

**ESPECTROS GENERALIZADOS DE DERIVA PARA BUCARAMANGA
USANDO UN MODELO CONTINUO**

JORGE FABIAN GELVEZ MUNEVAR

RONY ALEXANDER ORTIZ APONTE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
OCTUBRE DE 2009**

**ESPECTROS GENERALIZADOS DE DERIVA PARA BUCARAMANGA
USANDO UN MODELO CONTINUO.**

JORGE FABIAN GELVEZ MUNEVAR

RONY ALEXANDER ORTIZ APONTE

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil

Directora:

Ph. D. Esperanza Maldonado Rondón

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
OCTUBRE DE 2009**

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS	3
3.	MARCO TEORICO	5
3.1	ESPECTRO GENERALIZADO DE DERIVAS DE ENTREPISO	5
3.2	ANÁLISIS MODAL DE RESPUESTA SÍSMICA CONTRA EL TIEMPO	7
3.3	MODELO CONTINUO PARA EDIFICACIONES DE VARIOS PISOS	9
	3.3.1 PROPIEDADES DINÁMICAS DEL MODELO CONTINUO	11
3.4.	RESPUESTA DINÁMICA DE UN SISTEMA DINÁMICO DE UN GRADO DE LIBERTAD	15
4.	AMENAZA SÍSMICA	18
4.1	DETERMINACIÓN DE ESCENARIOS SÍSMICOS COMPATIBLES	18
4.2	ZONIFICACIÓN DE BUCARAMANGA	20
	4.2.1. ZONAS GEOTÉCNICAS	20
	4.2.2. ZONAS SÍSMOGEOTECNICAS	24
4.3	ACELEROGRAMAS EN SUPERFICIE	25
5.	IMPLENTACIÓN DEL MODELO CONTINUO EN UNA HOJA DE CÁLCULO	39
6.	VALIDACIÓN DEL METODO ESPECTRO GENERALIZADO DE DERIVAS DE ENTREPISO.	44

7.	CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECTROS DE DERIVAS	49
8.	ANALISIS DE RESULTADOS	59
9.	CONCLUSIONES	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del suelo utilizadas para obtener los valores del acelerograma en superficie de la zona sismogeotécnica 1.	26
Tabla 2. Características del suelo utilizadas para obtener los valores del acelerograma en superficie de la zona sismogeotécnica 2.	26
Tabla 3. Características del suelo utilizadas para obtener los valores del acelerograma en superficie de la zona sismogeotécnica 3.	26
Tabla 4. Valores de t_i y r_i para los primeros 6 modos de vibración para un modelo con $\alpha = 10$	40
Tabla 5. Parámetros generales de la estructura	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Viga con deformación tipo cortante	5
Figura 2. Vigas con diferente tipo de deformación lateral.....	6
Figura 3. Modelo continuo simplificado	10
Figura 4. Acelerogramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga–Santa Marta. De izquierda a derecha y de arriba abajo se presentan los acelerogramas de Helena, Friuli, Mammoth, Coalinga, Whittier y Umbria.....	19
Figura 5. Acelerogramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Frontal. De izquierda a derecha y de arriba abajo se presentan los acelerogramas de Montenegro, Loma Prieta, Pretolia y Dulze.	19
Figura 6. Curvas de degradación de módulo de corte, y amortiguamiento para los materiales del miembro Órganos (Formación Bucaramanga).	27
Figura 7. Curvas de degradación de módulo de corte, y amortiguamiento para los materiales del miembro Gravoso (Formación Bucaramanga).	27
Figura 8. Curvas de degradación de módulo de corte, y amortiguamiento para los materiales del miembro Limos Rojos (Formación Bucaramanga).	27
Figura 9. Curvas de degradación de módulo de corte, y amortiguamiento para los materiales de Suelo residual, Escombros, Aluvial, Miembro Finos, Rellenos.	28
Figura 10. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga-Santa Marta para la zona 1.....	29

Figura 11. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Frontal para la zona 1.....	29
Figura 12. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga-Santa Marta para la zona 2.....	30
Figura 13. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Frontal para la zona 2.....	30
Figura 14. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga-Santa Marta para la zona 3.....	31
Figura 15. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Frontal para la zona 3.....	31
Figura 16. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Bucaramanga-Santa Marta, para la zona 1, calculados con los acelerogramas obtenidos en este estudio.	33
Figura 17. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Bucaramanga-Santa Marta, para la zona 1, presentados por Ingeominas (2001).	33
Figura 18. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Frontal de los Llanos, para la zona 1, calculados con los acelerogramas obtenidos en este estudio.	34
Figura 19. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Frontal de los Llanos, para la zona 1, presentados por Ingeominas (2001).	34
Figura 20. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Bucaramanga-Santa Marta, para la zona 2, calculados con los acelerogramas obtenidos en este estudio.	35

Figura 21. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Bucaramanga-Santa Marta, para la zona 2, presentados por Ingeominas (2001).	35
Figura 22. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Frontal de los Llanos, para la zona 2, calculados con los acelerogramas obtenidos en este estudio.	36
Figura 23. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Frontal de los Llanos, para la zona 2, presentados por Ingeominas (2001).	36
Figura 24. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Bucaramanga-Santa Marta, para la zona 3, calculados con los acelerogramas obtenidos en este estudio.	37
Figura 25. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Bucaramanga-Santa Marta, para la zona 3, presentados por Ingeominas (2001).	37
Figura 26. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Frontal de los Llanos, para la zona 3, calculados con los acelerogramas obtenidos en este estudio.	38
Figura 27. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Frontal de los Llanos, para la zona 3, presentados por Ingeominas (2001).	38
Figura 28. Ecuaciones características (1) y (2), para $\alpha = 10$	40
Figura 29. Graficas de $\Gamma_i\Phi_i$ contra z/H realizada (a la izquierda grafica realizada con el modelo programado en la hoja de cálculo; a la derecha grafica presentada por Miranda y Akkar (2006).	41
Figura 30. Graficas de $\Gamma_i\Phi'_i$ contra z/H a la izquierda grafica realizada con el modelo programado en la hoja de cálculo; a la derecha grafica presentada por Miranda y Akkar (2006).	41

Figura 31. Espectro de desplazamiento calculado con la hoja de cálculo.....	42
Figura 32. Espectro de desplazamiento calculado con Degtra A4v4(xp)	42
Figura 33. Espectro de derivas para el sismo de Kobe, a la izquierda realizado con hoja de cálculo; a la derecha el presentado por Miranda y Akkar (2006).	43
Figura 34. Comparación presentada por Miranda (2007) para un edificio cuyo sistema de resistencia lateral consiste en pórticos de concreto reforzado resistentes a momentos.	44
Figura 35. Comparación presentada por Miranda (2007) para un edificio cuyo sistema de resistencia lateral consiste en muros estructurales.	45
Figura 36. Comparación presentada por Miranda (2007) para un edificio cuyo sistema de resistencia lateral consiste una combinación de pórticos de concreto reforzado resistentes a momentos y muro de concreto reforzado.....	45
Figura 37. Modelo del edificio utilizado para la validación del método	46
Figura 38. Comparación modos de vibración obtenidos con la hoja de cálculo y con ETABS.....	47
Figura 39. Comparación de la deriva máxima obtenida con la hoja de cálculo y con ETABS.....	47
Figura 40. Espectro de derivas para la zona 1, $\alpha = 1$, y $\xi = 5\%$	49
Figura 41. Espectro de derivas para la zona 1, $\alpha = 1$, y $\xi = 2\%$	50
Figura 42. Espectro de derivas para la zona 1, $\alpha = 4$, y $\xi = 5\%$	50
Figura 43. Espectro de derivas para la zona 1, $\alpha = 4$, y $\xi = 2\%$	51

Figura 44. Espectro de derivas para la zona 1, $\alpha = 10$, y $\xi = 5\%$	51
Figura 45. Espectro de derivas para la zona 1, $\alpha = 10$, y $\xi = 2\%$	52
Figura 46. Espectro de derivas para la zona 2, $\alpha = 1$, y $\xi = 5\%$	52
Figura 47. Espectro de derivas para la zona 2, $\alpha = 1$, y $\xi = 2\%$	53
Figura 48. Espectro de derivas para la zona 2, $\alpha = 4$, y $\xi = 5\%$	53
Figura 49. Espectro de derivas para la zona 2, $\alpha = 4$, y $\xi = 2\%$	54
Figura 50. Espectro de derivas para la zona 2, $\alpha = 10$, y $\xi = 5\%$	54
Figura 51. Espectro de derivas para la zona 2, $\alpha = 10$, y $\xi = 2\%$	55
Figura 52. Espectro de derivas para la zona 3, $\alpha = 1$, y $\xi = 5\%$	55
Figura 53. Espectro de derivas para la zona 3, $\alpha = 1$, y $\xi = 2\%$	56
Figura 54. Espectro de derivas para la zona 3, $\alpha = 4$, y $\xi = 5\%$	56
Figura 55. Espectro de derivas para la zona 3, $\alpha = 4$, y $\xi = 2\%$	57
Figura 56. Espectro de derivas para la zona 3, $\alpha = 10$, y $\xi = 5\%$	57
Figura 57. Espectro de derivas para la zona 3, $\alpha = 10$, y $\xi = 2\%$	58
Figura 58. Espectros de derivas para el sismo Pretolia en todas las zonas, $\alpha = 4$, $\xi = 2\%$ y $\xi = 5\%$	60

Figura 59. Espectros de derivas para el sismo Montenegro en todas las zonas, $\alpha = 10$, $\xi = 2\%$ y $\xi = 5\%$ 61

RESUMEN

TÍTULO:

ESPECTROS GENERALIZADOS DE DERIVA PARA BUCARAMANGA USANDO UN MODELO CONTINUO.*

AUTOR:

JORGE FABIÁN GELVEZ MUNEVAR, RONY ALEXANDER ORTIZ APONTE**

PALABRAS CLAVES:

Espectro, Deriva, Acelerograma, Demanda de deriva, Viga de cortante, Viga de flexión.

DESCRIPCIÓN:

El espectro generalizado de derivas de entrepiso es una grafica del periodo fundamental del edificio, versus demanda máxima de deriva. Por lo tanto, este espectro ofrece una indicación directa de la máxima deriva de entrepiso en edificaciones con diferentes periodos de vibración (Miranda y Akkar, 2006).

Muchos estudios han mostrado que la razón de deriva de entrepiso, definida como la diferencia en el desplazamiento de 2 pisos (niveles) consecutivos, es el parámetro que mejor está correlacionado con el daño en una estructura (Algan 1982; Sozen 1983; Moehle 1984; Qi y Moehle 1991; Moehle 1994; Gulkan y Sozen 1999; Bozorgnia y Bertero 2001). Por esta razón los espectros de derivas son herramientas muy útiles para los ingenieros estructurales.

Para calcular los espectros generalizados de deriva se utilizo el modelo continuo simplificado propuesto por Miranda y Akkar (2006), que consiste en una viga de flexión en voladizo y una viga de cortante en voladizo que están conectadas por miembros axialmente rígidos. Este modelo continuo tiene en cuenta deformaciones tipo cortante, deformaciones tipo flexión, y deformaciones intermedias que son las que más se parecen a las deformaciones presentadas por los edificios de varios pisos.

Se calcularon espectros generalizados de derivas para edificaciones cuyo sistema de resistencia lateral consiste en pórticos resistentes a momentos, muros estructurales, y sistemas que combinan pórticos resistentes a momentos y muros de cortante. Estos espectros se calcularon utilizando los registros de sismos propuestos como amenaza para Bucaramanga por Ingeominas (2001).

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Maldonado Rondón, Esperanza.

ABSTRACT

TITLE:

GENERALIZED INTERSTORY DRIFT SPECTRUMS FOR BUCARAMANGA CITY USING A CONTINUOUS MODEL.*

AUTHOR:

JORGE FABIÁN GELVEZ MUNEVAR, RONY ALEXANDER ORTIZ APONTE**

KEY WORDS:

Spectrum, Drift, Accelerogram, Drift Demand, Shear Beam, Flexural Beam.

DESCRIPTION:

The generalized interstory drift spectrum is a plot of the fundamental period of the building versus IDR_{max} . Hence it provides a direct indication of the peak interstory drift in buildings with different periods of vibration (Miranda and Akkar, 2006).

Many studies have shown that the interstory drift ratio, defined as the difference in lateral displacements in between two consecutives normalized by the interstory height, is the response parameter that is best correlated with damage in buildings (Algan 1982; Sozen 1983; Moehle 1984; Qi and Moehle 1991; Moehle 1994; Gülkan and Sozen 1999; Bozorgnia and Bertero 2001). That is the reason why drift spectrums are very useful tools for structural engineers.

Generalized drift spectrums were calculated using the Simplified Continuous Model proposed by Miranda and Akkar (2006) it consist of a flexural cantiléver beam and a shear caltilever beam connected by axially rigid members. This continuous model takes into account shear deformations, flexural deformations, and combined overall shear and flexural deformations that represent more closely deformation of multistory buildings.

Generalized drift spectrums were calculated for buildings whose lateral resisting systems consist in moment-resisting frames, shear walls, and buildings with a combination of moment-resisting frames and shear walls. These spectrums were calculated using the seismic registers proposed by Ingeominas (2001) as a menace for Bucaramanga City.

* Project

** UIS Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Civil Engineering, Director: Maldonado Rondón, Esperanza.

1. INTRODUCCIÓN

Para calcular el daño potencial de un sismo existen diferentes herramientas. Algunas de las más utilizadas son el espectro de respuesta en desplazamiento y el espectro de respuesta en aceleración, los cuales brindan información de aceleraciones y desplazamientos, respectivamente, para diferentes valores de períodos de vibración.

Iwan (1997) planteó un nuevo espectro llamado espectro de derivas basándose en un modelo de viga de cortante. Este espectro brinda la información de demanda sísmica de derivas para diferentes períodos de vibración. Éste, a pesar de ser válido, presenta la limitación de que sólo provee resultados confiables para edificaciones cuya deformación lateral es similar a la del modelo de viga de cortante.

Basados en el espectro presentado por Iwan (1997), Miranda y Akkar (2006) plantearon una herramienta muy útil denominada espectro generalizado de derivas basándose en un modelo que combina una viga de cortante con una viga de flexión, unidas mediante una serie de elementos que actúan axialmente para permitir deformaciones iguales. Este planteamiento permite considerar un amplio rango de deformaciones que varían entre las deformaciones que se obtienen con una viga de cortante y una viga de flexión, lo cual representa más acertadamente la deformación real de una estructura (Miranda y Akkar, 2006).

El espectro generalizado de derivas, al igual que los espectros de respuesta, se basa en un sistema de comportamiento lineal, pero, con la ventaja que el modelo planteado por Miranda y Akkar (2006) contempla múltiples grados de libertad, lo cual permite tener en cuenta la influencia de múltiples modos de vibración, a diferencia del espectro de respuesta que contempla únicamente el primer modo de vibración.

El espectro generalizado de derivas provee información directa de la demanda sísmica de derivas en edificaciones, como una herramienta para los ingenieros estructurales que brinda información adicional acerca de la intensidad de un sismo en estructuras, es decir, que no pretende reemplazar los espectros de respuesta en aceleración y desplazamiento (Miranda y Akkar, 2006).

Así mismo el espectro generalizado de derivas ofrece valiosa información acerca del potencial de daño de un sismo para diferentes tipos de edificaciones. De esta forma, dicho espectro se convierte una gran ayuda para el cálculo del riesgo sísmico en una ciudad, ya que mediante el conocimiento de las propiedades geológicas y geotécnicas de las diferentes zonas es posible determinar el comportamiento diferentes sistemas estructurales.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GENERALES

Construir espectros generalizados de deriva para la ciudad de Bucaramanga con el fin de conocer la respuesta sísmica de las edificaciones de concreto reforzado cuyo sistema de resistencia sísmica consiste en pórticos resistentes a momentos, muros estructurales y sistemas que combinan pórticos resistentes a momentos y muros estructurales, ante los diferentes eventos sísmicos definidos como amenaza para esta ciudad.

2.1.1. Objetivos Específicos

- Construir un modelo continuo que represente el comportamiento dinámico de las estructuras cuyo sistema de resistencia sísmica sean pórticos resistentes a momentos, muros estructurales y sistemas que combinan muros estructurales y pórticos resistentes a momentos.
- Identificar la amenaza sísmica en superficie de las diferentes zonas sismogeotécnicas de Bucaramanga presentadas por INGEOMINAS 2001.
- Construir espectros de deriva representativos de las 3 zonas sismogeotécnicas de Bucaramanga.
- Calcular la demanda de deriva de edificios cuyo sistema de resistencia sísmica consiste en pórticos de concreto reforzado resistentes a momentos, muros estructurales de concreto reforzado, y sistemas que combinan pórticos de concreto reforzado resistentes a momentos y muros estructurales de concreto reforzado, en cada una de las zonas sismogeotécnicas de Bucaramanga, utilizando los

registros de los sismos presentados por INGEOMINAS 2001 como amenaza sísmica.

3. MARCO TEORICO

3.1 ESPECTRO GENERALIZADO DE DERIVAS DE ENTREPISO

Muchos estudios han mostrado que la deriva de entrepiso, definida como la diferencia en el desplazamiento de 2 pisos (niveles) consecutivos, es el parámetro que mejor está correlacionado con el daño en una estructura (Algan 1982; Sozen 1983; Moehle 1984; Qi y Moehle 1991; Moehle 1994; Gulkan y Sozen 1999; Bozorgnia y Bertero 2001). Además, la deriva de entrepiso inducida por el sismo es la responsable de daño provocado a elementos no estructurales de las edificaciones (Miranda y Reyes 2002). Iwan planteó una medida sencilla y directa de la demanda de deriva, llamada espectro de deriva (Iwan 1997).

El espectro generalizado de derivas de entrepiso es una grafica del periodo fundamental del edificio, versus demanda máxima de deriva. Por lo tanto, este espectro ofrece una indicación directa de la máxima deriva de entrepiso en edificaciones con diferentes periodos de vibración.

Al igual que el espectro respuesta, el espectro de deriva utiliza un sistema de comportamiento lineal relativamente simple, diferenciándose en que mientras el espectro de respuesta utiliza un sistema de un solo grado de libertad, el espectro de deriva se basa en un modelo continuo de múltiples grados de libertad mediante una viga de cortante en voladizo (Miranda y Akkar 2006) como el mostrado en la figura 1.

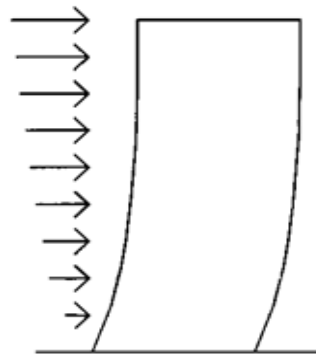


Figura 1. Viga con deformación tipo cortante

Fuente: Miranda y Reyes (2002)

Los más importantes aportes de esta herramienta consisten, en tener en cuenta la diferencia de la demanda de deriva a lo largo de la altura, y considerar la contribución de múltiples modos de vibración (Miranda y Akkar 2006).

Para edificios en los que la estructura consta de pórticos resistentes a momentos, en los que las vigas son significativamente más rígidas que las columnas, y donde la deformación axial de las columnas es despreciable, el modelo continuo de viga de cortante en voladizo puede proveer una buena aproximación de la demanda de deriva de entrepiso, ya que los modos de vibración del modelo son relativamente iguales a los de estas estructuras. Sin embargo, en estructuras con muros de cortante, o estructuras en donde la rigidez lateral aportada por las columnas es importante comparada con la de las vigas, o donde la deformación axial es importante, el uso de un modelo de viga de cortante en voladizo, puede no ser adecuado (Miranda y Akkar, 2006).

El espectro generalizado de derivas de entrepiso, está basado en un modelo continuo que consiste en la combinación de una viga de cortante en voladizo y una viga de flexión en voladizo, como el mostrado en la figura 2 (c), en el cual al variar un parámetro, se pueden obtener múltiples formas de deformación lateral, en lugar de utilizar únicamente deformaciones similares a las de una viga de cortante. Además esto permite tener en cuenta la participación de varios modos de vibración, los cuales pueden representar de mejor forma el comportamiento de los edificios de varios pisos (Miranda y Akkar 2006).



Figura 2. Vigas con diferente tipo de deformación lateral

Fuente: Miranda y Reyes (2002)

3.2 ANÁLISIS MODAL DE RESPUESTA SÍSMICA CONTRA EL TIEMPO

La metodología utilizada durante este estudio para encontrar la respuesta sísmica fue desarrollada por Miranda y Akkar (2006), y presentada en el artículo titulado Generalized Interstory Drift Spectrum (Espectro generalizado de derivas de entrepiso), la cual consiste en lo siguiente:

Para un sistema amortiguado, la contribución del modo de vibración i al desplazamiento lateral, contra el tiempo, en una altura adimensional $x = z/H$ está dada por

$$u_i(x, t) = \Gamma_i \Phi_i(x) D_i \quad (1)$$

Donde Γ_i es el factor de participación modal del modo de vibración i ; Φ_i es la amplitud del modo de vibración i en la altura adimensional x ; $D_i(t)$ es la respuesta en desplazamiento de un sistema de un grado de libertad, con periodo T_i , y razón de amortiguamiento modal ξ_i , correspondientes al modo de vibración i , sujeto a una aceleración del suelo $\ddot{u}_i(t)$.

La respuesta total del sistema puede ser calculada por medio de la superposición modal de la siguiente forma:

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} u_i(x, t) \quad (2)$$

En edificios la deriva de entrepiso IDR, se define como la diferencia entre los desplazamientos de la parte superior e inferior del entrepiso de interés normalizada por la altura de entrepiso (Miranda y Akkar, 2006). Por lo tanto, la razón de deriva de entrepiso en el piso (j) está dada por:

$$IDR(j, t) = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n \Gamma_i [\phi_i(j+1) - \phi_i(j)] D_i(t) \quad (3)$$

Donde $\phi_i(j + 1)$ y $\phi_i(j)$ corresponde a las amplitudes del i -ésimo modo de vibración en los pisos $(j + 1)$ y (j) respectivamente; h es la altura de entrepiso; y n es el número de pisos.

En la presentación original del espectro de derivas, la máxima deriva de entrepiso se considero aproximada a la deformación de cortante pico en la base de la viga de cortante (Iwan 1997). En este caso, la deriva de entrepiso se aproxima a la rotación del modelo en la altura correspondiente a la mitad del piso de interés.

Si deriva la ecuación (2) respecto a x , se obtiene la respuesta de rotación en el tiempo a la altura adimensional x .

$$\theta(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^{\infty} \Gamma_i \phi_i'(x) D_i(t) \quad (4)$$

Donde $\phi_i'(x)$ es la primera derivada de la forma del i -ésimo modo de vibración $\phi_i(x)$, con respecto a la altura adimensional.

Así se aproxima la razón de deriva de entrepiso para el nivel (j) de la siguiente forma:

$$IDR(j, t) \approx \theta(x, t) = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^{\infty} \Gamma_i \phi_i'(x) D_i(t) \quad (5)$$

Donde x corresponde al promedio de altura en los pisos $(j + 1)$ y (j) .

A pesar que la ecuación (5) indica que se debe usar un número infinito de modos de vibración, sin embargo Miranda y Akkar (2006) mostraron que para la mayoría de los edificios un número relativamente pequeño de modos es suficiente para obtener una buena aproximación de la demanda de rotación máxima en un modelo como el utilizado en este estudio. Por lo tanto, la razón de deriva de entrepiso en la altura adimensional x , puede aproximarse a:

$$IDR(x, t) \approx \frac{1}{H} \sum_{i=1}^m \Gamma_i \phi_i'(x) D_i(t) \quad (6)$$

Donde m es el número de modos considerados en el análisis.

Luego, las ordenadas en el espectro generalizado de derivas de entrepiso están definidas como la máxima rotación o lo largo de la altura del edificio, y se calcula de la siguiente forma:

$$IDR_{max} = \max_{\forall t,x} \theta(x,t) \quad (7)$$

3.3 MODELO CONTINUO PARA EDIFICACIONES DE VARIOS PISOS

El modelo utilizado en este estudio es el propuesto por Miranda y Akkar (2006) mostrado en la figura 2 (c), que consiste en una viga de flexión en voladizo, como la mostrada en la figura 2 (a), y una viga de cortante en voladizo, como la mostrada en la figura 2 (b), deformadas en flexión y cortante respectivamente, el modelo supone que las dos vigas están conectadas por miembros axialmente rígidos figura 3, que son los encargados de transmitir las fuerzas horizontales, y de esta forma las dos vigas conforman un sistema con deformaciones combinadas. Miranda y Reyes (2002), utilizaron un modelo como este para estudiar los casos en que la rigidez lateral no permanece constante a lo largo de la altura, y concluyeron que cuando no se presentan cambios abruptos en la rigidez, la máxima demanda de deriva de entrepiso no está significativamente influenciada por la reducción en la rigidez a lo largo de la altura

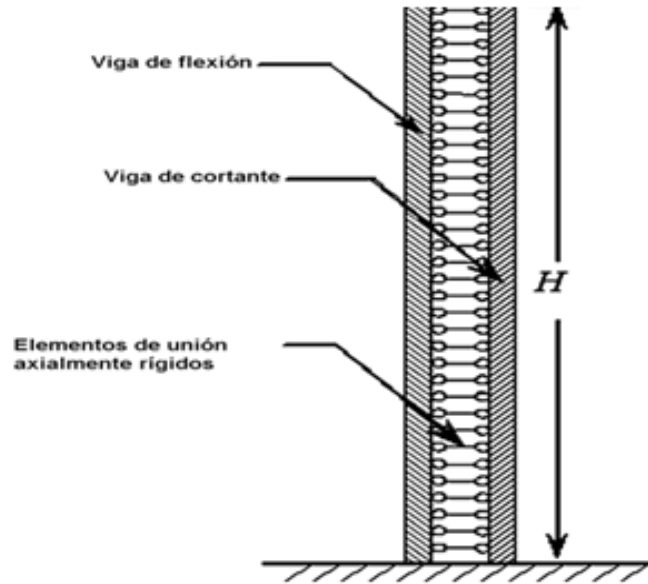


Figura 3. Modelo continuo simplificado

Fuente: Miranda y Akkar (2006)

Según Miranda y Akkar (2006), la respuesta del modelo uniforme de cortante y flexión sin amortiguar mostrado en la figura 3 sujeto a una aceleración en la base $\ddot{u}_g(t)$ está dada por la siguiente ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\rho}{EI} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + \frac{1}{H^4} \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} - \frac{\alpha^2}{H^4} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\rho}{EI} \frac{\partial^2 \ddot{u}_g(t)}{\partial t^2} \quad (8)$$

Donde ρ es la masa por unidad de altura en el modelo; H es la altura total del edificio; $u(x,t)$ es el desplazamiento lateral en la altura adimensional x igual a z/H (variando entre 0 en la base del edificio, y 1 en el techo del último nivel) en el tiempo t ; EI corresponde a la rigidez a flexión de la viga de flexión, y α es un factor de rigidez lateral definido de la siguiente forma:

$$\alpha = H \sqrt{\frac{GA}{EI}} \quad (9)$$

Donde GA es la rigidez a cortante de la viga de cortante.

El parámetro adimensional α es el que controla el grado de participación de deformación de cortante y de flexión en el modelo continuo, lo que quiere decir que es quien controla la forma de la deflexión lateral del modelo. Un valor de α igual a cero representa un modelo de flexión pura, y un valor de α igual a ∞ corresponde a un modelo con deformación de cortante total, mientras que valores intermedios de α representan edificaciones de varios pisos con deformación combinada (Miranda y Akkar, 2006).

Edificaciones en las cuales el sistema de resistencia lateral consiste únicamente en muros estructurales generalmente presentan de α entre 0 y 2. Valores de α entre 1.5 y 6 son recomendados para edificios con sistema de resistencia lateral combinado. Para edificios de pórticos resistentes a momentos los valores recomendados de α están entre 5 y 20 (Miranda y Reyes, 2002).

3.3.1 PROPIEDADES DINÁMICAS DEL MODELO CONTINUO

Para una aceleración inicial $\ddot{u}_g(t = 0) = 0$, la vibración libre no amortiguada del modelo está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\rho}{EI} \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + \frac{1}{H^4} \frac{\partial^4 u(x, t)}{\partial x^4} - \frac{\alpha^2}{H^4} \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = 0 \quad (10)$$

De acuerdo con Miranda y Taghavi (2005) la forma modal de una viga en voladizo que satisface la ecuación (10) está dada por:

$$\phi_i(x) = \sin(\gamma_i x) - \frac{\gamma_i}{\beta_i} \sinh(x\beta_i) - \eta_i \cos(\gamma_i x) + \eta_i \cosh(\beta_i x) \quad (11)$$

Donde β_i y η_i son parámetros adimensionales para el i-esimo modo de vibración, los cuales están dados por:

$$\beta_i = \sqrt{\alpha^2 + \gamma_i^2} \quad (12)$$

$$\eta_i = \frac{\gamma_i^2 \sin(\gamma_i) + \gamma_i \beta_i \sinh(\beta_i)}{\gamma_i^2 \cos(\gamma_i) + \beta_i^2 \cosh(\beta_i)} \quad (13)$$

Donde γ_i es el valor propio correspondiente al i-esimo modo de vibración.

Los valores de γ_i para el i-esimo modo de vibración se puede obtener con las raíces de la ecuación (14)

$$2 + \left(2 + \frac{\alpha^4}{\gamma_i^2 \beta_i^2}\right) \cos(\gamma_i) \cosh(\beta_i) + \left(\frac{\alpha^2}{\gamma_i \beta_i}\right) \sin(\gamma_i) \sinh(\beta_i) = 0 \quad (14)$$

Derivando la ecuación (11) con respecto a x se obtiene la derivada de la forma modal de la siguiente forma:

$$\phi'_i(x) = \frac{d\phi(x)}{dx} = \gamma_i \cos(\gamma_i x) - \gamma_i \cosh(x\beta_i) + \eta_i \gamma_i \sin(\gamma_i x) + \eta_i \beta_i \sinh(\beta_i x) \quad (15)$$

Las ecuaciones (11) y (15) son exactas, sin embargo, debido a que muchos equipos de cálculo utilizan puntos flotantes aritméticos estándar con un número relativamente pequeño de dígitos, para valores grandes de α , su uso en la

mayoría de estos equipos, puede llevar a resultados erróneos debido a la pérdida significativa de dígitos (Miranda y Akkar, 2006). Luego, las siguientes ecuaciones alternativas pueden ser utilizadas en los equipos que utilizan puntos flotantes aritméticos estándar, cuando α toma valores grandes:

$$\phi_i(x) = \sin(\gamma_i x) - \eta_i \cos(\gamma_i x) + \frac{1}{2} \left(\eta_i - \frac{\gamma_i}{\beta_i} \right) e^{\beta_i x} + \frac{1}{2} \left(\eta_i + \frac{\gamma_i}{\beta_i} \right) e^{-\beta_i x} \quad (16)$$

$$\phi'_i(x) = \gamma_i \cos(\gamma_i x) + \eta_i \gamma_i \sin(\gamma_i x) + \frac{1}{2} \beta_i \left(\eta_i - \frac{\gamma_i}{\beta_i} \right) e^{\beta_i x} - \frac{1}{2} \beta_i \left(\eta_i + \frac{\gamma_i}{\beta_i} \right) e^{-\beta_i x} \quad (17)$$

De igual forma Miranda y Akkar (2006) multiplicando la ecuación (14) por $2\gamma_i^2 \beta_i^2 e^{-\beta_i}$ y expresando las funciones hiperbólicas en términos exponenciales, obtienen una expresión alternativa de la ecuación característica, en donde no ocurre pérdida de dígitos significativos. La ecuación característica alternativa está dada por:

$$4\gamma_i^2 \beta_i^2 e^{-\beta_i} + (2\gamma_i^2 \beta_i^2 + \alpha^4) \cos(\gamma_i) + (\alpha^2 \beta_i \gamma_i) \sin(\gamma_i) + [(2\gamma_i^2 \beta_i^2 + \alpha^4) \cos(\gamma_i) - \alpha 2\gamma_i \beta_i \sin \gamma_i] e^{-2\beta_i} = 0 \quad (18)$$

Una vez calculados los valores propios, y conociendo el periodo fundamental del edificio, los periodos de vibración de los diferentes modos, pueden calcularse utilizando la siguiente razón de periodos:

$$\frac{T_i}{T_1} = \frac{\gamma_1}{\gamma_i} \sqrt{\frac{\gamma_1^2 + \alpha^2}{\gamma_i^2 + \alpha^2}} \quad (19)$$

Para un modelo continuo con distribución de masa uniforme, el factor de participación modal Γ_i puede ser calculado con la siguiente ecuación (Miranda y Reyes, 2006)

$$\Gamma_i = \frac{\int_0^1 \phi_i(x) dx}{\int_0^1 \phi_i^2(x) dx} \quad (20)$$

Las integrales mostradas en la ecuación anterior pueden ser resueltas en forma cerrada de la siguiente forma:

$$\int_0^1 \phi_i(x) dx = \frac{1}{2\gamma_i\beta_i^2} [2\beta_i^2 + 2\gamma_i^2 - 2\beta_i^2 \cos(\gamma_i) - 2\beta_i^2 \eta_i \sin(\gamma_i) + \beta_i \gamma_i (f_1 - f_2)] \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \int_0^1 \phi_i^2(x) dx = & \frac{1}{2} - \frac{1}{2\gamma_i} \sin(\gamma_i) \cos(\gamma_i) - \frac{\eta_i}{\gamma_i} \sin^2(\gamma_i) + \frac{\eta_i^2}{2} + \frac{\eta_i^2}{2\gamma_i} \sin(\gamma_i) \cos(\gamma_i) \\ & + \frac{\beta_i}{\beta_i^2 + \gamma_i^2} (f_1 - f_2) [\sin(\gamma_i) - \eta_i \cos(\gamma_i)] \\ & - \frac{\gamma_i}{\beta_i^2 + \gamma_i^2} (f_1 + f_2) [\cos(\gamma_i) + \eta_i \sin(\gamma_i)] \\ & + \frac{\sinh(\beta_i)}{4\beta_i} \left[f_1 \left(\eta_i - \frac{\gamma_i}{\beta_i} \right) + f_2 \left(\eta_i + \frac{\gamma_i}{\beta_i} \right) \right] + \frac{f_1 f_2}{2} \end{aligned} \quad (22)$$

Donde f_1 y f_2 son funciones dadas por:

$$f_1 = e^{\beta_i} \left(\eta_i - \frac{\gamma_i}{\beta_i} \right) \quad (23)$$

$$f_2 = e^{-\beta_i} \left(\eta_i + \frac{\gamma_i}{\beta_i} \right) \quad (24)$$

3.4. RESPUESTA DINÁMICA DE UN SISTEMA DINÁMICO DE UN GRADO DE LIBERTAD

Cuando se pretende determinar la respuesta de un sistema lineal de un grado de libertad utilizando procedimientos paso a paso, en general se conoce el desplazamiento de la masa, su velocidad y aceleración en un instante t ; obteniendo su desplazamiento, velocidad, y aceleración al final de un intervalo de tiempo Δt (García, 1998).

Para obtener la respuesta de modelos de un grado de libertad ante los registro de aceleraciones se uso el método paso a paso con la suposición de aceleración lineal.

Si inicialmente suponemos es un movimiento rectilíneo, y este tiene una aceleración constante a , entonces la velocidad v , después de un intervalo de tiempo Δt está dada por:

$$v = \int_t^{t+\Delta t} a dt = v_0 + (\Delta t)a \quad (25)$$

Donde v_0 corresponde a la velocidad al comienzo del intervalo.

El espacio que recorre durante el intervalo de tiempo Δt está dado por:

$$s = \int_t^{t+\Delta t} (v_0 + (\Delta t)a) dt = s_0 + (\Delta t)v_0 + (\Delta t)^2 \frac{a}{2} \quad (26)$$

Donde s_0 es el espacio recorrido hasta el comienzo de (Δt) .

Si se considera un sistema lineal amortiguado, el cual es afectado por una fuerza arbitraria que varía en el tiempo $P(t)$, el comportamiento de este sistema esta descrito por la siguiente ecuación diferencial de equilibrio:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = P(t) \quad (27)$$

Si se asume que la aceleración varía linealmente durante el intervalo de tiempo, entonces se puede decir que:

$$\ddot{u} = \ddot{u}_i + \left(\frac{\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i}{\Delta t} \right) (t - t_i) \quad (28)$$

Integrando esta expresión se obtiene la siguiente ecuación para la velocidad

$$\dot{u} = \dot{u}_i + \ddot{u}_i(t - t_i) + \left(\frac{\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i}{\Delta t} \right) \frac{(t - t_i)^2}{2} \quad (29)$$

Cuando se evalúa esta ecuación para el tiempo t_{i+1} se obtiene la expresión para la velocidad al final del intervalo de tiempo:

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \quad (30)$$

Integrando la ecuación (33) se obtiene la expresión para el desplazamiento:

$$u(t) = u_i + \dot{u}_i(t - t_i) + \ddot{u}_i \frac{(t - t_i)^2}{2} + \left(\frac{\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i}{\Delta t} \right) \frac{(t - t_i)^3}{6} \quad (31)$$

De la ecuación anterior se obtiene el desplazamiento para el final del intervalo de tiempo

$$u(t) = u_i + \dot{u}_i(\Delta t) + \ddot{u}_i \frac{(\Delta t)^2}{3} + (\ddot{u}_{i+1}) \frac{(\Delta t)^2}{6} \quad (32)$$

Utilizando la ecuación de equilibrio (31) evaluada al final del intercalo se obtiene:

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\dot{u}_{i+1} + ku_{i+1} = P(t = t_{i+1}) \quad (33)$$

Ahora se puede despejar el valor de la aceleración al final del intervalo, utilizando las ecuaciones (33) y (35) para los valores de la velocidad y desplazamiento, respectivamente:

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{P(t = t_{i+1})/m - \omega^2 u_i - (2\xi\omega + \omega^2\Delta t)\dot{u}_i - (\omega\Delta t)(\xi + \omega\Delta t/3)\ddot{u}_i}{1 + \xi\omega(\Delta t) + (\omega\Delta t)^2/6} \quad (34)$$

4. AMENAZA SÍSMICA

4.1 DETERMINACIÓN DE ESCENARIOS SÍSMICOS COMPATIBLES

El estudio de zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga presentado por INGEOMINAS (2001) indica que la amenaza para la ciudad de Bucaramanga está controlada por la posible ocurrencia de un sismo a lo largo de las Fallas Bucaramanga-Santa Marta, Suárez, Salinas y la Frontal de los Llanos Orientales. Sin embargo, este mismo estudio propone tomar como escenarios de amenaza la Falla Bucaramanga-Santa Marta, y la Falla Frontal de los Llanos Orientales. Lo anterior se debe a que los posibles efectos generados por un sismo en las fallas Suárez y Salinas estarían cubiertos por los escenarios escogidos.

Según INGEOMINAS (2001) un escenario sísmico compatible para la Falla de Bucaramanga-Santa Marta sería un evento con magnitudes entre 5.6 y 6.0, y distancia de la fuente al sitio entre 13 y 25 km. De igual manera para la Falla Frontal de los Llanos Orientales determinó, que eventos con magnitudes entre 6.9 y 7.3 y distancias al sitio de 60-80 km son compatibles con el nivel de amenaza.

Una vez escogidos los escenarios sísmicos compatibles con las fuentes que afectan la región, INGEOMINAS (2001) presentó los acelerogramas de registros reales obtenidos en roca compatibles mostrados en la figuras 4 y 5. Además, el mismo estudio estableció que los acelerogramas compatibles con la Falla de Bucaramanga-Santa Marta deben ser escalados a 0.16g, y de igual forma los acelerogramas compatibles con la Falla Frontal de los Llanos Orientales deben escalarse a 0.21g, que son los valores correspondientes a la probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, es decir, un periodo de retorno de 475 años. Los registros son compatibles con el contenido frecuencial, duración y energía de eventos producidos por estas fallas.

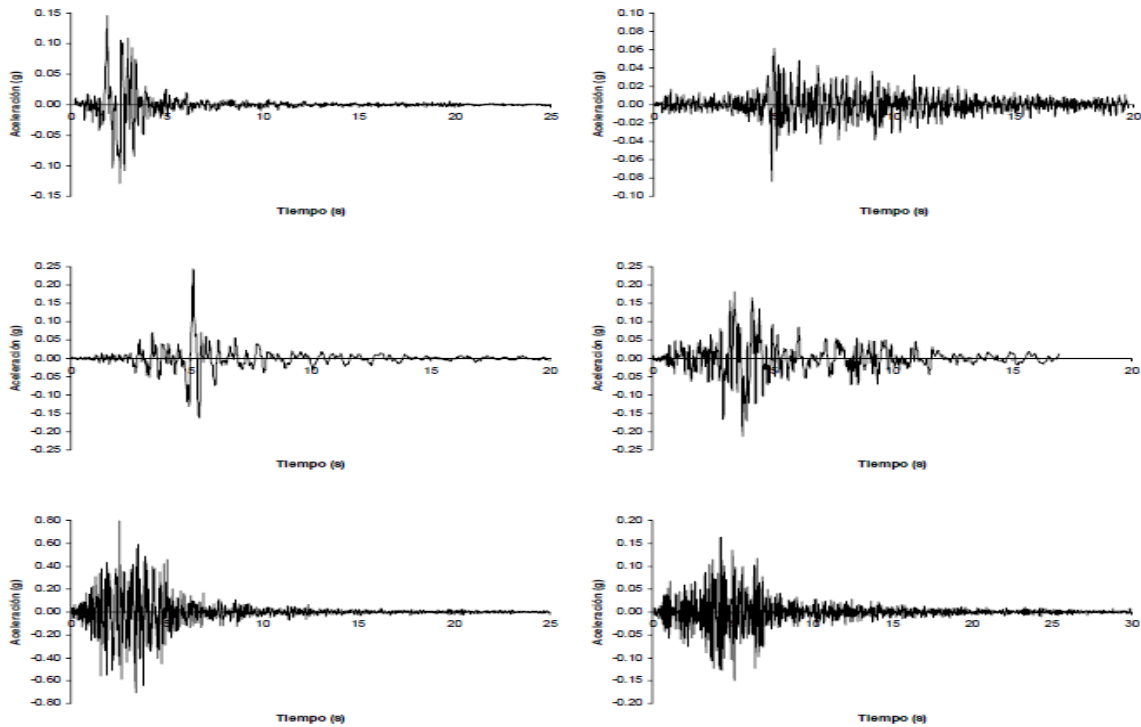


Figura 4. Acelerogramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga–Santa Marta. De izquierda a derecha y de arriba abajo se presentan los acelerogramas de Helena, Friuli, Mammoth, Coalinga, Whittier y Umbria.

Fuente: INGEOMINAS (2001).

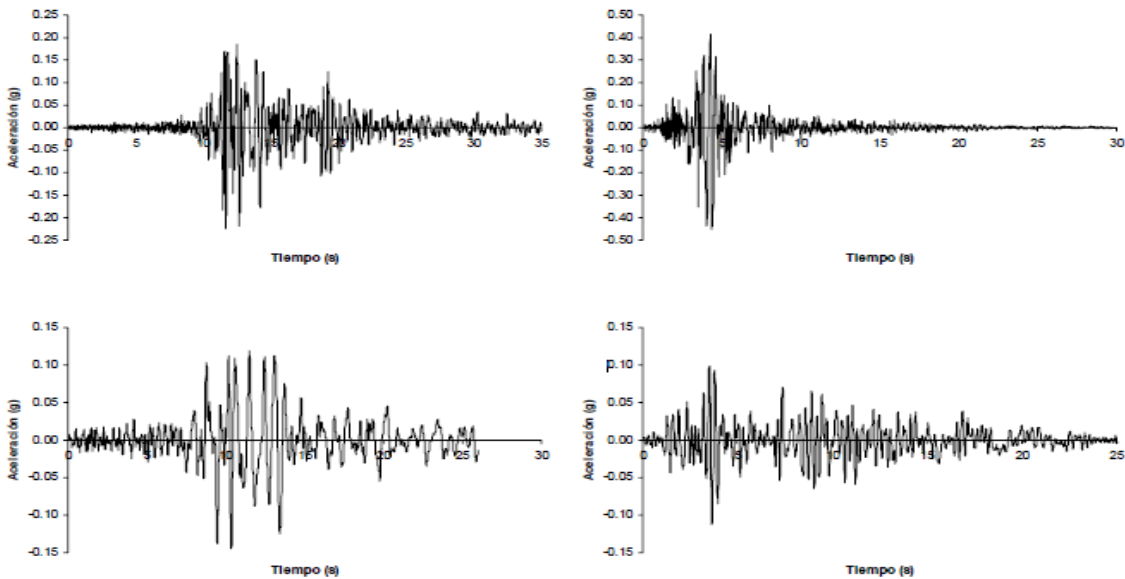


Figura 5. Acelerogramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Frontal. De izquierda a derecha y de arriba abajo se presentan los acelerogramas de Montenegro, Loma Prieta, Pretolia y Dulze.

Fuente: INGEOMINAS (2001)

4.2 ZONIFICACIÓN DE BUCARAMANGA

4.2.1 ZONAS GEOTÉCNICAS

INGEOMINAS (2001) basados en el mapa geológico de la ciudad, información recolectada en los informes de suelos, y en la información obtenida en las perforaciones profundas propuso las siguientes zonas geotécnicas para Bucaramanga:

- **ZONA 1A Rocas Sedimentarias con Pendientes Moderadas a Bajas**

Se encuentra ubicada en el extremo occidental y norte del área metropolitana de Bucaramanga, conformando la mesa de Lebrija al occidente del escarpe del cerro Palonegro, la mesa de Ruitoque Alto incluyendo el área de Acapulco y el sector el barrio Cañaveral en Floridablanca.

- **ZONA 1B Rocas Sedimentarias con Pendientes Fuertes**

Se encuentra ubicada en las laderas norte, oriental, suroriental y suroccidental de la Mesa de Ruitoque, incluyendo las laderas de los bajos de Ruitoque y las cuencas de la quebrada Guatiguará y El Palmar; en las laderas orientales y nororientales de la Mesa de Lebrija arriba del escarpe del cerro de Palonegro y en las laderas del cerro de La Cantera en Piedecuesta. Esta zona incluye la ladera occidental de la mesa de la cumbre, las laderas de la mesa de los Santos y algunos sectores al norte del área Metropolitana de Bucaramanga.

- **ZONA 1C Rocas Sedimentarias Fracturadas Afectadas por Fallamiento Geológico**

Se ubica en el extremo occidental del río de Oro, escarpe oriental del cerro de Palonegro y las laderas cercanas al escarpe norte de la Mesa de Ruitoque.

- **ZONA 2A Rocas Ígneas y Metamórficas de Alta Pendiente**

Localizada en el sector oriental del área metropolitana, por encima de la zona de mayor influencia del sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta, conformando el denominado macizo de Santander donde se incluyen las cuencas medias de los ríos y quebradas que nacen en el mismo.
- **ZONA 2B Rocas Ígneas y Metamórficas Fracturadas Afectadas por Fallas Geológicas**

Se presenta como una franja alargada de dirección nornoroeste, correspondiente a la zona de alto fracturamiento asociado al sistema de fallas Bucaramanga – Santa Marta, incluyendo las laderas nororientales de Bucaramanga ocupadas por asentamientos humanos, el cerro de Morrórico y las colinas del piedemonte del macizo de Santander
- **ZONA 3A Limos Rojos del Abanico Aluvial de Bucaramanga**

Corresponde a la zona más urbanizada de Bucaramanga (sector no erosionado), e incluye los barrios del Tejar, Diamante y Provenza hasta el barrio El Bosque.
- **ZONA 3B Escarpes de la Meseta de Bucaramanga**

La zona se encuentra localizada en la corona de los escarpes del Abanico de Bucaramanga, siguiendo una línea continua a lo largo del perímetro de la zona 3A e incluye las áreas junto al escarpe occidental de Bucaramanga y los sectores de los barrios localizados sobre éste.
- **ZONA 4A Miembros Órganos y Gravoso No Afectada por Procesos Erosivos**

Se localiza en el sector no afectado por procesos activos de erosión dentro de la formación Órganos e incluye principalmente los sectores de las mesetas de: Barrio Los Colorados, barrio La Cumbre, sector antiguo de Girón, barrio Kennedy y algunos sectores de Floridablanca.

- **ZONA 4B Miembro Órganos Afectada por Procesos Erosivos**

Esta zona conforma la escarpa occidental y sur del Abanico-Terraza de Bucaramanga, así como parte de las zonas norte y occidental de la mesa de Ruitoque, parte superior de los valles aluviales del río de Oro, río Frío y quebrada de la Iglesia.
- **ZONA 4C Miembros Órganos y Limos Rojos en Laderas Susceptibles a Deslizamientos**

Se localiza sobre laderas en los siguientes sectores del Area Metropolitana: Laderas del barrio El Reposo y contiguos, laderas de la meseta de La Cumbre, laderas de las quebradas La Iglesia, La Cascada, El Cacique, El Penitente y Zapamanga.
- **ZONA 5 Flujos de Escombros del Piedemonte del Macizo de Santander**

Se localiza al sur occidente del área de estudio y sobre esta se encuentran las siguientes localidades: Sector urbano antiguo de Floridablanca, sector carabineros en Floridablanca, valle Floridablanca – Piedecuesta, sector urbano antiguo de Piedecuesta, valles del río Lato de Guatiguará y Barroblanco en Piedecuesta.
- **ZONA 6A Valles Aluviales de Los Ríos y Quebradas Principales**

Localizada sobre los valles y llanuras de los ríos de Oro, Suratá, Frío y algunas quebradas importantes. Más específicamente la zona se encuentra en: Valle del río de Oro y sus quebradas afluentes desde Piedecuesta hasta el Café Madrid, valle del río Suratá desde Bosconia hasta el Café Madrid, valle medio de la quebrada La Loma, valle de la quebrada de La Iglesia desde el Viaducto Benjamín García Cadena hasta Chimitá, valle de la quebrada Chimitá, valle del río Frío y sus quebradas afluentes desde la urbanización Bucarica hasta Castilla Real, valles del río Lato, quebrada La Estancia y otros cauces menores.

- **ZONA 6B Valles Aluviales de los Ríos Afectados por Procesos de Erosión**

En esta zona se incluyen las áreas de depósitos aluviales de los ríos de Oro, río Frío y quebrada de La Iglesia entre otros, afectados directamente por procesos de erosión relacionados con la dinámica de las corrientes de agua. Las áreas correspondientes a la zona 6B se encuentran localizadas en las riberas de los ríos y quebradas en toda el Área Metropolitana, entre estas áreas están: Riberas del río de Oro desde Bahondo hasta el Café Madrid y riberas del río Frío desde la planta de tratamiento de aguas residuales hasta su desembocadura.

- **ZONA 7 Depósitos de Coluvión**

En esta zona se incluyen las áreas de depósitos coluviales sobre las pendientes de las laderas y en toda el Área Metropolitana de Bucaramanga existen una gran cantidad de coluviones principales localizados en: Piedemonte del macizo de Santander, laderas del cerro de Palonegro, escarpe occidental de la meseta de Bucaramanga, laderas de la mesa de Ruitoque, laderas de la colina de la Virgen en Piedecuesta y laderas laterales de los valles aluviales de las quebradas.

- **ZONA 8A Zona susceptible a deslizamientos en el Norte de Bucaramanga**

En esta zona se incluyen las áreas del bloque hundido y erosionado del abanico de Bucaramanga al norte de la Meseta, la cual presenta susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos de tierra de gran magnitud. El área susceptible a deslizamientos en la zona norte de la meseta de Bucaramanga se encuentra localizada al norte, nororiente y noroccidente del escarpe norte de la Meseta e incluye las siguientes áreas: Ciudad Norte desde la Universidad Industrial de Santander hasta el valle del río Suratá, ladera nororiental del Norte de Bucaramanga desde el barrio Los Pinos hasta Bosconia, ladera noroccidental del Norte de Bucaramanga

desde el barrio María Paz hasta el valle del río de Oro, en esta zona no está incluido el sector del barrio Kennedy.

- **ZONA 8B Zona de deslizamiento activo en el Norte de Bucaramanga**

En esta zona se incluyen las áreas que se encuentran dentro del deslizamiento activo del Norte de Bucaramanga. El área del deslizamiento incluye los siguientes barrios: Esperanza III, Mirador, Lizcano, José María Córdoba, Villa Helena I etapa y aproximadamente el 60% del barrio Villa Rosa.

- **ZONA 9 Rellenos sueltos**

En esta zona se incluyen las áreas de rellenos de suelos sueltos y basuras. Las áreas correspondientes a la zona 9, se encuentran localizadas en una gran cantidad de sitios del Área Metropolitana de Bucaramanga.

4.2.2. ZONAS SÍSMOGEOTECNICAS

INGEOMINAS (2001) teniendo en cuenta las características geológicas, geofísicas y geotécnicas de la ciudad presenta las siguientes zonas como representativas para el cálculo de la respuesta dinámica:

Zona 1: Roca.

Conformada básicamente por roca de las Formaciones Girón y Neis de Bucaramanga.

Zona 2: Abanico de Bucaramanga.

En esta zona se encuentra asentada la población del municipio de Bucaramanga.

Zona 3: Bad Lands.

Consiste básicamente en la Formación Órganos afectada por procesos erosivos.

Zona 4: Flujos de escombros.

En esta zona se encuentran los municipios de Piedecuesta y Florida.

Zona 5: Terrazas Bajas y Medias.

En esta zona se encuentran parte de municipio de Girón y el Valle Aluvial del río Frío.

Zona 6: Llenos.**Zona 7: Cañaveral.**

Debido a que pertenece a la zona de Flujos de Escombros, pero las características son diferentes a las definidas en dicha zona, INGEOMINAS (2001) decidió hacer una consideración especial y dejarla como zona independiente.

INGEOMINAS (2001) muestra que para los escenarios sísmicos correspondientes a la Falla Bucaramanga-Santa Marta y la Falla Frontal de los Llanos desde el punto de vista de respuesta dinámica de las 7 zonas propuestas existen 3 grupos de respuesta espectral similar en amplitud y forma. Un primer grupo reúne las respuestas espectrales de las zonas de roca pura, suelos residuales sobre roca sana 1G, 1N, 3 y 7, el segundo grupo está compuesto por las zonas 2, 4 y 5, aquí está incluida la mayoría del área construida, que se cimienta sobre depósitos de suelo rígido. El espectro para las zonas de llenos, resulta ser un caso especial y presenta las mayores aceleraciones esperadas (1.20g para la Falla Bucaramanga-Santa Marta, y 1.25g para la Falla Frontal de los Llanos). Teniendo en cuenta esto, INGEOMINAS (2001) denominó a estos 3 grupos Zona 1, Zona 2, y Zona 3 respectivamente.

4.3 ACELEROGRAMAS EN SUPERFICIE

Para calcular los acelerogramas en superficie de las zonas sismogeotécnica 1 y 2 de Bucaramanga se utilizaron las características del suelo que INGEOMINAS

(2001) basado en los acelerogramas registrados, y características geotécnicas del subsuelo utilizó para la calibración de los modelos dinámicos. Además, para encontrar los valores de los acelerogramas en superficie de la zona sismogeotécnica 3 se utilizaron las características del suelo de la zona Llenos presentada anteriormente.

Descripción	ESPESOR (m)	γ_t (Ton/m ³)	Vs (m/s)	Curva de degradación usada
Flujo de escombros	15	2,1	800	Gravoso
Roca		2,4	2000	Roca

Tabla 1. Características del suelo utilizadas para obtener los valores del acelerograma en superficie de la zona sismogeotécnica 1.

Fuente: INGEOMINAS (2001).

Descripción	ESPESOR (m)	γ_t (Ton/m ³)	Vs (m/s)	Curva de degradación usada
Limos Rojos	3	1,6	450	Limos Rojos
Gravoso	27	2,3	800	gravoso
Órganos	20	2,15	1300	Órganos
Roca		2,4	2000	Roca

Tabla 2. Características del suelo utilizadas para obtener los valores del acelerograma en superficie de la zona sismogeotécnica 2.

Fuente: INGEOMINAS (2001).

Descripción	ESPESOR (m)	γ_t (Ton/m ³)	Vs (m/s)	Curva de degradación usada
Llenos	12,5	1,7	300	Arena suelta
Gravoso	17,5	2,3	800	gravoso
Órganos	20	2,15	1300	Órganos
Roca		2,4	2000	Roca

Tabla 3. Características del suelo utilizadas para obtener los valores del acelerograma en superficie de la zona sismogeotécnica 3.

Fuente: INGEOMINAS (2001).

Las figuras 6, 7, 8, y 9 muestran las curvas de degradación de módulo de corte, y curvas de amortiguamiento presentadas por INGEOMINAS (2001).

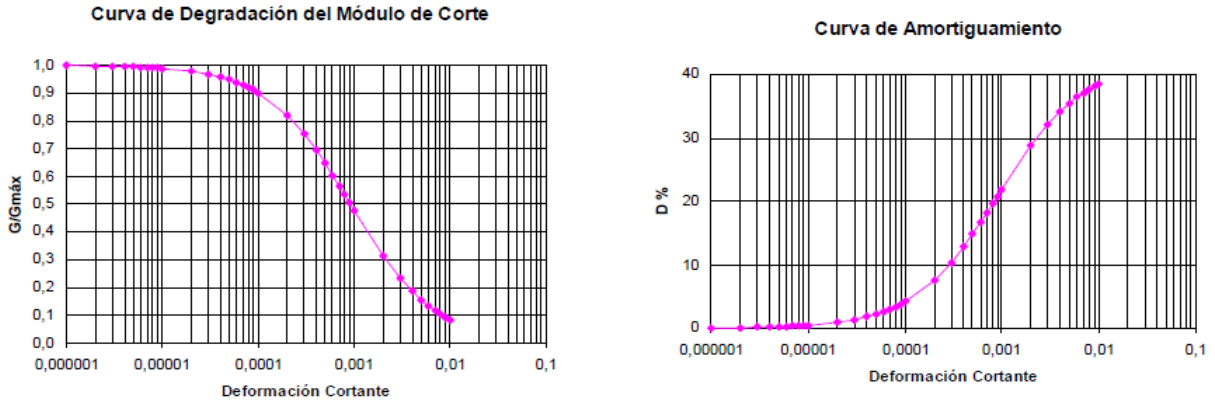


Figura 6. Curvas de degradación de módulo de corte, y amortiguamiento para los materiales del miembro Órganos (Formación Bucaramanga).

Fuente: INGEOMINAS (2001).

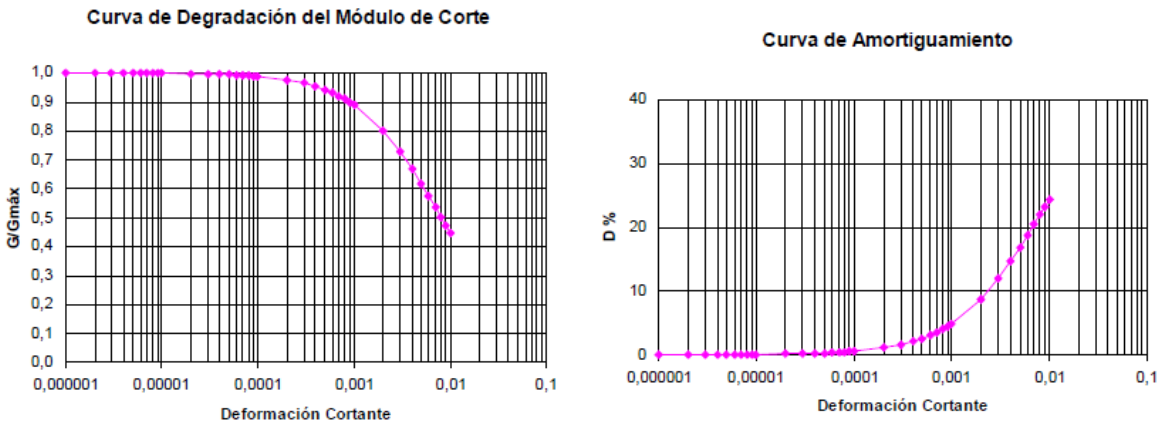


Figura 7. Curvas de degradación de módulo de corte, y amortiguamiento para los materiales del miembro Gravoso (Formación Bucaramanga).

Fuente: INGEOMINAS (2001).

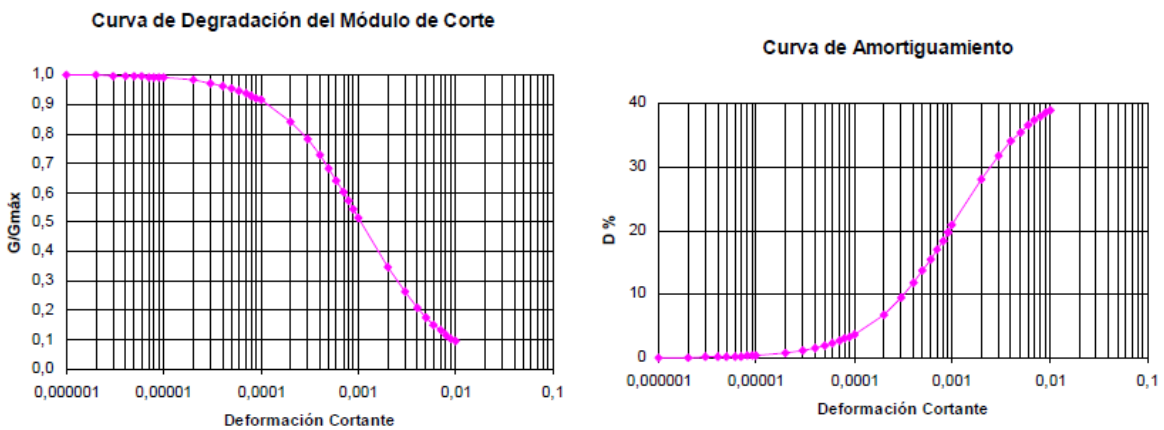


Figura 8. Curvas de degradación de módulo de corte, y amortiguamiento para los materiales del miembro Limos Rojos (Formación Bucaramanga).

Fuente: INGEOMINAS (2001).

INGEOMINAS (2001) para aquellos materiales diferentes a los anteriores y sobre los cuales no tenían datos de comportamiento dinámico, empleó curvas teóricas o evaluadas en dicho estudio.

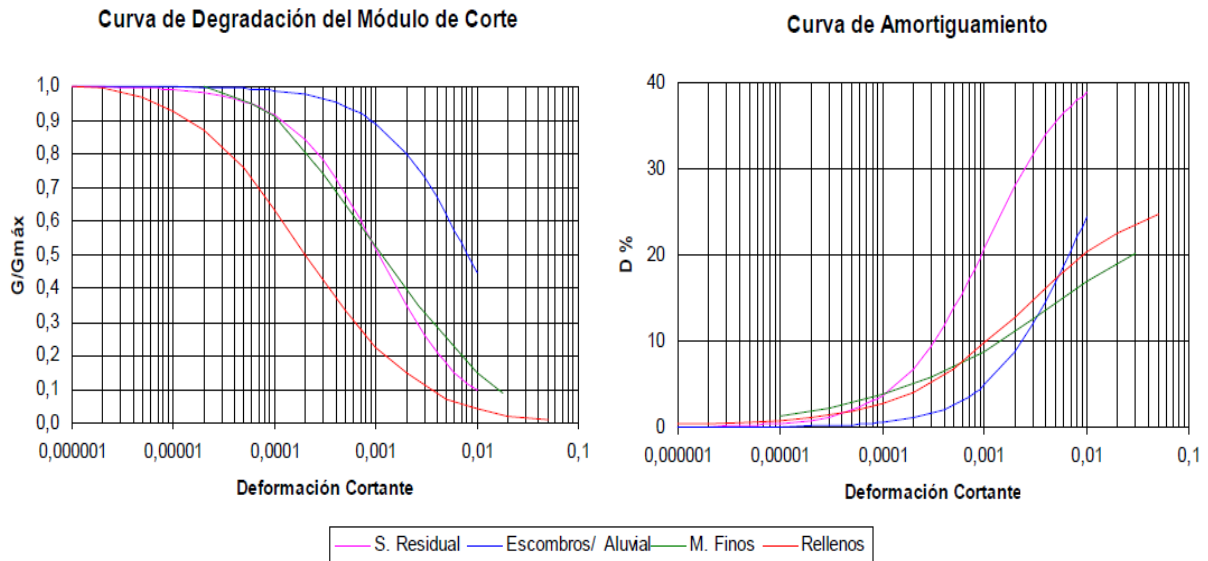


Figura 9. Curvas de degradación de módulo de corte, y amortiguamiento para los materiales de Suelo residual, Escombros, Aluvial, Miembro Finos, Rellenos.

Fuente: INGEOMINAS (2001).

Utilizando las características, y propiedades dinámicas del suelo presentadas por INGEOMINAS (2001) para las 3 zonas sismogeotécnicas, y mediante el programa SHAKE se calcularon los acelerogramas en superficie para cada zona sismogeotécnica.

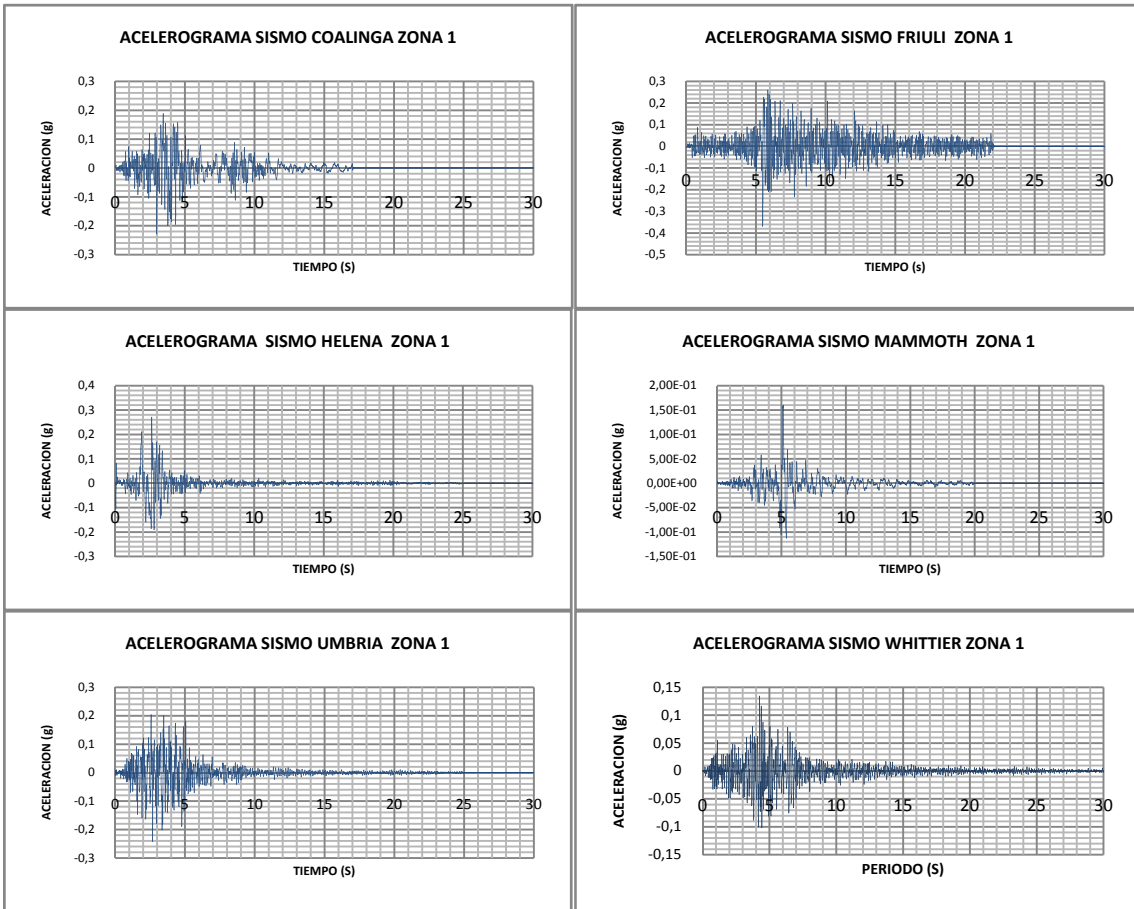


Figura 10. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga-Santa Marta para la zona 1. Fuente: El autor.

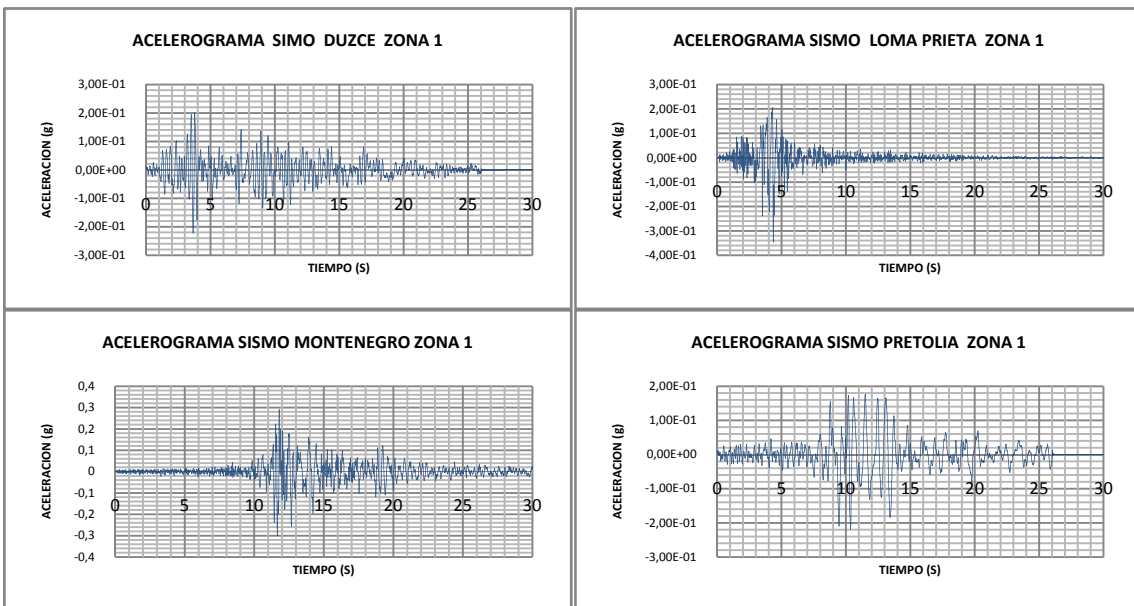


Figura 11. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Frontal para la zona 1. Fuente: El autor.

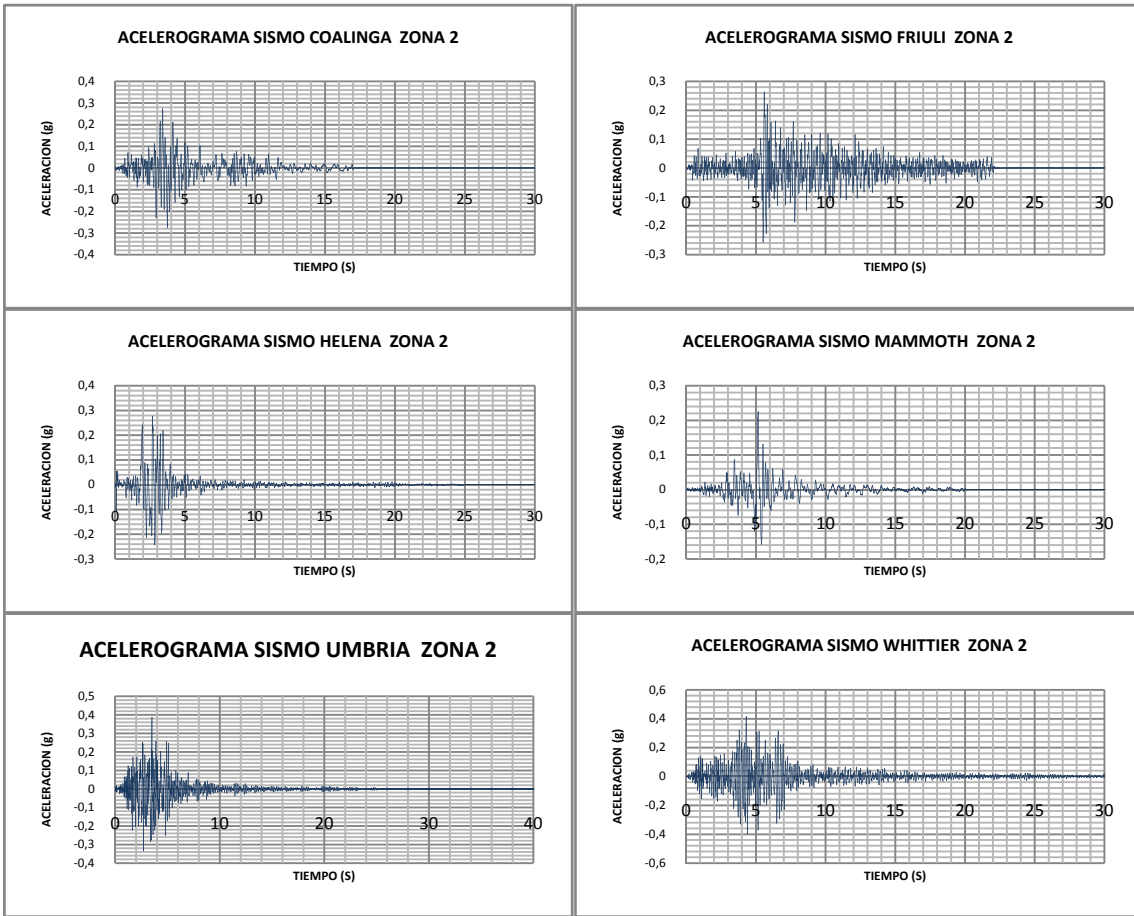


Figura 12. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga-Santa Marta para la zona 2
Fuente: El autor.

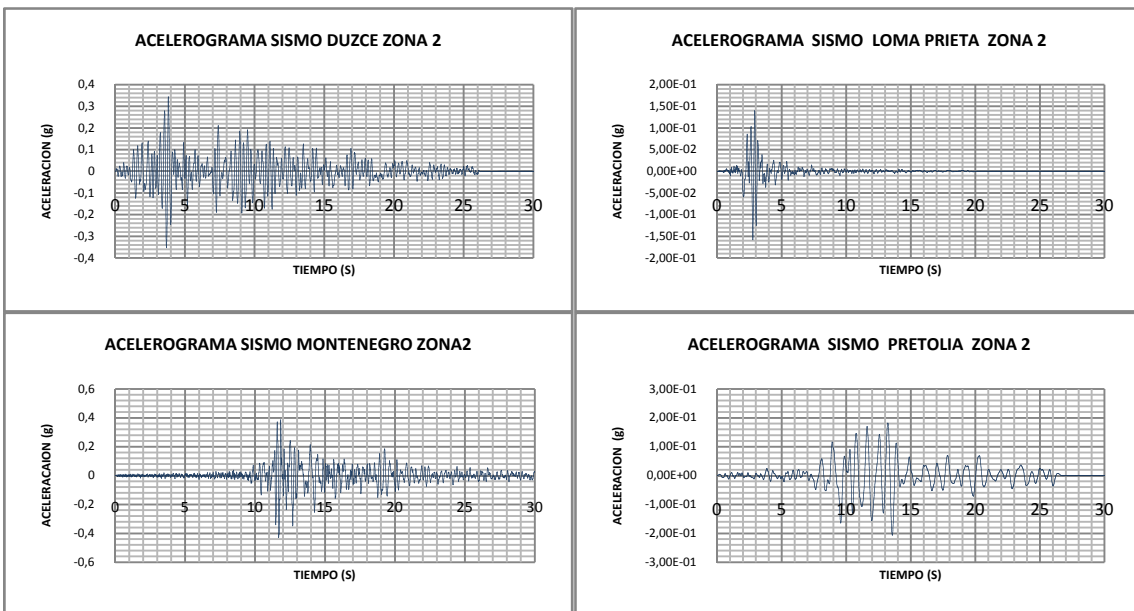


Figura 13. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Frontal para la zona 2
Fuente: El autor.

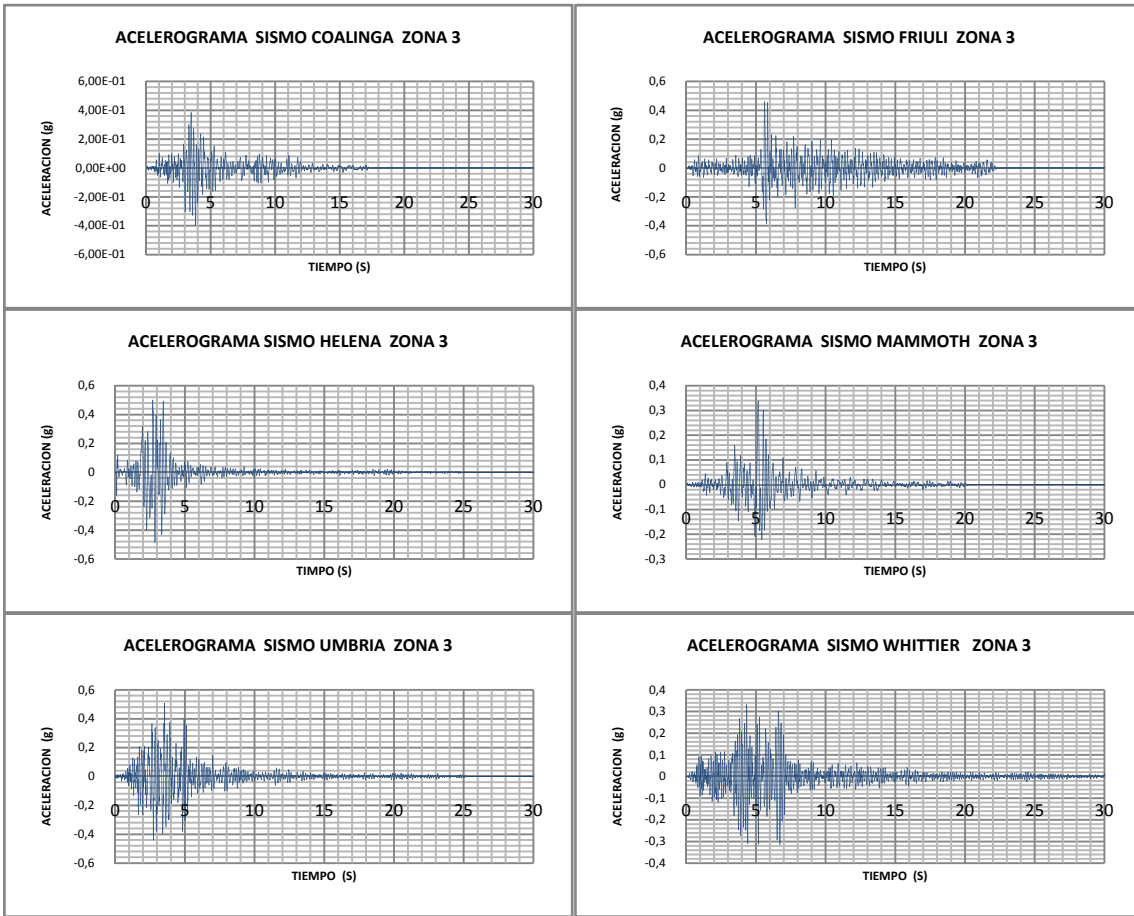


Figura 14. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga-Santa Marta para la zona 3.
Fuente: El autor.

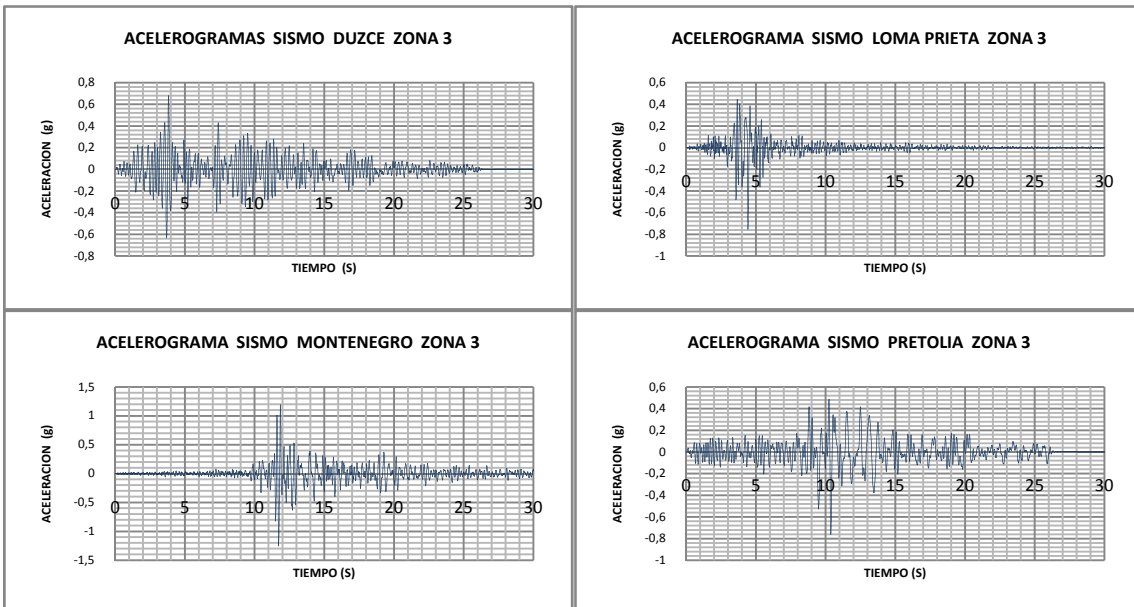


Figura 15. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Frontal para la zona 3
Fuente: El autor.

Debido a que INGEOMINAS (2001) no presenta los acelerogramas en superficie, para verificar la validez de los acelerogramas obtenidos en este estudio, se calcularon espectros respuesta de aceleración y se compararon con los espectros de aceleración presentados por INGEOMINAS (2001) para cada zona sismogeotécnica.

En la figuras (16, 18, 20, 24 y 26) se muestran los espectros respuesta de aceleración presentados por INGEOMINAS (2001) para cada zona sismogeotécnica, y los obtenidos en este estudio, observándose la similitud de estos, lo cual indica que acelerogramas calculados en este estudio coinciden con los utilizados por INGEOMINAS (2001).

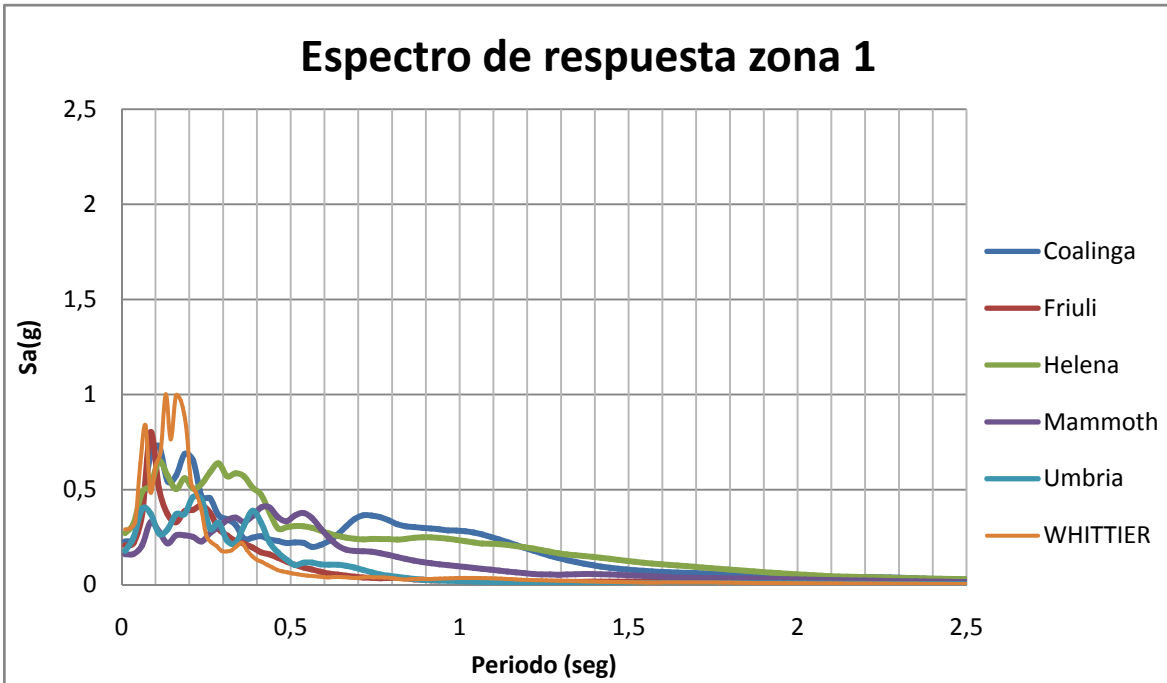


Figura 16. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Bucaramanga-Santa Marta, para la zona 1, calculados con los acelerogramas obtenidos en este estudio.

Fuente: El autor.

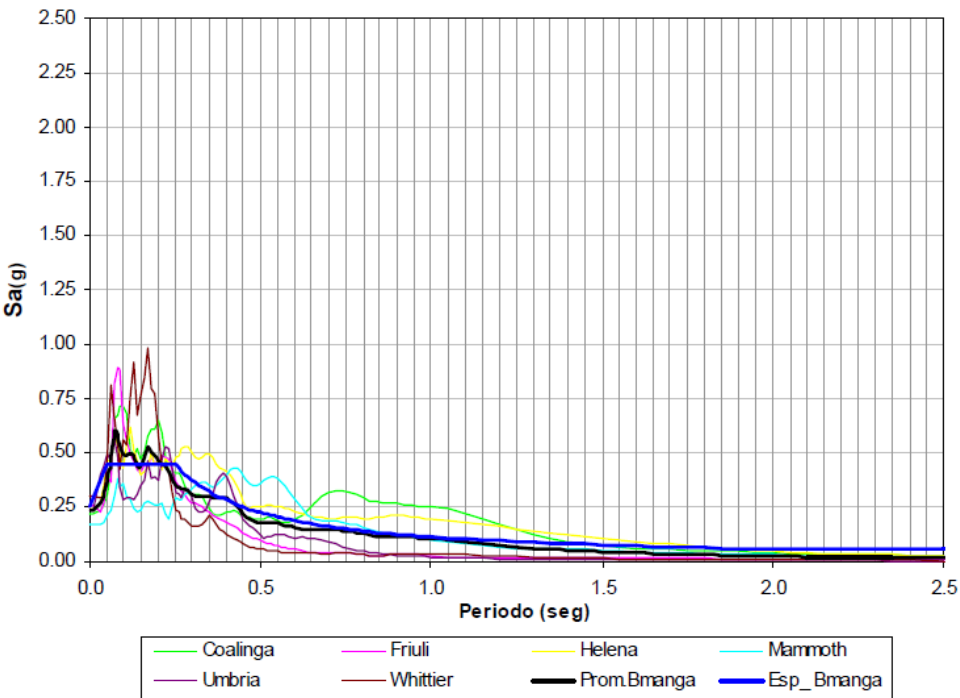


Figura 17. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Bucaramanga-Santa Marta, para la zona 1, presentados por Ingeominas (2001).

Fuente: INGEOMINAS (2001).

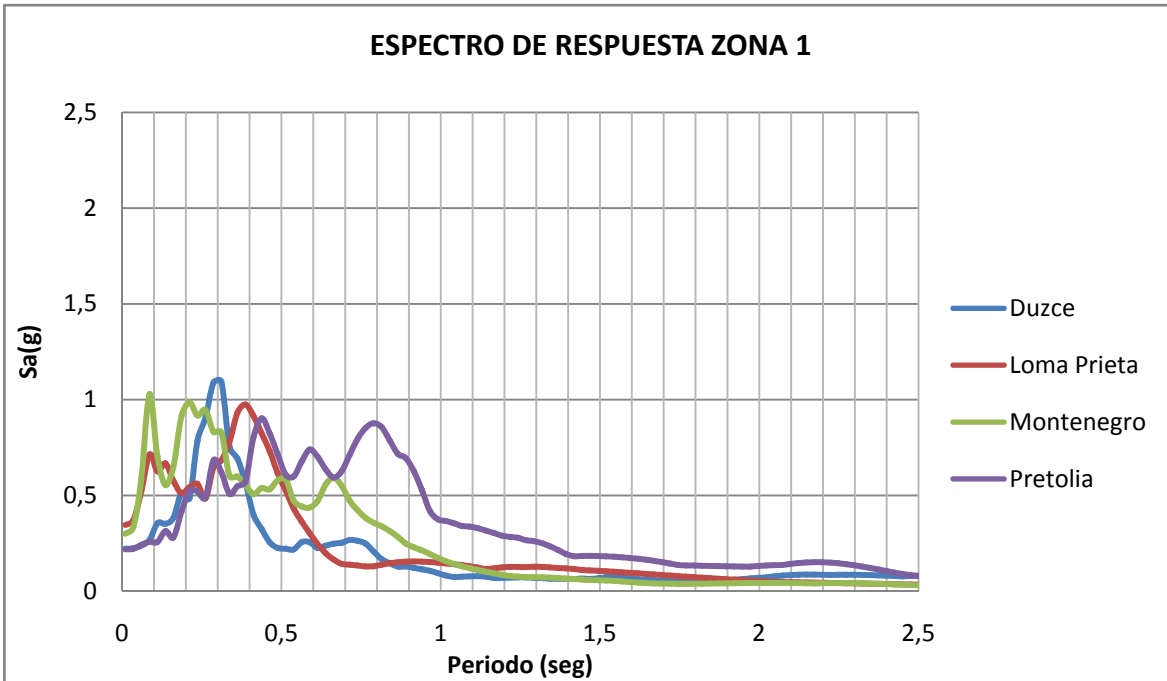


Figura 18. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Frontal de los Llanos, para la zona 1, calculados con los acelerogramas obtenidos en este estudio.

Fuente: El autor.

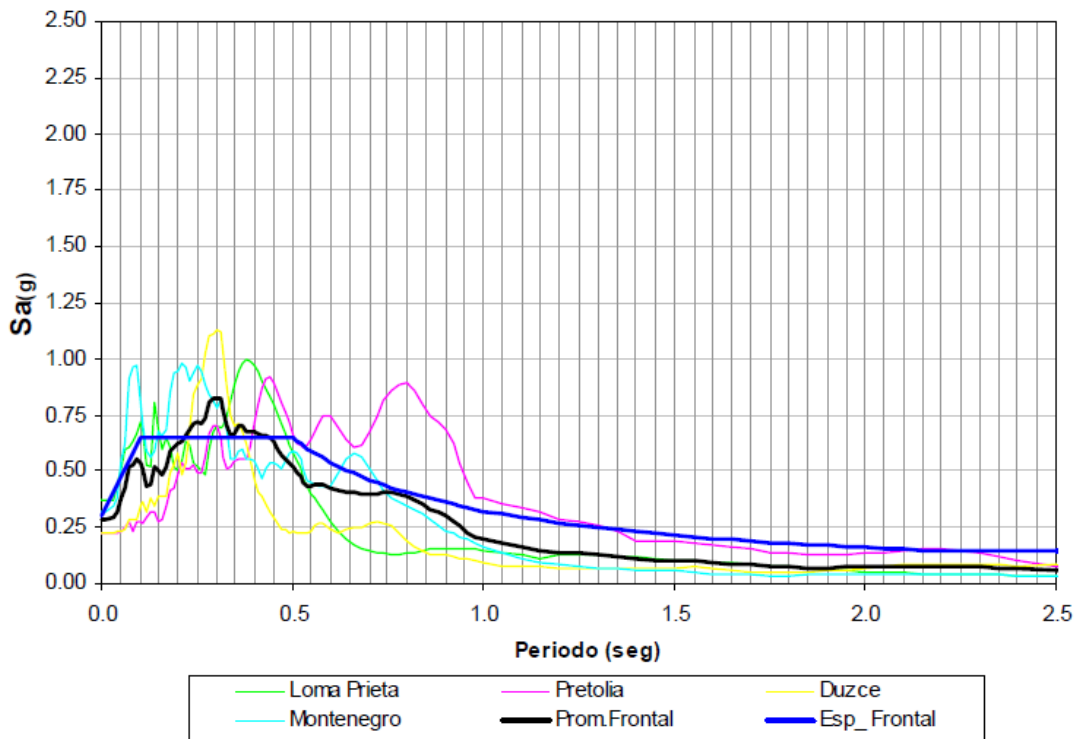


Figura 19. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Frontal de los Llanos, para la zona 1, presentados por Ingeominas (2001).

Fuente: INGEOMINAS (2001).

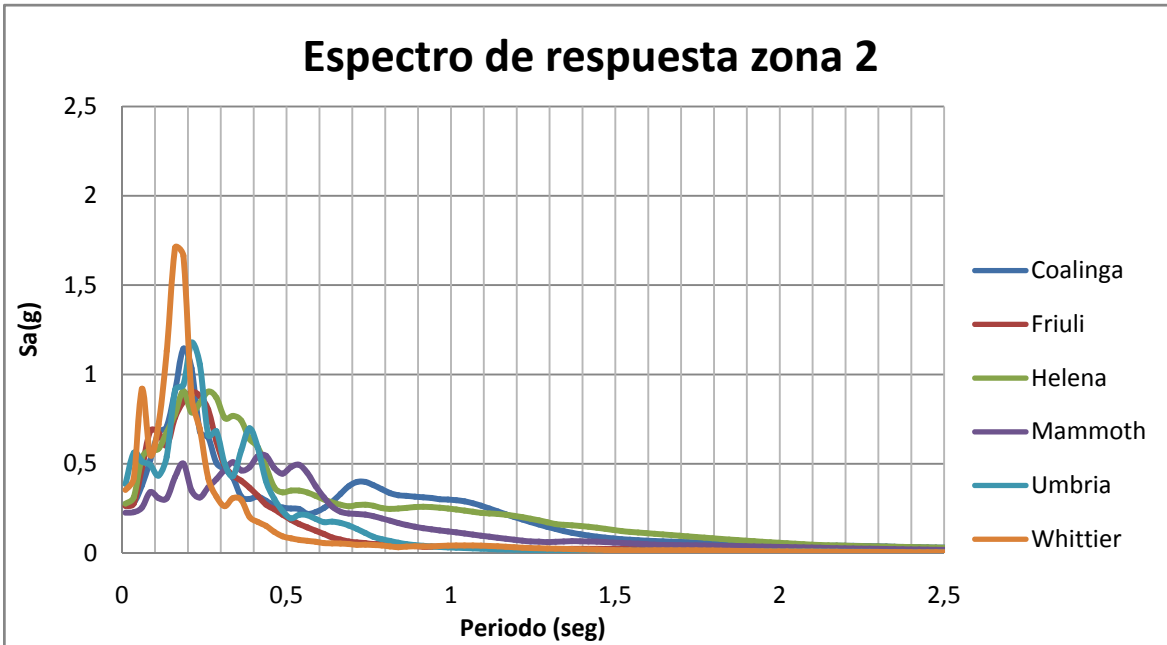


Figura 20. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Bucaramanga-Santa Marta, para la zona 2, calculados con los acelerogramas obtenidos en este estudio.

Fuente: El autor.

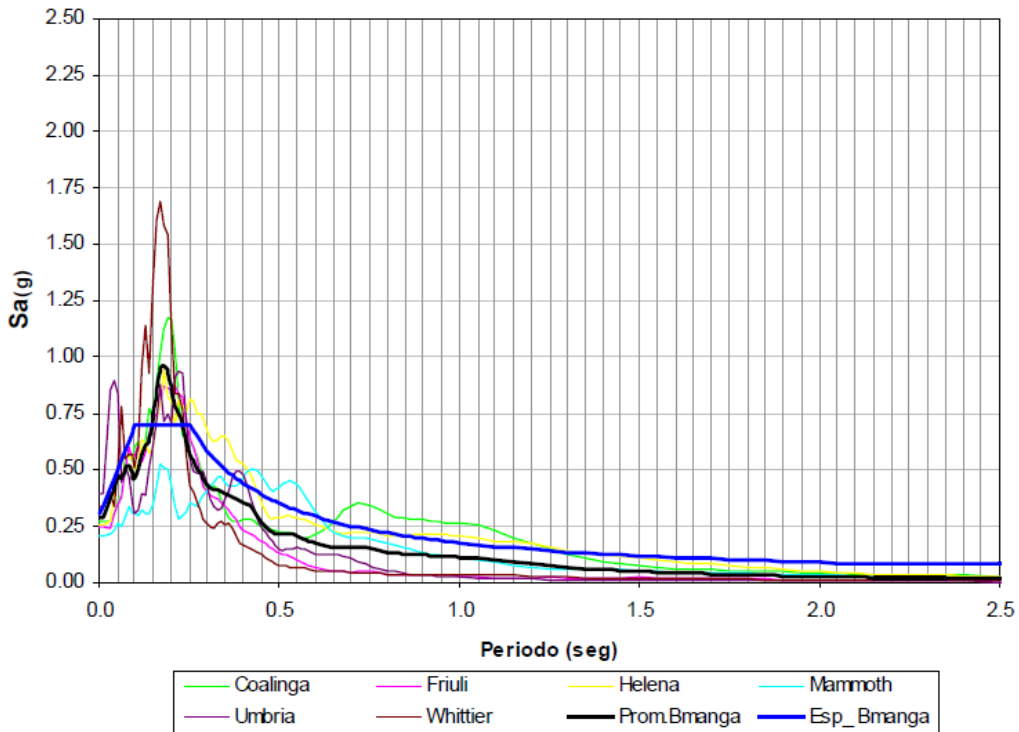


Figura 21. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Bucaramanga-Santa Marta, para la zona 2, presentados por Ingeominas (2001).

Fuente: INGEOMINAS (2001).

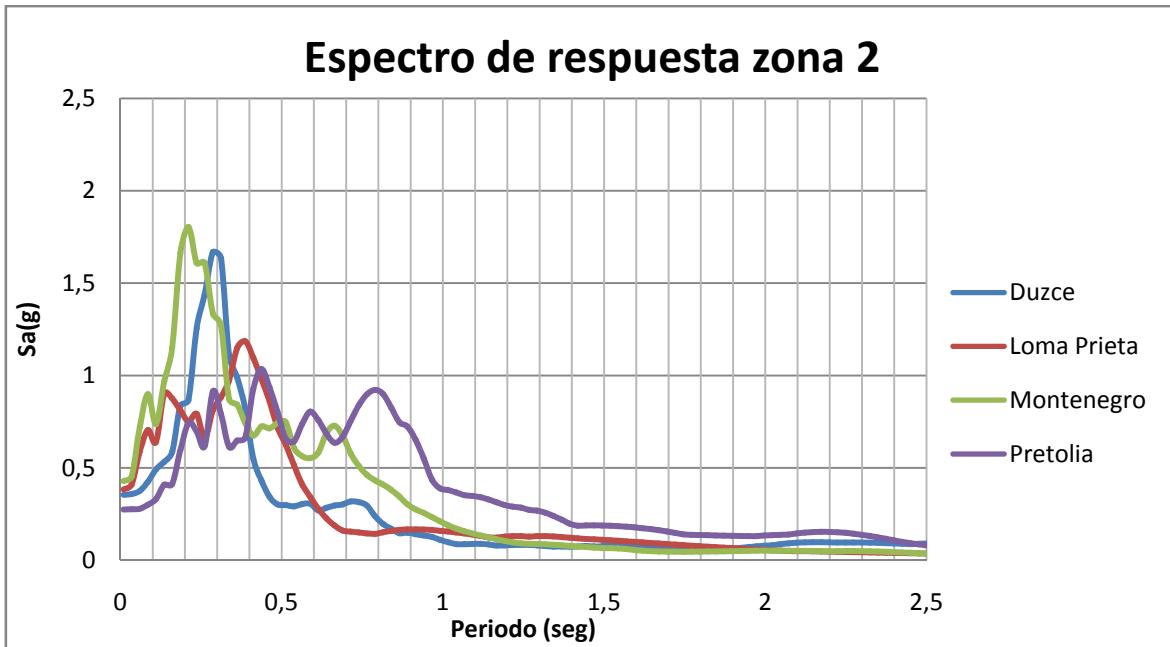


Figura 22. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Frontal de los Llanos, para la zona 2, calculados con los acelerogramas obtenidos en este estudio.

Fuente: El autor.

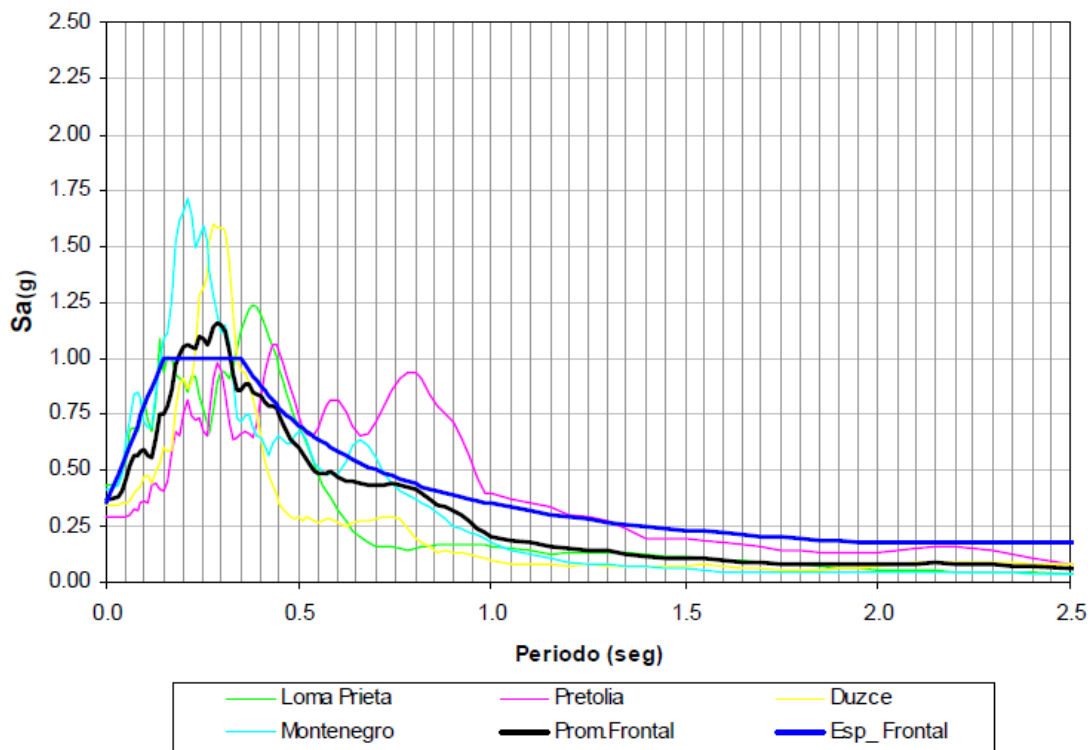


Figura 23. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Frontal de los Llanos, para la zona 2, presentados por Ingeominas (2001).

Fuente: INGEOMINAS (2001).

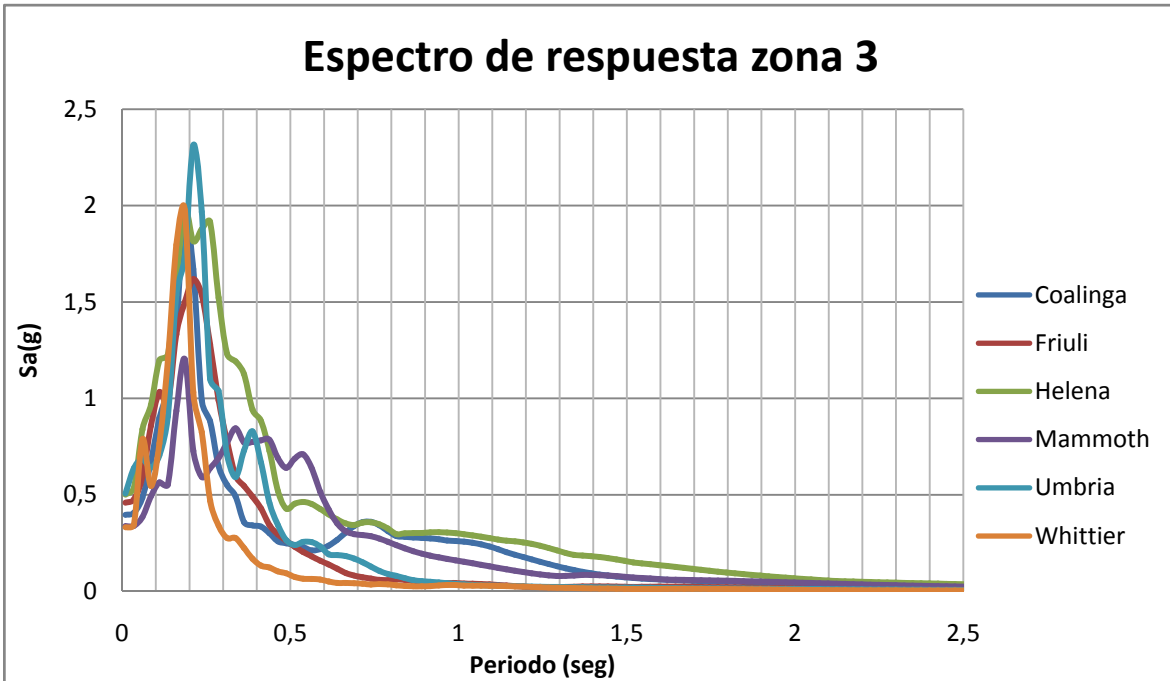


Figura 24. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Bucaramanga-Santa Marta, para la zona 3, calculados con los acelerogramas obtenidos en este estudio.

Fuente: El autor.

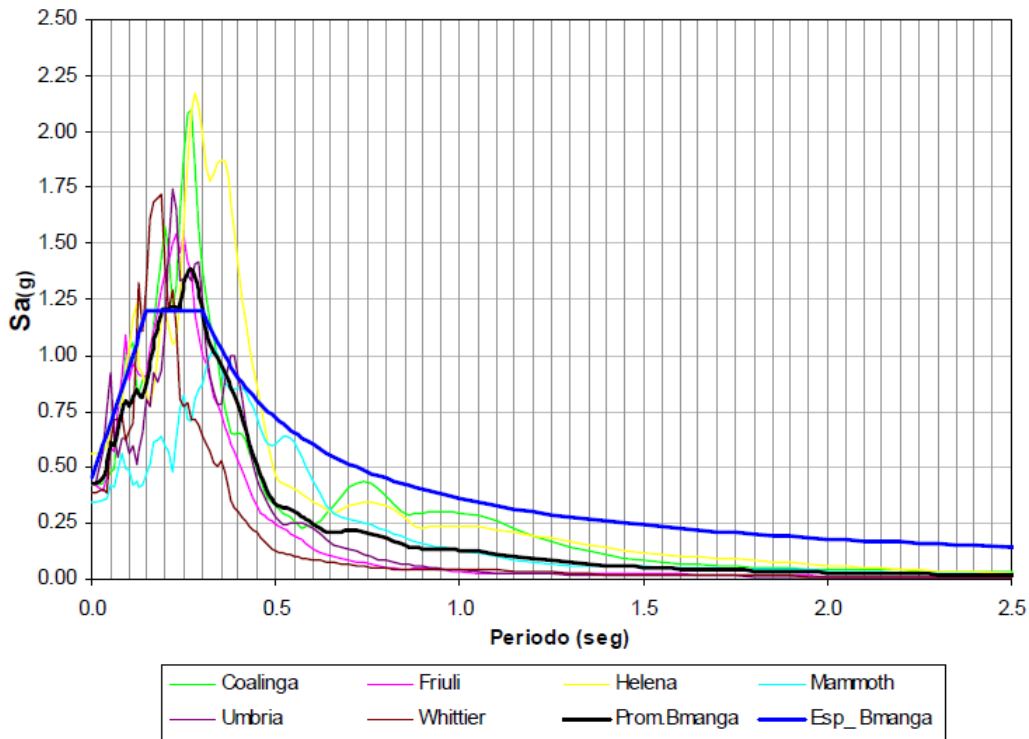


Figura 25. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Bucaramanga-Santa Marta, para la zona 3, presentados por Ingeominas (2001).

Fuente: INGEOMINAS (2001).

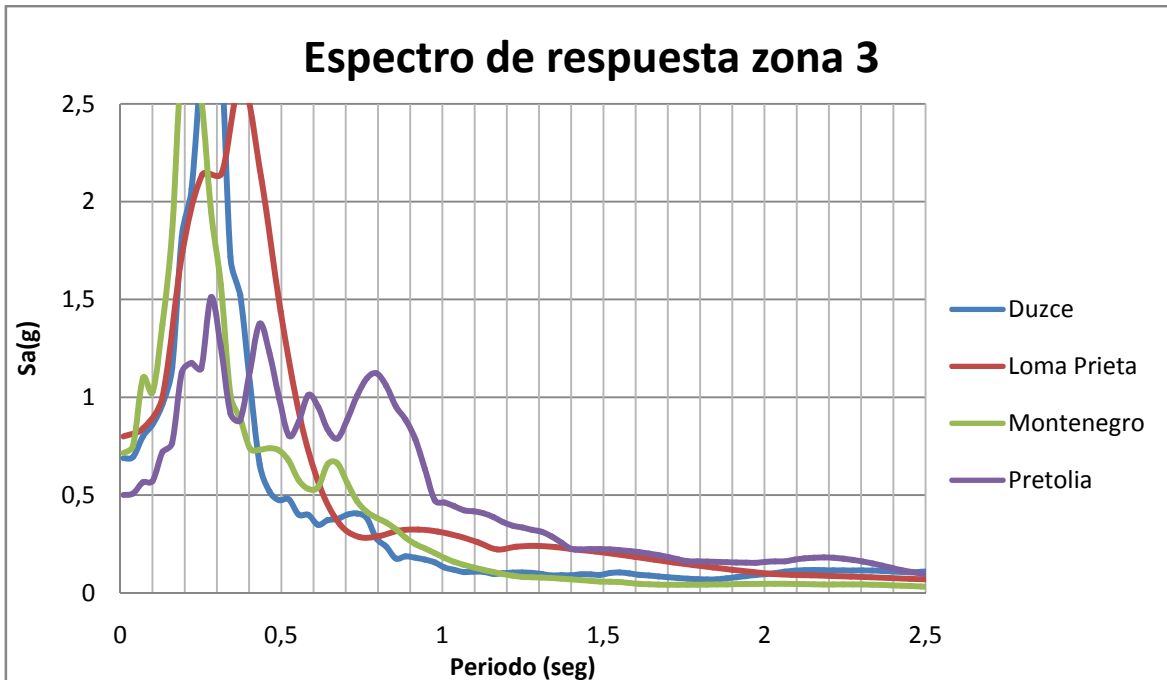


Figura 26. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Frontal de los Llanos, para la zona 3, calculados con los acelerogramas obtenidos en este estudio.

Fuente: El autor.

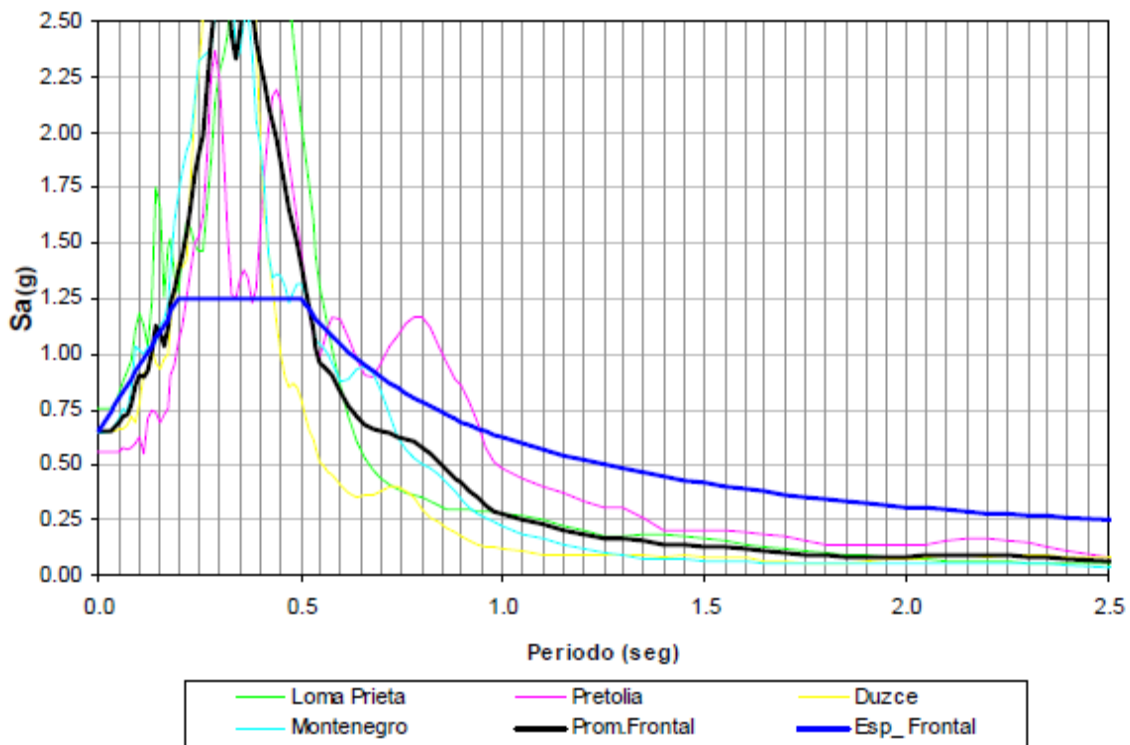


Figura 27. Espectros de aceleración para los sismos compatibles con la Falla Frontal de los Llanos, para la zona 3, presentados por Ingeominas (2001).

Fuente: INGEOMINAS (2001).

5. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CONTINUO EN UNA HOJA DE CÁLCULO

Tanto el modelo continuo como el análisis modal de respuesta contra el tiempo fueron programados en su totalidad en Excel.

Recordando la ecuación (6):

$$IDR(x, t) \approx \frac{1}{H} \sum_{i=1}^m \Gamma_i \phi_i(x) D_i(t) \quad (6)$$

El primer paso que se llevó a cabo fue programar las ecuaciones para el cálculo de las propiedades dinámicas del modelo. Con este fin, los primeros valores que se deben conocer son los valores propios γ_i característicos de cada modo de vibración, para esto se programaron las ecuaciones (14) y (18), se evaluaron las dos funciones para un número considerablemente alto de valores de γ_i y con la función “buscar” y una interpolación sencilla se encontraron los valores en donde la función es cero.

Para observar el comportamiento de las ecuaciones características (1) y (2) (correspondientes a las ecuaciones (14) y (18) respectivamente) se graficaron las ecuaciones (14) y (18) como se muestran en la figura 28 en la cual se observa lo dicho por Miranda y Akkar (2006), ya que se nota claramente que a pesar que las funciones características tienen igual frecuencia, y por lo tanto iguales raíces, la ecuación (1) tiene un mayor incremento en la amplitud.

Una vez programadas las funciones para encontrar γ_i , para obtener el periodo fundamental del modelo, se utilizó la ecuación A.4-2 del numeral A.4.2.2 de la N.S.R.98:

$$T_a = C_t H^{3/4} \quad (35)$$

Donde T_a es el Periodo fundamental del modelo; C_t se asumió igual a 0.08 para pórticos resistentes a momentos, de concreto reforzado, y 0.05 para otros tipos de sistema de resistencia sísmica.

Luego de programar la ecuación (35) para calcular el periodo fundamental del modelo, para el cálculo de los periodos T_i y los factores de participación Modal Γ_i correspondientes a cada modo de vibración se programaron las ecuaciones (19), (20), (21), (22), (23), y (24).

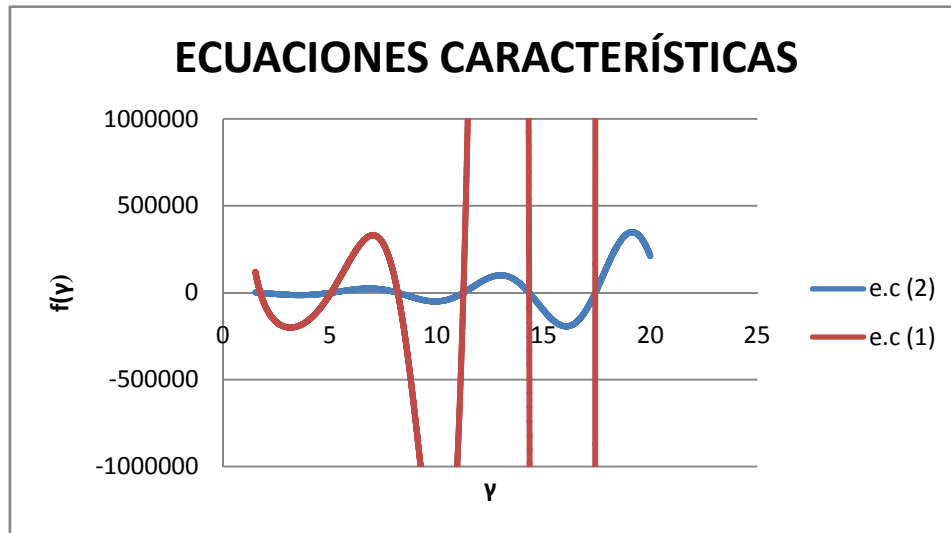


Figura 28. Ecuaciones características (1) y (2), para $\alpha = 10$

Fuente: El autor.

Se obtuvo la siguiente tabla para cualquier valor de α :

I	MODOS					
	1	2	3	4	5	6
Γ	1.735.125.558	5.044.446.834	8.170.046.131	1.124.208.069	1.432.020.476	1.741.525.614
B	1.014.941.677	1.120.028.767	1.291.315.816	1.504.607.518	1.746.620.349	2.008.211.011
H	0.170960472	0.450379413	0.63269382	0.747176583	0.819880832	0.867202499
f1	0.059288145	-0.443107788	0.918392061	-1.286.424.196	1.520.802.758	-1.685.386.776
f2	1.34E+00	1.23E+00	3.12E-01	4.37E-02	4.26E-03	3.29E-04
$\int \phi_i(x) dx$	0.593171329	0.238449783	0.171394564	0.138608912	0.11672148	0.100160327
$\int (\phi_i)^2(x) dx$	0.4711103191	0.591666425	0.713626256	0.797091628	0.850932845	0.887396284
Γ	1.259.111	0.403014	0.240174	0.1738933	0.1371689	0.1128699
Periodo T_i (s)	3.428.929	1.068.778	0.572365	0.3569937	0.2414252	0.17265979

Tabla 4. Valores de T_i y Γ_i para los primeros 6 modos de vibración para un modelo con $\alpha = 10$

Fuente: El autor.

Se programaron las formas modales $\phi_i(x)$ con la ecuación (16), y la derivada de la forma modal $\phi'_i(x)$ con la ecuación (17). Se obtuvieron graficas de altura en el modelo contra $\Gamma_i\phi_i$, y altura en el modelo contra $\Gamma_i\phi'_i$ para comparar con las graficas presentadas por Miranda y Akkar (2006), y de esta manera verificar que las ecuaciones estaban correctamente programadas.

A continuación se muestran tanto las funciones calculadas como las presentadas por Miranda y Akkar (2006), observándose la similitud en sus representaciones.

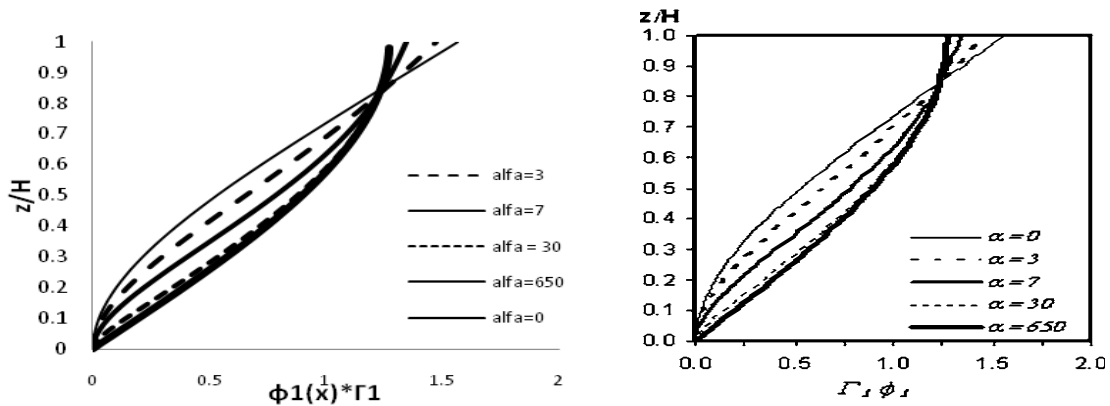


Figura 29. Graficas de $\Gamma_i\phi_i$ contra z/H realizada (a la izquierda grafica realizada con el modelo programado en la hoja de cálculo; a la derecha grafica presentada por Miranda y Akkar (2006).

Fuentes: El autor, Miranda y Reyes (2006).

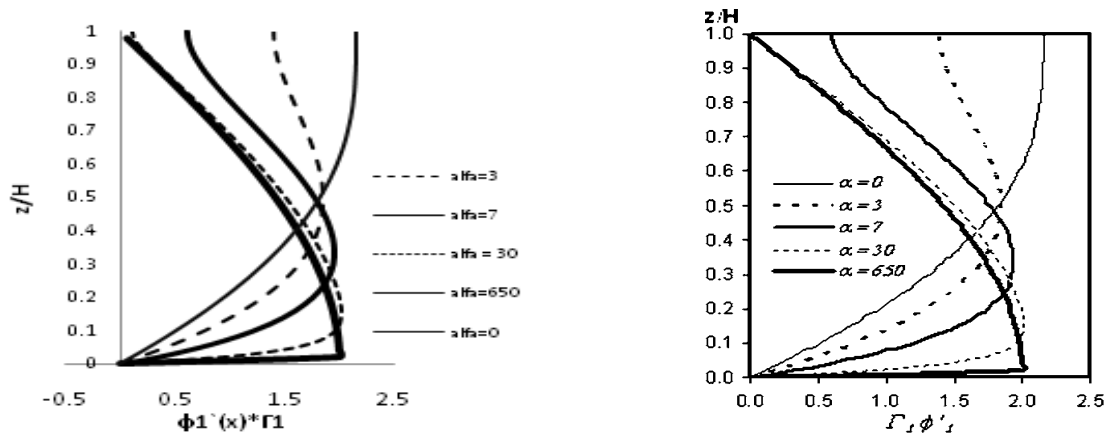


Figura 30. Graficas de $\Gamma_i\phi'_i$ contra z/H a la izquierda grafica realizada con el modelo programado en la hoja de cálculo; a la derecha grafica presentada por Miranda y Akkar (2006).

Fuentes: El autor, Miranda y Reyes (2006).

Para obtener la respuesta de desplazamiento de un sistema de un grado de libertad, con periodo T_i , y razón de amortiguamiento modal ξ_i , correspondientes al modo de vibración i , sujeto a una aceleración del suelo $\ddot{u}_g(t)$, se utilizó el método de la aceleración lineal. En una misma hoja de cálculo se programaron seis (6) modelos, cada uno con un valor de ω_i correspondiente a un T_i de cada uno de los seis (6) primeros modos de vibración del modelo. Para verificar que la hoja de cálculo estuviera arrojando resultados correctos se construyeron espectros de desplazamiento para el sismo de Coalinga, y se compararon los resultados de la hoja de cálculo, con los obtenidos con el programa Degtra A4v4(xp).

A continuación se muestra en la figura 31 el espectro de desplazamientos para el sismo de Coalinga construido con la hoja de cálculo, y en la figura 32 el espectro de desplazamientos construido con el programa Degtra A4v4(xp), observándose la similitud en sus representaciones.

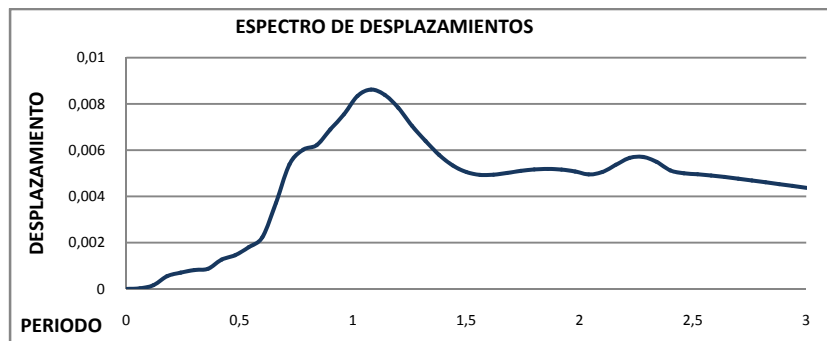


Figura 31. Espectro de desplazamiento calculado con la hoja de cálculo.

Fuente: El autor.

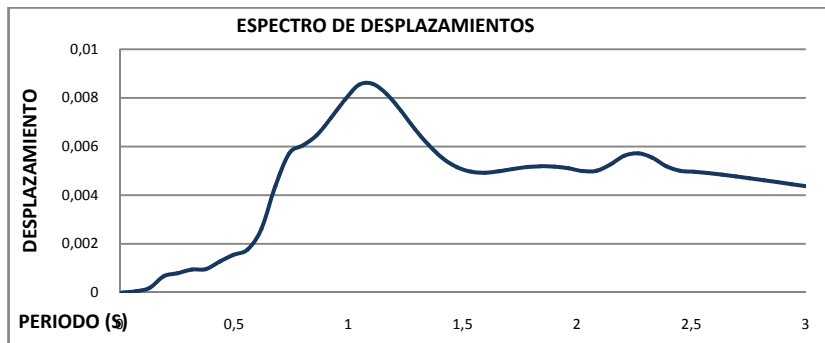


Figura 32. Espectro de desplazamiento calculado con Degtra A4v4(xp)

Fuente: El autor.

Para el cálculo de la razón de deriva de entrepiso (IDR) se programó la ecuación (6) para cada instante del sismo; estos cálculos fueron organizados en filas y columnas en donde la filas representa cada piso de la estructura, y las columnas representan cada instante del sismo, de esta forma se puede observar el comportamiento de cada piso durante el sismo, y ya estando de esta forma ordenado, con la ayuda de la función “buscar” se encuentra IDR_{max} que es el valor necesitado para construir el espectro generalizado de derivas. Para verificar los resultados obtenidos con la hoja de cálculo se construyó la figura 33 que representa el espectro generalizado de derivas para los datos de el sismo Kobe, 1995, estación Takatori, realizado con la hoja de cálculo programada para este estudio, y se compararon con el espectro generalizado de derivas mostrado por Miranda y Akkar (2002) para el sismo de Kobe, 1995, estación Takatori, N49W; encontrando gran similitud entre las dos (2) figuras.

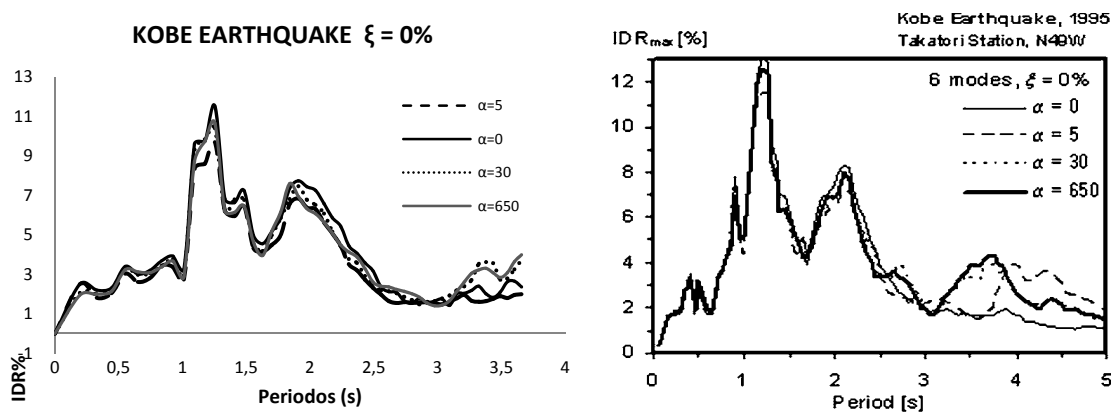


Figura 33. Espectro de derivas para el sismo de Kobe, a la izquierda realizado con hoja de cálculo; a la derecha el presentado por Miranda y Akkar (2006).

Fuente: El autor, Miranda y Akkar (2006).

6. VALIDACIÓN DEL METODO ESPECTRO GENERALIZADO DE DERIVAS DE ENTREPISO.

El modelo y método simplificado ha sido validado con un gran número de edificios instrumentados (Miranda, 2007).

En las figuras (34), (35), y (36) se encuentran las graficas presentadas por Miranda (2007), en las cuales se puede observar la similitud en la respuesta en desplazamientos de una edificación instrumentada para medir estos desplazamientos durante el sismo, y la respuesta calculada con el modelo continuo y el método simplificado utilizando los datos de aceleración registrados durante el mismo evento.

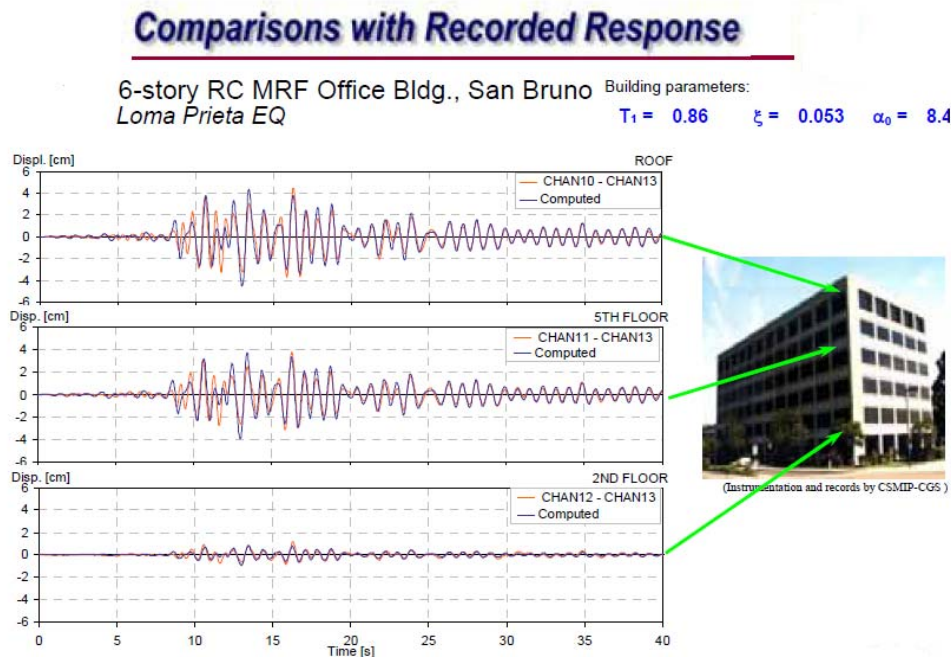


Figura 34. Comparación presentada por Miranda (2007) para un edificio cuyo sistema de resistencia lateral consiste en pórticos de concreto reforzado resistentes a momentos.

Fuente: Apuntes de clase (Miranda, E. Universidad de los Andes).

Comparisons with Recorded Response

6-story RC Shear Wall Office Bldg., San Bruno
Loma Prieta EQ

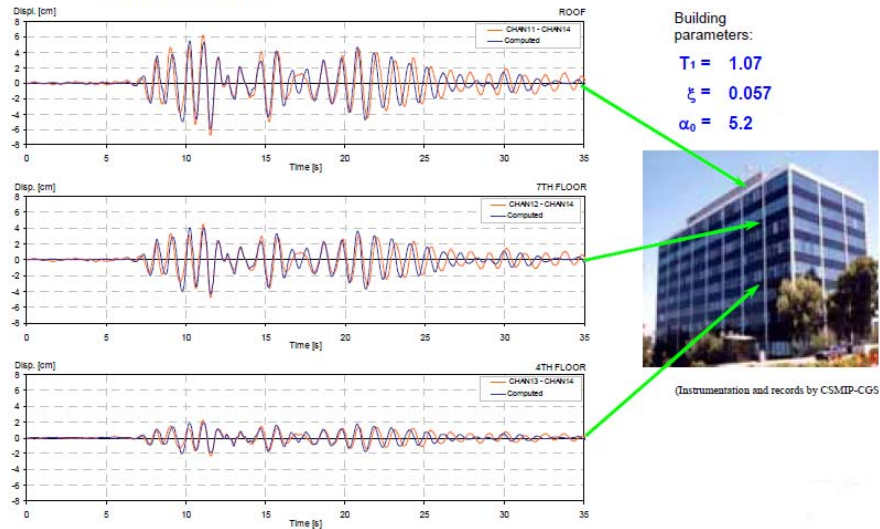


Figura 35. Comparación presentada por Miranda (2007) para un edificio cuyo sistema de resistencia lateral consiste en muros estructurales.

Fuente: Apuntes de clase (Miranda, E. Universidad de los Andes).

Comparisons with Recorded Response

13-story RC dual system Office Bldg., Hayward
Loma Prieta EQ

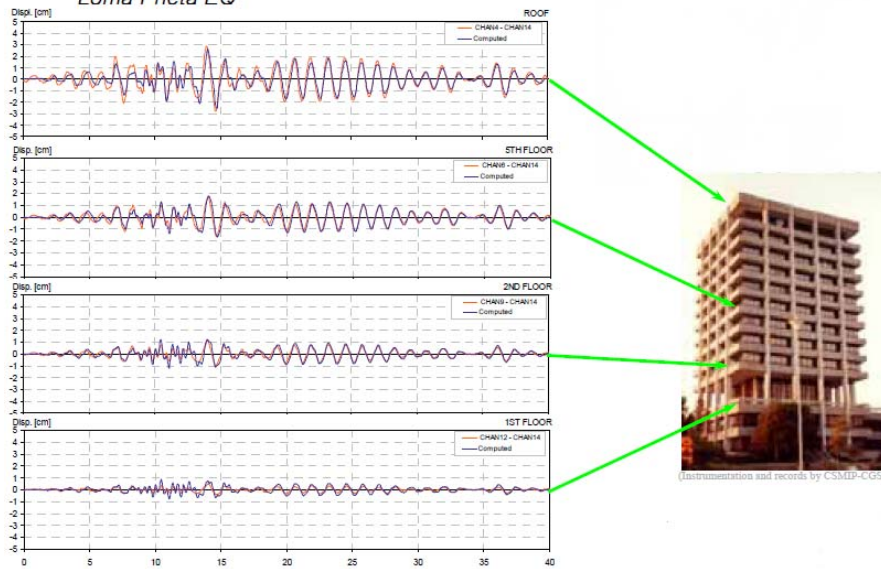


Figura 36. Comparación presentada por Miranda (2007) para un edificio cuyo sistema de resistencia lateral consiste una combinación de pórticos de concreto reforzado resistentes a momentos y muro de concreto reforzado.

Fuente: Apuntes de clase (Miranda, E. Universidad de los Andes).

Se realizó un análisis contra el tiempo con el registro del sismo de Coalinga para un edificio representativo de la zona 2 de Bucaramanga con el fin de mostrar que los resultados obtenidos con la hoja de cálculo programada son reales. A continuación se muestra el modelo de la edificación utilizada para verificar el método.

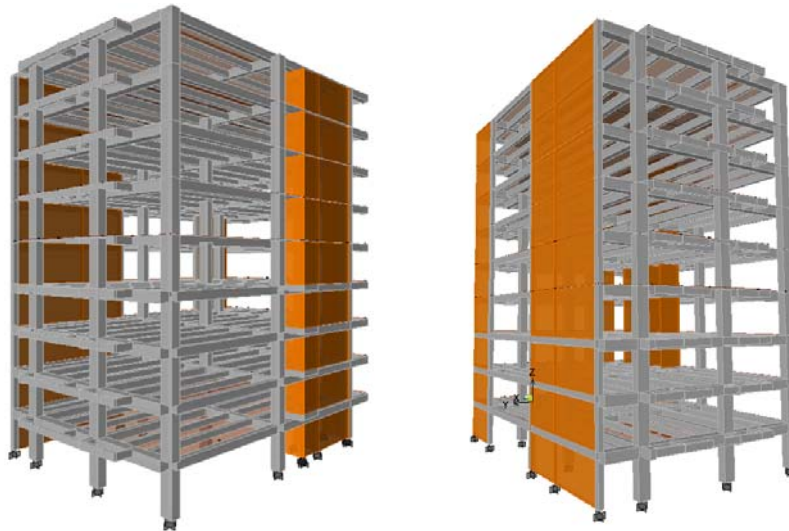


Figura 37. Modelo del edificio utilizado para la validación del método
Fuente: El autor.

Característica	Valor
Número de pisos	9
Área en planta	448
Área total	4032
Altura entrepiso	3.3 m
Altura total	29.7 m
Sistema estructural	Pórticos resistentes a momentos y muros estructurales
Cimentación	N/A
Fachadas	Muros en mampostería

Tabla 5. Parámetros generales de la estructura
Fuente: El autor.

Según los análisis realizados en la hoja de cálculo programada con el modelo continuo y el análisis de historia contra el tiempo hecho en ETABS se pudo encontrar una similitud en los modos de vibración de la estructura como se aprecia en la figura 38.

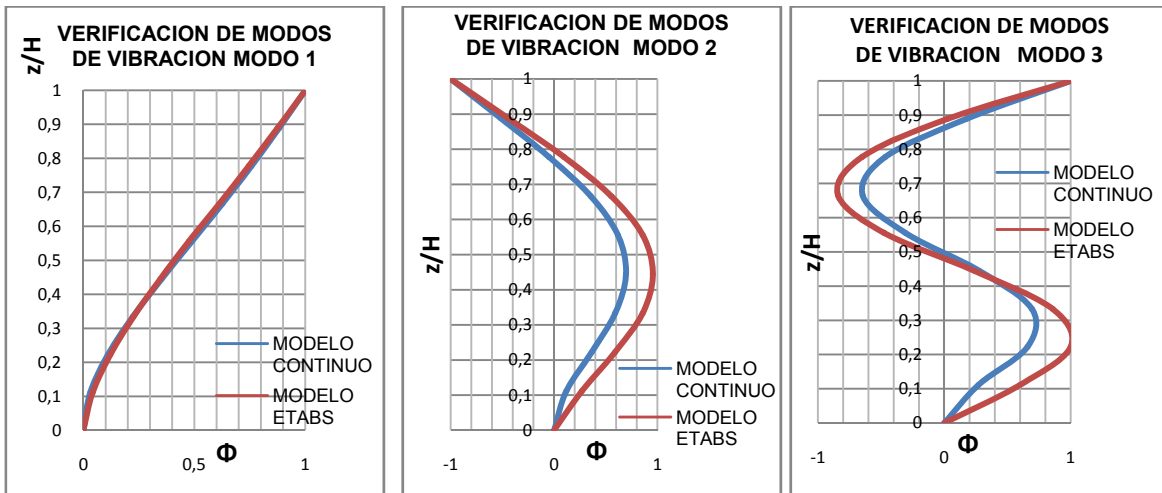


Figura 38. Comparación modos de vibración obtenidos con el modelo continuo y con ETABS.

Fuente: El autor.

Con el fin de comprobar que el resultado de la demanda de deriva máxima calculada sea semejante en los dos análisis, la figura 39 presenta las graficas de las derivas máximas obtenidas con cada uno de los análisis.

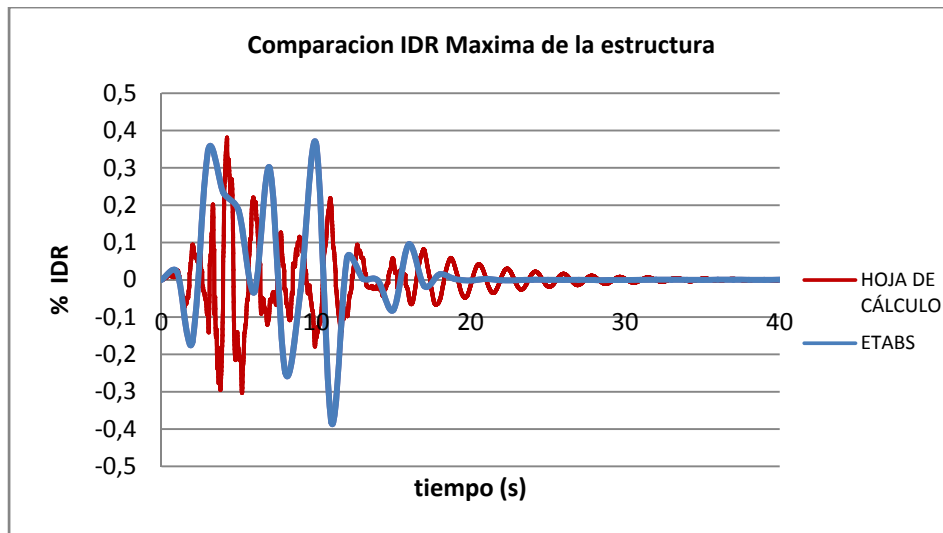


Figura 39. Comparación de la deriva máxima obtenida con el modelo continuo y con ETABS.

Fuente: El autor.

La demanda de deriva calculada con el programa ETABS es de 0.3828 % y la obtenida con la hoja de cálculo es de 0.3813.

Observando las figuras 38 y 39, y teniendo en cuenta la similitud en los valores de demanda deriva calculados con el modelo continuo y el modelo realizado en ETABS, se puede ver que los resultados obtenidos con el modelo continuo son confiables.

7. CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECTROS DE DERIVAS

Se calcularon espectros generalizados de deriva para cada registro de sismo definido como amenaza para cada zona sismogeotécnica por INGEOMINAS (2001).

Para el cálculo de los espectros se utilizaron valores de factor de rigidez lateral (α) de 1, 4 y 10 que como se menciona anteriormente representan edificios con sistema estructural tipo muros estructurales, sistemas combinados y pórticos resistentes a momentos respectivamente, para cada uno de estos valores de factor de rigidez lateral (α) se utilizaron valores de amortiguamiento de 2%, y 5%.

ESPECTROS DE DERIVAS PARA ZONAS SISMOGEOECNICAS DE BUCARAMANGA CON AMORTIGUAMIENTO 5% y 2%.

ZONA 1

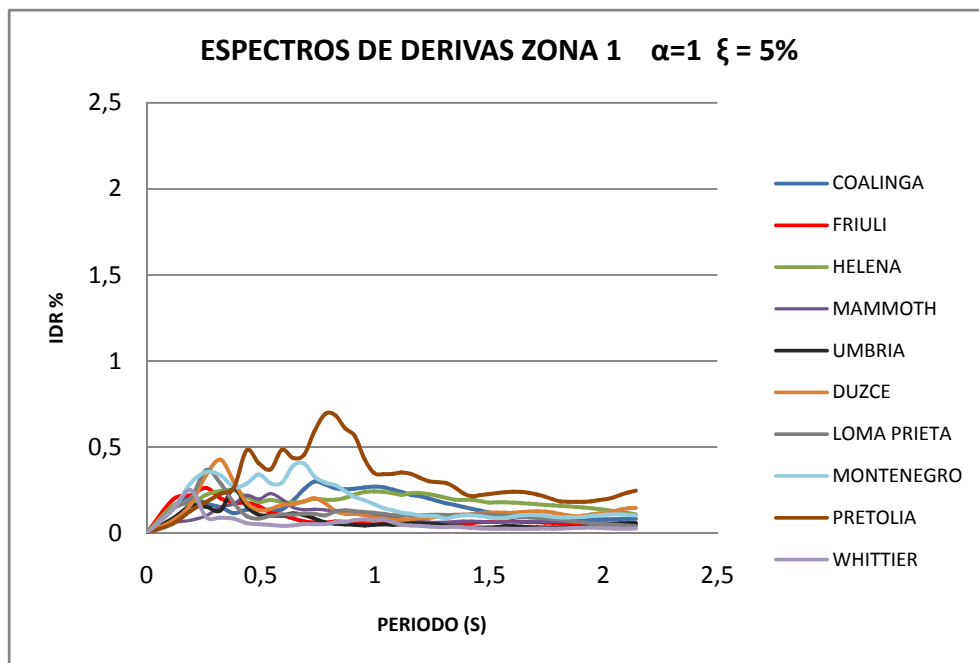


Figura 40. Espectro de derivas para la zona 1, $\alpha = 1$, y $\xi = 5\%$

Fuente: El autor.

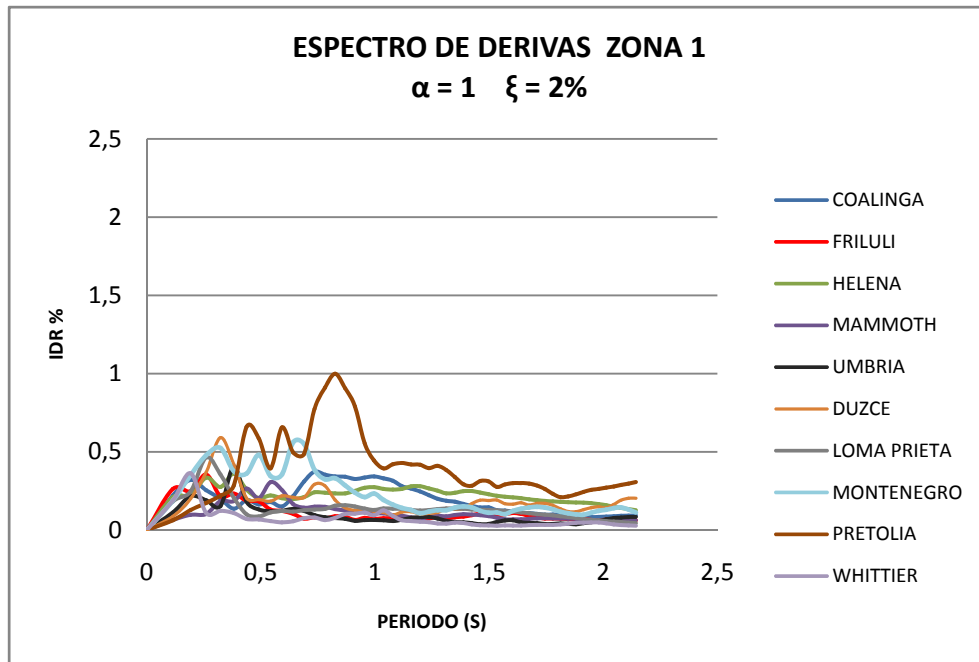


Figura 41. Espectro de derivas para la zona 1, $\alpha = 1$, y $\xi = 2\%$

Fuente: El autor.

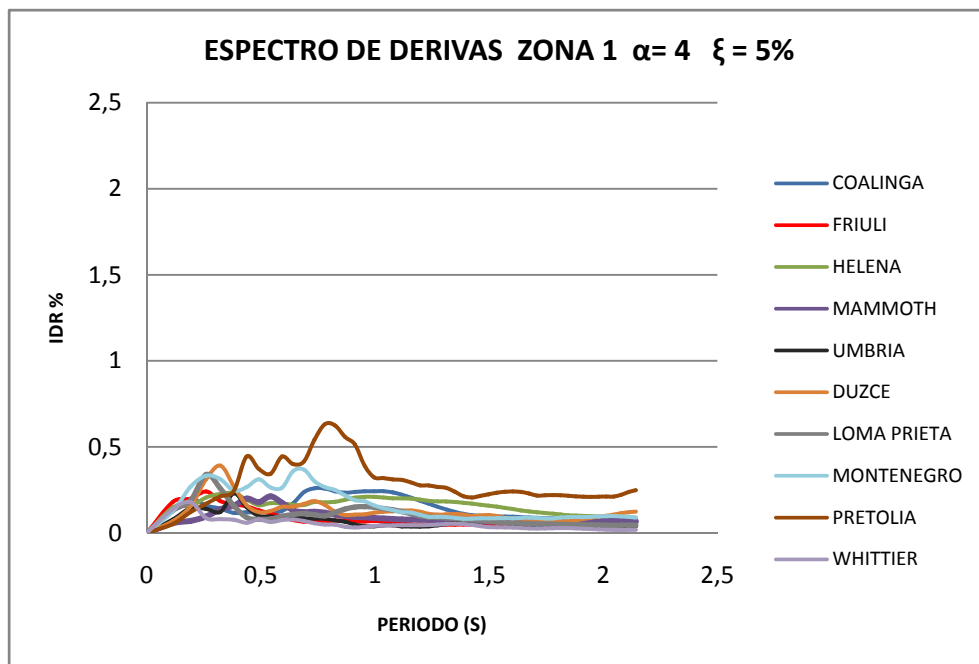


Figura 42. Espectro de derivas para la zona 1, $\alpha = 4$, y $\xi = 5\%$

Fuente: El autor.

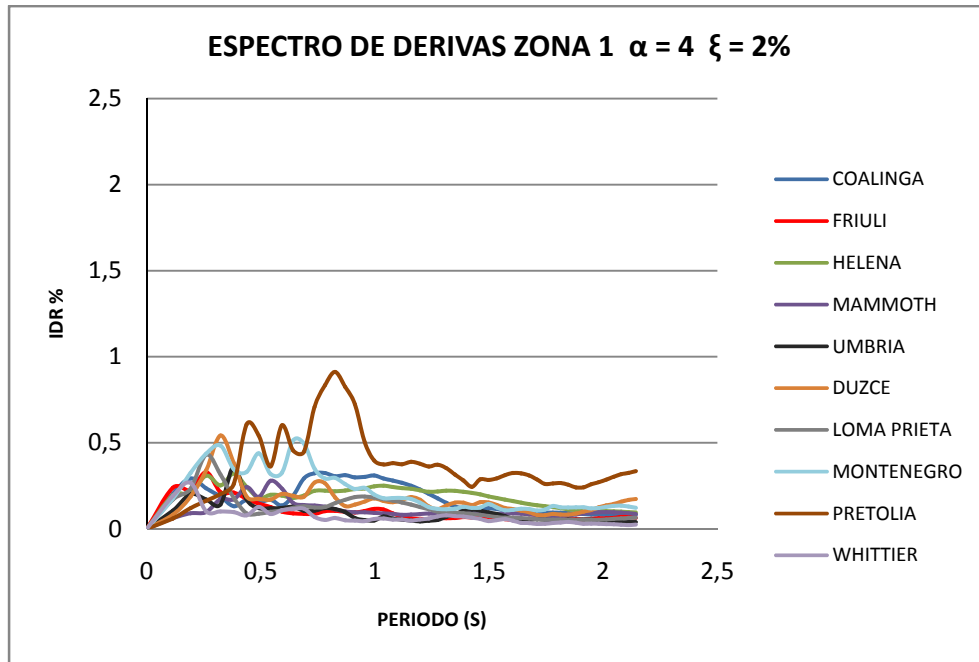


Figura 43. Espectro de derivas para la zona 1, $\alpha = 4$, y $\xi = 2\%$

Fuente: El autor.

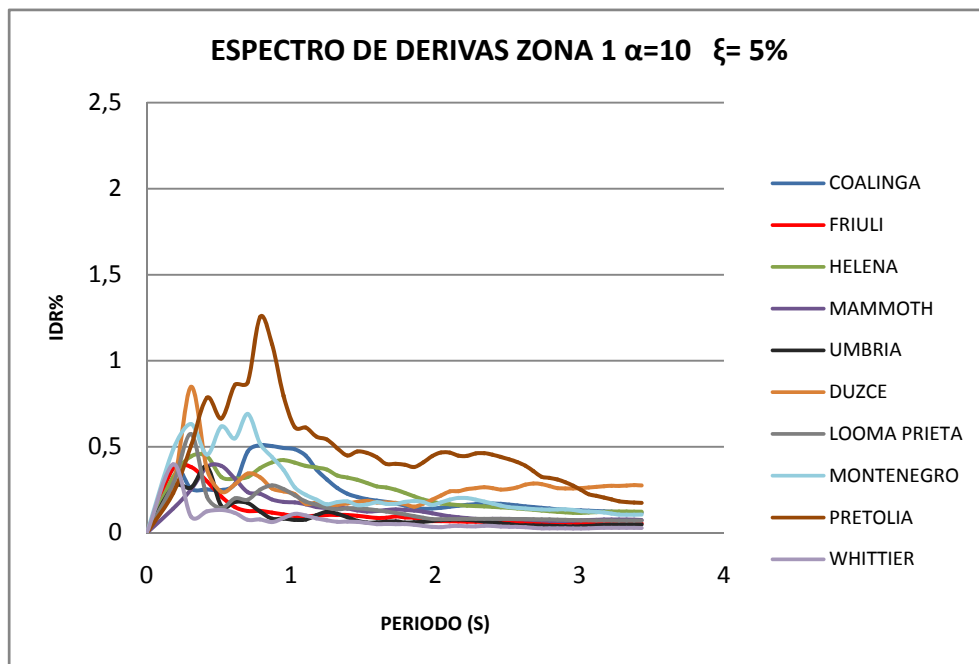


Figura 44. Espectro de derivas para la zona 1, $\alpha = 10$, y $\xi = 5\%$

Fuente: El autor.

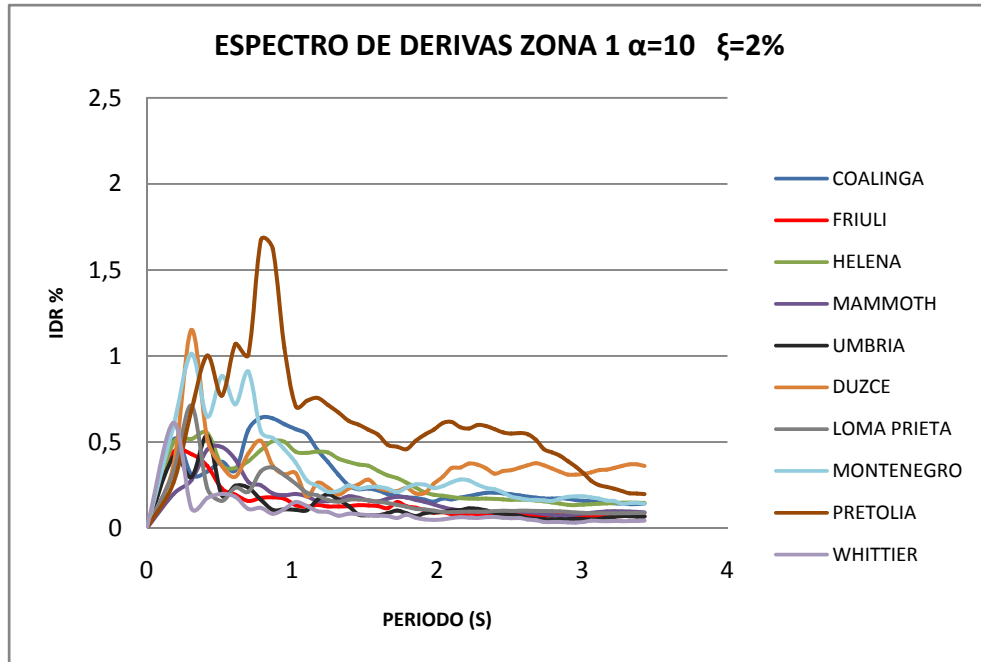


Figura 45. Espectro de derivas para la zona 1, $\alpha = 10$, y $\xi = 2\%$

Fuente: El autor.

ZONA 2

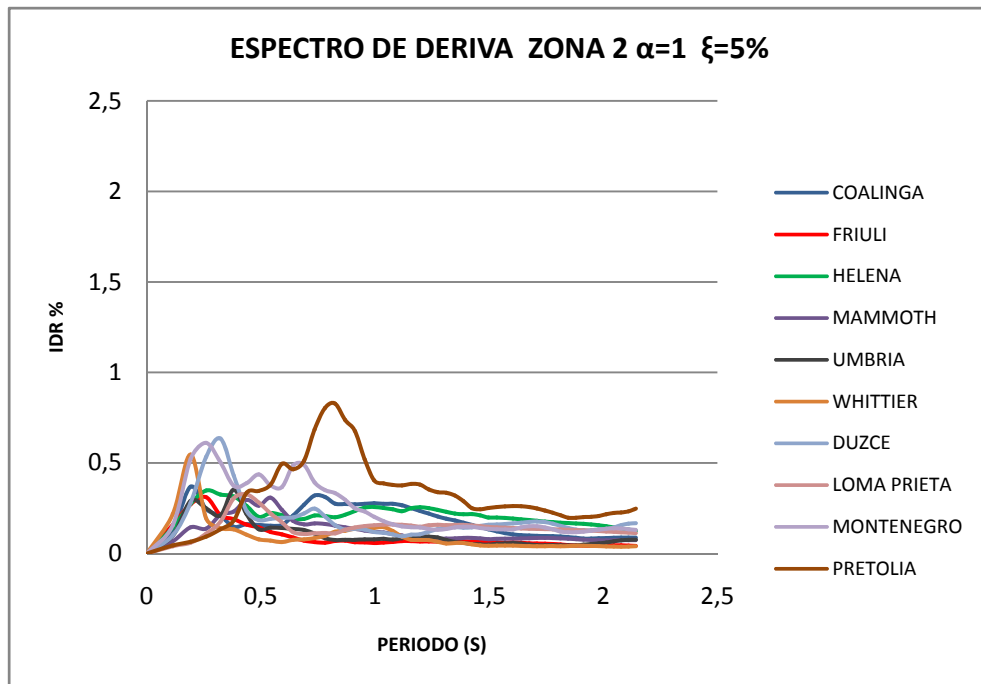


Figura 46. Espectro de derivas para la zona 2, $\alpha = 1$, y $\xi = 5\%$

Fuente: El autor.

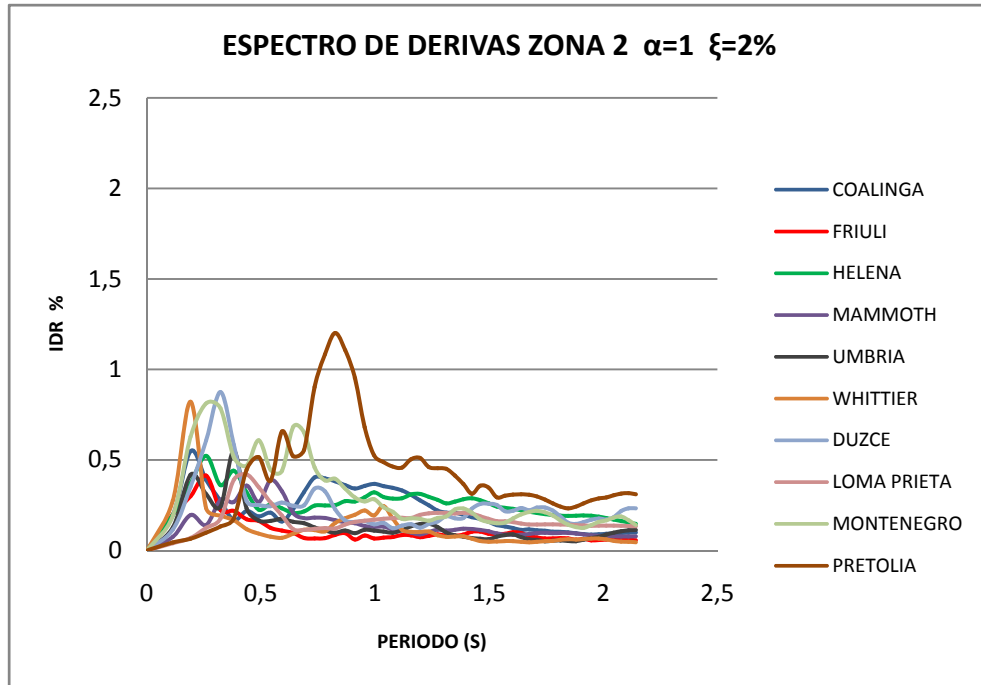


Figura 47. Espectro de derivas para la zona 2, $\alpha = 1$, y $\xi = 2\%$

Fuente: El autor.

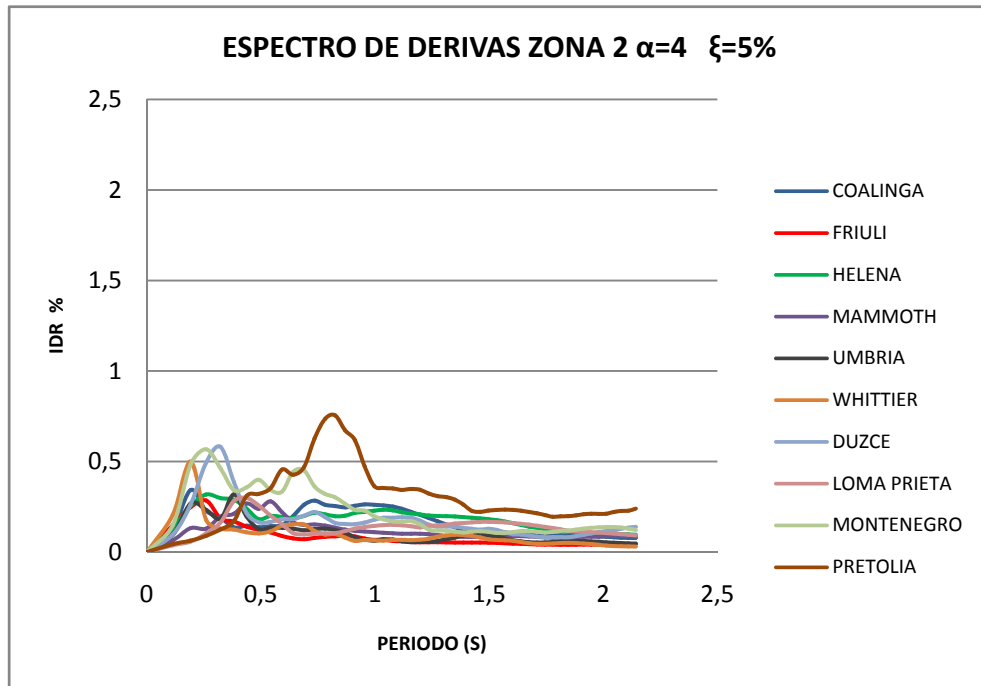


Figura 48. Espectro de derivas para la zona 2, $\alpha = 4$, y $\xi = 5\%$

Fuente: El autor.

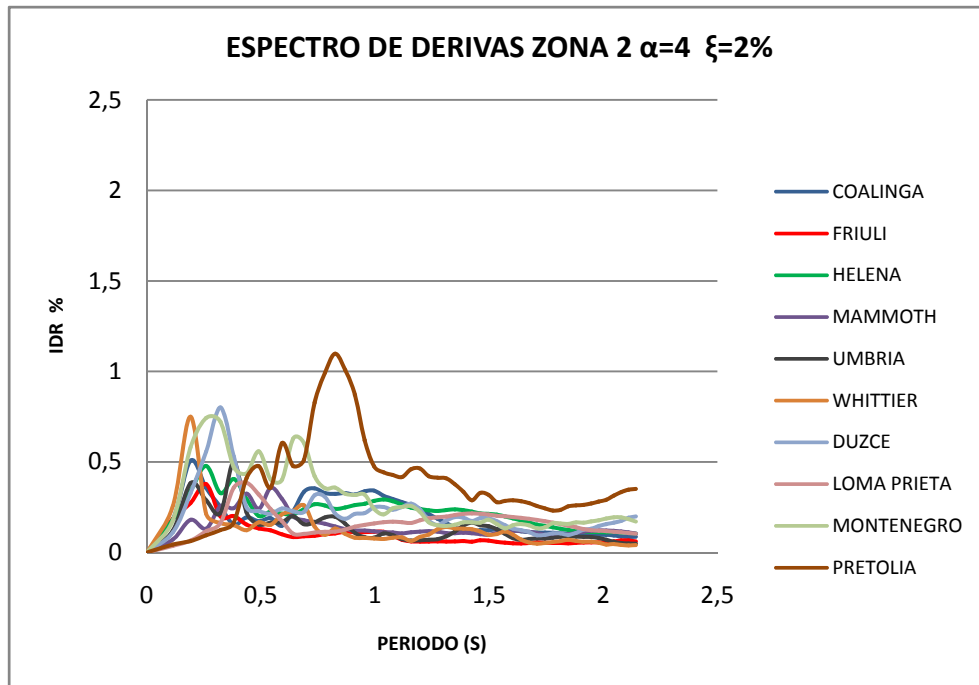


Figura 49.Espectro de derivas para la zona 2, $\alpha = 4$, y $\xi = 2\%$

Fuente: El autor.

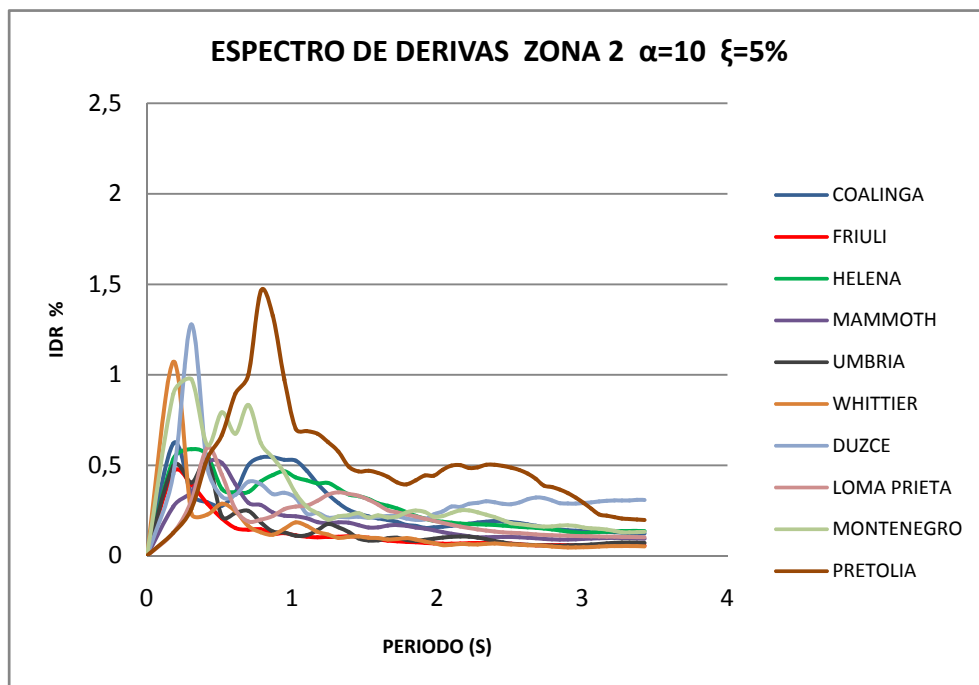


Figura 50.Espectro de derivas para la zona 2, $\alpha = 10$, y $\xi = 5\%$

Fuente: El autor.

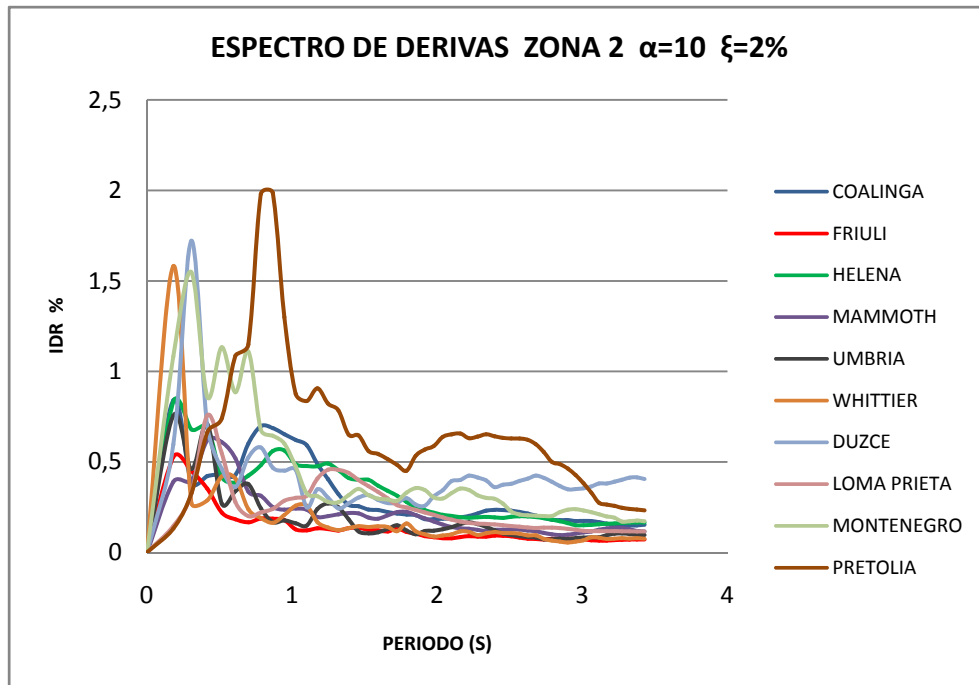


Figura 51. Espectro de derivas para la zona 2, $\alpha = 10$, y $\xi = 2\%$

Fuente: El autor.

ZONA 3

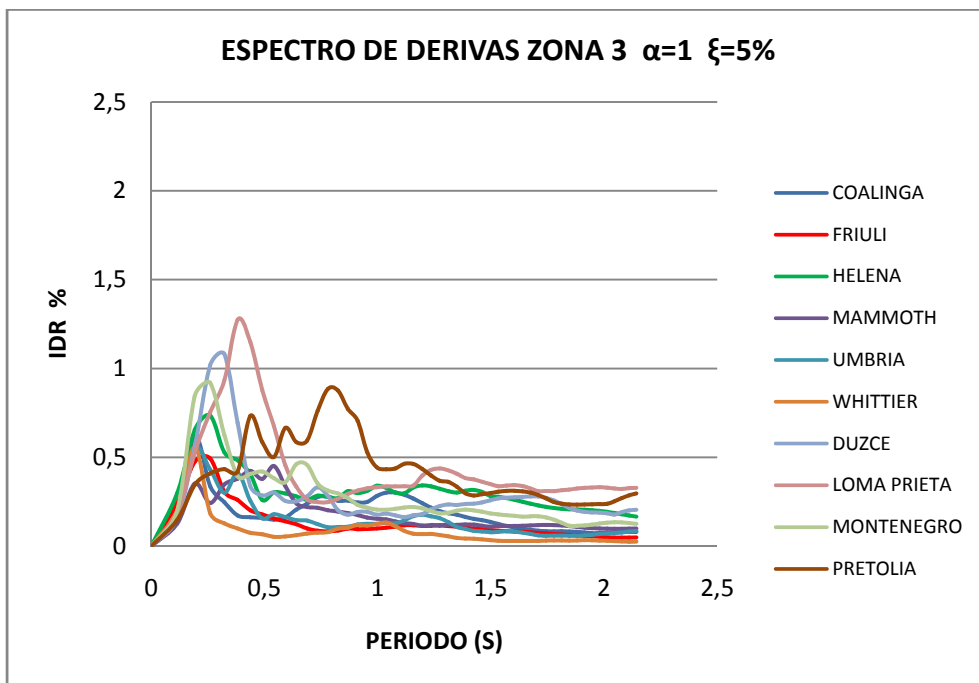


Figura 52. Espectro de derivas para la zona 3, $\alpha = 1$, y $\xi = 5\%$

Fuente: El autor.

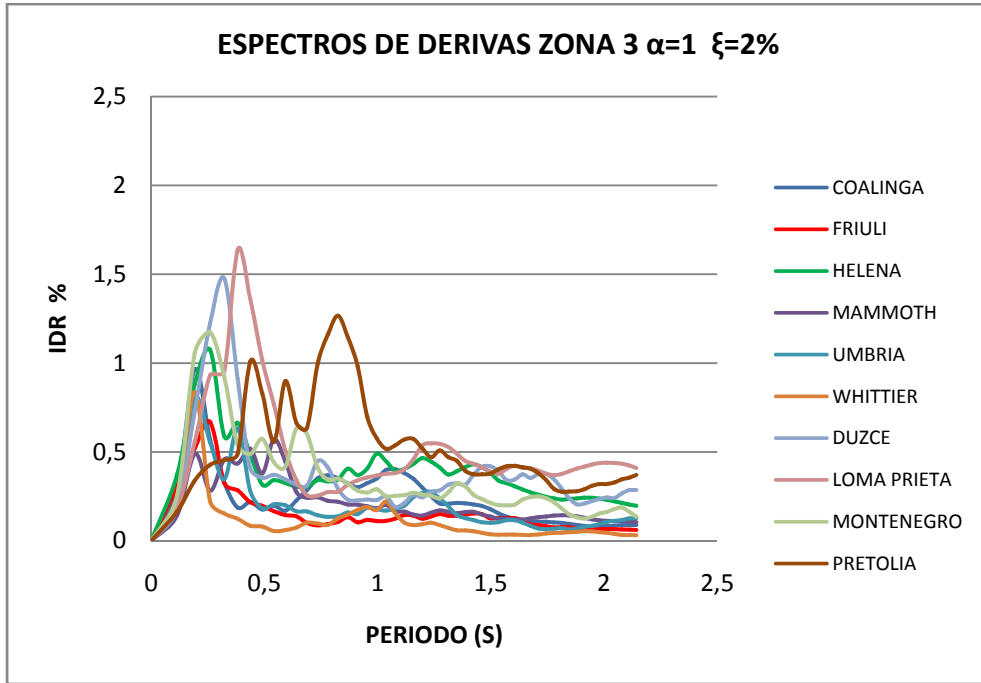


Figura 53.Espectro de derivas para la zona 3, $\alpha = 1$, y $\xi = 2\%$

Fuente: El autor.

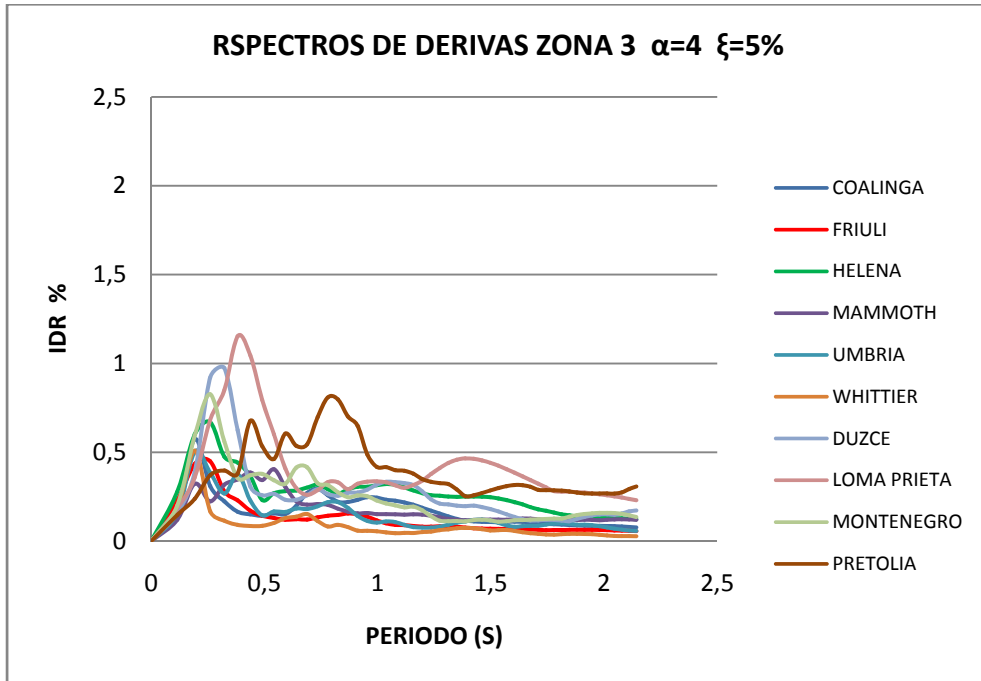


Figura 54.Espectro de derivas para la zona 3, $\alpha = 4$, y $\xi = 5\%$

Fuente: El autor.

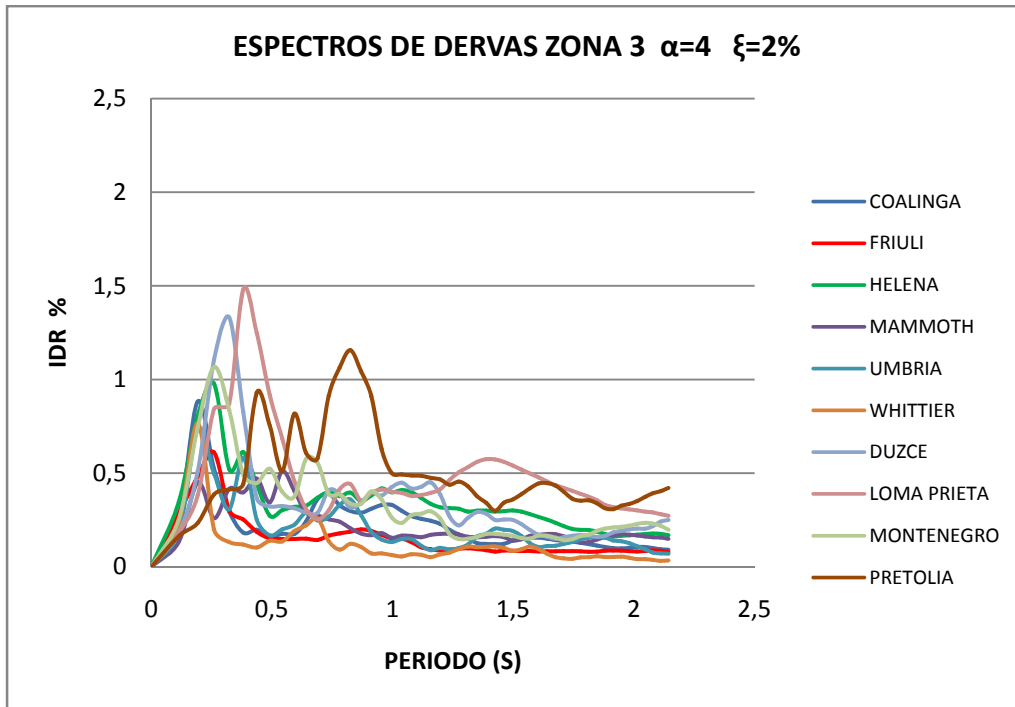


Figura 55. Espectro de derivas para la zona 3, $\alpha = 4$, y $\xi = 2\%$

Fuente: El autor.

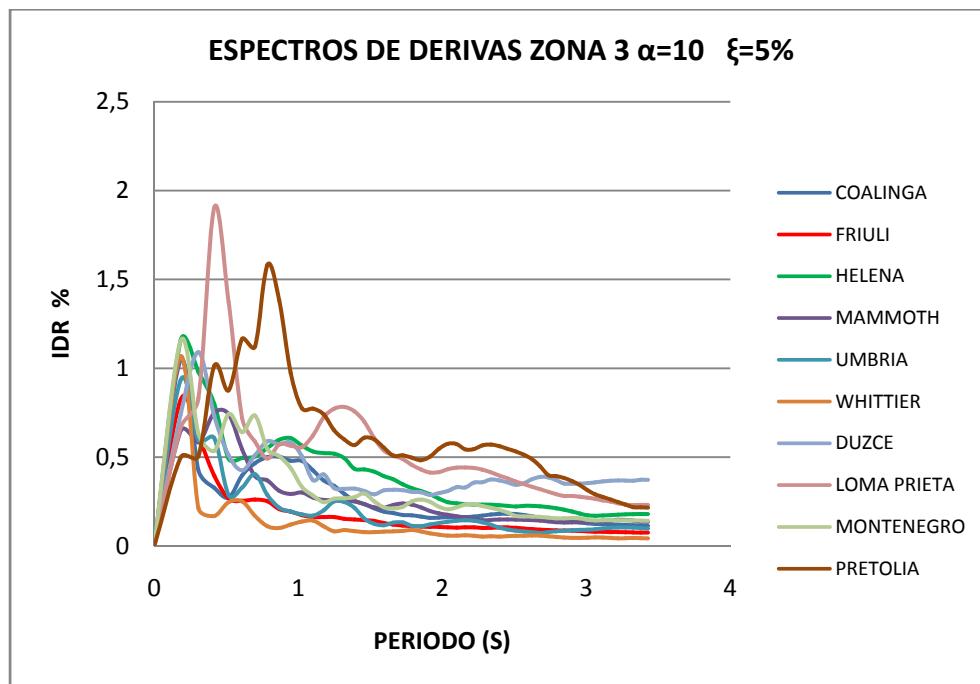


Figura 56. Espectro de derivas para la zona 3, $\alpha = 10$, y $\xi = 5\%$

Fuente: El autor.

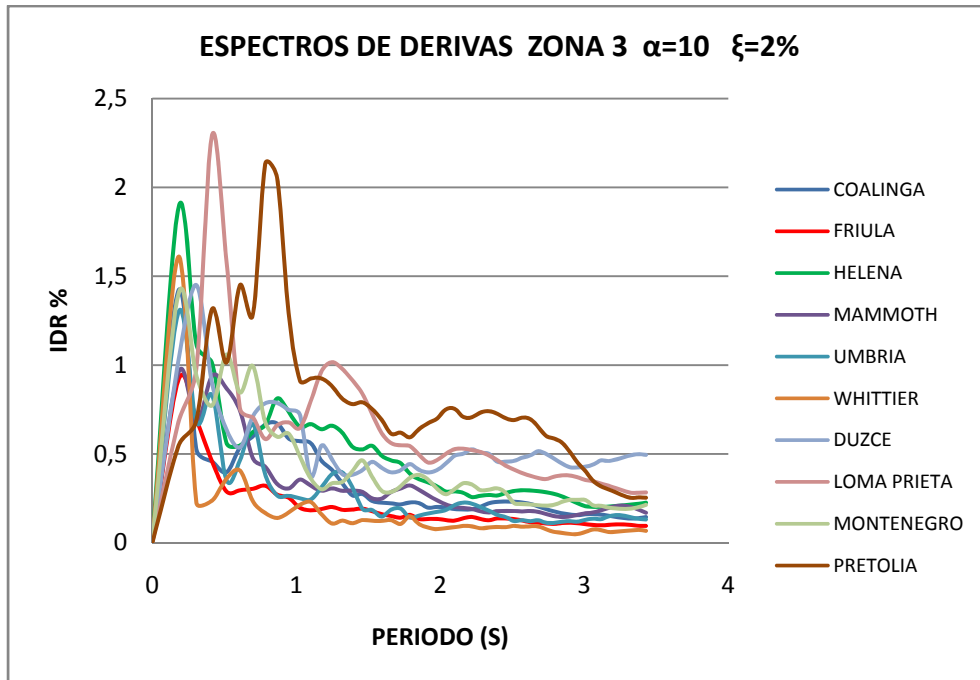


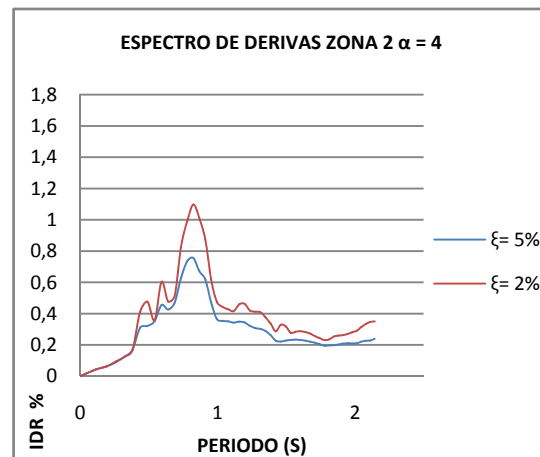
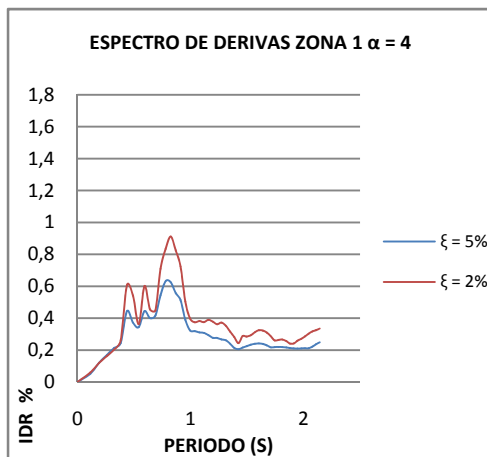
Figura 57.Espectro de derivas para la zona 3, $\alpha = 10$, y $\xi = 2\%$

Fuente: El autor.

8. ANALISIS DE RESULTADOS

Basados en los espectros calculados para todas las zonas y con los sismos utilizados en el estudio indicativo de microzonificación de Bucaramanga realizado por INGEOMINAS en el 2001, se observa lo siguiente para el amortiguamiento:

- Con el cambio de amortiguamiento para los edificios se puede observar que en los espectros de derivas las formas de los picos son similares, la diferencia que se presenta consiste en el aumento de la demanda de deriva en todos los espectros hechos para un amortiguamiento del 2%.
- Comparando los espectros de derivas a partir de los sismos propuestos por INGEOMINAS en las tres zonas, la influencia del amortiguamiento del 5% genera menor demanda de deriva para las estructuras, mientras que el amortiguamiento del 2% aumenta la demanda de deriva en todas las zonas, como se observa en los siguientes espectros construidos para el sismo de Pretolia.



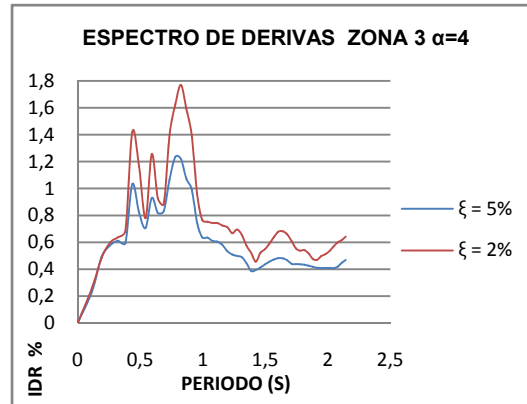


Figura 58. Espectros de derivas para el sismo Pretolia en todas las zonas, $\alpha = 4$, $\xi = 2\%$ y $\xi = 5\%$

Fuente: El autor.

- Los espectros de derivas generados a partir del registro sísmico de Pretolia, son los que presentan los picos más altos en todas las zonas con los dos valores de amortiguamiento, llegando a producir demandas de deriva mayores al 1% que es el máximo permitido por la NSR - 98.
- Los espectros de derivas hechos con el 2% presentan un mejor detalle de los diferentes picos, comparándolos con los hechos para el 5% de amortiguamiento.
- El amortiguamiento de los edificios en los espectros de derivas, afecta los resultados desde el punto de vista de la capacidad de disipación de energía, ningún espectro realizado con el 5% de amortiguamiento presenta mayor demanda de deriva que los realizados con amortiguamiento del 2%.

Comparando los espectros de derivas según el tipo de sistema estructural de los edificios, se observa lo siguiente:

- Las estructuras hechas con muros estructurales y caracterizadas con α igual a 1, presentan una demanda de deriva menor a las derivas de diseño propuesta por NSR – 98 que es del 1%.

- Las estructuras de sistemas combinados cuyo valor de α es igual a 4 para este estudio, presentan un comportamiento similar en forma, y muy poca diferencia en amplitud, comparado con sistemas de muros estructurales.
- Los pórticos resistentes a momentos que se caracterizan en el presente estudio con α igual a 10, son el sistema estructural que presenta mayor demanda de derivas en todas las zonas.
- La zona 3 es la que presenta mayor demanda de deriva según los espectros de derivas, específicamente los pórticos resistentes a momentos son los sistemas estructurales que presentan mayor demanda de deriva.
- Los pórticos resistentes a momentos son los sistemas que presentan mayor demanda de deriva. Como se aprecia en el siguiente gráfico, la demanda de deriva sobrepasa el valor propuesto para diseño por la NSR – 98 en la zona 3, además para amortiguamiento del 2% se ve claramente que los picos se encuentran superiores al 1% en las zonas 2 y 3, y en el borde del 1% de demanda en la zona 1.

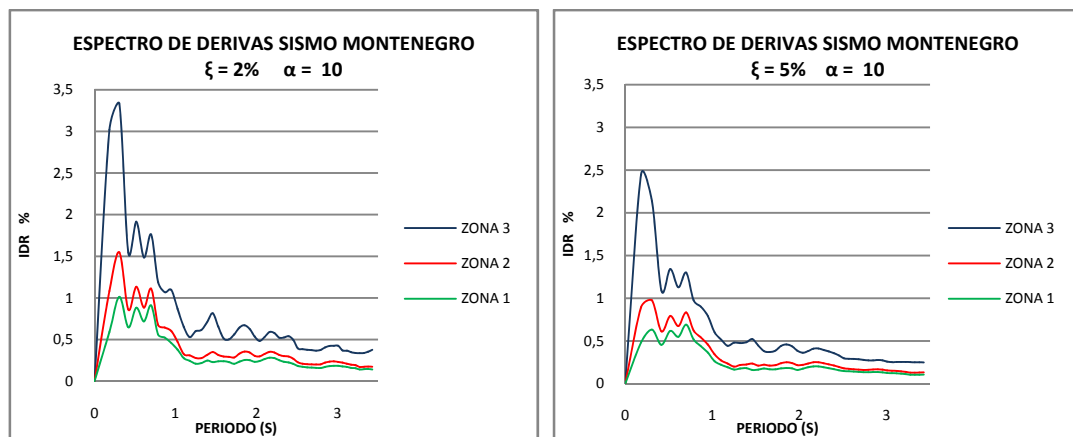


Figura 59. Espectros de derivas para el sismo Montenegro en todas las zonas, $\alpha = 10$, $\xi = 2\%$ y $\xi = 5\%$

Fuente: El autor

- Los sistemas combinados presentan el comportamiento descrito anteriormente debido a que los valores que se evalúan en las ecuaciones de periodo fundamental ($Ta = C_t * h^{3/4}$) propuestas por NSR – 98 y utilizadas en el presente estudio, son los mismos que se presentan para los sistemas de muros estructurales, luego el espectro obtenido para el sistema combinado se diferencia del sistema de muros estructurales únicamente por la variación de alfa. Pareciera importante definir un valor de C_t que represente este tipo de sistema estructural, con esto se podrán realizar espectros de derivas con mayor precisión para este sistema.
- Los diferentes sistemas estructurales están expuestos a mayor demanda de deriva en la zona 3, ya que esta zona presenta un comportamiento menos favorable ante la acción sísmica.
- Según los espectros de derivas, la deriva demandada para los acelerogramas estudiados es menor del 1%, las estructuras diseñadas y construidas siguiendo los requisitos de las normas CCCSR84 y NSR – 98 tienen la capacidad para resistir esta deriva, pero las estructuras que no cumplan con estos requisitos de diseño y construcción pueden tener daños relacionados con esta deriva.
- Las edificaciones que presentan periodos fundamentales menores a 1.5 aproximadamente, estarán sujetas a mayor daño, mientras que las que presenten periodos fundamentales mayores a 1.5 aproximadamente, están sujetas a menor demanda de deriva, lo que indica que presentaran menor daño; en otras palabras, los edificios de menos altura se espera que presenten mayor daño que los que tengan mayor altura.
- Según los espectros de derivas, los edificios más altos presentan menor demanda de deriva, cualquiera de los tres sistemas estructurales cumple con el 1% de deriva según lo propuesto por NSR – 98. De los tres sistemas

estructurales el que se espera tenga mayor daño es el sistema de pórticos resistentes a momentos.

Comparando los espectros de derivas según la demanda de deriva se observa lo siguiente:

- La demanda de deriva en general para todos los espectros de derivas se comporta dentro de un rango que es aceptable ya que la mayoría de estos espectros obtenidos con los registros sísmicos propuestos como amenaza por INGEOMINAS 2001, están dentro del rango del 1% según lo propuesto para diseño por NSR - 98, sin embargo hay registros sísmicos que presentan un valor mayor que lo permitido, lo cual no quiere decir que las estructuras estén diseñadas en base a parámetros mal establecidos.
- Los sistemas de muros estructurales y combinados presentan comportamiento de alta rigidez lateral, por esto la demanda de deriva se hace menor en estos dos sistemas, los espectros de derivas realizados para este tipo de sistemas muestran que en muy pocos casos los registros sobrepasaran el 1% establecido por la NSR – 98 como parámetro de diseño.
- La demanda de deriva para los registros sísmicos característicos de la Falla Bucaramanga – Santa Marta, son menores en la mayoría de los casos a los que presenta la Falla Frontal de los Llanos.
- La zona 3 presenta una demanda de derivas mayor a 1% en casi todos los registros, lo cual puede ser tema de estudio ya que en esta zona puede presentarse un daño considerable en los edificios que se encuentren construidos, así como los criterios de diseño para estos casos especiales.

9. CONCLUSIONES

- Las edificaciones en las que el sistema de resistencia lateral consiste en pórticos de concreto reforzado resistentes a momentos, presentan una demanda de deriva mayor, comparada con la demanda de deriva que presenta las edificaciones cuyo sistema de resistencia lateral consisten en muros estructurales de concreto reforzado, o combinación de muros estructurales de concreto reforzado y pórticos de concreto reforzado resistentes a momentos, basados en esta información, y teniendo en cuenta que la deriva está relacionada directamente con el daño en edificaciones, se concluye que las edificaciones en las que el sistema de resistencia lateral consiste en pórticos de concreto reforzado resistentes a momentos presentaran más daño que las edificaciones cuyo sistema de resistencia lateral consista en muros estructurales de concreto reforzado, o combinación de muros de concreto reforzado y pórticos de concreto reforzado.
- Las edificaciones ubicadas en la zona sismogeotécnica 3 son las que presentan valores más grandes de demanda de deriva, y por lo tanto se esperaría mayor cantidad de daño en estas.
- la deriva es uno de los factores que tienen mayor relación con el daño en una edificación (Miranda y Reyes, 2002). Ante la mayoría de los eventos sísmicos definidos como amenaza para la ciudad de Bucaramanga por INGEOMINAS (2001) las edificaciones con periodo fundamental de vibración menor a 1 segundo presentaran mayor cantidad de daño.
- La correcta utilización de modelos simplificados como el propuesto por Miranda y Akkar (2006) para calcular el Espectro Generalizado de Derivas puede brindar rápidamente información confiable.

BIBLIOGRAFIA

- Miranda, E., and Akkar, S.D. (2006). "Generalized Interstory Drift Spectrum." *Journal of Structural Engineering.*, june 2006.
- Miranda, E. (1999). "Approximate lateral drift demands in multi-story buildings." *Journal of Structural Engineering.*
- Miranda, E. and Reyes, C.J. (2002). "Approximate lateral drift demands in multi-story buildings whith nonuniform stiffness." *Journal of Structural Engineering.*
- García Reyes Luis Enrique. DINAMICA ESTRUCTURAL APLICADA AL DISEÑO SISMICO. Universidad de los Andes
- INGEOMINAS (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga.
- Esperanza Maldonado Rondón – Gustavo Chio Cho. DINAMICA ESTRUCTURAL.