

INTERACCION SUELO ESTRUCTURA, PARA EDIFICACIONES DE MUROS DE CONCRETO, EN SUELOS BLANDOS

SEISMIC SOIL STRUCTURE INTERACTION FOR CONCRETE WALL BUILDINGS IN SOFT SOILS

CARLOS ALFONSO BALLÉN DÍAZ¹

1. Ingeniero civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, postulante del programa de maestría en Ingeniería Civil, con énfasis en Geotecnia
c.ballend@yahoo.es

Recibido: 11/02/2015, Aceptado:
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

RESUMEN

El presente trabajo, está encaminado a investigar el comportamiento dinámico del suelo blando de la sabana de Bogotá y su interacción con una estructura prototipo, de concreto reforzado, de cinco pisos y altillo, que tiene un sistema sismoresistente conformado por muros de concreto de $f'c=21\text{MPa}$. Para realizar este análisis se dividió el problema en dos partes.

En la primera parte, se establecen las condiciones geológicas y geotécnicas de los suelos de la sabana y se estudia en particular el sondeo de 180m, realizado en la estación CBOG1, (localizado en la sede del INGEOMINAS). Debido a que se conoce con antelación el espectro de aceleraciones, velocidades y desplazamientos en la roca y la superficie, producido por el sismo de Quetame, ocurrido en el 2008, se tratara de verificar, utilizando como dato de entrada el registro en roca, del sismo de Quetame, y caracterizando el suelo, mediante ensayos de prospección geofísica tipo ReMi, Down Hole, Bender Elements y Triaxial Cíclico. Si las propiedades dinámicas del suelo, halladas con estos ensayos y aplicadas a las curvas de G/G_{\max} y de amortiguamiento "D", procesadas con el programa EERA, coinciden con las halladas en la estación CBOG1, con los registros de superficie, en el sentido Este-Oeste, implicaría que estas curvas representan adecuadamente al suelo de la sabana.

En la segunda parte, se utilizara el edificio antes mencionado, como si hubiera sido construido en cada una de las 27 estaciones de la RAB, que registraron el sismo de Quetame, tomando como dato de entrada, el registro en superficie, para cada una de las estaciones. Se escoge el programa ETABS, para realizar el análisis, mediante el "Response Spectrum Functions" y "Time History Functions", con el objeto de compararlos. Para recolectar la información, se escogieron dos puntos de la estructura y para cada uno de los edificios localizados en las estaciones. Con estos resultados se graficaron curvas de fuerza horizontal normalizada, rigidez normalizada, cortante Vs. Momento y los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento, para los sentidos Este-Oeste y Norte-Sur, tanto de entrada como de salida. Finalmente, los espectros obtenidos, se comparan con los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento de la MZSB, Decreto 523 de 2010.

Palabras Claves: Sabana, microzonificación, bender elements, down hole, triaxial cíclico, Quetame, G/Gmax, amortiguamiento, EERA, RAB, ETABS, rigidez, cortantes.

ABSTRACT

The present study aims to investigate the dynamic behavior of the soft soil of the savanna of Bogotá and its interaction with a prototype structure, reinforced concrete, five floors and attic, which has a system consisting earthquake resistant concrete walls $f'c = 21\text{MPa}$. To perform this analysis the problem was divided into two parts.

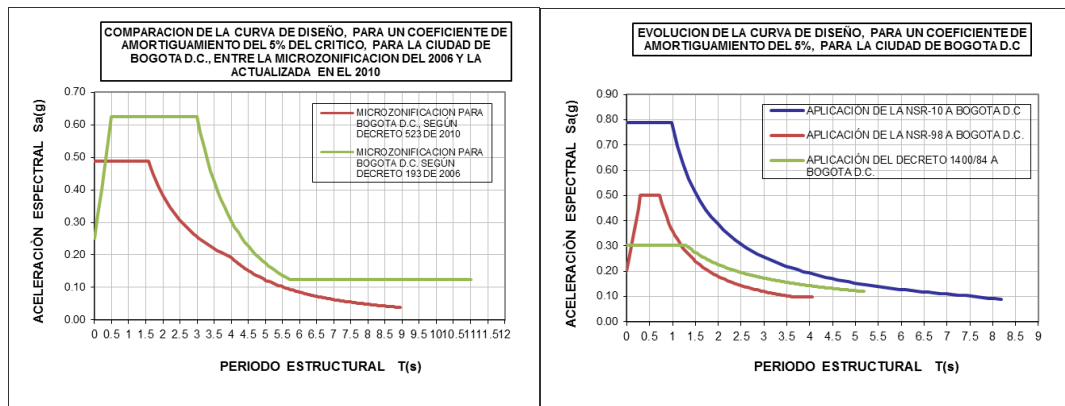
Geological and geotechnical conditions of savanna soils are established in the first part, and studied particularly 180m poll conducted in CBOG1 station (located at the seat of Weber County). Because it is known in advance the spectrum of accelerations, velocities and displacements in the rock and the surface produced by the earthquake Quetame, occurred in 2008, were to verify, using as input the registration rock, Quetame earthquake, and characterizing the soil, by testing geophysical prospecting type ReMi, Down Hole, Bender Elements and Cyclic Triaxial. If dynamic soil properties, these trials found and applied to the curves of G / G_{max} and damping "D" processed with the EERA program coincide with those found in the CBOG1 station with surface recordings in the East-West, these curves imply that adequately represent the floor of the savanna.

In the second part, the aforementioned building is used as if it had been built in each of the 27 stations of the RAB, which recorded the quake Quetame, taking as input, and the record size for each of stations. The ETABS program is chosen for analysis, using the "Response Spectrum Functions" and "Time History Functions", in order to compare them. Collecting information for two points of the structure and each of the buildings located in the stations were selected. With these results normalized horizontal force curves, normalized stiffness, shear Vs. Time and spectral acceleration, velocity and displacement for East-West and North-South; both input and output directions are plotted. Finally the spectra obtained are compared with the spectra of acceleration, velocity and displacement MZSB, 2010 Decree 523.

Keywords: Savannah, micro zoning, bender elements, down hole, cyclic triaxial, Quetame, G / G_{max} , damping, EERA, RAB, ETABS, stiffness, shear.

INTRODUCCION

El diseño sismoresistente ha evolucionado desde el año 1984 hasta el presente. Como consecuencia, existen en la ciudad de Bogotá y en otras ciudades importantes, estudios de microzonificación sísmica, para el cálculo del espectro de aceleraciones, velocidades y desplazamientos. Los cambios pueden observarse en las siguientes graficas:



La microzonificación sísmica para la ciudad de Bogotá D.C., se actualizó pasando de 5 zonas, en la NSR-98; a 16 zonas en la NSR-10; como puede verse en la tabla 3.1. Se evaluaron para periodos, con amortiguamiento del 5% del crítico y una tasa de retorno de 475 años, (probabilidad de excedencia del 10% en una vida útil de 50 años); también se estableció un diseño especial, denominado de umbral de daño, calculado para un amortiguamiento del 2% del crítico y una probabilidad de excedencia del 80%, en un periodo de 15 años, cuya periodo de retorno equivale aproximadamente a diez años, (Gallego, 2000).

COEFICIENTES ESPECTRALES DE DISEÑO					
	ZONA 1 CERROS	ZONA 2 PIEDEMONTE	ZONA 3A Y 3B LACUSTRE A	ZONA 4 LACUSTRE B	ZONA 5A Y 5B TERRAZAS
T_0	0.20	0.20	0.50	0.50	0.50
T_c	1.00	1.20	3.00	3.00	3.00
T_L	5.00	6.00	5.71	5.71	5.71
A_m	0.24	0.30	0.25	0.16	0.20
A_n	0.30	0.40	0.30	0.20	0.30
F_a	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
F_v	2.00	2.25	32.48	31.18	25.98

3.1. Coeficientes de diseño.					
Zona	F_a (475)	F_v (475)	T_c (s)	T_L (s)	A_0 (475) (g)
CERROS	1.35	1.30	0.62	3.00	0.18
PIEDEMONTE A	1.65	2.00	0.78	3.00	0.22
PIEDEMONTE B	1.95	1.70	0.56	3.00	0.26
PIEDEMONTE C	1.80	1.70	0.60	3.00	0.24
LACUSTRE-50	1.40	2.90	1.33	4.00	0.21
LACUSTRE-100	1.30	3.20	1.58	4.00	0.20
LACUSTRE-200	1.20	3.50	1.87	4.00	0.18
LACUSTRE-300	1.05	2.90	1.77	5.00	0.16
LACUSTRE-500	0.95	2.70	1.82	5.00	0.14
LACUSTRE ALUVIAL-200	1.10	2.80	1.63	4.00	0.17
LACUSTRE ALUVIAL-300	1.00	2.50	1.60	5.00	0.15
ALUVIAL-50	1.35	1.80	0.85	3.50	0.20
ALUVIAL-100	1.20	2.10	1.12	3.50	0.18
ALUVIAL-200	1.05	2.10	1.28	3.50	0.16
ALUVIAL-300	0.95	2.10	1.41	3.50	0.14
DEPÓSITO LADERA	1.65	1.70	0.66	3.00	0.22

INTERACCION ROCA SUELO HASTA LA SUPERFICIE

Para la interacción suelo estructura, en lo correspondiente al suelo, se necesita para modelar sus características, (cuando está sometido a movimientos sísmicos), de un modelo basado en unas curvas, que representan dinámicamente al suelo. Las más importantes son las curvas de degradación del módulo cortante y la de amortiguamiento. Durante los últimos 40 años, se han hecho avances significativos en su comprensión y algunos investigadores como Ishibashi y Zhang (1993), presentaron las siguientes ecuaciones para evaluar los valores de $\frac{G}{G_{max}}$, que son las que más se emplean en la actualidad:

$$\frac{G}{G_{max}} = \kappa_{(\lambda)} \sigma'_0 m_{(y)} - m_0 \quad (1)$$

$$\kappa_{(y)} = 0.50 * \left[1 + \tanh * \left\{ l_n * \left(\frac{0.000102}{\gamma} \right)^{0.492} \right\} \right] \quad (2)$$

$$m_{(y)} - m_0 = 0.272 * \left[1 - \tanh \left\{ l_n \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.40} \right\} \right] \quad (3)$$

$$D_{sand} = 0.333 * \left\{ 0.586 * \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 * \left(\frac{G}{G_{max}} \right) + 1 \right\} \quad (4)$$

Kramer (1996), propuso la siguiente expresión para evaluar las deformaciones en arcillas:

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_s} = \frac{A_{lazo}}{2\pi * G_{sec} * \gamma_c^2} \quad (5)$$

$$\xi = 0.333 * \frac{1 + e^{-0.145 * PI^{1.3}}}{2} * \left[0.586 * \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - \left(1.547 * \frac{G}{G_{max}} \right) + 1 \right] \quad (6)$$

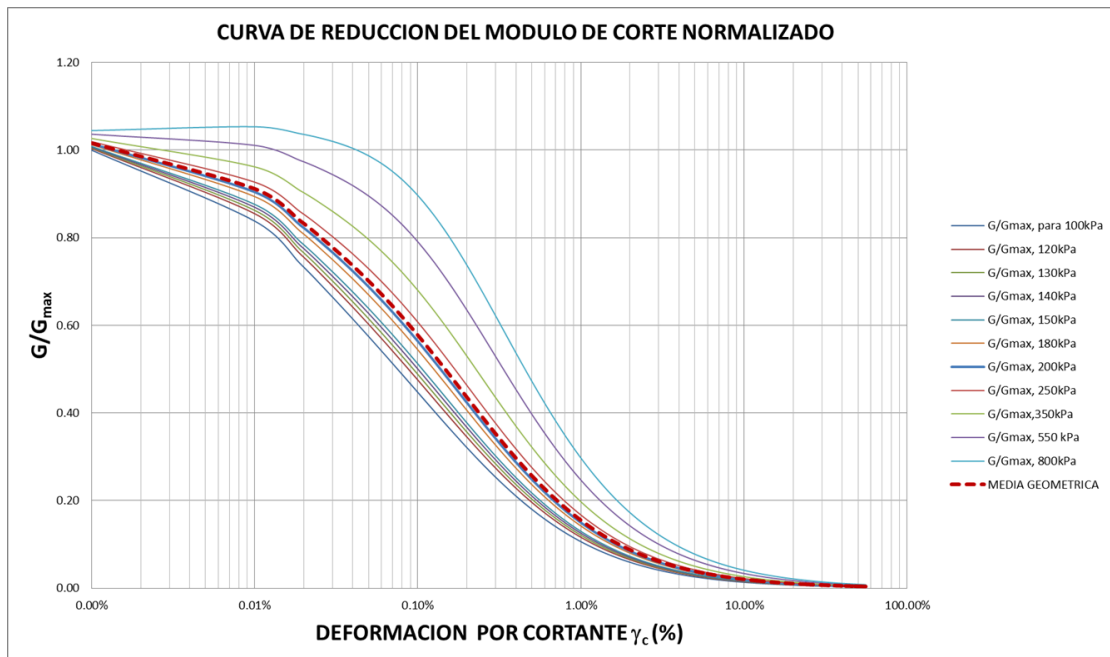
$$\frac{1 + e^{-0.145 * PI^{1.20}}}{2} = 0.50 \quad (7)$$

En general, se ha ido perfeccionando estos modelos, con la inclusión de resultados de varias investigaciones. Es así como hoy en día, se trabaja con uno u otro y son

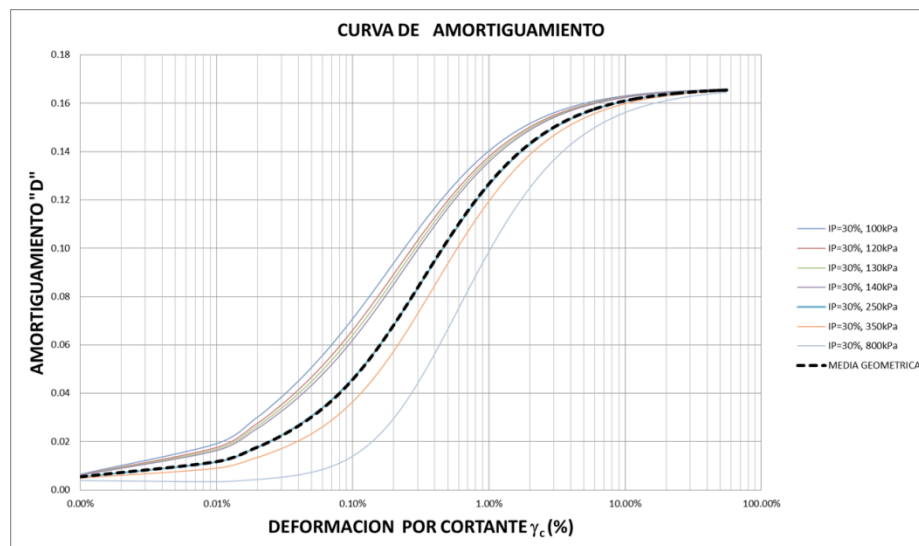
ampliamente aceptados por la academia, para calcular curvas de degradación del módulo cortante y de razón de amortiguamiento. Los modelos como ya se mencionó, más utilizados en la actualidad, son los de Zhang et al., 2005 y Díaz Parra, 2007, cuya formulación matemática es la siguiente:

Modelo Zhang et al., 2005	Modelo Díaz-Parra, 2007
$\frac{G}{G_{MAX}} = \frac{1}{1 + \left[\frac{\gamma}{\gamma_r}\right]^\alpha}$ $\alpha = 0.0021PI + 0.834$ $\gamma_r = \gamma_{r1} \left[\frac{\sigma'_m}{P_a}\right]^k$ $\sigma'_m = \frac{(\sigma'_v + 2\sigma'_h)}{3} = \sigma'_v \frac{(1 + 2k'_0)}{3}$ $k = 0.316 \cdot e^{-0.0142PI}$ $\gamma_{r1} = 0.0011PI + 0.0749$ $D = f\left(\frac{G}{G_{MAX}}\right) + D_{MIN}$ $f\left(\frac{G}{G_{MAX}}\right) = 10.6 \cdot \left(\frac{G}{G_{MAX}}\right)^2 - 31.6 \cdot \left(\frac{G}{G_{MAX}}\right) + 21$ $D_{MIN} = D_{MIN1} \cdot \left(\frac{\sigma'_m}{P_a}\right)^{\frac{k}{2}}$ $D_{MIN1} = 0.008 \cdot PI + 0.82$	$\frac{G}{G_{MAX}} = \frac{1}{1 + \left[\frac{\gamma}{\gamma_r}\right]^s}$ <p>Arcillas, $s = 0.919$ y Arenas, $s = 0.85$</p> $\gamma_{ref} = (c \cdot e_0) \left[\frac{\sigma'_0}{P_a}\right]^m$ <p>$m = 0.35$ $c = 0.0756$</p> $D = F \cdot D_{Masing} + D_{MIN}$ $F = \alpha \left(\frac{G}{G_{MAX}}\right)^\beta ; \quad D_{Masing} \approx 33 \left(1 - \frac{G}{G_{MAX}}\right)$ <p>$\alpha = 0.62\%$ y $\beta = 0.10$</p> $D_{MIN} = \delta \cdot \left(\frac{\sigma'_0}{P_a}\right)^{-\eta} \quad \eta = 0.30$ <p>Arcillas, $\delta = 1.0\%$ y para Arenas, $\delta = 0.50\%$</p>

Para aplicar el modelo Zhang et al., (2005), a los suelos blandos de la sabana, se realizó el ejercicio de hallar la curva de reducción del módulo de corte normalizado, G/G_{max} , con diferentes presiones de confinamiento, desde 120kPa a 800kPa. A estos resultados se les calculó la media geométrica del G/G_{max} , línea a trazos, con el objeto de observar el margen que se tiene y el grado de sensibilidad. Como puede observarse, la media geométrica de G/G_{max} se confunde con la curva G/G_{max} , a una presión de confinamiento de 200kPa y la desviación aumenta, para presiones de confinamiento mayores a 550kPa. El cálculo se realizó para un coeficiente de Poisson de $\mu = 0.35$, (normal en los suelos de la sabana).



La curva de amortiguamiento, “D”, se calculó para un Índice Plástico de 30% y para una presión de confinamiento entre 120kPa a 800kPa. Se observa que la curva que representa la media geométrica del amortiguamiento, se confunde con la curva de amortiguamiento para una presión de confinamiento a 250kPa. La variación del IP (índice plástico), parece no afectar tan drásticamente la forma de la curva.



De otra parte en el trabajo denominado: “Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships”, realizado por Jianfeng Zhang¹; Ronald D. Andrus²; and

C. Hsein Juang³; que se reseña en el anexo 3, se modifica la ecuación de Ishibashi y Zhang, introduciendo el término «D-D_{min}», para evaluar el amortiguamiento.

$$D - D_{min} = f\left(\frac{G}{G_{max}}\right) = 10.6\left(\frac{G}{G_{max}}\right)^2 - 31.6\left(\frac{G}{G_{max}}\right) + 21.0 \quad (8)$$

En este trabajo, concluyen los autores con base en 122 especímenes estudiados, que los suelos cuaternarios, presentan mayor linealidad con respecto a G/G_{max} y D , que los suelos de los otros dos grupos (terciario y saprolita) y el efecto de confinar el suelo, produce un resultado más significativo y en cambio el efecto del IP es menos importante. Por lo tanto, el efecto de confinar el esfuerzo efectivo y la edad geológica, en las Curvas G/G_{max} y D , pueden afectar significativamente la predicción de las aceleraciones espectrales.

Los suelos de la sabana, que conforman la mayor parte de la ciudad, son depósitos de origen Lacustre, conformados por arcillas y limos de alta plasticidad (CH y MH), con espesores que varían entre los 250 y 500m, con intercalaciones de materiales volcánicos y turbosos, que disminuyen hacia el piedemonte.

En la transición, entre las formaciones rocosas y los depósitos lacustres, que ocurren en la zona del piedemonte, existen condiciones especiales por la mezcla de materiales coluviales, aluviales, Lacustres y a la presencia de acuíferos artesianos, González (2013).

El lago sabanero se formó por sedimentación y se cree que se secó hace 10,000 años. Estos suelos arcillosos, sufren consolidación primaria o son normalmente consolidados, y con una relación de vacíos cercana a 4, Orozco (2013), y por efecto de su propio peso, continuarán consolidándose, hasta convertirse en arcillolitas. La costra superficial, con espesores de 2.0 a 3.0m está sobre consolidada por desecación.

En la zona de MZSB, Lacustre 200, se aplicara más adelante, el sismo de Quetame de 2008. En razón a que se conocen los registros en roca de la estación CBOG1 (INGEOMINAS) y se conoce la composición del suelo hasta la superficie, se hallaran las propiedades dinámicas para 5 tipos de muestras a varias profundidades y se aplicara el programa EERA, para hallar el espectro de aceleraciones, velocidades y desplazamientos y se compararan con los obtenidos en la superficie, por la estación CBOG1.

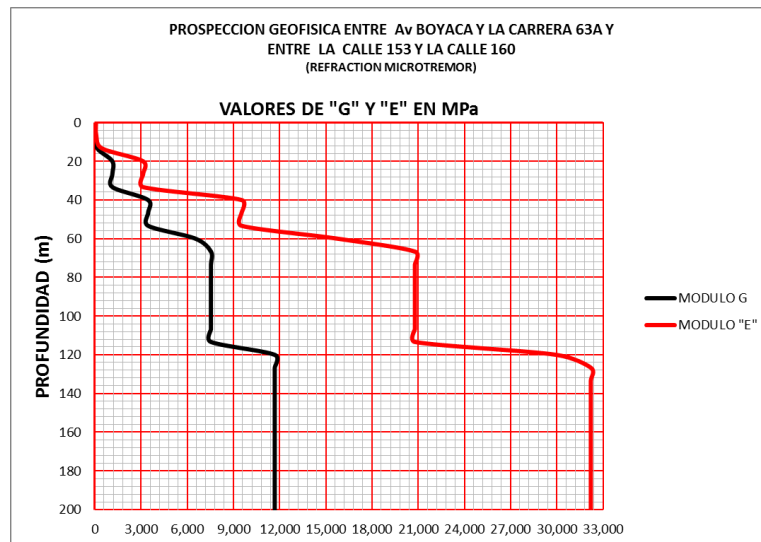
A efecto de su aplicación, a continuación se presentan ensayos geofísicos, down hole, bender elements y triaxial cíclico, utilizados obligadamente para caracterizar dinámicamente los suelos.

El FOPAE también ha estudiado los registros del sismo de Quetame de 2008, sus conclusiones se registran en la siguiente tabla, aplicadas a cada una de las estaciones de la RAB:

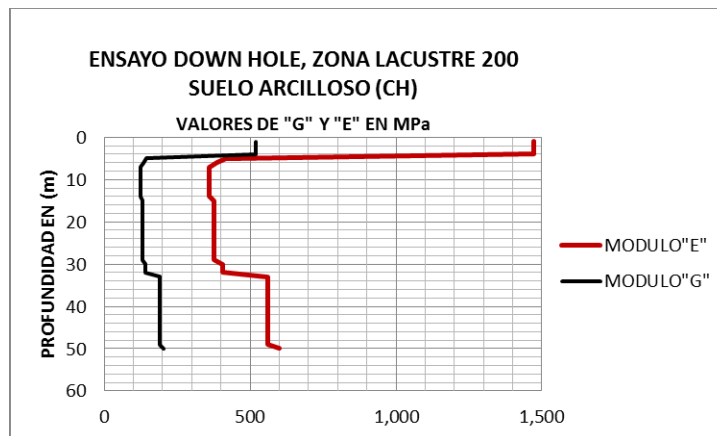
Tabla 11. Valores estimados de la velocidad de onda promedio del depósito hasta la roca						
CODIGO	NOMBRE	GRUPO	T fundamental (s)	H Profundidad (m)	Vs promedio metodo 1 (m/s)	Vs promedio metodo 2 (m/s)
CEING	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA	LACUSTRE	1.95	110	226	
CUSAL	UNIVERSIDAD DE LA SALLE	PIEDEMONTE	0.65	30	185	
CBOSA	COLEGIO FERNANDO MAZUERA	ALUVIAL	0.95	70	295	
CCORP	UNIVERSIDAD CORPAS	LACUSTRE	2.7	220	326	
CUAGR	UNIAGRARIA	LACUSTRE	2.2	130	236	249
CPSUB	ACADEMIA DE POLICIA	CERRO	0.45	0		
CUSAQ	COLONIA ESCOLAR DE USAQUEN	PIEDEMONTE	0.45	30	267	
CESCA	ESCUELA DE CABALLERIA	CERRO	0.3	0		
CBANC	BANCO DE LA REPUBLICA	LACUSTRE	1.05	60	229	
CTVCA	T.V. CABLE	CERRO	0.25	0		
CFLOD	PARQUE LA FLORIDA	LACUSTRE	4.25	500	471	
CAVIA	AVIANCA	LACUSTRE	2.95	300	407	
CFONT	PLANTA DE BOMBEO FONTIBON	LACUSTRE	3.2	270	338	
CNIÑO	CENTRO DE ESTUDIOS DEL NINO	LACUSTRE	2.45	220	359	
CJABO	JARDÍN BOTANICO	LACUSTRE	2.9	260	359	
CBART	COLEGIO SAN BARTOLOME	CERRO	0.3	0		
CUNMA	UNIVERSIDAD MANUELA BELTRAN	CERRO	0.2	0		
CDIOS	HOSPITAL SAN JUAN DE DIOS	PIEDEMONTE	0.65	40	246	
CCITE	CITEC	ALUVIAL	1.8	200	444	
CTIEM	CLUB EL TIEMPO	LACUSTRE	3.25	375	462	
CTIMI	PARQUE TIMIZA	ALUVIAL	1.65	160	388	
CTUNA	PARQUE TUNAL	ALUVIAL	0.9	80	356	
CARTI	ESCUELA DE ARTILLERIA	PIEDEMONTE	0.4	30	300	
CMARI	BOMBEROS MARICHUELA	PIEDEMONTE	0.4	30	300	
CSMOR	COLEGIO SIERRA MORENA	CERRO	0.3	0		
CTEJE	ESCUELA DE TEJEDORES	ALUVIAL	0.85	80	376	
CVITE	TANQUES DE VITELMA	CERRO	0.15	0		
CLAGO	COLEGIO LAUREANO GOMEZ	LACUSTRE	2.25	175	311	
CGRAL	ESCUELA GENERAL SANTANDER	ALUVIAL	1.1	100	364	334
CCKEN	COL-KENNEDY	ALUVIAL	1.65	220	533	
CBOG1	INGEOMINAS	LACUSTRE	2.1	180	343	368

Tomado de: PROCESAMIENTO E INTERPRETACION DE SEÑALES DE LA RED DE ACCELERÓGRAFOS DE BOGOTÁ-RAB. - FOPAE, PAG. 50

Para los perfiles de suelo arcilloso blando, de la sabana, (CH y CL); como uno localizado en la zona lacustre 50, de la MZSB, (Decreto 523), donde las velocidades de ondas de compresión “P” y de corte “S” fueron halladas, mediante una prospección de línea Geofísica, (ensayo ReMi, Refraction Microtremor). Los resultados de este ensayo me fueron suministrados por la firma LFO, del Ing. Luis Fernando Orozco, los cuales se utilizaron para hallar los valores de los módulos elásticos y de corte, cuyos resultados son los siguientes:



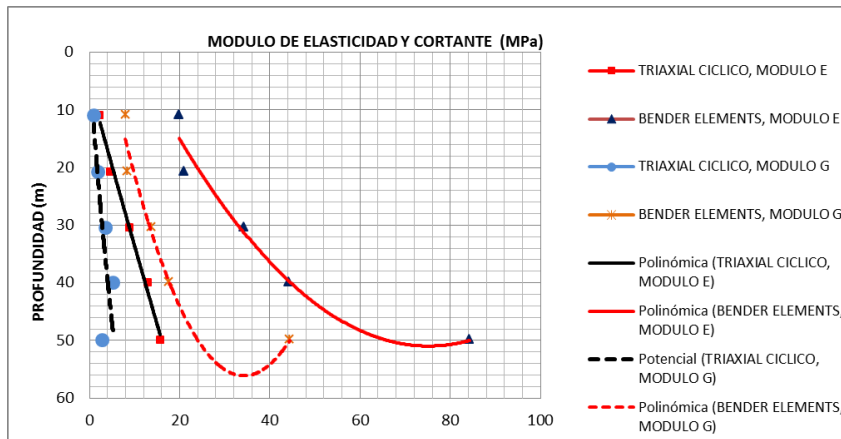
Para otro terreno, localizado en la zona Lacustre 200; con las mismas características del suelo anterior, es decir arcilloso y blando (CH); se realizó un ensayo Down Hole, a una profundidad de 50m, (Datos suministrados por la firma LFO). Los resultados para los módulos elásticos y de corte son los siguientes:



Para efectos comparativos, se aprovecharon también, para este mismo sitio, los ensayos tipo Bender Elements y Triaxial cíclico, (suministrados muy gentilmente por la firma LFO). Es de resaltar el hecho, de que este terreno pertenece a la zona Lacustre 200 de la MZSB, (Decreto 523).

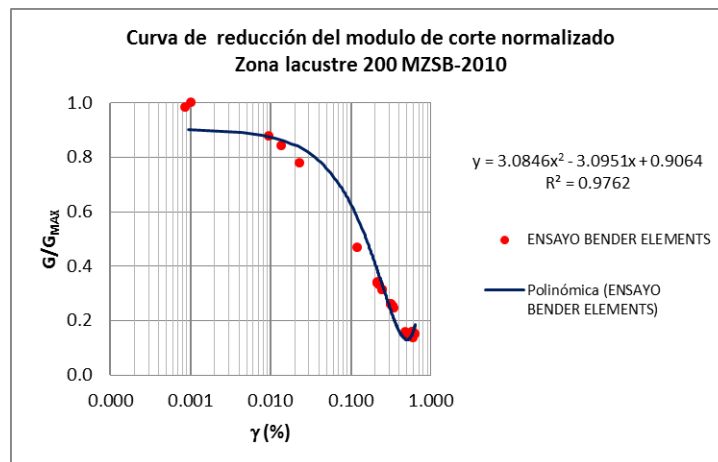
Es de resaltar igualmente, que los ensayos de triaxial cíclico, se realizaron sobre muestras inalteradas, obtenidas con tubo Shelby, a las profundidades anotadas; Para el ensayo se utilizó un equipo GDS, de propiedad del laboratorio de suelos de la Universidad Javeriana; contratado por la firma LFO, de quien se obtuvo autorización, para presentarlas en este artículo, con fines académicos.

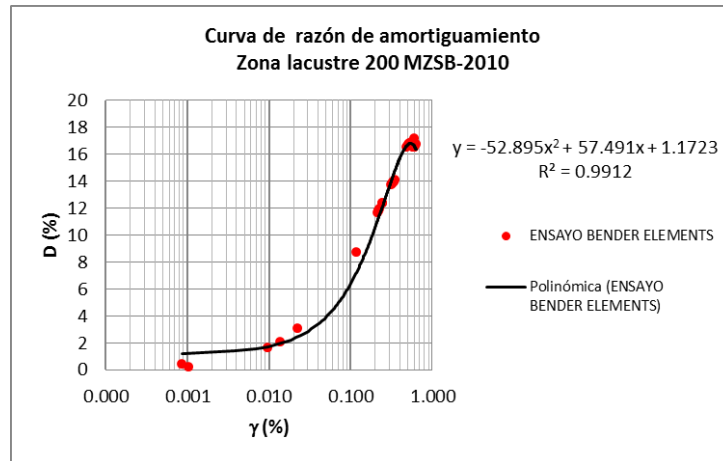
Los resultados, aplicando las ecuaciones de Ishibashi y Zhang (1993) y Zhang et al., (2005). Son:



Para la zona Lacustre 200 de la MZSB; el modulo elástico y de cortante, realizados para el mismo tipo de suelo, tomando muestras inalteradas a la misma profundidad y con tubo Shelby; arrojan resultados muy contradictorios en relación con la magnitud de los resultados, (parece que lo más adecuado hubiera sido utilizar, un muestreador de pistón), este hecho por sí mismo, representa una gran incertidumbre. Por esta razón las curvas de degradación del módulo de corte, deben calcularse haciendo uso de la mejor experticia y empleando un buen criterio, para que el suelo quede bien caracterizado.

La curva promedio, que representa la investigación de los primeros 50m., mediante los ensayos down hole, triaxial cíclico y bender elements, para la reducción del módulo de corte normalizado y la de razón de amortiguamiento, se presentan a continuación:



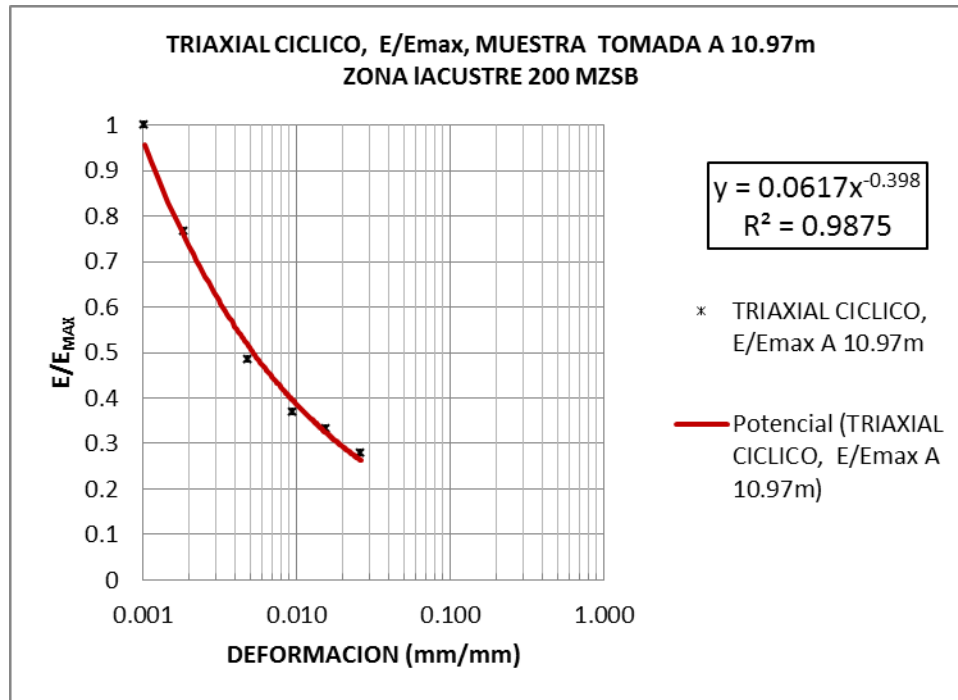


En razón a que el triaxial cíclico, con esfuerzo controlado, siguiendo la Norma ASTM D 5311, permite una mejor definición del comportamiento del suelo y también un mejor control de la muestra, se definirán con este ensayo, 5 muestras representativas de los 10.97m, 20.73m, 30.48m, 39.93m y 49.99m. El objeto es utilizarlas estas muestras, para procesar los datos con el programa EERA, del sismo de Quetame de 2008, sentido EO, a la estación CBOG1, donde funciona el INGEOMINAS y que pertenece a la zona Lacustre 200 de la MZSB (decreto 523). La roca en esta estación está a 180m de profundidad.

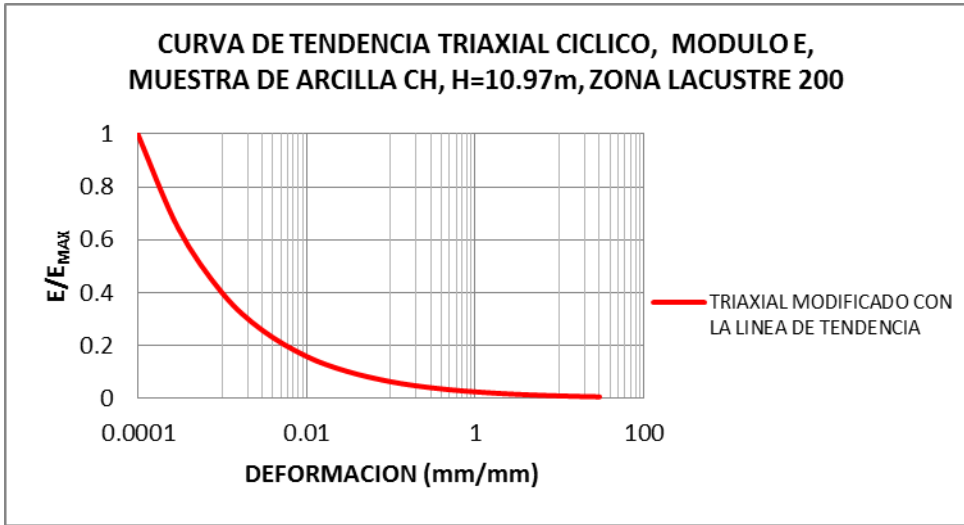
PERFIL GEOTECNICO ESTACION INGEOMINAS CBOG1											
No Capa	Material	DESCRIPCION GEOTECNICA	Tramo desde (m)	Tramo hasta (m)	Esp Estrato (m)	wn (%)	eo	IP	Peso unitario gr/cm ³	Vs Ref m/s	Vs modelado m/s
1	CH-MH	Arcilla ligeramente limosa, gris	0.00	5.00	5.00	43	1.10	45	1.80	170	137
2	CH	Arcilla, gris rosado palido.	5.00	7.00	2.00	79	1.90	92	1.65	170	157
3	CH	Arcilla, gris marrón.	7.00	12.00	5.00	127	2.91	151	1.40	170	161
4	CH	Arcilla, gris oliva.	12.00	17.00	5.00	119	2.88	149	1.38	170	166
5	CH	Arcilla, marrón.	17.00	21.00	4.00	116	2.78	143	1.43	170	169
6	PT	Turba.	21.00	23.00	2.00	300	5.50	270	1.00	150	151
7	CH	Arcilla, marrón amarillento oscuro.	23.00	30.00	7.00	87	2.70	122	1.45	170	174
8	CL	Arcilla arcillosa fina-media, marrón amarillo.	30.00	38.00	8.00	28	0.96	17	1.95	285	305
9	CH	Arcilla limosa, marrón amarillento oscuro.	38.00	44.50	6.50	52	1.32	46	1.75	175	196
10	CH	Arcilla, gris oliva, turba arcillosa negra.	44.50	52.50	8.00	81	2.10	104	1.55	175	201
11	PT	Turba.	52.50	58.00	5.50	120	2.95	155	1.34	150	175
12	CH	Arcilla arenosa gris oliva.	58.00	67.00	9.00	37	1.00	38	1.90	175	208
13	PT	Turba.	67.00	69.00	2.00	120	2.95	155	1.30	150	182
14	CL	Intercalaciones de arena y arcilla.	69.00	80.00	11.00	26	1.05	23	1.95	285	352
15	CL	Intercalaciones de arena y arcilla.	80.00	100.00	20.00	25	1.05	22	1.95	285	368
16	CL	Intercalaciones de arena y arcilla.	100.00	120.00	20.00	20	0.95	14	1.95	285	384
17	CL	Intercalaciones de arena y arcilla.	120.00	140.00	20.00	27	1.05	24	1.95	285	398
18	CL	Intercalaciones de arena y arcilla.	140.00	152.00	12.00	27	1.05	0	1.95	285	408
19	CH	Arcilla gris y marrón.	152.00	157.00	5.00	29	0.90	27	1.80	175	253
20	PT	Turba.	157.00	159.00	2.00	120	2.00	155	1.30	150	218
21	CL	Intercalaciones de arena y arcilla.	159.00	180.00	21.00	40	1.15	42	1.95	285	419

Tomado del estudio del DPAAE-"Procesamiento e interpretación de Señales de la RAB"

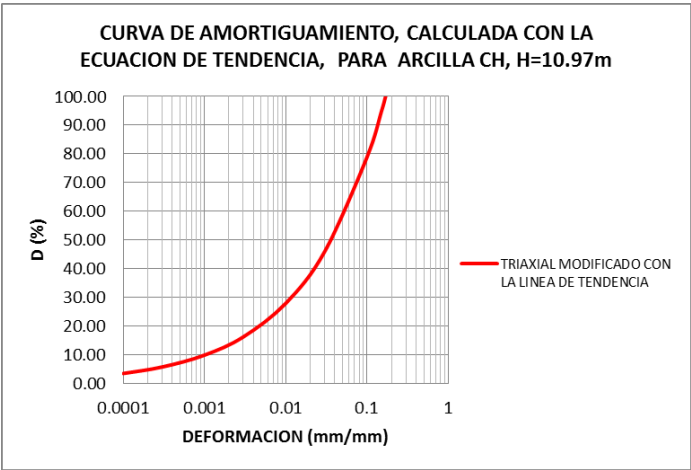
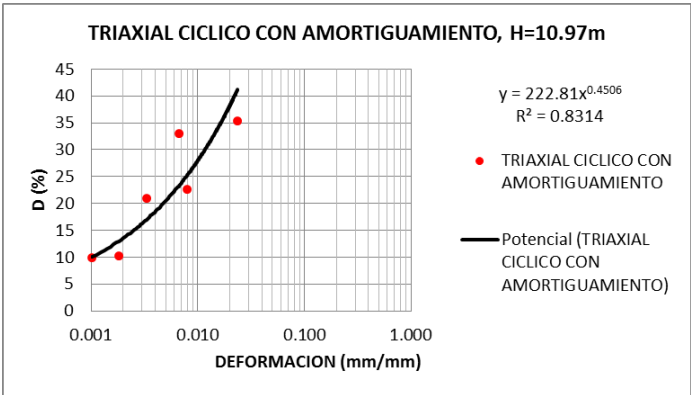
La curva realizada con los resultados de E/E_{MAX} , a la muestra tomada a una profundidad de 10.97m y teniendo en cuenta que las curvas de variación del módulo de corte, de acuerdo a lo observado por Rodríguez et al., (2007), con la deformación “son iguales a las del módulo E, considerando que la relación de Poisson o la relación entre el módulo de corte y el de compresibilidad volumétrica son constantes para la muestra durante la prueba”. De acuerdo a la premisa anterior es válido realizar las curvas con este criterio. De otra parte, Las condiciones reales en el terreno, tienen una condición K_0 , mientras que las condiciones de ensayo son de consolidación isotrópica, también existen condiciones en la tasa de carga y el número de ciclos, que pueden presentar incertidumbre. La misma muestra puede afectarse debido a la manipulación y a los cambios de esfuerzos y deformaciones, inducidas durante el muestreo. Rodríguez et al., (2007).



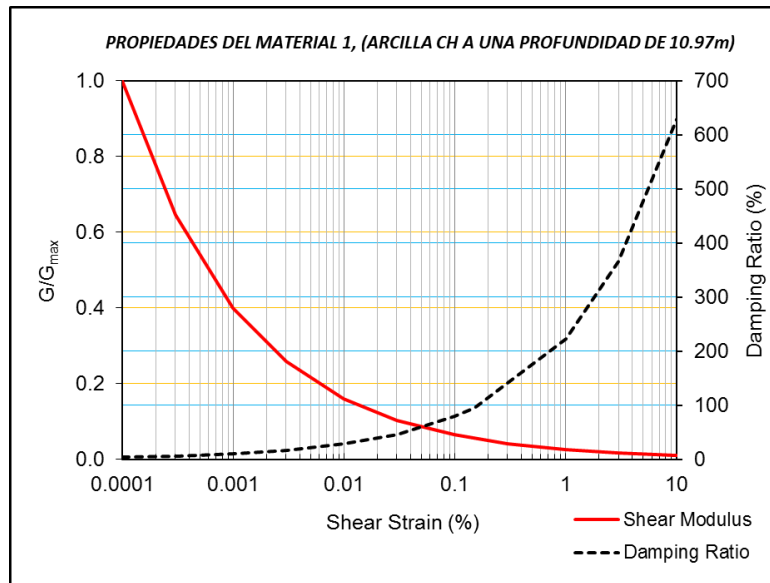
Una vez calculada la línea de tendencia, se procede a realizar una curva idealizada de E/E_{MAX} , que represente esta muestra y se realiza la gráfica siguiente:



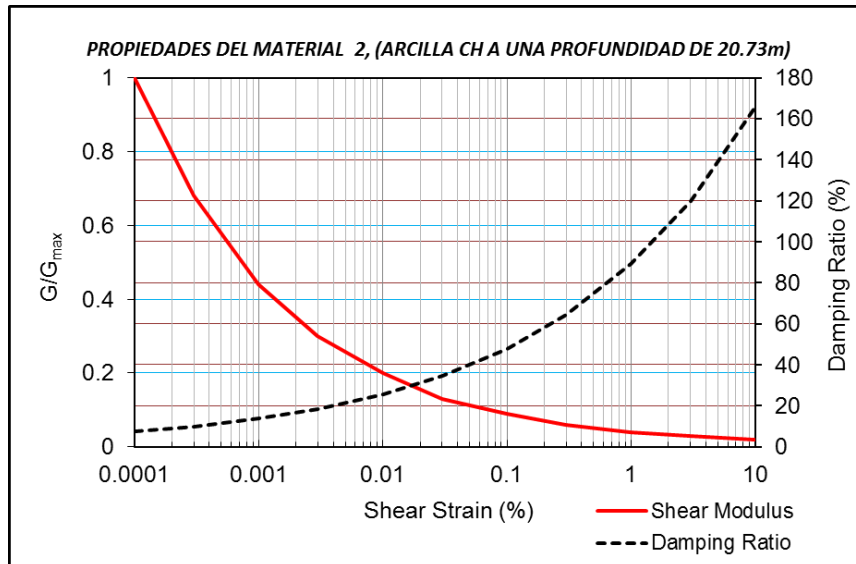
Igual ocurre con la curva de amortiguamiento a la que también se le calcula la curva de tendencia.

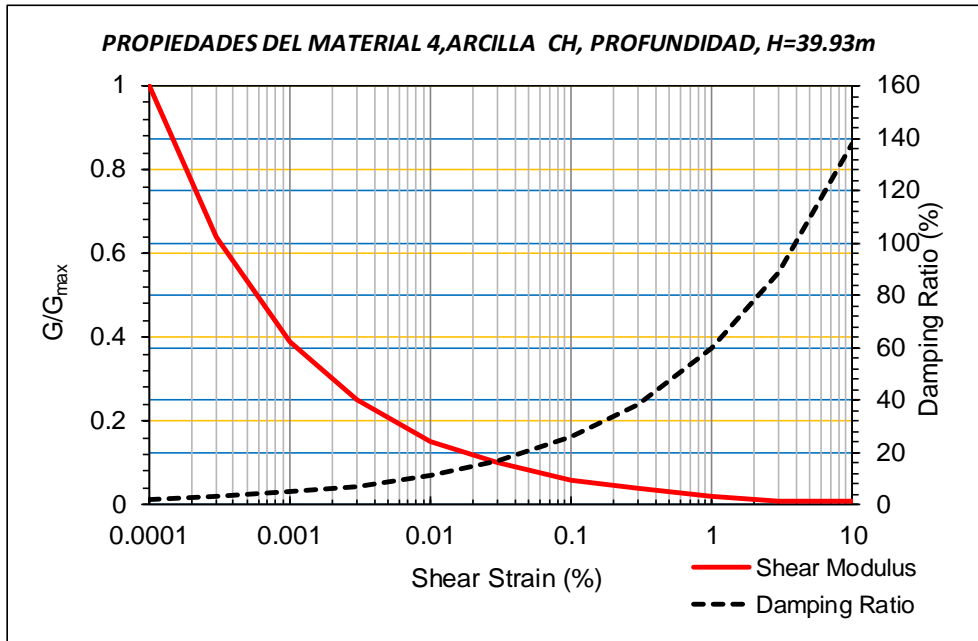
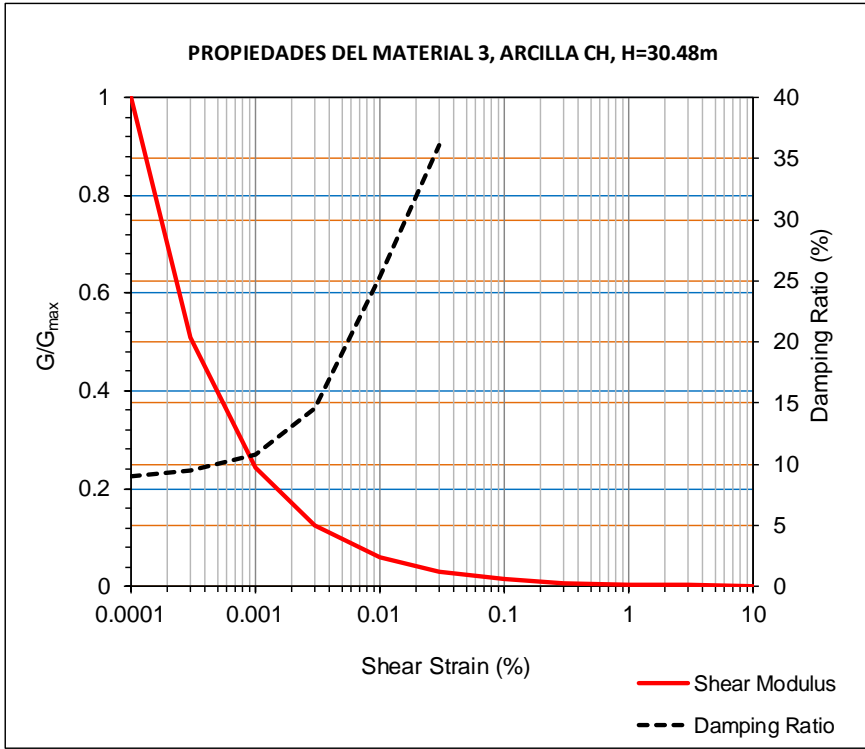


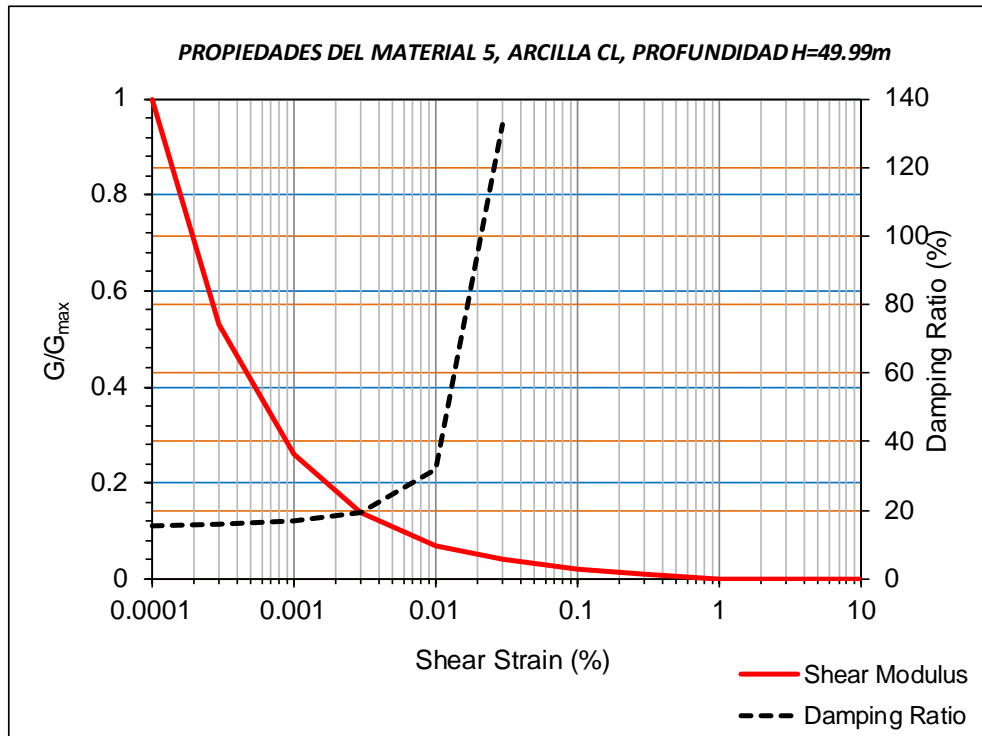
Finalmente, con estos resultados, se obtiene la curva del material, representativo a esa profundidad:



De igual manera se procede con las otras cuatro muestras y la roca. El resultado final para estos materiales a la profundidad mencionada, será:



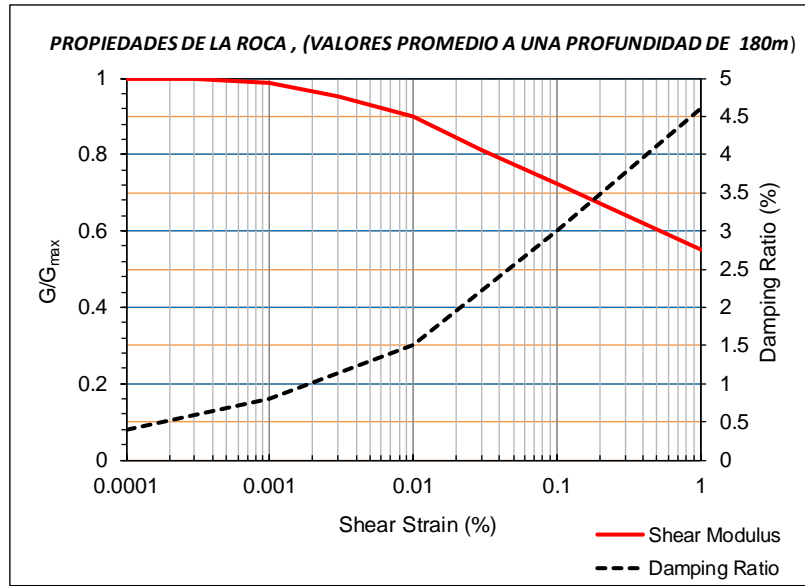




Para la caracterización de la roca, se tuvo en cuenta, lo recomendado por el INGEOMINAS, UPES y la Universidad de los Andes:

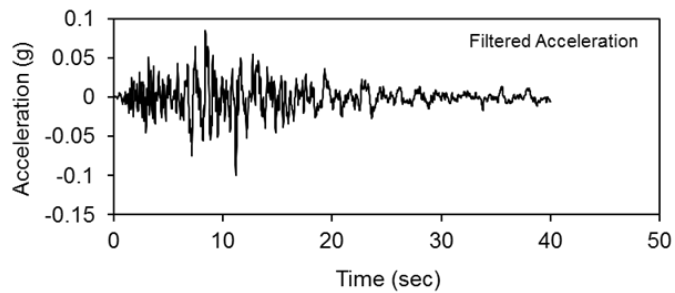
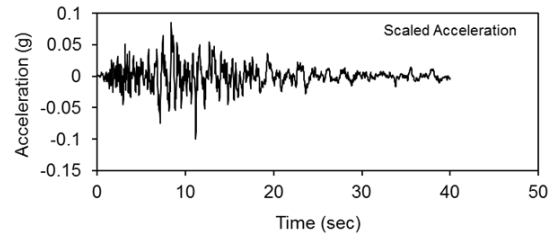
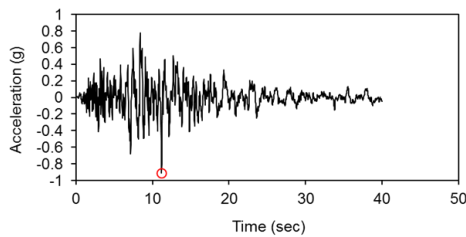
INTERFASE	SECTORES	V _p (m/s)	V _s (m/s)
Roca (Arcillolita)	Sector Norte		
Roca (Arcillolita)	Suba-Compartir	2,280/2,500	
Roca (Arcillolita)	Bosque Calderon	1,800	378
Arenas y gravas muy densas	Sector Sur	2,091	655
Roca-Arenisca	Parque Distrital del Sur	3,301	
Material arcilloso, arcillas húmedas	Sector norte y centro	1,000/1,400	120/280
Sedimentos arcillosos con contenido organico, poco compacto.	Sector Norte	130/450	70/120
Sedimentos arenosos poco compactos	Sector Sur	470/660	167/348

Fuente: INGEOMINAS, UPES, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES



Una vez obtenidas las gráficas representativas, para las 5 muestras y la roca, se procede a la aplicación del programa EERA, (Equivalent Linear Earthquake Site Response Analysis J.P. Bardet, 2000). El procedimiento que se realiza se describe a continuación:

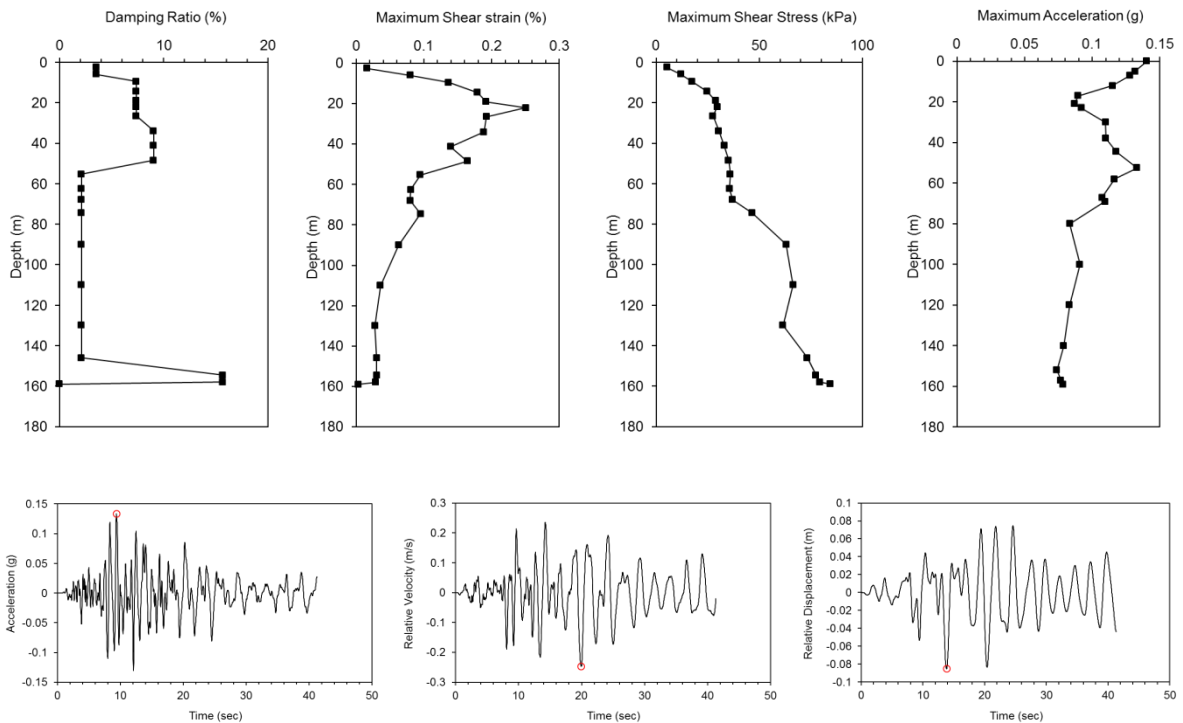
- Ingreso del acelerograma, ya filtrado, en el sentido EO, del sismo de Quetame de 2008, registrado por la estación CBOG1, (INGEOMINAS), localizada en la zona Lacustre 200 según la MZSB, decreto 523. A este acelerograma se le cortaron los primeros 10 segundos.

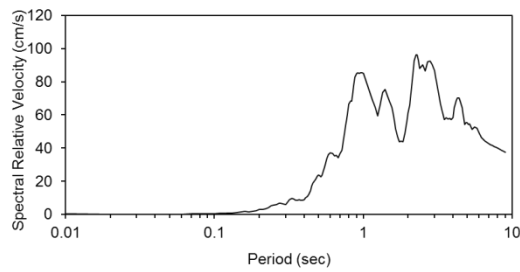
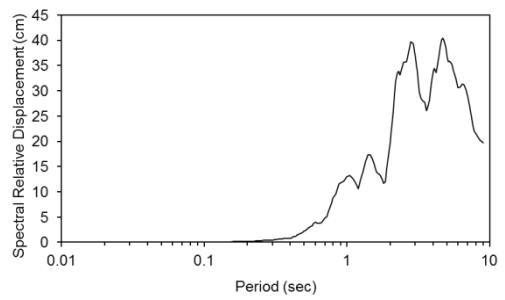
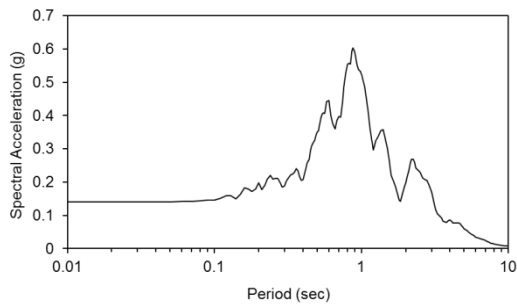
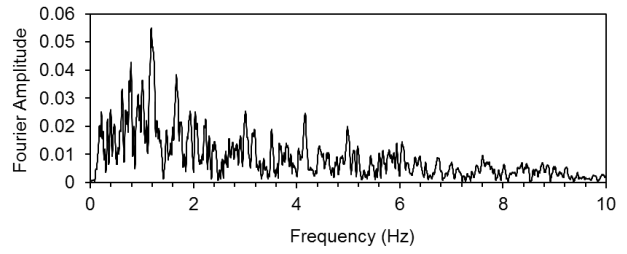
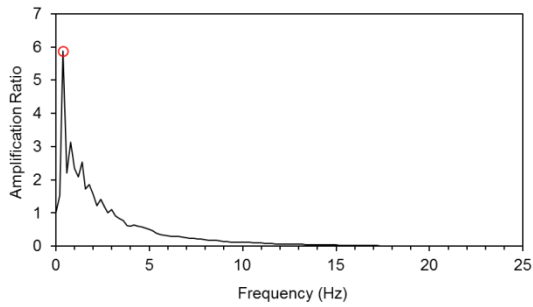
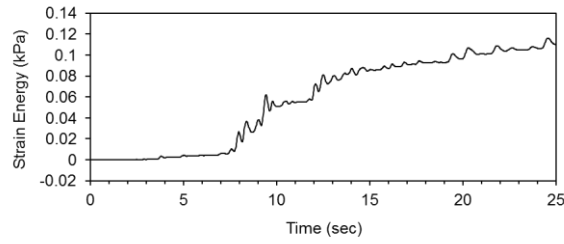
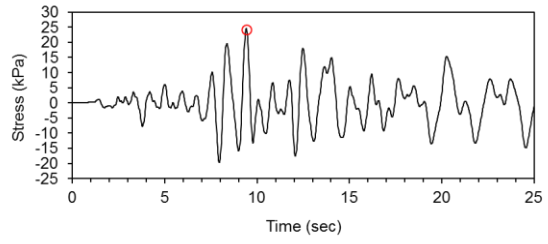
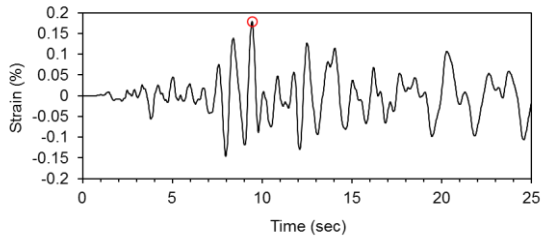


- Se establecen los estratos y la aplicación en cada uno de ellos de un material de los 5 calculados, que lo represente. A continuación se muestra la estratificación escogida:

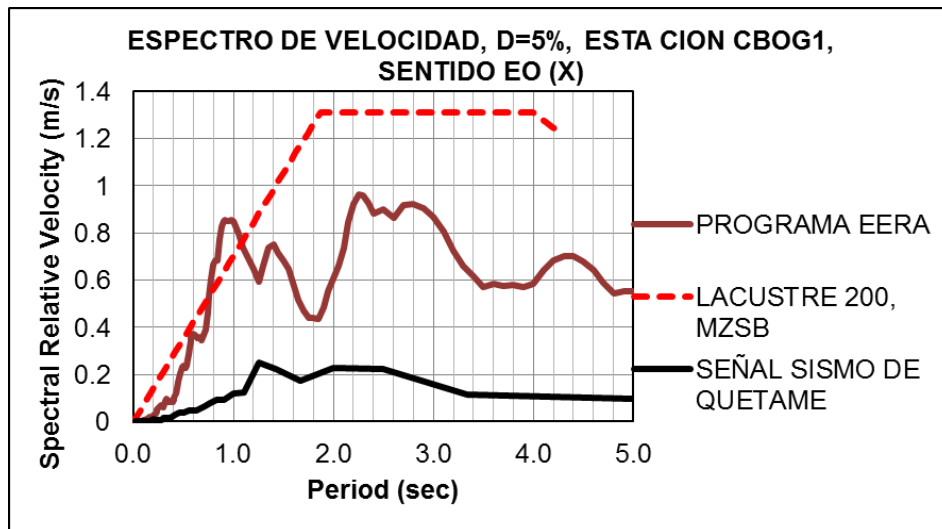
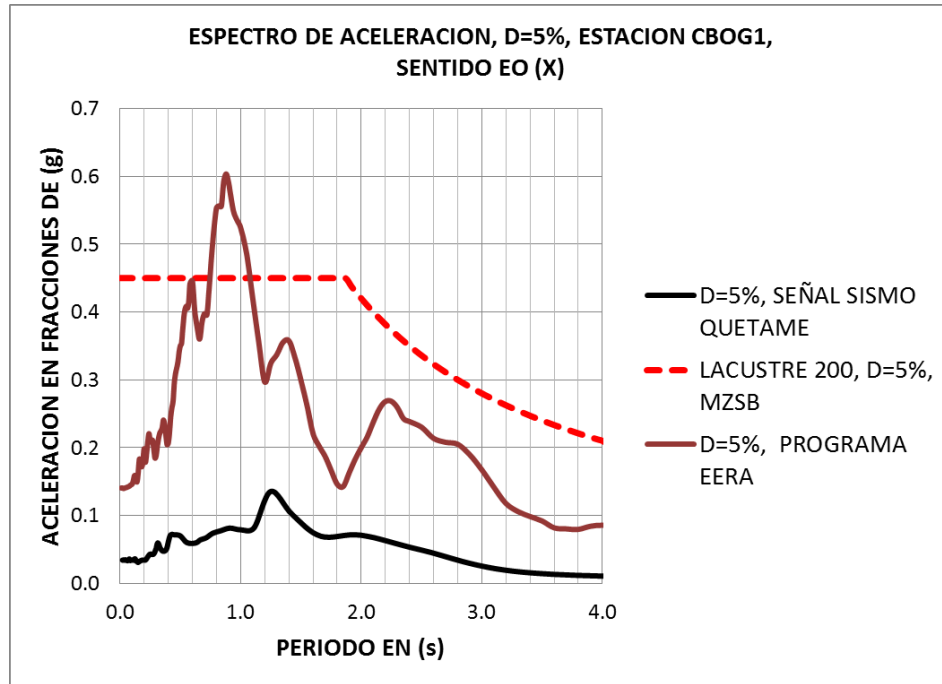
	Layer Number	Soil Material Type	Number of sublayers in layer	Thickness of layer (m)	Maximum shear modulus G_{max} (MPa)	Initial critical damping ratio (%)	Total unit weight (kN/m ³)	Shear wave velocity (m/sec)	Location and type of earthquake input motion	Location of water table	Depth at middle of layer (m)	Vertical effective stress (kPa)
Surface	1	1		5.0	32.15		15.00	145.00			2.5	37.50
	2	1		2.0	14.88		13.50	104.00		W	6.0	88.50
	3	2		5.0	12.68		13.00	97.80			9.5	109.97
	4	2		5.0	13.79		13.00	102.00			14.5	125.92
	5	2		4.0	15.03		13.00	106.50			19.0	140.28
	6	2		2.0	11.83		13.00	94.50			22.0	149.85
	7	2		7.0	14.27		14.00	100.00			26.5	167.70
	8	3		8.0	16.11		14.00	106.25			34.0	199.13
	9	3		6.5	23.63		14.00	128.67			41.3	229.51
	10	3		8.0	21.35		15.00	118.17			48.5	263.88
	11	4		5.5	37.93		15.00	157.50			55.3	298.92
	12	4		9.0	44.09		17.00	159.50			62.5	345.54
	13	4		2.0	46.61		17.00	164.00			68.0	385.09
	14	4		11.0	48.91		17.00	168.00			74.5	431.83
	15	4		20.0	100.09		17.00	240.33			90.0	543.27
	16	4		20.0	185.55		18.00	318.00			110.0	697.07
	17	4		20.0	223.49		18.00	349.00			130.0	860.87
	18	4		12.0	242.44		18.00	363.50			146.0	991.91
	19	5		5.0	256.65		18.00	374.00			154.5	1061.53
	20	5		2.0	276.74		19.00	378.00			158.0	1091.19
Bedrock	21	0		21.0	2343.53		19.00	1,100.00	Outcrop		159.0	1100.38

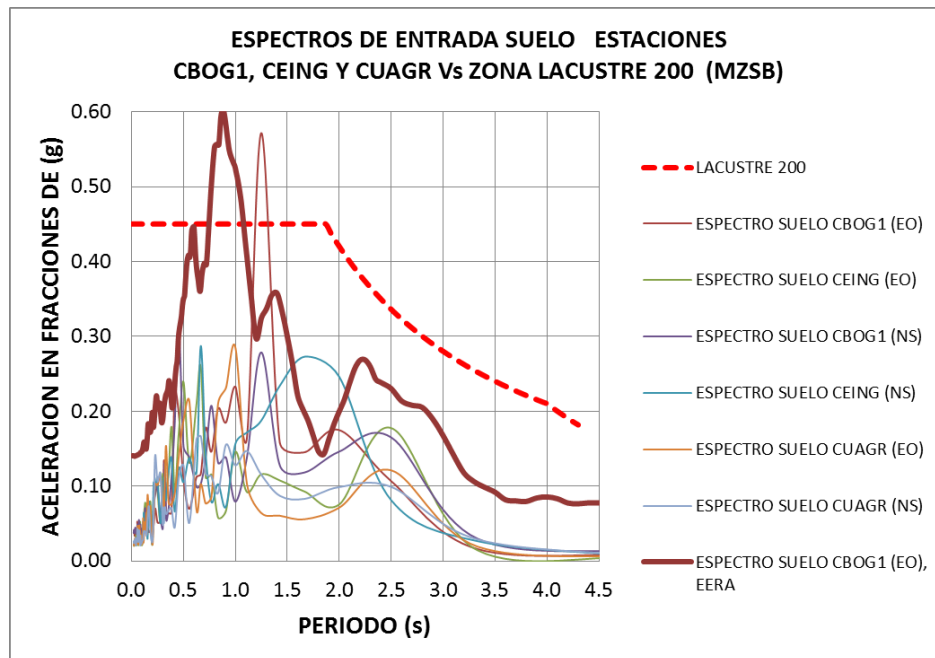
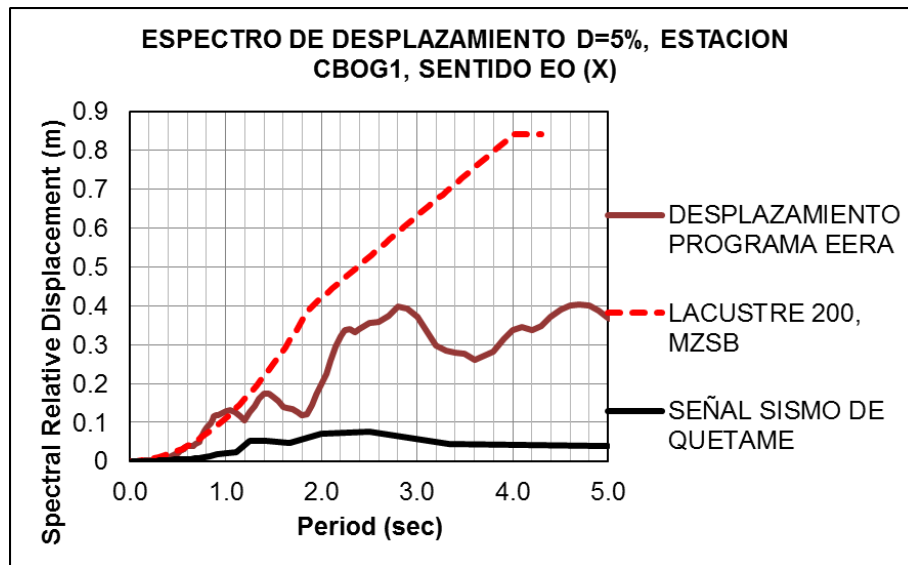
- Se corre el programa obteniendo los siguientes resultados de esfuerzos y espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento:





Si se compara el espectro de aceleraciones, velocidades y desplazamientos, obtenidos con el programa EERA y el espectro obtenido con los registros en superficie del sismo de Quetame de 2008, en la estación CBOG1 (INGEOMINAS), zona Lacustre 200, deberían coincidir ya que este es la respuesta. Al superponerlos se obtiene, para el sentido Este-Oeste:



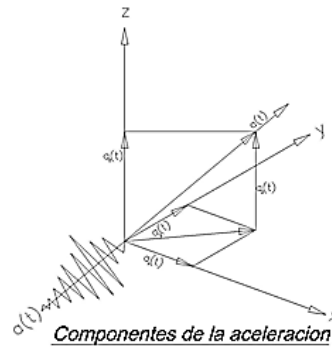


Como es obvio no concuerdan, aun cuando se grafiquen todas los registros de las estaciones que corresponden a la zona Lacustre 200, de la MSZB, Decreto 523 de 2010.

CONCLUSIONES 1

Las conclusiones a la primera parte, correspondiente a la interacción desde la roca hasta el suelo en la superficie, que es el dato de entrada, para la superestructura, son las siguientes:

- El espectro valido para esta investigación, es obviamente el de la superficie, registrado por el acelerómetro de la estación CBO1, localizado en el INGEOMINAS.
- Si se parte de la roca y se modelan los estratos hasta la superficie, de conformidad con los ensayos realizados a cada capa de suelo, era de esperarse que coincidieran o fueran muy parecidos, cosa que no ocurrió. El caso contrario, o deconvolución, cuando se realiza desde la superficie hasta la roca, con los inconvenientes encontrados en los ensayos, hace imposible realizarlos, por ahora.
- Los valores del módulo elástico y de cortante para cada uno de los ensayos difieren entre sí, la fluctuación es muy importante.
- No se disponen de datos experimentales, sobre el comportamiento de la roca y los módulos de degradación de cortante y amortiguamiento. La solución que propone la NSR-10 de convertir la velocidad horizontal en roca (en caso de disponer de esta información), en aceleraciones horizontales, dividiéndolas por 0.75m/s, en unidades de fracción de "g", artículo A.2.9.3.4 literal (b), parece ser no suficiente.
- La extracción de la muestra y la manipulación en el laboratorio, para las labores de de muestreo son especialmente críticas, (Se requieren protocolos de manipulación).
- Se debe tener un banco de datos para cada uno de los ensayos de cada capa del suelo y para todas las zonas de microzonificación. Deben valorarse estadísticamente estos resultados, para obtener curvas confiables para ser empleadas en el análisis de efectos locales del suelo y para el diseño estructural.
- Para los estudios sísmicos particulares de sitio, según el artículo A.2.10 de la NSR-10, para la ciudad de Bogotá, pueden utilizarse los espectros de superficie, calculados con el sismo de Quetame de 2008, registrados por la mayoría de las estaciones de la RAB y si se requieren sismos sintéticos, también se sugiere utilizarlos.
- Es imperativo considerar el efecto de la aceleración vertical en los diseños de cimentaciones. La afectación de esta aceleración, es más crítica en las cimentaciones superficiales de zapatas o cimientos continuos.

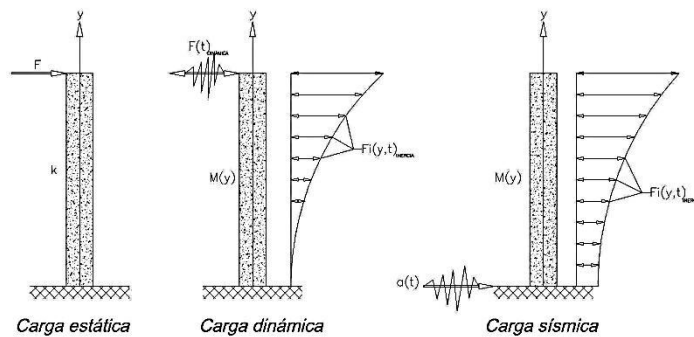


- Por último, se propone para futuros estudios, investigar sobre la posibilidad de realizar una curva unificada, desde la roca hasta la superficie del suelo. La curva según lo observado, debe ser del tipo exponencial, de la forma: $\frac{G}{G_{MAX}} = k\gamma^{-\alpha}$ en donde "K" depende de la relación de vacíos e_0 y del módulo Bulk (volumétrico); y el valor de " α ", depende de la relación de Poisson y del esfuerzo medio de confinamiento.

Hasta aquí lo referente al comportamiento del suelo, frente a los movimientos sísmicos. Se prosigue ahora con el comportamiento de la estructura, conformada por muros de cortante, frente al sismo de entrada para cada una de las zonas de la MZSB, según el Decreto 523 de 2010.

INTERACCION SUPERFICIE DEL SUELO CON LA ESTRUCTURA

En el análisis estructural se distinguen tres tipos de análisis, de los cuales únicamente es interesante, el de carga sísmica, cuyas deformaciones se presentan en la siguiente gráfica:



Fuente: "Estructuras sometidas a acciones sísmicas"
Juan M Canet, Alex Barbat, ISBN: B4-404-3213-5 (1988)

El sismo de entrada para el prototipo de la estructura, con muros de cortante, que más adelante se describirá, es el sismo de Quetame de 2008, aplicado en los sentidos Este-Oeste y Norte-Sur, del

modelo; este sismo en particular fue registrado por 27 estaciones, de la red de acelerógrafos de la ciudad de Bogotá D.C., llamada comúnmente RAB.

El sismo de Quetame de 2008, tuvo las siguientes características:

SISMO DE QUETAME CUNDINAMARCA			
MECANISMO FOCAL-PROYECTO GLOBAL CMT			
PLANO	AZIMUT	BUZAMIENTO	ESTRIA
PRINIPAL	198	83	177
SECUNDARIO	288	87	7

El DPAE, publico las estaciones de la RAB que registraron el sismo de Quetame en el 2008; el cuadro fue editado por el autor, para contener la nueva MZSB (Decreto 523 de 2010) y demás componentes, como el periodo del suelo, la aceleración máxima y la profundidad hasta la roca. El resumen se describe a continuación:

DATOS SISMO DE QUETAME-CUNDINAMARCA (2008)		
EPICENTRO:	8.6 km Al NE DE QUETAME-CUND.	
HORA:	19.20	UT
LATITUD:	4.399	°N
LONGITUD:	-73.814	°E
PROFUNDIDAD:	3.9	Km
FASE INTENSA:	15.1	S
INTENSIDAD DE ARIAS:	1.2E+00	cm/s
MAGNITUD (Richter):	5.7	ML
MAGNITUD (P.G.-CMT):	5.9	M _w
CANAL DE REGISTRO:	1	
FILTRO A:	BUTTERWORTH ORDEN 6, PASA BANDA	
ESTACIONES DE LA RAB QUE REGISTRARON:	27	



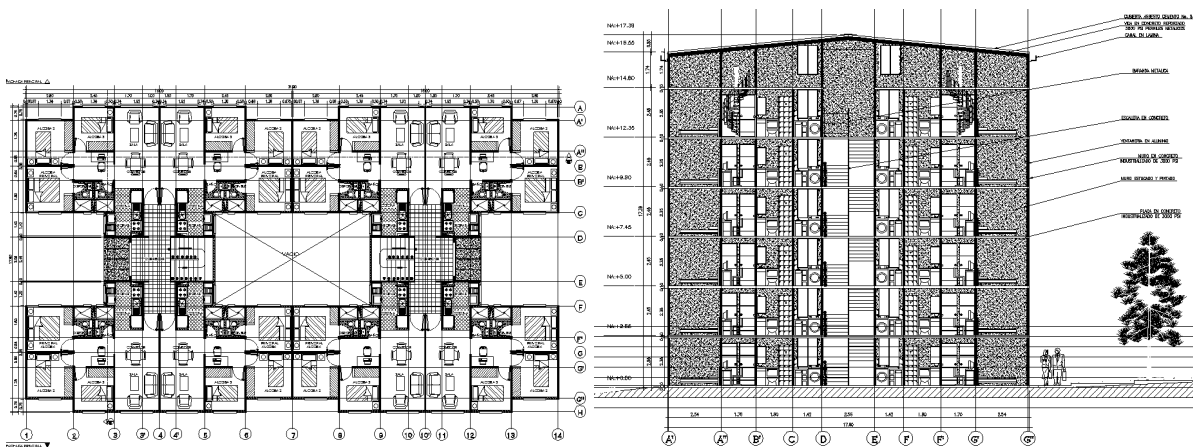
Proyección estereográfica del mecanismo focal, calculado por el Proyecto Global CMT, (Color rojo en compresión y blanco en dilatación), Quetame-Cundinamarca, 2008-INGEOMINAS

MICROZONIFICACION SISMICA, DECRETOS 523 DE 2010, PARA LAS ESTACIONES DE LA RAB, QUE REGISTRARON EL SISMO QUETAME-CUNDINAMARCA- 2008

No.	CÓDIGO	NOMBRE DE LA ESTACION	ZONA MZSB-10	DOWN HOLE m	EPICENTRO Km	HIPOCENTRO Km	I. ARIAS cm/s	FASE INTENSA s	Amax cm/s ²	PERIODO FUND. s	PROF. DEPOSITO m	Vs ₁ m/s	Vs ₂ m/s
1	CEING	E. COL. DE INGENIERÍA	Lacustre-200		49.3	49.5	5.1	46.2	24.8	1.95	110	226	0
2	CUSAL	UNIVERSIDAD DE LA SALLE	Lacustre-50		46.3	46.4	1.1	28.6	14	0.65	30	185	0
3	CBOSA	COL. FERNANDO MAZUERA	Aluvial-100		47.7	47.9	1.7	21.9	25.2	0.95	70	295	0
4	CCORP	UNIVERSIDAD CORPAS	Lacustre-300		49.9	50.1	2.2	69.8	16	2.7	220	326	0
5	CUAGR	UNIAGRARIA	Lacustre-200	130	46.5	46.7	3.7	44.5	25.6	2.2	130	236	249
6	CPSUB	ACADEMIA DE POLICÍA	Piedemonte		46.5	46.7	3.7	44.5	25.6	2.2	130	236	249
7	CUSAQ	COL. ESCOLAR DE USAQUEN	Piedemonte A		41.6	41.8	8.2	36.4	39.7	0.45	30	267	0
8	CESCA	ESCUELA DE CABALLERÍA	Cerros		39	39.2	0.67	17.4	14.2	0.3	0	0	0
9	CBANC	BANCO DE LA REPUBLICA	Lacustre-50		45	45.2	0.71	26.1	14.3	1.05	60	229	0
10	CTVCA	T.V. CABLE	Cerros		45.8	46	0.67	23.5	18.5	0.25	0	0	0
11	CFLOD	PARQUE LA FLORIDA	Lacustre-500		51.8	52	2.7	52.9	18.5	4.25	500	471	0
12	CAVIA	AVIANCA	Lacustre-500		44.2	44.4	3.6	50.3	28.1	2.95	300	407	0
13	CFONT	PTA DE BOMBEO FONTIBON	Aluvial-300		46.8	47	2.8	62.3	17	3.2	270	338	0
14	CNIÑO	C. DE ESTUDIOS DEL NIÑO	Lacustre-300		44.9	45.1	6.1	31.6	26.6	2.45	220	359	0
15	CIABO	JARDÍN BOTÁNICO	Lacustre-300		43.3	43.5	5	32.6	33.3	2.9	260	359	0
16	CBART	COLEGIO SAN BARTOLOMÉ	Deposito ladera		36.3	37.7	0.73	17.1	24.7	0.3	0	0	0
17	CUNMA	U. MANUELA BELTRÁN	Deposito ladera		37.1	37.3	4.3	15.8	49.4	0.2	10	0	0
18	CDIOS	HOSPITAL SAN JUAN DE DIOS	Piedemonte		37.1	37.3	4.3	15.8	49.4	0.2	10	0	0
19	CCITE	CITEC	Lacustre-Aluv-300		42	42.2	2.5	40.6	24.9	1.8	200	444	0
20	CTIEM	CLUB EL TIEMPO	Lacustre-500		49.7	49.9	2.8	32.6	26.8	3.25	375	462	0
21	CTIMI	PARQUE TIMIZA	Aluvial-200		43.6	43.8	1.3	36.1	15.7	1.65	160	388	0
22	CTUNA	PARQUE TUNAL	Aluvial-100		40	40.2	1.5	25.2	21.4	0.9	80	356	0
23	CARTI	ESCUELA DE ARTILLERÍA	Piedemonte		40	40.2	1.5	25.2	21.4	0.9	80	356	0
24	CMARI	BOMBEROS MARICHUELA	Deposito ladera		35.8	36	6.4	19.8	46.5	0.4	25	300	0
25	CSMOR	COLEGIO SIERRA MORENA	Cerros		43.4	43.6	0.23	20.1	9	0.3	0	0	0
26	CTEJE	ESCUELA DE TEJEDORES	Aluvial-200		39.1	39.3	3.5	14.1	33.5	0.85	80	376	0
27	CVITE	TANQUES DE VITELMA	Deposito ladera		34.5	34.7	1.4	15.1	26.3	0.15	0	0	0
28	CLAGO	COLEGIO LAUREANO GÓMEZ	Lacustre-300		34.5	34.7	1.4	15.1	26.3	0.15	0	0	0
29	CGRAL	ESCUELA GENERAL SANTANDER	Aluvial-200	100	40.6	40.8	1.6	35.9	18.5	1.1	100	364	334
30	CKEN	COL-KENNEDY	Aluvial-300		47.9	48	1.5	43.4	17.7	1.65	220	533	0
31	CBOG1	INGEOMINAS	Lacustre-200	180	39.5	39.7	7.3	29.6	37.3	2.1	180	343	368
32	CBOG2	GAVIOTAS (INGEOMINAS)	Deposito ladera		39.5	39.7	7.3	29.6	37.3	2.1	180	343	368
33	CREAC	REACTOR (INGEOMINAS)	Lacustre-300		39.5	39.7	7.3	29.6	37.3	2.1	180	343	368

FUENTE: ELABORACION PROPIA, CON DATOS TOMADOS DEL DPAA

El edificio estudiado, consta de 8 apartamentos por piso, con áreas individuales de 50m² y alturas de entrepiso de 2.35m, con losas de piso de 10cm. La planta y corte son:

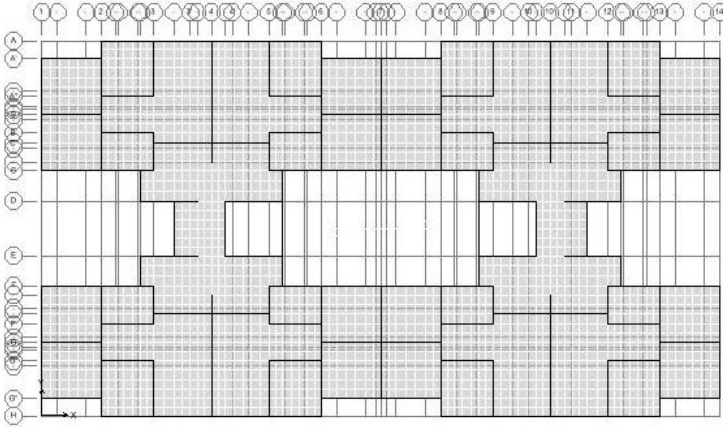


Fuente: M&H Ingenieros S.A., planta típica de apartamentos

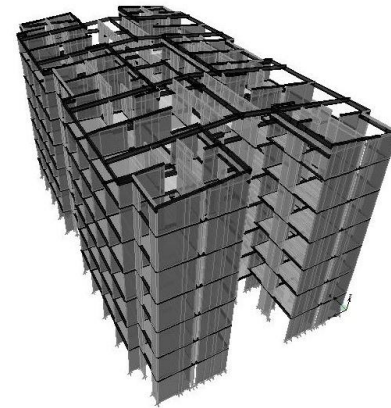
Fuente: M&H Ingenieros S.A., corte típica de edificios

El sistema estructural, como se mencionó, está conformado por muros de concreto de espesor 10cm, distribuidos en las dos direcciones y no son iguales en cantidad, debido a esto, la rigidez del edificio en un sentido es diferente al otro. Las alturas para modelación se tomaron de 2.45m,

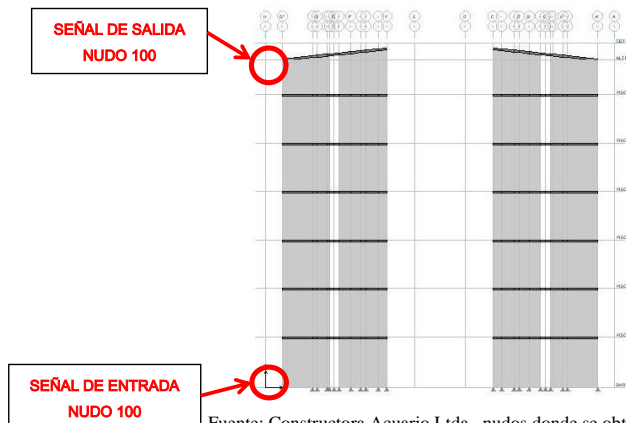
medidas hasta el borde superior de la losa. El concreto utilizado es de, $f'c=21\text{MPa}$ y el modulo elástico, $E=17,872\text{ MPa}$, la relación de Poisson, $\mu=0.20$ y el acero de refuerzo, $Fy=420\text{MPa}$. Los diafragmas son losas de concreto macizas de 10cm de espesor y resistencia, $f'c=21\text{MPa}$.



Fuente: Constructora Acuario Ltda., planta típica de muros estructurales.



Fuente: Constructora Acuario Ltda., axonometría de la edificación.



Fuente: Constructora Acuario Ltda., nudos donde se obtendrán

Los espectros de entrada y salida, para cada estación de la R.A.B

No. PISO	MASA DE PISO (Mg)	ALTURA DE PISO h_x (m)
NIVEL +14.80	114.70	2.45
NIVEL +12.35	273.30	2.45
NIVEL +9.90	273.30	2.45
NIVEL +7.45	273.30	2.45
NIVEL +5.00	273.30	2.45
NIVEL+2.55	272.10	2.55
$\Sigma =$	1,480.00	14.80

Tabla 5, Masas de diafragmas y altura de pisos. Fuente: Elaboración propia.

El periodo, con base en la NSR-10, se estimó en $T= 0.83s$, el coeficiente de capacidad de disipación de energía básico es $R=4$, para muros de concreto DMO. Del análisis modal espectral del edificio, elaborado con el programa ETABS, se hallaron las propiedades físicas del edificio, presentadas en la tabla 5.1, iguales para todos los modelos utilizados y para todas las estaciones del estudio, (Son las invariantes de la estructura).

MODE NUMBER	PERIOD (TIME)	FREQUENCY (CYCLES/TIME)	CIRCULAR FREQ (RADIANS/TIME)
Mode 1	0.32	3.11	19.54
Mode 2	0.31	3.21	20.14
Mode 3	0.30	3.34	20.97
Mode 4	0.15	6.79	42.68
Mode 5	0.11	8.73	54.85
Mode 6	0.11	8.93	56.09
Mode 7	0.11	8.97	56.36
Mode 8	0.10	9.68	60.85
Mode 9	0.10	10.11	63.53
Mode 10	0.09	11.74	73.74
Mode 11	0.08	11.85	74.43
Mode 12	0.08	12.71	79.86
Mode 13	0.06	16.13	101.33
Mode 14	0.06	17.95	112.79
Mode 15	0.04	23.36	146.78
Mode 16	0.04	26.10	164.00
Mode 17	0.02	42.35	266.10
Mode 18	0.02	48.04	301.84

Tabla 5.1, Periodos y frecuencias de la estructura. Fuente: Datos de salida ETABS.

LEVEL	NAME	MASS Mg	ORDINATE-X CM	ORDINATE-Y CM	ORDINATE-X CR	ORDINATE-Y CR
PISO 6	ALTILLO	114.70	13.32	7.07	15.74	8.62
PISO 5	PISO5	273.30	15.90	8.74	15.91	8.74
PISO 4	PISO4	273.30	15.90	8.74	15.90	8.74
PISO 3	PISO3	273.30	15.90	8.74	15.89	8.74
PISO 2	PISO2	273.30	15.90	8.74	15.89	8.74
PISO 1	PISO1	272.10	15.90	8.74	15.90	8.74

Medidas en m.

Tabla 5.2, Centros de masa y rigidez de la estructura. Fuente: Datos de salida ETABS.

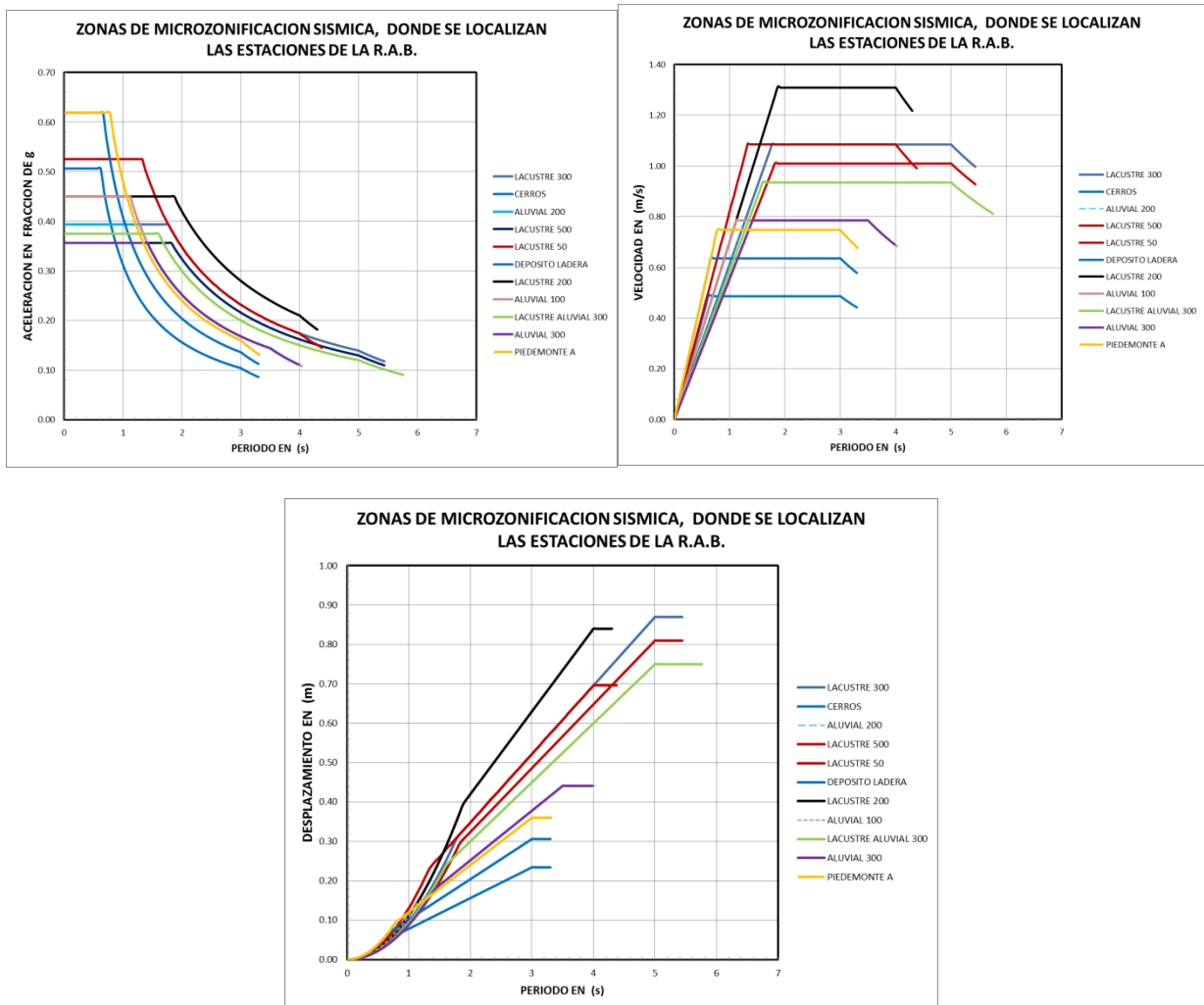
Metodología utilizada para obtener los resultados esperados:

- Se ingresa al programa la geometría de la estructura, los materiales, las secciones típicas, las cargas muertas, vivas y las hipótesis de carga.
- Para cada estación que registró el sismo de Quetame de 2008, utilizando las coordenadas geográficas, se le asignó una zona de microzonificación de conformidad a las establecidas por la MZSB-2010, (Decreto 523 de 2010).
- En el programa ETABS, se ingresa el espectro de aceleraciones, para utilizar el análisis «Response Spectrum Functions»; y los acelerogramas registrados por cada estación, ya filtrados, correspondientes a las direcciones Este-Oeste y Norte-Sur, suministradas por el FOPAE, para utilizar el análisis «Time History Functions».

Los resultados del análisis se organizan de acuerdo a lo siguiente:

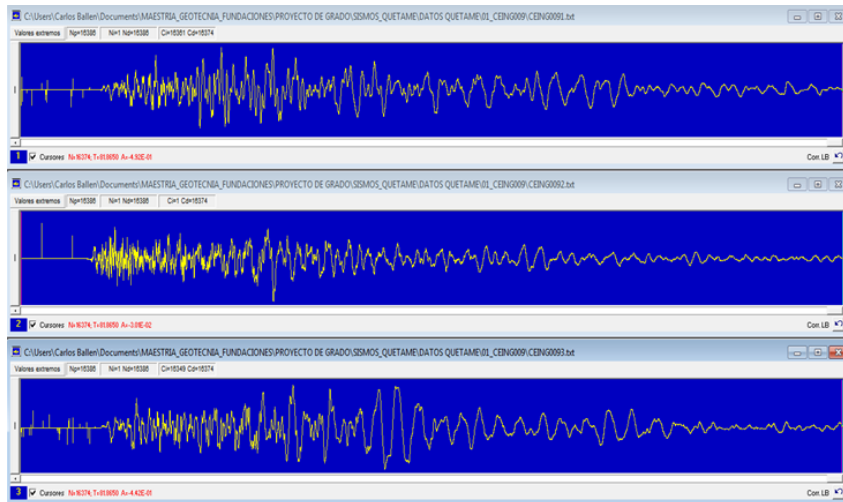
- Los datos de salida se ordenan y se grafican las fuerzas horizontales, normalizadas por los dos métodos de análisis mencionados, de igual forma los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento.
- Se comparan los resultados obtenidos con los fijados por el Decreto 523 de 2010.
- Se comparan los resultados entre los métodos de análisis de Response Spectrum y Time History.

Los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento, utilizados como datos de entrada al programa ETABS, para el análisis “Response Spectrum Functions”, son los siguientes:

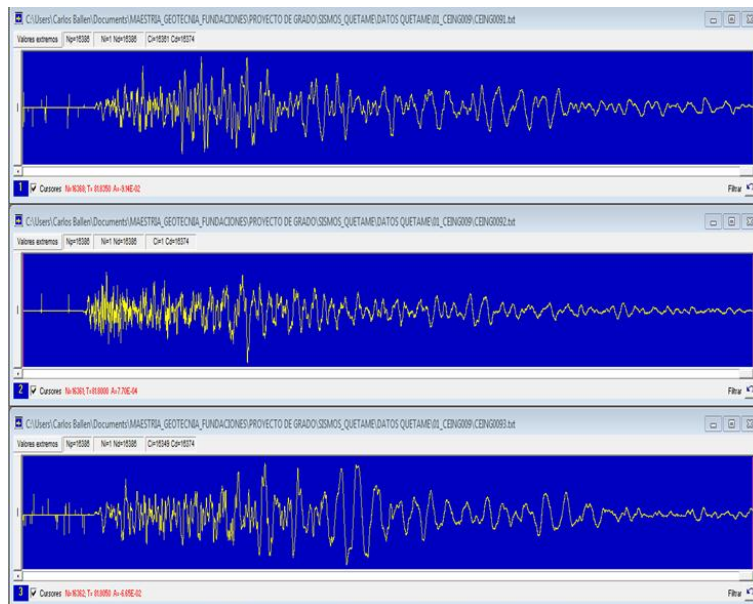


El registro Acelero gráfico, del sismo de Quetame, por ejemplo, para la aplicación de “Time History Functions”, en el programa ETABS, para el edificio localizado en la estación CEING, (Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito), para los sentidos E-O y NS son:

ANALISIS DE LOS ACELEROGRAMAS DEL SISMO DE QUETAME, REGISTRADOS POR LA R.A.B. ESTACION ESCUELA DE INGENIERIA-CEING-LACUSTRE 150, H=110m Av. 13 N°205-59



Fuente: Autor, ACELEROGRAMA ESTACION CEING, SISMO QUETAME 2008, EO (1), V (2) Y NS (3) CON CORRECCION DE LINEA BASE



Fuente: Autor, ACELEROGRAMA ESTACION CEING, SISMO QUETAME 2008, EO (1), V (2) Y NS (3), CON FILTRO PASABANDA DE ORDEN 6 (0.25 A 0.50Hz)

Este proceso se repitió, para cada una de las estaciones que registraron el sismo de Quetame. Para ubicar las estaciones, en las zonas establecidas por el Decreto 523 de 2010, sobre la microzonificación sísmica de Bogotá, se utilizaron las coordenadas de cada lugar y mediante el programa SIRE, (FOPAE e INGEOMINAS), se halló la zona sísmica correspondiente.

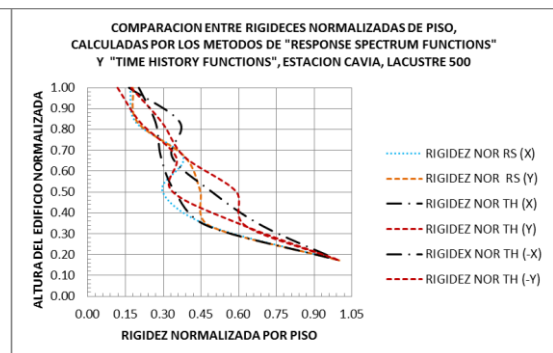
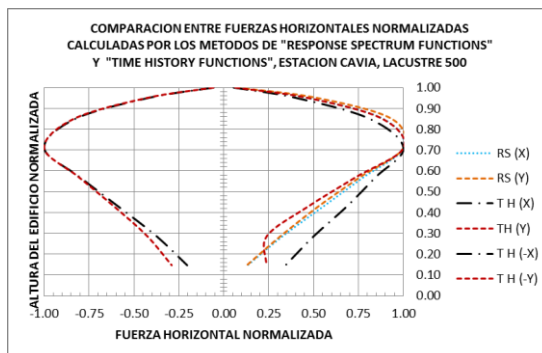
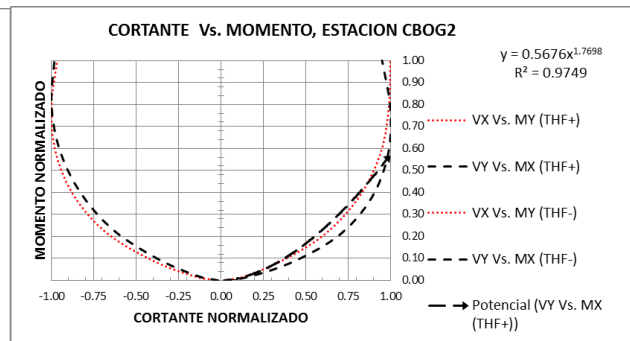
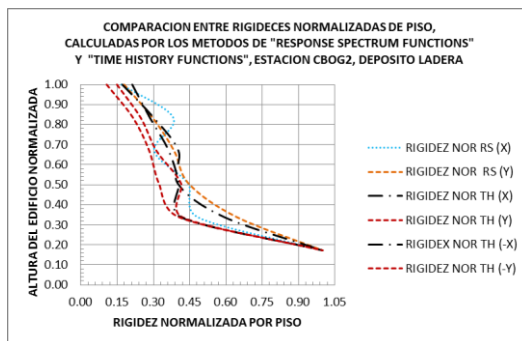
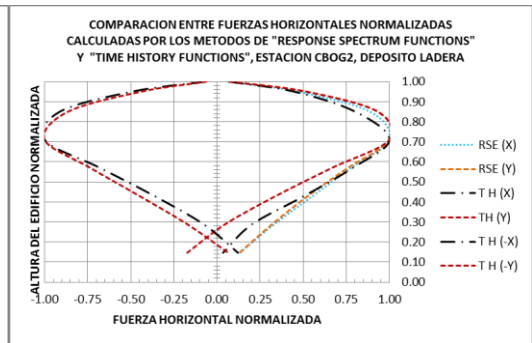
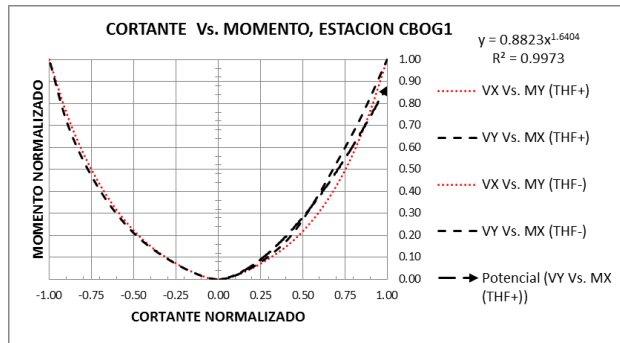
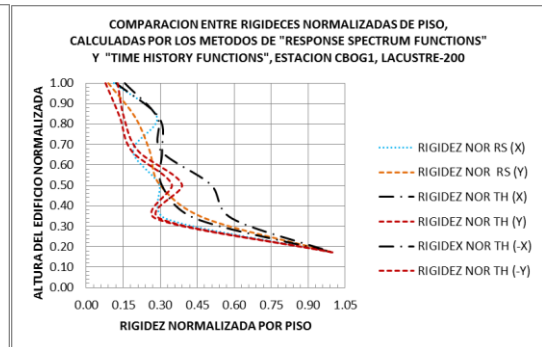
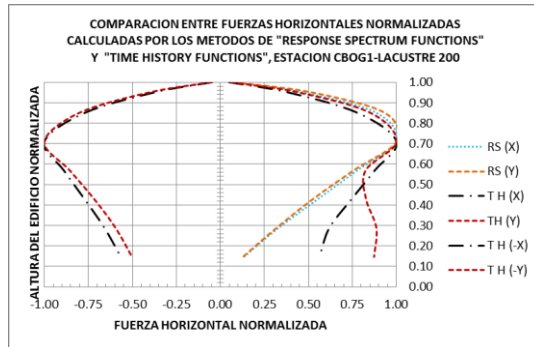
ESTACIONES DE LA RAB, QUE REGISTRARON EL SISMO DE QUETAME (CUNDINAMARCA), EL 24 DE MAYO DE 2008 A LAS 14:20 HORAS, DE MAGNITUD 5.7 ML Y PROFUNDIDAD SUPERFICIAL							
Nº	NOMBRE DE LA ESTACION	CODIGO	LAT N (°)	LONG E (°)	DIRECCION	ZONA SISMICA	LOCALIDAD
1	ESCUELA DE INGENIERIA	CEING	4.7833	-74.0458	Av 13 No. 205 - 59	LACUSTRE-200	11 SUBA
2	UNIVERSIDAD DE LA SALLE	CUSALL	4.7559	-74.0264	Cr 7 No. 172 - 85	LACUSTRE-50	1 USAQUEN
3	COLEGIO FERNANDO MAZUERA	CBOSA	4.6066	-74.192	Ci 68A Sur No. 87D - 09	ALUVIAL-100	7 BOSA
4	UNIVERSIDAD CORPAS	CCORP	4.7617	-74.094	Av Corpas, Km. 3, Vía Suba	LACUSTRE-300	11 SUBA
5	UNIVERSIDAD AGRARIA	CUAGR	4.7542	-74.0527	Ci 170 No. 50 - 90	LACUSTRE-200	11 SUBA
7	COLONIA ESCOLAR DE USAQUEN	CUSAQ	4.7064	-74.0332	Ci 127 No. 12A - 20	PIEDEMONTA	1 USAQUEN
8	ESCUELA DE CABALLERIA	CESCA	4.6822	-74.0332	Cr 7 con Ci 106	CERROS	1 USAQUEN
9	BANCO DE LA REPÚBLICA	CBANC	4.7085	-74.0791	Cr 57 No. 120 - 01	LACUSTRE-50	11 SUBA
10	T.V. CABLE	CTVCA	4.7181	-74.0848	Dg 120 No. 86 - 75	CERROS	11 SUBA
11	PARQUE LA FLORIDA	CFLOD	4.7295	-74.1464	Km. 3, vía Engativa- Cota	SIN IDENTIFICAR	10 ENGATIVA
12	AVIANCA	CAVIA	4.6858	-74.119	Av El Dorado No. 92 - 30	LACUSTRE-500	10 ENGATIVA
13	FONTIBÓN	CFONT	4.6607	-74.1454	Ci 13 con Cr 96	ALUVIAL-300	8 KENNEDY
14	CENTRO DE ESTUDIOS DEL NIÑO	CNIÑO	4.6962	-74.0932	Ci 71 No. 73A - 44	LACUSTRE-300	10 ENGATIVA
15	JARDÍN BOTÁNICO	CJABO	4.6665	-74.0993	Ci 57 No. 61 - 13	LACUSTRE-300	10 ENGATIVA
16	COLEGIO SAN BARTOLOME	CBART	4.6205	-74.062	Cr 5 No. 34 - 00	DEPOSITO LADERA	3 SANTA FE
17	UNIVERSIDAD MANUELA BELTRAN	CUNMA	4.6415	-74.0543	Cr 3 Este No. 60 - 50	DEPOSITO LADERA	2 CHAPINERO
19	CITEC	CCITE	4.6395	-74.1131	Cr 65B No 17A - 11	LACUSTRE ALUVIAL-300	16 PUENTE ARANDA
20	CLUB EL TIEMPO	CTIEM	4.6943	-74.1558	Ci 32 No. 125 - 01	LACUSTRE-500	9 FONTIBON
21	PARQUE TIMZA	CTIMI	4.6084	-74.1511	Dg 42 Sur No. 62 - 67	ALUVIAL-200	8 KENNEDY
22	PARQUE EL TUNAL	CTUNA	4.5753	-74.1313	Ci 48 con Av El Tunal	ALUVIAL-100	6 TUNJUELITO
24	BOMBEROS LA MARICHUELA	CMARI	4.5117	-74.1171	Cr 1A con cl 76A Bis sur	DEPOSITO LADERA	5 USME
25	COLEGIO SIERRA MORENA	CSMOR	4.5746	-74.1701	Ci 77A Sur No. 65 - 15	CERROS	19 CIUDAD BOLIVAR
26	ESCUELA DE TEJEDORES	CTEJE	4.6149	-74.0951	Cr 32 No. 12 - 55	ALUVIAL-200	16 PUENTE ARANDA
27	TANQUES DE VITELMA	CVITE	4.575	-74.0716	Ci 9 sur con Cr 9 Este	DEPOSITO LADERA	4 SAN CRISTOBAL
28	COLEGIO LAUREANO GOMEZ	CLAGO	4.718	-74.1003	CL 90A No.97-40	LACUSTRE-300	10 ENGATIVA
29	ESCUELA GENERAL SANTANDER	CGRAL	4.5881	-74.1301	Ci 44 Sur No. 45A - 15	ALUVIAL-200	6 TUNJUELITO
30	COLEGIO KENNEDY	CCKEN	4.6459	-74.1715	Ci 38 Sur No 107C - 29	ALUVIAL-300	8 KENNEDY
31	INGEOMINAS	CBOG1	4.641	-74.080		LACUSTRE-200	13 TEUSAQUILLO
32	GAVIOTAS (INGEOMINAS)	CBOG2	4.603	-74.063		DEPOSITO LADERA	17 CANDELARIA
33	REACTOR (INGEOMINAS)	CREAC	4.642	-74.095		LACUSTRE-300	13 TEUSAQUILLO

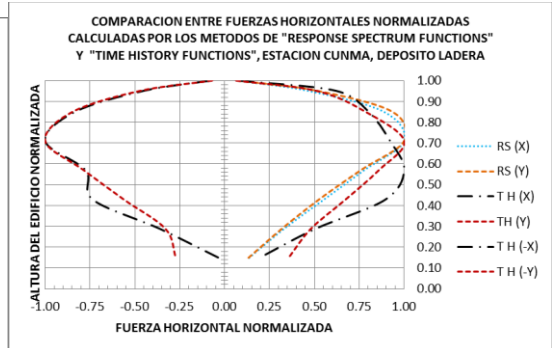
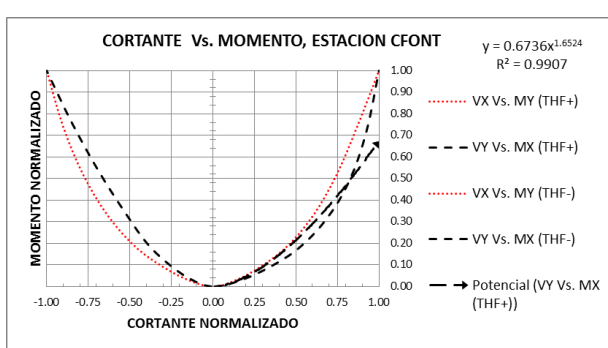
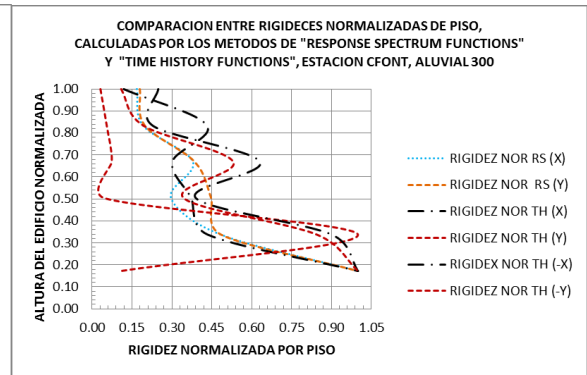
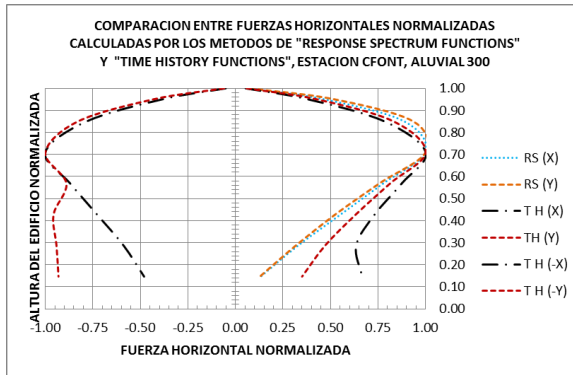
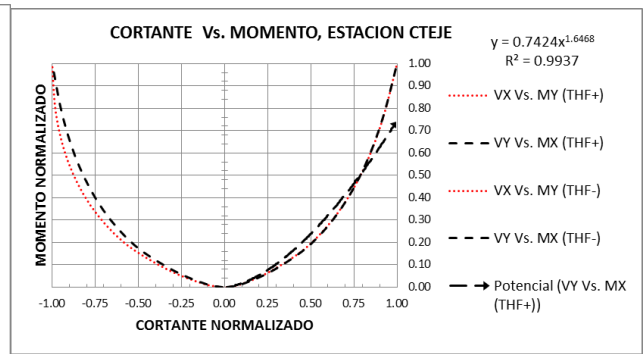
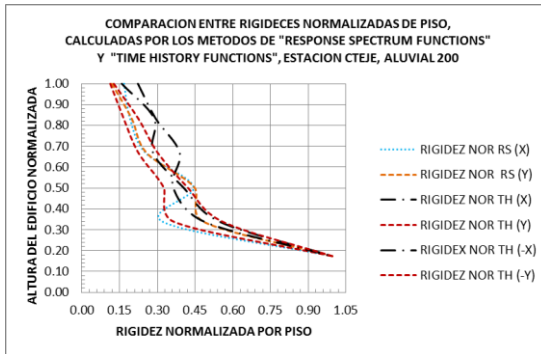
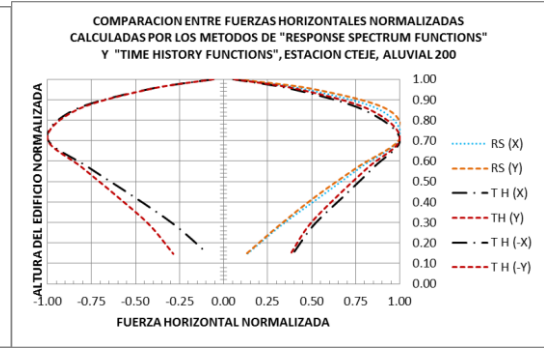
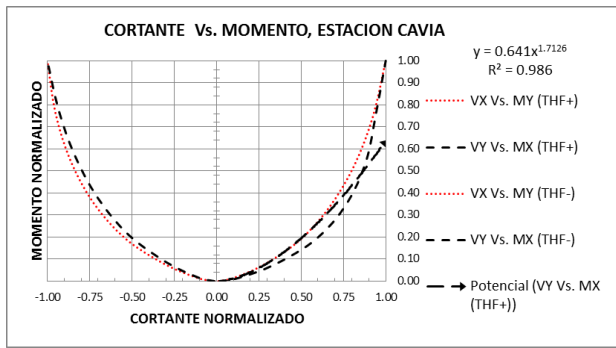
Elaborado por el autor

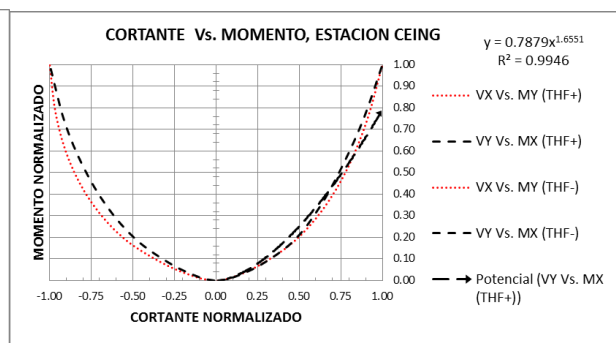
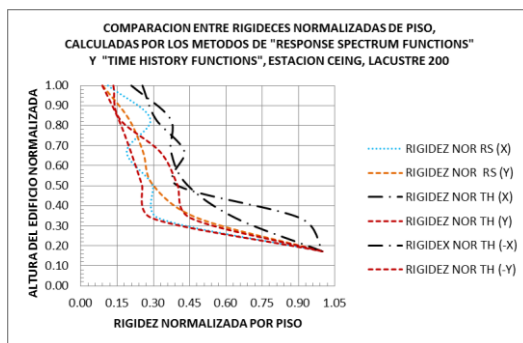
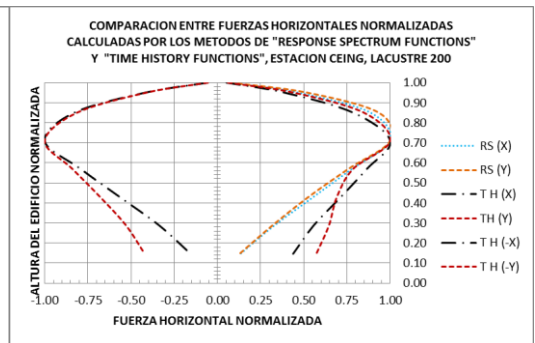
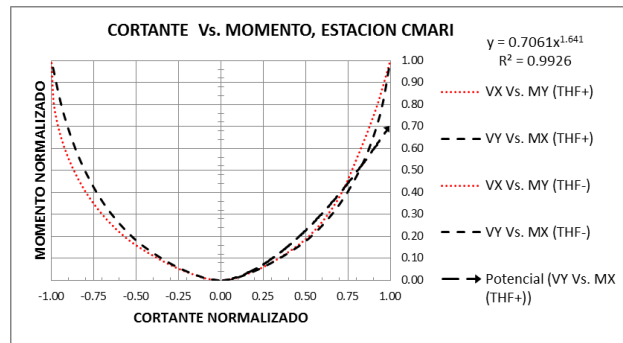
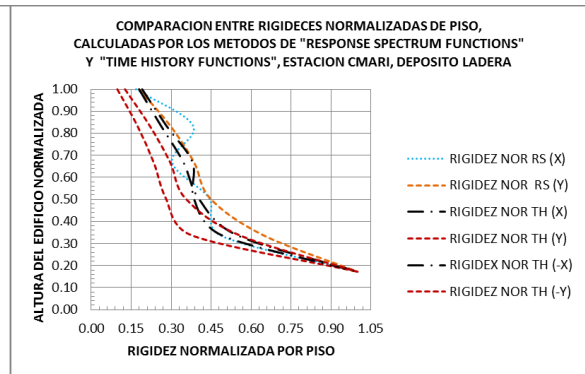
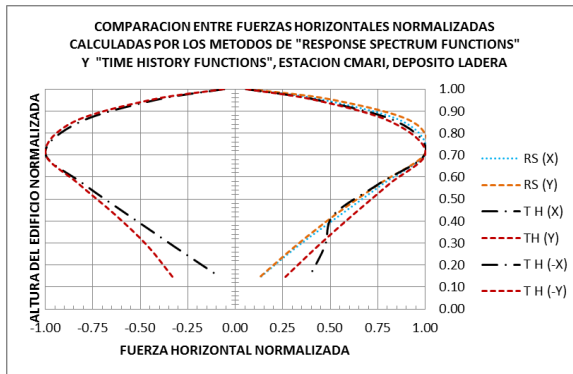
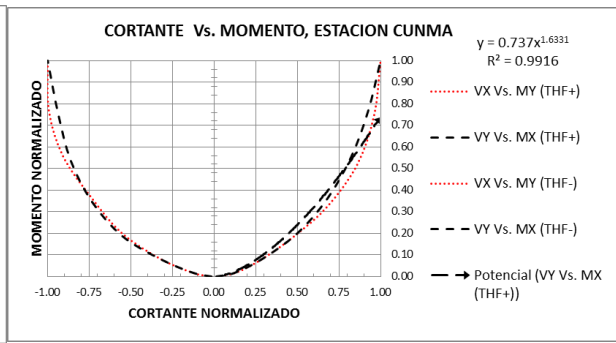
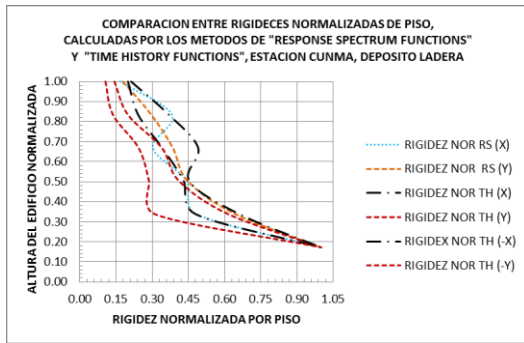
Los resultados de la modelación en ETABS, se obtuvieron para cada una de las 27 estaciones. A cada una de ellas se le realizaron tres tipos de gráficos, a saber:

- Comparación entre fuerzas horizontales normalizadas, calculadas por los métodos de "Response Spectrum Functions" y "Time History Functions". Para los sentidos EO (x) y NS (y).
- Comparación entre rigideces normalizadas de piso, calculadas por los métodos de "Response Spectrum Functions" y "Time History Functions". Para los sentidos EO (x) y NS (y).
- Cortante versus momento por el método, "Time History Functions". Para los sentidos EO (x) y NS (y).

Las gráficas, (el análisis se realizó para las 27 estaciones), que se presentan únicamente aluden a 9 estaciones, que presentan discrepancias con la MZSB, Decreto 523 de 2010. Las estaciones son: CBOG1, CBOG2, CAVIA, CTEJE, CFONT, CUNMA, CMARI y CEING.



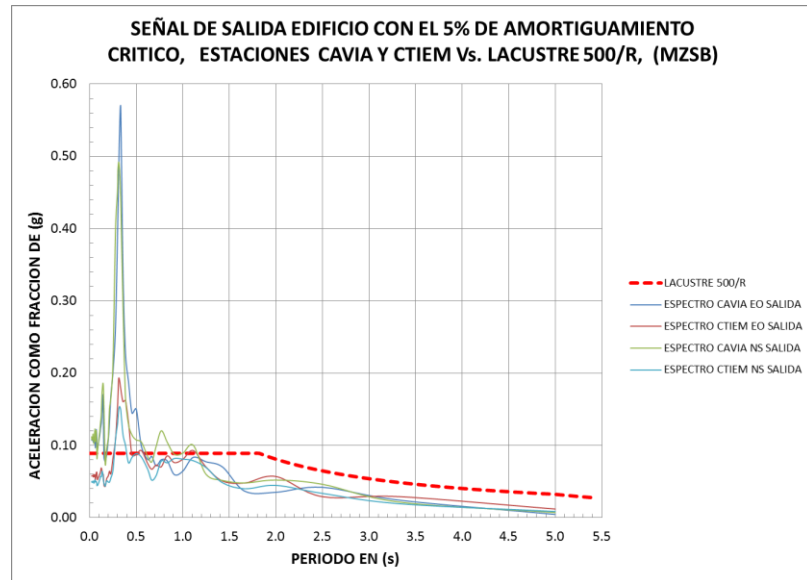
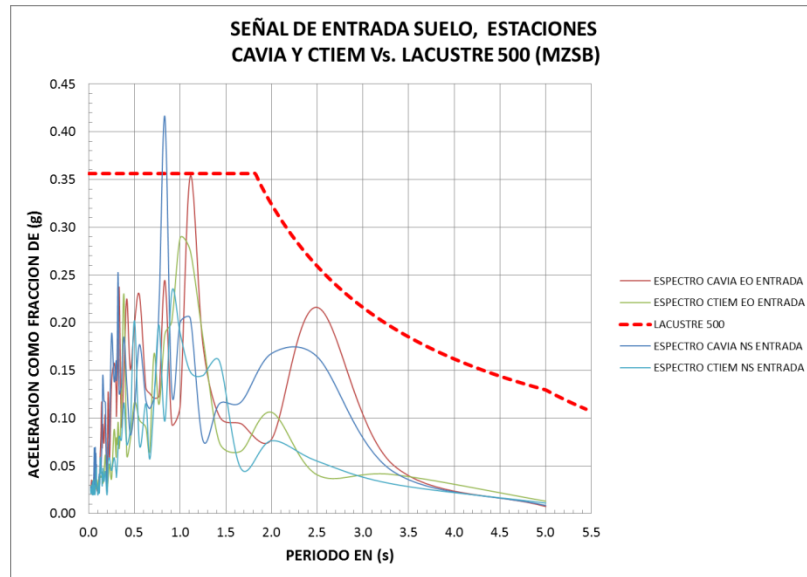


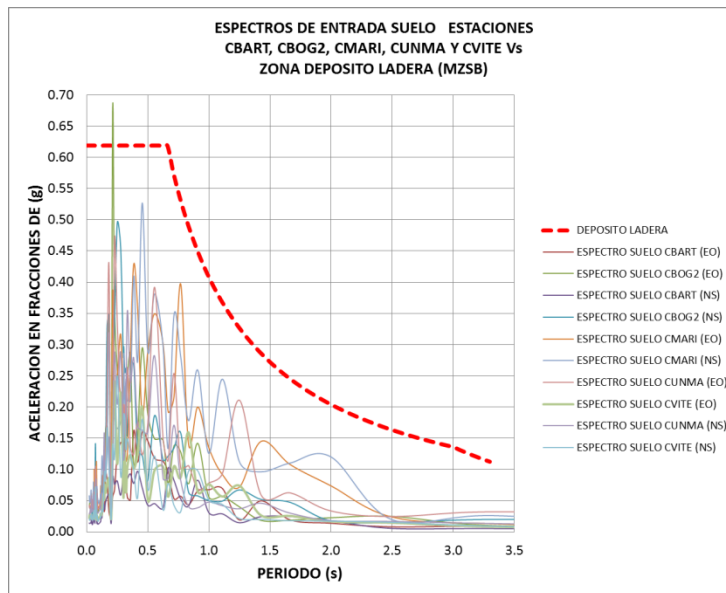
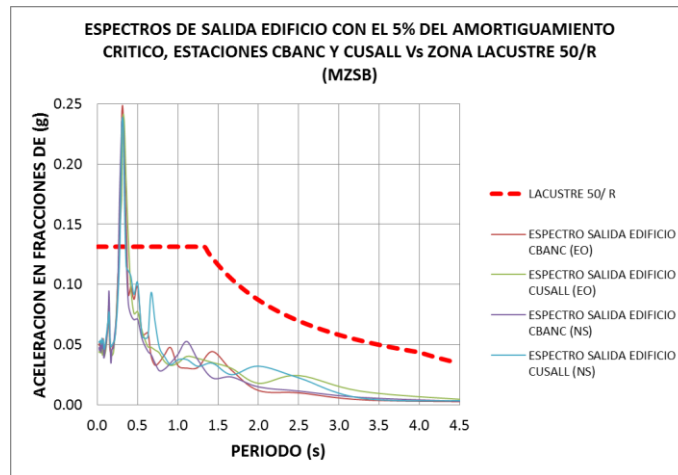
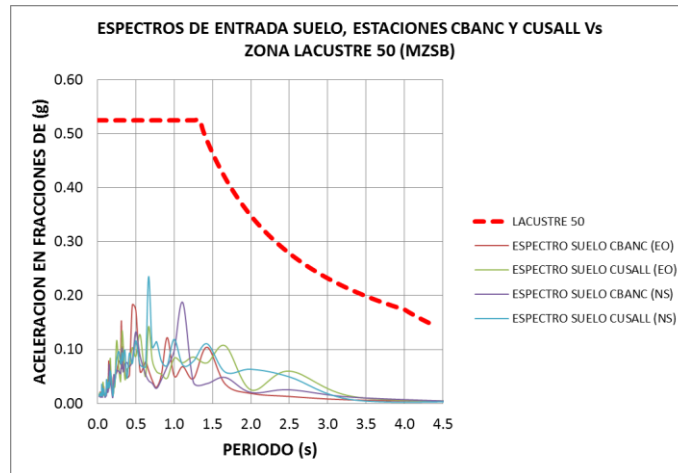


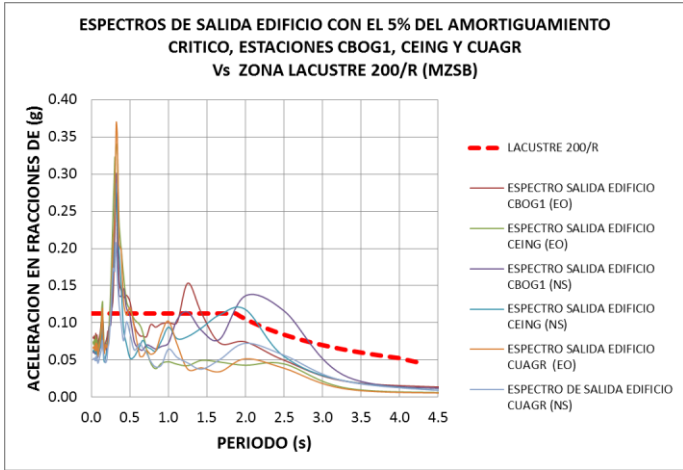
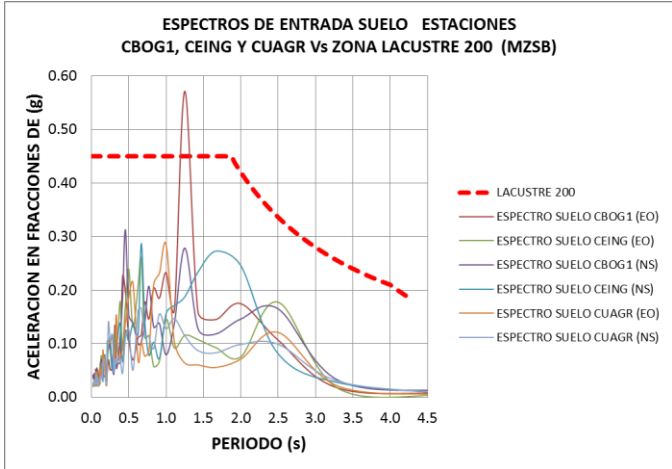
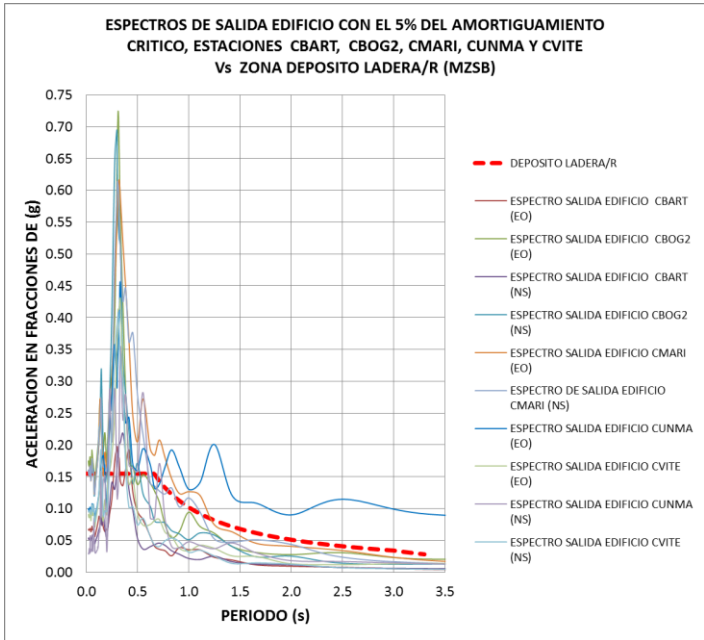
Los resultados de comparar, los espectros hallados y los propuestos por el Decreto 523 de 2010, para cada una de las estaciones, agrupadas de acuerdo a la zona de

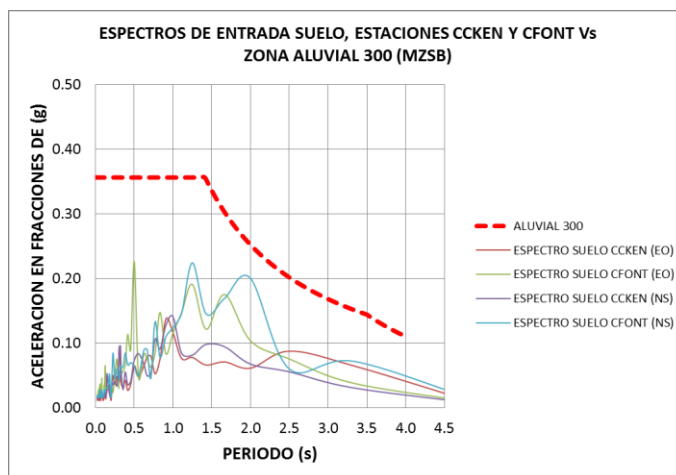
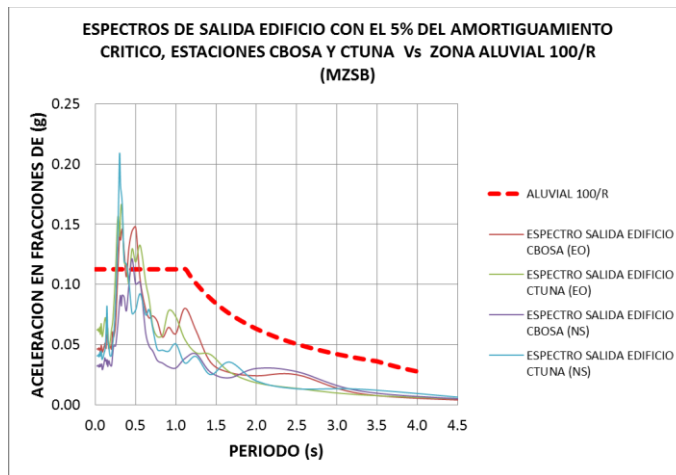
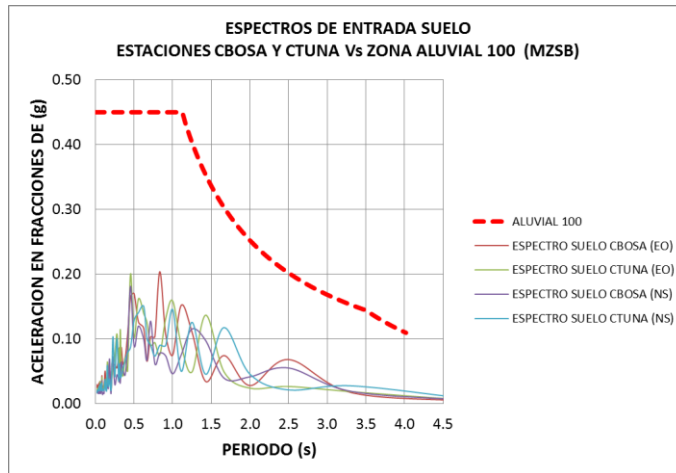
microzonificación sísmica a las que pertenecen. A continuación se presentan las gráficas donde se comparan estos espectros de aceleración:

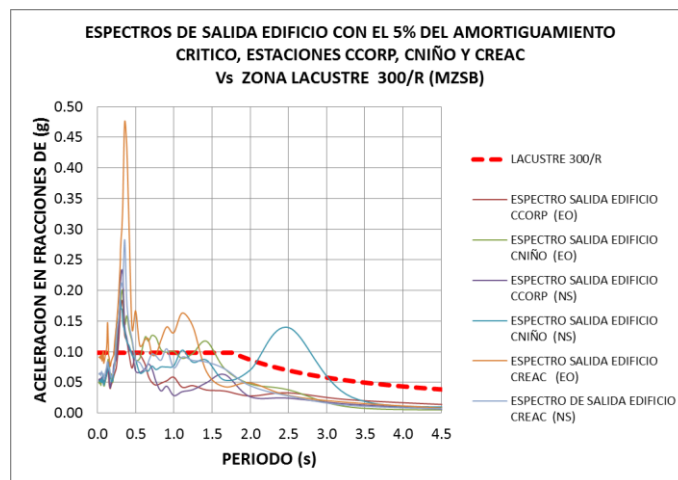
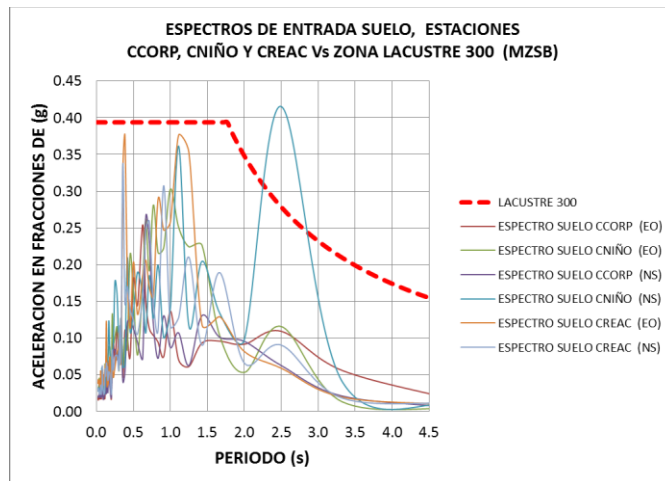
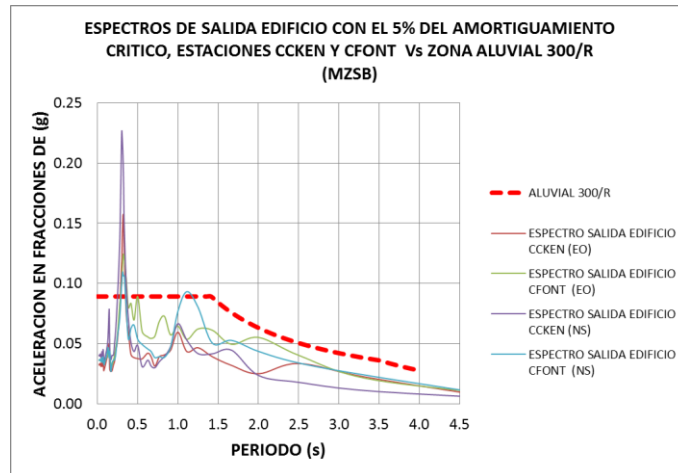
RESUMEN POR ZONAS DE MZSB										
LACUS. 500	LACUS. 50	DEP. LADERA	LACUS. 200	ALU. 100	LACUS. ALU. 300	ALU. 300	LACUS. 300	CERROS	ALU.L 200	ROCA
CAVIA	CBANC	CBART	CBOG1	CBOSA	CCITE	CCKEN	CCORP	CESCA	CGRAL	CBOG1
CTIEM	CUSALL	CBOG2	CEING	CTUNA		CFONT	CNIÑO	CSMOR	CTEJE	CGRAL
		CMARI	CUAGR				CREAC	CTVCA	CTIMI	CUAGR
		CUNMA								
		CVITE								

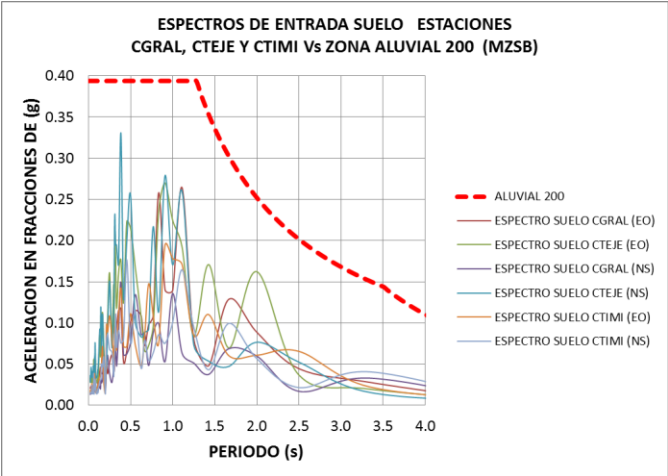
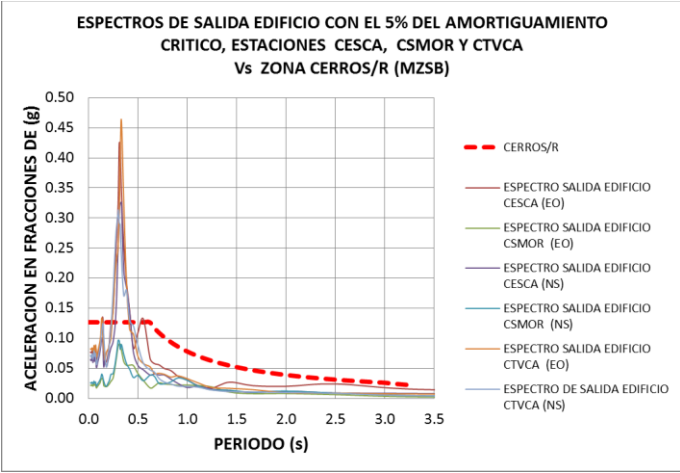
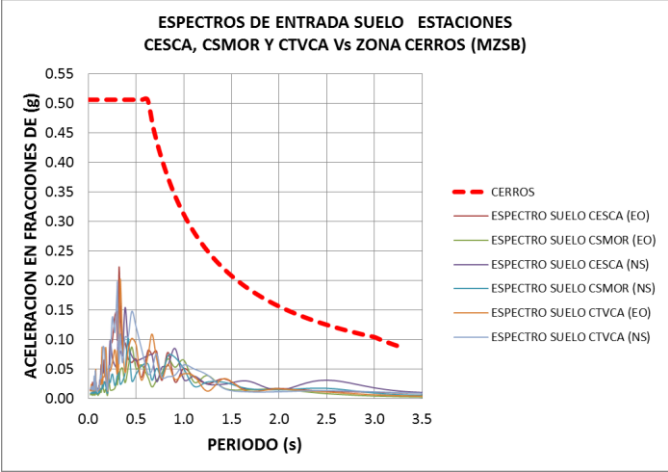


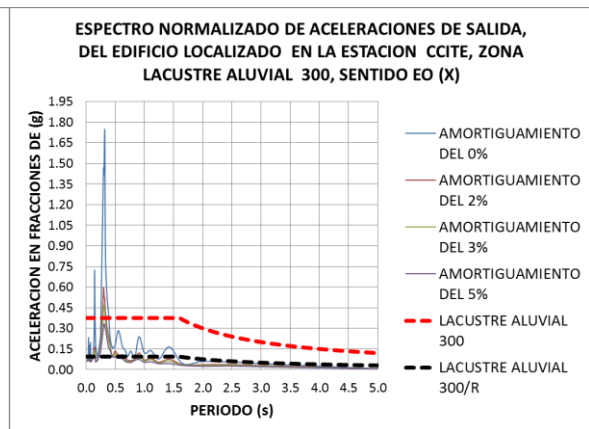
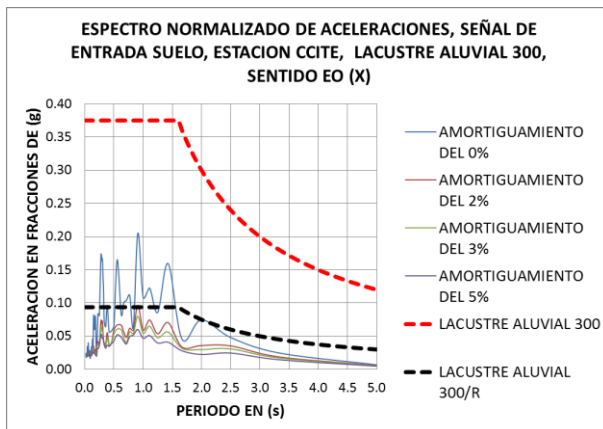
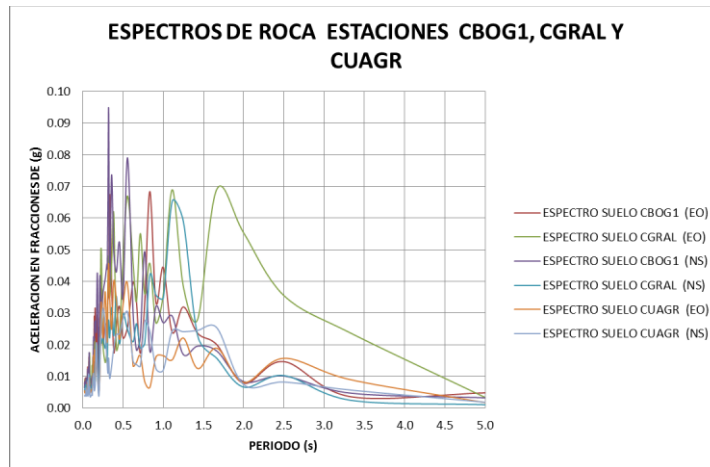
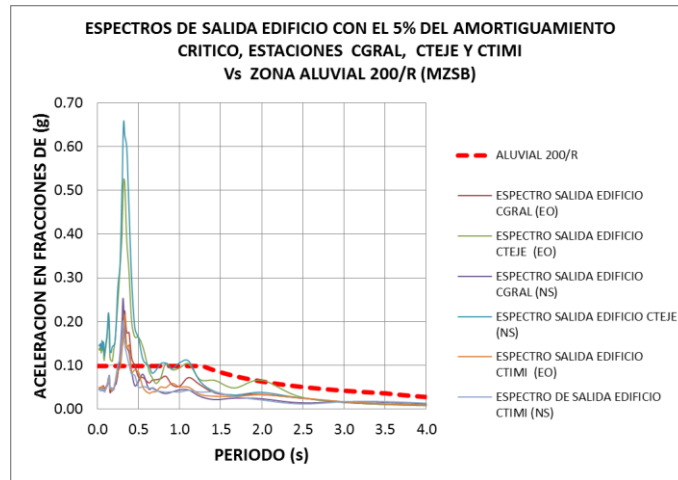












Observando los espectros de aceleración de salida, con amortiguamiento del 5% del crítico, es decir, la respuesta de la estructura de concreto al sismo de entrada, con amortiguamiento del 0%; se puede concluir, que las alturas de las edificaciones deben limitarse, cuando haya acercamiento o coincidencia con los periodos de salida de la estructura, que puedan generar el fenómeno de resonancia. Esta restricción aplica, a los edificios construidos con sistema sismoresistente de muros de concreto. A continuación se presentan las alturas que presentan riesgos:

EVALUACION DE PERIODOS Y ACELERACIONES MAXIMAS, POR ESTACIONES Y ZONAS DE MZSB-DECRETO 523 DE 2010, SENTIDOS EO Y NS													
Nº	NOMBRE DE LA ESTACION	CODIGO	DIRECCION	MZSB-DECRETO 523	LOCALIDAD	PROF/ROCA (m)	PERIODO (EO) (s)	Sa (EO) (g)	PERIODO (NS) (s)	Sa (NS) (g)	EDIFICIOS CON RIESGO DE RESONANCIA		
1	ESCUELA DE INGENIERIA	CEING	Av 13 No. 205 - 59	LACUSTRE-200	11	SUBA	110.00	0.67	0.26	0.67	0.29	6 PISOS	6 PISOS
5	UNIVERSIDAD AGRARIA	CJAGR	Ci 170 No. 50 - 90	LACUSTRE-200	11	SUBA	130.00	1.00	0.29	0.67	0.17	10 PISOS	6 PISOS
31	INGEOMINAS	CBOG1	INGEOMINAS	LACUSTRE-200	13	TEUSAQUILLO	180.00	1.25	0.57	0.45	0.31	12 PISOS	4 PISOS
2	UNIVERSIDAD DE LA SALLE	CUSALL	Cr 7 No. 172 - 85	LACUSTRE-50	1	USAQUEN	30.00	0.67	0.14	0.67	0.24	6 PISOS	6 PISOS
9	BANCO DE LA REPUBLICA	CBANC	Cr 57 No. 120 - 01	LACUSTRE-50	11	SUBA	60.00	0.45	0.18	1.11	0.19	4 PISOS	11 PISOS
3	COLEGIO FERNANDO MAZUERA	CBOSA	Ci 68A Sur No. 87D - 09	ALUVIAL-100	7	BOSA	70.00	0.83	0.20	0.45	0.18	8 PISOS	4 PISOS
22	PARQUE EL TUNAL	CTUNA	Ci 48 con Av El Tunal	ALUVIAL-100	6	TUNJUELITO	80.00	0.45	0.20	0.63	0.15	4 PISOS	6 PISOS
4	UNIVERSIDAD CORPAS	CCORP	Av Corpas, Km. 3, Via Suba	LACUSTRE-300	11	SUBA	220.00	0.63	0.25	0.67	0.26	6 PISOS	6 PISOS
14	CENTRO DE ESTUDIOS DEL NIÑO	CNIÑO	Ci 71 No. 73A - 44	LACUSTRE-300	10	ENGATIVA	220.00	1.00	0.30	2.50	0.42	10 PISOS	25 PISOS
15	JARDIN BOTANICO	CJABO	Ci 57 No. 61 - 13	LACUSTRE-300	10	ENGATIVA	260.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND
28	COLEGIO LAUREANO GOMEZ	CLAGO	CL 90A No.97-40	LACUSTRE-300	10	ENGATIVA	175.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND
33	REACTOR (INGEOMINAS)	CREAC		LACUSTRE-300	13	TEUSAQUILLO	ND	1.11	0.38	0.36	0.34	11 PISOS	3 PISOS
7	COLONIA ESCOLAR DE USAQUEN	CUSAQ	Ci 127 No. 12A - 20	PIEDMONTE A	1	USAQUEN	30.00	ND	ND	ND	ND		
8	ESCUELA DE CABALLERIA	CECSA	Cr 7 con Ci 106	CERROS	1	USAQUEN	0.00	0.32	0.22	0.38	0.15	3 PISOS	3 PISOS
10	T.V. CABLE	CTVCA	Dg 120 No. 86 - 75	CERROS	11	SUBA	0.00	0.33	0.20	0.30	0.20	3 PISOS	3 PISOS
25	COLEGIO SIERRA MORENA	CSMOR	Ci 77A Sur No. 65 - 15	CERROS	19	CIUDAD BOLIVAR	0.00	0.45	0.09	0.42	0.10	4 PISOS	4 PISOS
11	PARQUE LA FLORIDA	CFLOD	Km. 3, Via Engatva- Cota	SIN IDENTIFICAR	10	ENGATIVA	500.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND
12	AVIANCA	CAVIA	Av El Dorado No. 82 - 30	LACUSTRE-500	10	ENGATIVA	300.00	1.11	0.35	0.83	0.42	11 PISOS	8 PISOS
20	CLUB EL TIEMPO	CTIEM	Ci 32 No. 125 - 01	LACUSTRE-500	9	FONTEBON	375.00	1.00	0.29	0.91	0.23	10 PISOS	9 PISOS
13	FONTEBON	CFONT	Ci 13 con Cr 96	ALUVIAL-300	8	KENNEDY	270.00	0.50	0.23	1.25	0.22	5 PISOS	12 PISOS
30	COLEGIO KENNEDY	CKKEN	Ci 38 Sur No 107C - 29	ALUVIAL-300	8	KENNEDY	220.00	0.91	0.14	1.00	0.15	9 PISOS	10 PISOS
16	COLEGIO SAN BARTOLOME	CSBART	Cr 5 No. 34 - 00	DEPOSITO LADERA	3	SANTA FE	0.00	0.38	0.16	0.30	0.10	3 PISOS	3 PISOS
17	UNIVERSIDAD MANUELA BELTRAN	CUNMA	Cr 3 Este No. 60 - 50	DEPOSITO LADERA	2	CHAPINERO	0.00	0.23	0.47	0.33	0.35	2 PISOS	3 PISOS
24	BOMBEROS LA MARICUELA	CMARI	Cr 1A con ci 76A Bis sur	DEPOSITO LADERA	5	USME	30.00	0.38	0.43	0.45	0.53	3 PISOS	4 PISOS
27	TANQUES DE VITELMA	CVITE	Ci 9 sur con Cr 9 Este	DEPOSITO LADERA	4	SAN CRISTOBAL	0.00	0.23	0.24	0.25	0.25	2 PISOS	2 PISOS
32	GAVIOTAS (INGEOMINAS)	CBOG2		DEPOSITO LADERA	17	CANDELARIA	ND	0.21	0.68	0.25	0.49	2 PISOS	2 PISOS
19	CITEC	CCOTE	Cr 65B No 17A - 11	LACUSTRE ALUVIAL-300	16	PUENTE ARANDA	200.00	0.91	0.21	0.91	0.26	9 PISOS	9 PISOS
21	PARQUE TIMZA	CTIMI	Dg 42 Sur No. 62 - 67	ALUVIAL-200	8	KENNEDY	160.00	0.91	0.19	0.45	0.18	9 PISOS	4 PISOS
26	ESCUELA DE TEJEDORES	CTEJE	Cr 32 No. 12 - 55	ALUVIAL-200	16	PUENTE ARANDA	80.00	0.91	0.27	0.38	0.33	9 PISOS	4 PISOS
29	ESCUELA GENERAL SANTANDER	CGRAL	Ci 44 Sur No. 45A - 15	ALUVIAL-200	6	TUNJUELITO	100.00	1.11	0.26	0.38	0.15	11 PISOS	3 PISOS

Elaborado por: ING. CARLOS A. BALLEEN DIAZ.

CONCLUSIONES 2

- El espectro de aceleraciones propuesto por la microzonificación sísmica de Bogotá, a nivel de respuesta del suelo, para el diseño de estructuras, con un amortiguamiento del 5% del crítico, contiene a la mayoría de espectros calculados, (denominados en este trabajo como espectros de entrada suelo); con la excepción de las estaciones CBOG2, en el sentido EO, en la zona Deposito Ladera; la estación CBOG1, en el sentido EO, en la zona Lacustre 200; la estación CNIÑO, en el sentido NS, en la zona Lacustre 300; y la estación CAVIA, en el sentido NS, en la zona Lacustre 500.
- Para comparar los espectros de salida calculados, se dividieron por $R=4.0$, (valor aplicado al sistema de resistencia sísmica de muros de concreto). Se observa que a nivel de respuesta de salida de los edificios, la mayoría de las curvas de los espectros, sobresalen de la meseta de los espectros de microzonificación, sobre todo en las zonas intermedias, (periodos cortos).

- En las zonas de periodos largos, sobresalen los espectros de microzonificación de las estaciones CTEJE, en la zona Aluvial 200 en ambos sentidos, CFONT, en la zona Aluvial 300, en el sentido NS, entre periodos de 1.0s y 1.50s y la más dramática, que sobresale casi por completo, es la estación CUNMA, en la zona Deposito Ladera, en el sentido EO. También sobresale en esta misma zona, la estación CMARI, en el sentido EO, entre los periodos de 1.0s y 1.20s. Del mismo modo, las estaciones CBOG1, en ambos sentidos y CEING, sentido NS.

- Las aceleraciones alcanzadas por los edificios en la fase intensa, tienen valores extremadamente altos, con relación a los espectros de diseño de la NSR-10 y el Decreto 523. Comparativamente, los valores de la NSR-10 y de la microzonificación, oscilan entre 0.09g y 0.15g, mientras que los valores de respuesta del edificio, (espectros de salida), varían entre 0.23g y 0.72g.

- Se observa que en la fase intensa, se presentan las mayores fuerzas y aceleraciones y el mayor cortante basal. Como todas las gráficas están interrelacionadas y pertenecen a la misma muestra, se pueden establecer correlaciones, entre varios resultados. Se deja la inquietud para continuar con trabajos posteriores.

- Los espectros de la MZSB de velocidad y desplazamiento, en la zona de periodos largos, están muy por encima de los resultados obtenidos. Un diseño basado en estos parámetros, debe realizarse cuidadosamente, ya que en la zona de periodos cortos, entre 0.0 y 0.50s, todas las curvas de espectros de salida las excedieron significativamente. Suponer líneas rectas en los espectros de velocidad y cóncavas en la de desplazamiento, en la zona de los periodos cortos, no es lo más conveniente.

- Los resultados obtenidos en el presente trabajo, dejan en claro la necesidad imperativa, de realizar ajustes a los parámetros de diseño estructural, conjuntamente con los del suelo. El estudio dinámico del sismo de Quetame de 2008, en los edificios de configuración realística, muestran fehacientemente, que el diseño estructural y la interacción con el suelo de fundación, no está resuelta y se encuentra aún lejos de la realidad observada.

- Existe alta probabilidad de que las edificaciones, de rango intermedio, que son las más comunes, como los edificios de 5 y 6 pisos, como los de este trabajo,

entren en resonancia en el peor de los casos, o tengan demandas altas de rigidez y ductilidad.

- Los espectros de aceleración de salida, de los edificios del presente estudio, marcan una pauta muy interesante e importante en el diseño estructural, ya que su forma y la presencia de picos muy altos de aceleración, generados por las demandas sísmicas, son muy distintos a los propuestos por la microzonificación y serían aún más diferentes si se tomara, un acelerograma sintético, referido al de Quetame de 2008, con la magnitud real de diseño. Los ajustes deben realizarse en los espectros de amenaza uniforme y de conformidad con las tasas de retorno de 475, 225 o 55 años.

- Los sismos de entrada del suelo, en algunas zonas de microzonificación, están muy abajo del espectro de amenaza y en otros casos está al borde de la línea de amenaza y excepcionalmente la supera. Los resultados muestran la interdependencia que existe entre las funciones de transferencia de entrada y salida de los sismos.

- El análisis dinámico de estructuras, se muestra como la mejor herramienta para el diseño de las estructuras. Con este método se tiene en cuenta, la variación de las fuerzas horizontales con el tiempo, (ver gráficas de cortante basal normalizado versus tiempo) y su incidencia en las demandas de rigidez y ductilidad. La información que se requiere para llevar a cabo dicho análisis, consiste en acelerogramas de superficie, debidamente filtrados y seleccionados, para que representen los sismos lejanos de subducción; los regionales, (distancia al epicentro mínima con Bogotá de 60km aproximadamente y de magnitud relevante, por ejemplo entre 7.0 y 7.5 de ML) y sismos cercanos, (con magnitudes menores o iguales a 6), (Orozco et, al 2008). También existe la posibilidad de utilizar acelerogramas sintéticos, para simular la respuesta de los depósitos blandos al sismo de diseño y su verificación inmediata con el espectro de riesgo sísmico.

- Incrementando la instrumentación sísmica de la ciudad y mejorando el aprovechamiento de los datos, en archivo digital sobre diferentes estratos de suelo y para diferentes zonas de riesgo, que actualmente dispone el FOPAE y que a mi juicio se desperdician, ya que cuando se solicitan no están disponibles o dependen de la voluntad del encargado de turno, en manejar estos documentos; que son públicos y de libre consulta, inclusive por la red web.

- Los parámetros del suelo, pueden correlacionarse con los registros sísmicos, de cada una de las estaciones superficiales de la RAB y establecer valores promedio, para la rigidez y el módulo de cortante; inclusive pueden correlacionarse también con los ensayos SPT, CPT y piezocono.
- Por último y no menos importante, es la necesidad de utilizar en el diseño la aceleración vertical, como dato de entrada del suelo, para el diseño de los elementos de la cimentación. Estos elementos sufren desplazamientos verticales importantes durante el sismo, además del incremento de fuerzas, por el acoplamiento entre las demandas del suelo y la respuesta de la estructura. Este movimiento incrementa los esfuerzos cortantes de la cimentación.

BIBLIOGRAFIA

- Asociación Colombiana de ingeniería sísmica; *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, 2011.*
- Bobby O. Hardin and Michael E. Kalinski. *Estimating the Shear Modulus of Gravelly Soils, Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering* © Asce / July 2005
- Bowles, Joseph E. *Foundation Analysis and Design*, Mc Graw Hill, Fifth edition, 1997
- Das, Braja M. *Principios de ingeniería de cimentaciones*. 5ª. Edición.
- Gallego, Mauricio. *Estimación de riesgo sísmico en la República de Colombia*. Tesis de Maestría para optar al título de Maestro en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma del estado de México. Noviembre de 2000.
- Gallego, Mauricio. *Acerca de la construcción de edificaciones esbeltas, elevadas, pesadas y densamente pobladas sobre los suelos blandos de la ciudad de Bogotá D.C.* En: Anexo de la carta a las autoridades de planeación urbana de la ciudad de Bogotá D.C. Documento no publicado. Marzo de 2007.
- Gallego, Mauricio et al. *Edificios de concreto reforzado siguiendo la NSR-10 vs sismo de Quetame registrado en Bogotá D.C.* En: *Ingeniería y Ciencia* Vol. 8, N° 16, pp. 129-189. Universidad EAFIT. 2012
- Gallego, Mauricio y Gallego, Jorge. *Análisis y diseño conceptual de edificio Rioterra en Montería, Córdoba*. Documento no publicado. Octubre de 2011
- García R, Luis Enrique, *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*, Universidad de los Andes, Bogotá, 1998
- Jianfeng Zhang, Ronald D. Andrus, and C. Hsein Juang. *Model Uncertainty in Normalized Shear Modulus and Damping Relationships*. *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING* © ASCE / JANUARY 2008
- Maldonado Rondón, Esperanza y Chio Cho, Gustavo. *Análisis Sísmico de Edificaciones*. 2004, v.500. p.287

- Maldonado Rondón, Esperanza y Chio Cho, Gustavo. *Dinámica Estructural*. UIS, 2010
- Nava, Alejandro. *Terremotos*. Tercera edición (La ciencia para Todos). ISBN 968-16-5768-3. Fondo de Cultura Económica. México, D.F. 1998
- Orozco, Luis y Rodríguez, Jorge. *Asesoría geotécnica y sismológica para la evaluación de la amenaza sísmica del proyecto Titán Plaza*. FOPAE. Informe no publicado. 2008
- PAZ M. *Structural Dynamics Theory and Computation*. Van Nostrand Reinhold. (Orientado a SAP)
- Rodríguez G. Edgar E. *Apuntes de clase de la materia Dinámica de Suelos*. Primer semestre, año 2011.