundamentos de Ingeniería Geotécnica,. Pág. 153. Thomson Learning. 534 Pág
- Calderón, L.D., Livia, MC y Aguilar Z.2003. Consideraciones sobre la compresibilidad de suelos orgánicos y turbas.XIV Congreso nacional de Ingeniería Civil. Iquitos.
- Campos A. y Guzmán J. 1999. Suelos del Eje Cafetero, Productos UTP Pág. 87-88. Fondo Editorial.
- Cano S. L, Monsalve J. H, Espinosa B. A, Rubiano DM., Paris Q. G, Guzmán J. 1999 INGEOMINAS, CRQ, UNIQINDÍO. Estudio de la Amenaza Sísmica del Eje Cafetero.
- CARDER, Universidad de los Andes y DNPDA. 1999. Exploración geotécnica, investigación de laboratorio y zonificación sísmica de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal.
- Cortés L. 1976. Taxonomía de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC.
- Hermelin, M., y Betancurth, O., J., I 2007. Entorno natural de 17 ciudades de Colombia. "Pereira". 271p.
- Idriss, I. M. y Sun, J I.1993. User's manual for SHAKE91: a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits Center for Geotechnical Modeling, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis Davis, Calif., 1993, (480/S36/1992)
- Mesri, G., Stark, M. D., Ajlouni, M. A., and Chen, C. S. 1997. "Secondary compression of peat with or without surcharging." J. Geotech. Geoenviron. Eng., 123_5_, 411-421
- NTC 1964.2004. "Método de ensayo para determinar las propiedades de consolidación unidimensional de los suelos Norma Técnica Colombiana.
- Santagata M., Bobet A., Johnston C., y Hwang J.2008. One-Dimensional Compression Behavior of a Soil with High Organic Matter Content Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 134, No. 1, January 1, Pag 1. 14 Pag.
- Vasquez, M, J., Campos, A.G, Cardozo P, D y Osorio R, G. 2000. Base ambiental con énfasis en riesgo. CARDER- FOREC.