

Maestría en Ingeniería Civil

Relación entre la componente sísmica vertical y horizontal y efecto de la componente sísmica vertical en pórticos y sistemas combinados de concreto reforzado

Jorge Lenin Lemus Rojano

Bogotá, D.C., 13 de diciembre de 2021



**Relación entre la componente sísmica vertical y horizontal y
efecto de la componente sísmica vertical en pórticos y sistemas
combinados de concreto reforzado**

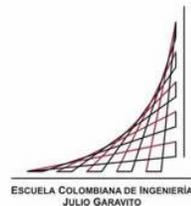
**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Ingeniería Estructural**

Jorge Lenin Lemus Rojano

Director

PhD. Ingeniera Sandra Rocío Jerez Barbosa

Bogotá, D.C., 13 de diciembre de 2021



La tesis de maestría titulada “Relación entre la componente sísmica vertical y horizontal y efecto de la componente sísmica vertical en pórticos y sistemas combinados de concreto reforzado” presentada por el Ingeniero Civil Jorge Lenin Lemus Rojano, cumple con los requisitos para optar el título de Magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Ingeniería Estructural.

Sandra Rocio Jeréz Barboza

Directora de tesis

Luis Enrique Aycardi Fonseca

Jurado

Héctor José Pérez Barrera

Jurado

Bogotá, D.C., 1 de febrero de 2022

“Para diseñar edificaciones de concreto reforzado que puedan resistir adecuadamente eventos sísmicos, es necesario conocer antes que nada el origen del problema, es decir, el origen de los terremotos y su forma de actuar sobre las edificaciones”

(Gallego & Sarria, 2010).

Dedicatoria

A mi amada esposa Blanqui, quien en mi ausencia ha ocupado el lugar de padre y madre en la familia con inigualable entrega y amor; a mis hijos Alejandro y Gabriela, que con su inocencia me han permitido dedicar horas que les pertenecían para poder alcanzar este objetivo. A mis padres y hermanas a quienes he querido agradecer y honrar no siendo inferior a las expectativas puestas en mí; a mis tías Consuelo y Sara.

Agradecimientos

A Dios por permitirme alcanzar cada uno de los objetivos propuestos, sin su voluntad nada puede alcanzarse. A mi esposa e hijos por su inigualable e incomparable apoyo, son los pilares de mi vida. A la doctora Sandra Jeréz, persona de inigualables condiciones humanas y de excelentes calidades profesionales, sin su paciencia, apoyo y ejemplo este trabajo de grado no hubiera sido posible, y a mis jurados de trabajo de tesis por su dedicación y generosidad. A mis profesores de posgrado por transmitirme su conocimiento sin más que el límite establecido por el tiempo en las aulas de clase.

A mis amigos y colegas por permitirme compartirles paso a paso el proyecto y por brindarme sus recomendaciones. Al Ejército Nacional por darme el apoyo para desarrollar los estudios de Maestría, en especial a los Mayores Generales Néstor Robinson y Luis Cardozo, y al Coronel Beimar Mejía, quienes tuvieron la gentileza, paciencia y confianza en mí para sacar adelante este proyecto.

Resumen

Estudios realizados durante las últimas décadas, y algunos colapsos de edificaciones a causa de eventos sísmicos, han mostrado que los efectos de la componente sísmica vertical (V) no pueden ser despreciados cuando las condiciones de sitio y de la amenaza sísmica lo exigen. Algunas investigaciones muestran que la componente V para movimientos del terreno ha alcanzado a ser el 140% de la componente horizontal (H), y que en el análisis de algunas columnas se han observado incrementos de carga axial de hasta un 60% cuando esta componente es considerada (Perea & Esteva, 2005).

Este trabajo de investigación se realizó para continuar contribuyendo al análisis de la relación entre la componente V y H desde dos puntos de vista. El primero con base en las relaciones entre aceleraciones máximas del terreno (PGA), aceleraciones espectrales (S_a) y formas espectrales de los registros de movimientos del terreno; y el segundo, desde el enfoque de cómo varían las solicitaciones de momento, corte y carga axial en algunos elementos de dos edificaciones (baja y mediana altura) cuando la componente V es considerada. Para cumplir ambos propósitos, se tomaron los datos de los registros sísmicos usados en el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica 2020 (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020), información apropiada para el estudio de las condiciones propias de la amenaza sísmica en territorio colombiano; posteriormente, sobre unos arquetipos estructurales de 5 y 15 pisos en pórticos y sistemas combinados de concreto reforzado, se realizaron análisis estructurales incluyendo y excluyendo la componente V para estudiar sus efectos.

Los resultados mostraron que, para perfiles de suelo tipo D, E y F en el ambiente Cortical y distancias focales menores a 60 kilómetros, las relación entre formas espectrales V y H para periodos aproximadamente de 0.10 s pueden alcanzar valores de 1.18, valor superior al $2/3$ (0.66) recomendado como mínimo en el reglamento NSR-10; en el mismo sentido, para los perfiles de suelo A, B y C y periodos entre 0.06 y 0.10 s, se obtuvieron relaciones espectrales V/H con valores comprendidos entre 0.60 y 0.80, en algunos casos superiores al mínimo recomendado en NSR-10.

En cuanto a los análisis estructurales, se evidenció que la carga axial en columnas cuando se incluye la componente V puede incrementarse hasta un 70% para las columnas interiores del edificio de 5 pisos y hasta un 47% para las columnas exteriores del edificio de 15 pisos. Los muros por su parte mostraron incrementos en la carga axial de los primeros pisos de hasta el 20%. En cuanto a las vigas, las variaciones fueron del orden del 2% para flexión y corte en los extremos y tuvieron un valor máximo de incrementos de flexión del 18% en el centro de la luz. Los valores anteriores son los máximos obtenidos, y disminuyen de acuerdo con los escenarios analizados en función de las combinaciones de carga consideradas, lo que además influye en las relaciones V/H para corte y flexión.

De acuerdo con los resultados anteriores, se recomienda, que para distancias de ruptura menores a 60 kilómetros de la falla que puede generar el movimiento, se considere en el análisis el efecto de la componente vertical para los diferentes grupos de perfil de suelo. Igualmente, que se revisen las solicitaciones sobre los elementos para verificar que los incrementos que pueda generar la componente V sean asumidos por la estructura sin colocar en riesgo su estabilidad.

Palabras claves: Relación V/H , componente sísmica vertical, aceleración vertical, relaciones espectrales, estructuras de concreto reforzado.

Índice general

Resumen	7
Índice general	9
Índice de tablas.....	12
Índice de figuras	14
Índice de ecuaciones	22
Índice de anexos.....	23
Introducción	1
Objetivos.....	5
1 Marco Teórico.....	6
1.1 Eventos sísmicos.....	6
1.1.1 Eventos sísmicos de naturaleza tectónica	7
1.1.2 Fallas geológicas.....	9
1.2 Amenaza sísmica en Colombia.....	10
1.2.1 Ambientes tectónicos.....	14
1.2.2 Base de datos de movimientos fuertes	16
1.2.3 Resultados Modelo Nacional Amenaza Sísmica 2020	19
1.3 Acelerogramas	21
1.4 Espectros	23
1.4.1 Espectros de aceleraciones.....	24
1.4.2 Espectros de diseño	25
1.5 Componente sísmica horizontal y vertical.....	27
1.6 Componente sísmica vertical de acuerdo con el reglamento NSR-10.....	28
1.6.1 Decreto 1400 de 1984	28
1.6.2 Normas Colombianas NSR-98.....	29
1.6.3 Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.....	29
1.7 Componente sísmica vertical de acuerdo con el documento ASCE 7-16.....	30
1.8 Análisis Dinámico Lineal (ADL).....	33
1.8.1 Señales sísmicas y su selección.....	36

1.8.2	Modificación de las señales sísmicas	38
1.9	Análisis Dinámico Espectral (ADE)	39
2	Estado del Arte	42
2.1	Relación entre componentes sísmicas vertical y horizontal (V/H)	42
2.2	Efectos de la componente vertical en estructuras	54
3	Metodología.....	65
3.1	Revisión bibliográfica.....	65
3.2	Relación entre la componente sísmica horizontal y vertical	66
3.2.1	Datos de interés y fuente de la información	66
3.2.2	Método para la evaluación numérica de la respuesta dinámica	67
3.2.3	Clasificación de la información	68
3.2.4	Algoritmo para el procesamiento de datos y obtención de resultados.....	69
3.2.5	Post procesamiento de datos y gráficos de resultados.	73
3.2.6	Comparación de resultados con lo establecido en la normatividad vigente. 80	
3.3	Efecto de la componente sísmica vertical en pórticos y sistemas combinados .. 80	
3.4	Evaluación a través de Análisis Dinámico Espectral (ADE)	81
3.4.1	Datos generales de la localización de las estructuras.....	82
3.4.2	Espectro elástico de diseño	82
3.4.3	Arquetipos estructurales	83
3.4.4	Cargas.....	87
3.4.5	Combinaciones de carga y regla de combinación.....	87
3.4.6	Respuesta e indicadores por considerar	89
3.4.7	Elementos para analizar	89
3.4.8	Discretización.	91
3.4.9	Modos de vibración y participación modal	93
3.4.10	Componente vertical espectral	94
3.4.11	Criterios para la selección de solicitaciones relevantes y relación V/H.....	94
3.4.12	Otras consideraciones especiales	99
3.5	Evaluación a través de Análisis Dinámico Lineal (ADL)	100
3.5.1	Modelo matemático	101

3.5.2	Desagregación de la amenaza sísmica	104
3.5.3	Selección y escalado de acelerogramas.....	105
3.5.4	Solicitaciones para el análisis de resultados.....	108
4	Resultados y contribución.....	109
4.1	Resultados para la relación entre la componente sísmica horizontal y vertical	109
4.1.1	Resultados de la relación V/H para PGA por ambiente tectónico incluyendo todos los perfiles de suelo (Condición 1)	111
4.1.2	Resultados de la relación V/H para Sa por ambiente tectónico incluyendo todos los perfiles de suelo (Condición 2).....	120
4.1.3	Resultados de la relación V/H para PGA por grupos de tipos de perfiles de suelo incluyendo todos los ambientes tectónicos (Condición 3).....	131
4.1.4	Resultados de la relación V/H para Sa por grupos de tipos de perfiles de suelo incluyendo todos los ambientes tectónicos (Condición 4)	137
4.1.5	Comparación de formas espectrales (Condición 5)	144
4.1.6	Análisis de resultados relación V/H entre componentes sísmicas.....	150
4.2	Resultados para los efectos de la componente sísmica vertical.....	152
4.2.1	Resultados para el edificio de 5 pisos.....	153
4.2.2	Resultados para el edificio de 15 pisos.....	160
4.2.3	Análisis de resultados para relaciones V/H entre solicitaciones.....	170
4.3	Contribuciones.....	180
5	Conclusiones y recomendaciones	181
5.1	Conclusiones.....	181
5.1.1	Relaciones V/H entre componentes sísmicas.....	181
5.1.2	Relaciones V/H entre solicitaciones en los modelos estructurales.....	183
5.2	Recomendaciones.....	184
	Bibliografía.....	186
6	Anexos	190

Índice de tablas

Tabla 1 - Principales eventos sísmicos históricos en Colombia	11
Tabla 2 - Evolución del estudio de la amenaza sísmica en Colombia	12
Tabla 3 - Registros acelerográficos por ambiente tectónico	17
Tabla 4 - Combinaciones de carga incluyendo la componente V en ASCE 7-16.....	30
Tabla 5 - Valores del coeficiente vertical C_v	32
Tabla 6 – Comparaciones clasificación del tipo de perfil de suelo en función de V_{s30}	47
Tabla 7 - Resultados obtenidos en investigaciones similares.....	56
Tabla 8 - Clasificación de la información para su análisis y procesamiento	69
Tabla 9 - Características relevantes sistema pórtico	84
Tabla 10 - Características relevantes sistema combinado	86
Tabla 11 - Resultados columna de esquina C1 piso 1	98
Tabla 12 – Rangos de valores obtenidos de la desagregación de la amenaza	105
Tabla 13 - Registros seleccionados de la base de datos del PEER edificio 5 pisos	106
Tabla 14 - Registros seleccionados de la base de datos del PEER edificio 15 pisos	106
Tabla 15. - Relaciones V/H en función de PGA por ambiente tectónico incluyendo todos los perfiles de suelo.....	120
Tabla 16 - Relaciones V/H en función de S_a por ambiente tectónico incluyendo todos los perfiles de suelo.....	131
Tabla 17 - Resultados de la relación V/H para PGA por grupos de tipos de perfiles de suelo incluyendo todos los ambientes tectónicos	137
Tabla 18 - Resultados de la relación V/H para S_a por grupos de tipos de perfiles de suelo incluyendo todos los ambientes tectónicos	144
Tabla 19 - Valores de interés para las relaciones V/H analizadas cuando se incluye la incidencia del periodo	149
Tabla 20 - Resumen de resultados representativos en las columnas del edificio de 5 pisos	157
Tabla 21 - Resumen de resultados representativos en muros y columnas del edificio de 15 pisos	166
Tabla 22 - Escala de Intensidad de Mercalli modificada.....	197
Tabla 23 - Análisis de carga viva y muerta edificio de 5 pisos.....	202
Tabla 24 - Análisis de carga viva y muerta edificio de 15 pisos.....	203

Tabla 25 - Base de datos de movimiento fuerte MNAS 2020	204
Tabla 26 - Valores aceleración espectral y periodo del espectro horizontal objetivo	207
Tabla 27 - Resultados para combinaciones que incluyen sismo en la columna C6 piso 1 (ADE).....	252
Tabla 28 - Resultados para combinaciones que incluyen sismo en la columna C6 piso 1 (ADL).....	253

Índice de figuras

Figura 1 - Hipocentro o foco y epicentro de un evento sísmico	6
Figura 2 - Zonas de convergencia entre placas, subducción entre litosfera oceánica y continental	8
Figura 3 - Fallas de desplazamiento vertical, izq. falla normal (N), der. falla inversa (R)....	9
Figura 4 - Falla de desplazamiento horizontal o strike-slip (S)	10
Figura 5 - Distribución de hipocentros contenidos en el CSI, periodo (1610-2014)	13
Figura 6 - Ambientes tectónicos definidos en el MNAS 2020	14
Figura 7 - Distribución de los registros de la base de datos de movimiento fuerte	18
Figura 8 - Mapa de aceleraciones pico para un periodo de retorno de 475 años	20
Figura 9 - Curva de amenaza uniforme y espectro de amenaza uniforme para Cali	21
Figura 10 - Acelerograma de las componentes H1, H2 y V de un registro del sismo Imp. Valley 1940.....	22
Figura 11 - Espectros de aceleración ($\xi=5\%$) componentes H1, H2 y V de un registro del sismo Imp. Valley 1940.....	25
Figura 12 - Espectro de aceleraciones de diseño indicado en NSR-10.....	26
Figura 13 – Magnitud, distancia y relación V/H de algunos registros de la costa pacífica de México	28
Figura 14 - Espectro de respuesta vertical de acuerdo con ASCE 7-16.....	31
Figura 15 - Relaciones V/H en función de la distancia epicentral, sismo de L’Aquila, abril de 2009	43
Figura 16 - Comparación entre el espectro de diseño y el espectro de relación V/H para suelos blandos en la Ciudad de México.....	44
Figura 17 - Comparación del espectro de diseño V/H propuesto y el espectro V/H obtenido para la zona D-1 del MOC-2015	45
Figura 18 - Espectros V/H predichos por el modelo propuesto por Bozorgnia y Campbell para cuatro efectos.....	48
Figura 19 - Comparación de resultados obtenidos a través de distintos modelos para la elaboración de espectros V/H en roca firme	49
Figura 20 - Espectro vertical propuesto para propósitos prácticos de ingeniería.....	50
Figura 21 - Definiciones del espectro vertical en algunos códigos de diseño sísmico	51

Figura 22 - Comparaciones de espectros verticales reales contra los obtenidos a través de códigos de diseño.....	52
Figura 23 - Forma general del espectro de aceleración vertical propuesto por Kale y Akkar	53
Figura 24 - Resumen de edificios estudiados en función del número de pisos	55
Figura 25 - Porcentajes de error promedio en función de la discretización de vigas	59
Figura 26 - Espectro Matching vs Espectro Escala de Amplitud	63
Figura 27 - Acelerogramas para la componente H1 (Azul), H2 (Cian) y V (rojo) del registro CIBA1_CO_20100729193445	71
Figura 28 - Espectros para la componente H1 (Azul), H2 (Cian) y V (rojo) del registro CIBA1_CO_20100729193445	71
Figura 29 - Relación entre PGA H y PGA V para todos los perfiles de suelo del ambiente Cortical, punto de vista a	74
Figura 30 - Relación entre SaH y SaV/SaH para perfiles de suelo A y B incluyendo todos los ambientes tectónicos.....	76
Figura 31 - Comparaciones espectrales V/H registros del ambiente Cortical con Dist Epi < 60 km perfiles de suelo A y B.....	79
Figura 32 - Espectro de diseño horizontal (color azul) y vertical (color rojo).....	83
Figura 33 - Planta y vista en 3d estructura tipo pórtico de 5 pisos.....	85
Figura 34 - Planta y vista en 3d estructura sistema combinado de 15 pisos	86
Figura 35 - Elementos para analizar en el sistema pórtico	90
Figura 36 - Elementos para analizar en el sistema combinado	91
Figura 37 - Discretización empleada en modelos estructurales	93
Figura 38 - Puntos para verificación de los indicadores propuestos.....	95
Figura 39 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro viga exterior edificio 5 pisos ADE.....	96
Figura 40 - Efecto componente V para V, M y P columna de esquina edificio 5 pisos ADE	97
Figura 41 - Acelerograma escalado componente V evento Coyote Lake edificio 5 pisos	101
Figura 42 - Ejemplo definición caso de carga componente V para un acelerograma	102
Figura 43 - Combinaciones en una de las direcciones para cargas sísmicas en ADE y ADL	103
Figura 44 - Organigrama para el análisis de resultados de la relación V/H	110

Figura 45 - Relación entre PGA H y PGA V todos los perfiles de suelo ambiente Cortical	112
Figura 46 - Incidencia de la distancia epicentral en el ambiente Cortical todos los tipos de suelo.....	113
Figura 47 - Relación entre PGA H y PGA V todos los perfiles de suelo ambiente Subducción	115
Figura 48 - Incidencia de la distancia epicentral en el ambiente Subducción todos los tipos de suelo	116
Figura 49 - Relación entre PGA H y PGA V todos los perfiles de suelo ambiente Benioff	118
Figura 50 - Relación entre PGA H y PGA V todos los perfiles de suelo ambiente Nido Sísmico de Bucaramanga.....	119
Figura 51 - Relación entre SaH y SaV/SaH todos los perfiles de suelo ambiente Cortical	122
Figura 52 - Relación entre SaH y SaV todos los perfiles de suelo ambiente Cortical, Incluye todos los resultados.....	123
Figura 53 - Relación entre SaH y SaV todos los perfiles de suelo ambiente Cortical, registros con SaH > 0.25 g.....	124
Figura 54 - Relación entre SaH y SaV/SaH todos los perfiles de suelo ambiente Subducción	126
Figura 55 - Relación entre SaH y SaV todos los perfiles de suelo ambiente Subducción, incluye todos los resultados.....	127
Figura 56 - Relación entre SaH y SaV/SaH todos los perfiles de suelo ambiente de Benioff	128
Figura 57 - Relación entre SaH y SaV todos los perfiles de suelo ambiente Benioff, incluye todos los resultados.....	129
Figura 58 - Relación entre SaH y SaV/SaH todos los perfiles de suelo ambiente del Nido Sísmico de Bucaramanga.....	130
Figura 59 - Relación entre SaH y SaV todos los perfiles de suelo ambiente Nido, incluye todos los resultados.....	131
Figura 60 - Relación entre PGA H y PGA V perfiles de suelo A y B incluyendo todos los ambientes tectónicos	133

Figura 61 - Relación entre PGA H y PGA V perfil de suelo C incluyendo todos los ambientes tectónicos	134
Figura 62 - Relación entre PGA H y PGA V perfiles de suelo D, E y F incluyendo todos los ambientes tectónicos	136
Figura 63 - Relación entre PGA H y PGA V perfiles de suelo D, E y F incluyendo todos los ambientes tectónicos con PGA H > 0.10 g.....	136
Figura 64 - Relación entre SaH y SaV perfiles de suelo A y B, se incluyen todos los ambientes tectónicos	138
Figura 65 - Relación entre SaH/SaV perfiles de suelo A y B, incluye todos los ambientes tectónicos y el parámetro Cv de ASCE 7-16	139
Figura 66 - Relación entre SaH y SaV perfil de suelo C, se incluyen todos los ambientes tectónicos	140
Figura 67 - Relación entre SaH/SaV perfil de suelo C, incluye todos los ambientes tectónicos y el parámetro Cv de ASCE 7-16.....	141
Figura 68 - Relación entre SaH y SaV perfiles de suelo D, E y F, se incluyen todos los ambientes tectónicos	142
Figura 69 - Relación entre SaH y SaV perfiles de suelo D, E y F, se incluyen todos los ambientes tectónicos con SaH > 0.25 g.....	142
Figura 70 - Relación entre SaH/SaV perfiles de suelo D, E y F, incluye todos los ambientes tectónicos y el parámetro Cv de ASCE 7-16	143
Figura 71 - Comparaciones espectrales V/H en registros del ambiente Cortical y perfiles de suelo A y B tomando como referencia la Dist. Epi.....	146
Figura 72 - Comparaciones espectrales V/H en registros del ambiente Cortical y perfil de suelo C tomando como referencia la Dist. Epi.....	147
Figura 73 - Comparaciones espectrales V/H en registros del ambiente Cortical y perfiles de suelo D, E y F tomando como referencia la Dist. Epi.	148
Figura 74 - Efecto componente V para V, M y P en la columna C1 edificio 5 pisos (X) ADE	154
Figura 75 - Efecto componente V para V, M y P en la columna C1 edificio 5 pisos (X) ADL	154
Figura 76 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C2 edificio 5 pisos (X) ADE	155

Figura 77 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C2 edificio 5 pisos (X) ADL	155
Figura 78 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C6 edificio 5 pisos (X) ADE	156
Figura 79 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C6 edificio 5 pisos (X) ADL	156
Figura 80 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga exterior edificio 5 pisos ADE	158
Figura 81 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga exterior edificio 5 pisos ADL	158
Figura 82 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga interior edificio 5 pisos ADE	159
Figura 83 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga interior edificio 5 pisos ADL	160
Figura 84 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C1 edificio 15 pisos (X) ADE	161
Figura 85 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C1 edificio 15 pisos (X) ADL	162
Figura 86 - Efecto componente V para V, M y P en el muro M1 edificio 15 pisos (X) 100% EX ADE	163
Figura 87 - Efecto componente V para V, M y P en el muro M1 edificio 15 pisos (X) 100% EX ADL.....	163
Figura 88 - Efecto componente V para V, M y P en el muro M5 edificio 15 pisos (X) 100% EX ADE	164
Figura 89 - Efecto componente V para V, M y P en el muro M5 edificio 15 pisos (X) 100% EX ADL.....	165
Figura 90 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga exterior edificio 15 pisos ADE	167
Figura 91 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga exterior edificio 15 pisos ADL	167
Figura 92 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga interior edificio 15 pisos ADE	168

Figura 93 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga interior edificio 15 pisos ADL	169
Figura 94 - Espectro H y V de registros usados en edificios de 5 pisos, y relación V/H entre el promedio de estos.....	172
Figura 95 - Espectro H y V de registros usados en edificios de 15 pisos, y relación V/H entre el promedio de estos.....	175
Figura 96 - Vistas de la estructura estratificada de la Tierra.....	190
Figura 97 - Placas tectónicas principales y medianas que conforman nuestra corteza terrestre	192
Figura 98 - Forma de propagación de las ondas P (primarias).....	194
Figura 99 - Forma de propagación de las ondas S (Secundarias).....	194
Figura 100 - Forma de propagación de las ondas Rayleigh	195
Figura 101 - Forma de propagación de las ondas Love	195
Figura 102 - Registro sísmico típico (sismograma o acelerograma).....	195
Figura 103 - Magnitud del terremoto y equivalencia de energía.....	200
Figura 104 - Magnitudes de los terremotos e incidencia mundial prevista.....	200
Figura 105 - Ejemplo del registro CFILA_CO_19940913100134 en el Current Folder de MATLAB, a la derecha los 13 arreglos que contiene y el tipo de cada uno de ellos	209
Figura 106 - Ejemplo del contenido del arreglo tipo estructura correspondiente al Canal 1 del registro CFILA_CO_19940913100134, se evidencia los 6 arreglos indicados en líneas anteriores.....	209
Figura 107 - Relación entre PGA H y PGA V todos los perfiles de suelo ambiente Cortical PGA H > 0.10 g	210
Figura 108 - Relación entre PGA H y PGA V todos los perfiles de suelo ambiente de Subducción PGA H > 0.10 g	210
Figura 109 - Efecto de la distancia epicentral para SaH > 0.25g todos los perfiles de suelo del ambiente cortical.....	211
Figura 110 - Relación entre SaH y SaV todos los perfiles de suelo ambiente Subducción, se incluyen solo registros con SaH > 0.25 g	211
Figura 111 - Efecto de la distancia epicentral para SaH > 0.25g todos los perfiles de suelo ambiente Subducción	212
Figura 112 - Relación entre PGA H y PGA V perfiles de suelo A y B incluyendo todos los ambientes tectónicos con PGA H < 0.10 g.....	213

Figura 113 - Relación entre PGA H y PGA V perfil de suelo C incluyendo todos los ambientes tectónicos con $PGA H < 0.10 g$	213
Figura 114 - Relación entre PGA H y PGA V perfiles de suelo D, E y F incluyendo todos los ambientes tectónicos con $PGA H < 0.10 g$	214
Figura 115 - Efecto de la distancia epicentral para $PGA H > 0.10 g$ y perfiles de suelo D, E y F incluyendo todos los ambientes tectónicos	215
Figura 116 - Efecto de la distancia epicentral para $SaH H > 0.25 g$ y perfiles de suelo D, E y F incluyendo todos los ambientes tectónicos	215
Figura 117 - Comparación de relaciones espectrales para el ambiente Cortical considerando la incidencia de los registros con distancia epicentral menor a 60 km.....	216
Figura 118 - Comparación de relaciones espectrales para el ambiente Cortical considerando la incidencia de los registros con distancia epicentral menor a 100 km.....	217
Figura 119 - Comparación de relaciones espectrales para el ambiente Cortical considerando la incidencia de todos los registros	218
Figura 120 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C1 edificio 5 pisos (Y) ADE	220
Figura 121 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C2 edificio 5 pisos (Y) ADE	220
Figura 122 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C6 edificio 5 pisos (Y) ADE	220
Figura 123 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C1 edificio 15 pisos (Y).	223
Figura 124 - Cuadro de desagregación sísmica para Cali, edificio 5 pisos.....	227
Figura 125 - Pares de magnitud y distancia para los 10 primeros máximos de la desagregación y gráfico de la misma.....	228
Figura 126 - Cuadro de desagregación sísmica para Cali, edificio 15 pisos.....	229
Figura 127 - Pares de magnitud y distancia para los 10 primeros máximos de la desagregación y gráfico de la misma.....	230
Figura 128 - Imagen de referencia 1 proceso búsqueda señales PEER	231
Figura 129 - Imagen de referencia 2 proceso búsqueda señales PEER	232
Figura 130 - Imagen de referencia 3 proceso búsqueda señales PEER	233
Figura 131 - Imagen de referencia 4 proceso búsqueda señales PEER	234
Figura 132 - Imagen de referencia 5 proceso búsqueda señales PEER	235

Figura 133 - Ejemplo del proceso gráfico de verificación del escalado de las señales para obtener el factor de escala. Registro evento Big Bear 01 (1992)	239
Figura 134 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C1 edificio 5 pisos (Y) ADL	242
Figura 135 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C2 edificio 5 pisos (Y) ADL	242
Figura 136 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C6 edificio 5 pisos (Y) ADL	242
Figura 137 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C1 edificio 15 pisos (Y) ADL	245
Figura 138 - Sección transversal de la columna típica usada en el arquetipo de 5 pisos	249
Figura 139 - Diagrama de interacción columna C6, incluye solicitaciones sísmicas (ADE)	250
Figura 140 - Diagrama de interacción columna C6, incluye solicitaciones sísmicas (ADL)	251

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 - Ecuación dinámica de equilibrio	34
Ecuación 2 - Cálculo de la aceleración, método de la aceleración lineal.....	68
Ecuación 3 - Ajuste de resultados para el ADL, ecuación A.5.5-1 NSR-10	103
Ecuación 4 - Cálculo del error entre espectro objetivo y espectro escalado.....	107
Ecuación 5 - Determinación magnitud momento de un evento sísmico	199

Índice de anexos

Anexo A – Conceptos básicos de contexto	190
Anexo B – Análisis básico de carga para los edificios.....	202
Anexo C - Base de datos de movimiento fuerte MNAS 2020	204
Anexo D – Espectro horizontal objetivo en la localización de la estructura	207
Anexo E – Características de los arreglos correspondientes a los registros entregados por el SGC.....	208
Anexo F – Resultados adicionales para la relación V/H en función de PGA por ambiente tectónico incluyendo todos los perfiles de suelo.....	210
Anexo G – Resultados adicionales para la relación V/H en función de Sa por ambiente tectónico incluyendo todos los perfiles de suelo.....	211
Anexo H – Resultados adicionales para la relación V/H en función de PGA por tipo de suelo incluyendo todos los ambientes tectónicos	213
Anexo I – Resultados adicionales para la relación V/H en función de PGA por tipo de suelo incluyendo todos los ambientes tectónicos	215
Anexo J – Comparación de relaciones espectrales para el ambiente Cortical considerando la incidencia de registros con DistEpi<60km	216
Anexo K – Comparación de relaciones espectrales para el ambiente Cortical considerando la incidencia de registros con DistEpi<100km	217
Anexo L – Comparación de relaciones espectrales para el ambiente Cortical considerando la incidencia de todos los registros	218
Anexo M – Comparación de algunas formas espectrales de registros reales con respecto a las formas espectrales de NSR-10 y ASCE 7-16	219
Anexo N – Resultados de las relaciones V/H para las solicitaciones de P, V y M en el edificio de 5 pisos ADE	220
Anexo O – Resultados de las relaciones V/H para las solicitaciones de P, V y M en el edificio de 15 pisos ADE	223
Anexo P – Resultados de la desagregación de la amenaza sísmica para los edificios de 5 y 15 pisos	227
Anexo Q – Ejemplo del procedimiento de búsqueda y criterios de selección de señales en la base de datos del PEER	231
Anexo R – Movimientos del terreno preseleccionados para los edificios de 5 y 15 pisos.....	236

Anexo S – Escalado de las tres componentes de uno de los registros de evento sísmico usado en el edificio de 5 pisos	238
Anexo T – Registros sísmicos escalados para edificio de 5 pisos.....	240
Anexo U – Registros sísmicos escalados para edificio de 15 pisos	241
Anexo V – Resultados de las relaciones V/H para las solicitaciones de P, V y M en el edificio de 5 pisos ADL	242
Anexo W – Resultados de las relaciones V/H para las solicitaciones de P, V y M en el edificio de 15 pisos ADL	245
Anexo X – Chequeo del diseño a flexo-compresión de la columna C6 cuando se considera la componente V	249

Introducción

Los sismos han estado presentes desde tiempos que se remontan a la formación de nuestro planeta; la mayoría asociados a movimientos que ocurren entre placas tectónicas o entre microplacas y a otros fenómenos como por ejemplo el de corrientes de convección (Aguilar, 2008). El estudio de estos eventos ha tomado relevancia a nivel mundial a raíz de la densificación de los cascos urbanos, lo que generó la construcción de algunas edificaciones sin considerar un sistema de resistencia adecuado para soportar los efectos de las componentes sísmicas horizontal (H) y vertical (V), aspectos que de no contemplarse podrían repercutir en la pérdida de vidas humanas y afectaciones negativas al patrimonio de las naciones y de sus habitantes. Evitar que estas pérdidas se presenten se convertiría con el tiempo en el objetivo principal de códigos o normas de diseño sísmico.

Para cumplir el objetivo principal de los códigos o normas de diseño sismo resistente, en distintas partes del mundo se iniciaron investigaciones cuyo fin era entender el comportamiento de los movimientos telúricos y su efecto sobre las estructuras para reglamentar su diseño; un ejemplo de ello ocurrió en 1927 cuando en Estados Unidos se incluyó en el Uniform Building Code (UBC) de ese año el tema sísmico; en la época se consideró que era razonable tener en cuenta hasta un 10% del peso del edificio como fuerza lateral empleando el método de la Fuerza Horizontal Equivalente (Fierro, 2003), pero sin contemplar el efecto de la componente vertical.

Colombia no es la excepción en cuanto a las naciones que necesitaban establecer requisitos mínimos con respecto al diseño sísmico. En 1984 se adoptó el primer código de construcción sismo resistente a través del Decreto 1400 del 7 de junio de ese año, esto como resultado de un sismo de 5.5 en la escala de Richter que afectó la ciudad de Popayán (García, 2014), dejando un saldo de 280 muertos, 72% de las viviendas afectadas, 23% de las viviendas destruidas y costos en pérdidas de cuatrocientos millones de dólares para la época (Díaz, 2008).

En la actualidad el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), menciona la componente V indicando que cuando se use debe considerarse mínimo un $2/3$

de los valores correspondientes a la componente sísmica H, ya sea en los espectros de diseño o en la familia de acelerogramas cuando solo se cuente con registros horizontales, o usar los registros de aceleración vertical de acelerogramas reales con el ajuste equivalente realizado a las componentes H. La primera indicación podría ser insuficiente si se tiene en cuenta que el $2/3$ obedece a un estudio realizado por Newmark y otros en Estados Unidos en el año de 1973 (Perea & Esteva, 2005), en el cual se realizó una revisión de los cocientes de aceleración vertical con respecto a la aceleración horizontal para 33 registros sísmicos obteniendo ese valor como promedio. Sin embargo, el uso de esta magnitud podría resultar insuficiente en sitios cercanos a las fuentes de falla, pues investigaciones posteriores han mostrado resultados de relaciones V/H iguales a 1.79 como sucedió en el sismo de Northridge en California en el año de 1994 (Vilera et al., 2008).

Un ejemplo en nuestro país es el sismo del 25 de enero de 1999 que afectó la región del eje cafetero con un saldo de 1.185 muertos y más de US 1.500 millones en pérdidas. Datos tomados del catálogo de aceleraciones del Servicio Geológico Colombiano, particularmente de la estación ARMEC ubicada a 13 km del epicentro (Servicio Geológico Colombiano, 2020), muestran que la relación entre la componente V y H de este evento fue de 0.89 para aceleraciones máximas del terreno (PGA), 34% mayor al límite de $2/3$ recomendado en NSR-10.

Perea y Esteva (2005) encontraron que para algunas zonas de México, la componente espectral vertical puede ser más intensa que la componente espectral horizontal, alcanzando para periodos cortos valores de hasta 140%, lo que contradice el $2/3$ considerado en algunos códigos y normas de diseño. Mas allá de si es apropiado o no el uso de un $2/3$ del espectro horizontal como componente vertical, el problema se refleja en que considerando un comportamiento elástico-lineal en la estructura, la componente sísmica vertical de los registros ha producido en columnas incrementos de hasta el 60% en la demanda de carga axial y un 30% en la demanda a flexión en comparación con aquellas que se obtendría únicamente considerando la componente H (Perea & Esteva, 2005).

Por lo menos en Colombia usualmente no se incluye la componente vertical en el análisis y diseño de edificios; adicionalmente no son muchas las investigaciones que se han desarrollado a nivel nacional para estudiar el comportamiento de las estructuras ante este

efecto. Un análisis similar al que se pretende realizar en este trabajo fue realizado por el ingeniero Oscar Cabrera (Cabrera, 2013); los resultados indican un 11% en el incremento de las cargas axiales en los muros, aclarando que no se consideraron acelerogramas reales para el análisis, en su lugar se supuso que el efecto de la componente V era el 2/3 del espectro horizontal. En países cercanos al nuestro como es el caso de Venezuela, se han encontrado para análisis no lineales incrementos en cargas axiales que variaron desde un 72% hasta un 167% para edificios de distintas alturas (Vilera et al., 2008), lo que indicaría un riesgo de colapso y la importancia de considerar la componente V.

Diseñar sin revisar si los efectos que induce un sismo en el sentido vertical son importantes o si por el contrario podrían ignorarse es una de las inquietudes que llevan a la realización de este trabajo, en cuanto hay evidencia nacional e internacional sobre efectos mayores ocasionados por la relación V/H a los establecidos en algunos requisitos vigentes, de tal forma que se pretende contribuir a validar esas evidencias y comenzar a generar recomendaciones al respecto. En el mismo sentido, se lleva a cabo con el fin de divulgar el problema y para concientizar a los consultores y que sean ellos quienes decidan sobre las medidas que pueden tomar en sus diseños aunque aún no estén en los reglamentos. Esto ayuda a dar respuesta al hecho de saber si es un riesgo para la estabilidad global de las estructuras de pórticos y sistemas combinados en concreto excluir del análisis y diseño la componente V del sismo, o en su defecto si es suficiente considerarla como el 2/3 de la componente H.

Los aspectos indicados hacen que el tema sea relevante y pertinente para estudiarlo dentro de la línea de investigación de comportamiento estructural del Grupo de Investigación en Estructuras y Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, considerando que se advertirá sobre los criterios a observar durante el análisis y diseño de estructuras de manera tal que se aumente la seguridad de quienes las ocupan. En atención a lo expuesto, esta tesis tiene como objeto adelantar un procedimiento analítico a través del cual se evalúe para los sismos de la Base de Datos de Movimientos Fuertes considerados en el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica 2020 (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020) en nuestro país (Anexo C), la relación entre la componente horizontal y vertical y el efecto de la componente vertical sísmica sobre estructuras aporricadas y sistemas combinados de concreto reforzado.

Para cumplir el propósito mencionado se plantearon cinco capítulos. En el capítulo 1 se abordan algunos conceptos generales que permitirán introducirse en el tema recordando aspectos claves que serán básicos en el desarrollo del documento; adicionalmente se hizo énfasis en algunas consideraciones generales del Modelo Nacional de Amenaza Sísmica vigente para Colombia (MNAS 2020). En el capítulo 2 se desarrolló el estado del arte del tema de investigación desde dos puntos de vista o enfoques, el primero hace referencia a las relaciones entre componentes V/H desde el punto de vista de la naturaleza del sismo, y el segundo al efecto que induce la componente V sobre algunos tipos de estructuras.

El capítulo 3 explica la metodología que se siguió para los dos enfoques generales del presente trabajo. Inicialmente se explica cuál fue el procedimiento para establecer la relación entre la componente V y H en Colombia con base en los registros de eventos sísmicos usados en el MNAS 2020 desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano. Posteriormente se explican los parámetros y pasos seguidos para definir los arquetipos estructurales y la forma en que se consideraría la componente sísmica vertical para estudiar sus efectos en las sollicitaciones de carga axial, momento y corte.

Por otra parte, el capítulo 4 se reservó para mostrar y analizar los resultados obtenidos en el capítulo inmediatamente anterior. Estos resultados se analizaron por separado en los dos enfoques de la relación entre la componente V y H, primero para la relación entre componentes de los registros sísmicos usados y segundo para las relaciones entre las sollicitaciones de los arquetipos estructurales, lo que es consistente con el orden en el que se desarrollaron los capítulos 2 y 3. Por último se presenta el capítulo 5, el cual recoge las conclusiones y recomendaciones derivadas del contenido general del documento.

Los resultados obtenidos contribuyen a dejar en evidencia que para algunas condiciones específicas, las cuales están en función de los ambientes tectónicos y de las condiciones de sitio, el hecho de considerar un $2/3$ de H como componente V no sería suficiente; así mismo, que esta componente induce para las condiciones analizadas en el presente documento esfuerzos adicionales de flexo compresión en los elementos verticales que en ciertos casos no estarían en capacidad de resistir.

Objetivos

Objetivo general

Analizar la relación entre la componente vertical (V) y horizontal (H) para sismos ocurridos en Colombia y el efecto de la componente sísmica vertical en columnas, vigas y muros de pórticos y sistemas combinados de concreto reforzado.

Objetivos específicos

1. Recopilar los registros y datos relevantes de los sismos de la Base de Datos de Movimientos Fuertes (Anexo C) considerados en la elaboración del Modelo Nacional de Amenaza Sísmica 2020, determinando con base en ellos la relación entre la componente vertical y horizontal (V/H).
2. Comparar la relación V/H obtenida en los registros sísmicos seleccionados con los valores sugeridos en el Reglamento NSR-10 y ASCE 7-16, evaluando qué tan acertadas son en cuanto a las magnitudes V/H recomendadas.
3. Realizar un análisis dinámico espectral (ADE) excluyendo e incluyendo la componente sísmica vertical para obtener relaciones V/H entre las solicitaciones de momento, corte y carga axial en columnas y muros, y momento y corte en vigas en cada modelo propuesto. Con base en los resultados de considerar únicamente la componente H verificar el diseño de las estructuras de acuerdo con NSR-10.
4. Realizar un análisis dinámico lineal (ADL) excluyendo e incluyendo la componente sísmica vertical para obtener relaciones V/H entre las solicitaciones de momento, corte y carga axial en columnas y muros, y momento y corte en vigas en cada modelo propuesto.

1 Marco Teórico

Los sismos han estado presentes desde la formación de La Tierra, son inevitables e impredecibles, lo que impone a los ingenieros el reto de enfrentarlos de la mejor manera posible; por lo anterior cualquier esfuerzo que se haga para comprender mejor su efecto sobre las edificaciones que emergen día a día será bien recibido. Desconocer el origen y el comportamiento de estos puede conducir a errores en el diseño de las estructuras, lo que en algunos casos podría ocasionar su colapso. Sin pretender incluir todos los conceptos sobre el tema, a continuación de forma básica se indican algunos de los más relevantes.

1.1 Eventos sísmicos

Los eventos sísmicos son movimientos de la corteza terrestre que ocurren en intervalos cortos de tiempo y con magnitud variable; se originan al interior de La Tierra por una rápida liberación de energía producto de una interacción de fuerzas entre placas tectónicas que cuando superan la resistencia de los materiales de la corteza redundan en el rompimiento de algunos sectores de esta. Son propiciados por la dinámica de nuestro planeta, el cual está compuesto internamente por capas de distintos materiales en estados físicos variables (sólido y líquido), y en placas tectónicas en estado sólido en superficie que terminan formando las placas continentales y la base de los océanos.



Figura 1 - Hipocentro o foco y epicentro de un evento sísmico
Fuente: Tomado de (Tarbuck & Lutgens, 2005)

En un terremoto el punto al interior de la litosfera donde se inicia la liberación de energía se conoce como hipocentro o foco del movimiento; esta definición necesita de una mayor explicación cuando se trata de movimientos que involucran grandes superficies de falla, en los cuales el punto de liberación de energía sigue siendo el hipocentro pero no es descriptivo de la zona de fallamiento (García, 1998). Otra definición importante es la del epicentro, el cual corresponde a la proyección en la superficie de la corteza terrestre del punto en el que se generó el hipocentro. Por último, la profundidad focal es la profundidad del hipocentro medida desde el epicentro (véase la Figura 1).

1.1.1 *Eventos sísmicos de naturaleza tectónica*

En general los sismos pueden catalogarse desde distintos puntos de vista, siendo la fuente que los genera uno de ellos. Desde este énfasis se mencionan los originados por la actividad volcánica; los que ocurren por causas antrópicas tales como la actividad militar y la ejecución de ensayos nucleares a gran escala que son poco frecuentes, controlados y de baja intensidad; y los de interés para el presente trabajo que son los de naturaleza tectónica, los cuales se producen por la actividad de las placas litosféricas.

Con enfoque en los de naturaleza tectónica, es relevante saber cómo pueden distinguirse para facilitar su estudio; una forma de clasificarlos se relaciona con la profundidad a la que ocurren; cuando este parámetro está comprendido entre los 0 y 70 km se clasifican como sismos superficiales, entre 70 y 300 km como sismos de profundidad intermedia, y para más de 300 km como sismos profundos (García, 1998). Otro criterio parte de dónde se produce la liberación de energía o fractura de la roca. Cuando el hipocentro se presenta en las zonas de contacto entre placas el evento sísmico se clasifica como un sismo tectónico o interplaca; a su vez, cuando la liberación de energía se produce al interior de las placas tectónicas como cuando ocurre en fallas geológicas internas activas se habla de sismos intraplaca (García, 1998). Otra forma de clasificarlos es la relacionada con el ambiente tectónico en el que se originan.

Clasificados los eventos sísmicos de naturaleza tectónica de acuerdo con la profundidad y la zona en la que se libera la energía, se retoman dos aspectos que en conjunto son relevantes para que estos ocurran, el primero asociado a un gradiente geotérmico entre la superficie de la corteza terrestre y el centro de La Tierra de 4.000°C (Gallego & Sarria, 2010), lo que deja ver una distribución desigual de calor al interior terrestre. El segundo relacionado con la disposición, composición y naturaleza dinámica de las placas tectónicas, a lo que se agrega la estratificación del interior terrestre en distintas capas que se encuentran en estado sólido o líquido.

Es precisamente al gradiente geotérmico al que se le atribuyen la mayoría de los eventos sísmicos de naturaleza cortical que afectan las estructuras de nuestro interés, en cuanto este produce el flujo por convección (transferencia de calor en medios líquidos) de materiales que terminan emergiendo en algunos lugares de la corteza oceánica o continental, siendo generalmente las fracturas ya existentes entre placas tectónicas estos puntos de afloramiento (Gallego & Sarria, 2010).

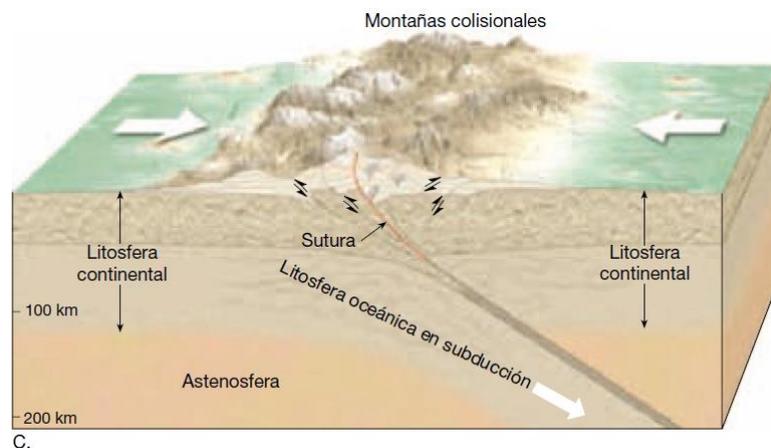


Figura 2 - Zonas de convergencia entre placas, subducción entre litosfera oceánica y continental
Fuente: Tomado de (Tarbuck & Lutgens, 2005)

El flujo de convección permite abordar el por qué se genera el movimiento de las placas tectónicas y la forma en que lo hacen entre sí. Adicionalmente nos introduce al movimiento derivado de la subducción que se resume en que una placa se desplace debajo de la otra ocasionando el afloramiento del material de corteza antes indicado (véase la Figura 2). Otro caso es cuando las placas se mueven

deslizándose lateralmente como es el caso de la falla de San Andrés en California Estados Unidos (García, 1998), en ambos casos el resultado es un movimiento de la corteza manifestado a través de un sismo tectónico.

1.1.2 Fallas geológicas

El movimiento no ocurre solo en el límite entre placas tectónicas principales, incluso en su interior estos movimientos generan una acumulación de esfuerzos tal como sucede en las fronteras entre estas, aumentando igualmente la fricción en las superficies de fallamiento internas (fallas geológicas), almacenando energía la cual al vencer la fricción entre las superficies produce un deslizamiento súbito de la falla produciéndose un evento sísmico intraplaca (García, 1998). Estas superficies de fallamiento son fracturas al interior de la corteza de La Tierra a través de las cuales ha tenido lugar un desplazamiento apreciable.

Cuando este desplazamiento es paralelo a la superficie de buzamiento o inclinación se habla de una falla con desplazamiento vertical (movimiento asociado a la generación de escarpes). Se ha adoptado la convención de llamar a la superficie de la roca ubicada por encima de la falla como Techo, y a la superficie de roca inferior como Muro (véase la Figura 3).

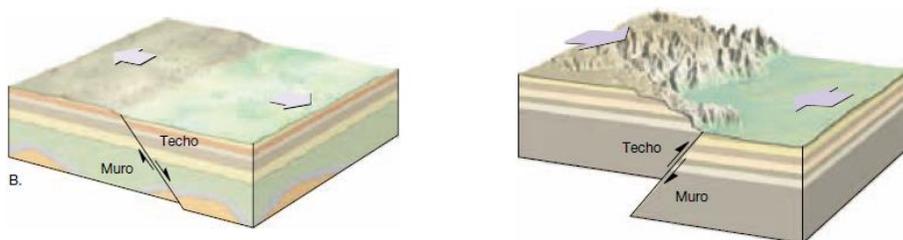


Figura 3 - Fallas de desplazamiento vertical, izq. falla normal (N), der. falla inversa (R)
Fuente: Tomado de (Tarbuck & Lutgens, 2005)

Entre las fallas de desplazamiento vertical se distinguen dos tipos, las Normales (N) en las cuales el bloque de Techo se desplaza hacia abajo con respecto al bloque de Muro, y las Inversas (R) donde el bloque de Techo se desplaza hacia arriba del

bloque de Muro (Tarbuck & Lutgens, 2005). En la figura anterior se evidencia que la falla normal se genera por tensión, condición en la cual la placa de Techo pierde soporte y por efectos de su propio peso trata de descender; caso distinto al de la inversa, en la que se presentan esfuerzos de compresión, lo que por la condición de la superficie inclinada genera un deslizamiento hacia arriba de la placa de Techo.

Además de las fallas de desplazamiento vertical existen las de desplazamiento horizontal o *strike-slip* (S), en estas predomina el desplazamiento en el sentido paralelo al de la superficie de la falla (véase la Figura 4). Para este caso se reconocen dos tipos de movimiento, el derecho o dextral y el izquierdo o sinistral, un ejemplo de este tipo de movimiento es el de la falla de San Andrés en Estados Unidos.

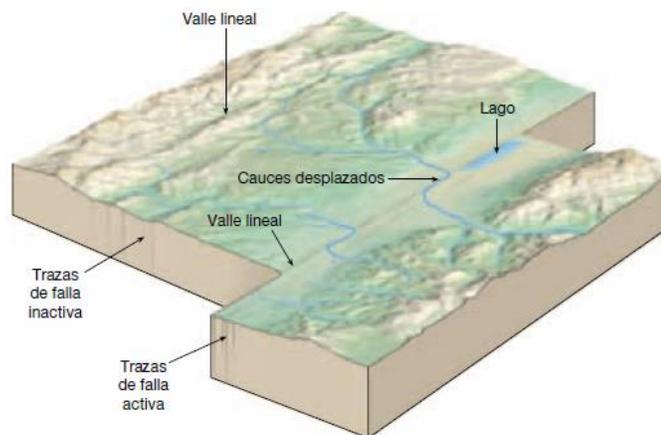


Figura 4 - Falla de desplazamiento horizontal o *strike-slip* (S)
Fuente: Tomado de (Tarbuck & Lutgens, 2005)

1.2 Amenaza sísmica en Colombia

A la severidad y frecuencia con que los eventos sísmicos pueden presentarse en un determinado lugar se le conoce con el nombre de amenaza sísmica. En este contexto conviene decir que Colombia está ubicada en una zona donde limitan bordes de las placas Suramericana, de Nazca y Caribe las cuales están en constante movimiento; esto sugiere una alta sismicidad en función de nuestra localización tectónica, lo que obliga continuamente a realizar investigaciones para

obtener herramientas como los mapas de aceleraciones espectrales para distintos periodos de retorno, información útil en el ejercicio de la ingeniería estructural.

A través del Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia 2020 (MNAS 2020), el Servicio Geológico Colombiano (SGC) zonificó y analizó la recurrencia de los sismos a nivel regional y nacional, determinando entre sus objetivos la probabilidad de que algún evento pueda exceder parámetros como la intensidad de movimiento del terreno para distintos sitios del país. A continuación algunos sismos importantes que han impactado nuestro territorio de acuerdo con el SGC, se indica ocurrencia, magnitud y zonas afectadas (véase la Tabla 1).

Tabla 1 - Principales eventos sísmicos históricos en Colombia

Fecha	Magnitud M_w	Sitio relacionado
1644/01/16	6.5	Pamplona (Norte de Santander)
1827/11/16	7.1	Altamira (Huila)
1875/05/18	6,8	Cúcuta (Norte de Santander)
1906/01/31	8.8	Costa pacífica, Pacífico
1917/08/31	6.7	Villavicencio (Meta)
1938/02/04	7.0	Eje cafetero
1947/07/14	6,0	Pasto (Nariño)
1950/07/08	6,1	Arboledas, (Norte de Santander)
1962/07/30	6,5	Eje cafetero
1967/02/09	7,0	Colombia (Huila)
1967/07/29	6,8	Betulia (Santander)
1976/07/11	7,3	Darién (Colombia) y Darién (Panamá)
1979/11/23	7,2	Eje cafetero
1979/12/12	8,1	Costa pacífica, Pacífico
1983/03/31	5,6	Popayán (Cauca)
1992/10/18	7,1	Murindó (Antioquia)
1995/01/19	6,5	Tauramena (Casanare)
1995/02/08	6,4	Calima (Darién), Valle del Cauca
1999/01/25	6,1	Eje cafetero
2004/11/15	7,2	Bajo Baudó (Pizarro, Chocó)

Fuente: Tomado de la Tabla 1 (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020)

Para llegar al modelo actual de amenaza sísmica se han realizado esfuerzos por más de sesenta años, durante este tiempo han contribuido profesionales,

instituciones educativas, organismos del Gobierno, y asociaciones como la Asociación de Ingeniería Sísmica (AIS), los hitos más importantes se indican en la Tabla 2.

Tabla 2 - Evolución del estudio de la amenaza sísmica en Colombia

Año	Autor (es)	Consideraciones especiales
1957	Ramírez y Forero Durán	Mapa sísmico y tectónico incluyendo eventos ocurridos entre 1566 y 1956.
1977	Estrada Uribe y Ramírez	Mapa de intensidades macrosísmicas (IMM) usando como referencia la escala de Mercalli Modificada.
1984	García et al.	Referencia para definir valores de aceleración pico efectiva del código CCCSR-84.
1996	Comité AIS 300, Uniandes e Ingeominas	Referencia para definir coeficientes sísmicos de diseño de la norma NSR-98.
2009	Comité AIS 300	Referencia para definir coeficientes sísmicos de diseño del reglamento NSR-10.
2014	Bernal	Referencia parámetros de diseño Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14.
2020	Servicio Geológico Colombiano (SGC)	Catálogo integrado de eventos sísmicos, fallas activas, base de datos movimiento fuerte, ambientes tectónicos, aceleraciones espectrales, entre otros.

Fuente: Tomado de (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020)

Todo modelo se construye a partir de datos relevantes. Para definir la amenaza sísmica en Colombia se emplearon distintos tipos de fuentes; una proveniente de datos históricos a partir de los cuales se estima la localización y severidad de sismos históricos; otra consideró información proveniente de estaciones que cuentan con equipos para registrar las características de los eventos (por ejemplo sismógrafos o acelerógrafos); y una más relacionada con la observación geológica, lo que permite identificar fallas y definir aspectos tales como su geometría y actividad. Con base en estas fuentes se elaboró un modelo probabilístico que permitió estimar la amenaza sísmica, logrando establecer en qué zonas se pueden producir terremotos y con qué magnitudes de aceleración pueden llegar a presentarse.

La metodología para agrupar estos datos en el contexto del MNAS 2020 consistió en reunir en un inventario conocido como Catálogo Sísmico Integrado (CSI) información de sismos ocurridos en una zona de interés para Colombia en un

periodo de tiempo específico. Para el CSI se tomó información de catálogos globales y nacionales teniendo en cuenta: 1. Criterios de priorización para la selección de información confiable de cada uno de ellos, 2. Homogenización del tipo de magnitud a la magnitud momento M_w , 3. Remoción de eventos dependientes (premonitores, réplicas y enjambres) y 4. Análisis de completitud. Los catálogos sísmicos de los que se consideraron más de sesenta y un mil eventos pueden revisarse en el MNAS 2020.

Se aclara que después del análisis realizado por el SGC, se disminuyó el número de eventos a un consolidado de 34.681 acontecidos entre 1610 y 2014 (véase la Figura 5), incluyendo los eventos considerados en el catálogo de sismos históricos del SGC (SGC-H), además es preciso mencionar que estos eventos se presentaron en un rango de profundidad de 0 a 700 km y que su magnitud M_w estuvo en un rango de 2.9 a 8.4. (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020).

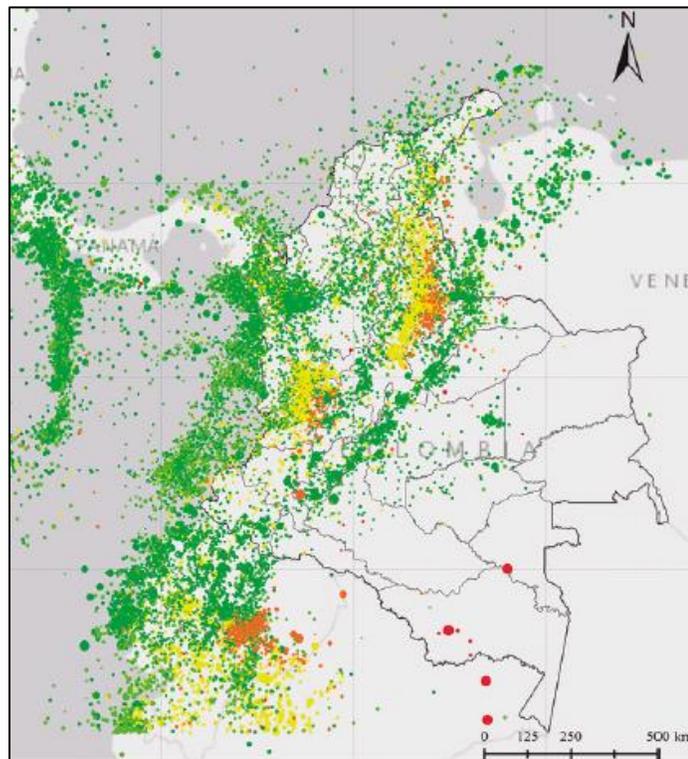


Figura 5 - Distribución de hipocentros contenidos en el CSI, periodo (1610-2014)
Fuente: Tomado de (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020)

En general con base en el CSI, en el estudio de la geología nacional y en modelos probabilísticos, se establecieron tasas de actividad sísmica de las fuentes generadoras, las cuales relacionan la cantidad de eventos según magnitudes que pueden ocurrir en un periodo de tiempo determinado (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020).

1.2.1 Ambientes tectónicos

El país está dividido en ambientes tectónicos donde se espera que ocurran sismos de características similares, esto facilita estudiar y definir la amenaza sísmica. Estos ambientes están clasificados en función de sus características sismológicas, de forma tal que se puede establecer para cada sismo los mecanismos de falla, magnitudes máximas, profundidad de los hipocentros y recurrencia. Esta particularidad está asociada a la definición de las fuentes generadoras de eventos sísmicos al interior de estos sectores. Con base en lo anterior se establecieron cuatro ambientes tectónicos fácilmente diferenciables entre sí (véase la Figura 6), a continuación una breve descripción de cada uno de ellos.

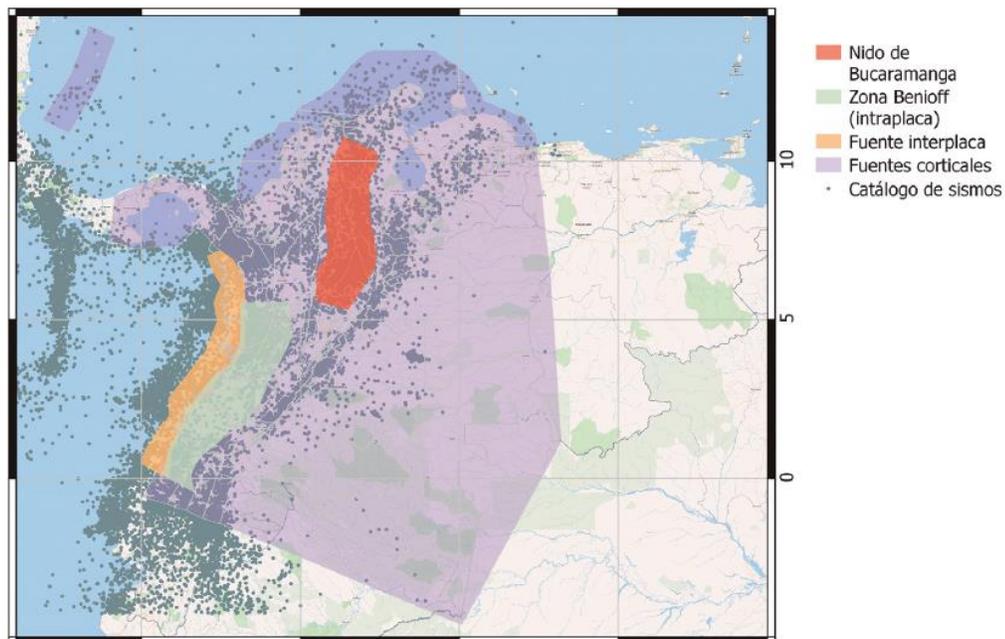


Figura 6 - Ambientes tectónicos definidos en el MNAS 2020
Fuente: Tomado de (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020)

1.2.1.1 *Cortical*

En este ambiente la actividad sísmica está acotada por la superficie terrestre y el límite corteza-manto superior o discontinuidad de Mohorovičić (“moho”), generalmente se asocia a profundidades menores a 70 km. (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020). Es el área de mayor extensión por tratarse de toda la corteza superficial, abarcando gran parte del territorio nacional.

1.2.1.2 *Subducción del pacífico*

Se había dicho que la palabra subducción hace referencia al fenómeno que ocurre cuando una placa tectónica trata de deslizarse por debajo de otra, este fenómeno ocurre en la costa pacífica de Colombia, zona en la cual la placa de Nazca trata de deslizarse permanentemente debajo de la placa Suramericana generando el ambiente de Subducción del pacífico.

1.2.1.3 *Benioff*

Este ambiente hace parte del proceso de subducción del pacífico, sin embargo, reúne unas características especiales que hacen que se diferencie del ambiente anterior. Para diferenciar los sismos de la zona de subducción de la zona intraplaca de Benioff se consideran los siguientes parámetros:

- a. La profundidad de los sismos, considerando que los de mayor profundidad son los que corresponden a la zona intraplaca o de Benioff, mientras que los más superficiales corresponden a la zona de subducción.
- b. La localización del arco volcánico que está más relacionado con la zona de Benioff.
- c. El tipo de mecanismo focal en su mayoría son de tipo inverso (R) para los sismos interplaca, mientras que son normales (N) para las zonas intraplaca. (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020).

1.2.1.4 Nido sísmico de Bucaramanga

Un nido sísmico es una región donde se puede observar una concentración inusual de actividad sísmica de manera más o menos continua. El Nido sísmico de Bucaramanga al que de ahora en adelante se hará referencia como Nido clasifica dentro de esta definición y es catalogado como uno de los nidos con mayor actividad en el mundo; generalmente los hipocentros se encuentran ubicados entre los 50 y los 250 km., aunque para este caso la zona focal está representada por una cuña de profundidades comprendida entre los 120 y 220 km. (Sepulveda & Cabrera, 2018), mientras que de acuerdo con lo indicado en MNAS 2020 estas profundidades varían entre los 140 a 200 km.

Para clasificar un sismo en un ambiente tectónico el SGC adoptó un procedimiento similar a los propuestos por Zhao et al en 2015 y García et al. en 2010, en el que cada evento es asignado a un ambiente de forma inequívoca. Generalmente está basado en los límites definidos para cada ambiente particular; por ejemplo si un sismo se ubica en una profundidad entre la superficie y el límite de “Moho” será clasificado como cortical, sin embargo si este evento está dentro de los límites de la zona intraplaca o del Nido sísmico de Bucaramanga se seguirá un procedimiento especial referido en el capítulo 4 del MNAS 2020 para su reclasificación.

1.2.2 Base de datos de movimientos fuertes

Es la consolidación de un conjunto de registros acelerográficos de eventos sísmicos del SGC y del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador; estos eventos fueron seleccionados por existir información suficiente para determinar su ubicación, magnitud y mecanismo focal. La base de datos es una herramienta útil para determinar las aceleraciones espectrales de cada uno de los sismos registrados (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020).

Para un fácil manejo de la información los eventos sísmicos fueron clasificados de acuerdo con las regiones tectónicas en las que se originaron, como se indicó son: 1. Corteza activa (Cortical), 2. Zona de subducción del pacífico (Interplaca), 3. Zona de Benioff (Intraplaca) y 4. Zona del Nido sísmico de Bucaramanga. En total se seleccionaron 118 eventos sísmicos (véase la Figura 7) para los cuales se dispone de 1.786 registros triaxiales, significa que existen 1.786 registros para la componente horizontal 1 (H1) e igual número de registros para la componente horizontal 2 (H2) y para la componente vertical (V) para un total de 5.358 registros. Estos eventos se registraron entre 1994 y 2017, nótese que es cercana la fecha inicial al año en que se inauguró la red sismológica nacional en 1993.

Las magnitudes de estos eventos superan los 4.8 en M_w , lo que es concordante con lo expuesto por (García, 1998) en cuanto a que los sismos que se considera pueden hacer daño en las edificaciones en las que habitamos son aquellos que superan una magnitud M_L de 5.0, valores cercanos considerando la similitud en las magnitudes entre estas escalas para ese rango de valores. La distribución de los registros por ambiente tectónico es la siguiente:

Tabla 3 - Registros acelerográficos por ambiente tectónico

Ambiente tectónico	Número de registros	Profundidad promedio (km)	Rango M_w
Cortical	607	25	4.8 a 7.0
Subducción (Interplaca)	259	22	5 a 7.8
Benioff (Intraplaca)	435	131	4.8 a 7.3
Nido (Intraplaca)	485	147	4.8 a 6.25
Total	1.786		

Fuente: Tomado (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020)

Obsérvese que el ambiente tectónico con mayor número de registros es el cortical, para este ambiente se escogieron 49 eventos sísmicos con un total de 607 registros, la profundidad promedio es de 25 km y aunque en la Tabla 3 se indica que la magnitud oscila entre 4.8 y 7.0 M_w , es conveniente aclarar que solo en 7 eventos se registraron magnitudes superiores a 6.0, lo que significa que mayoritariamente las magnitudes oscilan entre 5.0 y 6.0 M_w ; el mecanismo de falla predominante es el horizontal o strike-slip (S). Siguen en número de eventos los ambientes

correspondientes al Nido y la zona de Benioff. En el primer caso se seleccionaron 26 eventos sísmicos para un total de 485 registros, la profundidad promedio es de 147 km siendo este el ambiente en que se registran los eventos a mayores profundidades, las magnitudes varían generalmente entre 4.8 y 5.4 M_W a excepción de un solo evento que alcanzó 6.25 M_W . El segundo caso que corresponde a la zona de Benioff cuenta con un total de 22 eventos sísmicos y 435 registros, la profundidad promedio es de 131 km y la magnitud de los eventos oscila entre 4.8 y 7.3 M_W . En lo relacionado con el mecanismo de falla en estos ambientes se presentan diversos tipos, sin embargo, de acuerdo con un análisis del anexo B del MNAS 2020 en el Nido predominan los strike-slip (S) y en Benioff el mecanismo de falla normal (N).

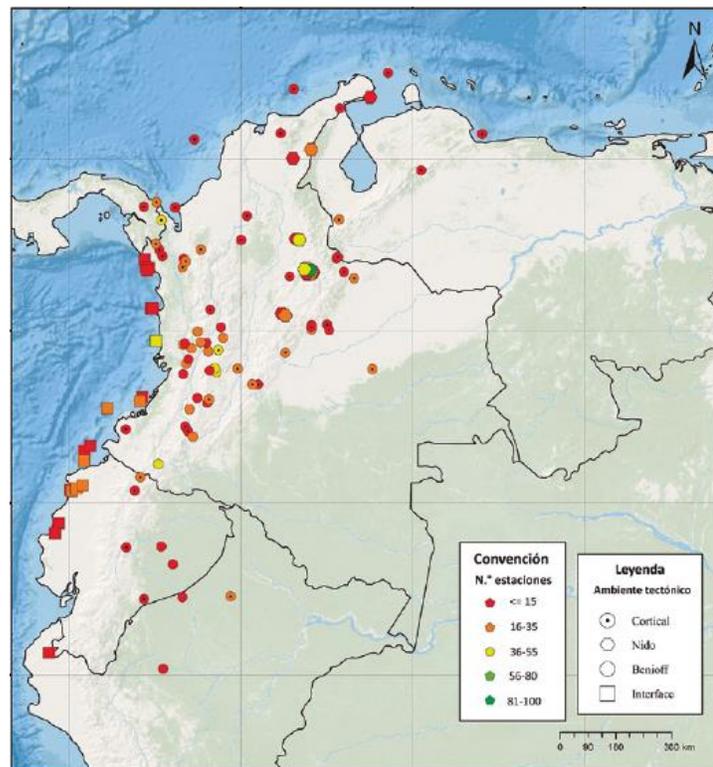


Figura 7 - Distribución de los registros de la base de datos de movimiento fuerte
Fuente: Tomado de (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020)

Para terminar, tenemos la zona de Subducción del pacifico, en esta zona se dispone de 21 eventos sísmicos con 259 registros, en este ambiente se presentan los sismos de mayor magnitud alcanzando valores de 7.8 M_W que corresponde a un sismo que se presentó en Ecuador en el año 2016; así mismo los eventos de esta zona son los

que se presentan a una menor profundidad. Estas condiciones de altas magnitudes y profundidad superficiales hacen que este sea el ambiente en que se registra una mayor amenaza sísmica. El mecanismo de falla predominante es el inverso (R).

1.2.3 Resultados Modelo Nacional Amenaza Sísmica 2020

La amenaza sísmica de acuerdo con el MNAS 2020 se representa básicamente a través de tres herramientas, son ellas: 1. Las curvas de amenaza que permiten establecer para un sitio dado la probabilidad de que se exceda la intensidad del movimiento en un rango de tiempo establecido, 2. Mapas de amenaza sísmica que indican la distribución de intensidades para un periodo de retorno dado, y 3. Los espectros de amenaza uniforme que son curvas que contienen para un sitio y periodo de retorno establecido valores de aceleración espectral para distintos periodos de vibración; esta herramienta es tal vez la más útil para el ejercicio de la ingeniería estructural, en cuanto a través de su empleo es posible idealizar las fuerzas que pueden afectar una estructura durante un sismo.

Los mapas de amenaza contienen las aceleraciones espectrales en roca firme para periodos de retorno de 475, 975 y 2.475 años, lo que permite evidenciar en que regiones de nuestro país podemos esperar mayores magnitudes de aceleraciones. La siguiente figura muestra que para un periodo de retorno de 475 años que representa una probabilidad de excedencia de un 10% en 50 años, los mayores valores de aceleración registrados (PGA) se ubican en el suroccidente del país, abarcando áreas significativas de los departamentos del Chocó, Cauca, Valle del Cauca y Nariño y al nororiente en límites de los departamentos de Arauca y Norte de Santander, obsérvese que los valores de aceleración en roca para algunas zonas pueden alcanzar valores de $PGA = 0.9g$.; seguidamente los valores intermedios de PGA predominan en la zona cubierta por la cordillera de Los Andes, para por último pasar a los valores más bajos de PGA en la zona de los llanos orientales, la amazonia y parte de la costa atlántica (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020).

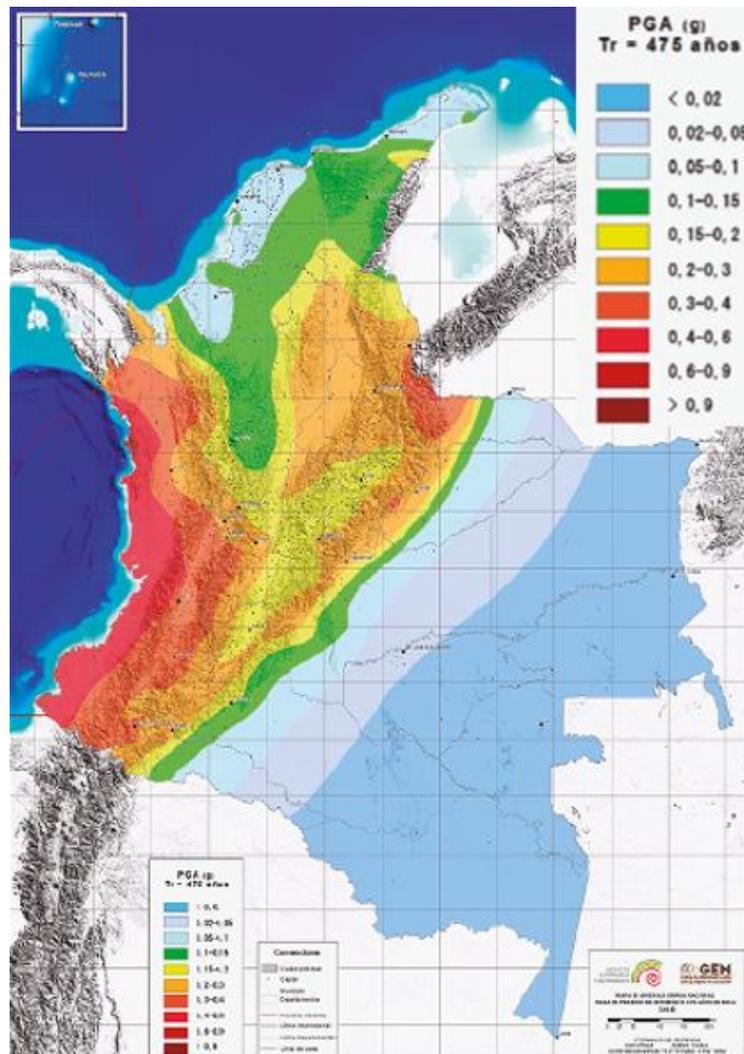


Figura 8 - Mapa de aceleraciones pico para un periodo de retorno de 475 años
Fuente: Tomado de (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020)

En cuanto a los ambientes tectónicos más predominantes, el SGC encontró que las fuentes interplaca son las que producen las mayores aceleraciones en el pacífico colombiano con impacto en los departamentos de Chocó, Cauca y Nariño (véase la Figura 8); las fuentes del ambiente de Benioff son representativas para los departamentos de Nariño, Cauca, Valle e incluso para algunas zonas del departamento del Quindío y Putumayo; El Nido como es de esperarse es el mayor responsable de eventos en los departamentos de Norte de Santander y sur del departamento de Santander y las fuentes superficiales o corticales con efectos en el resto de las regiones del país.

Por último, el MNAS 2020 en su anexo K muestra las curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme obtenidas para las capitales del país, aquí se muestra el espectro de amenaza uniforme para la ciudad de Cali en cuanto es en esta ciudad donde se desarrollará el modelo para el caso de estudio del presente trabajo de grado (véase la Figura 9).

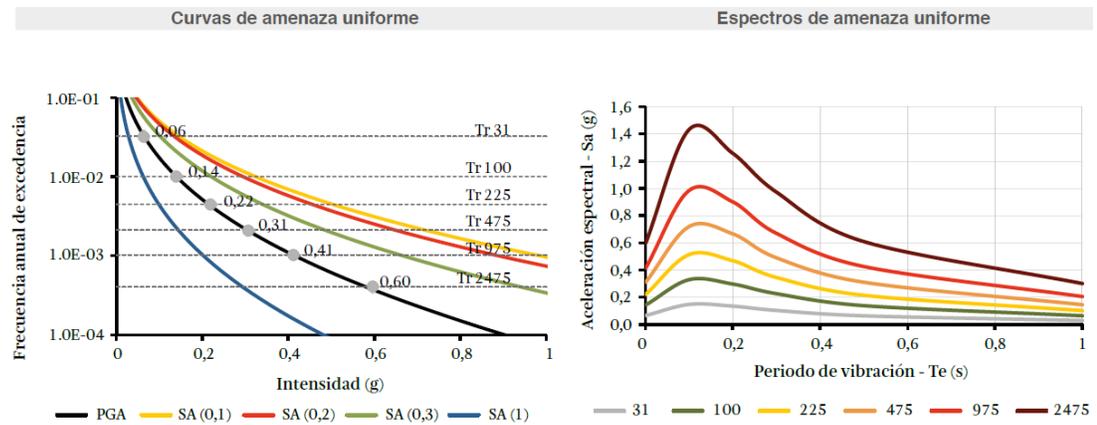


Figura 9 - Curva de amenaza uniforme y espectro de amenaza uniforme para Cali
Fuente: Tomado (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020)

1.3 Acelerogramas

En sismología e ingeniería hay gráficos que ayudan a estudiar los terremotos y los impactos que estos tienen sobre nuestras vidas, entre los más conocidos están los sismogramas y los acelerogramas. Los primeros son útiles para conocer los desplazamientos y velocidades, adicionalmente brindan información útil para la obtención de la magnitud y la localización de los eventos sísmicos; el equipo usado para obtenerlos es el sismógrafo. Los segundos como su nombre lo indica son útiles para la determinación de las aceleraciones que produce un evento sísmico, en este caso el equipo usado para registrarlos es el acelerógrafo.

Los sismogramas tienen la dificultad de que en el campo cercano las amplificaciones pueden ser muy grandes hasta el punto de que pueda imposibilitarse su registro, esto no es usual en los acelerogramas, por lo que son más usados para tomar registros en el campo cercano de movimientos fuertes. Por otra parte,

matemáticamente es más sencillo partir de la aceleración y a través de procesos de integración sencilla determinar la velocidad y de integración doble los desplazamientos, no es tan sencillo cuando se parte de los desplazamientos y se busca a través de la primera y segunda derivada obtener la velocidad y la aceleración respectivamente (Herráiz, 1997).

Los acelerogramas son entonces gráficas en las cuales se muestra la evolución de la aceleración que induce un movimiento sísmico sobre el terreno en función del tiempo, para estos efectos el tiempo es el transcurrido desde que se exceden valores de aceleraciones de 0.05g hasta el momento en que vuelven ser inferiores a esta magnitud (Herráiz, 1997). Es usual que las aceleraciones se indiquen en el eje Y en gales (cm/s^2), en m/s^2 o en fracciones de la aceleración de la gravedad g; por su parte, dadas las cortas duraciones de los sismos el tiempo se indica en segundos y es representado en el eje X (véase la Figura 10).

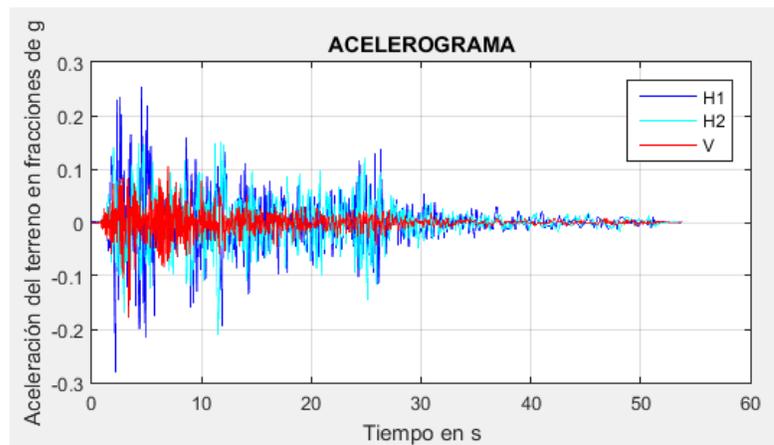


Figura 10 - Acelerograma de las componentes H1, H2 y V de un registro del sismo Imp. Valley 1940
Fuente: Datos tomados de la base de datos del PEER, estación El Centro No.9

Las amplitudes de las aceleraciones en los acelerogramas dependen de la distancia entre el instrumento y el hipocentro, de las propiedades del suelo donde se ubica el acelerógrafo y de la magnitud del evento sísmico (Pardo, 2014); entonces la cantidad de acelerogramas para un evento corresponderá al número de estaciones que lo registraron. A la máxima amplitud en un acelerograma se le conoce como Peak Ground Acceleration (PGA) y es uno de los datos de mayor uso para los

propósitos de la ingeniería estructural; como se verá más adelante, este valor corresponde al valor de la aceleración espectral en un espectro de aceleraciones cuando el periodo es igual a cero ($T= 0.0$ s).

Los acelerógrafos son capaces de registrar tres componentes del movimiento sísmico, dos horizontales (H1) y (H2) generalmente para las componentes NS y EO y una vertical (V). En el proceso en que las señales de cada componente son transformadas en impulsos eléctricos se generan perturbaciones que alteran la fiabilidad de la información. Por ello es necesario realizar la corrección del acelerograma y de su línea base, procedimiento en el cual por ejemplo, es posible seleccionar las frecuencias o periodos de interés; solo hasta después de este procedimiento es posible usar los registros para propósitos de ingeniería. Por último, existen varios tipos de acelerogramas, se destacan los reales que son los propiamente obtenidos a través de un acelerógrafo y los sintéticos que son una representación de la respuesta sísmica obtenida a través de simulaciones computacionales que parten de representaciones teóricas de la fuente, trayectoria y condiciones locales (Pardo, 2014).

1.4 Espectros

Los acelerogramas proveen información para el análisis sísmico de estructuras, sin embargo, individualmente no constituyen de forma representativa la amenaza sísmica de un lugar determinado; esto en cuanto una edificación implantada en un sitio específico está sometida a eventos sísmicos de distinto contenido frecuencial y amplitudes de desplazamiento o aceleración. Por lo anterior y para efectos de diseño estructural, en la práctica es deseable contar con una herramienta que además de envolver diversos tipos de formas de amenaza sísmica, pueda abarcar diversas estructuras clasificadas en función de su periodo o frecuencia.

La herramienta que satisface este requerimiento es el espectro. Son gráficas de una colección de valores máximos absolutos de aceleraciones, velocidades o desplazamientos en función de frecuencias o periodos. Es relevante aclarar los

conceptos de espectros en cuanto existen los espectros de respuestas individuales de desplazamiento, velocidad y aceleración para un registro sísmico específico, y los espectros de diseño para los mismos parámetros que son aquellos que se encuentran disponibles en los reglamentos de diseño. Mientras los acelerogramas están en función del tiempo, los espectros están en función de frecuencias o periodos, siendo el periodo un concepto más familiar y por ende resulta más atractivo para los ingenieros dedicados al diseño estructural (Chopra, 2014). En este documento se hará énfasis en los espectros de aceleraciones.

1.4.1 Espectros de aceleraciones

Se construyen para un acelerograma de un evento sísmico particular (véase la Figura 11). Su elaboración parte de solucionar la Ecuación Dinámica de Equilibrio (EDE) para un sistema lineal amortiguado de un grado de libertad (1GDL), excitado por una carga dinámica arbitraria que para este caso es el acelerograma correspondiente multiplicado por la masa de la estructura. A través de consenso se ha definido la relación de amortiguamiento (ξ) como el 5% del amortiguamiento crítico, aunque puede variarse de acuerdo con las condiciones particulares de la estructura a estudiar. Definida la carga y el amortiguamiento se soluciona la EDE para los periodos de interés (T_n) comprendidos entre un rango específico.

Conocida la carga, T_n y ξ , quedan tres incógnitas por determinar, son ellas los desplazamientos, las velocidades y aceleraciones relativas que corresponden a la respuesta de la estructura cuando es afectada por la aceleración del terreno. Esta respuesta puede calcularse usando la solución numérica de la Integral de Duhamel, o a través de métodos paso a paso entre los cuales se encuentran el método de Newmark – beta (β), de la aceleración lineal, el de Wilson – teta (θ) entre otros. Calculada la respuesta se escoge el valor máximo absoluto resultando una pareja de datos (T_n , aceleración) que corresponde a una estructura específica de periodo T_n ; de tal forma que realizando este proceso para varias estructuras con T_n distintos, al final se dispondrá de varias parejas de datos que se podrán unir para dar paso al espectro de aceleraciones tal como el obtenido en la figura anterior. La

aceleración relativa calculada se debe sumar a la aceleración del terreno para obtener la aceleración total que es la que se grafica en el espectro.

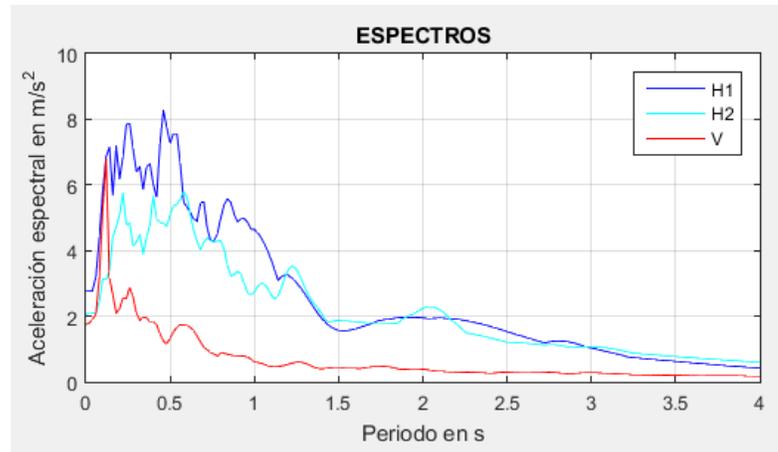


Figura 11 - Espectros de aceleración ($\xi=5\%$) componentes H1, H2 y V de un registro del sismo Imp. Valley 1940

Fuente: Datos tomados de la base de datos del PEER, estación El Centro No.9

Estos espectros son de gran utilidad toda vez que a través de muchos de ellos puede definirse la amenaza sísmica de una región específica, adicionalmente proporcionan un medio conveniente para resumir la respuesta máxima de todos los sistemas lineales de 1GDL a un componente particular del movimiento de tierra, siendo además un enfoque práctico para la aplicación del conocimiento de la dinámica estructural al diseño de estructuras (Chopra, 2014).

1.4.2 Espectros de diseño

Aunque un espectro de aceleraciones satisface el requerimiento de poder representar la amenaza que induce el registro de aceleraciones de un evento sísmico sobre un rango amplio de estructuras representadas por su periodo, tiene la limitante de considerar un solo evento lo que no es representativo de la amenaza; es aquí donde son importantes los espectros de diseño o normativos, los cuales son elaborados en función de muchos espectros de aceleraciones de forma tal que puedan representar múltiples tipos de amenazas sísmicas.

Este tipo de espectros está pensado para el diseño de edificaciones nuevas y para evaluar la seguridad de estructuras existentes; para esto deben ser representativos de los movimientos del terreno registrados con anterioridad en una zona determinada; deben ser consideradas para su construcción variables como la magnitud, mecanismo de falla, características del terreno y del desplazamiento de las ondas (Chopra, 2014); usualmente consisten en curvas suavizadas que anulan los picos observados en un espectro de aceleraciones en cuanto estos son propios de cada movimiento sísmico particular lo que no tendría sentido en un espectro de diseño (García, 1998). El reglamento NSR-10 considera un espectro elástico de aceleraciones con ($\xi=5\%$), el cual debe ser usado en el diseño de las estructuras a nivel nacional; este espectro (véase la Figura 12) tiene en cuenta los efectos de la amplificación del suelo de soporte, las magnitudes de aceleración en la roca, y un factor de importancia que privilegia algunas edificaciones por su servicio a la comunidad.

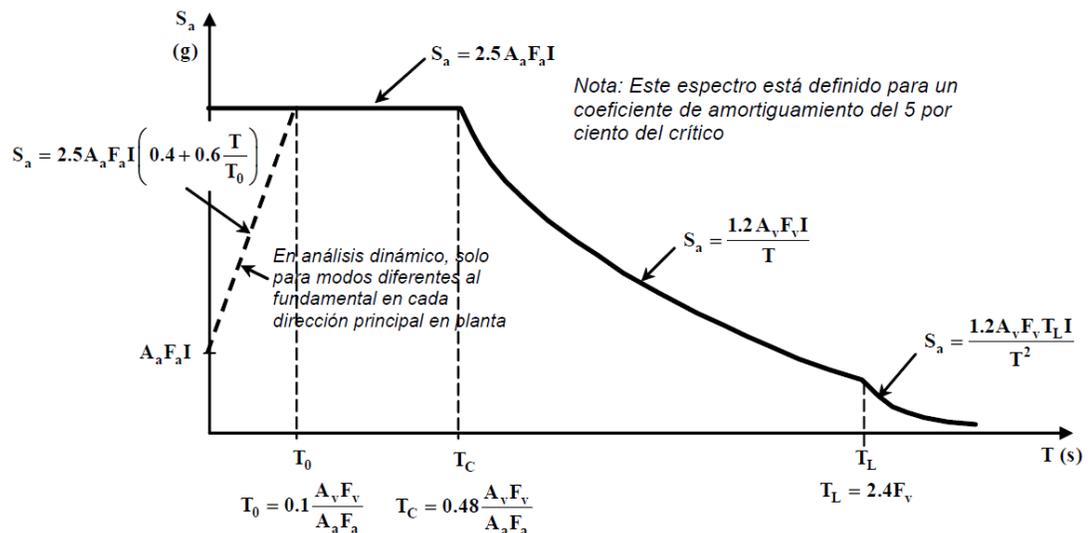


Figura 12 - Espectro de aceleraciones de diseño indicado en NSR-10
Fuente: Tomado de NSR-10

Estos espectros tienen mucha utilidad en el diseño estructural, a través del espectro de diseño elástico se revisan los criterios de rigidez de la estructura, usando espectros inelásticos se obtienen las sollicitaciones sobre los elementos estructurales, y adicionalmente, es con base en estos espectros de diseño elástico

que se realiza el escalado de los acelerogramas cuando se define la amenaza a través de registros sísmicos para un análisis dinámico lineal (ADL).

1.5 Componente sísmica horizontal y vertical

Un evento sísmico se manifiesta a través de ondas que se propagan en varias direcciones del terreno. Para propósitos de ingeniería es necesario encontrar una forma de registrar estos movimientos para su análisis y consideración de sus efectos dentro del contexto de la amenaza sísmica y su aplicación en el diseño estructural.

Desde hace algunos años, se ha dotado a los sismógrafos y acelerógrafos de sensores que permiten registrar dos componentes horizontales y una componente vertical. Normalmente los registros más usados son los obtenidos para las componentes H1 y H2, sin embargo, investigaciones como las adelantadas por Newmark y otros colaboradores en 1973 y por Rosenblueth en 1975, mostraron que la componente V podría ser representativa, iniciando con la incorporación en el análisis de esta componente a través de valores estadísticos obtenidos del cociente de la componentes V con respecto a las horizontales (Perea & Esteva, 2005).

En cuanto a la magnitud e importancia de cada componente, el tipo de falla y su geometría tienen un papel predominante en la distribución espacial de las ondas sísmicas que generan y en las características del movimiento del suelo producido; sin dejar a un lado que las propiedades geológicas pueden alterar estos efectos. Se espera que las fallas normales (N) o inversas (R) originen movimientos fuertes del terreno con una mayor componente vertical con predominio de las ondas P y SV, mientras que las fallas horizontales o *strike-slip* generan mayores movimientos horizontales con predominio de ondas SH (Herráiz, 1997). Como suele suceder existen excepciones, tal es el caso del sismo del Imperial Valley de 1940, que a pesar de ser de una fuente de falla horizontal produjo una componente vertical considerable. La Figura 13 muestra la relación entre componentes V/H de algunos sismos en la costa de México considerando la magnitud y la distancia de ruptura.

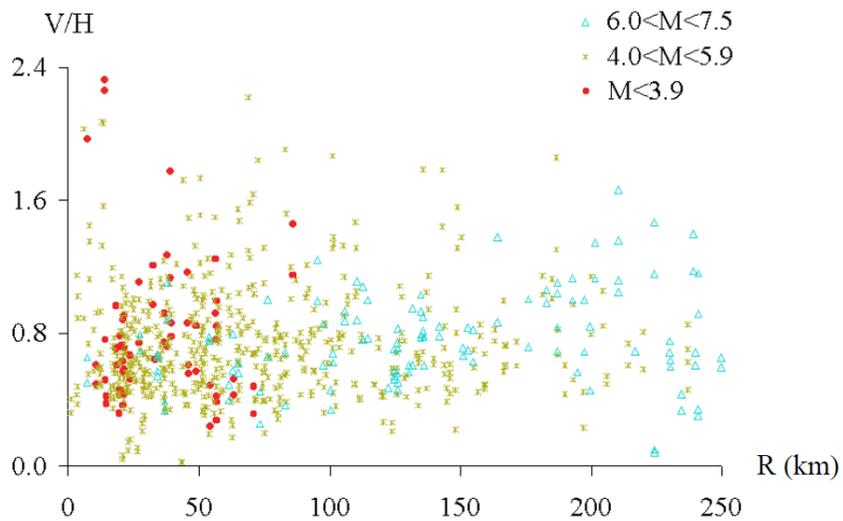


Figura 13– Magnitud, distancia y relación V/H de algunos registros de la costa pacífica de México
Fuente: Tomado de (Perea & Esteva, 2005)

1.6 Componente sísmica vertical de acuerdo con el reglamento NSR-10

Antes de mencionar que condiciones exige el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) en cuanto a la componente V, a continuación, se mostrará un contexto de cómo ha sido considerada a través del tiempo en los códigos y normas que lo han precedido.

1.6.1 Decreto 1400 de 1984

En este documento se estableció que la componente vertical del movimiento sísmico para zonas de amenaza sísmica intermedia (A.8.5) debía tomarse en cuenta en el diseño de voladizos incluyendo en el análisis una fuerza vertical ascendente o descendente en la punta del elemento con un valor neto igual al 10% de la carga muerta del voladizo, adicionalmente en el diseño de elementos pretensados horizontales debía considerarse usando la combinación de carga 0.5D + 1.0E. En zonas de amenaza sísmica alta, la fuerza ascendente o descendente en la punta de los voladizos pasaba del 10% al 20%, conservando la misma combinación de carga

usada en zona de amenaza sísmica intermedia (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1984).

1.6.2 Normas Colombianas NSR-98

En esta norma se adicionó el hecho de que cuando se necesite la incorporación de la componente sísmica vertical en el diseño, esta se podía tomar como las dos terceras partes ($2/3$) de los valores correspondientes a los efectos horizontales, bien sea en el espectro de diseño o en la familia de acelerogramas. Sumado a esto, el efecto de las aceleraciones verticales en algunos elementos se seguía considerando como en el Decreto 1400 de 1984, pero incrementando la fuerza ascendente o descendente en la punta del voladizo del 10% al 15% en zonas de amenaza sísmica intermedia, y del 20% al 30% en zonas de amenaza sísmica alta. En cuanto a los elementos de concreto preesforzado, se indicó que debían utilizarse combinaciones de carga adicionales a todas aquellas que incluían la carga muerta, en las cuales se utilizaría solo el 50% de la misma (Ministerio de Desarrollo Económico, 1998).

1.6.3 Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10

En esta oportunidad se conservaron las disposiciones establecidas en NSR-98, estableciéndose además que cuando se utilice la componente sísmica vertical el valor mínimo debe tomarse como las $2/3$ partes de los efectos horizontales a través del espectro de diseño o en la familia de acelerogramas si solo se cuenta con los registros horizontales; sin embargo, si se cuenta con el registro de la componente vertical es esta la que se debe emplear con el ajuste equivalente que se haya realizado a las componentes horizontales. En cuanto a los efectos de las aceleraciones verticales en algunos elementos estructurales no se realizaron modificaciones (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2017).

Se deduce que en nuestro país desde el primer código de diseño sísmico se ha considerado de alguna forma el efecto de la componente vertical de los sismos, y

que a través del paso del tiempo se le ha dado una mayor importancia a esta, lo que se ve reflejado en el aumento progresivo de las exigencias al respecto.

1.7 Componente sísmica vertical de acuerdo con el documento ASCE 7-16

Desde los inicios de la reglamentación de diseño sísmo resistente en Colombia se ha adoptado la tendencia de tomar normas estadounidenses como documentos de referencia. Por lo anterior, en el presente trabajo de grado se ha establecido como documento de referencia el documento ASCE 7-16, esto con el fin de conocer que prescripciones tiene al considerar la componente V de los eventos sísmicos. En términos generales, los aspectos para el diseño sísmico se encuentran consignados inicialmente en el capítulo 2 “*Combinations of loads*”, en el cual se establecen las combinaciones de carga en las que se debe incluir el efecto de los sismos (véase la Tabla 4). Lo primero por resaltar es la inclusión explícita de la componente vertical de los sismos (Ev) en las combinaciones de carga; eliminando la posibilidad de omitirla tal como sucede en algunos reglamentos que la mencionan sin indicar la obligatoriedad o no de considerar sus efectos en el análisis y diseño.

Tabla 4 - Combinaciones de carga incluyendo la componente V en ASCE 7-16

Combinación	Numeral	Número de combinación
$1.2D + Ev + Eh + L + 0.2S$	2.3.6	6 – Capítulo 2
$0.9D - Ev + Eh$	2.3.6	7 – Capítulo 2
$1.0D + 0.7Ev + 0.7 Eh$	2.4.5	8 – Capítulo 2
$1.0D + 0.525Ev + 0.525Eh + 0.75L + 0.75 S$	2.4.5	9 – Capítulo 2
$0.6D - 0.7Ev + 0.7Eh$	2.4.5	10 – Capítulo 2

Fuente: (ASCE, 2016)

El segundo capítulo en el que se hace énfasis en la componente V es en el capítulo 11 “*Seismic design criteria*”; aquí se presentan los criterios para el diseño y construcción de edificios u otras estructuras sujetas a terremotos, siendo aplicables los criterios allí especificados a edificios (capítulo 12) y a estructuras no edificables (capítulo 15). Es en esta parte de la norma donde se indican los parámetros

relevantes para definir el espectro de respuesta de diseño, entre estos los siguientes: Parámetros de mapas de aceleración, parámetros de aceleración espectral de diseño, coeficientes de amplificación F_a y F_v , factores de importancia y categorías de diseño sísmico. Es de particular interés el numeral 11.9 donde se define con claridad el espectro de diseño para la componente vertical “Vertical ground motions for seismic design”, el cual se construye en función de tres parámetros principalmente: 1. S_{MS} que corresponde al parámetro de aceleración de respuesta espectral en periodos cortos afectados para los efectos de sitio con un amortiguamiento crítico del 5%, 2. C_v que representa un coeficiente vertical que está en función del tipo de perfil de suelo y del parámetro de aceleración de respuesta espectral en periodos cortos SS (véase la Tabla 5), y 3. El periodo vertical de la estructura T_v .

La forma en que debe construirse este espectro está definida en el numeral 11.9.2, y el gráfico a obtener en los comentarios correspondientes a ese capítulo (véase la Figura 14); además, es importante evidenciar lo que se explicará más adelante en cuanto a que esta forma espectral se deriva sustancialmente de la investigación adelantada por Bozorgnia y Campbell hace aproximadamente 18 años, procedimiento que también es compatible con las observaciones y conclusiones de Abrahamson y Silva en 1997 (ASCE, 2016) .

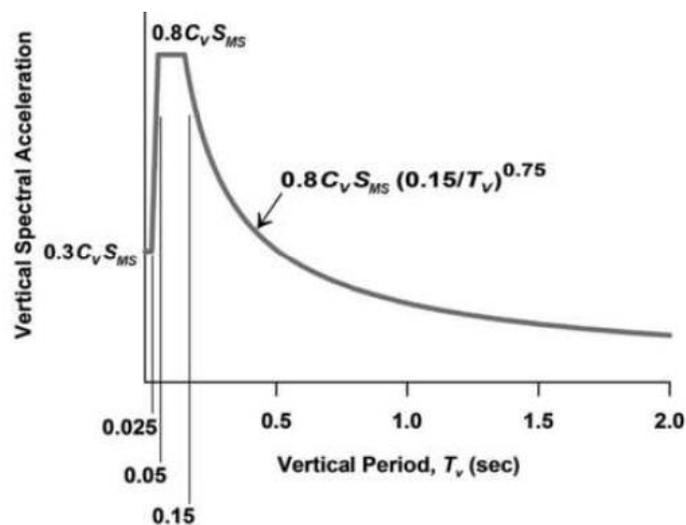


Figura 14 - Espectro de respuesta vertical de acuerdo con ASCE 7-16
Fuente: Tomado de los comentarios del capítulo 11 (ASCE, 2016)

Tabla 5 - Valores del coeficiente vertical C_v

Ss	Sitios clase A y B	Sitio clase C	Sitios clase D, E y F
$S_s \geq 2.0$	0.9	1.3	1.5
$S_s = 1.0$	0.9	1.1	1.3
$S_s = 0.6$	0.9	1.0	1.1
$S_s = 0.3$	0.8	0.8	0.9
$S_s \leq 0.2$	0.7	0.7	0.7

Fuente: (ASCE, 2016)

Obtenido el espectro indicado en la gráfica anterior, la aceleración espectral de respuesta vertical de diseño S_{av} o espectro de diseño, se calcula de acuerdo con lo definido en el numeral 11.9.3 de ASCE 7-16, donde se establece que esta se tomará como las dos terceras partes ($2/3$) del valor de la aceleración espectral definido en el numeral 11.9.2, estando este $2/3$ más relacionado con un periodo de retorno de 475 años que con la simplificación de $2/3$ propuesto por Newmark y Hall. El espectro vertical de diseño definido hasta aquí debe ser usado en las categorías de diseño sísmico C, D, E y F de acuerdo con lo indicado en 11.9.1.

Continuando con lo indicado en este estándar, en el capítulo 12 “Seismic design requirements for building structures” se indican los requerimientos que deben usarse para el diseño sísmico de edificios. Cuando se define en 12.4.2 el efecto de la carga sísmica se establece de forma explícita que debe incluirse el efecto de la componente vertical E_v en sentido ascendente o descendente de acuerdo como lo establezca la combinación de carga o prescripciones adicionales correspondientes. Adicionalmente se indica en 12.4.4.2 que la componente vertical se determina como el 20% del parámetro de aceleración de respuesta espectral en periodos cortos para un amortiguamiento crítico del 5% S_{DS} multiplicado por el efecto de la carga muerta D ($E_v = 0.20S_{DS}D$); esta consideración tiene dos excepciones: 1. Cuando la norma indique explícitamente que el efecto de la componente vertical debe incorporarse de acuerdo con lo indicado en 11.9, caso en el cual E_v será igual al 30% de la aceleración espectral de respuesta vertical de diseño S_{av} multiplicada por el efecto de la carga muerta D ($E_v = 0.30S_{av}D$); y 2. La que indica que puede tomarse el efecto de E_v igual a cero en las edificaciones con categoría de diseño sísmico B y

en la ecuación 12.4-2 ($E = E_h - E_v$) donde se determinen las demandas en la interfaz suelo-estructura de los cimientos.

Adicionalmente, en el capítulo 15 “Seismic design requirements for nonbuilding structures” se establecen los requisitos de diseño sísmico para estructuras que no son edificios. Aunque este tipo de estructuras no están en el alcance del presente trabajo, es importante indicar que para tanques, depósitos, silos, estructuras y estructuras colgantes que incorporen voladizos horizontales, es necesario incluir el efecto de la componente sísmica vertical de acuerdo con los criterios establecidos en 11.9 tal como está prescrito en el numeral 15.1.4.

Lo relevante aquí es la forma en cómo ha evolucionado la metodología en esta norma para considerar la componente vertical en edificaciones, en estructuras destinadas a usos distintos al habitacional y en elementos no estructurales; pasando de establecer una relación de la componente espectral vertical como una fracción de la componente espectral horizontal, a un enfoque basado en usar funciones espectrales establecidas para la componente vertical a partir del estudio y análisis de registros sísmicos como la establecida en ASCE 7-16 artículo 11.9.2.

1.8 Análisis Dinámico Lineal (ADL)

Uno de los aspectos más importantes en el diseño estructural es la selección del método de análisis a emplear; a través de este se determinan las solicitaciones de carga axial, momento flector, corte, etc., que actúan sobre cada uno de los elementos de una estructura cuando es sometida a la acción de cargas estáticas o dinámicas de manera independiente o simultánea; esto sin duda es más relevante que la preocupación en algunos casos de llegar a una precisión numérica que en términos prácticos puede resultar innecesaria para propósitos de diseño (García, 1998). En la actualidad existen varios métodos de análisis, en resumen se dividen en métodos estáticos y dinámicos, y cada uno de estos a su vez en lineales y no lineales; en las siguientes líneas se hablará brevemente del método de Análisis Dinámico Lineal (ADL).

El ADL es un procedimiento de análisis estructural que permite conocer la respuesta de la estructura para cada instante de tiempo a través de la solución de la ecuación dinámica de equilibrio (EDE), particularmente para el diseño sismorresistente cuando la fuerza que genera el movimiento se representa como el producto de la masa de la estructura por la aceleración, esta última obtenida de un acelerograma debidamente seleccionado, procesado y escalado. La EDE a resolver es la que se indica a continuación:

$$m\ddot{x}_{(t)} + c\dot{x}_{(t)} + kx_{(t)} = -mx_{g(t)}$$

Ecuación 1 - Ecuación dinámica de equilibrio

La solución de la EDE se puede enfocar de dos maneras diferentes: la solución modal, o la solución por medio de la integración de las ecuaciones de equilibrio o de integración directa (García, 1998). Al solucionar la EDE se obtienen los datos de interés que en ingeniería estructural usualmente son las aceleraciones y los desplazamientos; las primeras por ejemplo empleadas para el diseño de elementos no estructurales, y los desplazamientos para el cálculo de derivas, fuerzas cortantes de entrepiso y para obtener a través del análisis matricial las solicitaciones en cada uno de los elementos entre otros usos. En este trabajo la solución se realizará usando el enfoque del análisis modal.

Cuando se habla de análisis dinámico es conveniente definir el término de grados de libertad como el número mínimo de coordenadas necesarias para establecer la posición en el espacio y en el tiempo de todas las partículas de masa del sistema (García, 1998). La importancia de este concepto radica en que las bases del análisis sísmico de edificaciones están soportadas en sistemas de un grado de libertad (1GDL o SDOF), hasta el punto de que para solucionar sistemas de múltiples grados de libertad (MGDL o MDOF) se recurre a esta simplificación como se entenderá más adelante; adicionalmente los espectros de aceleraciones y de diseño se construyen para sistemas de 1GDL.

En una estructura de 1GDL resolver la ecuación dinámica de equilibrio resulta un tema relativamente sencillo; se trata de una ecuación diferencial homogénea de

segundo orden que puede ser resuelta paso a paso a través de cualquiera de los métodos numéricos anteriormente indicados para el desplazamiento, la velocidad y la aceleración (respuestas), partiendo de que la relación de amortiguamiento ξ y el periodo que es función de la masa y de la rigidez de la estructura son conocidos. Ejemplo de una estructura que representa un sistema de 1GDL es un tanque elevado de almacenamiento de agua (si solamente se considera el desplazamiento en una dirección) en el cual la mayor parte de la masa está concentrada en la parte superior.

Otro es el caso de los edificios que se construyen normalmente para uso habitacional o de oficinas que sean de más de un piso, estas estructuras tienen las masas mayoritariamente concentradas en cada uno de sus entresijos y se ubican dentro del contexto de sistemas de múltiples grados de libertad (MGDL). Obtener la respuesta de la estructura en este caso no resulta tan sencillo como en el caso anterior, en cuanto al plantear las ecuaciones de equilibrio resultan tantas ecuaciones diferenciales homogéneas de segundo orden como grados de libertad se consideren, anotando que estos grados de libertad por ejemplo pueden ser desplazamientos en las direcciones X, Y, o Z, y rotaciones por momentos flectores o torsiones alrededor de ellos.

Para MGDL en la EDE no se tienen valores escalares de masa, rigidez, amortiguamiento, etc., ahora en cambio se tienen matrices para cada uno de estos; en el mismo sentido aparece el concepto de modos de vibración de la estructura, existiendo tantos modos como grados de libertad se hayan considerado, dando paso de esta manera al análisis modal. Es necesario entonces recurrir a propiedades matemáticas de las matrices para simplificar el problema, el cual consiste en tener ecuaciones acopladas con múltiples incógnitas; es aquí donde la propiedad de ortogonalidad de los modos con respecto a las masas por ejemplo es relevante, en cuanto a través de esta es posible desacoplar las ecuaciones y solucionarlas como ecuaciones de un sistema de 1GDL, aclarando que la solución de la misma se realiza para cada intervalo de tiempo del acelerograma. Resueltas las ecuaciones para cada modo de vibración se realiza la suma algebraica de las respuestas de la

estructura en cada instante de tiempo, obteniendo como resultado la respuesta total para una amenaza sísmica particular.

Como se dejó ver en las líneas anteriores, la amenaza sísmica en este caso es un registro de aceleraciones para las componentes horizontales y vertical, el número de registros a emplear depende de la norma o código usada como referencia de diseño. De todas las respuestas totales obtenidas para cada registro se escoge la de los resultados más desfavorables para el diseño de la estructura, aclarando que para cada instante de tiempo corresponderá un desplazamiento, una velocidad y por supuesto una aceleración, de aquí que a este método se le conozca como Historia de Respuesta "Time History", en cuanto el análisis considera la historia en el tiempo del movimiento del terreno que afecta a la estructura, reafirmando como un método de análisis realmente dinámico.

El ADL es uno de los métodos más completos para realizar el análisis de una estructura cuando es sometida a una carga dinámica como la que representa un evento sísmico, sin embargo, puede requerir de un mayor esfuerzo computacional y de un mayor conocimiento para el correcto análisis e interpretación de los resultados, adicionalmente cuando se utiliza la solución modal se tiene la limitación de considerar la respuesta solo si la estructura permanece en el rango lineal, lo que a su vez está relacionado con que sea aplicable el principio de superposición (García, 1998).

1.8.1 Señales sísmicas y su selección

Tener registros de aceleración es de gran interés para propósitos de la ingeniería estructural por la relación directa entre la aceleración y la fuerza que esta produce sobre una estructura en función de su masa y su aplicación en el análisis dinámico de estas (Herráiz, 1997). Los acelerógrafos son capaces de registrar distintos rangos de frecuencias que abarcan los periodos de interés de la mayoría de las estructuras comúnmente diseñadas, sin embargo, el proceso de registro perturba la señal original por lo que es necesario antes de su empleo ejecutar un proceso de

corrección de la misma que permita eliminar los errores introducidos y garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos (Herráiz, 1997). Generalmente el procesamiento de las señales incluyendo la corrección instrumental, de la línea base y el filtrado de frecuencias de interés está a cargo de sismólogos y de personas especializadas en el procesamiento de señales.

Utilizar acelerogramas reales para la realización de análisis dinámicos es deseable por la información que contienen sobre la naturaleza del movimiento sísmico, por ello es importante tener claro los criterios necesarios para su selección en cuanto estos deben ser representativos de los movimientos esperados del terreno, por lo cual deben provenir de registros tomados en eventos con características similares a los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar cumpliendo con la mayor gama de frecuencias y amplificaciones posibles. En el mismo sentido, la definición del escenario anterior requiere el conocimiento de la amenaza del sitio, bien sea mediante un estudio determinístico donde se identifica claramente el sismo de diseño, o mediante un estudio probabilístico en donde se requiere de la realización de una desagregación para identificar los escenarios sísmicos que más contribuyen a la amenaza del sitio (Acevedo, 2012).

Encontrar señales que cumplan con los criterios de los escenarios planteados en el párrafo anterior puede ser una tarea difícil de cumplir, por ello algunos autores como Bommer y Acevedo en el 2004 especifican un orden de importancia para la selección de señales el cual es el siguiente: magnitud, distancia, tipo de suelo y mecanismo de ruptura, en donde el número de criterios descritos a emplear dependerá de la cantidad de registros disponibles (Acevedo, 2012). En la actualidad existen varias bases de datos de las cuales se pueden obtener las señales necesarias para un análisis dinámico, una de las más importantes y confiables es la del Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) de la Universidad de Berkeley en Estados Unidos, otras como COSMOS y K-NET pueden igualmente usarse para obtener movimientos del terreno (NIST, 2011). El número de las señales a usar dependerá de la norma que se tome como referencia y del tipo de análisis a realizar (ASCE, 2016), en todo caso no es recomendable en ninguno de los casos usar menos de tres pares de registros por estructura.

1.8.2 Modificación de las señales sísmicas

Adicional a los criterios de selección en función de los parámetros indicados, las señales sísmicas que se seleccionen para los análisis dinámicos deben en cuanto a sus ordenadas espectrales ser similares a las del espectro de respuesta definido en la norma de diseño a emplear. Esta condición obliga a que los acelerogramas deban ser emparejados para lograr una adecuada coincidencia espectral o escalados (escala de amplitud) hasta que se satisfagan los criterios que se establezcan para los espectros de diseño en los reglamentos de referencia. Para el caso de Colombia deberá atenderse lo indicado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 y para el caso de los Estados Unidos será el documento Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures ASCE 7-16.

El reglamento NSR-10 en A.2.7 obliga a que los espectros de respuesta de los acelerogramas a emplear no tengan individualmente ordenadas espectrales para periodos de vibración comprendidos entre $0.8T$ y $1.2T$ menores que el 80% de las ordenadas espectrales del movimiento esperado en el terreno como se define en el artículo A.2.6 del mismo reglamento, el cual hace referencia al espectro de diseño mostrado en la figura 12 de este documento. Así mismo, el promedio de todas las ordenadas espectrales de todos los registros utilizados, en el rango comprendido entre $0.2T$ y $1.5T$, no deben ser menores que las ordenadas espectrales en el mismo rango de periodos para el espectro de diseño (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2017). En este contexto T se refiere al periodo de vibración fundamental inelástico esperado en la estructura en la dirección bajo estudio. En términos generales este procedimiento está enfocado en la modificación del movimiento del terreno a través de la escala de amplitud; en el cual en todas las direcciones debe emplearse el mismo factor de escala (NIST, 2011).

Por su parte, el documento estándar ASCE 7-16 en el numeral 12.9.2.3.1 establece como procedimiento para la correspondencia de espectros, el emparejamiento de los acelerogramas con respecto al espectro objetivo definido en ese reglamento. En este caso, se realizará en un rango comprendido entre $0.8T$ y $1.2T$ teniendo en

cuenta que en ese rango de periodo y en cada dirección de respuesta, el promedio de las pseudo aceleraciones amortiguadas al 5% no debe caer por encima o por debajo del espectro objetivo en más del 10% en cada dirección de respuesta. Este procedimiento está enfocado en la modificación del movimiento del terreno a través de la coincidencia espectral o emparejamiento espectral (Matching) (ASCE, 2016).

Puede observarse en los casos anteriores, que la necesidad de ajustar señales que representen el ambiente sísmico máximo definido por un espectro objetivo se realiza a través de dos enfoques. En el caso del escalado lineal se afectan las señales sísmicas de eventos existentes previamente seleccionados por un factor de escala uniforme. Por otra parte, el método de coincidencia espectral emplea una escala no uniforme que asemeja más los espectros de pseudo aceleraciones de las señales al espectro objetivo, teniendo entre sus ventajas el empleo de menos movimientos del suelo (ASCE, 2016). Esta última metodología cuyos avances significativos entre otros fueron desarrollados por Hancock en 2006, la cual asemeja los espectros reales o sintéticos al espectro objetivo a través de la incorporación de ondas disminuyendo la modificación excesiva de las señales de movimientos existentes en parámetros como la amplitud y la duración han ganado aceptación; por ello colocando especial atención en la evaluación de las metas a lograr pueden ser consideradas en futuros análisis dinámicos que incluyan movimientos del terreno (Flores & Ayes, 2018).

1.9 Análisis Dinámico Espectral (ADE)

En el ejercicio cotidiano del diseño de estructuras es deseable contar con métodos de análisis que además de ser confiables, sean fáciles de comprender, con resultados fáciles de interpretar y procesar, y que adicionalmente no consuman grandes recursos computacionales, aun cuando con el paso de los días esta última consideración ha ido perdiendo relevancia ante los avances de los actuales procesadores. El Análisis Dinámico Espectral (ADE) es una herramienta que reúne estos requisitos al ser una simplificación del ADL, lo que en la actualidad lo convierte

en uno de los métodos más usados para el análisis estructural por parte de los ingenieros calculistas.

Como en el caso del ADL con el uso del ADE se logra conocer la respuesta de la estructura (desplazamientos, velocidades y aceleraciones) a través de la solución de la ecuación dinámica de equilibrio (EDE) para el caso en que la fuerza que genera el movimiento se representa como el producto de la masa de la estructura por la aceleración, pero en este caso esta última es obtenida de un espectro de diseño o normativo para el periodo de interés; por ello parte de su nombre “espectral”, en cuanto se requiere de un espectro de diseño para el análisis de la estructura. Puede evidenciarse que la solución del problema no está en el dominio del tiempo como se esperarían al emplear la palabra “dinámico”; queda claro que en este caso se trata del dominio de los periodos o frecuencias al ser estos datos de entrada en un espectro.

Al ser los valores que se leen en un espectro de diseño valores máximos de respuesta (aceleraciones, velocidades, desplazamientos) de un sistema dinámico de 1GDL, es evidente que conociendo el espectro se puede determinar el valor máximo de la respuesta que puede tener un grado de libertad desacoplado, y por ende se podrían utilizar estos valores para determinar la máxima respuesta que tendría un sistema de varios grados de libertad (García, 1998). De lo anterior puede anotarse que la solución no se realiza para cada instante de tiempo en cada modo de vibración, lo que supone tantas respuestas como intervalos de tiempo tenga el registro sísmico y grados de libertad tenga la estructura que es el caso del ADL; en este caso la solución está limitada a una sola respuesta correspondiente a cada modo de vibración para el periodo de la estructura obtenido en el mismo, siendo cada respuesta obtenida la respuesta máxima, notándose de forma sencilla la simplificación antes indicada.

Estas respuestas máximas obtenidas para cada modo de vibración no pueden ser sumadas algebraicamente como era el caso de las historias de respuesta modal del ADL, en este análisis (ADE) deben ser combinadas a través de métodos de combinación adecuados, entre ellos el de combinación cuadrática completa (CQC)

o a través del método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS), en cuanto se estaría sobreestimando la respuesta si se realiza la suma algebraica de los valores absolutos correspondiente a cada modo (García, 1998). El resto de los conceptos y métodos para la solución de la EDE son los que corresponden al ADL. Este método ha sido de gran aceptación en los diseñadores estructurales por varias razones, algunas se indican a continuación: 1. Computacionalmente consume menos recursos, 2. Al considerar un análisis modal se obtienen respuestas que tienen en cuenta el aporte de modos superiores de la estructura, convirtiéndose en una de las diferencias con el método de Fuerza Horizontal Equivalente que solo considera la respuesta para el primer modo de vibración, 3. Proporciona respuestas similares a las obtenidas a través de un ADL que es un análisis más completo, y 4. Permite una simplificación y generalización de la amenaza al pasar de señales de eventos sísmicos a espectros de diseño o normativos.

Para concluir es conveniente indicar algunas particularidades sin que se consideren desventajas, algunas de estas son: 1. Aunque se reconoce con el nombre de análisis dinámico, realmente el método no considera la historia de la respuesta de la estructura, y aunque se pueda conocer la respuesta máxima no es posible conocer en que instante de tiempo ocurrió ni en qué sentido en cuanto a los ejes de coordenadas de la estructura, 2. El método es válido en el rango elástico y no es directamente aplicable a un análisis en el rango inelástico de la estructura, aunque se hacen algunas adecuaciones en el método lo que permite considerar la incursión de la estructura en el rango inelástico a través de los coeficientes de capacidad de disipación de energía, 3. Es un método aproximado basado en las respuestas máximas que puede tener una estructura ante la representación de la amenaza de un evento sísmico (espectro), 4. Se resuelve la EDE para cada periodo y no para cada instante de tiempo de un registro sísmico. 5. Está limitado a los requisitos necesarios para que pueda ser aplicable el principio de superposición.

2 Estado del Arte

Por muchos años la componente sísmica vertical (V) ha recibido menor atención que la horizontal por considerar que los márgenes de seguridad para carga vertical en condición estática son suficientes. Sin embargo, en lugares cercanos a la falla las magnitudes de la aceleración vertical pueden ser iguales a los de la componente horizontal (H) y los efectos de no linealidad geométrica pueden llegar a comprometer la estabilidad de la estructura (Gallego & Sarria, 2010). Desde hace aproximadamente cinco décadas esta componente ha llamado la atención de ingenieros estructurales, toda vez que algunos autores atribuyen parte de los daños ocasionados por los terremotos de Mammoth Lakes (1983), Palm Spring (1986), Loma Prieta (1989), Cape Mendocino (1992), Northridge (1994), Kobe (1999) a esta componente (Vilera et al., 2008).

La mayoría de las investigaciones realizadas se han enfocado en evaluar el efecto de la aceleración vertical en la respuesta dinámica de distintas edificaciones, la magnitud de las aceleraciones y el contenido frecuencial de las señales de los eventos sísmicos considerados importantes. Estos estudios se han llevado a cabo con el objeto de estudiar eventos como los ocurridos en el centro de Italia en 2016, donde se presentaron una serie de eventos sísmicos con componentes verticales importantes a las que se les atribuye el daño de muchas edificaciones (Rinaldin et al., 2019). En Colombia son pocos los trabajos realizados; a nivel regional los países con más investigaciones son Chile y México, y a nivel mundial se han realizado numerosos trabajos especialmente en Estados Unidos, Turquía, Italia y Japón.

2.1 Relación entre componentes sísmicas vertical y horizontal (V/H)

La relación entre la componente horizontal y vertical de $2/3$ empleada como referencia en la mayoría de los códigos se ha generalizado por la ausencia de otra información (Perea & Esteva, 2005). Una parte de los investigadores que han trabajado en el tema consideran que para el campo cercano es necesario ir más allá y evaluar de manera específica el efecto que tendría la componente vertical sobre

la estructura. Un caso es el sismo de Northridge para el cual en el campo cercano se registraron valores para la aceleración vertical del 85% de la aceleración de la gravedad (8.33 m/s^2) con relaciones V/H de 1.79 como se indicó al inicio del presente documento (Ruíz & Sarria, 2002); añádase a esto, que en un estudio relacionado con sismos ocurridos en Italia entre 2009 y 2016, se evidenciaron magnitudes de aceleración vertical comprendidas entre 3.18 m/s^2 y 8.69 m/s^2 y relaciones V/H comprendidas entre 0.61 y 1.37 (Rinaldin et al., 2019). Un ejemplo de ello es el sismo de L'Aquila en 2009, en el que en varias estaciones ubicadas en el campo cercano las componentes verticales tuvieron magnitudes mayores a sus homologas horizontales ($V/H > 1.0 > 2/3$) hasta una distancia de 30 kilómetros (Di Sarno et al., 2011) (véase la Figura 15).

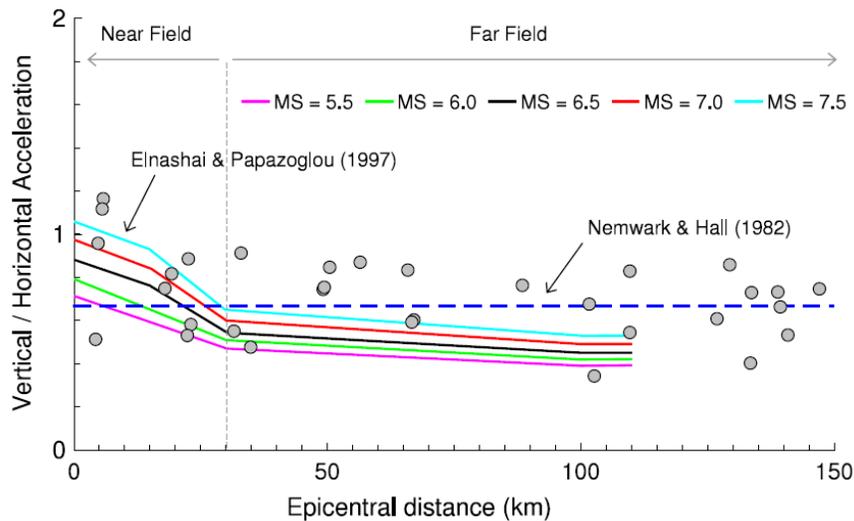


Figura 15 - Relaciones V/H en función de la distancia epicentral, sismo de L'Aquila, abril de 2009
Fuente: Tomado de (Di Sarno et al., 2011)

Por otra parte, de acuerdo con la investigación realizada sobre las características que en suelos blandos de Ciudad de México tuvo el sismo Puebla – Morelos ($M_w=7.1$) ocurrido en septiembre de 2017, se evidenció que para registros tomados de diez estaciones las componentes verticales tienen periodos más cortos que las componentes horizontales, además, las relaciones espectrales V/H son mayores a uno ($V/H > 1.0$) para periodos entre 0.22s y 0.56s en seis estaciones de diez, concluyendo que para nuevas regulaciones como lección aprendida de este evento sísmico la componente vertical debe ser considerada (Ruíz-García, 2018).

Continuando con el estudio de las características del sismo descrito en el párrafo anterior, algunos investigadores notaron que las aceleraciones de movimiento de tierra del terremoto vertical registradas en estaciones acelerográficas ubicadas en sitios de suelo blando, superaron significativamente las registradas durante los terremotos históricos intraplaca en el campo cercano, lo que permite recomendar que la componente vertical deba tenerse en cuenta para edificaciones ubicadas a menos de 80 km de la falla cuando estén sobre suelos blandos y tengan periodos cortos (Jaimes & Ruíz-García, 2019). A la conclusión anterior se llegó a través de un análisis de 283 registros para seis eventos sísmicos considerados importantes entre 1964 y 2017, lo que además permitió proponer una relación espectral (V/H) como la que se indica en la Figura 16 con línea roja, cuyas relaciones V/H para periodos cortos menores a 0.35 s son de 0.80, mayor al valor comúnmente adoptado ($2/3 = 0.67$) en aproximadamente un 20%.

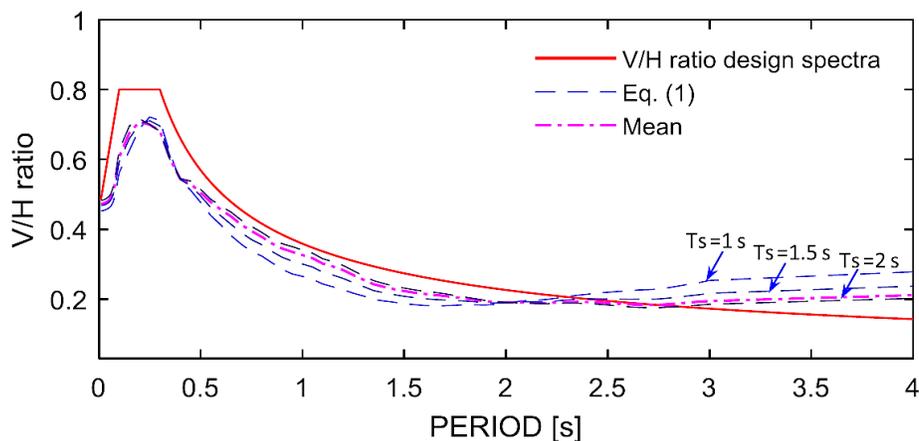


Figura 16 - Comparación entre el espectro de diseño y el espectro de relación V/H para suelos blandos en la Ciudad de México
Fuente: Tomado de (Jaimes & Ruíz-García, 2019)

En todo caso esta propuesta de relación V/H que es función del periodo de vibración de la edificación, es menos conservadora que la indicada en el Manual de Diseño de Obras Civiles MOC-2015 de México para periodos aproximadamente menores a 0.1s, en la cual la relación V/H puede alcanzar valores cercanos a 1.5 como se observa en la Figura 17.

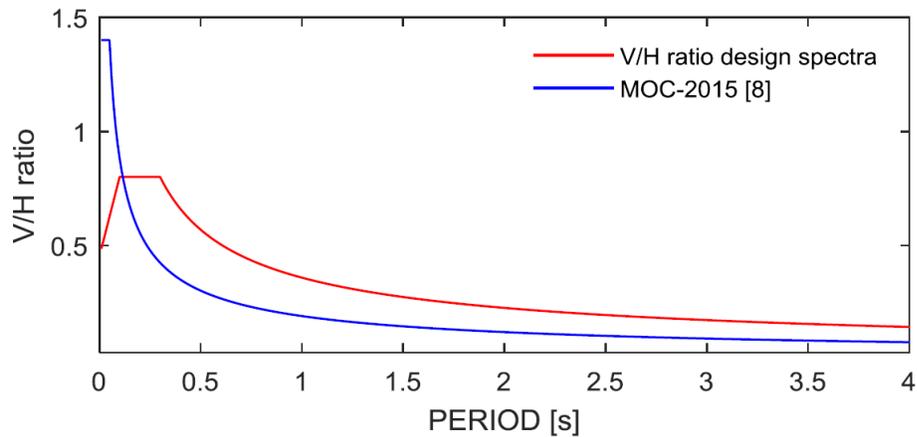


Figura 17 - Comparación del espectro de diseño V/H propuesto y el espectro V/H obtenido para la zona D-1 del MOC-2015

Fuente: Tomado de (Jaimes & Ruíz-García, 2019)

Comúnmente los reglamentos han adoptado la consideración del efecto de la componente vertical a través de la factorización del espectro de diseño horizontal o través del incremento del efecto de las cargas gravitacionales para algunas combinaciones de carga, buscando simplificar el análisis a través de un análisis dinámico espectral. Esta factorización del espectro vertical ha sido posible gracias a investigaciones como las adelantadas por Watabe et al. en 1990, en las que se sugirió con evidencia en análisis de resultados de eventos sísmicos de Estados Unidos que hay una dependencia sistemática entre las componentes espectrales verticales y horizontales, reconociéndose que debía ser posible desarrollar reglas simples para estimar espectros verticales en función de espectros horizontales (Bozorgnia & Campbell, 2004).

El enfoque de multiplicar por un factor el espectro horizontal para obtener el vertical se ha mantenido por más de tres décadas en distintos códigos y normas; sin embargo, en los últimos años ha cobrado importancia en algunos de los más avanzados (ASCE 7-16 y Eurocódigo EC8 por ejemplo) el enfoque que consiste en idealizar la componente vertical de los eventos sísmicos a través de definiciones de espectros verticales basados en funciones para el cálculo de las aceleraciones espectrales verticales y periodos específicos de interés en un rango determinado.

Uno de los avances más significativos en este enfoque fue el propuesto por Elnashai y Papazoglou en 1997 en su investigación "Procedure and spectra for analysis of RC structures subjected to strong vertical earthquake loads", la cual fue la base para la propuesta de espectro vertical adoptada por el Eurocódigo (EC8) (Kale & Akkar, 2020). A esto se agrega la investigación realizada por Bozorgnia y Campbell en 2004 "The vertical to horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra" que sirvió para la propuesta de espectro vertical adoptado en la versión de ASCE 7 del año 2016. Sobre esta última investigación se hablará en las líneas siguientes toda vez que es fundamental en uno de los documentos de referencia (ASCE 7-16), adicionalmente, en la misma se adoptaron y validaron varios resultados obtenidos en 1997 por Elnashai y Papazoglou.

Bozorgnia y Campbell propusieron un método simplificado para estimar espectros V/H y dos procedimientos para estimar un espectro vertical con el fin de que fueran usados en aplicaciones prácticas de ingeniería. Para cumplir lo propuesto seleccionaron 443 acelerogramas horizontales y 439 acelerogramas verticales de 36 y 34 eventos sísmicos ocurridos entre 1957 y 1998. Estos sismos tuvieron epicentros en distintas partes del mundo como puede evidenciarse en la tabla 1 de la referencia (Bozorgnia & Campbell, 2004); las características más relevantes de estos son: a. La distancia más corta entre el sitio de registro y la zona de ruptura sismogénica (r_{seis}) menor a 60 km, b. Eventos con hipocentro en el ambiente Cortical, c. Magnitud comprendida entre 4.7 y 7.7 Mw y d. Sismos ubicados en tres tipos de falla y en cuatro tipos de suelos: Suelo firme ($Vs_{30} 298 \pm 92$), suelo muy firme ($Vs_{30} 368 \pm 80$), roca blanda (421 ± 109) y roca firme (830 ± 339) datos en los que el segundo valor representa la variación estándar calculada. En este último caso, la clasificación del suelo en función del parámetro Vs_{30} es similar a la usada en el Uniform Building Code de 1997 (UBC 1997) y en el International Building Code del 2000 (IBC 2000).

Con el propósito de asociar los resultados obtenidos en la investigación de Bozorgnia y Campbell del año 2004 en función del tipo de perfil de suelo con los del presente trabajo, se realiza una comparación para lograr una aproximación al

momento de cotejarlos, esto empleando el parámetro Vs30 y los rangos indicados para él en los perfiles de suelo establecidos en NSR-10 (véase la Tabla 6).

Tabla 6 – Comparaciones clasificación del tipo de perfil de suelo en función de Vs30

Tipo de perfil de suelo Bozorgnia y Campbell 2004	Parámetro Vs30 (m/s)	Desviación estándar	Tipo de perfil de suelo aproximado de acuerdo con NSR-10
Suelo firme	298	± 92	Perfil tipo D
Suelo muy firme	368	± 80	Perfil tipo C
Roca blanda	421	± 109	Perfil tipo C
Roca firme	830	± 339	Perfil tipo B

Fuente: (Autor)

Como en investigaciones anteriores desarrolladas por Bozorgnia y Niazi (1989 a 1993), y Bozorgnia et al (1995 y 1996), en la investigación de 2004 se confirmó que V/H es función del periodo natural, de la distancia entre la fuente y el sitio y de las condiciones de sitio (perfil de suelo), y que guarda menos relación con la magnitud del evento y con la profundidad del sedimento. Por otra parte, se evidenció que en suelo firme y en periodos cortos, la relación V/H tiene amplitudes de hasta 1.8, siendo esta relación más alta en suelos que en rocas. Estos resultados permitieron concluir que la relación de 2/3 no es acertada para periodos cortos y fuentes cercanas, lo que además obedece a una característica universal (Bozorgnia & Campbell, 2004).

En el modelo matemático desarrollado encontraron espectros V/H que muestran el efecto de la magnitud, la distancia, las condiciones del sitio y los mecanismos de falla. En la Figura 18 gráficos (a) y (b) se observa la influencia de la magnitud y de la distancia en la generación de valores altos en la relación V/H para periodos cortos, mientras que para periodos intermedios y largos no existe una influencia representativa, obteniéndose valores de relación V/H inferiores a 0.5, lo anterior para magnitudes comprendidas entre 5.5 y 7.5 Mw y distancias entre la ruptura sismogénica y el sitio del registro de 3 y 30 km respectivamente.

El gráfico (c) indica que para periodos cortos la relación V/H es más pronunciada para suelos firmes con un incremento en este tipo de suelo con respecto a los otros de aproximadamente un 35%, mientras que para los tres tipos de suelo restantes esta relación es menor y muy similar entre ellos; además se puede observar que solo el perfil de suelo de roca firme tiene valores levemente mayores a 0.5 para periodos mayores a 1.0 s. Por último, el gráfico (d) muestra que el mecanismo de falla es levemente importante en periodos menores a 0.10 s para el mecanismo de falla *strike slip* o de deslizamiento horizontal, sin embargo para periodos mayores al indicado el impacto del mecanismo de falla en la relación V/H es débil (Bozorgnia & Campbell, 2004).

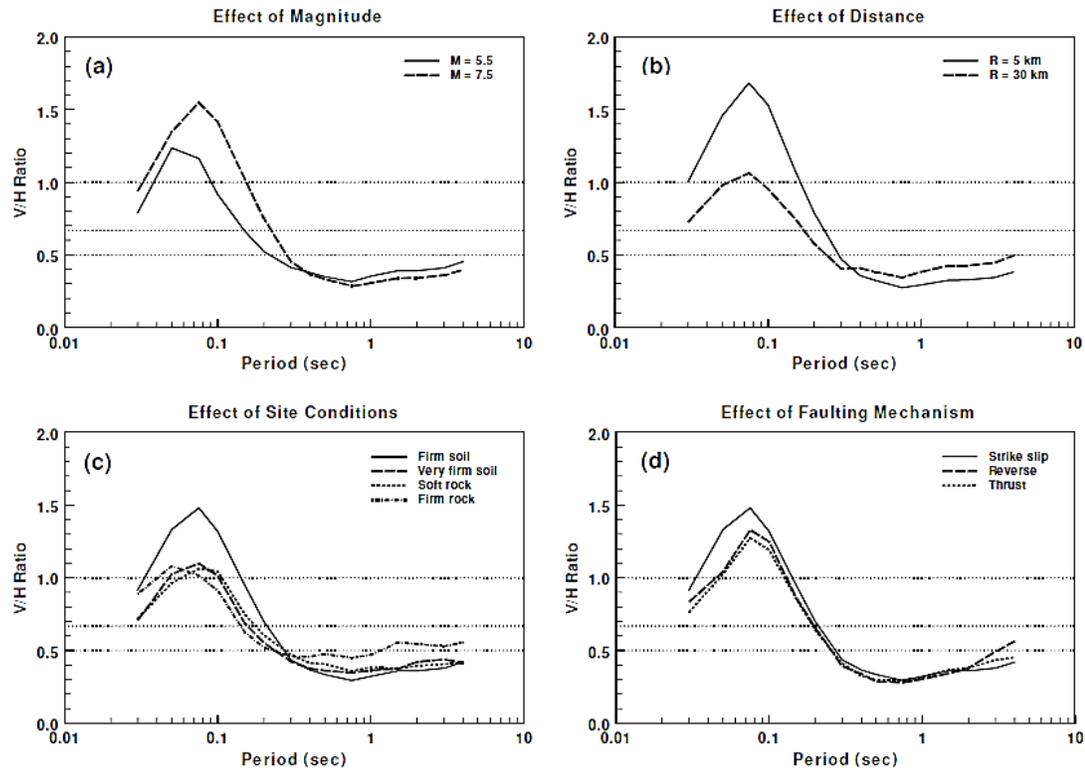


Figura 18 - Espectros V/H predichos por el modelo propuesto por Bozorgnia y Campbell para cuatro efectos

Fuente: (Bozorgnia & Campbell, 2004)

Estos investigadores compararon su estudio de 2004 con otros desarrollados para el oeste de América del Norte que también permiten la construcción de espectros V/H, estos son: Sadigh et al (1993), Abrahamson y Silva (1997) y Campbell (1997,

2000, 2001), todos desarrolladas para ambientes corticales(Bozorgnia & Campbell, 2004). A continuación se indica una figura que muestra los resultados de esta comparación para roca firme ($V_s30 \ 830 \pm \ 339$) construida a través de las ecuaciones de atenuación de los modelos mencionados, incluyendo la del estudio de Bozorgnia y Campbell para un evento con $M_w \ 7.0$, profundidad a la falla de 3 km y r_{seis} de 10.4 km. Las variaciones entre las funcionales de atenuación no superaron el 30%, lo que supone una buena aproximación entre los resultados y tendencias si se tiene en cuenta que los rangos de clasificación del tipo de perfil de suelos en función de V_s30 no fueron iguales para todas las investigaciones (véase la Figura 19). Un ejemplo de los espectros V/H propuesto por los autores para los distintos tipos de perfil de suelo se indican en la figura 7 de la bibliografía (Bozorgnia & Campbell, 2004).

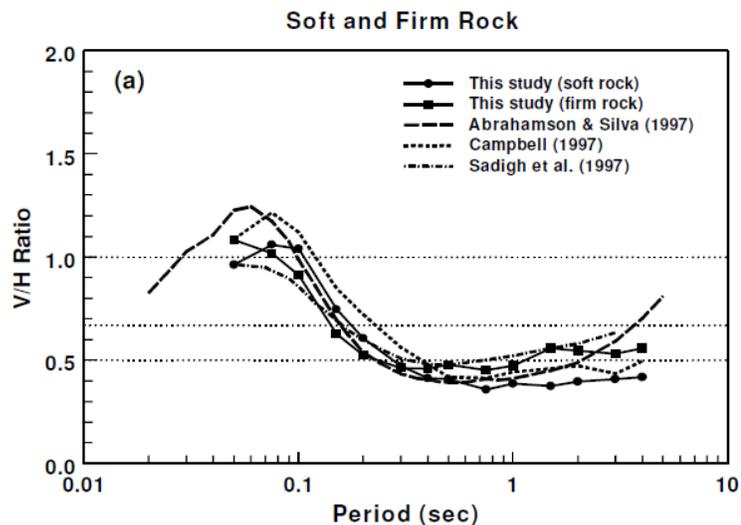


Figura 19 - Comparación de resultados obtenidos a través de distintos modelos para la elaboración de espectros V/H en roca firme
Fuente: (Bozorgnia & Campbell, 2004)

Pasando ahora a los espectros de la componente vertical, consideraron en su modelo que debe prestarse especial atención al rango de periodos cortos, esto teniendo en cuenta que los picos de respuesta espectral vertical ocurren en este rango de periodos, y que la mayoría de los periodos naturales de respuesta vertical de algunas estructuras y sus componentes caen en este rango; un ejemplo de esto es el análisis realizado por Bozorgnia et al. en 1998, en el que los periodos naturales verticales para numerosos componentes de las estructuras y los propios sistemas

estructurales eran menores a 0.26 s (Bozorgnia & Campbell, 2004); esto puede verificarse además en el estudio adelantado en Chile por Cares et al., en el que se observa que incluso para edificios de más de 20 pisos el periodo vertical no supera los 0.25 s (Cares et al., 2019).

Para ocuparse de esto definieron un espectro con una porción plana que se extiende hasta un periodo de esquina de 0.15 s con un valor de A_{vs} que es igual a la estimación de la aceleración vertical en $T = 0.1$ s para espectros verticales de un estudio de amenaza sísmica, y a partir de $T = 0.15$ s el espectro decae con la forma de la ecuación $A_{vs} (0.15/T)^{0.75}$ (véase la Figura 20). El periodo de esquina de 0.15 s es igual y coherente con el propuesto por Elnashai y Papazoglou en 1997.

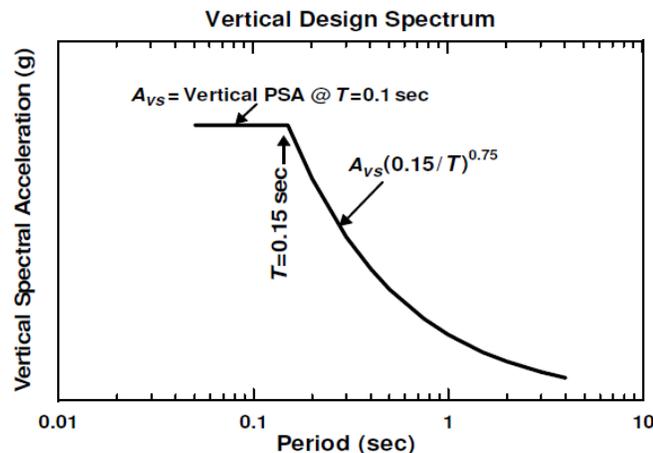


Figura 20 - Espectro vertical propuesto para propósitos prácticos de ingeniería
Fuente: (Bozorgnia & Campbell, 2004)

Por último, es preciso aclarar que la ordenada de A_{vs} para el espectro vertical se puede estimar a partir de dos procedimientos. El primero conociendo la ordenada espectral vertical para un periodo de $T = 0.1$ s que es lo que se indicó en el párrafo inmediatamente anterior, y el segundo cuando solo se dispone de una estimación de la ordenada espectral horizontal para un periodo de $T = 0.1$ s proveniente igualmente de un estudio de amenaza sísmica, en este caso la ordenada vertical A_{vs} puede ser calculada multiplicando la ordenada espectral horizontal a 0.1 s por la ordenada correspondiente de la relación de un espectro V/H al mismo periodo (0.1 s) (Bozorgnia & Campbell, 2004), advirtiéndose aquí la importancia de este tipo

de espectros. Conocida la ordenada espectral A_{vs} es posible construir todo el espectro vertical tal como se puede evidenciar en la Figura 20.

Avanzando en el tiempo, encontramos que uno de los estudios más recientes sobre espectros verticales para diseño sísmico es el realizado por Ozkan Kale y Sinan Akkar de la Universidad de Ankara en Turquía. El análisis partió de estudiar las prescripciones para movimientos verticales de tres códigos considerados avanzados en temas de diseño sísmico (ASCE 7-16 de EEUU, Eurocódigo EC8 y el TBEC18 de Turquía. Véase la Figura 21), para a través de lo dispuesto en ellos obtener espectros de diseño.

TABLE 1 Vertical design spectrum definitions in the selected seismic design codes

Design code	Lower corner period of constant spectral acceleration plateau (s)	Upper corner period of constant spectral acceleration plateau (s)	Short-period vertical spectral acceleration (SA_{VS})	Vertical spectral acceleration (SA_{V1}) at 1 s,	Decay rate
ASCE 7-16 (2016)	0.05	0.15	$0.8C_V S_S F_S^{a,c,d}$	Not used	0.75
EC8 Draft (2018)	0.05	$\frac{SA_{V1}}{SA_{VS}}$	$f_{vha} S_S F_S^{a,c,e}$	$f_{vh\beta} S_1 F_1^{b,c,e}$	1.0
TBEC18 (2018)	$\frac{1}{3} \left(0.2 \frac{S_1 F_1}{S_S F_S} \right)^{a,b,c}$	$\frac{1}{3} \left(\frac{S_1 F_1}{S_S F_S} \right)^{a,b,c}$	$0.8 S_S F_S^{a,c}$	Not used	1.0

Abbreviations: ACSE, American Society of Civil Engineers; EC8, Eurocode 8; TBEC, Turkish Building Earthquake Code.

^a S_S : Short-period horizontal spectral acceleration for reference rock condition.

^b S_1 : Horizontal spectral acceleration at $T = 1$ s for reference rock condition.

^c F_S and F_1 : Site factors of short (S_S) and $T = 1$ s (S_1) spectral acceleration.

^d C_V : Vertical coefficient defined in terms of S_S .

^e f_{vha} and $f_{vh\beta}$: Ratios of SA_{VS} to $S_S F_S$ and SA_{V1} to $S_1 F_1$, respectively. $f_{vha} = 0.8$ and $f_{vh\beta} = 0.6$ for high seismicity; $f_{vha} = f_{vh\beta} = 0.6$ for low seismicity.

Figura 21 - Definiciones del espectro vertical en algunos códigos de diseño sísmico
Fuente: (Kale & Akkar, 2020)

Hecho esto, compararon los resultados contra espectros construidos con base en la evaluación probabilística de peligro sísmico (PSHA) empleando modelos predictivos de movimiento vertical del suelo (GMPM), procedimiento que permite mantener una relación coherente entre la componente horizontal y vertical. Esto les permitió realizar observaciones sobre el grado de aproximación de lo propuesto en los códigos con la realidad de los registros existentes, además de sugerir fórmulas adecuadas para la representación del espectro vertical.

Las conclusiones de esta investigación señalan que hay aspectos por mejorar en la forma en que los códigos definen el espectro vertical, en cuanto los escenarios

evaluados con terremotos filtrados de acuerdo con criterios de magnitud M_w , distancia Joyner-Boore (R_{JB}) y tipo de perfil de suelo de registros de la base de datos del NGA-West226, mostraron que los espectros de los códigos dejan algunos puntos importantes por fuera de las curvas definidas.

Con el fin de subsanar esta diferencia, elaboraron una metodología para desarrollar un espectro vertical que superara entre otras las deficiencias evidenciadas y que además proporcionara una forma espectral que mantuviera una relación entre la componente horizontal y vertical para periodo corto e intermedio como función de las condiciones del suelo, y un nuevo enfoque para modelar la meseta de aceleración constante y la porción de decadencia del espectro de diseño vertical.

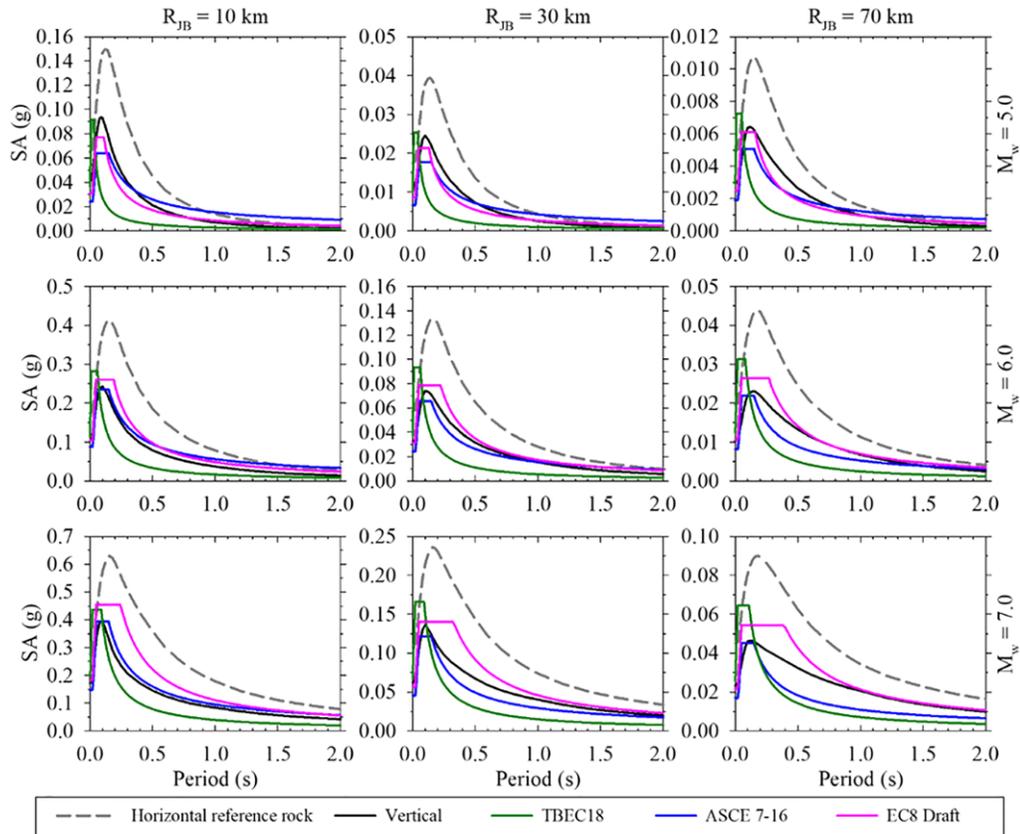


Figura 22 - Comparaciones de espectros verticales reales contra los obtenidos a través de códigos de diseño

Fuente: (Kale & Akkar, 2020)

La Figura 22 muestra las comparaciones de espectros reales seleccionados del modelo predictivo de movimiento del suelo GMPM para un perfil de suelo de referencia con un V_{s30} de 760 m/s para casos de magnitud M_w 5.0 (fila superior), M_w 6.0 (fila media) y M_w 7.0 (fila inferior). Las distancias del lugar de origen son $RJB=10$ km (primera columna), 30 km (columna central) y 70 km (última columna). Así mismo, la Figura 23 muestra el resultado del espectro de diseño vertical obtenido en la investigación de Kale y Akkar, con la cual se logró incluir los sectores que las formas espectrales de los códigos citados anteriormente excluían.

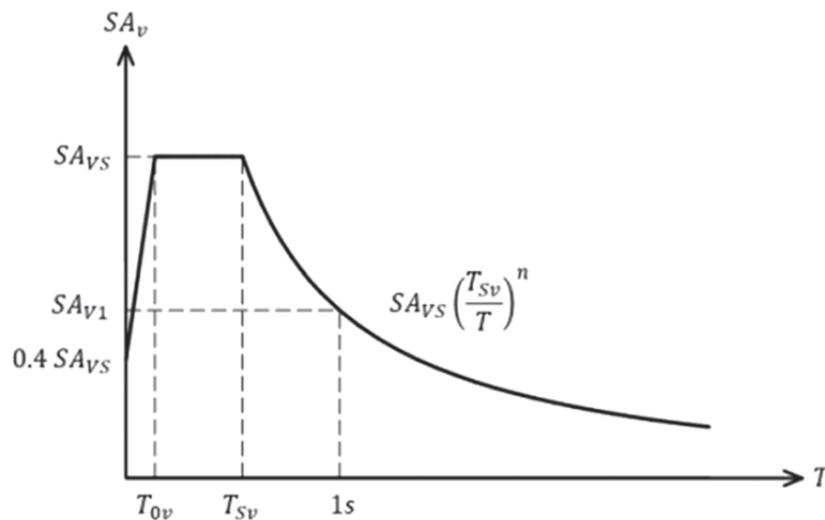


Figura 23 - Forma general del espectro de aceleración vertical propuesto por Kale y Akkar
Fuente: (Kale & Akkar, 2020)

Las ecuaciones para calcular los valores de la aceleración espectral vertical pueden revisarse en el documento correspondiente (Kale & Akkar, 2020), pero en resumen estas son función del tipo de perfil de suelo (parámetro V_{s30}), de la aceleración espectral de diseño horizontal para periodo corto incluyendo el efecto de la amplificación por factores de sitio, y de los periodos de esquina que limitan el ancho de la meseta T_{0v} y T_{sv} , en donde el inferior al igual que en ASCE 7-16 está limitado a 0.05 s y el periodo de esquina superior a 0.13 s, no obstante, la inclusión de los puntos que inicialmente quedaban por fuera está en parte garantizada por la tasa de decaimiento (n) que afecta a la función después del periodo T_{sv} . Con esta metodología, para un ejemplo de perfil de suelo tipo B de acuerdo con las ecuaciones y parámetros definidos en el capítulo 3 de (Kale & Akkar, 2020) se

obtendría una aceleración espectral vertical en la meseta de 0.67 o $2/3$, mientras que para un perfil de suelo C el valor de esta misma aceleración sería de 0.77.

En cuanto a los métodos para analizar la respuesta de la estructura y los efectos sobre la misma, la mayoría de los investigadores consideran que una de las mejores maneras de estudiar el efecto de la componente vertical es realizar un análisis dinámico espectral (ADE) y comparar los resultados con los que se obtienen de realizar un análisis dinámico lineal (ADL) o un análisis dinámico no lineal (ADNL), en todos los casos excluyendo e incluyendo la componente vertical del sismo.

2.2 Efectos de la componente vertical en estructuras

Abordando ahora los efectos que la componente vertical tiene sobre las edificaciones, (Colangelo, 2020) indica que la componente vertical puede generar daños en edificios y puentes aun cuando sean regulares; para ello realizó un análisis correlacionando la componente vertical con la horizontal y sin correlación entre ellas sobre marcos de concreto reforzado de diferentes alturas, evidenciando un incremento en la demanda de ductilidad de las columnas de entre 2 y 5 veces y un incremento de hasta el 20% en la magnitud de la carga axial; en cuanto a las vigas disminuye la demanda máxima de rotación en un 25% encontrando además que en el centro de la luz había una variación en los momentos a flexión de 0.5 a 1.0 para tramos internos, y de 0.75 a 1.25 para tramos externos.

Dentro de este contexto, otro estudio realizado en Italia por (Bovo & Savoia, 2019) para estructuras construidas con elementos de concreto reforzado prefabricado, se enfocó en el efecto de la componente vertical en vigas prefabricadas de concreto, obteniendo que para edificaciones ubicadas en el campo cercano la relación entre la fuerza vertical inducida por la carga sísmica y la fuerza debido a la carga gravitacional era superior a uno para la mayoría de los casos en que los periodos eran inferiores a 0.3 segundos, alcanzando relaciones superiores a tres para algunas vigas internas para periodos inferiores a 0.1 segundos.

Para la misma época análisis no lineales realizados en Chile por (Cares et al., 2019), mostraron que para edificios altos los efectos de la componente vertical son representativos, obteniendo amplificaciones en la respuesta de hasta dos veces en comparación con el análisis dinámico espectral realizado inicialmente; este trabajo de investigación fue realizado para doce (12) edificaciones en su mayoría de más de 30 niveles de altura; llama la atención que los periodos en sentido vertical de estas estructuras fueron del orden del 10% al 15% de los periodos en el sentido horizontal (véase la Figura 24); un ejemplo es una edificación de 30 pisos con periodo en uno de los sentidos horizontales de 1.8s pero que en su sentido vertical tiene un periodo de aproximadamente 0.2s; si esta consideración se contrasta con lo evidenciado por (Perea & Esteva, 2005) en cuanto a que las aceleraciones verticales son importantes para periodos verticales cortos, puede deducirse la importancia de analizar la componente vertical para este tipo de edificaciones.

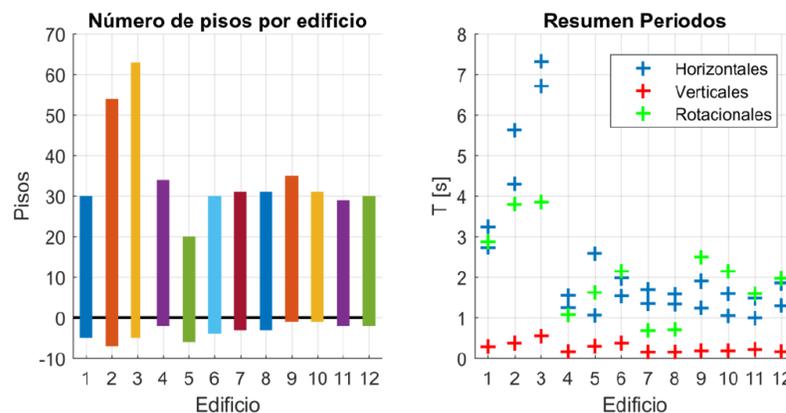


Figura 24 - Resumen de edificios estudiados en función del número de pisos
Fuente: Tomado de (Cares et al., 2019)

Por su parte, (Di Sarno et al., 2011) observando los daños causados en elementos estructurales y no estructurales en edificios de pórticos en concreto reforzado causados por el sismo de L'Aquila del 6 de abril de 2009 que tuvo una magnitud Mw 6.3 con epicentro a 6 km de la ciudad, decidió realizar un estudio analítico de los efectos de la componente vertical en estas estructuras sobre marcos simples (simulando edificaciones típicas existentes), toda vez que a los efectos de ésta se le atribuyen entre otros el aumento de las fuerzas axiales en columnas, incremento en los momentos flectores y demandas a corte, amplificación de las deformaciones

plásticas y reducción de la ductilidad en los componentes estructurales. En este análisis se indica que para relaciones de cargas axiales normalizadas con respecto a la carga axial de aplastamiento con valores de 0.50, cuando se incluye el efecto de la componente vertical se pueden aumentar las magnitudes de carga axial hasta en un 59%, por su parte los momentos obtenidos se ubican por fuera de los diagramas de interacción de las columnas.

En cuanto a estructuras de mayor rigidez, como es el caso de edificaciones de dos pisos en mampostería no reforzada, (Rinaldin et al., 2019) halló que pueden encontrarse variaciones de la relación demanda capacidad del orden del 15% con variaciones de cargas axiales que pueden llegar hasta el 94%. Lo dicho deja en evidencia que es importante revisar para cada caso el efecto de la componente vertical en distintas estructuras. Buscando mostrar de forma breve los resultados obtenidos en distintas investigaciones se agrega una tabla de resumen de algunos trabajos mencionados (véase la Tabla 7), para mayor información de casos de estudio similares realizados antes de 2005 puede consultarse la tabla 2 de la referencia (Perea & Esteva, 2005).

Tabla 7 - Resultados obtenidos en investigaciones similares

Referencia	Estructura	Conclusiones
(Ruíz & Sarria, 2002)	Naves industriales de grandes luces	El efecto del sismo vertical es mayor al efecto que producen las cargas gravitacionales pero menor al que produce la componente horizontal, se considera importante para algunos elementos de la estructura la componente vertical.
(Perea & Esteva, 2005)	Pórticos planos de concreto	Cuando la estructura ingresa en el rango inelástico se evidencian incrementos en las cargas axiales del orden del 60% y del 30% para solicitaciones a flexión.
(Vilera et al., 2008)	Pórticos de acero	Incrementos en los valores de la carga axial desde 73.69% hasta en un 167%, sin variaciones representativas en derivas. La demanda en la carga axial está directamente relacionada con la distancia epicentral.

Referencia	Estructura	Conclusiones
(Di Sarno et al., 2011)	Pórticos planos de concreto	Para relaciones de cargas axiales normalizadas con respecto a la carga axial de aplastamiento con valores de 0.50, cuando se incluye el efecto de la componente vertical se pueden incrementar las magnitudes de carga axial hasta en un 59%; los momentos obtenidos se ubican por fuera de los diagramas de interacción de las columnas.
(Leal, 2012)	Pórticos de acero (PAE)	Para el análisis modal espectral no se evidencian mayores cambios en los resultados obtenidos, para el análisis dinámico lineal se evidencian variaciones en cargas axiales de hasta un 40% en los pisos inferiores.
(Cabrera, 2013)	Mampostería reforzada	Los incrementos en las cargas axiales no se incrementaron en más de un 11%, lo anterior derivado de un análisis elástico con un espectro vertical equivalente al 2/3 del horizontal, no se realizó análisis inelástico.
(Bovo & Savoia, 2019)	Elementos prefabricados en concreto reforzado	La relación entre la fuerza vertical inducida por la carga sísmica y la fuerza debido a la carga gravitacional es mayor a 1.0 para la mayoría de los casos en que los periodos eran inferiores a 0.3 s, alcanzando relaciones mayores a 3.0 para algunas vigas internas para periodos inferiores a 0.1 s.
(Cares et al., 2019)	Sistemas combinados	La realización de este estudio permite concluir que efectivamente los edificios altos poseen flexibilidad en la dirección vertical, con lo cual existe amplificación de la respuesta en este sentido.
(Rinaldin et al., 2019)	Mampostería no reforzada	Incrementos en las relaciones D/C hasta de un 15%. Se concluye que la componente vertical debe considerarse durante el proceso de diseño especialmente para sismos del campo cercano.
(Colangelo, 2020)	Pórticos planos de concreto reforzado	Aumento en la demanda de ductilidad de las columnas de entre 2 y 5 veces y un incremento de hasta el 20% en la magnitud de la carga axial; en vigas disminución de la demanda máxima de rotación en un 25%, incremento en los momentos a flexión de 0.5 a 1.0 para tramos internos, y de 0.75 a 1.25 para tramos externos.

Fuente: Autor

Uno de los aspectos más importantes al considerar el efecto de la componente vertical, es disponer de reglas de combinación que permitan representar adecuadamente el efecto de las tres componentes sísmicas sobre una estructura. A la fecha, se han realizado numerosos estudios para determinar cuál es la más adecuada; entre los más relevantes y que a la fecha siguen vigentes están los de Newmark (1975), Rosenblueth y Contreras (1977) y Newmark y Hall (1982), los cuales propusieron que la regla para obtener la respuesta sísmica combinada era adecuada cuando se consideraba el 100% de una componente en una dirección y entre el 30% y 40% en las otras direcciones (considerando dos componentes horizontales perpendiculares entre sí y la componente vertical); siendo comúnmente adoptado el 30%, conociéndose como regla de combinación del 30% (Valenzuela et al., 2015). Esta regla de combinación es aceptada por la mayoría de los códigos de diseño sísmico, incluidos los de interés para el presente trabajo (Reglamento NSR-10 y el estándar ASCE 7-16); sin embargo, es necesario considerar cual es el grado de precisión de la regla de combinación anteriormente indicada.

En la investigación de Valenzuela y otros colaboradores, se encontró que la regla del 30% puede subestimar la carga axial en columnas en aproximadamente un 10% cuando se realizan análisis elásticos, y en un 15% cuando se realizan análisis inelásticos; mientras que puede sobreestimar el cortante en la base en aproximadamente un 10% para los casos en que solo se consideran las componentes horizontales o cuando estas se acompañan de la componente vertical.

En cambio, esta regla del 30% es ligeramente más precisa cuando se incluye en el análisis la componente vertical en conjunto con las componentes horizontales, lo cual es deseable para efectos de la presente investigación. Otra de las reglas de combinación empleadas es la Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS por sus siglas en inglés), no obstante, se ha encontrado que no hay diferencias significativas en los resultados obtenidos a través de esta metodología y la de la regla del 30% (Valenzuela et al., 2015).

Hasta aquí se ha hablado del efecto de la componente vertical en estructuras empleadas en la construcción de edificaciones, así mismo, se ha mencionado la

incidencia de la relación espectral y de algunas de las reglas de combinación que deben tenerse en cuenta para que esta componente esté bien representada; sin embargo, no se han tratado algunas particularidades que deben considerarse en el modelo matemático para obtener resultados satisfactorios que permitan considerar adecuadamente la componente V sin incurrir en errores relevantes que los invaliden.

En este sentido, una de las investigaciones consideradas relevantes fue la realizada por Ju y otros colaboradores en el año 2000 titulada 3D Analyses of buildings under vertical component of earthquakes (Ju et al., 2000), la cual se enfocó en edificios de concreto reforzado de 5, 10, 15, 20 y 25 pisos con alturas de entrepiso de 3 m y luces de 7 m. Los modelos empleados fueron regulares (rectangular) e irregulares (forma de L) vistos en planta. De esta investigación se consideran relevantes las siguientes consideraciones y conclusiones:

- a. Es necesario discretizar la estructura dividiendo las vigas principales en varios elementos para disminuir errores en los resultados obtenidos. Para definir el porcentaje de error en cada modelo supuesto (Mesh-0: sin dividir la viga; Mesh-1: dividiendo viga en 2 partes y Mesh-2; dividiendo viga en 3 partes), Ju y sus colaboradores plantearon una ecuación en función de los desplazamientos obteniendo los resultados indicados en la Figura 25.

TABLE 1. Percentage of Averaged Error Using Eq. (6)

Building stories (1)	Lumped Mass			Consistent Mass	
	Mesh-0 (2)	Mesh-1 (3)	Mesh-2 (4)	Mesh-0 (5)	Mesh-1 (6)
(a) Rectangular Building					
5	22.70	5.44	1.53	16.88	1.29
10	12.73	1.24	0.60	11.72	1.07
15	7.09	0.67	0.31	10.46	0.63
20	5.02	0.56	0.19	5.95	0.42
25	4.24	0.30	0.08	5.05	0.34
(b) L-Shaped Building					
5	40.79	7.97	2.02	23.01	1.70
10	13.87	3.15	0.80	9.67	1.15
15	10.37	1.27	0.52	9.56	0.80
20	5.82	0.87	0.36	3.11	0.29
25	4.41	0.49	0.14	3.61	0.27

Figura 25 - Porcentajes de error promedio en función de la discretización de vigas
Fuente: Tomado de (Ju et al., 2000)

De estos resultados se concluye que dividir las vigas en dos partes (Mesh-1) es adecuado para edificios desde 5 pisos cuando se usan modelos de masa consistente, en los cuales se tienen en cuenta los grados de libertad suficientes para considerar los efectos de la masa en el sentido vertical en cada uno de los puntos discretizados, en estos casos los errores no superan el 1.29%. En cambio, si se usaran modelos de masa concentrada, la suposición de dividir las vigas en dos partes sería adecuada para edificios de más de 10 pisos, mientras que para edificios de 5 pisos o menos sería adecuado dividir las vigas en tres partes. En cuanto a esto, la investigación concluye que entre más se discretice la estructura menor es el error en los resultados obtenidos, igualmente, que los edificios más altos presentan menores errores teniendo en cuenta que la respuesta de estos está más gobernada por el comportamiento de las columnas que de las vigas.

- b. Es aceptable continuar con el criterio de definir los entrepisos rígidos en su plano y despreciar la rigidez de estos en el sentido normal al mismo, esto debido a que descuidar la rigidez vertical del piso hace que las vigas del edificio soporten más cargas verticales, lo que hace que este método tradicional arroje resultados más conservadores; lo que indica que esa suposición es válida para el análisis de edificios considerando la componente vertical siempre que el espesor de la losa del entrepiso no supere los 0.15 m.
- c. Para obtener resultados satisfactorios, es necesario tener en cuenta el 80% de la participación de la masa en el sentido vertical, porcentajes de participación de la masa superiores pueden generar un mayor esfuerzo computacional sin que ello signifique una precisión significativamente superior en los resultados.
- d. La componente vertical es importante para la carga axial de las columnas y menos importante para los momentos en las vigas. Por otra parte, el incremento de la carga axial es función de la relación existente entre la magnitud de la aceleración vertical del sismo y la magnitud de la aceleración de la gravedad.

Como los anteriores, existen otros aspectos importantes para tener en cuenta en el estudio del estado del arte, los cuales se abordarán a continuación considerando que son fundamentales en la elaboración de un mejor desarrollo del trabajo. Uno de estos especialmente para el ADL es la selección de señales sísmicas a emplear en los modelos matemáticos de la idealización de la estructura. Este particular se aborda de acuerdo con los reglamentos en tres pasos principalmente. El primero de ellos relacionado con la obtención de las señales y su procesamiento para corregirlas y eliminar de ellas el contenido frecuencial no deseado, el segundo aspecto está relacionado con la selección de las señales en función de que puedan asemejarse a la amenaza sísmica del sitio, y la tercera y última con su proceso de escalado o de coincidencia para asemejarse con el espectro objetivo. En este documento se hará una breve referencia a la segunda y a la tercera por considerar que son las que guardan relación con el alcance del presente trabajo de grado, partiendo del hecho de que los acelerogramas a emplear se han filtrado y corregido con anterioridad por parte de la fuente.

Las normas de referencia empleadas indican que para la selección de las señales sísmicas se deben tener en cuenta algunos criterios para garantizar una respuesta de la estructura concordante con la amenaza sísmica del sitio. El Reglamento NSR-10 indica en A.2.7.1 que deben usarse por lo menos tres acelerogramas diferentes que sean representativos de los movimientos esperados del terreno, considerando que deben obtenerse de registros tomados en eventos con magnitudes, distancias hipocentrales a la falla causante y mecanismos de ruptura similares a los de los movimientos sísmicos prescritos para el lugar pero que cumplan la mayor gama de frecuencias y amplitudes posibles (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2017). En el mismo documento se aclara que si se utilizan siete o más acelerogramas en vez del mínimo de tres, se puede utilizar el valor promedio de los valores obtenidos de todos los acelerogramas empleados, en reemplazo de considerar los valores máximos de los análisis individuales.

Por su parte, el documento estándar ASCE 7-16 exige en el numeral 12.9.2.3 que no deben usarse menos de tres pares de componentes ortogonales emparejados espectralmente con el espectro objetivo los cuales pueden venir de movimientos

reales del suelo o de registros artificiales. En cuanto a recomendaciones iniciales se sugiere revisar el documento NIST GCR 11-918-15 en el cual se establecen las pautas para seleccionar y escalar movimientos de tierra de terremotos para realizar el análisis de historia de respuesta en distintos tipos de estructuras (ASCE, 2016).

Adicional al número de registros a emplear (3 o 7), lo que dependerá del tipo de respuesta a evaluar, de la proximidad de la estructura con la falla, del tipo de estructura, entre otros, es igual de importante el método con el cual se modifiquen los registros, toda vez que esto ofrece una mayor precisión en la estimación de la respuesta de la estructura. Se indica que también es importante para obtener buenos resultados definir un buen periodo de acondicionamiento, obteniendo que el periodo del primer modo de acuerdo con investigaciones realizadas ha arrojado resultados aceptables (NIST, 2011).

En cuanto a los criterios de selección de señales para escalar a un espectro objetivo, se puede decir que en su orden los criterios a tener en cuenta son la forma espectral en el rango de periodos de interés definidos entre $0.2T$ y $1.5T$, la cual debe ser similar; sigue en orden la magnitud del terremoto, la distancia del sitio a la fuente y las condiciones de sitio representadas normalmente a través del parámetro V_s30 ; el rango de periodo indicado tiene la particularidad de que hacia el valor de $1.5T$ incluye el efecto del alargamiento del periodo por la acción inelástica, mientras que hacia $0.2T$ se destina a calcular modos de respuesta más altos (NIST, 2011). Puede observarse que en términos generales los parámetros anteriores son los acogidos en los reglamentos NSR-10 y ASCE 7-16 para la selección de señales.

Haciendo referencia a los métodos usados para realizar el escalado o la coincidencia espectral se destacan los de escalado lineal y el escalado en el dominio de la frecuencia o en el dominio del tiempo; el primero apunta a un método de escalado uniforme como el definido en NSR-10, y el último a un método de coincidencia espectral como el especificado y recomendado en los comentarios de ASCE 7-16. En líneas generales el escalado lineal o uniforme parte de que la totalidad del acelerogramas es escalado de manera directa hacia arriba o hacia abajo por un factor constante, el cual es seleccionado para lograr un ajuste del

movimiento del suelo a la aceleración espectral en zonas cercanas al periodo fundamental de la estructura estudiada; usualmente este factor oscila entre 2 y 3 (Acevedo, 2012) de acuerdo con algunos autores, otros por su parte no hacen énfasis en un valor específico. Por otra parte, los escalados en el dominio de la frecuencia y del tiempo, incluyen la adición de ondas las cuales son funciones matemáticas que se localizan en el dominio del tiempo y de la frecuencia, lo que resulta útil para la modificación de señales no estacionarias como las señales sísmicas (Flores & Ayes, 2018). Para ilustrar algunas de las diferencias entre los dos métodos indicados se muestra la Figura 26.

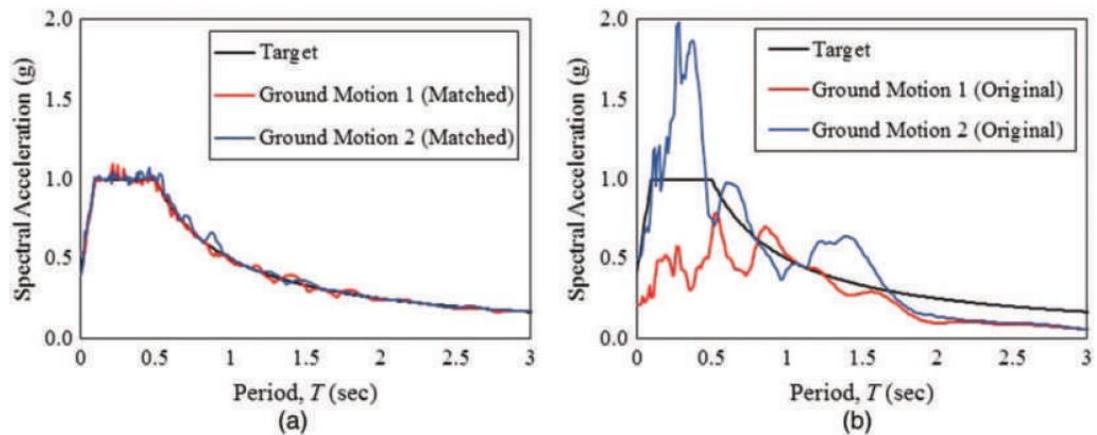


Figura 26 - Espectro Matching vs Espectro Escala de Amplitud
Fuente: (ASCE, 2016)

El tipo de método para modificar los registros de movimientos del terreno (escalado uniforme o coincidencia espectral) dependerá de varios aspectos que debe evaluar cuidadosamente el ingeniero diseñador al momento de realizar el análisis estructural. Por ejemplo, para predecir respuestas promedio de derivas de la historia de respuesta para una determinada magnitud sísmica, se puede hacer coincidir los movimientos del suelo con un espectro objetivo (Spectral Matching), esto sería un enfoque apropiado porque la coincidencia de espectro reduce la variabilidad en los espectros de aceleración de los movimientos del terreno conduciendo a una mayor confianza en la respuesta promedio para un número dado de movimientos de suelo. En cambio, si el objetivo por ejemplo es evaluar la probabilidad de falla por corte en un muro de concreto controlado por fuerza en el cual es importante la predicción del

valor medio y de su variabilidad, la coincidencia espectral sería inapropiada porque suprime la variabilidad del registro que es inherente al movimiento del suelo correspondiente (NIST, 2011).

Ambos métodos pueden usarse de acuerdo con las necesidades del proyecto a estudiar. El escalado uniforme puede generar incrementos en las amplitudes que excedan las que realmente pueden inducir un movimiento del terreno en la zona de estudio, pero entre sus ventajas se encuentra la de que conserva el contenido frecuencial del movimiento lo que garantiza el análisis de la variabilidad de los efectos sobre la estructura, dicho esto, si se dispone de buenos registros de movimientos del suelo que cumplan los criterios de selección ya definidos (forma espectral, magnitud, distancia, condiciones del sitio) este método resulta muy apropiado. En cuanto al método de coincidencia espectral (Spectral Matching), se requiere de mucha experiencia por parte del ingeniero diseñador para evaluar los efectos que sobre la respuesta de la estructura inducen el cambio del contenido frecuencial del movimiento del terreno, adicionalmente este método puede afectar la participación de algunos modos que pueden ser representativos; como ventaja puede mencionarse que estudios realizados indican que con este método se pueden llegar a requerir un menor número de registros (NIST, 2011).

3 Metodología

En este capítulo se describirá la metodología empleada para alcanzar los objetivos propuestos. Inicialmente se abordan los temas relacionados con la relación de la componente V y H de los eventos sísmicos, haciendo énfasis en la información empleada, las herramientas usadas para su procesamiento y la selección de los datos más relevantes para su análisis. Posteriormente se explicarán las consideraciones para el análisis de dos estructuras sometidas al efecto de la componente V y H de los eventos sísmicos. En este sentido, se recomienda al lector familiarizarse con dos usos que se darán al término “relación V/H”, inicialmente se usará para hacer referencia a las relaciones entre componentes sísmicas del movimiento del terreno vertical y horizontal, y en otro contexto se usará para hacer referencia a las relaciones entre solicitaciones de carga axial, cortante o momento cuando se incluye y cuando no se incluye la componente V. A continuación, en cada uno de los numerales se explicarán los pasos más significativos.

3.1 Revisión bibliográfica

Se inició con una búsqueda bibliográfica de carácter nacional e internacional. En síntesis se consultaron algunas bases de datos de contenido científico, se revisaron los repositorios de algunas universidades, bibliotecas y otros contenidos técnicos en la web, lo que permitió el acceso a artículos científicos, reportes, conferencias, trabajos de grado, textos especializados, reglamentos, normas y demás documentos que en conjunto permitieron establecer los objetivos, el marco teórico, el estado del arte y la metodología para desarrollar este documento.

Con base en la bibliografía consultada se establecieron cuáles serían los datos de interés, las fuentes para obtenerlos, los procedimientos y métodos para procesarlos y analizarlos, qué modelos matemáticos y sobre cuáles arquetipos estructurales debían usarse para evaluar sus efectos, entre otras actividades que nos permitieran obtener resultados que contribuyeran a elaborar las mejores recomendaciones y

conclusiones posibles sobre la relación entre la componente sísmica V y H y el efecto de la componente sísmica V en pórticos y sistemas combinados de concreto.

3.2 Relación entre la componente sísmica horizontal y vertical

Los pasos generales que se describirán a continuación son los necesarios para cumplir con los objetivos uno y dos del presente trabajo. En resumen el propósito es establecer las relaciones entre las componentes sísmicas V y H.

3.2.1 Datos de interés y fuente de la información

Uno de los objetivos del presente trabajo es analizar la relación entre la componente V y la componente H de eventos sísmicos ocurridos en el territorio colombiano, o de algunos eventos de otros países que tuvieran influencia en nuestra nación. Para ello, primero se identificó cual era la mejor fuente de información local y que sismos habían sido considerados importantes por esa fuente, posteriormente se establecieron los datos significativos de esos eventos para procesarlos y analizarlos.

3.2.1.1 Fuente de la información

La información se obtuvo del Servicio Geológico Colombiano (SGC), institución a nivel nacional que entre sus responsabilidades tiene la de estudiar y conocer la amenaza sísmica en nuestro territorio, identificando que amenazas de origen geológico pueden afectar municipios y departamentos de nuestro país (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020). A su vez, la información de interés para este trabajo está incluida en el Anexo B – Base de Datos de Movimientos Fuertes del MNAS 2020. Como se explicó en el capítulo 1, el Anexo B agrupa 118 eventos sísmicos (49 corticales, 26 del Nido, 22 de la zona de Benioff y 21 interplaca de la zona de Subducción del pacífico) para un total de 1.786 registros triaxiales.

La información de los 1.786 registros fue entregada por el SGC en igual número de archivos de Microsoft Access, lo que facilitó su procesamiento en MATLAB, software desarrollado por MathWorks (MathWorks, 2015). Estos archivos se clasificaron en carpetas independientes por ambientes tectónicos, filtrando así 607 archivos que representan igual número de registros para el ambiente Cortical, 259 para la zona de Subducción, 435 para la zona de Benioff y 485 para la zona del Nido.

3.2.1.2 *Datos de interés*

El siguiente paso fue analizar la información recibida y determinar qué datos de los que contenía eran relevantes, se estableció que los de interés por cada registro son:

- a. Código de identificación del evento (ejemplo: CO_19940913100134).
- b. Código de la estación que registró el evento sísmico (ejemplo: CFILA).
- c. Componente horizontal H1 procesada en fracciones de g.
- d. Componente horizontal H2 procesada en fracciones de g.
- e. Componente vertical V procesada en fracciones de g.
- f. Intervalo de tiempo del registro DT en segundos.
- g. Profundidad del hipocentro en kilómetros.
- h. Distancia epicentral en kilómetros.
- i. Magnitud Mw.
- j. Ambiente tectónico.
- k. Parámetro Vs30 en metros sobre segundo.

Los detalles de las características de los arreglos que contienen la información antes indicada pueden revisarse en el Anexo E.

3.2.2 *Método para la evaluación numérica de la respuesta dinámica*

En los problemas que la ingeniería estructural debe resolver en cuanto a la evaluación del impacto de los sismos sobre las edificaciones, resulta más útil trabajar en el dominio de las frecuencias o periodos que es la información obtenida

de un espectro de aceleraciones, que trabajar en el dominio del tiempo que es la información obtenida de un acelerograma, esto en cuanto a que resulta práctico caracterizar e individualizar cada estructura en función de su periodo o frecuencia. Por otra parte, cuando la excitación que afecta una estructura se muestra compleja como es el caso de los eventos sísmicos, la evaluación numérica de la respuesta sísmica a través de la solución de la Integral de Duhamel es difícil de resolver; en estos casos es necesario recurrir a métodos numéricos como los descritos en el capítulo 1 para facilitar la solución del problema.

Para continuar con este paso que es la evaluación numérica de la respuesta dinámica, se escogió el método de la aceleración lineal para determinar la respuesta de un sistema lineal de un grado de libertad. Cada componente H1, H2 y V de los 1.786 registros sísmicos fueron sujetas de la aplicación de este método para obtener los espectros de respuesta; se deduce que al término del ejercicio se procesaron 5.358 señales de componentes de eventos sísmicos para obtener igual número de espectros de aceleración. Para garantizar la convergencia del método y una precisión adecuada de sus resultados, se garantizó que el intervalo de evaluación de la respuesta como mínimo debía corresponder a los puntos en los cuales cambia la fuerza de excitación de acuerdo con la información suministrada por cada registro. Para un mayor entendimiento del método se puede revisar el texto (García, 1998) capítulo 3, numeral 3.3 Método de la aceleración lineal.

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

Ecuación 2 - Cálculo de la aceleración, método de la aceleración lineal

3.2.3 Clasificación de la información

Decidida la fuente de la información, los datos de interés y el método a través del cual se obtendrían los espectros de aceleración, se continuó con la clasificación de los registros en cuatro grupos (uno por cada ambiente tectónico), lo que aparte de

mejorar la eficiencia de los programas al procesar un menor número de datos, permite analizar resultados por ambientes con alta probabilidad de generar eventos sísmicos de características similares. El contenido de la información de cada grupo se concentró en carpetas las cuales se indican en la Tabla 8.

Tabla 8 - Clasificación de la información para su análisis y procesamiento

Carpeta digital	Ambiente tectónico	Número de registros en archivos.mat	Archivos Excel FlatFile
CRUSTAL	Cortical	607	1
INTERFACE	Subducción	259	1
INSLAB	Benioff	435	1
DEEP	Nido	485	1
	Total	1.786	

Fuente: Autor

De los resultados obtenidos se hablará más adelante en razón a que los criterios de clasificación además de estar relacionados con el ambiente tectónico se relacionan con otros parámetros, entre ellos el tipo de perfil de suelo, las magnitudes de las aceleraciones espectrales, entre otros.

3.2.4 Algoritmo para el procesamiento de datos y obtención de resultados

Para obtener los resultados propuestos fue necesario construir 5.358 espectros y a su vez extraer de ellos los datos de interés, para esto se desarrolló un script en MATLAB. El script como se conocen los programas en este lenguaje computacional no es más que el uso sincronizado de los comandos disponibles; el desarrollado para el procesamiento de la información puede resumirse en las siguientes fases:

- a. Extracción de datos de interés de las carpetas digitales y archivos.mat.
- b. Construcción de acelerogramas.
- c. Desarrollo del método de la aceleración lineal para construir los espectros de aceleración de las componentes H1, H2 y V.
- d. Obtención de datos relevantes de los acelerogramas y espectros de aceleración.

- e. Elaboración de gráficos por cada registro.
- f. Organización de resultados y elaboración de gráficos generales.

3.2.4.1 Extracción de datos de interés de las carpetas digitales y archivos.mat

Por ambiente tectónico el programa construyó para cada registro su código con base en el FlatFile como la combinación del código de la estación y el código del evento (por ejemplo: CFILA_CO_19940913100134); seguidamente se extrajo de cada registro la siguiente información: Ambiente tectónico (Ate), magnitud del evento sísmico (Mw), profundidad del hipocentro (ProfHip), parámetro Vs30 (Vs30) y distancia epicentral (DistEpi), a partir de aquí el script dispuso de los datos de cada registro para procesarlos y organizarlos.

Con el nombre del registro creado, el script ubicó dentro de la carpeta de cada ambiente tectónico el archivos.mat correspondiente, obteniendo de él los registros de aceleraciones de la componente H1 en la Señal 1, la componente H2 en la Señal 3 y la componente V en la Señal 2; adicionalmente se estableció el intervalo de tiempo del registro, datos que sumados a los indicados en el párrafo anterior permiten iniciar con el procesamiento de la información.

3.2.4.2 Construcción de acelerogramas

Para cada registro se construyeron tres acelerogramas. El procedimiento fue sencillo y consistió en graficar para cada componente H1, H2 y V la magnitud de fracción de aceleración registrada y procesada en el eje Y y el tiempo en que ocurrió cada registro de fracción de aceleración correspondiente en el Eje X. A continuación, se muestra como ejemplo la Figura 27, en la que se incluyen los tres acelerogramas para cada una de las componentes del registro CIBA1_CO_20100729193445, el cual hace parte de los registros incluidos en la base de datos del MNAS 2020.

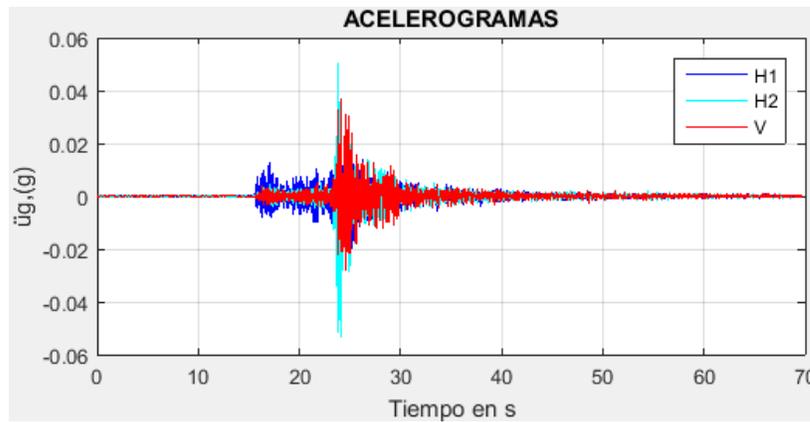


Figura 27 - Acelerogramas para la componente H1 (Azul), H2 (Cian) y V (rojo) del registro CIBA1_CO_20100729193445
Fuente: Autor

3.2.4.3 Espectros de aceleración de las componentes H1, H2 y V

Empleando el método de la aceleración lineal y para un coeficiente de amortiguamiento del 5% del amortiguamiento crítico con el fin de que los resultados fueran comparables con lo definido en NSR-10 numeral A.2.6 (Espectro de diseño) y en otras investigaciones como por ejemplo la de Bozorgnia y Campbell en 2004 y la de Kale y Akkar en 2020, se construyeron los espectros de aceleraciones para cada una de las componentes H1, H2 y V de cada registro. Los espectros obtenidos son como los que se indican en la Figura 28.

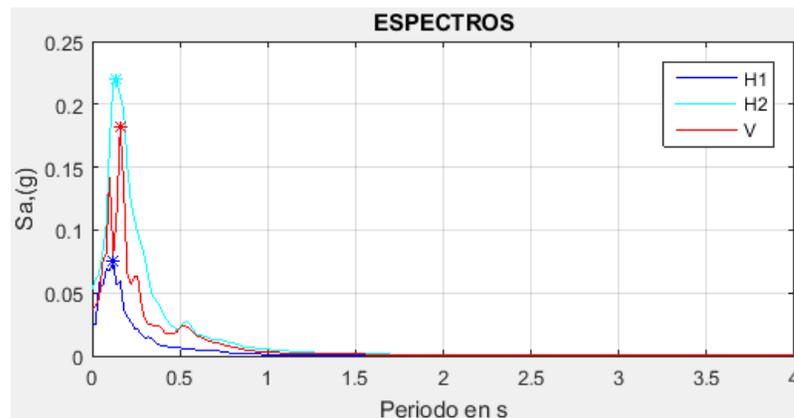


Figura 28 - Espectros para la componente H1 (Azul), H2 (Cian) y V (rojo) del registro CIBA1_CO_20100729193445
Fuente: Autor

Los espectros se construyeron usando un intervalo de periodo de 0.02 s en un rango desde cero hasta un valor máximo de 4 s, límite superior igual al propuesto por Bozorgnia y Campbell en 2004 (Bozorgnia & Campbell, 2004). Se consideró que el intervalo indicado es aceptable para obtener formas espectrales y precisiones razonables, y que además hasta el periodo máximo de 4 s se cubren la mayoría de las edificaciones que se diseñan en Colombia.

3.2.4.4 Datos relevantes de acelerogramas y espectros de aceleración

Procesada la información, el siguiente paso fue obtener por registro de cada ambiente tectónico los datos de mayor interés de los acelerogramas y de los espectros de respuesta de cada una de las componentes H1, H2 y V, estos son:

- a. SaH1T0: Valor absoluto de la máxima aceleración del terreno en (g) para la componente H1 del registro analizado (PGA H1).
- b. SaH2T0: Valor absoluto de la máxima aceleración del terreno en (g) para la componente H2 del registro analizado (PGA H2).
- c. SaVT0: Valor absoluto de la máxima aceleración del terreno en (g) para la componente V del registro analizado (PGA Vertical).
- d. MGPGAH: Media geométrica entre los valores SaH1T0 y SaH2T0 (PGA Horizontal).
- e. SaH1Ti: Máxima aceleración espectral en (g) para la componente H1 del registro analizado que se presenta en un periodo T_i .
- f. SaH2Ti: Máxima aceleración espectral en (g) para la componente H2 del registro analizado que se presenta en un periodo T_i .
- g. SaVTi: Máxima aceleración espectral en (g) para la componente V del registro analizado que se presenta en un periodo T_i (SaVMax).
- h. MGSaH: Media geométrica entre los valores SaH1Ti y SaH2Ti (SaHMax) para cada valor de periodo T_i .
- i. SaVMax/SaHMax: Relación entre SaVTi y MGSaH para obtener un valor de la relación entre aceleraciones espectrales máximas de la componente

vertical con respecto a la media geométrica de las componentes horizontales.

- j. Espectros de aceleración: Para cada componente de cada registro se obtuvieron las parejas de datos de S_a , T con el fin de construir los espectros de aceleración horizontales y verticales de cada una de ellas.

Es importante aclarar que en este trabajo se definió la componente horizontal a nivel de aceleraciones del terreno (PGA Horizontal) y a nivel de aceleraciones espectrales horizontales (S_{ah}) como la media geométrica correspondiente de las dos componentes horizontales H1 y H2, lo anterior basados en los buenos resultados obtenidos por Bozorgnia y Campbell en su investigación del año 2004.

3.2.4.5 Organización de resultados y elaboración de gráficos generales

El último paso antes de seguir con el post procesamiento de datos fue organizar los resultados obtenidos en archivos de Excel para cada ambiente tectónico, esto facilitó su entendimiento y manipulación en función de cualquiera de las variables seleccionadas (M_w , DistEpi, Vs30, etc.) y ordenar de mayor a menor los resultados en función de las aceleraciones espectrales o de la relación de estas.

3.2.5 Post procesamiento de datos y gráficos de resultados.

Por último, en cuanto a la metodología de esta primera parte de la tesis que corresponde al estudio de la relación entre la componente V y H de eventos sísmicos en el territorio colombiano, se realizó un procesamiento adicional de datos para poner en tres tipos de gráficos los resultados importantes para su posterior análisis.

3.2.5.1 Comparaciones de PGA

En esta etapa a través de un gráfico como el que se muestra en la de la Figura 29 (gráfico tipo 1), se realizó la comparación de las máximas aceleraciones del terreno

para las componentes H y V. En el eje horizontal se localizaron los valores de PGA Horizontal (MGPGAH) y en el eje vertical el valor correspondiente a PGA Vertical (SaVT0) para cada registro; la intercepción de estos dos valores a través de líneas perpendiculares entre sí y paralelas al eje opuesto obedecen a puntos de color cian que representan parejas de datos en el gráfico (PGA Horizontal, PGA Vertical).

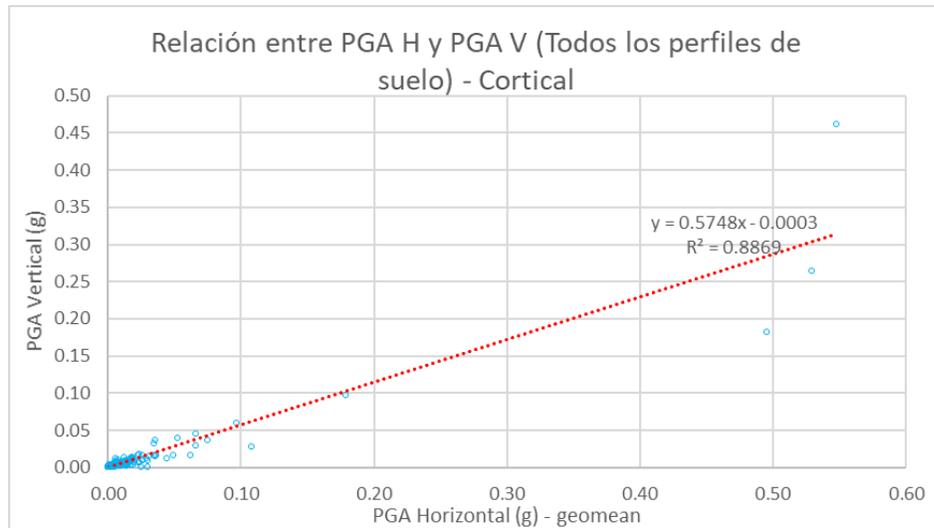


Figura 29 - Relación entre PGA H y PGA V para todos los perfiles de suelo del ambiente Cortical, punto de vista a
Fuente: Autor

La intención de este gráfico fue obtener una línea de tendencia en función de la dispersión de los puntos indicados (línea color rojo), para que a través de la pendiente de esta se mostrara un valor aproximado de la relación entre las aceleraciones máximas del terreno para la componente V con respecto a la media geométrica de las horizontales (véase la Figura 29). Este gráfico fue elaborado desde distintos puntos de vista o condiciones así:

- a. En el primer caso predomina el ambiente tectónico y se incluyen para cada ambiente todos los perfiles de suelo del A al F; por ejemplo, se seleccionan todos los registros del ambiente tectónico Cortical y con los resultados de PGA Horizontal y PGA Vertical para todos los perfiles de suelo se construye el gráfico y se obtiene la correspondiente línea de tendencia. Este mismo

ejercicio se realizó para el ambiente de Subducción, Nido sísmico de Bucaramanga y para la zona de Benioff.

- b. En el segundo caso predominan los tipos de perfil de suelo agrupados entre algunos de ellos, se incluyeron aquí los resultados de los registros de todos los ambientes tectónicos; los perfiles de suelos se clasificaron en tres grupos así: Perfiles de suelos A y B, perfil de suelo C y perfiles de suelo D, E y F, esta clasificación es afín con la adoptada por el ASCE 7-16 y por NSR-10, lo que posteriormente permitirá comparar los resultados obtenidos; adicionalmente, el parámetro V_{s30} generalmente es usado en este tipo de investigaciones para la clasificación de los resultados obtenidos.

Según lo sugerido por el reglamento NSR-10 y por el ASCE 7-16, predomina la tendencia de analizar la relación V/H teniendo en cuenta el punto de vista b, sin embargo ambos resultados se consideran importantes.

Para terminar es importante anotar que aunque para magnitudes superiores a 0.10 g de PGA Horizontal existen pocos valores de referencia, se consideró relevante realizar las comparaciones incluyéndolos y excluyéndolos para evidenciar la influencia de los eventos de mayores magnitudes de aceleraciones a nivel del terreno. El análisis de los resultados obtenidos se realizará en el siguiente capítulo.

Es pertinente explicar por qué se adoptó el valor de PGA de 0.10 g como el límite a nivel de aceleraciones horizontales del terreno para establecer los eventos relevantes. En NSR-10 se define la amenaza sísmica intermedia como aquella en la cual los valores de A_a y A_v son mayores a 0.10; sin embargo, este parámetro que en el primer caso representa la aceleración pico efectiva para diseño es definido a nivel de la roca, por lo que debe multiplicarse por un coeficiente de amplificación para periodos cortos F_a que depende de las condiciones de sitio para obtener la aceleración a nivel del terreno (PGA Horizontal). Considerando entonces un ejemplo de un perfil de suelo lo tipo B con coeficientes de amplificación de F_a igual a 1.0, el valor de PGA Horizontal sería igual al de A_a , de tal forma que en este caso para $PGA > 0.10g$ se estaría en el rango de una amenaza sísmica intermedia, que es la amenaza a partir de la cual se considera que existen eventos sísmicos que pueden

generar daño sobre las estructuras. Se aclara que solo para perfiles de suelo tipo A y para algunas magnitudes de A_a en perfiles de suelo tipo E se obtienen valores menores a 1.0, pero en la mayoría de los casos estos coeficientes son mayores a la unidad.

3.2.5.2 Relación aceleraciones espectrales S_{aVMax}/S_{aHMax} y S_{aHMax}

Se continuó desarrollando un recurso que permitiera analizar la analogía entre la relación de las máximas aceleraciones espectrales verticales y la media geométrica de las máximas aceleraciones espectrales de las componentes horizontales y la componente espectral horizontal. Se propuso un gráfico como el de la Figura 30 (gráfico tipo 2), en el que el eje Y representa la relación entre la máxima aceleración espectral de la componente vertical y las máximas magnitudes de aceleración espectral horizontal expresada como (S_{aVMax}/S_{aHMax}) , y en el eje X las máximas relaciones espectrales horizontales (S_{aHMax}); la intención fue conocer como varía la relación S_{aV}/S_{aH} en función de las magnitudes de las aceleraciones S_{aH} .

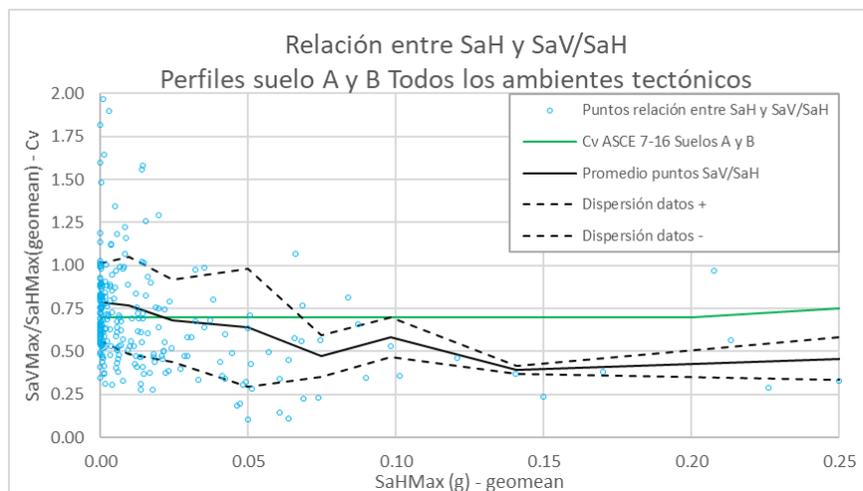


Figura 30 - Relación entre S_{aH} y S_{aV}/S_{aH} para perfiles de suelo A y B incluyendo todos los ambientes tectónicos
Fuente: Autor

Esta forma de ver los resultados fue tomada de uno de los aspectos propuestos por (Kale & Akkar, 2020) en su investigación sobre el efecto de la componente vertical

en la formulación de los nuevos códigos de diseño. Así mismo, es similar y comparable con la forma introducida en el estándar ASCE 7-16, en la cual el coeficiente vertical C_v depende de la magnitud del parámetro de aceleración de la respuesta espectral para periodo corto S_s .

Adicionalmente, se incluyen en este gráfico una línea continua de color negro que representa un promedio aritmético de los puntos (S_{aV}/S_{aH}) ubicados en ciertos rangos de valores de aceleración espectral horizontal (S_{aH}), los rangos son: 0 a 0.001, 0.001 a 0.01, 0.01 a 0.025, 0.025 a 0.05, 0.05 a 0.075, 0.075 a 0.10, 0.10 a 0.15, 0.15 a 0.25, 0.25 a 0.35 y 0.35 a 0.40, como complemento acompañan a esta línea negra continua dos líneas negras punteadas que representan la desviación estándar de estos puntos por encima y por debajo del promedio de datos. A través de esta línea continua de color negro se busca conocer lo indicado en el párrafo anterior en cuanto a encontrar un patrón de comportamiento de la relación S_{aV}/S_{aH} en función de las magnitudes de S_{aH} . Por último, se indican los valores del coeficiente vertical C_v de la norma estándar ASCE 7-16 para distintos tipos de suelo con la intención de ir construyendo herramientas para dar cumplimiento al segundo objetivo del presente trabajo de grado.

Como en la condición de análisis de PGA se analizarán dos condiciones, la primera de ellas consiste en construir este gráfico dando prioridad al ambiente tectónico incluyendo entonces para cada caso los resultados de todos los perfiles de suelo (del A al F); la segunda se desarrollará teniendo en cuenta el criterio de clasificación por grupos de perfil de suelo incluyendo para ellos los resultados de todos los ambientes tectónicos, un ejemplo de este caso es lo mostrado en la figura anterior.

Los resultados que se obtengan hasta aquí nos permitirán conocer cuál de los ambientes tectónicos y cuál de los grupos de perfiles de suelos definidos presentan mayores magnitudes de las relaciones V/H para aceleraciones a nivel del terreno y a nivel de aceleraciones espectrales, lo que nos indicará cuales son probablemente las condiciones más desfavorables para la consideración de la componente V de los eventos sísmicos en el territorio colombiano.

3.2.5.3 *Relaciones espectrales entre la componente vertical y la horizontal*

Las relaciones entre componentes V/H son importantes en función de su magnitud, sin embargo, tener un valor máximo sin conocer en qué periodo se presenta puede restar relevancia a los resultados obtenidos para propósitos prácticos de ingeniería. En varios estudios se ha establecido que la relación V/H es fuerte en periodos cortos, en los cuales se exhiben mayores relaciones V/H que en periodos largos, además que V/H tiene un máximo en periodos comprendidos entre 0.05 y 0.10 s y un mínimo entre 0.4 y 0.8 s, por otra parte, en periodos largos la relación V/H aumenta lentamente con el periodo (Bozorgnia & Campbell, 2004).

Es importante saber en qué periodos ocurren los máximos V/H para el ambiente tectónico y grupo de perfiles de suelo en que se presentan los escenarios más críticos. Para satisfacer este requisito se adoptará parcialmente la metodología propuesta por Bozorgnia y Campbell en 2004, la cual consiste en clasificar los registros en función de grupos de perfiles de suelo y una vez clasificados calcular los espectros verticales y horizontales para por último definir un espectro V/H que es el resultado del cociente entre ellos (gráfico tipo 3).

Como se verá más adelante, el escenario más crítico de relaciones V/H se obtiene para este estudio en el ambiente tectónico Cortical, lo que coincide con el ambiente tectónico seleccionado por los autores antes indicados en su investigación. Lo dicho nos lleva a concentrarnos en los registros del ambiente Cortical exclusivamente para revisar la incidencia del periodo. Aclarado esto, las relaciones entre espectros V/H se calcularán para tres escenarios así:

Escenario 1: Incluye los registros con distancia epicentral menores e iguales a 60 km que es un parámetro similar al seleccionado por Bozorgnia y Campbell en 2004 quienes definieron emplear registros con r_{seis} menores a 60 km. Seleccionados estos registros se subdividirán en 3 subgrupos, el primero para los perfiles de suelo A y B, el segundo para el perfil de suelo C y el tercero para los perfiles de suelo D, E y F.

Escenario 2: Incluye los registros con distancia epicentral menores e iguales a 100 km, esta condición se establece con el fin de aumentar el número de registros que puedan incluirse en la relación V/H, lo que es relevante considerando que la base de datos de movimiento fuerte del SGC es joven y tiene pocos registros de fuente cercana. Obtenidos todos los registros que cumplan este criterio se subdividirán en los subgrupos indicados en el primer escenario.

Escenario 3: se incluyen todos los registros del ambiente Cortical sin considerar el criterio de la distancia epicentral conservando las subdivisiones y subgrupos anteriormente indicados.

Esta metodología más allá de mostrar la relación V/H en un rango de periodos comprendidos entre 0 y 4 s, permitirá obtener una tendencia de esta relación a medida que se van incorporando resultados de registros con mayores distancias epicentrales, lo que supone una disminución en las aceleraciones espectrales. Un ejemplo de los resultados obtenidos a nivel de gráficos se indica en la Figura 31, en el que se observa el espectro V/H del primer escenario para el subgrupo de perfiles de suelo A y B, en este primer caso se registró el mayor pico de relación V/H en un periodo de 0.10 s con una magnitud V/H de 0.80.



Figura 31 - Comparaciones espectrales V/H registros del ambiente Cortical con Dist Epi < 60 km perfiles de suelo A y B
Fuente: Autor

En estos gráficos se incorporan unas líneas de referencia de relaciones V/H en color rojo para un valor de 1/2 y color naranja para 2/3, igualmente una línea punteada vertical color negro para indicar la referencia del periodo igual a 0.10 s. Esto le facilitará al lector la comparación de los resultados con los obtenidos en investigaciones similares.

3.2.6 Comparación de resultados con lo establecido en la normatividad vigente

Se revisaron los requisitos exigidos en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 y en el documento estándar Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures ASCE 7-16 en cuanto a la componente sísmica vertical, cuál es la relación entre esta y la componente horizontal y cuáles son las recomendaciones para tener en cuenta en el diseño. Los análisis correspondientes y conclusiones serán indicados en los capítulos siguientes cuando además de lo obtenido hasta aquí se complemente con el impacto que esto tiene en el diseño de las estructuras propuestas.

Como una herramienta adicional para analizar los resultados, se construyeron gráficos en los cuales es posible comparar las formas espectrales por cada grupo de perfil de suelo para ciertos rangos de valores de PGA Horizontal, con los espectros de diseño sugeridos por las normas, principalmente los de la componente vertical; esto nos permitió conocer con base en los resultados disponibles si lo propuesto por los reglamentos de referencia (NSR-10 y ASCE 7-16) cubre o no las amenazas hasta la fecha registradas y consideradas importantes en Colombia.

3.3 Efecto de la componente sísmica vertical en pórticos y sistemas combinados

La metodología descrita a continuación fue la empleada para desarrollar el tercer y cuarto objetivo, los cuales hacen énfasis en los efectos de la componente V sobre pórticos y sistemas combinados de concreto reforzado. Para ello, se plantearon dos

tipos de análisis, el primero un Análisis Dinámico Espectral (ADE), y el segundo un Análisis Dinámico Lineal (ADL); en ambos casos excluyendo e incluyendo la componente sísmica V. Estos análisis se realizaron sobre dos arquetipos estructurales de 5 y 15 pisos de altura respectivamente. La edificación de 5 pisos es un pórtico y la de 15 un sistema combinado, ambos en concreto reforzado. En planta ambos arquetipos tienen un área aproximada de 338.5 m² medidos entre bordes de placa estructural. La altura de las edificaciones, el sistema estructural y el material se escogieron teniendo en cuenta su empleo frecuente en nuestro país.

Los dos tipos de análisis se seleccionaron considerando lo siguiente: El ADE es el método usado con mayor frecuencia para el diseño de edificaciones en nuestro país, lo que familiarizará al lector con la metodología empleada y con los resultados obtenidos. Por otra parte, el ADL vincula la respuesta de la estructura con la variación propia de los movimientos sísmicos del terreno, incorporando en los resultados aspectos como la historia del movimiento, el contenido frecuencial de cada una de las señales, entre otros parámetros que se esbozaron con anterioridad en el marco teórico y en el estado del arte.

3.4 Evaluación a través de Análisis Dinámico Espectral (ADE)

El procedimiento de análisis empleado se adaptó a la metodología establecida en NSR-10 (a excepción de la definición de la amenaza sísmica), en líneas generales se describe a continuación:

- a. Localización de las estructuras.
- b. Definición del espectro de diseño horizontal y vertical.
- c. Tipología de los arquetipos estructurales.
- d. Análisis de cargas gravitacionales.
- e. Reglas de combinación.
- f. Respuesta e indicadores por considerar.
- g. Elementos por analizar.
- h. Discretización de los elementos tipo viga.

- i. Participación modal.
- j. Consideración de la componente vertical.
- k. Solicitaciones relevantes.
- l. Consideraciones especiales del modelo matemático.

3.4.1 Datos generales de la localización de las estructuras

Las estructuras se ubicaron en una zona de amenaza sísmica alta, particularmente para este caso de estudio en la ciudad de Cali - Colombia. En este sentido, para obtener la amenaza sísmica a nivel de espectros, se tomó como base el Decreto 411.0.20.0158 (Alcaldía Santiago de Cali, 2014), documento en el cual se define la metodología para determinar el espectro de diseño para sitios específicos de la ciudad. Se determinó además que las edificaciones estarían sobre un suelo tipo D para simular una condición de suelo con parámetros moderadamente desfavorables, lo que además es consecuente con el hecho de que para este tipo de perfil de suelo se presentan valores de relaciones V/H superiores a la unidad como se evidenciará en los resultados obtenidos más adelante para los objetivos 1 y 2. En cuanto a las microzonas de respuesta sísmica de la ciudad de Cali, se eligió la microzona 3 – Piedemonte, en la cual predominan abanicos aluviales con espesor promedio de 300 m y periodos fundamentales de vibración del suelo comprendidos entre 0.6 y 1.2 s.

3.4.2 Espectro elástico de diseño

El segundo paso fue con base en el Decreto 411.0.20.0158 establecer el espectro elástico de diseño o curva de diseño para el ADE en lo que corresponde a la componente horizontal. Adicionalmente y siguiendo los criterios establecidos en el Reglamento NSR-10 (A.2.8.1), se construyó el espectro para la componente V como las dos terceras partes de la componente horizontal (Espectro V = 2/3 Espectro H) (véase la Figura 32).

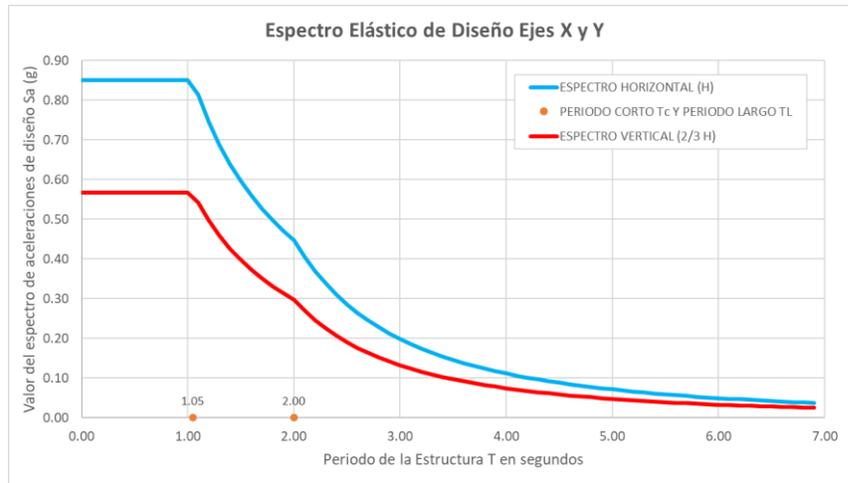


Figura 32 - Espectro de diseño horizontal (color azul) y vertical (color rojo)
Fuente: Autor

Los parámetros empleados en la construcción del espectro se indican a continuación:

Aceleración horizontal pico efectiva de diseño	Aa: 0,25.
Velocidad horizontal pico efectiva de diseño	Av: 0,25.
Aceleración horizontal pico efectiva del terreno en superficie	Ao: 0,35.
Coefficiente de amplificación de aceleración periodos cortos	Fa: 1,36.
Coefficiente de amplificación de aceleración periodos intermedios	Fv: 2,98.
Periodo corto	Tc: 1.05 s
Periodo largo	T _L : 2.00 s
Coefficiente de amortiguamiento	ξ: 5 %.

Para el ADL se empleará el espectro H para escalar las señales seleccionadas; el número de las señales será de siete de acuerdo con lo recomendado en el documento NSR-10 A.2.7.

3.4.3 Arquetipos estructurales

El tercer paso consistió en dimensionar ambas estructuras para satisfacer los requisitos de rigidez y resistencia. En cuanto a la rigidez, la deriva no debía exceder

en ningún piso el 1% (A.6.4.1 NSR-10). Por su parte, el tamaño de sus elementos y las propiedades de los materiales debían satisfacer los requisitos de diseño del reglamento NSR-10, en especial los del título C capítulo C.21 para sistemas con capacidad especial de disipación de energía (DES) diseñados en concreto reforzado. Este dimensionamiento se realizó a través de un ADE considerando solamente la componente horizontal como usualmente se realiza en las empresas de diseño estructural.

De lo anterior se deduce que la definición de los arquetipos estructurales incluyó posteriormente la etapa de verificación del diseño de los elementos para las solicitaciones sísmicas convencionales (componente horizontal), las comprobaciones de diseño se realizaron a través de hojas de cálculo para el diseño de corte y flexión para vigas y de corte e interacción de flexión y carga axial para columnas, adicionalmente se chequeó el diseño de los elementos a través del programa ETABS (CSI Computers & Structures Inc., 2018) para el nivel de desempeño sísmico correspondiente. Las tipologías generales de las estructuras que cumplieron los requisitos de rigidez y resistencia se indican a continuación:

3.4.3.1 Pórtico

En el eje global X se definieron cuatro ejes del A hasta el eje D, la luz entre ejes A-B y C-D es de 5.50 m y entre ejes B-C de 7.00 m; el eje global Y tiene igualmente cuatro ejes desde el eje 1 hasta el 4, la luz entre ejes 1-2 y 3-4 es de 5.50 m y entre ejes 2-3 de 7.00 m. El pórtico es de 5 pisos con altura de entrepiso de 3.00 m para una altura total de 15 m (véase la Figura 33); algunas características tipológicas de este sistema se indican en la Tabla 9.

Tabla 9 - Características relevantes sistema pórtico

Descripción del elemento	Dimensiones y resistencia del material
Columnas	0.80 m x 0.50 m – f_c 28 MPa
Vigas	0.45 m x 0.50 m – f_c 28 MPa
Viguetas	0.10 m x 0.50 m – f_c 28 MPa
Otros datos de interés	Magnitud

Periodo horizontal	0.55 s
Periodo vertical	0.088 s
Peso / m ²	1.02 t/m ²
Deriva máxima	0.75 %
Relación alto/ancho	0.81
Irregularidades	No

Fuente: Autor

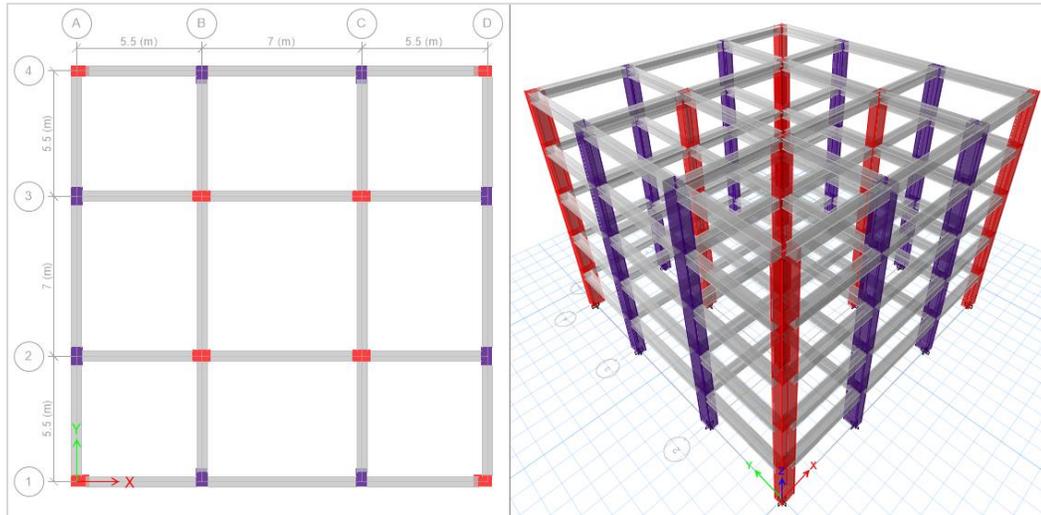


Figura 33 - Planta y vista en 3d estructura tipo pórtico de 5 pisos
Fuente: Autor

3.4.3.2 Sistema combinado

El sistema combinado tiene 15 pisos con altura de entrepiso de 3 m para una altura total de 45 m medidos desde la base. En los ejes globales X y Y se definieron los mismos ejes del sistema pórtico con iguales luces entre ellos; entre ejes A-B y C-D una luz de 5.50 m y entre ejes B-C de 7.00 m; por su parte en el eje global Y entre ejes 1-2 y 3-4 una luz de 5.50 m y entre ejes 2-3 de 7.00 m (véase la Figura 34). Se aclara que se incluyeron ejes adicionales distinguidos con uno o dos apóstrofes antecidos de la letra del eje principal, esto con el fin de facilitar la incorporación de los elementos tipo Wall para la representación de los muros. Las características tipológicas relevantes de este sistema se indican en la Tabla 10.

Tabla 10 - Características relevantes sistema combinado

Descripción del elemento	Dimensiones y resistencia del material
Columnas piso 1 a 5	0.80 m x 0.50 m – f'c 49 MPa
Columnas piso 6 a 10	0.75 m x 0.45 m – f'c 42 MPa
Columnas piso 11 a 15	0.70 m x 0.40 m – f'c 28 MPa
Vigas piso 1 a 5	0.40 m x 0.55 m – f'c 49 MPa
Vigas piso 6 a 10	0.40 m x 0.55 m – f'c 42 MPa
Vigas piso 11 a 15	0.35 m x 0.50 m – f'c 28 MPa
Muros piso 1 a 5	Espesor 0.40 m – f'c 49 MPa
Muros piso 6 a 10	Espesor 0.40 m – f'c 42 MPa
Muros piso 11 a 15	Espesor 0.35 m – f'c 28 MPa
Otros datos de interés	Magnitud
Periodo horizontal	1.00 s
Periodo vertical	0.11 s
Peso / m ²	1.23 t/m ²
Deriva máxima	0.93 %
Relación alto/ancho	2.44
Irregularidades	No

Fuente: Autor

Para este modelo los elementos fueron ajustados con respecto a su eje longitudinal para que en todas las losas de entre piso la medida de borde a borde de placa fuera de 18.4 m al igual que en el sistema pórtico.

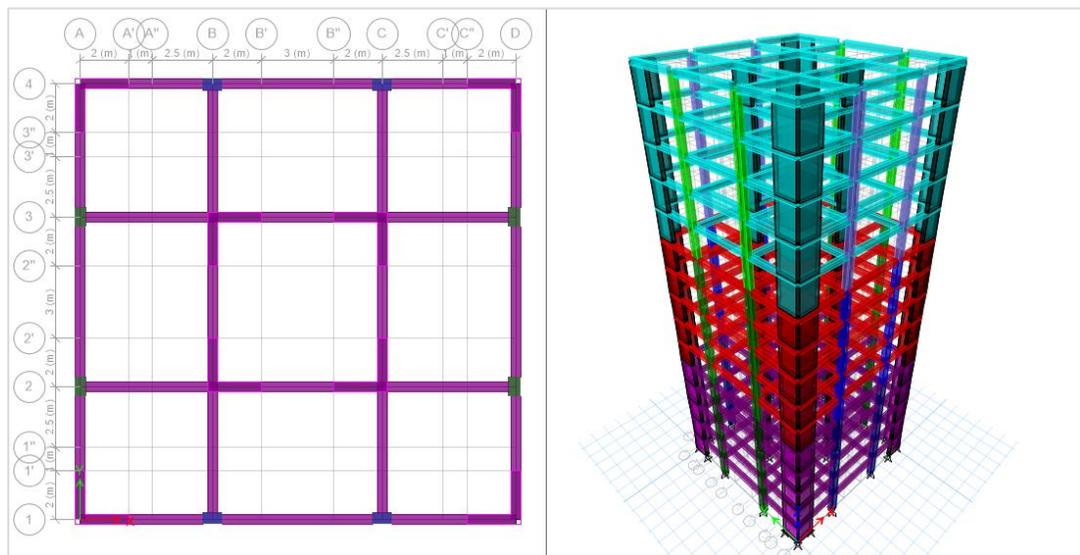


Figura 34 - Planta y vista en 3d estructura sistema combinado de 15 pisos

Fuente: Autor

Ambos sistemas estructurales se clasificaron en el Grupo de Uso uno (I) de acuerdo con lo establecido en el Título A de NSR-10, correspondiéndoles un factor de importancia igual a la unidad ($I=1.0$). Una premisa para el análisis fue considerar las columnas empotradas en la base y los muros sobre apoyos de segundo género.

3.4.4 Cargas

En el cuarto paso se definieron los análisis de carga para los arquetipos, los cuales se podrán revisar en los anexos del presente documento. La estimación de las cargas se llevó a cabo en concordancia con las prescripciones del título B del reglamento NSR-10.

3.4.5 Combinaciones de carga y regla de combinación

Para estudiar el efecto de la componente vertical en los dos arquetipos propuestos, fue necesario estudiar el efecto inicialmente de las componentes sísmicas horizontales y posteriormente incluir el efecto de la componente vertical. Para satisfacer este requerimiento, era requisito establecer las combinaciones de carga que incluyan los efectos sísmicos y la regla de combinación para considerar la componente vertical.

En cuanto a las combinaciones de carga básicas empleadas para considerar la componente horizontal, se tomaron las prescritas en el Título B del reglamento NSR-10 cuando se emplea el método de la resistencia última, las cuales son en esencia iguales a las establecidas en el estándar ASCE 7-16 para la misma filosofía de diseño así:

1.4 D	Ecuación (B.2.4-1) NSR-10, Ecuación 1 – 2.3.1 ASCE-7-16
1.2 D + 1.6 L	Ecuación (B.2.4-2) NSR-10, Ecuación 2 – 2.3.1 ASCE-7-16
1.2 D + 1.0E + 1.0L	Ecuación (B.2.4-5) NSR-10, Ecuación 6 – 2.3.6 ASCE-7-16
0.9 D + 1.0E	Ecuación (B.2.4-7) NSR-10, Ecuación 7 – 2.3.6 ASCE-7-16

Es importante aclarar que en el alcance del presente trabajo no se tienen en cuenta los efectos de las cargas de viento y granizo.

Definidas las combinaciones de carga, se estableció la regla de combinación a través de la cual se obtendrá el efecto de las tres componentes sísmicas sobre la estructura, las cuales se representaron en las ecuaciones anteriores a través de la letra E. Con base en lo definido en los reglamentos indicados y en la literatura revisada, para el presente trabajo se empleó la regla del porcentaje, mejor conocida como la regla del 30% incluyendo la componente vertical; para tal efecto, la componente sísmica E será considerada en los modelos que incluyen el efecto de las componentes horizontales a través de las reglas de combinación 1 y 2, y cuando se incluya la componente vertical se tendrán en cuenta las reglas de combinación 3, 4 y 5 como se indica a continuación:

Regla de combinación 1: $1.0 EX + 0.3 EY$

Regla de combinación 2: $0.3 EX + 1.0 EY$

Regla de combinación 3: $1.0 EX + 0.3 EY + 0.3 SV$

Regla de combinación 4: $0.3 EX + 1.0 EY + 0.3 SV$

Regla de combinación 5: $0.3 EX + 0.3 EY + 1.0 SV$

En el caso de las combinaciones que incluyan la componente vertical, el efecto sísmico no se dividirá por el coeficiente de capacidad de disipación de energía proporcionado a la estructura R en función de su capacidad de disipación de energía, lo anterior teniendo en cuenta la baja capacidad de disipación de energía proporcionada por los elementos tipo columna, elementos de interés para este trabajo de investigación. Esta suposición es consecuente con los análisis estáticos no lineales realizados para definir los coeficientes de capacidad de disipación de energía, en los cuales generalmente se detiene el análisis cuando se genera un mecanismo de colapso a través de cualquiera de las columnas de la estructura. El efecto de la carga sísmica vertical se revisó de acuerdo con lo definido en el numeral 12.4.2 de ASCE 7-16, en donde se indica el sentido en el que debe ser estudiado el efecto de la carga para cada una de las combinaciones.

3.4.6 Respuesta e indicadores por considerar

Para dar alcance a la presente investigación, es necesario definir específicamente en que elementos de la estructura se realizaría el estudio del efecto de la componente sísmica vertical. Se estableció que el análisis se concentraría en las columnas, muros y vigas de acuerdo con lo que aplique en cada caso. Este efecto se analizará a través de respuestas e indicadores específicos así:

3.4.6.1 Respuesta:

- a. Momentos de flexión M .
- b. Cortantes V . (Se identifica esta V en cursiva para el corte, diferente a la letra V sin cursiva usada para referirnos a la componente sísmica vertical).
- c. Cargas axiales en elementos verticales P .

3.4.6.2 Indicadores:

- a. Relación entre momentos de flexión M (incluyendo V /sin incluir V) para todos los análisis.
- b. Relación entre cortantes V (incluyendo V /sin incluir V) para todos los análisis.
- c. Relación entre cargas axiales P en columnas (incluyendo V /sin incluir V) para todos los análisis.

3.4.7 Elementos para analizar

En estructuras con alta simetría como las que nos ocupan es innecesario estudiar todas las columnas, muros y vigas para revisar el efecto de la componente vertical. Por ello, un paso importante fue seleccionar elementos que por su ubicación y características en la estructura fueran relevantes para el análisis de las respuestas e indicadores, estos son:

3.4.7.1 Elementos por analizar en el sistema pórtico

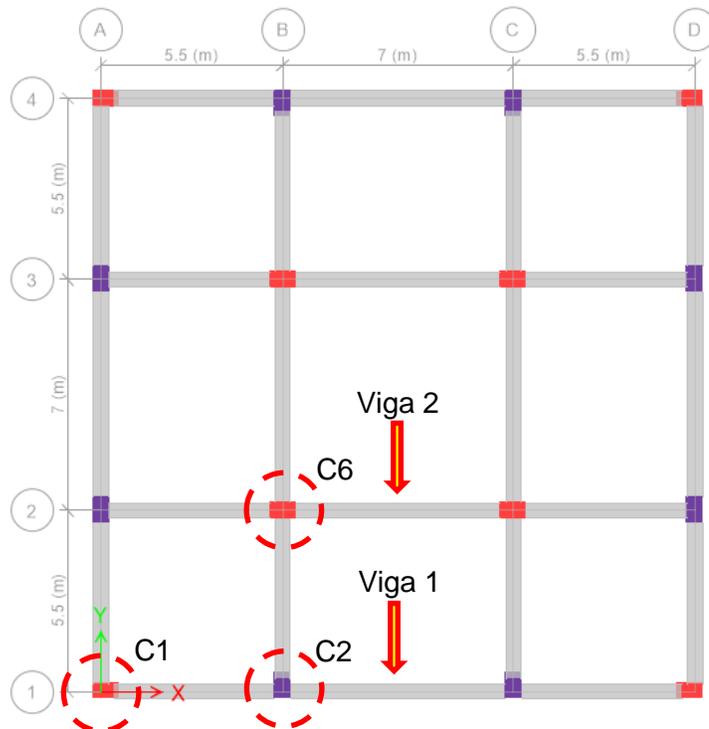


Figura 35 - Elementos para analizar en el sistema pórtico
Fuente: Autor

Columna de esquina : Columna C1, intersección Eje A y Eje 1.

Columna exterior : Columna C2, intersección Eje B y Eje 1.

Columna interior : Columna C6, intersección Eje B y Eje 2.

Viga exterior : Viga 1 entre ejes B y C.

Viga interior : Viga 2 entre ejes B y C.

La simetría con respecto a los ejes X y Y facilitó el análisis y evitó aspectos como irregularidades que pudieran inducir mayores variables en los resultados a estudiar. En futuros trabajos relacionados con el tema, se recomienda incorporar otras variables para el estudio del efecto de la componente vertical. Los elementos para estudiar en el sistema combinado son:

3.4.7.2 Elementos por analizar en el sistema combinado.

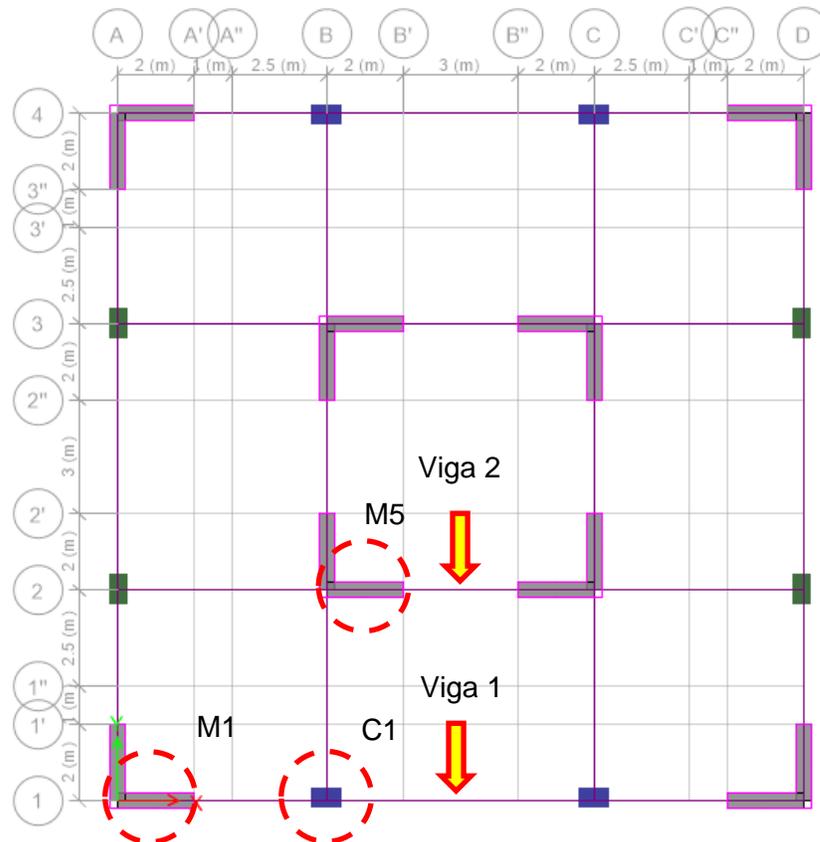


Figura 36 - Elementos para analizar en el sistema combinado
Fuente: Autor

- Muro de esquina : Muro M1, Eje 1 entre Ejes A y A'.
- Columna exterior : Columna C1, intersección Eje B y Eje 1.
- Muro interior : Muro M5, Eje 2 entre Ejes B y B'.
- Viga exterior : Viga 1 entre ejes B y C.
- Viga interior : Viga 2 entre ejes B y C.

3.4.8 Discretización.

En este tipo de análisis que incluyen la componente sísmica vertical es necesario garantizar una adecuada distribución de la masa en ese sentido (Eje Z en los modelos de análisis), además de definir grados mínimos de libertad que permitan

evaluar su comportamiento ante una excitación producto de la componente sísmica vertical. Esto garantiza un comportamiento estructural mejor idealizado, lo que redundará en una respuesta adecuada en términos del análisis.

Para lograr este propósito, es necesario discretizar las vigas en un número mínimo de elementos que garantizaran una precisión aceptable sin que resultaran modelos excesivamente pesados para efectos computacionales. Para establecer el número mínimo en el que se dividirán los elementos tipo viga se tomaron como referencia dos criterios. El primero enfocado en las experiencias de otros investigadores, aquí se tomaron como antecedentes los resultados obtenidos por Ju, quien para edificios de 5 pisos encontró que discretizando las vigas en 3 partes se obtenía un porcentaje de error promedio del 1.53% para modelos de masa concentrada, mientras que para edificios de 15 pisos era suficiente dividir las vigas en 2 partes para obtener un error del 0.67% (Ju et al., 2000).

El segundo criterio consistió en construir modelos simplificados para estudiarlos y compararlos entre sí con el fin de establecer las diferencias porcentuales entre los resultados obtenidos para momento y corte principalmente en columnas y vigas. Se modeló un pórtico de una luz en las direcciones X y Y con dos pisos de altura en el programa ETABS, las vigas se discretizaron en 2, 4 y 7 partes. Como era de esperarse las mayores solicitaciones se encontraron en el modelo cuyas vigas se discretizaron en 2 partes (3 puntos) con valores máximos de incrementos del 10% para solicitaciones de vigas con respecto al modelo que se discretizó en 7 partes (8 puntos); por otro lado, el modelo en el que se discretizaron las vigas en 4 partes no presentó diferencias con respecto al de 7 en más de un 3% en vigas. En cuanto a las diferencias en las columnas, las variaciones en cualquier caso no superaron el 2%. Al igual que lo encontrado por Ju, a medida que se aumentaron más pisos era menor la diferencia entre resultados para modelos con vigas discretizadas en 2, 4 o 7 partes.

Con base en lo anterior, se definió un tipo de discretización para ambos arquetipos en los cuales se discretizó la viga en cuatro partes. Para un mayor entendimiento se presenta la Figura 37.

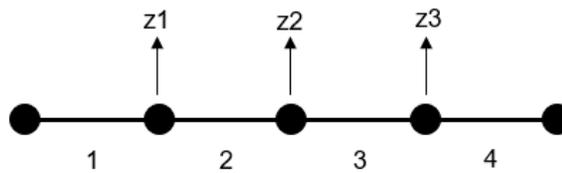


Figura 37 - Discretización empleada en modelos estructurales
Fuente: Autor

3.4.9 Modos de vibración y participación modal

Considerando los criterios establecidos en el reglamento NSR-10 artículo A.5.4.2, es necesario incluir en el análisis dinámico todos los modos de vibración que contribuyan de una manera significativa a la respuesta dinámica de la estructura, requisito que se entiende cumplido cuando se demuestra que con el número de modos empleados se ha incluido en el cálculo de la respuesta en cada una de las direcciones el 90% de la masa participante de la estructura (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2017). El criterio anterior es concordante con lo indicado en el documento estándar ASCE 7-16 artículo 12.9.1 donde se exige que por lo menos participe el 90% de la masa de la estructura en cada dirección. Por último, resultados obtenidos en las investigaciones como la adelantada por Ju en el año 2000, indican que con un 80% de la participación de la masa en la dirección vertical es suficiente para obtener resultados satisfactorios (Ju et al., 2000).

Un paso importante fue definir la participación mínima de la masa en las dos direcciones horizontales X y Y, y en la dirección vertical Z, se estableció que por lo menos debía ser el 90%. Para cumplir este criterio, en el edificio de 5 pisos se requirieron 150 modos de vibración para obtener una participación de la masa en el sentido vertical del 91.55%; mientras que en el edificio de 15 pisos se requirieron 396 modos de vibración para obtener una participación de la masa del 91.56%. En cuanto a la participación de la masa en los sentidos ortogonales horizontales, para el edificio de 5 pisos se superó el 99% mientras que para el de 15 se superó el 97% de la participación de la masa respectivamente. Se evidenció que incluir modos adicionales no contribuyó a una mejor respuesta pero si comprometía un mayor tiempo de análisis computacional.

3.4.10 Componente vertical espectral

Esta componente se incluyó a través de un espectro vertical (ESPECTRO V) que se definió como las dos terceras partes del espectro de la componente horizontal (ESPECTRO). Para tener en cuenta el efecto de esta componente se activaron en el modelo matemático desarrollado en el programa ETABS los grados de libertad verticales a través de la activación de la función “include vertical mass”, la cual le indica al programa que considere grados de libertad en la dirección U3 o Z. Al espectro vertical incorporado se asoció el caso de carga SV para representar la componente vertical, el cual fue incorporado sin afectarlo por R en las combinaciones para columnas y afectándolo por R para las combinaciones de vigas, este último caso dio origen a la combinación de carga SVV.

3.4.11 Criterios para la selección de solicitaciones relevantes y relación V/H

En el ejercicio del diseño de estructuras de concreto reforzado, es usual para elementos tipo viga generar una combinación de carga tipo envolvente, la cual incluye las combinaciones de diseño establecidas en el reglamento NSR-10. De este tipo se elaboraron dos combinaciones, la primera (ENVOLVENTE HORIZONTAL) con la inclusión de la componente horizontal únicamente, y la segunda (ENVOLVENTE VERTICAL) con la componente horizontal y la inclusión de la componente vertical con el efecto vertical a través de la combinación SVV. Para las vigas, las combinaciones que incluyen sismo fueron afectadas por el coeficiente de capacidad de disipación de energía R para el sentido horizontal y vertical, se aclara que para todas las combinaciones se empleó la regla de combinación del 30%.

Elaborado el análisis a través del modelo matemático en el programa ETABS, se revisaron los resultados más críticos de las combinaciones ENVOLVENTE VERTICAL y HORIZONTAL y seguidamente se calculó el cociente entre los resultados de estas para cada elemento en particular, de tal forma que con este resultado se obtuviera la magnitud de la variación de las solicitaciones de momento y corte en cada uno de los elementos como se estableció en los indicadores a

revisar; se evidenció que la combinación de carga que arrojó los resultados más críticos fue la correspondiente a 1.2D+1.0E+1.0L en ambas edificaciones. Los puntos de control para la comparación de los resultados fueron la cara de los elementos y el eje de estos (véase la Figura 38).

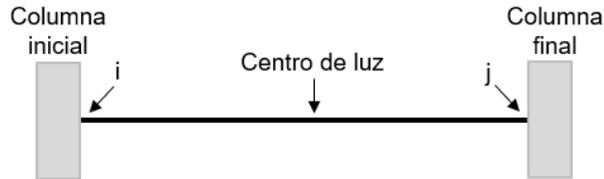


Figura 38 - Puntos para verificación de los indicadores propuestos.
Fuente: Autor

En los puntos indicados se calculó la relación entre las solicitaciones de cortante y momento obtenidas con el efecto de la componente vertical y horizontal y únicamente con el efecto de la componente horizontal. Estos valores permitieron construir curvas para vigas exteriores e interiores en las que se evidencia la magnitud de relaciones por efectos V/H en cada piso de las estructuras. En forma simple la relación para cada indicador se calculó así:

Para esfuerzos cortantes V :

$$\text{Variación solicitación por cortante nudo } i = \frac{V_i \text{ con componente } V \text{ y } H}{V_i \text{ con componente } H}$$

Para esfuerzos por flexión M :

$$\text{Variación solicitación por flexión nudo } i = \frac{M_i \text{ con componente } V \text{ y } H}{M_i \text{ con componente } H}$$

En donde V y M son los esfuerzos cortantes y de flexión para las mismas combinaciones de carga que arrojaron los resultados más críticos cuando se incluye (numerador) y cuando se excluye (denominador) la componente sísmica vertical. Cuando en el documento se habla de excluir la componente sísmica vertical se mantiene el efecto de la componente sísmica horizontal. los resultados para una de las vigas se indican en la Figura 39.

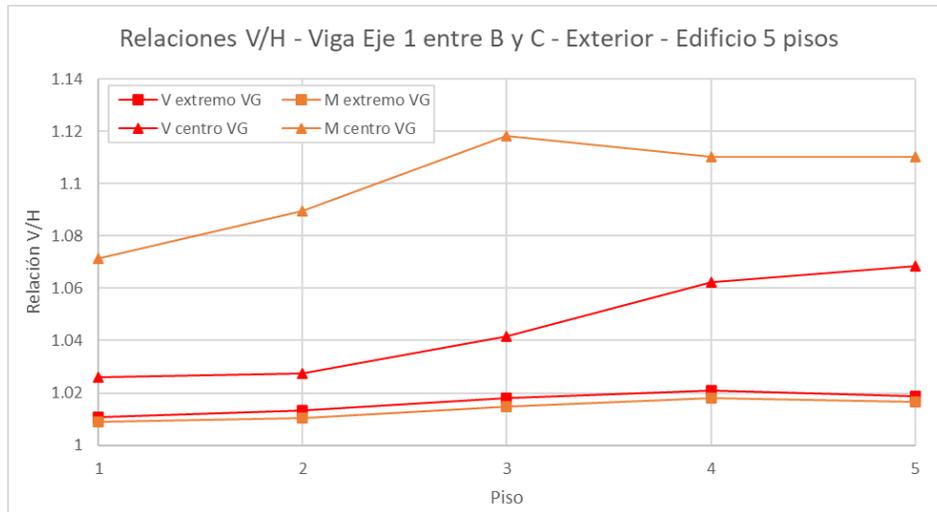


Figura 39 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro viga exterior edificio 5 pisos ADE
Fuente: Autor

Para el caso anterior, se evidencia que en el arquetipo de 5 pisos los mayores efectos se presentan para la flexión de la viga exterior del piso 3 con un incremento máximo del 12% en el centro de la luz (Viga Eje 1 entre Ejes B y C) cuando se incluye el 100% del efecto sísmico en la componente vertical de la combinación 1.2D + 1.0E + 1.0L, mientras que el corte representa un incremento cercano al 7% en el piso 5 para el mismo caso.

En las columnas se siguió un procedimiento similar con la salvedad de que para este tipo de elementos sería un error trabajar con envolventes; en su defecto, se observó cuidadosamente cuales eran las combinaciones que producían el efecto más crítico en cuanto al efecto simultaneo de carga axial P y momento M cuando se incluye y cuando se excluye la componente sísmica vertical; en este caso resultó siendo la más crítica la misma combinación indicada para las vigas 1.2D+1.0E+1.0L.

Aquí es importante anotar que se adicionaron combinaciones de carga para columnas en las cuales la componente sísmica vertical no se afectó por el coeficiente R (combinación SV), toda vez que en estos elementos se espera un comportamiento poco dúctil. Como ejemplo de los resultados obtenidos para las columnas se muestran los de la columna C1 (véase la Figura 40).

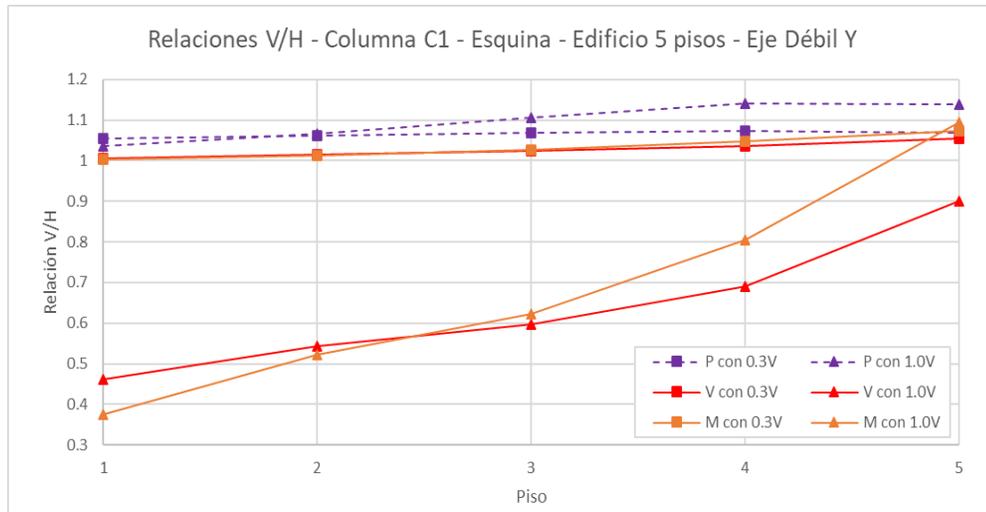


Figura 40 - Efecto componente V para V, M y P columna de esquina edificio 5 pisos ADE
Fuente: Autor

En ambos casos, se tuvo en cuenta la diferencia entre los resultados obtenidos cuando en la componente vertical incluía el 30% o el 100% de esta. A diferencia de las vigas en las que se usó una envolvente; en las gráficas de resultados de las columnas se indicaron claramente los resultados para 0.3V cuando se incluye el 30% de la componente vertical en la combinación y 1.0V cuando equivalía al 100%. Esto permitirá para el análisis de resultados saber en qué condición se presentan los resultados críticos para efectos de diseño y las mayores relaciones V/H.

Debe tenerse en cuenta que solo para propósitos de identificar el eje con mayor y menor inercia, se emplearon los términos fuerte y débil respectivamente. En este sentido, los elementos tipo columna se analizaron en función de cuando el 100% de la componente horizontal afecta sus ejes de mayor o menor inercia, de tal forma que en los resultados se encontraran algunas referencias de solicitaciones para parejas de resultados V2-M3 y V3-M2, lo que guarda relación con que dirección del elemento se está considerando en ese resultado en particular, esto se aclara para no concentrar una mayor atención a este tema al momento de realizar una lectura de los resultados.

A continuación se muestra la Tabla 11, la cual contiene algunos de los resultados obtenidos con el fin de indicar como ejemplo de donde se obtuvieron los valores de las relaciones V/H para los elementos de ambos arquetipos estructurales.

Tabla 11 - Resultados columna de esquina C1 piso 1

COMBINACIÓN DE CARGA	P(kN)	V2(kN)	V3(kN)	M2(kN.m)	M3(kN.m)
DI (1.2D+1.0EX+0.3EY+1.0L)	-1105.23	-137.98	-37.62	-62.16	-354.99
DI (1.2D+0.3EX+1.0EY+1.0L)	-1108.57	-55.64	-85.24	-170.34	-118.81
DIV (1.2D+0.3EX+1.0EY+1.0L+0.3SV)	-1168.09	-56.28	-85.75	-170.82	-119.37
DIV (1.2D+1.0EX+0.3EY+1.0L+0.3SV)	-1164.75	-138.63	-38.13	-62.64	-355.55
DIV (1.2D+0.3EX+0.3EY+1.0L+1.0SV)	-1148.39	-57.79	-39.33	-63.73	-120.67
RELACIÓN V/H	P	V2	V3	M2	M3
Valores máximos con 0.3V Eje V2-M3	1.054	1.005			1.002
Valores máximos con 0.3V Eje V3-M2	1.054		1.006	1.003	
Valores máximos con 1.0V Eje V2-M3	1.039	0.419			0.340
Valores máximos con 1.0V Eje V3-M2	1.036		0.461	0.374	

Fuente: Autor

Con la tabla anterior se puede explicar cómo se calcularon las relaciones V/H para las solicitaciones de la columna de esquina C1 para el edificio de 5 pisos. Para el caso de la figura anterior se están mostrando los resultados del eje de menor inercia de la columna, el cual coincide con los resultados de las solicitaciones V3 y M2 de la tabla anterior. Para el piso 1 con el 100% de la componente vertical (1.0V) el corte tiene una relación V/H de 0.461, magnitud que resulta de dividir $-39.33\text{kN} / -85.24\text{kN}$, para el cortante se compara el mayor valor obtenido para la componente vertical con respecto al mayor valor obtenido cuando se incluye la componente horizontal únicamente.

Para el caso de la carga axial y el momento es necesario tener en cuenta el efecto conjunto de la pareja de resultados P y M, que son los usados para la incorporación en un diagrama de interacción durante la actividad de diseño; aquí cobra relevancia el análisis por resultados V2-M3 y por los resultados V3-M2, para este ejemplo el dato corresponde a la pareja V3-M2. Puede notarse entonces que cuando se emplea el 100% de V el valor de 1.036 que corresponde a un incremento del 3.6% en la carga axial se obtiene de la relación entre $-1148.39\text{kN} / -1108.57\text{kN}$; por otra

parte la relación entre momentos corresponde a la relación entre $-63.73\text{kN.m}/170.34\text{kN.m}$ cuya magnitud de relación V/H es de 0.37 como se evidencia en la gráfica. Este procedimiento se empleó para los pisos restantes y para el eje fuerte de cada columna y muro de acuerdo con el caso, los resultados se podrán revisar en las gráficas correspondientes; así mismo, en el capítulo siguiente se analizarán los resultados obtenidos para cada uno de los elementos seleccionados y se concluirá sobre el efecto de la componente vertical. En algunos casos puede presentarse que los resultados de otra combinación sean levemente superiores, sin embargo esto no invalida los resultados en cuanto a que los resultados de la componente horizontal también sufren un leve incremento garantizando la proporcionalidad en los resultados.

3.4.12 Otras consideraciones especiales

Para el caso de los muros en el edificio de 15 pisos la combinación 1.2D+1.0E+1.0L terminó igualmente sugiriendo las solicitaciones más desfavorables, pero a diferencia de las columnas, en los muros se privilegió la combinación que tenía el mayor sismo en su plano; para los muros M1 y M5 corresponde al sismo en el eje global X, por ello los resultados de interés para el análisis son los correspondientes a la carga axial P, al cortante V2 y al momento M3, que son los que corresponden a las solicitaciones principales en el eje de estudio. Así mismo, privilegiamos los resultados de la parte baja del muro (Bottom), entendiendo que las mayores cargas axiales y momentos altos estaban en esta zona a excepción de algunos pisos superiores. A las columnas de este arquetipo se les dio el mismo tratamiento que a las de las columnas del edificio de 5 pisos privilegiando igualmente los resultados en la parte inferior del elemento.

Para analizar los efectos de la componente V se partió de seleccionar los resultados de la combinación que indujeran en los elementos los mayores esfuerzos, pues es con estos resultados con los que típicamente se realiza el diseño de cada uno de los componentes de la estructura en el ejercicio práctico de la ingeniería. Los resultados y su correspondiente análisis se socializarán en el capítulo siguiente.

3.5 Evaluación a través de Análisis Dinámico Lineal (ADL)

En términos generales y como complemento a la metodología empleada en el numeral anterior (ADE), se efectuaron ajustes y se adicionaron algunos pasos que son necesarios siguiendo los lineamientos establecidos en el documento NIST GCR 11-917-15 (NIST, 2011) así:

- a. Identificación de las metas del análisis: En este caso se realizó una evaluación basada en la intensidad, en la cual la respuesta tomará la forma de los parámetros de fuerza definidos (Momento, corte y carga axial) para la posterior definición de los indicadores.
- b. Construcción de los modelos matemáticos del edificio: Como se indicó, los modelos serán los empleados en el ADE, con las modificaciones propias para la realización de un Análisis Dinámico Lineal en cuanto a los efectos sísmicos a través de acelerogramas (el término acelerogramas para estos efectos hace referencia al movimiento del suelo e incluye tres componentes).
- c. Selección de un espectro objetivo para el análisis: Corresponde al espectro definido de acuerdo con la microzonificación sísmica de Cali para la componente horizontal.
- d. Selección y escalado de los movimientos del suelo de sismos ocurridos con respecto al espectro objetivo, incluyendo por supuesto registros horizontales y el vertical. Para la selección se recurrió a un método probabilístico consistente en la desagregación de la amenaza sísmica revisado y empleado usualmente en la Universidad de Los Andes. Por otra parte el escalado de las señales se realizó a través de un escalado uniforme como está definido en el reglamento NSR-10.
- e. Realización del análisis e interpretación de resultados: El análisis se realizó empleando el software ETABS (CSI Computers & Structures Inc., 2018) y los parámetros son los usados para los indicadores y elementos definidos en el ADE, esto con el propósito de que sean comparables entre los dos tipos de análisis realizados.

3.5.1 Modelo matemático

Es necesario tener en cuenta algunas consideraciones especiales en el modelo matemático, las cuales sumadas a las anteriores diferencian este análisis del realizado a través de un ADE así:

- a. Se parte de tener un modelo matemático con su tipología y condiciones de carga definidas, este modelo es el empleado para el ADE y solo se realizarán los ajustes correspondientes a un ADL. Además se inicia con la desagregación de la amenaza sísmica y la selección y escalado de señales, aspectos de los que se hablará brevemente más adelante.
- b. Para cada evento sísmico se construirá un modelo matemático de análisis cuya diferencia con los otros es el evento sísmico representado a través de sus tres acelerogramas debidamente escalados. De aquí se deduce que se requiere de 14 modelos, 7 para el edificio de 5 pisos y el mismo número para el edificio de 15 pisos.
- c. Para cada modelo es necesario establecer las funciones tiempo historia que representan los acelerogramas, un ejemplo se indica en la Figura 41.

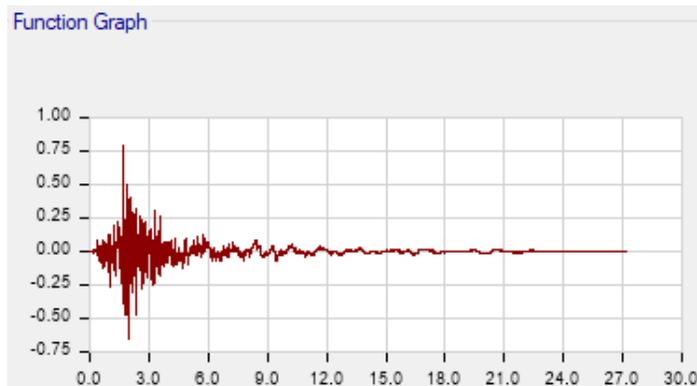


Figura 41 - Acelerograma escalado componente V evento Coyote Lake edificio 5 pisos
Fuente: Autor

- d. Las funciones anteriores deben asociarse a casos de carga que representarán en el modelo matemático el efecto del sismo en las combinaciones de carga; estos casos de carga son del tipo tiempo historia para un análisis modal lineal; además, corresponde establecer en el sentido

en el que actuará la componente reservando los acelerogramas H1 y H2 para las direcciones globales U1 y U2 y viceversa y la componente vertical para la dirección U3. Un requerimiento importante es definir con base en los datos del registro el número de pasos, el cual resulta de dividir el tiempo en que se registró el movimiento entre el intervalo de tiempo dt usado para obtener cada valor de amplitud (aceleración). El amortiguamiento se definió constante en un 5%, como ejemplo se indica la Figura 42.

ET Load Case Data

General

Load Case Name: Design...

Load Case Type/Subtype: Time History | Linear Modal Notes...

Mass Source: Previous (MsSrc1)

Analysis Model: Default

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U3	RSN149_COYOTEL...	9806.65

Buttons: Add, Delete, Advanced

Other Parameters

Modal Load Case: Modal

Time History Motion Type: Transient

Number of Output Time Steps:

Output Time Step Size: sec

Modal Damping: Constant at 0.05 Modify/Show...

Buttons: OK, Cancel

Figura 42 - Ejemplo definición caso de carga componente V para un acelerograma
Fuente: Autor

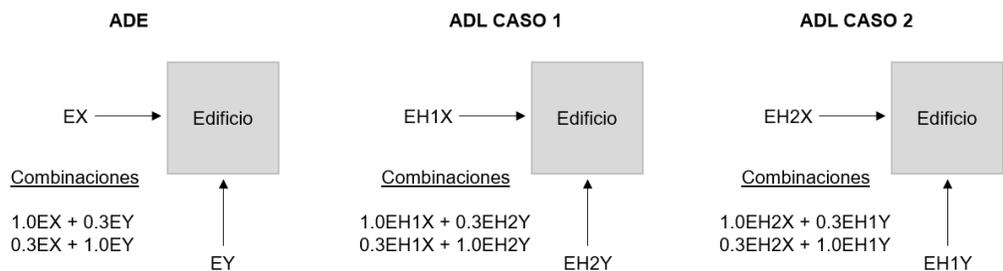
- e. Los resultados deben ajustarse teniendo en cuenta que el valor del máximo cortante dinámico total en la base V_{tj} obtenido para cualquiera de las direcciones principales j , no sea menor que el cortante sísmico en la base V_s calculado por el método de la Fuerza Horizontal Equivalente (A.5.5.3 de NSR-10). Si se utilizan siete o más acelerogramas, en vez del valor máximo del cortante dinámico total en la base, V_{tj} , obtenido para cualquiera de las

direcciones principales, j , se puede utilizar el valor promedio de los valores obtenidos de todos los acelerogramas para efectos de cumplir los requisitos de esta sección.

$$\text{Factor de ajuste} = \frac{Vs - \text{Cortante sísmico en la base FHE}}{Vtj - \text{Cortante dinámico total en la base}}$$

Ecuación 3 - Ajuste de resultados para el ADL, ecuación A.5.5-1 NSR-10

- f. Como se dijo, los registros sísmicos seleccionados para cada evento están compuestos por tres acelerogramas, dos horizontales H1 y H2, y una vertical V. Cuando se realiza un ADL es necesario que cada una de las señales horizontales sea aplicada en cada uno de los ejes ortogonales en planta de la estructura, esta condición a diferencia del ADE supone un mayor número de combinaciones de cargas para efectos sísmicos, en el mismo sentido debe considerarse la doble dirección de aplicación de la carga, en la Figura 43 se muestra un esquema de las diferencias entre las combinaciones usadas en el ADE y en el ADL para una sola dirección.



*Figura 43 - Combinaciones en una de las direcciones para cargas sísmicas en ADE y ADL
Fuente: Autor*

- g. El caso de carga que en los modelos matemáticos desarrollados en el programa ETABS representa las señales horizontales escaladas antes de afectarlas por el factor de ajuste son: SH1X, SH2X, SH1Y, SH2Y.
- h. Posteriormente, cada uno de los casos de carga anterior se multiplica por el correspondiente factor de ajuste con el propósito de obtener las

combinaciones de carga necesarias para el chequeo de derivas así: SH1XDE, SH2XDE, SH1YDE, SH2YDE.

- i. Por último, las combinaciones de carga de diseño resultan de dividir la combinación de carga del punto anterior entre el coeficiente de capacidad de disipación de energía R, resultando las combinaciones EH1X, EH2X, EH1Y, EH2Y.
- j. Los resultados definitivos de carga axial, flexión y corte a comparar entre sí para determinar las relaciones V/H entre sollicitaciones, serán aquellos que resulten del promedio entre los resultados de los 7 eventos analizados de acuerdo con A.2.7.1 de NSR-10.

3.5.2 Desagregación de la amenaza sísmica

Para este trabajo se usará un método probabilístico para la definición de la amenaza sísmica. En este sentido se usará una herramienta de Excel “Análisis de Desagregación Sísmica para Colombia” desarrollada en la Universidad de Los Andes con base en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, 2009). Adicionalmente, los datos obtenidos fueron comparados con el Modelo Nacional de Riesgo Sísmico con el fin de establecer una mayor certeza de estos. Aunque las estructuras están localizadas en el mismo lugar, es necesario realizar una desagregación de la amenaza para cada una de ellas teniendo en cuenta las diferencias en su periodo fundamental.

La desagregación permitió establecer rangos de distintos parámetros con los que se debían seleccionar los acelerogramas a emplear en el ADL; los criterios adoptados son la magnitud M_w y la distancia focal, adicionalmente se empleará el parámetro V_{s30} al momento de la búsqueda de los registros en las bases de datos. En cuanto al criterio de M_w , se redondeó el número obtenido en el límite del rango superior e inferior en un valor máximo de 0.2, teniendo en cuenta que este es una proporción adecuada para disminuir la incertidumbre en el contenido frecuencial y

en la duración, los cuales dependen en cierta manera de Mw (Acevedo, 2012). El conjunto de combinaciones Mw y distancia focal que contribuyen en mayor medida a la amenaza sísmica del sitio donde se localizaran las estructuras se indican en la Tabla 12.

Tabla 12 – Rangos de valores obtenidos de la desagregación de la amenaza

Edificio de 5 pisos, T = 0.55 s.		
Distancia (km)	Magnitud (Mw)	Parámetro Vs30
0 - 26 km	4.8 a 5.8	180 a 360 m/s
26 - 53 km	5.6 a 6.5	180 a 360 m/s
158 - 184 km	7.1 a 8.3	180 a 360 m/s

Edificio de 15 pisos, T = 1.00 s.		
Distancia (km)	Magnitud (Mw)	Parámetro Vs30
26 - 53 km	6.0 a 6.5	180 a 360 m/s
158 - 184 km	7.0 a 8.5	180 a 360 m/s
184 - 211 km	7.5 a 8.5	180 a 360 m/s
237 - 263 km	8.0 a 8.5	180 a 360 m/s

Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, 2009)

Para todos los casos se evidencia que el parámetro Vs30 se ubica en el rango comprendido entre 180 y 360 m/s, valores asociados a un perfil de suelo tipo D de acuerdo con NSR-10. Así mismo, y ante la ausencia de una cantidad representativa de registros, para el caso del edificio de 15 pisos se concentraron las parejas de datos en dos rangos representativos, el primero para distancias comprendidas entre 26 y 53 kilómetros con magnitudes entre 6.0 y 6.5 Mw, y el segundo para distancias comprendidas entre 156 y 263 kilómetros con magnitudes comprendidas entre 7.0 y 8.5 Mw. En el dato anterior del rango de distancia, fue necesario disminuir el dato inicial de 158 km en 2 km para establecer un rango de distancia inferior de 156 km con la finalidad de obtener registros sin que la variación sea significativa.

3.5.3 Selección y escalado de acelerogramas

Para la búsqueda de acelerogramas que incluyan las tres componentes necesarias para el análisis, se prefirió la base de datos de movimientos fuertes del PEER

(Pacific Earthquake Engineering Research Center), en atención a que es una de las bases de datos más robustas a nivel mundial de movimientos fuertes del terreno (NIST, 2011). En resumen, para cada arquetipo se revisaron 100 señales para al final preseleccionar 13 para el arquetipo de 5 pisos y 15 para el de 15, de estos registros sísmicos se seleccionaron 7 para cada arquetipo (véase Tablas 13 y 14).

Tabla 13 - Registros seleccionados de la base de datos del PEER edificio 5 pisos

N°	Event	Year	Station	Mag	Rrup (km)	Vs30 (m/s)	Factor de escala	Error H1	Error H2	Error promedio
1	Hollister-04	1986	Hollister Differential Array #3	5.45	13.11	215.54	5.24	5.47	2.66	4.06
2	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #4	5.74	5.7	221.78	1.89	5.54	3.56	4.55
3	Big Bear-01	1992	Desert Hot Springs	6.46	40.54	359	1.86	4.92	5.00	4.96
4	Yountville	2000	Napa Fire Station #3	5	11.5	328.57	1.29	8.13	9.97	9.05
5	Chalfant Valley-01	1986	Zack Brothers Ranch	5.77	6.39	316.19	2.35	8.97	11.71	10.34
6	Coalinga-05	1983	Burnett Construction	5.77	11.5	352.2	1.80	7.84	13.35	10.60
7	Managua, Nicaragua-02	1972	Managua, ESSO	5.2	4.33	288.77	3.65	13.12	17.21	15.16

Fuente: Autor

Tabla 14 - Registros seleccionados de la base de datos del PEER edificio 15 pisos

N°	Event	Year	Station	Mag	Rrup (km)	Vs30 (m/s)	Factor de escala	Error H1	Error H2	Error promedio
1	Tabas, Iran	1978	Kashmar	7.35	193.91	280.26	9.73	2.75	2.65	2.70
2	Morgan Hill	1984	Hollister City Hall	6.19	30.76	198.77	6.27	2.92	5.34	4.13
3	Denali, Alaska	2002	TAPS Pump Station #12	7.9	164.66	338.6	13.18	5.76	3.72	4.74

N°	Event	Year	Station	Mag	Rrup (km)	Vs30 (m/s)	Factor de escala	Error H1	Error H2	Error promedio
4	Landers	1992	LB - Orange Ave	7.28	160.85	344.72	7.75	2.85	11.56	7.20
5	Hector Mine	1999	Whittier Narrows Dam downstream	7.13	169.83	298.68	6.95	5.96	9.78	7.87
6	Big Bear-01	1992	Desert Hot Springs	6.46	39.52	359	3.20	9.12	6.75	7.93
7	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	TCU059	6.2	51.81	272.67	11.55	8.05	10.47	9.26

Fuente: Autor

Inicialmente las señales preseleccionadas cumplieron con los criterios de magnitud, distancia, parámetros Vs30, entre otras condiciones como haber sido procesadas previamente. Adicional a lo anterior se verificó la apariencia espectral de cada una de ellas con respecto al espectro objetivo y se determinó un error como el cuadrado de las desviaciones entre las aceleraciones espectrales horizontales del espectro objetivo con respecto a las aceleraciones espectrales de las dos componentes horizontales de cada registro, esto con el fin de ordenarlas en función de este error que lo único que busca es saber que tan alejado está el espectro escalado del espectro objetivo, básicamente la ecuación es muy simple:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n (Sa_{espectro\ obj}^i - Sa_{señal\ H\ esc}^i)^2$$

Ecuación 4 - Cálculo del error entre espectro objetivo y espectro escalado

En cuanto al escalado de las señales, para este trabajo se decidió escalarlas a través del procedimiento de escalado uniforme descrito en el reglamento NSR-10, procedimiento que disminuye en los resultados el impacto de la modificación del contenido frecuencial de las señales originales y que además es adecuado para el tipo de efectos a estudiar sobre la estructura (carga axial, momento y corte) (NIST, 2011). Un ejemplo de la hoja de cálculo de Excel elaborada para este propósito puede observarse en el Anexo (T). Seleccionados los registros con sus tres componentes (dos horizontales y uno vertical), fue posible incluirlos en el programa

ETABS para cada estructura y poder ejecutar el ADL. Por último, es preciso aclarar que con base en el documento NIST GCR 11-917-15 se adoptó la opción de escalar los acelerogramas en su componente vertical con el mismo factor de escala obtenido para las dos componentes horizontales.

Para la selección de registros sísmicos además de lo dicho, se consideró la magnitud de la componente vertical con respecto a la horizontal, esto en cuanto a que para los propósitos de este trabajo además de considerar eventos que contribuyan a la amenaza sísmica a través de un método probabilista, es necesario un efecto representativo en el sentido vertical de la estructura. Esta condición limitó para el edificio de 15 pisos la posibilidad de contar con registros que tuvieran una componente vertical con una magnitud representativa con respecto a la horizontal.

3.5.4 Solicitaciones para el análisis de resultados

Previa revisión para observar cuales eran las sollicitaciones más relevantes para cada uno de los elementos, se escogieron las mismas combinaciones de carga definidas para el ADE sobre los mismos elementos de las estructuras. Se recalca el hecho de que posiblemente algunas combinaciones de carga pueden ser levemente superiores y otras pudieran representar alguna condición de excepción más crítica, sin embargo, como se indicó, se mantiene proporcionalidad entre estas para los fines de establecer las relaciones V/H en cada uno de los elementos seleccionados.

4 Resultados y contribución

En el presente capítulo se darán a conocer los resultados obtenidos durante el desarrollo de la metodología explicada en el capítulo 3; adicionalmente se realizará un análisis de estos con la finalidad de materializar los objetivos y la contribución del presente trabajo de investigación. Para empezar, se presentarán los resultados inherentes a la relación entre la componente V y H de los eventos sísmicos; posteriormente, se abordarán los resultados y análisis relacionados con los efectos de la componente sísmica V en las dos estructuras.

4.1 Resultados para la relación entre la componente sísmica horizontal y vertical

Los resultados de esta primera parte se enfocan en las relaciones entre las máximas aceleraciones del terreno (PGA), y las máximas aceleraciones espectrales (S_a) de la componente V con respecto a las componentes H. En este orden de ideas se analizaron los resultados desde dos enfoques: 1. Inicialmente considerando la relación entre componentes cuando el análisis se realiza por ambiente tectónico sin distinguir por tipo de perfil de suelo, y 2. Analizando la relación entre componentes cuando se analiza la información clasificándola por tipo de perfil de suelo, incorporando para este caso los resultados de todos los ambientes tectónicos. De lo anterior se deduce que se analizaran inicialmente cuatro condiciones en las que se tendrá en cuenta cómo afecta el ambiente tectónico y el tipo de perfil de suelo las relaciones entre componentes inicialmente para PGA y posteriormente para S_a , efectuando comentarios en ambos casos sobre la posible incidencia de la distancia epicentral.

Adicionalmente se incorporará una quinta condición en la que se revisa como son las formas entre relaciones espectrales para establecer en que rangos de periodos se presentan los picos V/H de interés. Este análisis se realizará para el ambiente Cortical por grupos de perfil de suelo teniendo en cuenta que, como se mostrará más adelante, es el ambiente en el que se generan las mayores relaciones V/H. Para terminar, como anexo, se compararán algunos espectros de interés con los

espectros de diseño propuestos por NSR-10 y ASCE 7-16, principalmente para la componente vertical que es el énfasis del presente trabajo (ver anexo N).

Antes de continuar es necesario aclarar que los análisis en función de PGA y Sa (Condiciones 1 a 4) no consideran explícitamente el periodo, mientras que la quinta condición que se enfoca en las relaciones espectrales sí lo tiene en cuenta. En la Figura 44 se muestran en color azul las cinco condiciones de análisis.



Figura 44 - Organigrama para el análisis de resultados de la relación V/H
Fuente: Autor

Es importante tener en cuenta que para cada condición de análisis en función de PGA (condiciones 1 y 3) y de Sa (condiciones 2 y 4) se tendrán en cuenta tres puntos de vista. Para las condiciones en función de PGA el primer punto de vista incluye una relación V/H con base en los resultados de todos los registros, el segundo solo considera registros con $PGA_H > 0.10\text{ g}$ y el tercero se limita a registros con $PGA_H < 0.10\text{ g}$. En cuanto a los puntos de vista para las condiciones en función de Sa, el primero se orienta a una relación V/H de registros hasta una magnitud de SaH donde se incluyan por lo menos el 80% de todos los resultados, el segundo considera todos los valores de SaH y el tercero y último se limita a registros con $SaH > 0.25\text{ g}$.

Durante el desarrollo del presente capítulo se espera una familiarización con estos criterios, que si bien pueden ser más o distintos, se estima que a través de estos se obtengan resultados razonables de las relaciones V/H.

4.1.1 Resultados de la relación V/H para PGA por ambiente tectónico incluyendo todos los perfiles de suelo (Condición 1)

La primera condición por analizar es la línea de tendencia de los puntos que obedecen a parejas de datos resultantes de la máxima aceleración del terreno vertical (PGA V) y la media geométrica de las máximas aceleraciones del terreno horizontales (PGA H), incluyendo todos los registros de un mismo ambiente tectónico sin excluir tipos de perfil de suelo; esto quiere decir por ejemplo, que para el ambiente Cortical se incluyen todos los registros de los perfiles de suelo del A al F de acuerdo con la clasificación de NSR-10.

4.1.1.1 Ambiente Cortical

Se analizaron 607 registros que corresponden a 49 eventos sísmicos con magnitudes comprendidas entre 4.78 y 6.99 Mw. El mayor valor de PGA V registrado fue de 0.46 g para un valor de PGA H de 0.54 g, lo que indica una relación entre PGA vertical y horizontal de 0.84; estos datos corresponden al sismo ocurrido el 25 de enero de 1999 en el eje cafetero para los datos de la estación CARME ubicada a una distancia de 13.02 km.

La línea de tendencia que representa la relación entre la componente V y H tiene una pendiente de 0.57 cuando se incluyen los datos de todos los registros, lo que resulta en que el valor de la componente V sugerido debe ser el 57% del PGA de la componente H sin tener en cuenta variables adicionales (véase la Figura 45). Es relevante anotar que solo el 0.80% de los registros tienen un valor de PGA H superior a 0.10 g, cuando se incluye este punto de vista en el análisis la relación V/H considerando solo este pequeño grupo de datos alcanza una magnitud de 0.66 (Anexo G), lo que representa un incremento del 15% con respecto al resultado

anterior de 0.57. Por otra parte, cuando el análisis de la relación se hace sin tener en cuenta estos resultados, la magnitud de la relación desciende hasta un valor de 0.50, con una magnitud menor en un 12% con respecto al mismo valor de referencia.

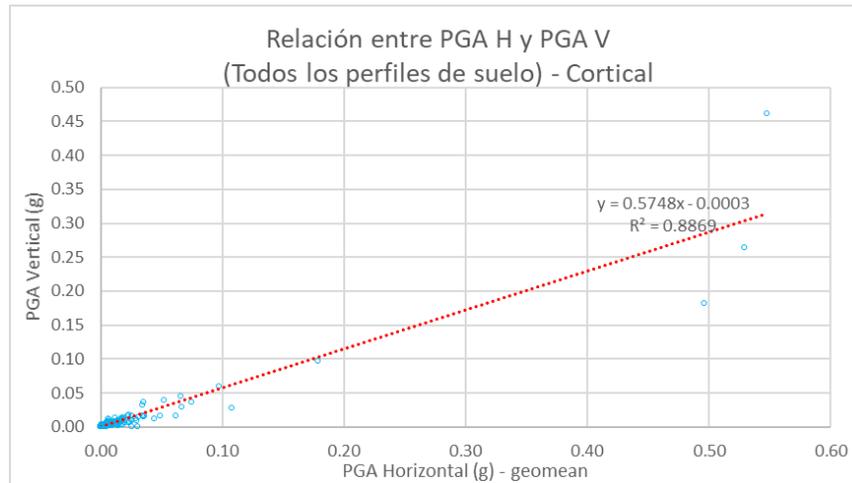


Figura 45 - Relación entre PGA H y PGA V todos los perfiles de suelo ambiente Cortical
Fuente: Autor

Lo anterior muestra la importancia de los registros con valores de aceleraciones horizontales del terreno superiores a 0.10 g (registros relevantes). Puede notarse además en el gráfico anterior y en los del Anexo G para este ambiente, que los coeficientes de variación R^2 se ubican en un rango de 0.89 y 0.70, este último valor para el caso donde solo se consideraron el 0.80% de los registros, lo que permite afirmar que las líneas de tendencia representan por lo menos en un 70% los datos a partir de los cuales se construyeron.

Los registros considerados relevantes en función del PGA H tienen relaciones entre componentes comprendidos entre 0.26 y 0.84 y promedio de distancia epicentral entre ellos de 28.41 km; en este pequeño grupo de datos, el valor de 0.84 corresponde a la segunda menor distancia epicentral, mientras que el de 0.26 corresponde a la mayor distancia epicentral con un valor de 51.41 km; esto indica que los resultados son consistentes con la literatura existente en cuanto a que los efectos de la componente V son importantes para los casos en que la fuente que genera el movimiento sísmico está cerca de la estructura analizada (ASCE, 2016).

Al incluir el efecto de la distancia epicentral en la relación V/H es conveniente limitar los registros a los relevantes. De estos datos se encontró que de las relaciones entre componentes V y H contra la distancia epicentral, se obtiene una línea de tendencia con una función que indica que cuando la distancia epicentral es cero la relación V/H es de 0.74, para una distancia de 25 km es de 0.53 y para una distancia de 50 km la relación es de 0.32, resultados consecuentes con el hecho de que generalmente la relación V/H disminuye a medida que la distancia epicentral aumenta. Sin embargo, en esta situación el coeficiente de variación es de 0.44, lo que indica una representación del 44% de la línea de tendencia en cuanto a los puntos que representa, esto se considera como una baja representación en los resultados obtenidos por lo que solo se indican como referencia informativa (véase la Figura 46).

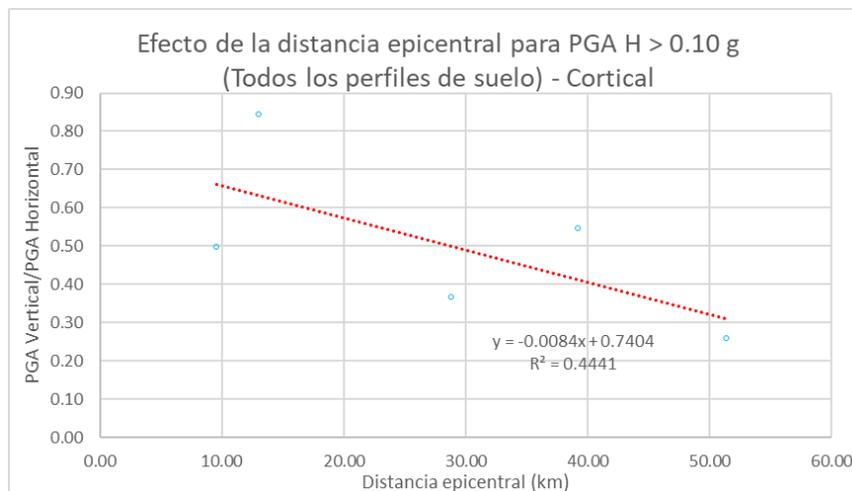


Figura 46 - Incidencia de la distancia epicentral en el ambiente Cortical todos los tipos de suelo
Fuente: Autor

Con base en la función mencionada, resulta que para una distancia epicentral de 10 km se obtendría una relación V/H de 0.66 o 2/3, dato igual al obtenido cuando se analiza esta relación considerando solo los registros relevantes, y aunque aquí no estamos hablando de aceleraciones espectrales, es este el valor mínimo tomado como referencia en NSR-10 para considerar la componente vertical, y es de este valor donde inicia el espectro de diseño definido en este reglamento para esta componente con respecto a la horizontal. Más adelante se observará que las

relaciones entre aceleraciones espectrales son muy parecidas a las relaciones entre máximas aceleraciones del terreno para tres de los cuatro ambientes tectónicos.

En cuanto a las magnitudes de PGA, en el 39% de los casos la relación entre PGA V y H superó una relación de $2/3$ alcanzando inclusive para un registro un valor de 6.13; no obstante, pudo establecerse que para valores de V/H mayores a 1.0 las magnitudes de las aceleraciones de ambas componentes son bajas, lo que es consecuente además con un promedio de distancia epicentral para este grupo de valores de 425 km, distancia a la que los efectos de la mayoría de los eventos analizados resultan en valores de S_a inferiores a los mínimos obtenidos usando el espectro definido en la norma para una zona de amenaza sísmica intermedia.

Considerando la profundidad del hipocentro, es preciso anotar que en los 49 eventos del ambiente Cortical este parámetro varía entre 3.1 y 54.1 km. Para los registros con $PGA > 0.10$ g estos valores se ubican entre los 17 y los 50.6 km, evidenciándose que entre menor es la profundidad mayor son las relaciones V/H; por ejemplo, para valores de relaciones V/H de 0.84 y 0.49 las profundidades son de 17 y 14.7 km respectivamente, mientras que para una relación V/H de 0.26 la profundidad es de 50.6 km. Se aclara que solo en cinco registros el valor de PGA H es mayor a 0.10 g, estos son: sismo CO_19990125181918 los registros de las estaciones CARME, CCAST, CFLAN, para el sismo CO_20070424085334 el registro de la estación CANSE_ y para el sismo CO_20080524192044 el registro de la estación CQUET.

4.1.1.2 Ambiente Subducción del pacífico

Se estudiaron 259 registros de 21 eventos con magnitudes entre 4.97 y 7.78 Mw, aquí se encuentran las mayores magnitudes de los eventos considerados por el SGC. El mayor valor de PGA V fue de 0.71 g para un valor de PGA H de 1.01 g, lo que supone una relación entre PGA V y H de 0.70, estos datos son del sismo del 16 de abril de 2016 ocurrido cerca de Pedernales en Ecuador registrados por la estación APED ubicada a una distancia del epicentro de 36.0 km.

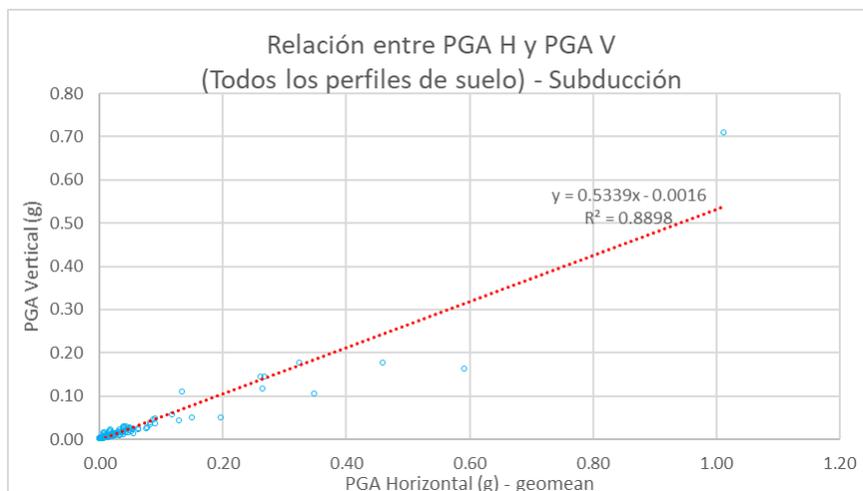


Figura 47 - Relación entre PGA H y PGA V todos los perfiles de suelo ambiente Subducción
Fuente: Autor

En este caso la línea de tendencia tiene una pendiente de 0.53 cuando se incluyen todos los registros, quiere decir que debería tomarse el 53% del PGA H como PGA V (véase la Figura 47). Además, cuando se consideran exclusivamente los registros relevantes el valor obtenido para V/H es de 0.64, mientras que cuando se excluyen estos valores la relación V/H baja hasta un valor de 0.42. Comparando estos resultados con el ambiente Cortical, los valores son muy parecidos a excepción del criterio en el que se eliminan los registros relevantes, pero obsérvese que precisamente cuando solo estos son considerados el valor no difiere en más de un 1.5% (0.66 para el Cortical contra 0.64 para Subducción).

En cuanto a los coeficientes de variación, cuando se incluyen todos los registros el valor es de 0.88, para los valores relevantes es de 0.84, y cuando estos últimos se eliminan de los registros a analizar quedando solo aquellos registros con valores de PGA H menores a 0.10 g el resultado es de 0.88, siendo los valores de coeficientes de variación más parecidos entre sí con un promedio del 0.87 de representatividad. Aquí el 5% de los registros tienen valores de PGA H por encima de 0.10 g, lo que es mayor al caso del ambiente Cortical en que aunque existían más registros solo el 0.80% alcanzaron este criterio. Ahora bien, todos los registros que satisfacen la condición de tener un PGA H mayor a 0.10 g corresponden a eventos con epicentro en Ecuador, pero como se dijo en el desarrollo del documento, en el MNAS 2020 se

incluyen eventos sísmicos ocurridos en Colombia o en otros países pero que se consideren importantes para definir nuestra amenaza sísmica.

Haciendo un análisis de los registros relevantes ($PGA_H > 0.10\text{ g}$), se observó que se mantiene la tendencia de que a menor distancia epicentral mayores valores de PGA_H y V . En este ambiente el máximo valor de relación V/H es de 0.82, sin embargo, las magnitudes de PGA son aproximadamente el 15% de las máximas registradas para el sismo de Pedernales, lo que afirma lo dicho en que no es una norma que a mayores relaciones V/H mayores valores de PGA .

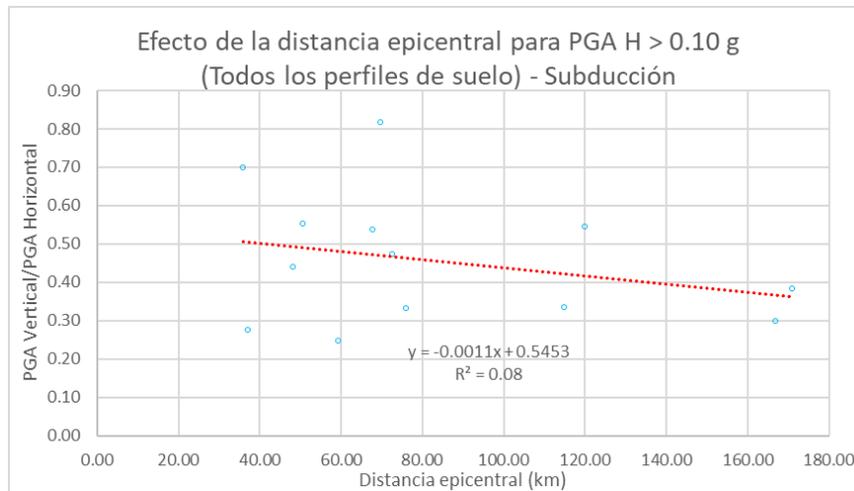


Figura 48 - Incidencia de la distancia epicentral en el ambiente Subducción todos los tipos de suelo
Fuente: Autor

Pasando ahora a la incidencia de la distancia epicentral, para los registros relevantes tuvo un promedio de 83.92 km, condición que más que una característica del ambiente tectónico obedece a una de las limitantes de la instrumentación sísmica del país, toda vez que este ambiente predomina en una de las regiones con menor desarrollo e instrumentación. En estos datos se encontró que para una distancia igual a cero la relación V/H es de 0.54, para una distancia de 25 km es de 0.51 y por último para una de 50 km la relación es de 0.49 (véase la Figura 48), notándose que la relación V/H hasta distancias de 50 km sigue siendo un 50% aproximadamente de la componente horizontal, diferente del ambiente Cortical que a esta misma distancia la relación tenía una magnitud de 0.32. Se hace énfasis en

que al igual que en el ambiente Cortical, estos datos relacionados con la distancia epicentral son informativos, y aunque su tendencia es la esperada no se consideran significativos por sus bajos coeficientes de variación y número de datos disponibles.

En cuanto a la profundidad del hipocentro el promedio para los registros importantes es de 22.62 km, similar al del ambiente cortical en el cual el promedio se ubicó sobre los 23.26 km, es importante anotar que para este ambiente y para el Cortical los eventos estudiados pueden clasificarse como sismos superficiales de acuerdo con la clasificación propuesta por García (García, 1998). En este caso solo 13 registros de tres eventos sísmicos tienen valor de PGA horizontal superior a 0.10 g, estos son: En el sismo EC_20160416235837 los registros de las estaciones APED, AES2, ASDO, ACHN, APO1, AMNT, para el sismo EC_20160518164644 los registros de las estaciones APED, AV21, AV18, AMA1 y para el sismo EC_20160518075703 los registros de las estaciones AMA1, AV21, APED.

4.1.1.3 Ambiente Benioff

En este caso el SGC seleccionó 22 eventos sísmicos con un total de 435 registros. Llama la atención que en solo dos registros, que equivalen a menos del 0.45% de los analizados, existen valores de PGA H mayores o iguales a 0.10 g, valor de referencia que fue superado levemente en ambos casos por magnitudes de 0.11 g. Adicionalmente, los valores de aceleraciones del terreno para la componente vertical que acompañaron estos valores fueron de 0.038 y 0.018 g respectivamente, lo que supone relaciones V/H considerando estos criterios de 0.34 y de 0.16 respectivamente para los valores máximos de aceleración. Lo anterior hace solo referencia a los valores máximos, sin embargo, incluyendo todos los valores de los registros analizados se obtuvo una pendiente de la línea de tendencia de 0.42, lo que quiere decir que para este ambiente tectónico la componente vertical solo sería el 42% de la componente PGA Horizontal (véase la Figura 49). Este valor es en promedio el 75% de los valores obtenidos para el ambiente Cortical y de Subducción, y como se verá más adelante se reflejará igualmente un valor bajo de relación V/H entre aceleraciones espectrales.

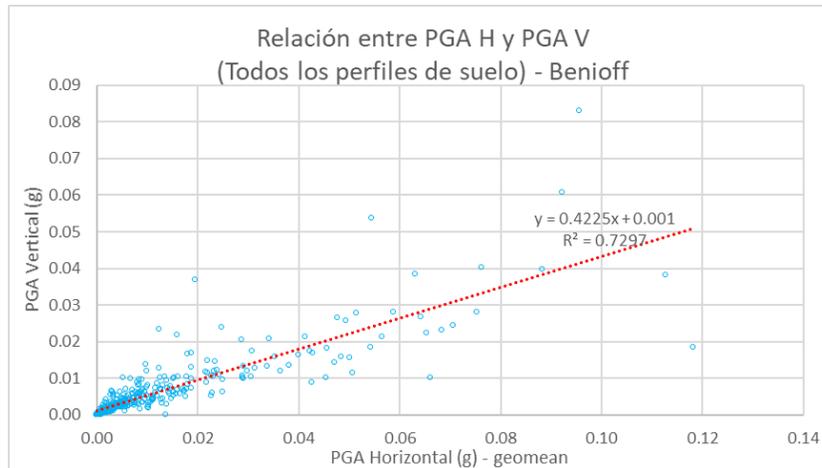


Figura 49 - Relación entre PGA H y PGA V todos los perfiles de suelo ambiente Benioff
Fuente: Autor

Aquí no se consideró relevante realizar el análisis adicional excluyendo los registros con PGA H mayores a 0.10 g por tratarse solo de dos registros, mucho menos analizarlos por separado. En el mismo sentido, no se estimó incluir un análisis del efecto de la distancia epicentral por existir pocos datos y por encontrar una relación V/H baja en comparación con los otros ambientes y con las recomendaciones de los reglamentos NSR-10 y ASCE 7-16. El coeficiente de variación para este caso fue de 0.72, el más bajo de todos los ambientes cuando se incluyen todos los datos.

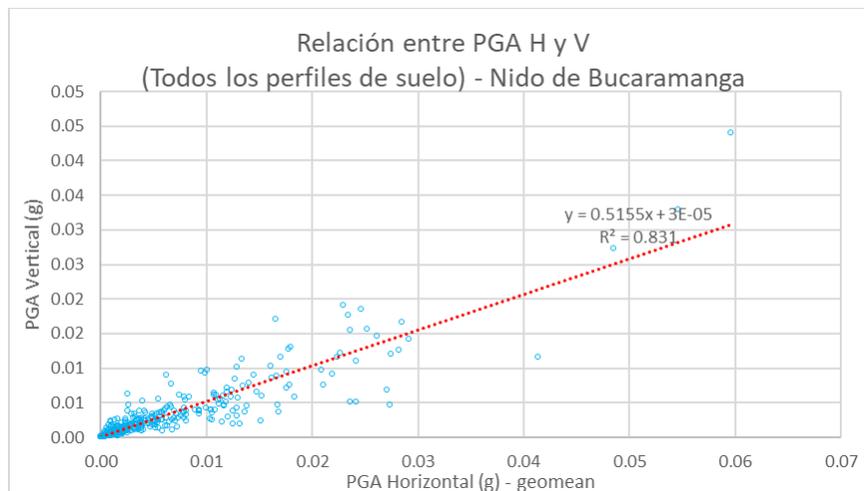
Uno de los aspectos que puede influir en estas bajas magnitudes, apartándonos de la limitante de los pocos datos disponibles, es la profundidad del hipocentro; mientras que en promedio para los ambientes tectónicos ya analizados este dato estaba alrededor de los 22 km, para este ambiente el promedio de todos los datos es de 138 km, esto sin duda interpone entre las estaciones de registro y el hipocentro una mayor masa de suelo que de acuerdo con su tipo disipa la energía del sismo, generando menores magnitudes y relaciones V/H en la superficie del terreno.

4.1.1.4 Ambiente Nido sísmico de Bucaramanga

El último ambiente tectónico en esta primera condición es el del Nido Sísmico de Bucaramanga; para este caso se analizaron 485 registros de 26 eventos sísmicos.

Las magnitudes oscilan entre 4.80 y 6.25 Mw siendo estas las menores magnitudes de los cuatro ambientes tectónicos. Aquí ninguno de los valores de PGA H supera el valor de referencia de 0.10 g, lo que indica valores de PGA bajos, condición que como se ha indicado puede estar condicionada por la cantidad de instrumentos para registrar los sismos en todo el territorio nacional, a la profundidad del hipocentro y a que nuestra red sismológica es muy joven en términos geológicos (27 años).

Se había mencionado que aún con la condición anterior, los datos de estos registros sísmicos indistintamente de su magnitud nos permiten evaluar la relación entre la componente vertical con respecto a la horizontal para valores de PGA. En este la relación obtenida a través de la línea de tendencia es de 0.51, lo que representa una componente vertical del 51% de la componente H (véase la Figura 50); adicionalmente el coeficiente de variación para línea de tendencia con respecto a los puntos que representa es 0.83. En este caso como en el de Benioff no hay datos como para estimar una relación con la distancia epicentral, por esto es pertinente que ante la ausencia de registros relevantes no realizar sugerencias al respecto.



*Figura 50 - Relación entre PGA H y PGA V todos los perfiles de suelo ambiente Nido Sísmico de Bucaramanga
Fuente: Autor*

Por último, el promedio de profundidades del hipocentro es de 153 km, la mayor de los cuatro ambientes; esta magnitud al igual que en el caso del Benioff lleva a clasificar los eventos sísmicos producidos en estos ambientes como de profundidad

intermedia; lo que hasta el momento sugiere que la relación V/H está afectada por las distancias desde el epicentro y por las profundidades hipocentrales en cuanto a que, generalmente, a mayores profundidades y distancias mayor disipación de la energía de las ondas sísmicas. Para terminar, se suministra la Tabla 15 con el resumen de los resultados obtenidos durante el análisis de esta primera condición.

Tabla 15. - Relaciones V/H en función de PGA por ambiente tectónico incluyendo todos los perfiles de suelo

Ambiente tectónico	Relación V/H en función de PGA (Todos los valores de PGA)	Relación V/H en función de PGA (Solo PGA H > 0.10 g)	Relación V/H en función de PGA (Solo PGA H < 0.10 g)
Cortical	0.57	0.66	0.50
Subducción	0.53	0.64	0.42
Benioff	0.42	No disponible	0.42
Nido	0.51	No disponible	0.51

Fuente: Autor

Algunos gráficos adicionales del análisis de esta primera condición se pueden revisar en el Anexo G - Resultados adicionales para la relación V/H en función de PGA por ambiente tectónico incluyendo todos los perfiles de suelo.

4.1.2 Resultados de la relación V/H para Sa por ambiente tectónico incluyendo todos los perfiles de suelo (Condición 2).

En este caso se revisaron los resultados de las relaciones entre aceleraciones espectrales de la componente V y H (Sa_{VMax}/Sa_{HMax}) y su variación con respecto a las magnitudes de las máximas aceleraciones espectrales horizontales por cada uno de los ambientes tectónicos incluyendo todos los tipos de perfil de suelo. Adicionalmente, se realiza la comparación de cómo es la tendencia al comparar las aceleraciones espectrales verticales con respecto a las horizontales incluyendo todos los registros y al realizar el mismo ejercicio solo con los registros relevantes. En cuanto a las aceleraciones espectrales, los registros relevantes se definieron como aquellos que producen aceleraciones espectrales horizontales mayores o

iguales a 0.25 g. Este valor de referencia se estableció considerando la menor aceleración espectral para una zona de amenaza sísmica intermedia de acuerdo con NSR-10, lo que resulta de un valor de $A_a = 0.10$, $F_a = 1.0$ y de $I = 1.0$ en la ecuación A.2.6-3 de ese reglamento.

El número de registros analizados por ambiente tectónico es igual al indicado en la condición 1. Este enfoque es relevante en cuanto nos acerca a realizar comparaciones de los resultados obtenidos con lo estipulado en el Reglamento NSR-10, documento que para relaciones entre componentes espectrales vertical y la horizontal prescribe un valor mínimo de $2/3$ (0.67).

4.1.2.1 Ambiente cortical

Como se dijo en el preámbulo de esta segunda condición, aquí se compara la relación entre S_{aVMax}/S_{aHMax} y S_{aHMax} . En este ambiente las mayores relaciones entre componentes se presentaron para valores de S_{aH} comprendidos entre 0 y 0.025, las magnitudes V/H en este intervalo varían linealmente con una pendiente negativa desde 0.76 hasta 0.67 respectivamente, observándose que las mayores magnitudes de relaciones V/H están asociadas a los menores valores de S_{aHMax} . Esto más que una regla particular puede deberse a que hasta la fecha se han registrado eventos a distancias epicentrales que impiden obtener mayores aceleraciones espectrales, es importante aclararlo antes de que con base en estos resultados se afirme que las relaciones altas entre componentes se limitan a aceleraciones espectrales bajas; en el mismo sentido, puede deberse al hecho de que no hayan registrado en los últimos años eventos de magnitudes significativas.

En la Figura 51 se observará que la línea dibujada en color negro que representa el promedio de las relaciones V/H , continúa con una pendiente negativa hasta un valor 0.44 de la relación V/H para una aceleración espectral horizontal de 0.075, hasta este valor de S_{aHMax} se ubican el 93% de los datos disponibles de este ambiente tectónico. Desde este punto, y hasta valores de S_{aHMax} de 0.40 que es hasta donde se considera que existen parejas de datos que permiten obtener una tendencia de

la línea promedio, los valores de relación V/H varían entre 0.46 y 0.63. Con la imagen siguiente el lector podrá hacerse una idea de cómo varía la relación V/H en función de las magnitudes de aceleraciones espectrales horizontales, sin pretender establecer una conclusión al respecto solo con este resultado.

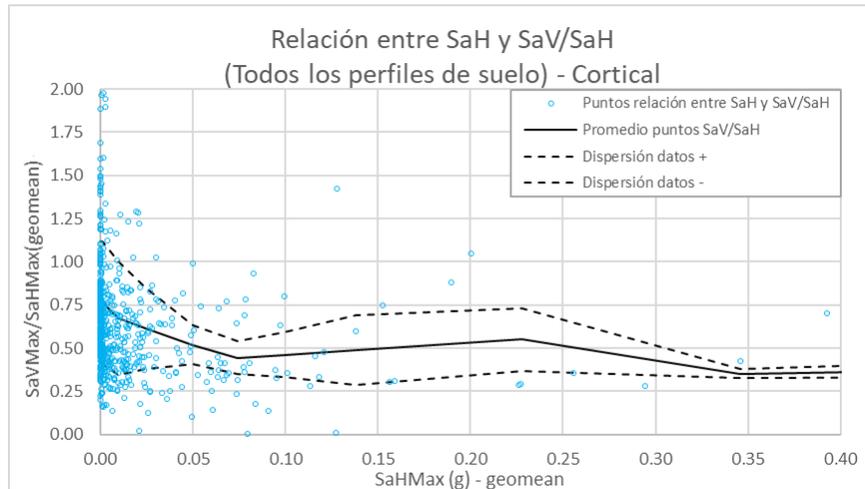


Figura 51 - Relación entre SaH y SaV/SaH todos los perfiles de suelo ambiente Cortical
Fuente: Autor

En estos gráficos las líneas punteadas representan la desviación estándar del conjunto de datos usados para el cálculo de la línea promedio entre rangos de valores de Sa, los intervalos de los rangos fueron indicados en la metodología del presente trabajo en el numeral *Relación aceleraciones espectrales SaV y SaH*. La desviación estándar representa la dispersión de un conjunto de datos, dejando claridad que entre mayor es la desviación estándar mayor es la dispersión de los datos empleados. Para este ambiente tectónico la desviación estándar promedio fue del 33%, el valor máximo fue del 48% para valores de Sa de 0.10 g y el mínimo fue de 7% para valores de Sa de 0.35 g.

Como valor de referencia para todos los ambientes tectónicos, se consideró importante como primer punto de vista saber cuál era el promedio de las relaciones V/H hasta un valor de SaH en el que se concentrarán en promedio el 80% de los datos de los registros; esto se realizó aun cuando la mayoría de los eventos están concentrados en valores de SaH bajos para analizar que sucede con las relaciones

V/H más que con las magnitudes en un tamaño representativo de registros. En este ambiente el 83.69% de los registros se ubican entre valores de aceleraciones espectrales de 0 y 0.025 g, y para este rango el promedio de la relación V/H es de 0.70; este primer resultado proporciona una idea de lo que para ciertos criterios aquí aclarados ocurre entre relaciones espectrales V/H. Esta suposición parte de la hipótesis de que las relaciones V/H que se presentan para magnitudes de SaH bajas pueden ser por lo menos iguales para magnitudes de SaH mayores, aunque de acuerdo con ASCE 7-16 para mayores valores de SaH mayor es la relación V/H; esto será una incertidumbre en nuestro país hasta que se disponga de más eventos de magnitudes superiores que puedan ser adecuadamente registrados.

El segundo punto de vista para analizar los resultados consistió en construir líneas de tendencia similares a las construidas para PGA pero en función de aceleraciones espectrales Sa.

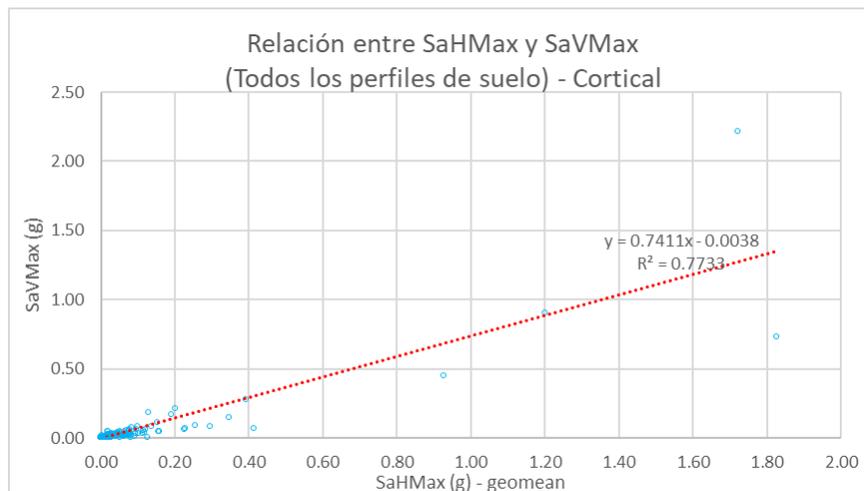


Figura 52 - Relación entre SaH y SaV todos los perfiles de suelo ambiente Cortical, Incluye todos los resultados
Fuente: Autor

Revisados los resultados la línea de tendencia tiene una pendiente de 0.74 cuando se incluyen todos los datos correspondientes al ambiente Cortical, este dato está acompañado de un coeficiente de variación de 0.77 lo que para efectos de este trabajo es un valor aceptable teniendo en cuenta la limitante de datos (véase la Figura 52). Este resultado al igual que el anterior de 0.70 son comparables con la

relación espectral de 2/3 o 0.67 indicada como mínima en NSR-10. Aunque esto ya se había aclarado, es relevante recordarlo para que el lector se mantenga enfocado en lo que quiere lograrse en cuanto a la comparación de lo obtenido en esta tesis con respecto a lo indicado en los reglamentos.

Siguiendo los criterios propuestos, se indican los resultados del tercer y último punto de vista. Aquí se realiza la misma comparación anterior entre valores de SaHMax y SaVMax, pero en este caso los registros usados se limitan a aquellos en que los valores de SaH son mayores a 0.25 g. En este ambiente nueve registros satisfacen esta condición con aceleraciones espectrales ubicadas en un rango comprendido entre 0.256 y 1.826 g; la relación ahora indica una pendiente del 0.89 con un coeficiente de variación de 0.65 que es menor al anterior (véase la Figura 53).

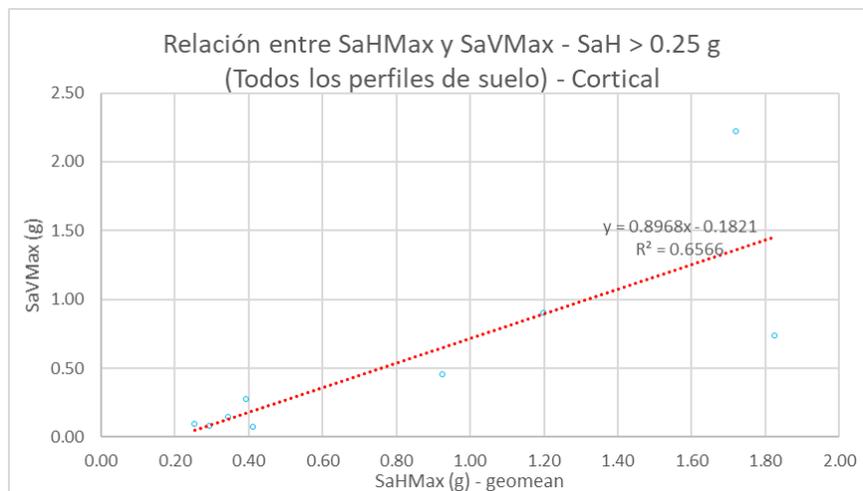


Figura 53 - Relación entre SaH y SaV todos los perfiles de suelo ambiente Cortical, registros con SaH > 0.25 g
Fuente: Autor

En todo caso los valores de aceleraciones espectrales en todos los puntos de vista arrojaron para este ambiente resultados mayores a las relaciones entre PGA y al valor mínimo recomendado en NSR-10 para relaciones espectrales. Adicionalmente, en los últimos resultados de V/H igual a 0.89 puede evidenciarse que para mayores magnitudes de SaH mayor es la relación V/H a nivel de aceleraciones espectrales, observando que por lo menos para este ambiente tectónico no es satisfactoria la relación de 2/3 propuesta en NSR-10, pero si es

conservadora la relación propuesta en ASCE 7-16 cuando este análisis se realiza en función del tipo de perfil de suelo, donde se recomiendan valores de C_v comprendidos entre 0.70 y 1.50 como se verá más adelante.

De manera informativa, el promedio de las distancias epicentrales en el caso de los registros relevantes es de 49.66 km, y el de la profundidad del hipocentro es de 21.68 km. Realizado un ejercicio en el que se grafica el posible efecto de la distancia epicentral, se obtiene una función que indica que para distancias epicentrales iguales a cero la relación V/H entre componentes espectrales es de 0.77, para una distancia de 25 km la relación tiene una magnitud de 0.65 y para una distancia epicentral de 50 km la magnitud es de 0.53. Aunque la tendencia en estos casos sigue siendo la esperada, se ha indicado que no es recomendable hacer conclusiones en cuanto a los bajos coeficientes de variación en los gráficos que representan la tendencia, referencia que para este caso es de 0.24.

4.1.2.2 Ambiente Subducción del pacifico

El trabajo realizado para este ambiente es el mismo que para el Cortical. Es conveniente para no extender el documento realizar una breve mención de los resultados obtenidos para los tres puntos de vista considerados importantes, partiendo del hecho que se trata del mismo orden y criterios en los procedimientos empleados. Como se había dicho, en este ambiente se presentaron los eventos sísmicos de mayor magnitud, lo que es concordante con que a su vez se presenten mayores aceleraciones y relaciones espectrales mirando algunos resultados independientemente; por ejemplo, la máxima relación V/H de este ambiente fue de 0.82 contra un máximo de 0.76 del ambiente Cortical, en todo caso estos valores se ubicaron en el sector de SaH menores 0.01 g.

En la Figura 54 se observa en la línea promedio de valores V/H una primera pendiente que desciende desde 0.82 hasta 0.49 en el intervalo de valores de SaH de 0 a 0.025, posteriormente una pendiente positiva con un ascenso en las relaciones V/H hasta 0.66 para un SaH de 0.05 g, desde este punto inicia

nuevamente un descenso hasta una relación de 0.43 para un Sa de 0.10 g, a partir de aquí el comportamiento de la línea es bastante uniforme con valores de relaciones V/H comprendidos entre 0.38 y 0.51 con un promedio de 0.42 hasta alcanzar el valor de SaH de 0.40 g.

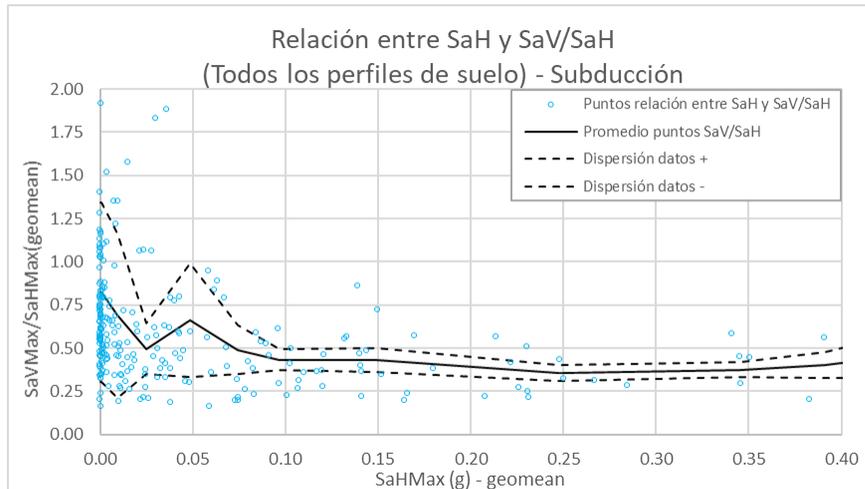


Figura 54 - Relación entre SaH y SaV/SaH todos los perfiles de suelo ambiente Subducción
Fuente: Autor

El 80% de las parejas de datos obedecen a registros que están ubicados entre valores de Sa de 0 y 0.10 g, un rango mayor de distribución si se compara con el ambiente Cortical en el que un poco más del 80% de los datos estaban concentrados hasta valores de 0.025 g; aquí los valores de las relaciones V/H varían entre 0.82 y 0.43 para este rango, lo que nos indica un primer promedio de la relación V/H de 0.63 para el primer punto de vista definido.

Por otra parte, el valor obtenido a partir de la pendiente de la línea de tendencia que corresponde al segundo punto de vista en el que se incluyen todos los datos, tiene una magnitud de 0.54 para un coeficiente de variación de 0.83 (véase la Figura 55); para este ambiente la relación obtenida incluyendo todos los datos en función de PGA fue de 0.53, siendo muy parecida a la obtenida aquí para relaciones espectrales de 0.54.

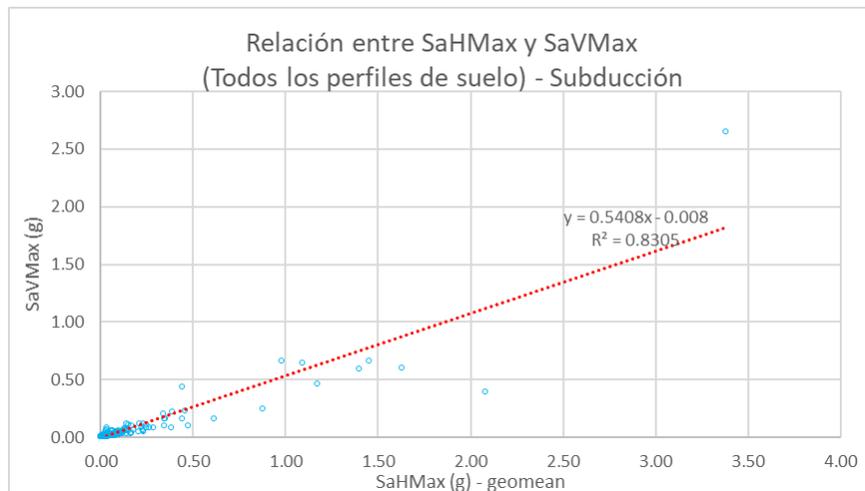


Figura 55 - Relación entre SaH y SaV todos los perfiles de suelo ambiente Subducción, incluye todos los resultados
Fuente: Autor

Por último, la relación V/H entre aceleraciones espectrales para registros considerados relevantes, que es el tercer y último punto de vista, fue de 0.62 incluyendo veintitrés registros que cumplieron con el criterio de valores de SaH mayores o iguales a 0.25 g, en este caso la línea de tendencia tiene un coeficiente de variación de 0.77. Hasta aquí los resultados obtenidos para las relaciones V/H en los tres puntos de vista son inferiores a los obtenidos para el ambiente Cortical, y en todos los casos menores al valor de referencia de 2/3 establecido en NSR-10.

Para la distancia epicentral en los registros relevantes tenemos un promedio de 97.13 km, mientras que el promedio de la profundidad del hipocentro es de 20.84 km; en cuanto a las relaciones V/H para aceleraciones espectrales en función de la distancia epicentral, que es un dato informativo, a los cero kilómetros existe una relación de 0.57, a los 25 km de 0.53 y por ultimo a los 50 km una magnitud de 0.50, guarda esto correspondencia con lo obtenido para relaciones V/H en función de PGA, no obstante, el coeficiente de variación es de 0.12, valor muy bajo. Las relaciones bajas V/H de este ambiente con respecto al ambiente Cortical pueden deberse a los datos de los registros obtenidos a mayores distancias epicentrales.

4.1.2.3 Ambiente Benioff

Aquí se presentan valores altos de relaciones V/H para valores de SaHMax muy cercanos a cero con una magnitud de 0.90, desde este punto hasta valores de SaHMax de 0.075 g la línea de promedios tiene una pendiente negativa hasta alcanzar un valor de 0.48, de aquí hasta valores de SaH de 0.40 g la línea promedio toma una tendencia muy horizontal con valores de SaHMax que oscilan entre 0.38 y 0.48 para un promedio de 0.44 (véase la Figura 56). En cuanto a la distribución de las parejas de datos, el 83% de estos se encuentran entre valores de aceleraciones espectrales horizontales comprendidas entre 0 y 0.075 g.

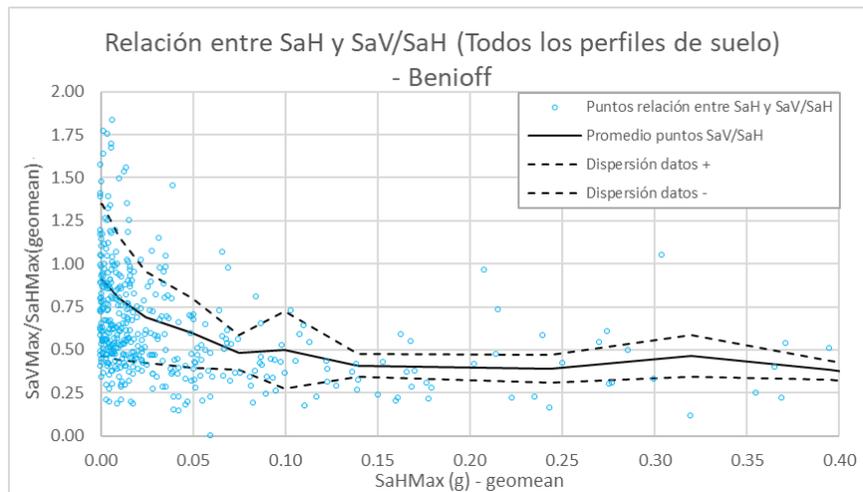
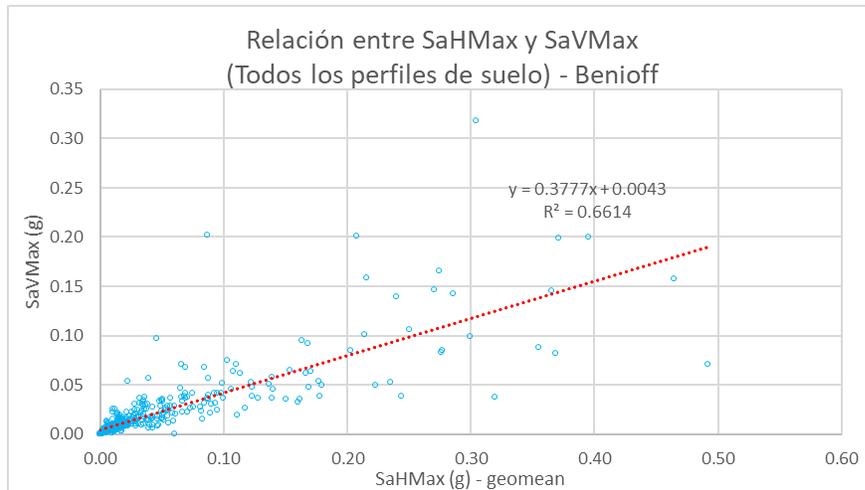


Figura 56 - Relación entre SaH y SaV/SaH todos los perfiles de suelo ambiente de Benioff
Fuente: Autor

Para los datos relacionados con el primer punto de vista, en este ambiente tenemos un promedio de las relaciones SaVMax/SaHMax hasta el valor de SaHMax donde se localizan por lo menos el 80% de estos valores de 0.71, siendo hasta ahora por un 1.4% la mayor relación de los ambientes tectónicos analizados en esta primera condición. Para la segunda consideración que se obtiene construyendo una línea de tendencia que parte de las parejas de datos SaHMax, SaVMax, la pendiente es de 0.38 (véase la Figura 57), lo que equivale a un 52% del primer valor de referencia obtenido; esto se debe a que si bien hay valores relaciones V/H altos, hay un número

importante de valores de relaciones V/H bajos, lo que tiende a disminuir en el promedio general.



*Figura 57 - Relación entre SaH y SaV todos los perfiles de suelo ambiente Benioff, incluye todos los resultados
Fuente: Autor*

Para encontrar una explicación de este valor relativamente bajo de 0.38, se efectuó un análisis independiente para la relación SaHMax contra SaVMax por grupo de perfil de suelo. Se encontró que para el grupo de perfil de suelo que incluye los tipos A y B la línea de tendencia tiene una pendiente de 0.60 con un coeficiente de variación de 0.68; para el perfil de suelo tipo C se obtuvo una pendiente de 0.38 con un coeficiente de variación de 0.62; y por último, para el grupo que incluye los perfiles de suelo tipo D, E y F una pendiente para la relación V/H de 0.36 con un coeficiente de variación de 0.71. Esto muestra que los tipos de perfil de suelos del C al F arrojan relaciones bajas V/H (0.37 en promedio), y que el hecho de que en estos perfiles se concentren el 80% de los registros influye significativamente en la relación V/H final del segundo punto de vista. Adicionalmente, es conveniente recordar que para este ambiente tectónico a nivel de PGA se evidenciaron valores bajos en las relaciones correspondiente V/H.

En el tercer punto de vista los datos obtenidos tienen una particularidad en cuanto a que no facilitan la construcción de una línea de tendencia con una pendiente que permita sugerir una relación V/H, esto debido a que la mayoría de los valores

dispersos de SaV corresponden al 40% de SaH; para subsanar este aspecto se analizó cada pareja de datos independientemente obteniendo un promedio entre ellos de 0.41 para esta relación en los registros con SaH > 0.25 g.

4.1.2.4 Ambiente Nido sísmico de Bucaramanga

Se continua con el análisis de los resultados del último ambiente tectónico correspondiente al Nido sísmico de Bucaramanga. En este caso se obtuvo el menor valor correspondiente a 0.68 para la relación SaVMax/SaHMax en un valor SaHMax muy cercano a cero, magnitud que se indica como una primera referencia. En cuanto al primer punto de vista considerado, cerca del 80% de los datos se encuentran ubicados antes de valores de SaHMax de 0.025 g, y hasta aquí el promedio de los valores de la relación de la componente espectral vertical contra la horizontal es de 0.64 (véase la Figura 58), muy parecido al obtenido para el ambiente de Subducción.

Para el segundo punto de vista, la línea de tendencia tiene una pendiente de 0.50 con un coeficiente de variación de 0.78 (véase la Figura 59), siendo este el segundo más bajo después del ambiente de Benioff. Para el tercer punto de vista no se indica resultado en cuanto para este no existen valores de SaH superiores a 0.25 g.

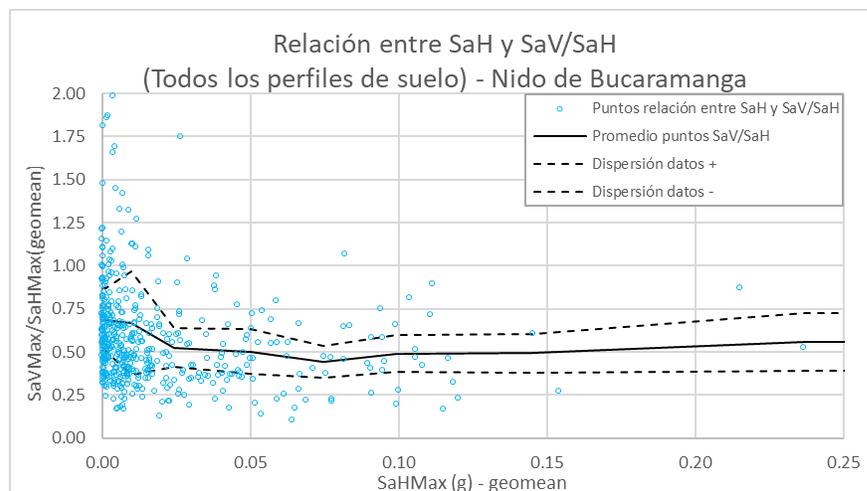


Figura 58 - Relación entre SaH y SaV/SaH todos los perfiles de suelo ambiente del Nido Sísmico de Bucaramanga
Fuente: Autor

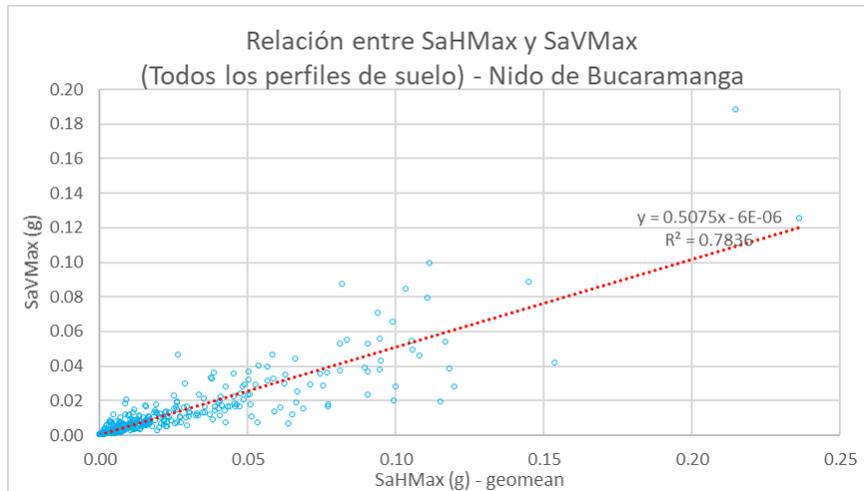


Figura 59 - Relación entre SaH y SaV todos los perfiles de suelo ambiente Nido, incluye todos los resultados
Fuente: Autor

Por último, se presenta la Tabla 16 en la que se muestra un resumen de los resultados obtenidos durante el análisis de esta segunda condición.

Tabla 16 - Relaciones V/H en función de Sa por ambiente tectónico incluyendo todos los perfiles de suelo

Ambiente tectónico	Relación V/H en función de Sa (Hasta SaH con 80% de datos)	Relación V/H en función de Sa (Todos los datos)	Relación V/H en función de Sa (Registros con SaH > 0.25 g)
Cortical	0.70	0.74	0.89
Subducción	0.63	0.54	0.62
Benioff	0.71	0.38	0.41
Nido	0.64	0.50	No disponible

Fuente: Autor

4.1.3 Resultados de la relación V/H para PGA por grupos de tipos de perfiles de suelo incluyendo todos los ambientes tectónicos (Condición 3)

El enfoque a partir de ahora es analizar los resultados filtrándolos en función del tipo de perfil de suelo y no por ambiente tectónico como se hizo en las dos condiciones

anteriores. Obtener datos a partir de esta orientación nos permitirá comparar los resultados obtenidos con lo recomendado en el estándar ASCE 7-16 y en NSR-10, teniendo en cuenta que en ambos documentos los espectros de amenaza sísmica empleados para diseño están directamente influenciados por el tipo de perfil de suelo sobre el cual se construirá la estructura. Estos resultados sin ser más relevantes que los anteriores, pueden ofrecer un punto de comparación adicional que fortalecerá el análisis de resultados propuesto.

Dicho esto, es claro que para esta tercera condición corresponde analizar los resultados de la relación de la componente vertical con respecto a la horizontal para valores de PGA por grupos de perfiles de suelos, estos grupos se indican a continuación: El primero corresponde a los tipos de suelos A y B, el segundo al perfil de suelo tipo C, y el tercer grupo incluye los tipos de suelos D, E y F. Esta clasificación es concordante con la establecida en el numeral 11.9.2 del documento ASCE 7-16; además es proporcional en NSR-10 a los perfiles de suelos de roca competente y de rigidez media para el primer grupo, roca blanda para el segundo, y el grupo de suelos restantes para el tercero, y consistentes con investigaciones similares realizadas entre ellas las de Bozorgnia y Campbell.

4.1.3.1 Perfiles de suelo A y B

En este primer grupo se concentran 264 registros de eventos sísmicos que fueron registrados por estaciones localizadas en terrenos con magnitudes de parámetro V_{s30} mayor o igual a 760 m/s. De estos registros 87 corresponden al ambiente Cortical, 38 a la zona de Subducción del Pacífico, 88 a la zona de Benioff y 51 al Nido Sísmico de Bucaramanga; las magnitudes varían entre 4.79 y 7.24 Mw para una profundidad del hipocentro máxima evidenciada de 209.9 km; es importante aclarar que estos últimos valores son informativos en cuanto incluyen las características de todos los ambientes tectónicos y eventos sísmicos registrados.

Cuando se analizan los resultados de todos los registros, supuesto que corresponde al primer punto de vista, se obtiene una relación de la componente V y H a través

de la pendiente de la línea de tendencia de 0.50 con un coeficiente de variación del 0.97 (véase la Figura 60), lo que indica una buena representación de las parejas de datos a través de esta línea. En estos perfiles de suelo para el segundo punto de vista, solo se evidenciaron dos registros que superaron el valor de referencia de aceleración del terreno para la componente horizontal de 0.10 g, con este pequeño número de datos no es posible obtener conclusiones al respecto como se había indicado en casos anteriores en los que se presentaron situaciones similares.

Para el tercer punto de vista que es aquel en donde se analizan exclusivamente los valores de pendiente de la línea de tendencia cuando se consideran los valores de PGA H menores o iguales a 0.10 g, la pendiente de la línea de tendencia es del 0.54 con un coeficiente de variación del 0.73. Aquí es clara la incidencia que en los resultados tienen los registros con magnitudes representativas, pero como en las otras condiciones, hasta tanto no exista un mayor número de datos, los resultados deben estar sujetos a las limitaciones impuestas por los disponibles.

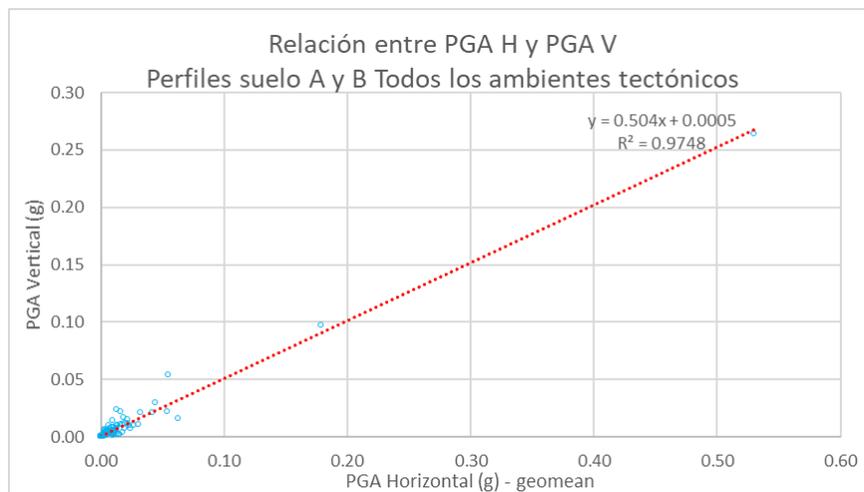


Figura 60 - Relación entre PGA H y PGA V perfiles de suelo A y B incluyendo todos los ambientes tectónicos
Fuente: Autor

En cuanto al efecto de la distancia epicentral, para este escenario no se considera toda vez que solo hay dos datos relevantes, estableciendo que con esta cantidad no es posible efectuar una recomendación o análisis al respecto.

4.1.3.2 Perfil de suelo C

El perfil de suelo tipo C agrupa 604 registros, estos fueron registrados por estaciones localizadas sobre suelos con magnitudes de parámetros Vs30 comprendidos entre 360 y 760 m/s. De estos 232 corresponden al ambiente Cortical, 56 a la zona de Subducción del Pacifico, 137 de la zona de Benioff y 179 del Nido Sísmico de Bucaramanga. Las magnitudes de los eventos están ubicadas en un rango de 4.78 y 7.78 Mw; la profundidad del hipocentro máxima es la misma que la del caso anterior; de aquí en adelante no se tocarán estos parámetros en cuanto arrojarían los mismos resultados por tratarse de los mismos eventos registrados por estaciones localizadas en distintos tipos de suelo.

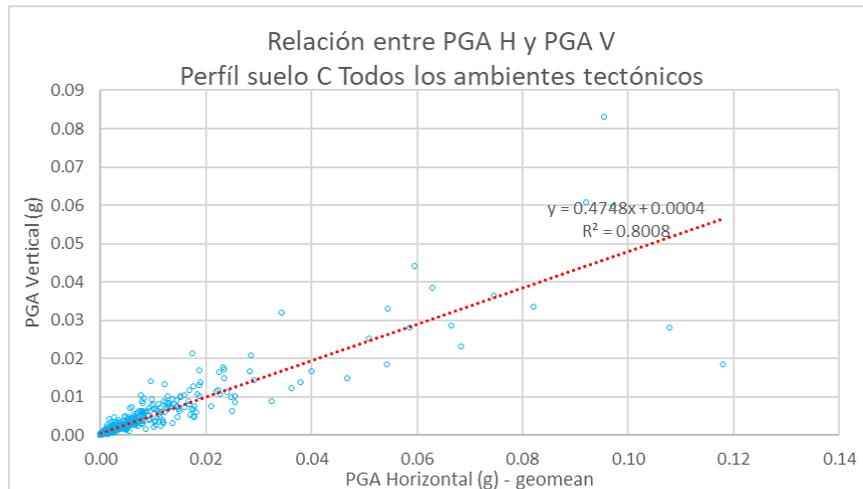


Figura 61 - Relación entre PGA H y PGA V perfil de suelo C incluyendo todos los ambientes tectónicos
Fuente: Autor

Cuando se incluyen todos los registros, la pendiente de la línea de tendencia que relaciona los valores de PGA Vertical y el PGA Horizontal tiene una magnitud de 0.47 (véase la Figura 61) que es un valor muy similar al obtenido en el caso anterior de 0.50, por su parte el coeficiente de variación es de 0.80. En el segundo escenario o punto de vista que es aquel en el que se limitan los registros a aquellos cuyos valores de PGA Horizontal son mayores a 0.10 g, se identificó que al igual que en el caso anterior solo dos registros cumplen con este criterio, lo que limita obtener

resultados coherentes, además de la imposibilidad de tener para este perfil de suelo tendencias sobre la influencia de la distancia epicentral.

Cuando se consideran solo los valores de PGA Horizontal con magnitudes menores a 0.10 g, la línea de tendencia muestra una pendiente de 0.55 con un coeficiente de variación de 0.88, comportamiento parecido al del caso anterior en el que al retirar los dos valores de magnitudes representativas aumenta el valor de la pendiente de 0.50 a 0.54. Se considera con base en esto, que para estos dos grupos de perfil de suelo (A, B y C) la influencia de dos datos dispersos más allá de contribuir, generan una mayor tendencia con una influencia menos conservadora en los resultados. En todo caso los resultados de los perfiles A y B y del perfil C para esta condición son similares con una relación de 0.54 y 0.55 respectivamente.

4.1.3.3 Perfiles de suelo D, E y F

Para terminar el análisis de la tercera condición propuesta, se abordan los resultados que pueden clasificarse en los perfiles de suelo del D al F, son estos aquellos en los que el valor del parámetro Vs30 es menor a los 360 m/s. Este es el grupo que reúne el mayor número de registros con una cantidad de 918, lo que corresponde al 51% del total de registros disponibles. Estos registros están distribuidos en 288 registros del ambiente Cortical, 165 de la zona de Subducción del Pacífico, 210 de la zona de Benioff y 255 del Nido Sísmico de Bucaramanga.

Incluyendo en el análisis todos los resultados, se obtiene una pendiente de la línea de tendencia de 0.54 convirtiéndose este en el valor más alto para este mismo escenario en los tres grupos de perfil de suelos definidos, por su parte el coeficiente de variación fue de 0.87 (véase la Figura 62). Cuando se analiza el segundo punto de vista ($PGA_H > 0.10$ g) se identifican 16 registros que satisfacen esta condición, en este caso se obtuvo un valor para la relación objetivo de 0.658 con un coeficiente de variación de 0.80 (véase la Figura 63), que a su vez es el valor más alto en esta condición para todos los puntos de vista; además coincide este valor con el obtenido para este mismo escenario en el ambiente cortical, de tal forma que este valor de

0.66 o 2/3 puede considerarse el más crítico para todas las condiciones de PGA analizadas en el presente trabajo, incluyendo los casos que se limitan a registros con PGA Horizontales superiores a 0.10 g.

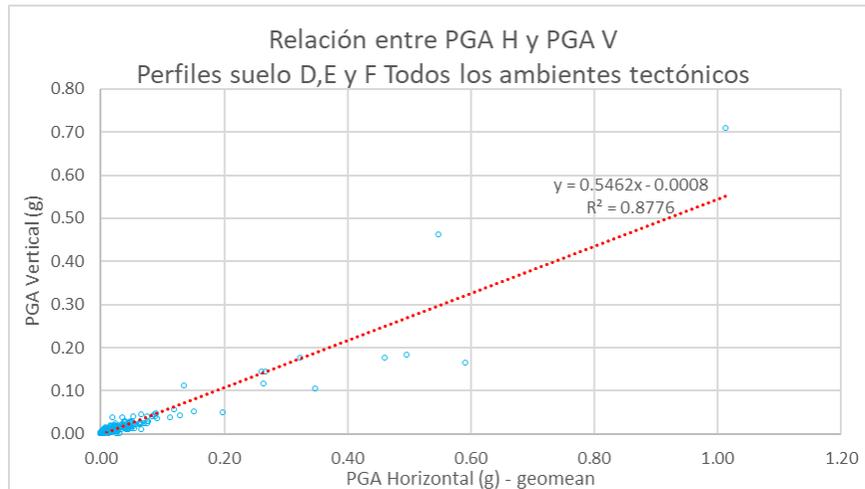


Figura 62 - Relación entre PGA H y PGA V perfiles de suelo D, E y F incluyendo todos los ambientes tectónicos
Fuente: Autor

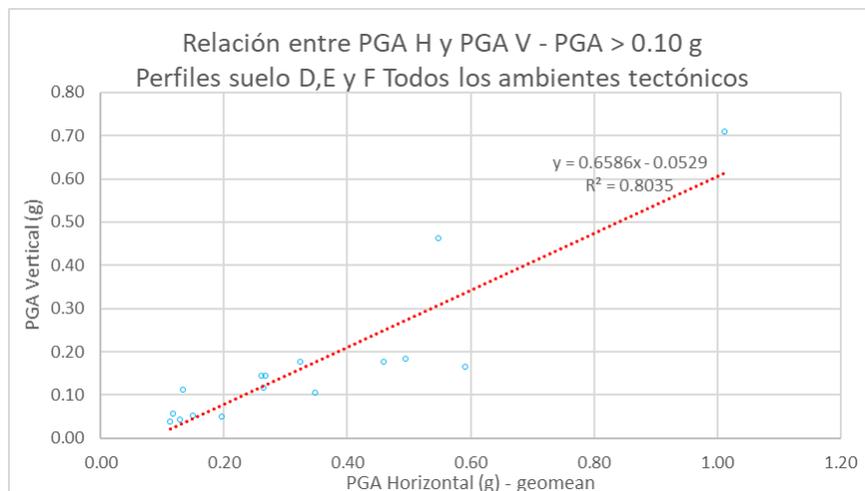


Figura 63 - Relación entre PGA H y PGA V perfiles de suelo D, E y F incluyendo todos los ambientes tectónicos con PGA H > 0.10 g
Fuente: Autor

Cuando se analiza el escenario que solo incluye los registros con PGA H inferiores a 0.10 g, el valor de la relación disminuye a 0.42 con un coeficiente de variación de 0.82. En este último caso se observa la importancia de los resultados con valores

de PGA H representativos, lo que deja claro para estos tipos de suelos por lo menos, que cuando aumenta la magnitud de PGA aumenta la magnitud de las relaciones entre componentes.

Puede observarse que predominan los resultados encontrados para el grupo de perfiles de suelo que incluye los perfiles D, E y F. El resumen de los resultados de esta tercera condición se indican en la Tabla 17.

Tabla 17 - Resultados de la relación V/H para PGA por grupos de tipos de perfiles de suelo incluyendo todos los ambientes tectónicos

Grupo de perfiles de suelo	Relación V/H en función de PGA (Todos los valores de PGA)	Relación V/H en función de PGA (Solo PGA H > 0.10 g)	Relación V/H en función de PGA (Solo PGA H < 0.10 g)
Perfiles A y B	0.50	No disponible	0.54
Perfil C	0.47	No disponible	0.55
Perfiles D, E y F	0.54	0.66	0.42

Fuente: Autor

4.1.4 Resultados de la relación V/H para Sa por grupos de tipos de perfiles de suelo incluyendo todos los ambientes tectónicos (Condición 4)

Corresponde analizar ahora la última de las condiciones propuestas en las que no se considera la incidencia del periodo para los casos de aceleraciones espectrales. Esta consiste en evaluar las relaciones entre aceleraciones espectrales de la componente vertical con respecto a la horizontal filtrando los resultados por tipo de grupo de perfil de suelo. Estos resultados al igual que los de la segunda condición son comparables con las relaciones espectrales propuestas en el documento ASCE 7-16 y en NSR-10.

4.1.4.1 Perfiles de suelo A y B

La cantidad de registros por tipo de grupo de perfil de suelo es igual al indicado en cada uno de los casos de la tercera condición. La relación entre componentes espectrales a través de la línea de tendencia tiene una magnitud de 0.63 (véase la Figura 64), lo que representa un incremento del 26% con respecto a la relación para este mismo grupo de perfil de suelo evaluada en función de PGA; el coeficiente de variación para este primer resultado es de 0.92, indicando esto una buena representación de los puntos a través de la línea de tendencia.

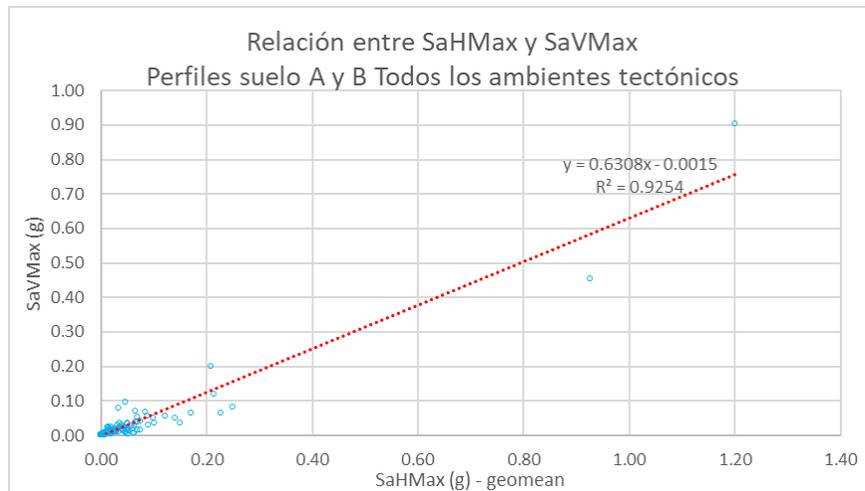


Figura 64 - Relación entre SaH y SaV perfiles de suelo A y B, se incluyen todos los ambientes tectónicos
Fuente: Autor

Conviene ahora incluir la comparación de los resultados obtenidos con respecto a las condiciones establecidas en ASCE 7-16; para esto se construyó la gráfica que muestra la relación entre la aceleración espectral vertical y horizontal con respecto a la aceleración espectral horizontal, en otras palabras, este gráfico nos permite revisar como varía la relación entre componentes a medida que se incrementa la magnitud de la aceleración espectral horizontal (véase la Figura 65). Esta situación es igual a la planteada en la segunda condición, diferenciándose en que los resultados ahora están filtrados por tipo de perfil de suelo, lo que hace posible revisar la línea promedio de los resultados obtenidos con la línea propuesta de

valores de C_v en la tabla 11.9-1 del documento ASCE 7-16, la cual en los gráficos de este documento estará representada por una línea de color verde.

Es importante aclarar que las magnitudes de S_aH están limitadas a valores de 0.40 g o en algunos casos como este a magnitudes menores, esto teniendo en cuenta que hasta esta magnitud de referencia existirían datos que pudieran representar de alguna manera aceptable los promedios de valores de S_aH en los rangos de valores indicados en numerales anteriores. Aquí debemos concentrarnos en si la línea de promedio que representa los resultados obtenidos de relaciones espectrales está por encima o por debajo de la línea propuesta por ASCE 7-16 para los grupos de perfil de suelo estudiados, esto nos permitirá conocer si lo propuesto en ese documento es conservador con respecto a los resultados aquí obtenidos con los registros disponibles.

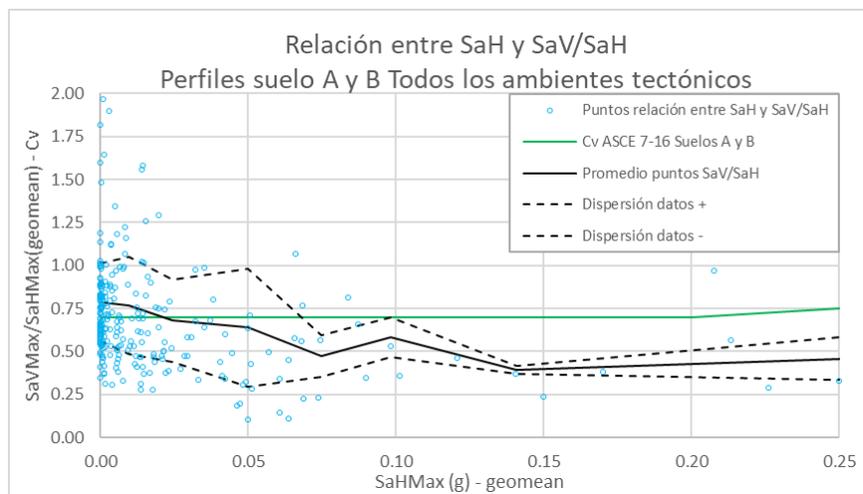


Figura 65 - Relación entre S_aH/S_aV perfiles de suelo A y B, incluye todos los ambientes tectónicos y el parámetro C_v de ASCE 7-16
Fuente: Autor

Aquí puede observarse que el valor de C_v de ASCE 7-16 está representado por la línea de color verde, y la línea que representa el promedio entre rangos de S_aH de la relación entre S_aV/S_aH está representada en color negro. Se observa que solo para valores inferiores a 0.025 g la línea de color negro está por encima del valor propuesto por ASCE, de esa magnitud en adelante es aceptable lo propuesto por el documento antes referido para los resultados disponibles en nuestro país. Un dato

importante para el análisis muestra que hasta este valor de SaH de 0.025 g están concentrados el 80% de los datos disponibles, además de que hasta este valor la relación entre componentes tiene una magnitud de 0.75, valor mayor al 0.70 recomendado en ASCE para estas magnitudes de SaH; a su vez también es importante aclarar que para valores de SaH de 0.20 y mayores, este reglamento considera un incremento lineal del valor de Cv hasta magnitudes de 0.90 para este grupo de perfiles de suelos. Para estos perfiles de suelo no se evalúan resultados con SaH mayores a 0.25 g en cuanto solo tres registros cumplen esta condición, y a través de estos no se obtuvieron resultados consistentes con lo esperado.

4.1.4.2 Perfil de suelo C

En este perfil de suelo se evidencia que no existe una amplificación de las relaciones entre componente vertical y horizontal a nivel espectral si se comparan los resultados con los obtenidos en función de PGA. Aquí la pendiente de la línea de tendencia tiene un valor de 0.41, acompañado además de un coeficiente de variación de 0.71 (véase la Figura 66). Si comparamos este resultado con los obtenidos a nivel de aceleraciones del terreno encontraríamos que es un 13% menor.

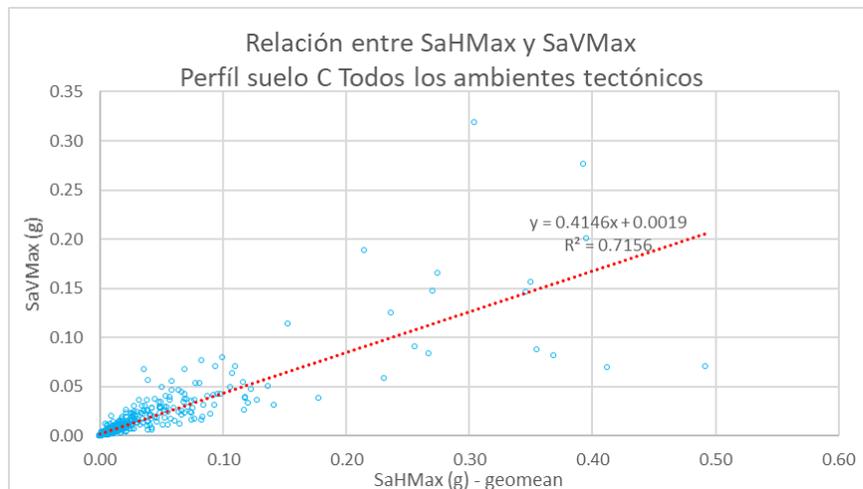


Figura 66 - Relación entre SaH y SaV perfil de suelo C, se incluyen todos los ambientes tectónicos
Fuente: Autor

Para este perfil el coeficiente C_v se incluye con una línea de color amarillo como se muestra en la Figura 67, valor que se mantiene constante hasta 0.20 g con una magnitud de 0.70, desde ahí se incrementa hasta 0.80 en 0.30 g, para a partir de aquí aumentar hasta un valor de 1.30 en un valor de aceleraciones espectrales horizontales de 2.0 g. En cuanto a los resultados obtenidos, solo para valores muy pequeños de SaH de aproximadamente 0.01 g la línea de promedio supera la línea recomendada en ASCE 7-16, de esa magnitud en adelante la línea de promedio se mantiene por debajo del valor recomendado en este reglamento. Para ser concordante con lo analizado en la condición de los perfiles A y B, hasta este valor de 0.01 g el promedio de los valores de las relaciones V/H es de 0.71, sin embargo, solo hasta un valor de 0.025 g se acumulan cerca del 80% de los resultados con un valor hasta aquí del promedio V/H de 0.67, en todo caso menor a 0.70 que es la recomendación de ASCE.

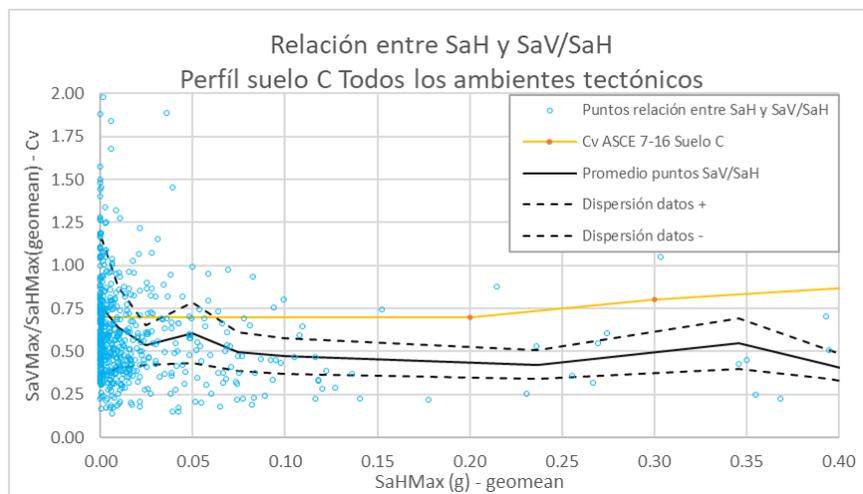


Figura 67 - Relación entre SaH/SaV perfil de suelo C, incluye todos los ambientes tectónicos y el parámetro C_v de ASCE 7-16
 Fuente: Autor

4.1.4.3 Perfiles de suelo D, E y F

Corresponde ahora analizar el último grupo de perfiles de suelo que incluye el 51% de todos los registros disponibles. Para el primer caso en el que se comparan las aceleraciones espectrales vertical y horizontal, el valor de la relación obtenido a

través de la pendiente de la línea de tendencia es de 0.57 con un coeficiente de variación del 0.77 (véase la Figura 68), este valor es muy similar al obtenido cuando se compararon las aceleraciones a nivel del terreno en cuyo caso se obtuvo una relación de 0.54, considerando en ambos casos todos los registros disponibles.

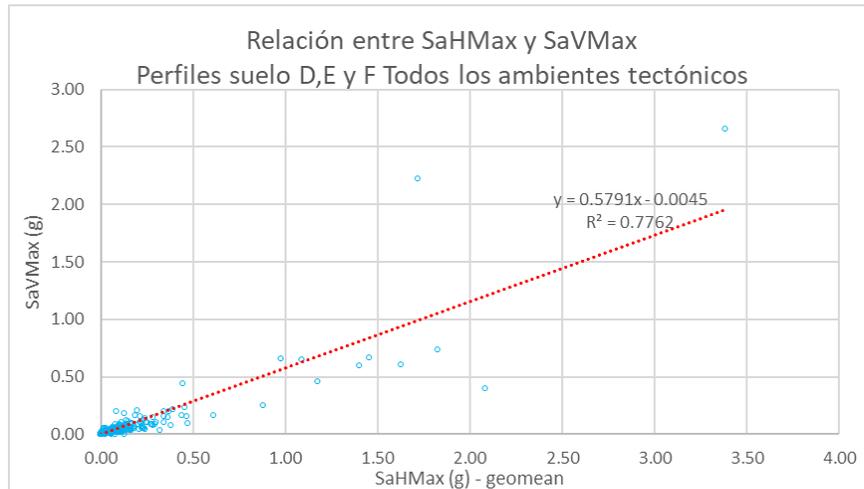


Figura 68 - Relación entre SaH y SaV perfiles de suelo D, E y F, se incluyen todos los ambientes tectónicos
Fuente: Autor

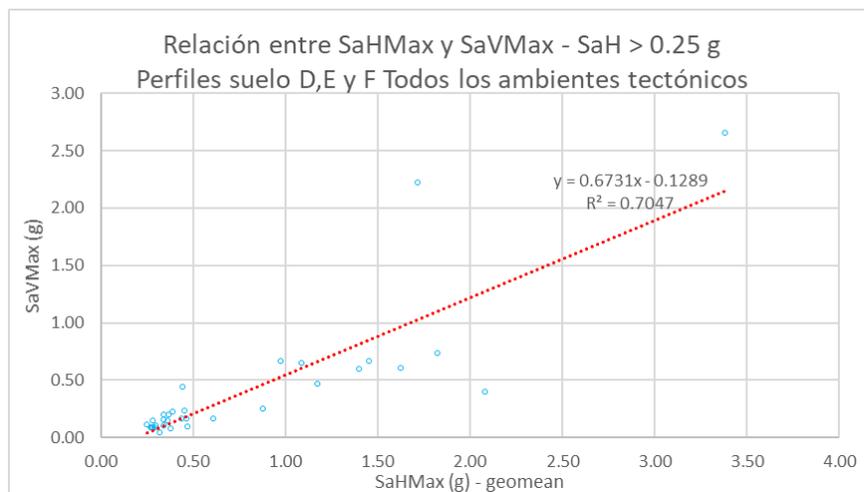


Figura 69 - Relación entre SaH y SaV perfiles de suelo D, E y F, se incluyen todos los ambientes tectónicos con SaH > 0.25 g
Fuente: Autor

En estos perfiles de suelo se encuentran 32 registros que satisfacen la condición de generar espectros con magnitudes de aceleraciones espectrales horizontales de

0.25 g o más, parámetro a partir del cual para efectos de este trabajo se consideraban registros relevantes en función de SaH. En este caso la relación V/H asciende a un valor de 0.67 con un coeficiente de variación de 0.70 (véase la Figura 69), siendo consistente con lo evidenciado para estos perfiles a nivel de PGA y con el hecho de que a mayores SaH mayores relaciones V/H.

En la última condición de análisis, se observó que la línea de promedios de relaciones V/H en función de las aceleraciones espectrales horizontales al igual que en los casos anteriores solo supera la línea de Cv indicada por ASCE representada en este caso a través del color rojo en valores de aceleraciones pequeños, de ahí en adelante la línea de promedio se mantiene por debajo de la línea propuesta en ASCE 7-16 (véase la Figura 70). Por su parte, para estos perfiles de suelo, el 80% de los datos están ubicados hasta valores de SaH de 0.05g, y el promedio de la relación espectral hasta este punto es de 0.69 que termina siendo igual a la magnitud propuesta de Cv en el documento ASCE 7-16, lo que al igual que en los casos anteriores pareciera ser una constante.

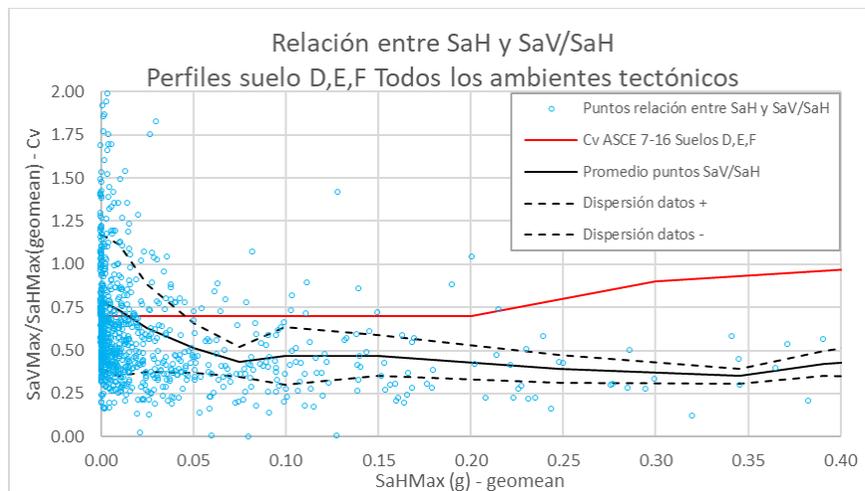


Figura 70 - Relación entre SaH/SaV perfiles de suelo D, E y F, incluye todos los ambientes tectónicos y el parámetro Cv de ASCE 7-16

Fuente: Autor

Debe tenerse presente que el parámetro Cv incluido en ASCE 7-16 al momento de emplearse para construir el espectro de diseño vertical es afectado por un coeficiente de 0.80, y que posteriormente este espectro es afectado por un 2/3 para

aproximarlo a un periodo de retorno de 475 años, datos que ofrece un mejor contexto de la información mostrada. Los resultados de esta condición se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18 - Resultados de la relación V/H para Sa por grupos de tipos de perfiles de suelo incluyendo todos los ambientes tectónicos

Grupo de perfiles de suelo	Relación V/H en función de Sa (Hasta SaH con 80% de datos)	Relación V/H en función de Sa (Todos los datos)	Relación V/H en función de Sa (Registros con SaH > 0.25 g)
Perfiles A y B	0.75	0.63	No disponible
Perfil C	0.67	0.41	No disponible
Perfiles D, E y F	0.69	0.57	0.67

Fuente: Autor

A nivel de conclusión preliminar, los resultados relevantes de relaciones V/H se presentan para el ambiente Cortical y para el grupo que incluye los perfiles de suelo D, E y F cuando se incluyen SaH de interés. Sin embargo, para efectos de las aceleraciones espectrales Sa, es necesario complementar el análisis con una condición en la que se incluya el efecto del periodo natural de la estructura, toda vez que a diferencia del análisis de PGA, para Sa es importante esta variable.

4.1.5 Comparación de formas espectrales (Condición 5)

En las condiciones anteriores se analizó la relación entre componentes V/H teniendo en cuenta las máximas aceleraciones a nivel del terreno y las máximas aceleraciones espectrales, metodología que no consideró en el caso de las segundas, en que rango o valor de periodo se presentaban los picos en cada una de ellas. Como se había mencionado, el periodo es muy importante en las relaciones V/H, motivo por el cual a partir de ahora, basándonos en las relaciones espectrales, se analizarán los resultados teniendo en cuenta la incidencia de esta variable en un rango de 0 a 4 s.

Para cumplir este propósito, nos apoyaremos en la metodología de análisis comparativo entre componentes espectrales vertical y horizontal propuesta por Bozorgnia y Campbell en 2004, la cual entre otras permite una vez se conozca la aceleración espectral horizontal para un periodo $T = 0.1$ s, determinar la aceleración espectral vertical como el producto de esta por el valor de la relación V/H para este periodo como se explicó en el estado del arte de este documento. Mas allá de validar una forma espectral para espectros V/H y para espectros verticales, lo importante aquí es verificar si para ese valor de periodo se presentan los picos en las relaciones V/H y en qué magnitud.

Para esta investigación la clasificación de resultados se realizó en función de los grupos de perfil de suelo propuestos por ASCE 7-16 que son A y B, C y D, E y F, seleccionando el ambiente Cortical que es el ambiente con mayores relaciones V/H, además el que permite comparar de forma aproximada los resultados propuestos por Bozorgnia y Campbell en 2004, quienes tomaron este ambiente tectónico como uno de los parámetros de su investigación. Es importante aclarar que adicional a los filtros indicados en el párrafo anterior, se elaboraron tres relaciones espectrales, una para cada uno de los tres escenarios propuestos en la metodología indicada en el capítulo 3.

Cuando se analizan los perfiles de suelo A y B, el pico más alto de la relación V/H se encuentra a un periodo de 0.10 s con magnitudes comprendidas entre 0.75 y 0.80 aproximadamente, en donde el mayor valor corresponde al escenario 1 con registros cuya distancia epicentral es menor o igual a 60 km. Se muestra un segundo pico a 1.6 s con valores comprendidos entre 0.68 y 0.77 (véase la Figura 71), en este caso el valor más alto corresponde al escenario en el que se incluyen todos los registros con distancias epicentrales de acuerdo con lo definido en el escenario 3. El primer pico se presenta casi en el mismo periodo en el que se presentó en la investigación de Bozorgnia y Campbell en 2004 para roca firme, en la que se obtuvo una magnitud de 1.05 aproximadamente, lo que indica en comparación con nuestros resultados un valor 31% mayor.

El segundo pico obtenido en el presente trabajo de grado coincide con un segundo valor máximo obtenido en la investigación de referencia para el mismo periodo (1.6 s), sin embargo, nuestro resultado está por encima un 17% comparado con el obtenido por Bozorgnia y Campbell, el cual alcanzó para roca firme un valor de 0.58 contra un 0.68 en nuestro caso para distancias epicentrales con magnitudes indicadas en los escenarios 1 y 2 ($\text{Dist Epi} \leq 60 \text{ km}$ y $\leq a 100 \text{ km}$ respectivamente). Hay que tener en cuenta que en la investigación de referencia se usó la clasificación de suelos del IBC 2000, la cual es diferente a la clasificación de suelos actuales en función de V_s30 ; no obstante, la comparación se está realizando entre los rangos de valores más parecidos.

Nótese que al igual que lo encontrado por Bozorgnia y Campbell en 2004, cuando se incluyen mayores distancias epicentrales en roca firme se observa un incremento de las relaciones V/H a partir de un periodo de 0.5 s aproximadamente; de igual manera, coinciden nuestros resultados con los de Bozorgnia y Campbell en cuanto a que las menores relaciones V/H se presentan para periodos comprendidos entre 0.4 y 0.8 s; en todo caso para periodos cortos y para periodos comprendidos entre 1.3 y 1.8 s la relación de 2/3 indicada en NSR-10 no es suficiente para abarcar los efectos de la componente vertical.

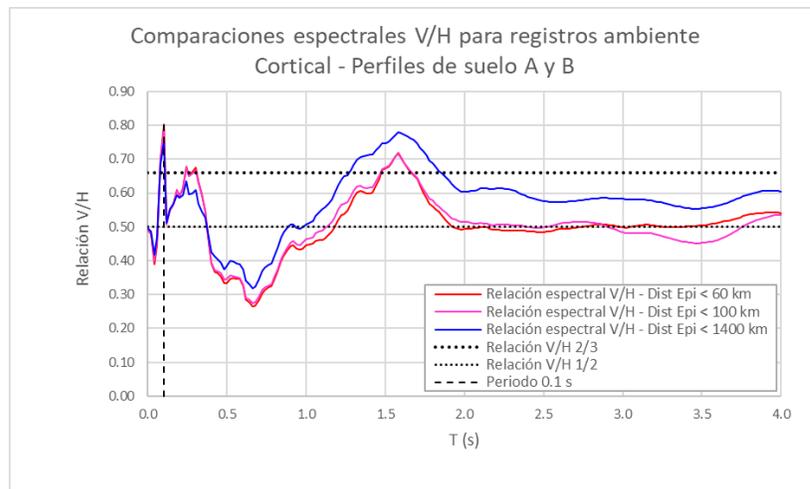


Figura 71 - Comparaciones espectrales V/H en registros del ambiente Cortical y perfiles de suelo A y B tomando como referencia la Dist. Epi.
Fuente: (Autor)

Otros aspectos relevantes indican que para periodos menores a 0.4 s la relación V/H no muestra grandes diferencias cuando se considera una variación representativa en las distancias epicentrales, mientras que a partir de ese valor a mayores distancias epicentrales mayores amplificaciones V/H. A partir de 2.0 s y hasta los 3.5 s la relación entre componentes es ligeramente mayor a 0.5, a partir de 3.5 s la relación se incrementa levemente hasta un valor de 0.55 para un periodo de 4 s, tendencia similar a la encontrada por Bozorgnia y Campbell para roca firme.

Para el perfil de suelo C se presentan dos picos de relación V/H, el primero a un periodo de 0.06 s con una magnitud comprendida entre 0.6 y 0.69 en la que el menor valor corresponde al escenario 1, y el segundo y más alto a un periodo entre 1.86 y 1.92 s con una magnitud que varía entre 0.70 y 0.82, en este caso el mayor valor corresponde al escenario 1 (véase la Figura 72). Se mantiene en este perfil de suelo la tendencia de encontrar las menores relaciones V/H para rangos de periodos comprendidos entre 0.4 y 0.8 s aproximadamente; sin embargo, a excepción del segundo pico los mayores valores de V/H se obtienen para los casos en que se incluyen mayores distancias epicentrales. Para este caso a excepción del rango de periodos comprendidos entre 1.6 y 2.1 s, la relación de 2/3 propuesta en NSR-10 es conservadora para valores de periodos menores a 1.5 s y levemente conservadora para valores de periodo superiores a 2.1 s.

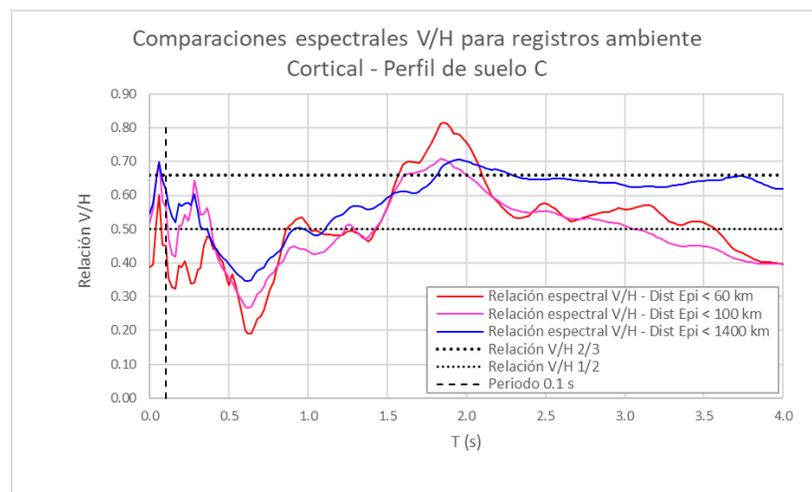


Figura 72 - Comparaciones espectrales V/H en registros del ambiente Cortical y perfil de suelo C tomando como referencia la Dist. Epi.

Fuente: (Autor)

Para el alcance del presente trabajo, los valores definidos como útiles son los del primer pico V/H, pues las estructuras de interés para esta investigación y sus elementos no estructurales tienen periodos naturales verticales generalmente menores a 0.26 s; adicionalmente, para periodos superiores a 0.5 s es recomendable usar espectros verticales específicos de sitio (Bozorgnia & Campbell, 2004). Por otra parte, los escenarios importantes son el 1 (DistEpi < 60km) y el 2 (DistEpi < 100 km) que además, a diferencia del grupo de perfil de suelo C no muestran diferencias significativas entre sí; lo anterior teniendo en cuenta que las magnitudes de las aceleraciones espectrales son mayores para menores distancias epicentrales, siendo estas las que pueden generar daño significativo sobre las estructuras y sus componentes.

Para terminar, se muestran los resultados de los perfiles D, E y F (véase la Figura 73), los cuales muestran la mayor aproximación en cuanto a su forma con los espectros propuestos por los investigadores Elnashai y Papazoglou en 1997, Bozorgnia y Campbell en 2004 y Kale y Akkar en 2020. En este caso es claro que las máximas relaciones V/H se presentan en el rango de periodos cortos y para las menores distancias epicentrales.

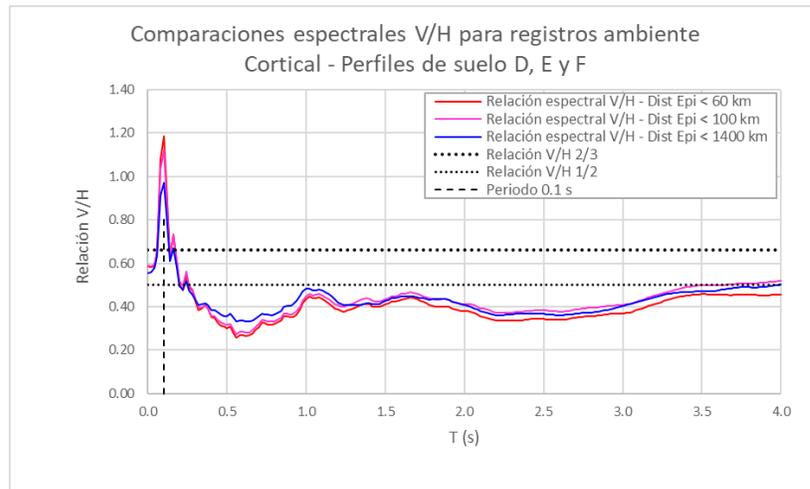


Figura 73 - Comparaciones espectrales V/H en registros del ambiente Cortical y perfiles de suelo D, E y F tomando como referencia la Dist. Epi.
Fuente: (Autor)

El pico de relaciones V/H se ubica en un periodo de 0.10 s con magnitudes que oscilan entre 0.96 y 1.18, donde el mayor valor corresponde a las menores distancias epicentrales. Nótese además que para este caso solo se presenta un pico, y que para periodos superiores a los 0.25 s y hasta los 4 s una relación V/H de 0.5 es adecuada, condición que difiere de los grupos de perfiles de suelo anteriores. En cuanto a la distancia epicentral, a excepción de lo que se observa en periodos cortos no se evidencian variaciones significativas cuando se incrementan los valores de distancia epicentral.

Estos valores de relaciones V/H son conservadores si se comparan con los propuestos como valores máximos de C_v en la tabla 11.9-1 del documento ASCE 7-16, lo que sumado a otros resultados ya indicados permitirán recomendar más adelante la conveniencia o no de adoptar los criterios ahí mencionados para nuestro reglamento.

Tabla 19 - Valores de interés para las relaciones V/H analizadas cuando se incluye la incidencia del periodo

Grupo de perfil de suelo	Periodos en los que se presenta V/H máximos.	Valores V/H en periodos indicados.
Perfiles A y B	0.10 s y 1.6 s	0.75 a 0.80 y 0.68 a 0.77
Perfil C	0.06 s y 1.9 s	0.60 a 0.69 y 0.70 a 0.82
Perfiles D, E y F	0.10 s	0.96 a 1.18

Fuente: (Autor)

Los resultados obtenidos en el presente trabajo, que son los mostrados en la Tabla 19, son consistentes con los que obtuvieron Bozorgnia y Campbell en 2004, estos indican que la relación V/H es fuerte en periodos cortos comprendidos entre 0.05 y 0.10 s, rangos donde se registran valores máximos, y valores mínimos entre 0.4 s y 0.8 s. Además de que la dependencia de V/H con respecto a la distancia epicentral es muy diferente para suelo firme en comparación con los otros tipos de perfil de suelo (Bozorgnia & Campbell, 2004).

4.1.6 Análisis de resultados relación V/H entre componentes sísmicas.

- a. Se parte del hecho que aunque son pocos los registros capaces de producir espectros con aceleraciones espectrales $SaH > 0.25$ g, se consideran válidas las relaciones V/H obtenidas. Esto, teniendo en cuenta que para PGA y Sa , las parejas de datos representan una tendencia afín con la encontrada en la bibliografía revisada. Por otra parte, cuando no se distingue por magnitudes de PGA y Sa , se dispuso de una cantidad representativa de datos que confirman las tendencias encontradas en los registros relevantes.
- b. En el análisis de la relación V/H en función de PGA por ambiente tectónico (Condición 1), las mayores magnitudes se obtuvieron para el ambiente Cortical con un valor de 0.57 cuando se incluyen todos los resultados, y de 0.66 cuando solo se incluyeron los registros con $PGA > 0.10$ g. En este caso, el segundo resultado obtenido es igual al mínimo sugerido en NSR-10 cuando el periodo es igual a cero ($PGA V$), y es conservador con respecto al recomendado en ASCE 7-16 en la ecuación 11.9-1 ($SaMv=2/3(0.3CvSMS)$) incluyendo lo indicado en 11.9.3.
- c. Los resultados de V/H en función de PGA por grupos de perfil de suelo (Condición 3), mostraron que los valores relevantes se obtienen en los perfiles de suelo D, E y F con una magnitud de 0.54 cuando se incluyen todos los registros y de 0.66 cuando se incluyen los registros con $PGA > 0.10$ g. Al igual que en el caso anterior, los valores no exceden el $2/3$ recomendado en NSR-10 mínimo, y es conservador con respecto a los valores de Cv indicados en ASCE 7-16 para $T = 0$ s. Para los perfiles de suelo restante en ninguno de los casos se excede una relación V/H de 0.55.
- d. Realizado el análisis en función de Sa por ambiente tectónico (Condición 2), las mayores relaciones V/H ocurren en el ambiente Cortical con una magnitud de 0.74 cuando se incluyen todos los registros, y de 0.89 cuando solo se analizan los registros con magnitudes de $SaH > 0.25$ g. Esta relación es mayor a la mínima sugerida en NSR-10 para relaciones espectrales de la componente V con respecto a la H para periodos diferentes a cero; además, indica que las relaciones V/H pueden aumentar cuando se incrementa el valor de SaH , condición concordante con lo establecido en ASCE 7-16.

Para este análisis lo propuesto por NSR-10 como valor mínimo tendría que revisarse en cuanto el ambiente Cortical cubre todo el territorio nacional. Por otra parte, los valores de C_v propuestos en ASCE 7-16, cubren los resultados obtenidos cuando no se afectan por el factor de 0.8 indicado en la ecuación 11.9-3 y por el $2/3$ para aproximarlos a un periodo de retorno de 475 años.

- e. Con base en los registros considerados importantes en los distintos escenarios de análisis para el ambiente Cortical y de Subducción, se observó que la distancia epicentral tiene influencia en el efecto de la componente vertical, evidenciándose que a menor distancia mayores relaciones V/H; sin embargo, desde este punto de vista, los resultados de los coeficientes de variación obtenidos ($R^2 < 0.50$), y el número limitado de registros que cumplen $SaH > 0.25$ g, no permiten realizar recomendaciones cuantitativas al respecto y solo se coloca el análisis como información de referencia.
- f. Se evidenció que las mayores relaciones V/H se presentan en los ambientes tectónicos Cortical y de Subducción (Condiciones 1 y 2), esto indica que esta relación en parte depende de la profundidad del hipocentro, observándose que a menores distancias hipocentrales mayores relaciones V/H.
- g. En cuanto al efecto de la distancia epicentral, cuando se realizan las comparaciones espectrales V/H en función de grupos de perfiles de suelo para el ambiente Cortical (Condición 5), se encontró que para periodos inferiores a 0.36 s en perfiles A y B, las relaciones V/H son mayores para distancias epicentrales menores a 100 km; mientras que para valores superiores a 0.36 s las mayores relaciones V/H se muestran cuando se incluyen los registros con distancias epicentrales que van hasta los 1.400 km. En perfiles tipo C no hay un parámetro definido pero es claro que la relación V/H aumenta para periodos superiores a 2.0 s cuando se consideran mayores distancias epicentrales. Para perfiles D, E y F, la tendencia es prácticamente igual para todas las condiciones de distancia epicentral analizadas, a excepción para nuestro interés de periodos entre 0.08 y 0.12 s donde predomina el efecto de distancias epicentrales menores a 60 km.
- h. Las comparaciones de formas espectrales verticales con respecto a las horizontales, muestran que las condiciones críticas se presentan en los

perfiles de suelos D, E y F con valores V/H para periodos de 0.10 s de hasta 1.18, siguen en importancia los perfiles de suelo A y B con valores de relaciones V/H de 0.75 a 0.80 para periodos de 0.10 s, por ultimo las menores relaciones V/H en relaciones espectrales fueron las del perfil de suelo tipo C con valores V/H comprendidos entre 0.60 y 0.69 para periodos de 0.06 s. Este hecho es consistente con lo encontrado en los resultados de la condición 4 en la cual los mayores valores de relación V/H fueron para los perfiles de suelo A y B y para los perfiles de suelo D, E y F.

4.2 Resultados para los efectos de la componente sísmica vertical

Se indicó en el capítulo 3 que el propósito general consistió en conocer cuáles eran las sollicitaciones con las que se diseñarían los elementos de ambos arquetipos estructurales cuando se someten a la componente sísmica horizontal, y como varían esas sollicitaciones cuando se incluye además de la componente H la componente sísmica V tanto para un análisis espectral como para un análisis dinámico lineal. A partir de ahora se socializarán los resultados obtenidos con los aspectos más relevantes de estos para las vigas, columnas y muros seleccionados, lo cual permitirá dar cumplimiento a los objetivos 3 y 4.

Para diferenciar los resultados, se aclara nuevamente que se compararon los de las combinaciones que incluyen horizontal más la componente V en un 30% (0.30V) y en un 100% (1.0V) con respecto a las combinaciones que solo incluyen la componente H; de este modo se obtuvo la relación V/H correspondiente en cuanto a sollicitaciones se refiere, lo que guarda relación directa con parte de la respuesta de la estructura. Además, debe tenerse presente que estos resultados para el ADE están asociados a un espectro de diseño vertical que corresponde a las 2/3 partes del espectro de diseño H acorde a lo definido en NSR-10; para el caso del ADL corresponden a acelerogramas reales escalados. Cuando se habla de las combinaciones que incluyen la componente vertical debe entenderse que la misma está acompañada de la componente horizontal (V+H).

Para facilitar la lectura de la información, las relaciones V/H en columnas que incluyen la componente V con una participación del 30% en la combinación se identificaron con una línea continua o punteada con cuadrados solidos como marcadores (■); por su parte, cuando la participación es del 100% el marcador usado es un triángulo (▲). Adicionalmente, la carga axial se indicó con una línea punteada color morado, el corte con una línea continua color rojo y el momento con una línea continua color naranja. Para las vigas se usa el mismo tipo de marcador, pero en este caso el cuadrado se refiere a las relaciones V/H en los extremos de la viga y el triángulo en el centro de la luz.

4.2.1 Resultados para el edificio de 5 pisos

A continuación se mostrarán en términos generales los resultados obtenidos para las relaciones V/H, información complementaria podrá revisarse en los Anexo W.

4.2.1.1 Columnas

Para este arquetipo se analizaron tres columnas. La C1 como elemento de esquina con la de menor área aferente y menor carga gravitacional; la C2 que es una columna exterior con área aferente y carga gravitacional ubicados en un nivel intermedio; y por último la C6 que es una columna interior cuya área aferente y cargas gravitacionales son las de mayor magnitud.

En la columna C1 para el ADE se obtuvo un incremento máximo de 14% en el piso 4 y 5 y un mínimo del 4% en el piso 1. Por otra parte, para el ADL el incremento mínimo de carga axial fue del 10% en el piso 1 y el máximo del 29% en el piso 4; valores registrados cuando las combinaciones de carga incluían el 100% de la componente V y el 30% de las componentes H. Así mismo, estos mayores valores de carga axial estuvieron acompañados de disminuciones en las relaciones V/H por corte para los pisos 1 y 4 en ambos análisis, en el ADE variaron entre 0.42 y 0.69 y en el ADL entre 0.39 y 0.61, en el piso 5 se presentó en ambos casos un incremento en esta sollicitación del 11% y 19%. Por último, las sollicitaciones de flexión en ambos

análisis presentaron relaciones V/H menores a 1.0, con excepción del caso en el que se analiza el eje de menor inercia para el cual solo en el piso 5 el incremento es del 9% para el ADE y del 28% para el ADL (véanse las Figuras 74 y 75).

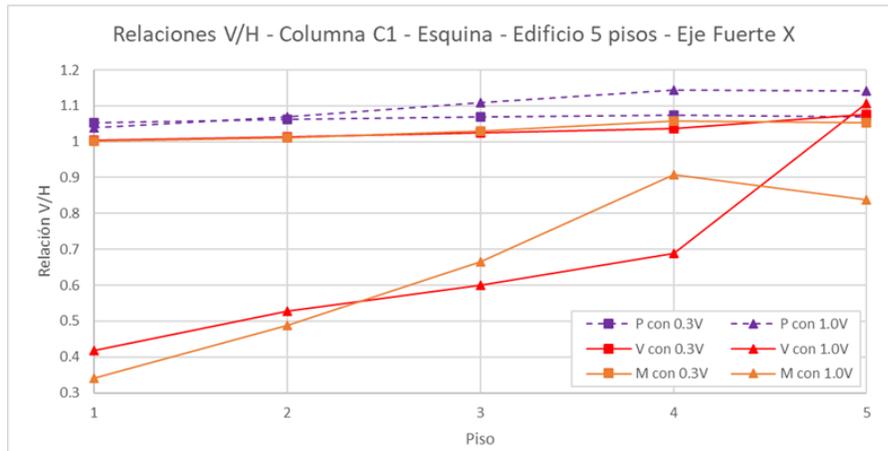


Figura 74 - Efecto componente V para V, M y P en la columna C1 edificio 5 pisos (X) ADE
Fuente: Autor

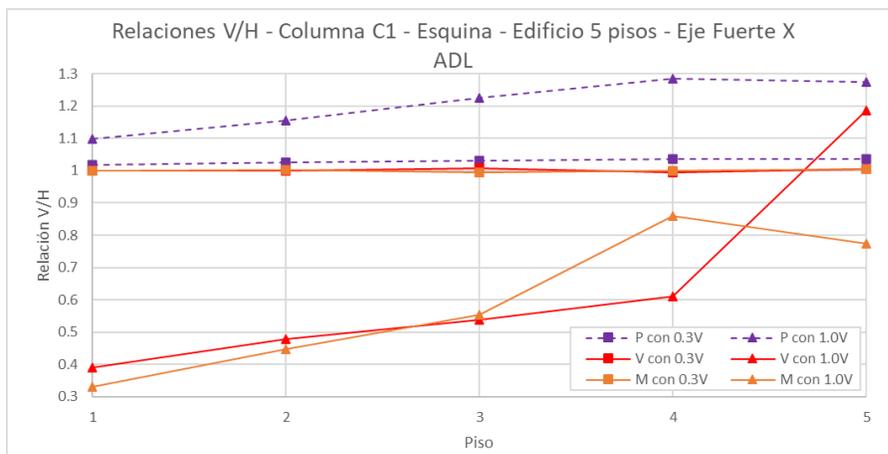


Figura 75 - Efecto componente V para V, M y P en la columna C1 edificio 5 pisos (X) ADL
Fuente: Autor

En la columna C2 los resultados indican incrementos en cargas axiales para el ADE de mínimo 18% en el piso 1 y de 25% máximo en el piso 4; en cuanto al ADL los valores para los mismos niveles sugieren un aumento del 37% y 49% respectivamente. Estos resultados pertenecen al escenario en el que se considera 1.0V en las combinaciones, y como en el caso anterior, los mayores valores de carga axial estuvieron relacionados con disminuciones en los esfuerzos de corte y flexión

de los pisos 1 al 4, donde las relaciones V/H son significativamente menores a 1.0, se mantiene la excepción indicada en la columna C1 en cuanto para el piso 5 se presentaron solicitudes para V y M superiores a la unidad (véanse las Figuras 76 y 77).

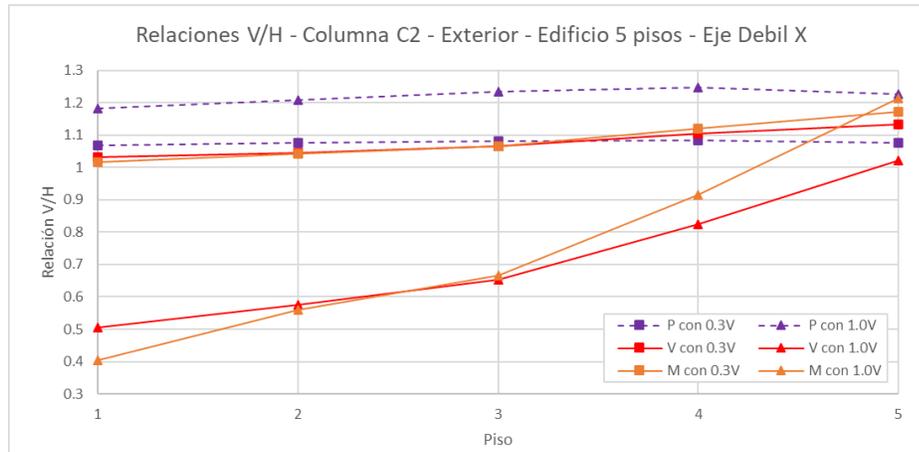


Figura 76 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C2 edificio 5 pisos (X) ADE
Fuente: Autor

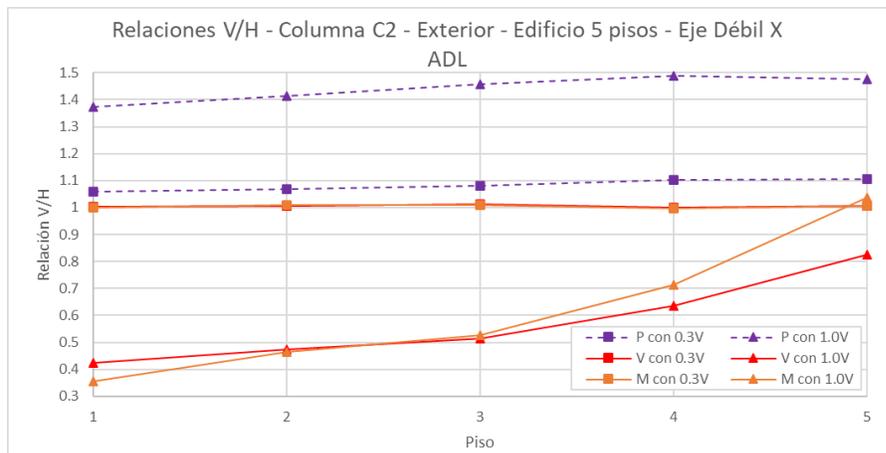


Figura 77 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C2 edificio 5 pisos (X) ADL
Fuente: Autor

Las Figuras 78 y 79 muestran los resultados obtenidos para el ADE y ADL de la última columna estudiada en el edificio de 5 pisos, la columna C6.

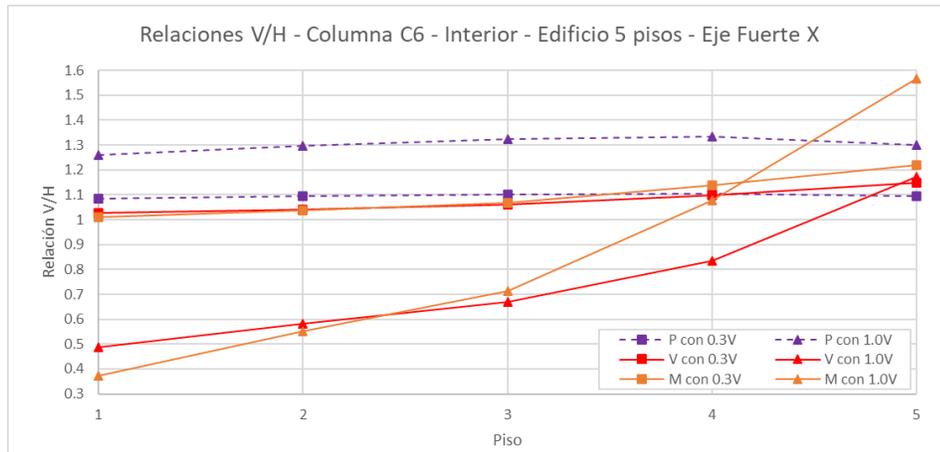


Figura 78 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C6 edificio 5 pisos (X) ADE
Fuente: Autor

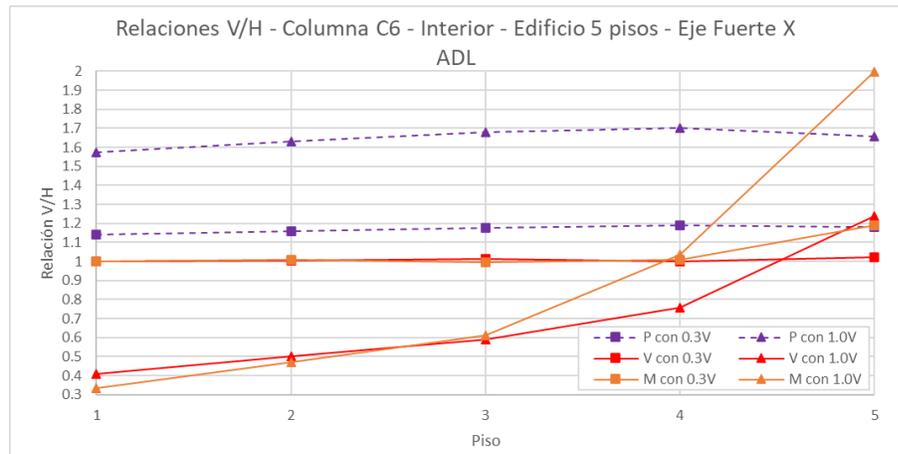


Figura 79 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C6 edificio 5 pisos (X) ADL
Fuente: Autor

Los aumentos de carga axial para el ADE tuvieron su menor valor en el piso 1 con un 26% y un máximo en el 4 del 34%; en el ADL los incrementos evidenciados son del 57% para el piso 1 y del 70% en el 4. Para ambos análisis las solicitaciones de corte y flexión tienen relaciones V/H inferiores a 1.0 entre los pisos 1 y 3, a partir del piso 4 estas relaciones son mayores a 1.0 hasta alcanzar un valor límite máximo V/H para flexión en el ADL de 2.0 para el piso 5.

A continuación, en la Tabla 20 se muestra el resumen de los resultados más representativos en cuanto a relaciones V/H para las columnas analizadas, que en este caso obedecen a los del Análisis Dinámico Lineal.

Tabla 20 - Resumen de resultados representativos en las columnas del edificio de 5 pisos

Elemento	V considerada con el 100% (1.0V) en combinaciones			PISOS
	Incremento de P	Relación V/H para V	Relación V/H para M	
C1 Esquina	10% - 29%	0.39 - 0.61	0.33 - 0.86	1 - 4
C2 Exterior	37% - 49%	0.43 - 0.82	0.36 - 1.04	1 - 5
C6 Interior	57% - 70%	0.41 - 1.24	0.40 - 2.00	1 - 5

Elemento	V considerada con el 30% (0.30V) en combinaciones			PISOS
	Incremento de P	Relación V/H para V	Relación V/H para M	
C1 Esquina	2% - 4%	1.00	1.00	1 - 4
C2 Exterior	6% - 10%	1.00	1.00	1 - 5
C6 Interior	14% - 18%	1.00 - 1.02	1.00 - 1.19	1 - 5

Fuente: Autor

Los resultados anteriores muestran que la componente V incrementa algunas solicitaciones en las columnas analizadas. En razón a esto, y dando un alcance inicial de revisión, en el Anexo X se realiza un chequeo para establecer si el diseño de la columna interior C6 en el piso 1, requiere alguna variación en su diseño a flexo-compresión cuando se considera la componente V. Las características de este diseño en cuanto a especificaciones de materiales, dimensiones y cantidad de refuerzo obedecen a solicitaciones que solo incluyen la componente H en un Análisis Dinámico Espectral. Es pertinente aclarar, que el diseño para el arquetipo de 5 pisos arrojó que en cuanto al refuerzo, las columnas satisfacen los requerimientos de la estructura con una cuantía mínima del 1%. Los aspectos generales relacionados con este párrafo se mencionarán en el análisis de resultados.

4.2.1.2 Vigas

Se seleccionaron dos vigas por considerarse representativas de las restantes que hacen parte de la estructura, una viga es exterior y la otra interior, los resultados obtenidos de relaciones V/H corresponden a los extremos y centros de luz.

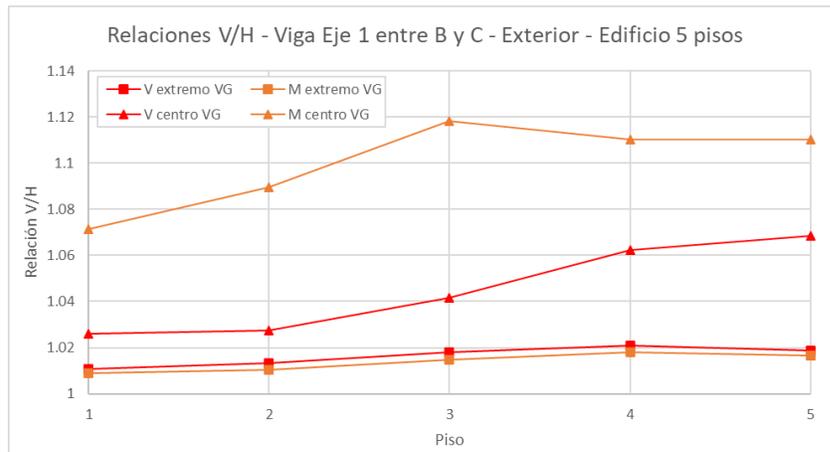


Figura 80 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga exterior edificio 5 pisos ADE
Fuente: Autor

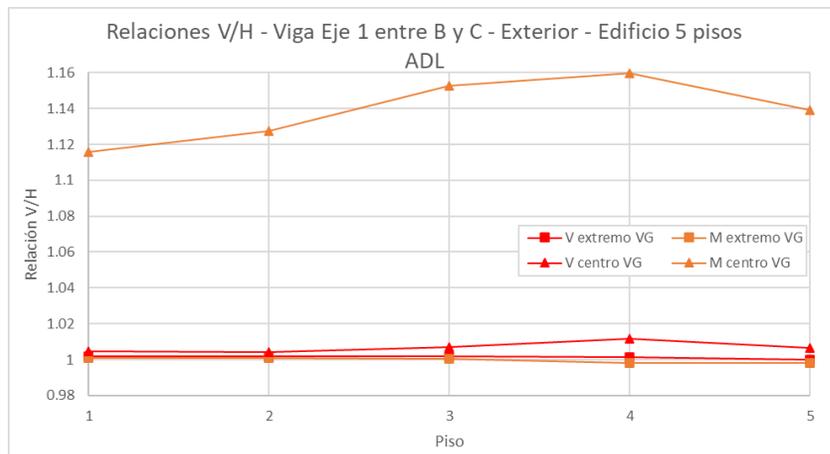


Figura 81 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga exterior edificio 5 pisos ADL
Fuente: Autor

En la viga 1 entre ejes B y C que corresponde a un elemento exterior, se evidencian relaciones V/H para el ADE de 1.12 máximo para flexión en el piso 3 y mínimo de 1.07 en el piso 1 cuando se considera el 100% de la componente V; para el cortante el valor mínimo se presenta en el piso 1 con una relación V/H de 1.03 y un máximo en el piso 5 de 1.07; en los extremos de la viga las relaciones V/H para corte y flexión no superan el valor de 1.02, lo que sugiere incrementos poco significativos. El ADL en este elemento mostró incrementos en el centro de la luz para relaciones V/H a

flexión de 1.16 máximo en el piso 4 y mínimo de 1.12 en el piso 1; las relaciones V/H para el centro de la luz y de flexión y corte en los extremos mostraron relaciones V/H sin variaciones significativas ($V/H=1.0$) (véanse las Figuras 80 y 81).

El siguiente elemento considerado es la viga 2 entre ejes B y C que corresponde a un elemento interior que supone más área aferente y mayor carga gravitacional que el elemento anterior (véanse las Figuras 82 y 83). Los resultados de relaciones V/H para el análisis dinámico espectral en el centro de la luz sugieren magnitudes de máximo 1.09 en el piso 3 y de mínimo 1.06 en el piso 1 para flexión, para el corte los valores varían entre 1.03 en el piso 1 y de 1.06 en el piso 5. Para este mismo sector de la viga el ADL muestra incrementos máximos de 1.16 en el piso 3 y de 1.12 en el piso 1 para flexión, las relaciones para corte en esta sección no tienen variaciones significativas.

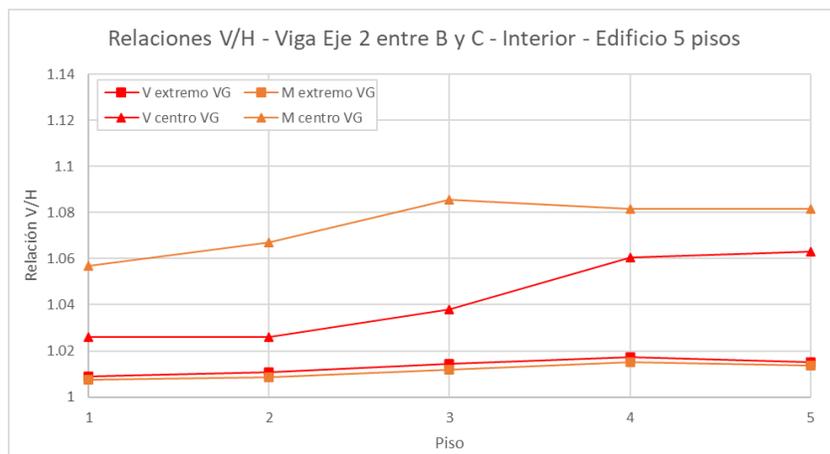


Figura 82 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga interior edificio 5 pisos ADE
Fuente: Autor

En cuanto a los extremos de la viga el ADE mostró que los valores de relaciones V/H no superan 1.02 para corte y flexión, mientras que estas magnitudes en esta sección para el ADL no presenta variaciones significativas ($V/H=1.0$).

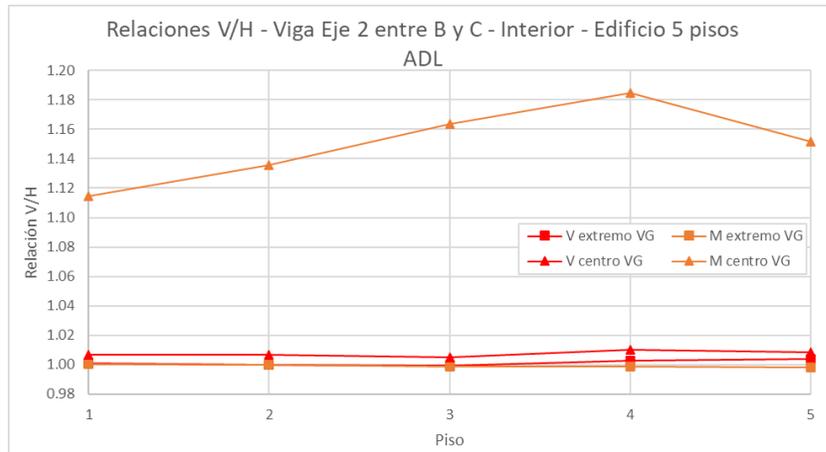


Figura 83 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga interior edificio 5 pisos ADL
Fuente: Autor

Los resultados esbozados hasta aquí son algunos de los obtenidos para las combinaciones en las que se consideró la componente vertical en un 100% (1.0V); en los anexos O y W se pueden observar las relaciones V/H para las combinaciones en las que la componente vertical se consideró como un 30% (0.3V), resultados que deben ser analizados con igual cuidado en cuanto a que en ellos se presentaron incrementos de carga axial no tan representativos pero acompañados de solicitaciones de corte y flexión con relaciones V/H iguales o superiores a la unidad; además se muestran los resultados de los elementos en los ejes de menor inercia, aunque se advierte que las variaciones en la mayoría de los casos no son significativas. Aunque para las vigas se usaron combinaciones tipo envolvente, una revisión detallada de los resultados mostró que los mayores valores de relaciones V/H se obtienen para combinaciones que incluyen la componente V como 1.0V.

4.2.2 Resultados para el edificio de 15 pisos

Para este arquetipo se analizan los resultados de una columna exterior C1, de un muro de esquina M1, de un muro interior M5, de una viga exterior y de una viga interior; estos elementos coinciden con la ubicación geométrica en planta de los elementos estudiados en el arquetipo de 5 pisos.

4.2.2.1 Columna

Cuando se revisan las combinaciones de carga que incluyen 1.0V, la carga axial tiene incrementos entre el 1% y 7% en los pisos 1 y 4 respectivamente, entre el piso 5 y 9 los incrementos varían entre el 11% y el 33%, y los mayores valores se evidencian en los pisos 10 al 15 donde las magnitudes de carga axial superan un 40% alcanzando en estos niveles su valor máximo de 55% en el piso 13. Estos resultados se combinan con relaciones V/H para corte menores a 1.0 entre los pisos 1 y 13, en el piso 14 no hay variaciones ($V/H=1.0$) y en el 15 el incremento es solo del 2%. En cuanto a las solicitaciones de flexión, entre los pisos 1 y 13 las relaciones V/H son menores a 1.0 y para los pisos 14 y 15 aumentan un 3 y 5% (véase la Figura 84).

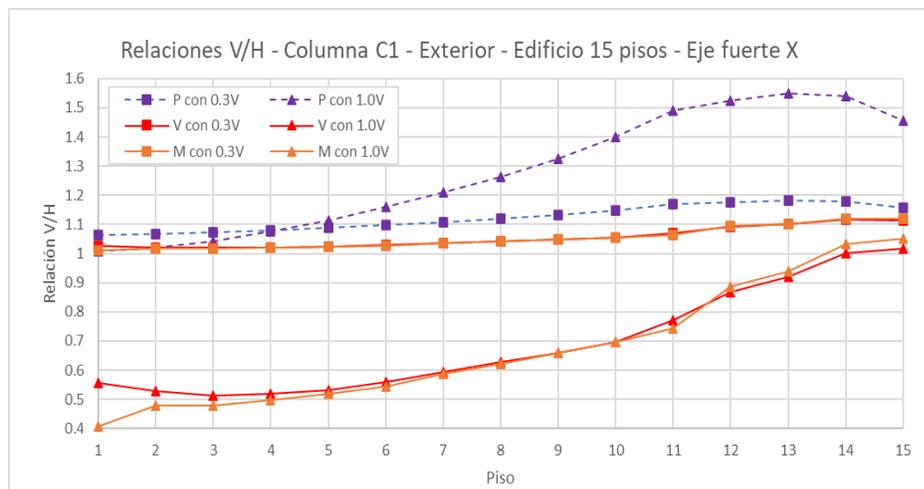


Figura 84 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C1 edificio 15 pisos (X) ADE
Fuente: Autor

Los resultados del ADL muestran por los mismos puntos de comparación, entre el piso 1 y 4 las relaciones V/H para carga axial varían entre 0.97 y 1.03 (en pisos 1 y 2 $V/H < 1.0$), entre los pisos 5 y 9 los incrementos varían casi linealmente entre el 6% y el 27%, por último, las variaciones entre los pisos 10 y 15 muestran los mayores incrementos con magnitudes que van desde un 34% hasta un 47% con este valor máximo en el piso 13 con respecto a un 55% en el mismo piso obtenido

para el ADE. Las relaciones V/H para corte y flexión permanecen en todos los pisos menores a 1.0 con un valor mínimo de 0.37 y máximo de 0.86 (véase la Figura 85).

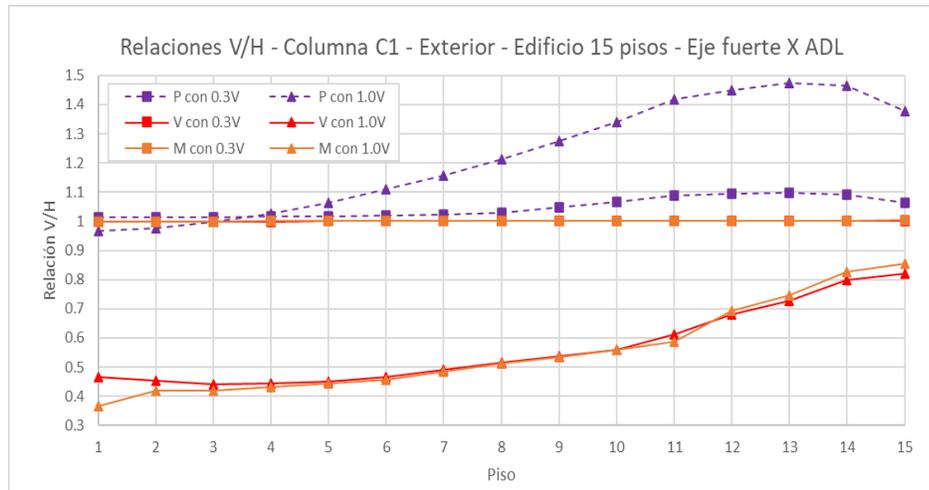


Figura 85 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C1 edificio 15 pisos (X) ADL
Fuente: Autor

En este elemento no se evidenciaron variaciones significativas en las relaciones V/H marcadas por las tendencias de los gráficos elaborados si se tiene en cuenta en el análisis el eje de mayor o menor inercia. Así mismo, se observaron unos incrementos por las relaciones V/H en la parte superior (top) de columnas y muros en los pisos 13 y 14, sin embargo estos valores de relaciones V/H solo son relevantes en los elementos verticales de los pisos superiores.

4.2.2.2 Muro de esquina M1

Los muros en particular se analizaron con las solicitaciones que actúan en su plano, pues sus condiciones de apoyo los restringen a que en el plano perpendicular existan solicitaciones de mayor relevancia. En el mismo sentido, se realizó un análisis cuando la componente sísmica horizontal se considera 100% en el eje global X y otra cuando actúa el 100% en el eje global Y, en ambos casos considerando la regla de combinación definida y la componente sísmica vertical del 30% y 100%. Se hablará solo de los resultados que atañen al 100% del efecto sísmico actuando en su plano por ser las de mayor relevancia e interés.

Cuando se considera en las combinaciones el 1.0V, en el ADE los valores máximos de incrementos en carga axial se presentan en los pisos 2 y 3 con magnitudes del 18% y 22% respectivamente. En los pisos ubicados entre el 1 y el 12 los incrementos varían entre un 5% y un 17%, del piso 13 al 15 las relaciones V/H son menores a 1.0. En cuanto al corte, a excepción del piso 15 donde se presenta una relación V/H de 1.07, las relaciones son menores a 1.0 con un rango que oscilan entre un 0.34 y 0.94. Finalmente la flexión en todos los pisos tiene relaciones V/H menores a 1.0 con valores que varían entre 0.32 y 0.94 (véase la Figura 86).

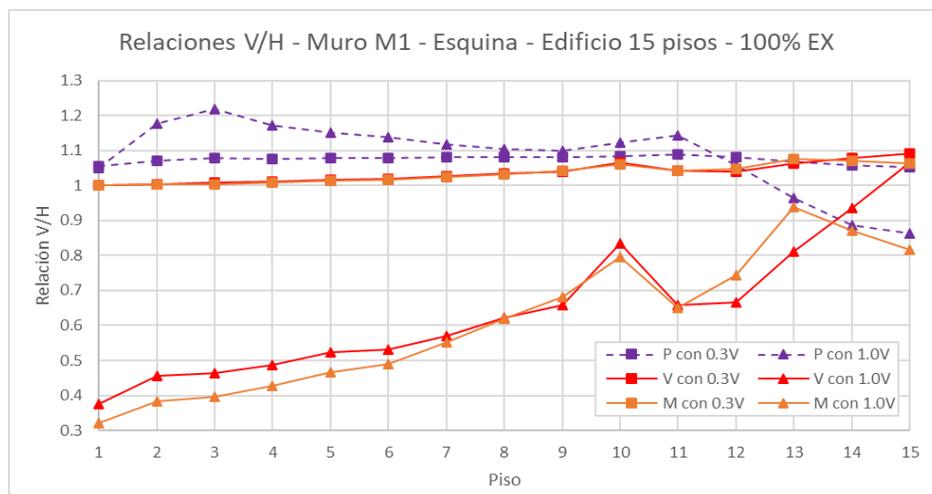


Figura 86 - Efecto componente V para V, M y P en el muro M1 edificio 15 pisos (X) 100% EX ADE Fuente: Autor

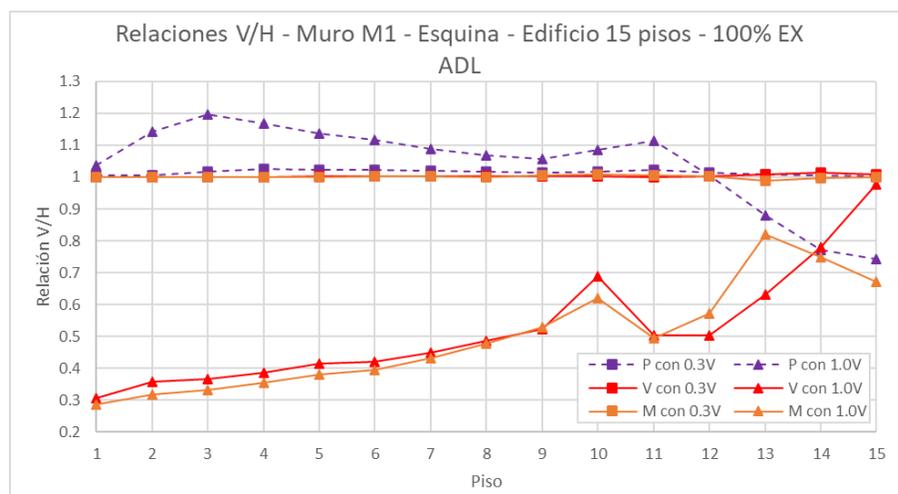


Figura 87 - Efecto componente V para V, M y P en el muro M1 edificio 15 pisos (X) 100% EX ADL Fuente: Autor

Los resultados del ADL muestran como en el caso de la columna C2 disminuciones en las relaciones V/H. Sigue manteniéndose el incremento máximo en el piso 3 con un 20% y continua en orden de magnitud el piso 4 con un incremento del 17%; en los pisos restantes del 1 al 11 los incrementos varían entre un 4% y 11%, en el piso 12 el incremento es apenas del 1% y en los pisos 13 a 15 las relaciones V/H son menores a 1.0. Por otra parte las relaciones V/H de corte y flexión que acompañan estos resultados, en todos los pisos son menores a 1.0 con sus menores magnitudes en los pisos inferiores y las que se acercan a 1.0 en los pisos superiores (véase la Figura 87).

4.2.2.3 Muro interior M5

Los resultados del ADE mostrados en la Figura 88, muestran los mayores incrementos de carga axial en el piso 2 y 3 con valores de 20% y 19% y en el piso 11 con un 22%. El incremento en la carga axial del primer piso es del 11% con respecto a un 5% del muro de esquina en el mismo nivel, adicionalmente, de los pisos 4 al 12 los incrementos varían entre un 14% y un 17%, rango de valor mayor a los evidenciados en el muro M1. Con respecto a las solicitaciones de corte y flexión, en todos los pisos la relación es menor a 1.0, manteniéndose muy cercana a 0.35 entre los pisos 1 y 14 y sobre 0.70 para el piso 15.

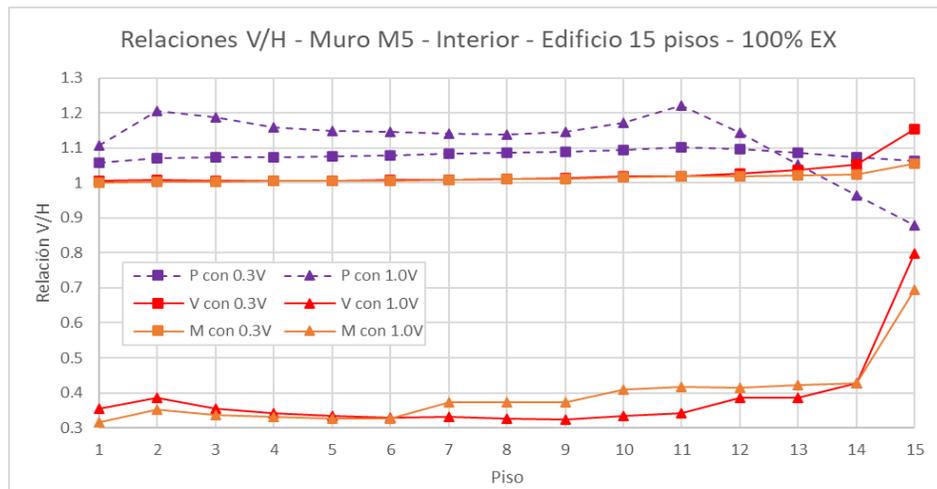


Figura 88 - Efecto componente V para V, M y P en el muro M5 edificio 15 pisos (X) 100% EX ADE
Fuente: Autor

Los resultados del ADL mostrados en la Figura 89, son muy parecidos a los obtenidos en el ADE en su forma y adicionalmente en su orden de magnitud. En estos casos de análisis en los que se están tomando como referencia los resultados de las combinaciones que incluyen en la componente vertical 1.0V, los mayores aumentos de carga axial se muestran en el piso 2 con un 18%, y en los pisos 3 y 11 con un 20%. En el piso 1 el incremento equivale a un 10% y en los pisos del 4 al 12 varía entre un 9% y 15%, en los pisos del 13 al 15 la relación V/H es menor a 1.0.

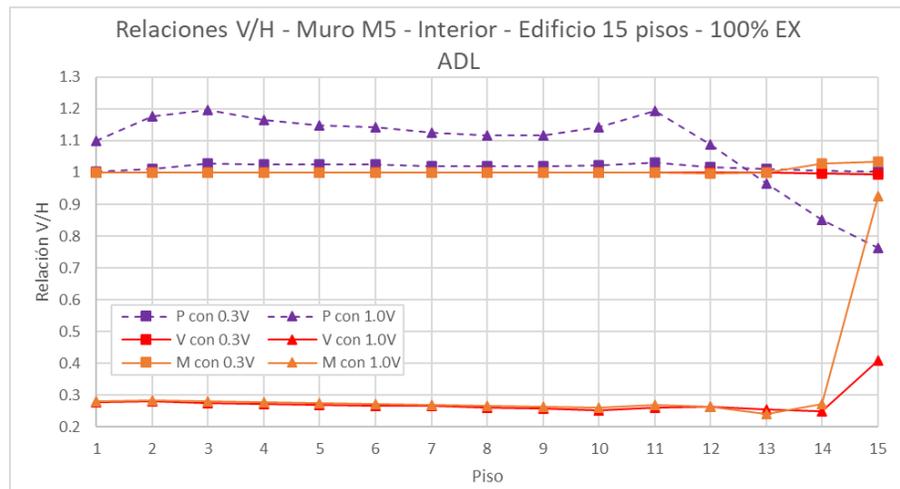


Figura 89 - Efecto componente V para V, M y P en el muro M5 edificio 15 pisos (X) 100% EX ADL
Fuente: Autor

Como en los resultados del ADE las relaciones V/H para corte y flexión se mantienen inferiores a 1.0 en todos los pisos, con la diferencia que en este caso desciende hasta un promedio de 0.28 aproximadamente para los pisos del 1 al 14, en el piso 15 la relación V/H para flexión aumenta hasta 0.93 y el corte hasta 0.41.

En la Tabla 21 se muestra el resumen de los resultados más representativos en cuanto a relaciones V/H para muros y para la columna exterior, en este caso se muestran los resultados obtenidos a través del ADL. Es pertinente aclarar que se indican estos resultados toda vez que no hay variaciones representativas con respecto a los obtenidos en el ADE, adicionalmente, estos ofrecen resultados más aproximados a la realidad de la respuesta de la estructura.

Tabla 21 - Resumen de resultados representativos en muros y columnas del edificio de 15 pisos

Elemento	V considerada con el 100% (1.0V) en combinaciones			PISOS
	Incremento de P	Relación V/H para V	Relación V/H para M	
C1 Exterior	0.97 - 47%	0.47 - 0.80	0.37 - 0.83	1 - 14
M1 Esquina	20% - 11%	0.37 - 0.50	0.33 - 0.49	3 - 11
M5 Interior	20%	0.28 - 0.26	0.28 - 0.27	3 - 11

Elemento	V considerada con el 30% (0.30V) en combinaciones			PISOS
	Incremento de P	Relación V/H para V	Relación V/H para M	
C1 Exterior	2% - 10%	1.00	1.00	3 - 13
M1 Esquina	2%	1.00	1.00	2 - 11
M5 Interior	3%	1.00	1.00	3 - 11

Fuente: Autor

4.2.2.4 Vigas

En la viga exterior del eje 1 entre ejes B y C se conserva la tendencia de obtener valores más relevantes para el centro de la viga que para los extremos (véase la Figura 90). A través del ADE los incrementos cerca a los nudos no superan el 2.6% para corte y el 1.9% para flexión, perteneciendo estos valores a los pisos superiores. En cuanto al centro de la viga, se registraron incrementos máximos para corte de 3.94% mientras que para flexión se acercaron al 16.15%, en ambos casos para los pisos más altos.

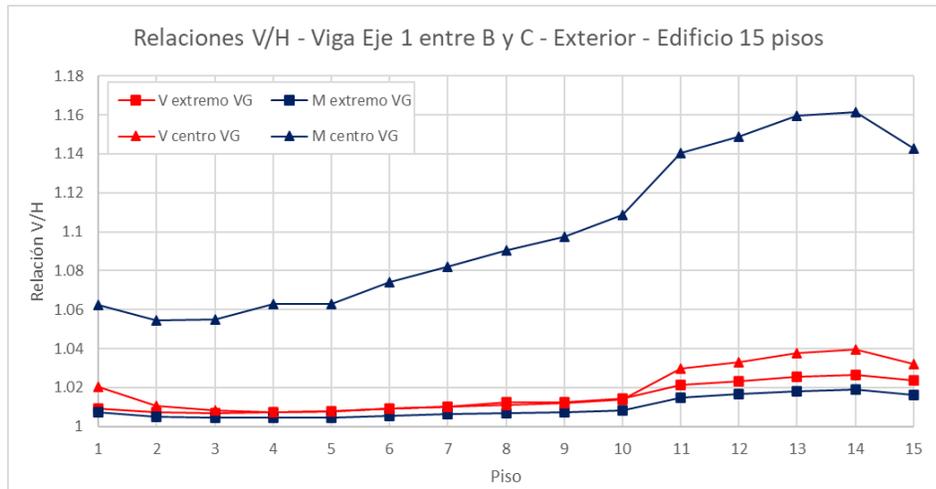


Figura 90 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga exterior edificio 15 pisos ADE
Fuente: Autor

El ADL muestra un comportamiento similar pero con relaciones V/H levemente menores, en los extremos las variaciones V/H no son significativas, varían entre 0.99 y 1.001 lo que en términos prácticos es 1.0 (véase la Figura 91).

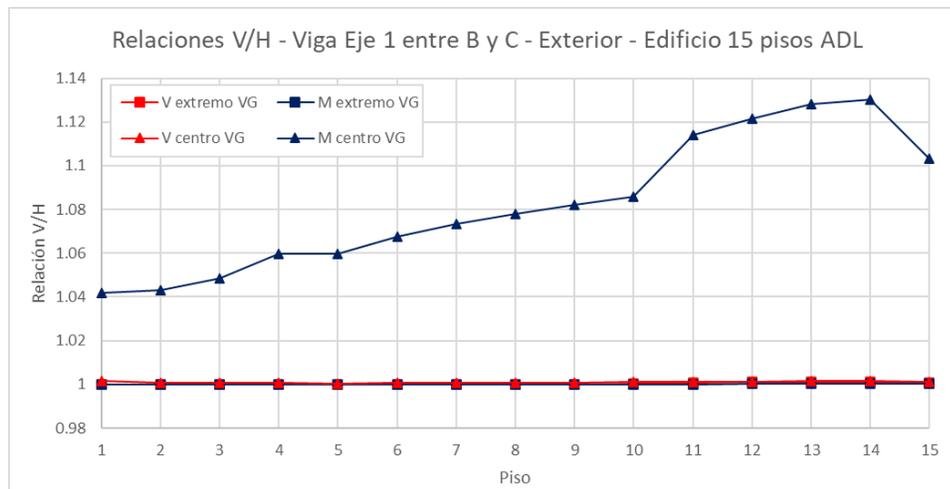


Figura 91 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga exterior edificio 15 pisos ADL
Fuente: Autor

En el centro del elemento las variaciones en corte son igualmente despreciables, sin embargo, la flexión presenta relaciones V/H de interés que oscilan entre un 4%

para el piso 1 y un valor máximo del 13% para el piso 14, en todo caso, son valores inferiores a los obtenidos en el ADE.

La viga interior del eje 2 entre ejes B y C en el ADE muestra resultados con relaciones V/H relevantes para flexión en el centro de la viga, caso en el que se evidencian incrementos de hasta un 6% principalmente en los pisos superiores. Las solicitaciones de corte en el centro y la flexión y el corte en los extremos no registran variaciones significativas, en ninguno de estos casos los incrementos superan el 1% por lo que pueden despreciarse (véase la Figura 92).

Revisados los resultados para el ADL (véase la Figura 93), el comportamiento es muy similar al espectral con una variación consistente en un pico en la relación V/H a flexión en el centro de la viga en el piso 9, los resultados restantes tienen leves incrementos con respecto al caso anterior; en este caso el mayor incremento a flexión se presenta en el piso 12 con un 6.2%. Los incrementos de corte en todos los casos y los de flexión en el extremo pueden despreciarse para condiciones de análisis similares a las del presente trabajo de acuerdo con los resultados obtenidos.

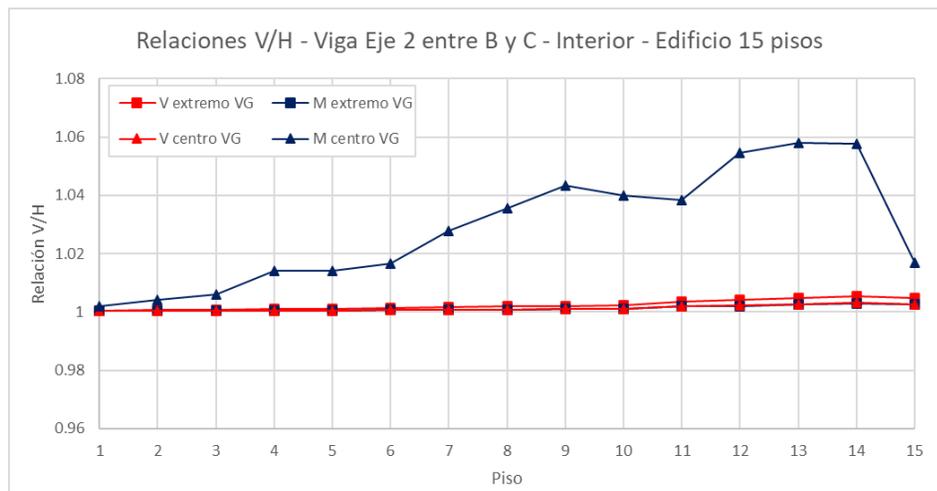


Figura 92 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga interior edificio 15 pisos ADE
Fuente: Autor

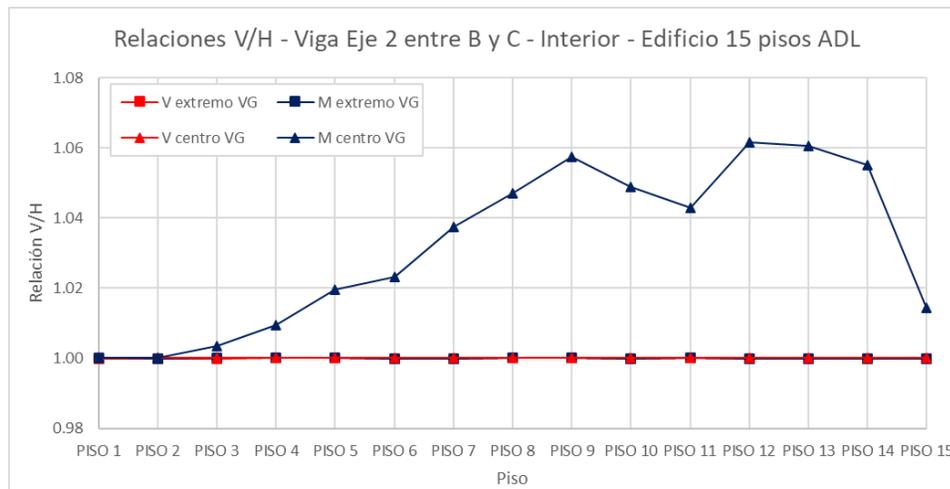


Figura 93 - Efecto componente V para V y M en el extremo y centro de una viga interior edificio 15 pisos ADL
Fuente: Autor

Para terminar la ilustración gráfica y textual de algunos resultados obtenidos, es importante como se recomendó para el edificio de 5 pisos, revisar en los anexos P y X los resultados adicionales, especialmente los que incluyen la componente vertical como un 30% (0.3V), para el ADE se observarían incrementos en carga axial de columnas para los pisos superiores de hasta un 18% acompañados de incrementos en corte y flexión del 10%; en los primeros pisos para estas condiciones los incrementos en carga axial pueden alcanzar incrementos entre el 6% y 10% con aumentos en solicitaciones de corte y flexión de hasta un 5%.

En los muros sucede algo similar para las combinaciones que incluyen 0.3V; las cargas axiales para el ADE pueden aumentar en promedio entre 6% y 9% con incrementos en los esfuerzos de corte y flexión que oscilan en un rango similar. Para terminar la descripción de los resultados del edificio de 15 pisos, es importante tener en cuenta que para los muros que cuando se analiza el caso de las combinaciones que incluyen el 100% de la componente sísmica horizontal en la dirección perpendicular a la del plano (eje global Y) se obtienen relaciones V/H mayores para carga axial; en cuanto a esto hay que analizar el contexto, toda vez que estas magnitudes cuando se presentan corresponden a solicitaciones menores a las que sugiere el análisis considerando el 100% de la componente H en el eje global X.

4.2.3 Análisis de resultados para relaciones V/H entre solicitaciones

4.2.3.1 Edificio de 5 pisos

- a. Las mayores relaciones V/H para carga axial se presentaron en la columna C6 (columna interior) con un incremento en la carga axial del 34% para el ADE y del 70% para el ADL, ocurren en el piso 4 y están acompañados de una relación V/H en corte de 0.83 y 1.08 en flexión en el ADE, y de 0.76 y 1.03 respectivamente para el ADL. Este elemento en el piso 1 registró aumentos en la carga axial del 26% con relaciones V/H para corte y flexión de 0.49 y 0.37 en el ADE; para el ADL el incremento en la carga axial alcanzó el 57% acompañado de una relación V/H para corte de 0.41 y de 0.34 para flexión. Los resultados anteriores corresponden a las combinaciones de carga que incluyen el 100% de la componente V.

En las combinaciones de carga que consideraron el 30% de la componente V, el mayor incremento de carga axial se ubicó en el piso 4 con un 10% acompañado de una relación V/H para corte de 1.10 y de 1.14 para flexión en el ADE; para el ADL la carga axial aumentó un 19% con relaciones V/H de 1.0 para corte y de 1.03 para flexión. En el primer piso por su parte, el incremento de carga axial para el ADE fue del 8% con relaciones V/H para corte de 1.03 y para flexión de 1.01; por su parte el ADL mostró incrementos del 14% para carga axial sin variaciones significativas en la relación V/H para flexión y corte ($V/H=1.0$).

- b. En la columna exterior (C2) disminuyeron las relaciones V/H para todas las solicitaciones de carga axial con respecto a los resultados de la columna anterior (C6). Para este elemento la mayor relación V/H para carga axial se presentó igualmente en el piso 4 con un incremento del 25% y valores de relaciones V/H para corte de 0.83 y de 0.91 para flexión en el ADE; en el caso del ADL, el incremento de carga axial alcanzó un 49% con relaciones V/H para corte de 0.74 y de 0.61 en flexión. En el piso 1 el ADE mostró un incremento de carga axial del 18% con relaciones V/H de 0.50 y 0.40 para corte y flexión; el ADL indicó incrementos del 37% para carga axial y

relaciones V/H de 0.43 y 0.36 para corte y flexión. Estos resultados corresponden a las combinaciones que incluyen 1.0V.

Cuando actúa el 30% de la componente V, los incrementos en todos los pisos para el ADE oscilaron entre el 7% y 8% para carga axial, las relaciones V/H para corte variaron entre 1.03 en el piso 1 y 1.13 en el piso 5, la flexión por su parte tuvo variaciones de relaciones V/H de 1.02 para el piso 1 y de 1.17 para el piso 5. En el ADL la variación en la carga axial estuvo entre un 6% para el piso 1 y un 10% para el piso 5, las relaciones V/H en todos los pisos no registraron incrementos superiores al 2%.

- c. La columna con menores incrementos de carga axial fue la columna de esquina C1. Para el ADE el valor máximo se presentó en el piso 4 con un incremento del 14% de carga axial con relaciones V/H de 0.69 para corte y de 0.91 para flexión; en el primer piso, para el mismo análisis y para la combinación que incluye 1.0V, el aumento de carga axial fue del 4% con relaciones V/H para corte y flexión de 0.42 y 0.34 respectivamente. En el ADL el incremento en el piso 4 es el mayor con un 29% para carga axial y relaciones V/H para corte y flexión 0.61 y 0.86; en el piso 1 el incremento alcanzó un 10% con relaciones V/H de corte y flexión de 0.39 y 0.33.

Para la combinación que incluyó un 30% de la componente V, en el ADE los incrementos de carga axial alcanzaron aproximadamente un 6% en todos los pisos con relaciones V/H para corte que oscilaron entre el 1.0 para el piso 1 y de 1.08 para el piso 5, la flexión varió entre un 1.0 para el piso 1 y 1.05 para el piso 5. El ADL indicó incrementos de carga axial entre un 2% y 4% en todos los pisos sin variaciones significativas para corte y flexión (V/H=1.0).

- d. Para este arquetipo los resultados con mayores relaciones V/H son los obtenidos a través del ADL. Esta particularidad está relacionada con los resultados de la desagregación de la amenaza; con base en los resultados obtenidos, se pudo disponer para el análisis de un mayor número de registros en el campo cercano, resultando para los periodos de interés relaciones espectrales V/H de hasta 1.4, mayores a la mínima recomendada en NSR-10 de 2/3 para el ADE (véase la Figura 94). Las distancias

epicentrales de los siete eventos usados en el ADL oscilaron entre los 4.33 y 40.54 km.

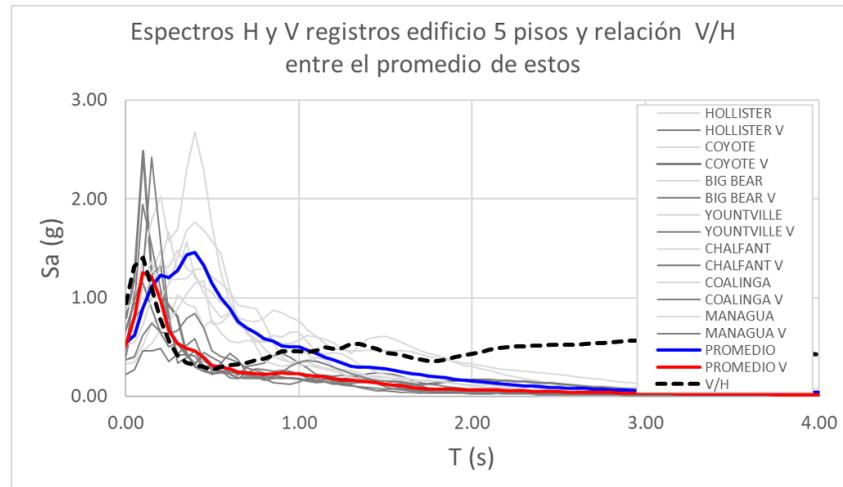


Figura 94 - Espectro H y V de registros usados en edificios de 5 pisos, y relación V/H entre el promedio de estos
Fuente: Autor

- e. Los resultados anteriores muestran que las columnas con mayor carga axial por efectos gravitaciones, tienen las relaciones V/H más elevadas cuando se considera la componente V. En este sentido, cuando se incluye el 100% de la componente V la columna C6 tiene un incremento máximo del 70%, la columna C2 del 49% y la columna C1 del 29%. Cuando la componente vertical se consideró en un 30%, los incrementos alcanzaron el 19%, 10% y 4% para las columnas C6, C2 y C1 respectivamente. Estos resultados corresponden al ADL que son los más críticos para este arquetipo.
- f. Cuando ocurren los mayores incrementos de carga axial (empleando 1.0V), a excepción de lo que sucede en los pisos superiores, las relaciones V/H para corte y flexión son menores a 1.0. Por otra parte, cuando se emplean las combinaciones de carga con 0.3V, los incrementos en las cargas axiales son menores pero las relaciones V/H para corte y flexión son iguales o superiores a 1.0. Esta condición deberá analizarse individualmente para cada elemento, toda vez que en algunos casos, usando un diagrama de interacción P-M, puede ser más desfavorable un menor incremento de la carga axial acompañado de un mayor o igual requerimiento a corte y flexión.

Esto dependerá de las características propias de cada estructura y de su correspondiente diseño.

- g. Los eventos sísmicos que más contribuyeron al incremento de las relaciones V/H para carga axial fueron el de Coyote Lake (1979) y el de Yountville (2000). Si se analiza el anexo U, estos eventos, aparte de ser los de mayores valores de PGA, tienen la particularidad de poseer componentes verticales superiores o por lo menos muy cercanas a las horizontales.
- h. Entre mayor es la carga gravitacional sobre las columnas, la variación de los incrementos entre el valor mínimo y máximo tiende a disminuir. Por ejemplo: Para el ADL, en la columna C1 el incremento mínimo para 1.0V fue del 10% y el máximo del 29% (variación del 19%), en la C2 un mínimo de 37% y un máximo de 49% (variación del 12%), por último, en la columna C6 el mínimo fue de 57% contra un máximo del 70% (variación del 13%).
- i. En cuanto a las vigas, la ubicada sobre el eje 1 (viga exterior), registró relaciones V/H inferiores en todos los casos a 1.02 para flexión y corte en sus extremos en el ADE. Para el ADL las relaciones V/H no tuvieron variaciones significativas siendo en todos los casos inferiores a 1.01. En el centro de la viga (centro de luz), el ADE mostró incrementos en las relaciones V/H para corte que iniciaron con 1.03 para el piso 1 y terminaron en 1.07 para el piso 5, en cuanto a la flexión los valores del piso 1 son de 1.07 e iniciaron igualmente a incrementarse hasta alcanzar una relación de 1.11 en el piso 5. Para el ADL, las relaciones V/H para esta porción de la viga disminuyeron para corte manteniéndose menores a 1.01 y aumentaron progresivamente para flexión con una relación en el piso 1 de 1.12 y de 1.16 en el piso 4, en el piso 5 la relación V/H tuvo una magnitud de 1.14.
- j. En la viga del eje 2 (viga interior) se mantiene el comportamiento evidenciado en la viga exterior, las relaciones V/H en los extremos para corte y flexión fueron inferiores a 1.02 para el ADE y a 1.01 para el ADL. En el centro del elemento, las relaciones V/H para corte son iguales a las de la viga exterior en el ADE pero disminuyen para el caso de flexión, en este sentido, para el piso 1 se presentó una relación V/H de 1.06 y en el piso 3 un valor máximo de 1.09, en los pisos 4 y 5 la relación fue de 1.08. Los resultados del ADL

- indican relaciones V/H en el centro de la viga de 1.11 para el piso 1 con aumento progresivo hasta 1.18 en el piso 4, el piso 5 presentó fue de 1.15.
- k. En términos generales las variaciones representativas de relaciones V/H ocurren en el centro de las vigas para las solicitaciones de flexión alcanzando incrementos máximos del 18%. Las solicitaciones de corte y flexión en los extremos son muy pequeñas y en términos prácticos pueden llegar a ignorarse, en ningún caso superaron un 2%; con respecto al corte en el centro de la luz los resultados más desfavorables se evidencian en el ADE y no superan incrementos del 7%. Para las vigas debe tenerse en cuenta, que en el centro del elemento para las condiciones de carga analizadas se presentan las menores magnitudes de cortante y momento flector con respecto a los valores registrados en los extremos, en este sentido, estos incrementos máximos del 18% para flexión y del 7% para corte no representan aumentos significativos en la relación demanda/capacidad.
 - l. Para el ADE las relaciones de mayor magnitud se presentan en la viga exterior con un 12% para flexión con respecto a un 9% en la viga interior. Por su parte, en el ADL el mayor incremento se presenta en la viga interior con un 18% con respecto a un 16% en la viga interior. Esto indica que a medida que se incrementan las solicitaciones verticales por efectos sísmicos, los resultados tienden a ser más críticos en las vigas con mayor carga gravitacional.
 - m. En el Anexo X se muestra un ejercicio preliminar realizado para verificar la posible incidencia de la componente V en el diseño de un elemento tipo columna, escogiendo para este propósito la que presenta mayores incrementos en carga axial. Se evidenció que el diseño del elemento para los resultados que incluyen solamente la componente H a través de un ADE puede satisfacer las solicitaciones que incluyen el efecto de la componente V. Sin embargo, se observó que las cargas axiales cuando se incluye V se alejan más hacia la parte superior, distanciándose de la línea imaginaria que representa la carga axial balanceada, lo que sugiere una posible falla del elemento en compresión; adicionalmente, en análisis no lineales, mayores cargas axiales pueden disminuir la ductilidad de la estructura, lo que a su vez afecta la capacidad de esta para resistir eventos sísmicos. Sobre este

aspecto no se concluirá entendiendo que no está dentro del alcance del presente trabajo, sin embargo, se deja como inquietud para que sea considerado en futuras investigaciones.

4.2.3.2 Edificio de 15 pisos

- a. Aunque se conservan las mismas tendencias en las gráficas de relaciones V/H obtenidas entre los dos tipos de análisis para todos los elementos analizados, los resultados del ADL muestran disminuciones leves con respecto al ADE. Este hecho tiene parte de su explicación en que los eventos seleccionados con base en la desagregación de la amenaza tuvieron componentes verticales menores a las horizontales. Esta característica está altamente influenciada además por el hecho de que las distancias epicentrales para estos registros variaron entre 30.76 y 193.91 km, rango mayor al de los eventos empleados en el arquetipo de 5 pisos.

Esta consideración puede entenderse mejor al analizar la relación espectral V/H del promedio de los 7 registros seleccionados. Se observó en este caso un pico de 0.98 para un periodo de 0.10 s (véase la Figura 95), valor menor aproximadamente en un 40% al obtenido en los registros del arquetipo de 5 pisos, donde para este mismo periodo se alcanzó una relación espectral V/H de 1.41.

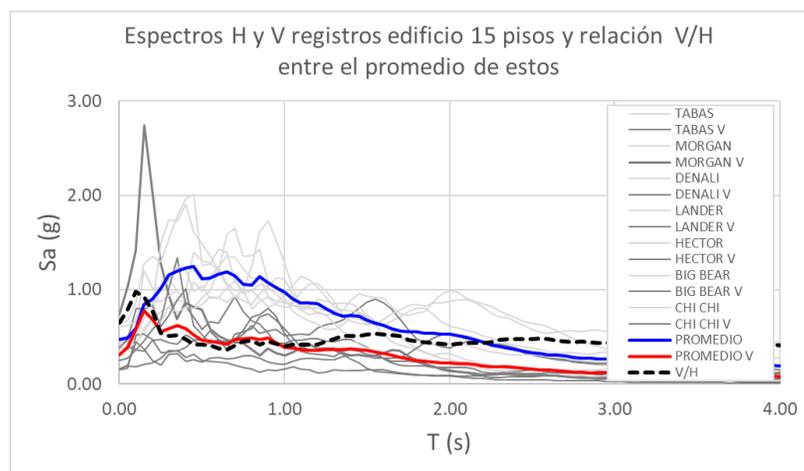


Figura 95 - Espectro H y V de registros usados en edificios de 15 pisos, y relación V/H entre el promedio de estos

Fuente: Autor

Además, con el fin de verificar esta pequeña variación a nivel de ordenes de magnitud, se revisó en uno de los modelos la participación modal, evidenciando en un ejemplo que para el modo 10 con un periodo de 0.11 s participa el 66% de la masa en el sentido vertical. Para ese periodo, en la línea roja de la gráfica anterior, la cual representa el espectro de aceleraciones verticales, se obtuvo un valor de SaV de 0.59 g, muy parecido al que correspondería al 2/3 del SaH ($0.85g \times 0.66 = 0.57 g$) usado en el ADE. Pero además, verificando la relación espectral V/H que en la imagen anterior está indicada con la línea punteada de color negro, para ese periodo corresponde una relación espectral V/H de 0.98 y una aceleración SaH de 0.60 g ($0.98 \times 0.60g = 0.58g$) cuyo producto es muy parecido al resultado obtenido en el espectro vertical.

Ambas revisiones preliminares en ordenes de magnitud, son concordantes con las formas sugeridas por Bozorgnia y Campbell para la determinación de SaV, verificándose así que los resultados son consistentes entre sí, proporcionando tranquilidad sobre los obtenidos, y validando que estas variaciones menores entre el ADE y el ADL sean razonables si se tiene en cuenta la naturaleza del ADE cuyos resultados serán en algunos casos como este levemente mayores, esta última apreciación teniendo en cuenta que para cada modo la aceleración espectral será la de la meseta del espectro. Con base en este análisis, se considera valido para el estudio de los resultados de este arquetipo usar los obtenidos del ADL, esto teniendo en cuenta que las variaciones no son tan representativas entre un análisis y otro como ocurrió en el arquetipo de 5 pisos, adicionalmente el ADL es un análisis que bien elaborado puede proporcionar una respuesta muy acertada de la estructura, y por último, porque las formas entre relaciones V/H para cada uno de los elementos muestran una coherencia entre los resultados obtenidos a través de los dos métodos.

- b. Las columnas exteriores en un sistema combinado, que para este caso son las únicas en el arquetipo, mostraron un comportamiento distinto al evidenciado en el sistema pórtico cuando se incluye la componente sísmica V. Para las combinaciones en las que V actúa como un 100%, el incremento en la carga axial inicia en el piso 4 con un 3% y se incrementa de forma

aproximadamente lineal hasta el piso 13 donde alcanza su incremento máximo de 47%; en los primeros pisos se observa una disminución de la relación V/H 0.97 y 0.98 para los pisos 1 y 2, en el piso 14 y 15 los incrementos son del 47% y 38% respectivamente. En cuanto a las relaciones V/H para corte y flexión, en todos los pisos fueron inferiores a 1.0 con valores que oscilaron entre 0.44 y 0.82 para corte y entre 0.37 y 0.86 para flexión. Cuando la componente vertical actúa como un 30%, en los pisos del 1 al 8 los incrementos de carga axial oscilan entre un 1% y 3%, del piso 9 al 15 los incrementos varían entre un 5% y 10%, presentándose este valor máximo en el piso 13. Las relaciones V/H para corte y flexión no presentaron variaciones significativas y en todos los pisos fueron muy similares a 1.0. Comparando los resultados de esta misma columna en el arquetipo anterior, la variación entre magnitudes máximas de carga axial estuvo sobre el 12%, mientras que en este caso el rango de variación corresponde para el mismo caso al 50%. Adicionalmente, los incrementos significativos de carga axial están concentrados en los pisos superiores, mientras que en el arquetipo anterior en todos los pisos se presentaron incrementos significativos.

- c. Revisados las solicitaciones en la columna exterior, para cada uno de los casos de carga, se observó que a medida que aumenta la altura, la carga axial debida a la carga muerta va aproximándose a los valores de carga axial causada por la componente sísmica vertical, sucediendo lo mismo cuando se realiza la comparación con respecto a las cargas axiales generadas por la componente sísmica horizontal. Estos resultados inducen a que a medida que se revisan las relaciones V/H piso a piso la misma vaya aumentando al superar, considérese que en este caso de análisis lineal es válido el principio de superposición. Esta condición no se presenta del mismo modo en el arquetipo de 5 pisos, donde las columnas tienen toda la responsabilidad con respecto a la componente horizontal, generando mayores cargas axiales debido a estas en los pisos superiores, equilibrando un poco la relación entre componentes V/H. En este modelo la mayor parte de la sollicitación por efecto de las componentes H la toman los muros.
- d. Para los muros interior M1 y de esquina M5, las diferencias entre relaciones V/H no son tan marcadas como ocurrió para la columna C1 y la columna C6

en el edificio de 5 pisos. En este caso, las solicitaciones máximas por carga axial cuando se considera 1.0V para el M1 se presentaron en el piso 3 con un incremento del 20%, igual al máximo valor del incremento del muro interior M5 el cual se presentó en el mismo piso y con igual magnitud. La diferencia, aunque no tan significativa, se presenta en los pisos comprendidos entre 4 y el 10, en estos niveles para el muro de esquina el incremento promedio fue del 10%, mientras que para el muro interior fue del 14%. Otra diferencia se presentó en el piso 11, ahí ocurrió el pico máximo de relaciones V/H en los últimos 5 pisos, en este caso, el incremento de carga axial del muro M1 alcanzó un 11% y en el muro M5 alcanzó el 20%. En todos estos casos las relaciones V/H para corte y flexión fueron menores a 1.0.

Cuando se consideró la componente vertical como un 30%, en el muro de esquina M1 las variaciones de carga axial no superaron un incremento del 2% con relaciones V/H para corte y flexión iguales a 1.0; mientras que en el muro M5 no se superó el 3% en incrementos de carga axial y flexión, por su parte las relaciones V/H para corte fueron iguales como en el caso anterior a 1.0. Estos resultados dejan en evidencia las grandes solicitaciones de carga axial que impone la componente sísmica horizontal sobre muros de este tipo en una zona de amenaza sísmica alta, las cuales se ven poco alteradas por componentes verticales relativamente menores.

- e. Es importante lo que sucede para el caso de los incrementos en las cargas axiales cuando se usa el 30% de la componente vertical, caso en el que los incrementos de carga axial no superan el 3% en muros. Aquí cobra importancia la responsabilidad de los muros para atender las solicitaciones que impone en una amenaza sísmica alta la componente H, condición que genera sobre estos una carga axial elevada cuando entre los muros se trata de generar un par para contrarrestar el momento en el base producido por la componente horizontal. Ante cargas axiales tan altas, lo que puede agregar una componente vertical del 30%, además asociada a eventos con componentes verticales relativamente pequeñas con respecto a las horizontales es poco.
- f. Para estos muros en el ADE, los incrementos asociados a 0.30V oscilan entre un 6% y 8% para el muro M1 y entre un 6% y 10% para el muro M5.

En este análisis influye el hecho de que todas las masas que se existen en distintos modos en un rango de periodos entre 0 y T_c , siempre se van a interactuar con la aceleración espectral en la meseta del espectro ($0.85g \times 0.66 = 0.57g$), lo que arrojará mayores sollicitaciones si se tiene en cuenta que para un ADL no sucede igual al considerar la historia real del movimiento con respecto al tiempo.

- g. En la viga exterior, para el ADE, los incrementos de corte y flexión en los extremos varían entre un 1% y 3%, magnitudes que no representan cambios significativos en las sollicitaciones. En el centro del elemento, el corte entre los pisos 1 y 10 muestra incrementos inferiores al 1%, solo entre los pisos 11 y 15 se alcanzan valores comprendidos entre el 3% y 4%; La flexión presenta mayores incrementos alcanzando un máximo en el piso 13 y 14 del 16%, en los niveles comprendidos entre el 1 y el 10 los incrementos oscilan entre el 5% y 11%, en los pisos 11, 12 y 15 los incrementos varían entre 11% y 14%. El ADL por su parte, no indica variaciones en la flexión y corte de los extremos del elemento y en el corte a nivel del centro de este. Solo para flexión indica valores levemente menores a los obtenidos en el ADE, aquí la variación entre los pisos 1 y 10 oscila entre el 4% y 9%, el valor máximo se obtiene en los pisos 13 y 14 con un incremento del 14%, mientras que en los pisos restantes varía entre el 10% y 12%.
- h. La viga interior para el ADE y para el ADL no presenta incrementos en las relaciones V/H para el corte en los extremos y centro del elemento, en el mismo sentido, no hay incrementos de las relaciones V/H a flexión en los extremos. Para el centro de la viga, solo se evidenciaron incrementos en la flexión en el centro de esta, como referencia, el ADE mostró incrementos en las sollicitaciones a flexión entre el 1% y 3% entre los pisos 3 y 7, y entre el 4% y 6% entre los pisos 8 y 14, conservando la tendencia de registrar los valores máximos en los pisos 13 y 14, en los pisos 1 y 2 no hubo variaciones, mientras que el piso 15 alcanzaron un 2%. Los resultados del ADL para los incrementos de flexión en el centro de la luz son en esencia iguales a los obtenidos en el ADE.

4.3 Contribuciones

- a. Se colocan a disposición de la comunidad académica y del gremio de ingenieros dedicados al diseño de edificaciones similares a las cubiertas en el presente trabajo, las relaciones espectrales V/H mostradas en las figuras 71, 72 y 73 para distancias epicentrales menores a 100 km; las cuales podrían ser útiles ante la ausencia de más información, para realizar chequeos de los efectos de la componente V en zonas de amenaza sísmica alta cuando el proyecto a diseñar se encuentre a menos de 60 km de una falla activa capaz de generar movimientos sísmicos importantes. Su empleo podría materializarse a través de lo recomendado por Bozorgnia y Campbell, por lo que se recomienda la revisión del artículo “THE VERTICAL-TO-HORIZONTAL RESPONSE SPECTRAL RATIO AND TENTATIVE PROCEDURES FOR DEVELOPING SIMPLIFIED V/H AND VERTICAL DESIGN SPECTRA” (Bozorgnia & Campbell, 2004).
- b. Se llama la atención sobre el hecho de que realizar un diseño estructural sin revisar si los efectos verticales que induce un sismo son importantes o si por el contrario podrían ignorarse, puede llevar a que se ignoren solicitaciones que puedan comprometer la estabilidad local de un elemento estructural e incluso la estabilidad global de una edificación. Además, los resultados obtenidos indican que la componente espectral V no puede tomarse como el $2/3$ de la componente H. En ambos casos, se considera que con este pequeño aporte, se ha contribuido a validar la evidencia nacional e internacional sobre efectos adicionales ocasionados por la relación V/H.
- c. Por último, este trabajo de profundización contribuye a divulgar el problema de considerar o no los efectos de la componente V, y pone a disposición de los interesados los resultados obtenidos para que sean ellos quienes decidan sobre las medidas que pueden tomar en sus diseños aunque aún no estén en los Reglamentos.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

5.1.1 Relaciones V/H entre componentes sísmicas

- a. El ambiente Cortical es el ambiente en el que se registraron los valores más altos de relaciones V/H para las aceleraciones del terreno PGA y para las aceleraciones espectrales S_a . Lo anterior coincide con lo encontrado por Bozorgnia y Campbell en sus investigaciones, en las cuales se indica que los resultados del ambiente Cortical son los relevantes y pueden considerarse universales (Bozorgnia & Campbell, 2004). Esto es relevante toda vez que este ambiente predomina en todo el territorio colombiano.
- b. Para los análisis de relaciones V/H en función de ambiente tectónico y tipo de perfil de suelo para PGA, los valores máximos se obtienen para el ambiente Cortical y para el grupo que reúne los perfiles de suelo D, E y F con un valor en ambos casos de 0.66. En este sentido lo recomendado por NSR-10 sería acertado para PGA V, es decir como valor inicial de espectro.
- c. Cuando se considera el periodo en el análisis, los picos obtenidos de las relaciones espectrales V/H ocurren en periodos cortos y exceden para los grupos de perfiles de suelo tipos A y B y tipos D, E y F el valor de referencia de $2/3$. Dependiendo de la magnitud de la aceleración espectral horizontal estos picos están cubiertos por los valores de C_v indicados en la tabla 11.9-1 del documento ASCE 7-16.
- d. Los periodos de esquina de 0.05 s y 0.15 s propuestos por Elnashai y Papazoglou en 1997 y confirmados por Bozorgnia y Campbell en 2004, cubren los picos de relaciones V/H identificados en este trabajo, los cuales se encuentran entre los 0.06 s y 0.10 s, sin embargo, no se evidenció que estos picos alcancen valores límites como el de 0.35 s encontrado en la investigación de Kale y Akkar en 2020, lo que debería validarse en una futura investigación.

- e. Teniendo en cuenta lo anterior, y que la mayoría de las estructuras de interés tanto para sistemas estructurales como para elementos no estructurales tienen periodos verticales menores a 0.26 s, se considera adecuado tener en cuenta los efectos de la componente vertical en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta cuando la distancia de la estructura con respecto a la falla que pueda generar el movimiento sísmico sea menor a 60 km. Este valor de distancia epicentral está en el rango de los usados en las investigaciones más recientes como las de Bozorgnia y Campbell en 2004 y la de Kale y Akkar en 2020.
- f. Los resultados obtenidos para las comparaciones de las relaciones V/H en las cuatro condiciones analizadas, permiten concluir que para el ambiente Cortical y para los perfiles de suelo D, E y F, la relación espectral de 2/3 podría superarse. No obstante, las recomendaciones de ASCE 7-16 satisfacen todas las condiciones estudiadas en nuestros ambientes tectónicos y en nuestros perfiles de suelo con una única excepción para periodos iguales a 0 en la cual puede ser levemente inferior (0.66 vs 0.60). Ante la ausencia de más datos de movimiento fuerte en nuestra red sísmológica, y con más resultados de estudios similares, podría evaluarse la posibilidad de considerar el espectro vertical de ASCE 7-16 para futuras actualizaciones de NSR-10.
- g. El espectro recomendado en NSR-10 para la componente vertical podría ajustarse teniendo en cuenta que: i. Hay evidencia que existen relaciones V/H superiores a 2/3 en función del tipo de perfil de suelo; ii. Afectar el espectro H por 2/3 para obtener el vertical no considera que los mayores valores V/H entre relaciones espectrales se encuentran en periodos generalmente menores al T_c del espectro horizontal, lo que en un ADE resultaría en aceleraciones verticales inferiores a las que puedan presentarse; iii. Los periodos de esquina de un espectro vertical no coinciden con los periodos de esquina de un espectro horizontal, condición que restaría validez a los resultados obtenidos.

5.1.2 Relaciones V/H entre solicitaciones en los modelos estructurales

- a. En el sistema de pórticos, los mayores incrementos de carga axial y de relaciones V/H se presentan en la columna interior C6 (70%), le sigue la columna exterior C2 (49%) y por último la columna de esquina C1 (29%). Esto sugiere un mayor impacto de la componente V en los elementos que soportan más carga gravitacional. Así mismo, los incrementos de relaciones V/H para todas las solicitaciones alcanzan sus valores máximos en los pisos superiores.
- b. Los mayores incrementos de carga axial en columnas se presentan cuando se considera el 100% de la componente V en las combinaciones de carga, sin embargo, debe tenerse en cuenta, que estas magnitudes están acompañadas de relaciones V/H menores a 1.0 para flexión y corte a excepción de los últimos pisos. Cuando la componente vertical se supone en las combinaciones de carga como el 30%, los incrementos en carga axial son menores, pero las relaciones V/H para corte y flexión son iguales o superiores a 1.0. El impacto de cada combinación deberá evaluarse para cada elemento en particular.
- c. En vigas, los incrementos más altos se alcanzan en el centro de la luz con magnitudes del 18% en el edificio de 5 pisos y del 16% en el edificio de 15 pisos para flexión. Se evidenció además, que entre más carga gravitacional llega a tener este tipo de elemento y mayor sea la luz entre sus apoyos, mayores son las relaciones V/H para este tipo de solicitación. Se observó además, que las solicitaciones a corte en el centro de la luz, y de corte y flexión en los extremos, no presentan variaciones representativas.
- d. A diferencia de las columnas, los muros en sistemas combinados alcanzan sus valores máximos en incrementos de carga axial en los pisos inferiores con magnitudes hasta del 20% para las combinaciones de carga que incluyen 1.0V con relaciones V/H para corte y flexión menores a 1.0. Los incrementos en carga axial para combinaciones que incluyen el 30% de la componente V no superan el 3% con relaciones V/H iguales a 1.0. Sin embargo, debe tenerse en cuenta el impacto que en este resultado tienen componentes espectrales menores a las usadas en el edificio de 5 pisos.

- e. La desagregación de la amenaza sísmica influye en los resultados que pueda tener la componente vertical en estructuras altas. En este caso, las parejas de datos obtenidas de Mw y distancia epicentral, sugirieron registros de eventos que en promedio tienen una componente vertical baja influenciada por registros de mayor distancia epicentral. Se recomienda estudiar este tema con mayor detenimiento para establecer qué condiciones deben priorizarse al momento de seleccionar eventos en el campo cercano para este tipo de estructuras.
- f. Con los resultados obtenidos, puede concluirse que despreciar los efectos de la componente vertical, o simplemente considerarla como $2/3$ de la componente H, puede llevar a despreciar incrementos en solicitaciones que en algunos casos puedan llegar a comprometer la seguridad local o global de la estructura. Además, que los factores de mayoración usados para las cargas gravitacionales no suministran un margen de seguridad suficiente ante esta componente de los eventos sísmicos.

5.2 Recomendaciones

- a. Se considera pertinente en un país con nuestras características geológicas, realizar mayores inversiones en nuestra red sismológica. Esto contribuirá a mitigar una de las debilidades evidenciadas en este trabajo, la cual está relacionada con el número de registros sísmicos disponibles.
- b. Continuar con investigaciones similares para que en el mediano plazo (5 años) pueda adoptarse en las actualizaciones del reglamento NSR-10 un espectro suavizado para la componente vertical.
- c. Revisar en un periodo no menor a diez años, o antes si así se considera, la actualización de los resultados aquí obtenidos, adicionando los datos relevantes que hasta ese entonces puedan registrarse. Este estudio podría realizarse antes si se considera válido incluir eventos sísmicos ocurridos en otros países pero que tengan en común ambientes tectónicos, tipos de fallas y condiciones de sitio similares a los del MNAS2020.

- d. Complementar los resultados obtenidos para los arquetipos estructurales a través de un Análisis Dinámico No Lineal, lo que contribuirá a validarlos y a revisar su impacto en la relación demanda/capacidad.
- e. Para trabajos de grado futuros, se recomienda estudiar los efectos de la componente sísmica V en elementos no estructurales de edificaciones, en edificios que incluyan irregularidades en planta y en altura, en voladizos y en estructuras especiales como tanques, silos y puentes.
- f. Realizar estudios más detallados que permitan a través de procedimientos más completos estimar el periodo de esquina superior para el espectro vertical, esto en cuanto Kale y Akkar en 2020 encontraron que este valor puede superar el periodo actual propuesto en ASCE 7-16 de 0.15 s.

Bibliografía

- Acevedo, A. B. (2012). Criterios sismológicos para seleccionar acelerogramas reales de la red nacional de acelerógrafos de Colombia para su uso en análisis dinámicos. *Revista EIA*, 17, 57–70.
- Aguiar, R. (2008). *Análisis sísmico de edificios* (Centro de Investigaciones Científicas (ed.); Primera Ed). Escuela Politécnica del Ejército del Ecuador.
- Alcaldía Santiago de Cali. (2014). *Decreto 411.0.20.0158 Por el cual se adopta la microzonificación sísmica de Santiago de Cali y se definen sus respectivas curvas y parámetros de diseño estructural sismoresistente*.
- ASCE. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures ASCE 7-16* (ASCE (ed.)).
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS. (2009). *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009*.
- Bovo, M., & Savoia, M. (2019). Evaluation of force fluctuations induced by vertical seismic component on reinforced concrete precast structures. *Engineering Structures*, 178, 70–87.
- Bozorgnia, Y., & Campbell, K. (2004). The vertical to horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra. *Journal of Earthquake Engineering, Imperial College Press*, 8, 175–207.
- Cabrera, O. (2013). *Incidencia de la componente vertical sísmica en el comportamiento estructural de una edificación en mampostería estructural*. Universidad del Valle.
- Cares, D., Boroschek, R., Lagos, R., & Larrain, A. (2019). Efecto de la componente sísmica vertical en el diseño de edificios de gran altura en Chile. En Universidad Austral de Chile (Ed.), *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica 2019* (pp. 1–12). Achisina.
- Chen, W.-F., & Scawthorn, C. (2003). *Earthquake Engineering Handbook* (Primera Ed).
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de Estructuras* (Pearson (ed.); Cuarta Ed.).
- Colangelo, F. (2020). Effect of earthquake statistically correlated vertical component on inelastic demand to regular reinforced-concrete frames. *Engineering Structures*, 211, 1–17.
- CSI Computers & Structures Inc. (2018). *Extend Three Dimensional Analysis of Building System* (ETABS Ultimate 18.1.1).
- Di Sarno, L., Elnashai, A. ., & Manfredi, G. (2011). Assessment of RC columns subjected to horizontal and vertical ground motions recorded during the 2009 L'Aquila (Italy)

- earthquake. *Engineering Structures*, 33, 1514–1535.
- Díaz, N. (2008). Colombia: el impacto de sus terremotos a lo largo de la historia. *Revista Fasecolda*, 127, 38–41.
- Fierro, E. (2003). *Crónica de un desastre anunciado* (p. 92). Asociación Dominicana de Mitigación de Desastres.
- Flores, F., & Ayes, J. (2018). Generación de acelerogramas sintéticos mediante el uso de wavelets, orientados a aplicaciones geotécnico - estructurales. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 98, 1–24.
- Gallego, M., & Sarria, A. (2010). *El Concreto y los terremotos: Conceptos, comportamiento, patología y rehabilitación* (Asocreto (ed.); Segunda Ed). Asocreto.
- García, L. E. (1998). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico* (Universidad de Los Andes (ed.); Primera). Universidad de Los Andes.
- García, L. E. (2014). Desarrollo de la normativa sismo resistente colombiana en los 30 años desde su primera expedición. *Revista de Ingeniería Universidad de Los Andes*, 41, 71–77.
- Herráiz, M. (1997). *Conceptos Básicos de Sismología para Ingenieros* (C. P. J. de I. S. y M. de D. CISMID (ed.); Primera Ed). Universidad Nacional de Ingeniería.
- Holly, M. (2007). *MATLAB para ingenieros* (PEARSON (ed.); Primera Ed). Pearson.
- Jaimes, M. A., & Ruíz-García, J. (2019). New vertical-to-horizontal ratio spectrum due to intraslab earthquakes for soft-soil sites of Mexico City. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 126, 1–6.
- Ju, S. H., Liu, C. W., & Wu, K. Z. (2000). 3D Analyses of buildings under vertical component of earthquakes. *Journal of Structural Engineering*, 126, 7.
- Kale, O., & Akkar, S. (2020). A new formulation for a code-based vertical design spectrum. *Wiley*, 1–18. <https://doi.org/10.1002/eqe.3272>
- Kious, W. J., & Tilling, R. I. (1996). *This dynamic earth: the story of plate tectonics*.
- Leal, R. (2012). *Análisis de los efectos de la acción sísmica vertical en edificios de acero, en zonas de sismicidad alta*. Universidad Austral de Chile.
- MathWorks. (2015). *MATLAB* (V 2015a).
- Ministerio de Desarrollo Económico. (1998). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98*.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (1984). *Decreto 1400 Por el cual se adopta el Código Colombiano de Construcción Sismo Resistente* (Presidencia de la República

- de Colombia (ed.); Primera Ed).
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2017). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10* (Asociación de Ingeniería Sísmica (ed.)).
- NIST. (2011). *Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analyses NEHRP Consultants Joint Venture A partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of* (National Institute of Standards and Technology (ed.)).
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. (2021). *PEER Ground Motion Database NGA West 2*. <https://ngawest2.berkeley.edu/>
- Pardo, A. (2014). *Criterios de selección de acelerogramas reales para su uso en análisis dinámicos para la ciudad de Medellín*. EAFIT.
- Perea, T., & Esteva, L. (2005). Componente vertical de registros sísmicos en México y en su efecto en la respuesta sísmica no lineal de edificios. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 72, 45–79.
- Rinaldin, G., Fasan, M., Noé, S., & Amadio, C. (2019). The influence of earthquake vertical component on the seismic response of masonry structures. *Engineering Structures*, 185, 184–193.
- Ruíz-García, J. (2018). Examination of the vertical earthquake ground motion component during the September 19, 2017 (Mw =7.1) earthquake in Mexico City. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 110, 13–17.
- Ruíz, D., & Sarria, Al. (2002). Efecto de las diferentes componentes sísmicas de movimiento sobre las naves industriales de grandes luces. *Revista de Ingeniería Universidad de Los Andes*, 48, 46–55.
- Sepulveda, F., & Cabrera, F. (2018). Tomografía sísmica 3D del nido sísmico de Bucaramanga (Colombia). *Boletín de Geología*, 40 No.2, 19. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v40n2-2018001>
- Servicio Geológico Colombiano. (2020). *Servicio Geológico Colombiano - Sismos. Catalogo de Aceleraciones*. <https://www.sgc.gov.co/>
- Servicio Geológico Colombiano, & Global Earthquake Model. (2020). *Modelo Nacional de Amenaza Sísmica 2020* (Servicio Geológico Colombiano (ed.); Primeran E). Servicio Geológico Colombiano.
- Tarback, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de La Tierra, una introducción a la geología física* (Pearson (ed.); Octava Ed.). Pearson.
- Valenzuela, F., Reyes, A., De León, D., Bojórquez, E., & López, A. (2015). Reglas de combinación de los efectos de las tres componentes de terremotos y respuesta crítica. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 92, 65–94.

Vilera, L., Rivero, P., & Lobo, W. (2008). Efectos sísmicos de la componente vertical en edificios aporticados de acero. *Ciencia e Ingeniería*, 29, 79–87.

6 Anexos

Anexo A – Conceptos básicos de contexto

Interior de la Tierra

Desde la superficie de la Tierra denominada corteza (en la cual habitamos) hasta el centro de la misma, existe una distancia aproximada de 6.386 km. divididos en las capas que en términos generales se indican a continuación: la Litosfera en la cual se incluye la corteza oceánica y continental y que va hasta una profundidad aproximada de 250 km; la Astenosfera con un espesor de 410 km comprendidos desde donde termina la Litosfera hasta los 660 km, posteriormente la Mesosfera con un espesor de 2.240 km comprendidos entre los 660 km y los 2.900 km; por último están el núcleo externo con un espesor de 2.270 km y el núcleo interno con un espesor de 1.216 km. (Tarbuck & Lutgens, 2005).

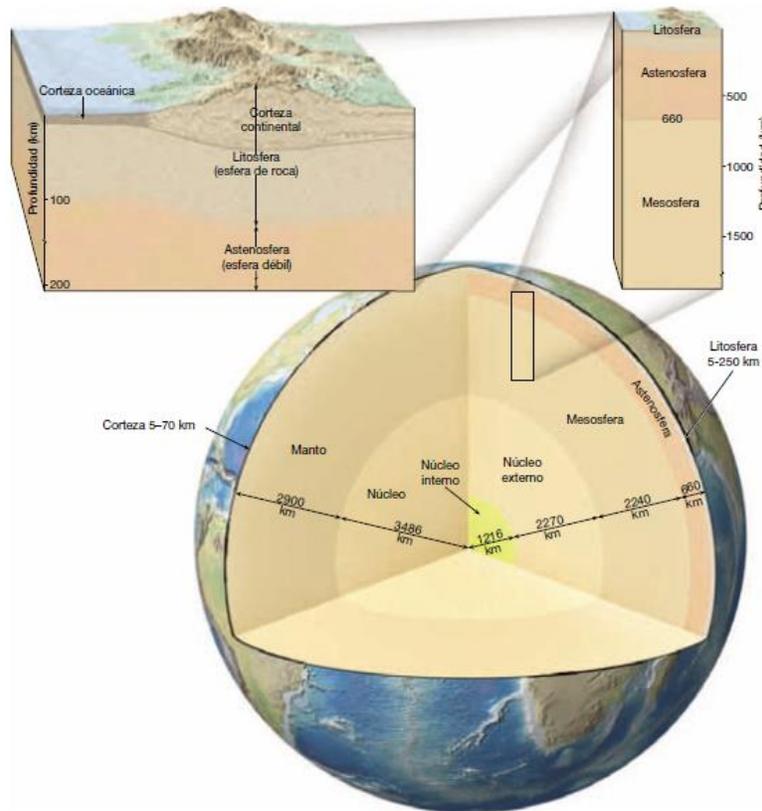


Figura 96 - Vistas de la estructura estratificada de la Tierra
Fuente: Tomado de (Tarbuck & Lutgens, 2005)

Se considera importante mencionar que entre la superficie y el centro de la Tierra se ha estimado a través de algunas hipótesis un gradiente geotérmico de 4.000°C según Gallego & Sarria y de aproximadamente 6.000°C tomando como referencia lo manifestado por Tarbuck & Lutgens. Para facilitar la lectura de este documento se aclara que algunos autores se refieren a la unión de la Litosfera y la Astenosfera como manto superior (0 a 660 km.), y a la Mesosfera como manto interior (660 a 2.900 km.), en general los núcleos interno y externo son llamados por el mismo nombre.

El interior de la Tierra es heterogéneo y en consideración a esto se pueden realizar varias clasificaciones de las capas antes indicadas; por ejemplo desde el punto de vista de la composición química tendrían las siguientes diferencias: la corteza hasta los 70 km de profundidad aproximadamente tomando como referencia la cúspide de algunas zonas montañosas, es rica en elementos como el sodio, potasio y silicio; seguidamente el manto (superior e interno) como una capa rica en sílice y magnesio que va hasta los 2.900 km de profundidad; y por último el núcleo (externo e interno) como una esfera rica en hierro, níquel y azufre en menores proporciones con un radio de aproximadamente 3.486 km. (Tarbuck & Lutgens, 2005).

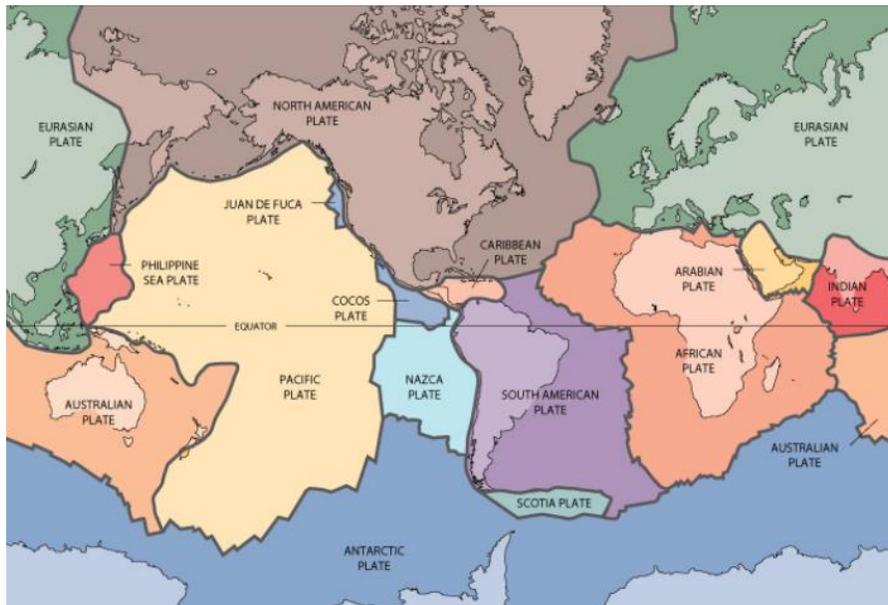
Para el interés de este trabajo, conviene resaltar que la mayoría de los eventos sísmicos que causan daño sobre las estructuras se producen en la Litosfera (Gallego & Sarria, 2010); y de acuerdo con lo establecido en el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia 2020, los eventos considerados como movimiento fuerte están entre los 3 y los 210 km de profundidad.

Placas tectónicas

Las placas tectónicas también conocidas como placas litosféricas son losas masivas de roca sólida de forma irregular, generalmente compuesta por litosfera continental y oceánica (Kious & Tilling, 1996). En otras palabras las placas tectónicas son los distintos fragmentos de corteza en los cuales se divide la Litosfera terrestre. De acuerdo con los autores anteriormente indicados, su estudio se ha desarrollado a través de la tectónica de placas, concepto introducido hace aproximadamente cincuenta años y que requirió de la unión de distintas ciencias de la Tierra incluidas la paleontología (estudio de los fósiles) y la

sismología (estudio de los eventos sísmicos) para encontrar respuestas a interrogantes relacionados con la formación de cadenas montañosas, erupciones volcánicas, movimientos sísmicos, entre otros aspectos geológicos anteriormente desconocidos.

Cabe señalar que Tarbuck & Lutgens indican que actualmente se reconocen siete placas principales, son ellas: la placa Norteamericana, la Suramericana, la del Pacífico, la Africana, la Euroasiática, la Australiana y la Antártica, siendo de las anteriores la de mayor tamaño la placa del Pacífico; igualmente se reconocen el mismo número de placas medianas: la Caribe, la de Nazca, la Filipina, la Árabe, la de Cocos, la de Escocia, y la de Juan de Fuca; existen otras placas de menor tamaño que no se consideran relevantes en el alcance del presente documento (véase la Figura 97).



*Figura 97 - Placas tectónicas principales y medianas que conforman nuestra corteza terrestre
Fuente: Tomado de (Kious & Tilling, 1996)*

Es evidente que el área en superficie varía de manera significativa entre una y otra placa; los bordes entre ellas son irregulares y rugosos pero dispuestos de tal forma que generan una traba y fricción entre estas. Los espesores de estos fragmentos de corteza no son la excepción y también cambian de forma sustancial, las placas de la corteza oceánica son más delgadas, oscilan entre 5 km. y 100 km. de espesor, ahora bien, la corteza continental

tiene un grosor que varía entre los 100 km y los 250 km reflejándose el mayor valor debajo de las áreas más antiguas de las masas continentales.

Precisamente es en las zonas de frontera entre placas tectónicas conocidas en algunos textos también como fallas continentales, donde se registran la mayoría de los epicentros de los eventos sísmicos de interés; en parte porque las placas tectónicas están en constante movimiento y reacomodamiento unas con respecto a otras a una velocidad que oscila en promedio entre 5 a 10 cm. anuales; este movimiento en algunos casos va acumulando un desplazamiento relativo que, por la rugosidad y forma irregular en las zonas de contacto entre placas, genera fricción y esfuerzos en el material, condición que con el paso del tiempo va acumulando energía que es liberada en forma de ondas sísmicas en el instante en que por excederse los esfuerzos resistentes de la roca se produce la fractura de la misma.

Ondas sísmicas

Los eventos sísmicos se propagan desde el hipocentro y en cualquier dirección a través de ondas mecánicas que son el resultado de la liberación de energía producto de la fractura de las rocas que conforman la corteza terrestre en el momento que se superan sus límites de resistencia. Estos eventos generan dos grupos principales de ondas sísmicas: Las primeras son las que viajan al interior de la Tierra conocidas como ondas de cuerpo; las segundas las que viajan por la superficie de la Tierra y son conocidas como ondas superficiales. A su vez, las ondas de cuerpo se dividen en dos tipos, en las ondas primarias P (véase la Figura 98) y en las ondas secundarias S (véase la Figura 99); por su parte, las ondas superficiales se dividen en las ondas Love y en las ondas Rayleigh.

En cuanto al primer grupo, la división de las ondas de cuerpo en ondas P y S se realiza en función de la forma en que viajan al interior de los materiales de la corteza. Las ondas P son aquellas que se caracterizan por involucrar una serie de compresiones y expansiones por donde viajan sin cambiar su forma pero con cambios transitorios en su volumen, se caracterizan por viajar a través de medios sólidos y líquidos. Las ondas S son ondas de corte o transversales que causan deformaciones de corte en los materiales que atraviesan, como característica generan cambios transitorios de forma pero sin cambios de volumen,

solo pueden propagarse a través de medios sólidos (Herráiz, 1997), para entender cómo se propagan estas ondas basta recordar la forma de una cuerda en el tiempo cuando es sujeta por ambos extremos y sacudida de arriba abajo por uno de ellos (Tarbuck & Lutgens, 2005).

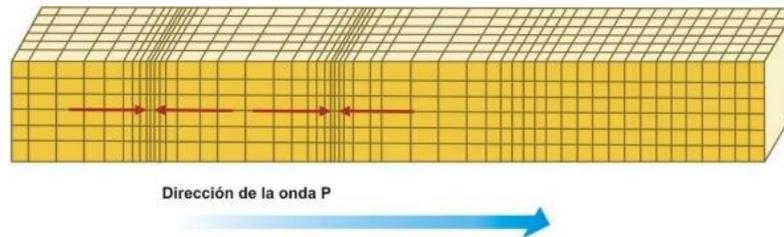


Figura 98 - Forma de propagación de las ondas P (primarias)
Fuente: Tomado de <http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>

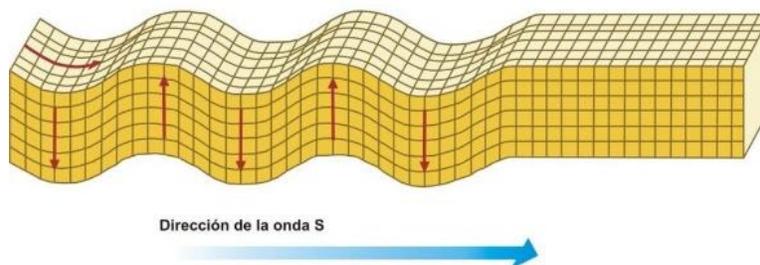


Figura 99 - Forma de propagación de las ondas S (Secundarias)
Fuente: Tomado de <http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>

El segundo grupo resulta de la interacción entre las ondas de cuerpo P y S y la superficie del terreno, las más importantes son las Ondas Rayleigh (véase la Figura 100) que se producen por la interacción de las Ondas P y la componente normal a la superficie del terreno de las Ondas S (SV vertical) lo que genera un símil con las olas del mar y que por su forma de propagación son importantes en cuanto al efecto de la componente vertical de los sismos.

Las Ondas Love (véase la Figura 101) se producen por la interacción de la componente paralela a la superficie del terreno (SH horizontal) con suelos blandos, quiere decir que son similares a las Ondas S pero solo en el eje horizontal (Herráiz, 1997), en este último caso podría hacerse una similitud con el movimiento que describe una serpiente cuando se desplaza sobre la tierra, lo que deja en evidencia lo peligrosas que pueden ser para los cimientos de las estructuras (Tarbuck & Lutgens, 2005).

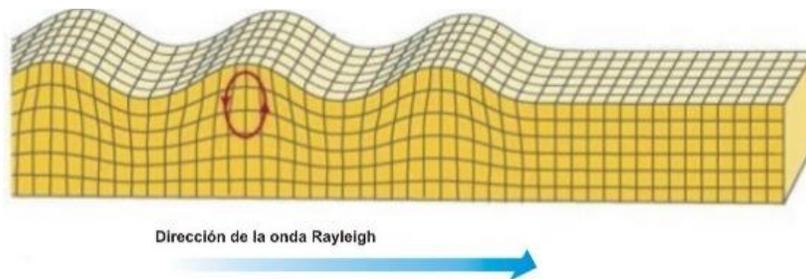


Figura 100 - Forma de propagación de las ondas Rayleigh
 Fuente: Tomado de <http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>

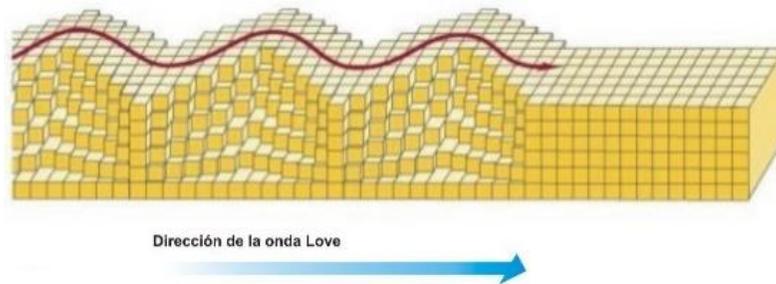


Figura 101 - Forma de propagación de las ondas Love
 Fuente: Tomado de <http://ncarquitectura.com/que-es-un-terremoto/>

Empleando registros sísmicos pueden observarse diferencias entre los tipos de ondas. En cuanto a su velocidad si el medio de propagación por ejemplo fuera una roca de granito como las que existentes en la corteza continental, las ondas P alcanzan una velocidad promedio de 6 km/s. y bajo estas mismas condiciones una onda S viajaría a una velocidad de 3.6 km/s., en cuanto a las ondas superficiales (Love y Rayleigh) se espera que su velocidad sea el 90% de la velocidad de las ondas S (Tarbuck & Lutgens, 2005). En el siguiente registro sísmico típico se puede observar el intervalo de tiempo transcurrido entre la llegada de la primera onda P y el arribo de la primera onda S.

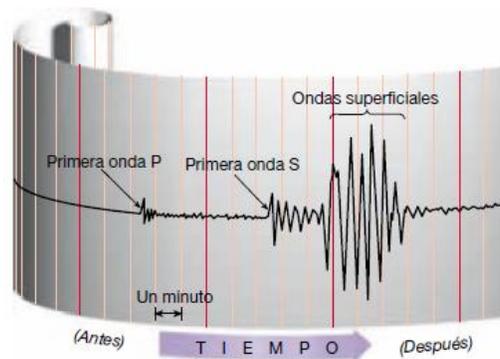


Figura 102 - Registro sísmico típico (sismograma o acelerograma)
 Fuente: Tomado de (Tarbuck & Lutgens, 2005)

También es posible evidenciar en los sismogramas o en los acelerogramas en función de la amplitud y de las frecuencias o periodos, de cuales ondas sísmicas se esperaría un mayor efecto negativo; es claro que son las ondas superficiales las que más potencial de daño tienen sobre las estructuras. En función de las ondas se pueden determinar entre otros la magnitud y localización de los sismos.

Magnitud de los eventos sísmicos

Hasta aquí se ha realizado una explicación de los eventos sísmicos abordando algunas definiciones básicas, conviene ahora anotar que una de las más importantes es aquella que pueda dar una idea de su tamaño. Durante muchos años ha existido la creencia de que entre mayor tamaño mayores son las consecuencias negativas sobre la sociedad y la naturaleza, consideración parcialmente cierta cuando se ignoran en los factores por analizar la cercanía del epicentro a centros poblados, profundidad, tipo de suelo, entre otras variables. En este contexto, a través del tiempo los sismólogos han ideado formas para medir su tamaño, desde esta perspectiva se han generalizado dos opciones, una que mide la intensidad y la otra la magnitud del sismo, ambas importantes para diversas aplicaciones pero con diferencias sustanciales en los resultados obtenidos.

Cuando se habla de la intensidad se establece el tamaño de forma cualitativa; en este caso evidenciando el daño causado sobre diversos tipos de estructuras, afectaciones sobre la naturaleza y características percibidas por las personas que presenciaron el evento se asigna un valor en una escala de intensidades; una de las más usadas actualmente es la de Mercalli modificada por Wood y Neumann en 1931, en la que el sismo apenas sentido por algunos habitantes es identificado con el número I, mientras el que genera un daño total se le asigna el número XII (véase la Tabla 22).

De su uso se obtienen los mapas de isosistas que son líneas que unen puntos de igual intensidad, herramienta útil para definir el alcance de un evento sísmico y para obtener entre otros datos de interés una aproximación del epicentro; a pesar de lo anterior es una metodología limitada por la valoración de quien realiza la inspección visual, quienes pueden tener diferencias de conceptos en la calidad de los materiales que constituyen las estructuras comprometidas y en los parámetros de diseño por mencionar algunas variables;

pero es absolutamente cierto que es una metodología que permite tener una idea del tamaño del sismo en zonas donde no se dispone de estaciones de registro.

Tabla 22 - Escala de Intensidad de Mercalli modificada

Intensidad	Descripción
I	No sentido, excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables.
II	Sentido sólo por unas pocas personas en reposo, especialmente en los pisos elevados de los edificios.
III	Sentido con bastante nitidez en los interiores, especialmente en los pisos superiores de los edificios, pero muchas personas no lo reconocen como un terremoto.
IV	Durante el día, sentido en interiores de edificios por muchas personas, en los exteriores por muy pocas. Sensación de que un camión pesado haya chocado con el edificio.
V	Sentido por casi todo el mundo, muchos se despiertan. A veces se observan cambios en los árboles, los postes y otros objetos altos.
VI	Sentido por todos; muchos se asustan y salen a la calle. Algunos muebles pesados se mueven; pocos casos de paredes caídas o chimeneas dañadas. Poco daño.
VII	Todo el mundo corre a la calle. Daño despreciable en los edificios de diseño y construcción buenos; de ligero a moderado en las estructuras de construcción ordinaria; considerable en los edificios pobres o con estructuras mal diseñadas.
VIII	Daño ligero en estructuras especialmente diseñadas; considerable en edificios sustanciales ordinarios con derrumbamiento parcial; grande en estructuras mal construidas (caída de chimeneas, columnas, monumentos, muros).
IX	Daño considerable en estructuras especialmente diseñadas. Los edificios son desplazados de sus cimientos. Se abren grietas en el suelo.
X	Se destruyen algunas estructuras de madera bien construidas. La mayoría de las estructuras de albañilería y madera se destruyen. Se abren muchísimas grietas en el terreno.
XI	Quedan de pie muy pocas estructuras, si queda alguna. Se destruyen los puentes; grandes fisuras en el terreno.
XII	Daño total. Se ven ondas en el suelo. Los objetos son lanzados al aire.

Fuente: Tomado de (Tarbuck & Lutgens, 2005)

En cuanto a la segunda opción lo primero por señalar es que se trata de una medida cuantitativa, la cual a través de equipos instalados en estaciones de registros y del posterior análisis de resultados obtenidos, permite establecer la magnitud del evento en función de la energía liberada, lo que ha sido posible por los avances tecnológicos desarrollados durante el último siglo. Esta metodología elimina la subjetividad en cuanto a la interpretación de los resultados, adicionalmente los independiza de los efectos que los eventos sísmicos inducen sobre la naturaleza y sobre las edificaciones indistintamente de los materiales que las constituyen, del sistema estructural y proceso constructivo.

Por años, uno de los métodos más usados fue el propuesto por Richter en 1935, la escala de Richter se basa en la mayor amplitud de la onda sísmica registrada en un sismógrafo independientemente del tipo de onda (P, S o Superficial). Como estas se debilitan a su paso por el medio de propagación, Richter desarrolló un método que considera la disminución de la amplitud de la onda con el incremento de la distancia desde el hipocentro, sugiriendo que siempre que se usen los mismos instrumentos en todas las estaciones se obtendrá la misma magnitud con diferencias asociadas al medio de propagación (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Aunque la escala de Richter no tiene un límite superior, la máxima magnitud registrada por un sismógrafo Wood Anderson es de 8.9. En esta escala un incremento de diez veces en la amplitud de onda corresponde a un incremento de una unidad en la escala de magnitud, lo que sugirió el empleo de una escala logarítmica; además cada unidad en la escala indica un incremento de 32 veces la energía liberada, lo que quiere decir que un sismo de M_L 6 libera 32 veces más energía que uno de M_L 5 y aproximadamente 1.024 veces más que uno de M_L 4 (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Resumiendo, el método de Richter puede generar diferencias en las magnitudes determinadas de acuerdo con la roca en la que se propagan las ondas, y adicionalmente es una escala que para magnitudes superiores a 7.0 presenta problemas de saturación debido a que las respuestas de los sismógrafos es limitada para amplitudes y frecuencias (Herráiz, 1997), sin olvidar que aunque posteriormente fue ajustada para usarse en otros lugares del mundo y para distintos sismógrafos, inicialmente fue propuesta para clasificar sismos en el sur de California EEUU, de esta última apreciación su nombre de magnitud local M_L .

Para eliminar estas incidencias, Thomas Hanks y Hiroo Kanamori en 1979 propusieron la magnitud momento M_W , acabando con los diversos problemas que surgen de la identificación de ondas, fases o periodos, y limitando el problema a una magnitud basada en el momento sísmico M_0 , el cual muestra con mayor precisión el tamaño del sismo en función de la energía liberada. Esta metodología aunque requiere un mayor análisis para determinar M_0 ha tenido mucha aceptación por su mayor precisión y por la facilidad suministrada por el desarrollo computacional (Gallego & Sarria, 2010), hasta el punto que en la actualidad es la preferida por los sismólogos para determinar la magnitud de los eventos sísmicos.

A partir de la zona plana del espectro de amplitudes la relación para calcular la magnitud M_W de acuerdo con Herraiz es la que se indica a continuación:

$$M_W = \frac{1}{1.5} \log M_0 - 10.7$$

Ecuación 5 - Determinación magnitud momento de un evento sísmico

En esta ecuación M_0 es igual al producto del módulo de corte del medio (μ), el deslizamiento medio de la falla (D) y el área de la superficie de dislocación o superficie de ruptura de la falla (A) (Chen & Scawthorn, 2003). Esta escala ha permitido extender la evaluación del tamaño hasta $M_W = 9.5$ que es el valor asignado al terremoto de Chile de 1960 el cual se originó por una dislocación de la placa de Nasca de aproximadamente $800 \times 200 \text{ km}^2$ (Herráiz, 1997).

La magnitud momento se ha acreditado entre los sismólogos por las siguientes razones: 1. Es la escala de magnitud que realiza una estimación adecuada para sismos de gran tamaño, 2. Es una medida que puede obtenerse matemáticamente a partir del tamaño de la ruptura y la cantidad de desplazamiento, reflejando mejor la energía liberada y 3. Puede verificarse a través de dos métodos independientes, los estudios de campo de desplazamientos de la falla y a través de métodos sismográficos (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Existen otras escalas como la de magnitud de onda superficial M_S , y la magnitud de onda de cuerpo m_b , pero se considera que las descritas son las de mayor relevancia en la

actualidad. Para concluir, se suministran unas imágenes para llamar la atención sobre la importancia de la magnitud en la percepción de la energía que puede liberar un evento telúrico y de la frecuencia en la que puedan esperarse se repitan en nuestro planeta.

Magnitud del terremoto	Energía liberada* (millones de ergios)	Equivalencia de energía aproximada
0	630.000	1/2 kilo de explosivos
1	20.000.000	
2	630.000.000	Energía emitida por un relámpago
3	20.000.000.000	
4	630.000.000.000	500 kilos de explosivos
5	20.000.000.000.000	
6	630.000.000.000.000	Prueba atómica de 1946 en Bikini
7	20.000.000.000.000.000	Terremoto Northridge de 1994
8	630.000.000.000.000.000	Terremoto Loma Prieta de 1989
9	20.000.000.000.000.000.000	Terremoto de San Francisco de 1906
10	630.000.000.000.000.000.000	Erupción del volcán Santa Elena de 1980
		Terremoto de Alaska de 1964
		Terremoto chileno de 1960
		Consumo anual de energía en Estados Unidos

Figura 103 - Magnitud del terremoto y equivalencia de energía
Fuente: Tomado de (Tarbuck & Lutgens, 2005)

Magnitudes Richter	Efectos cerca del epicentro	Número calculado por año
<2,0	Generalmente no se siente, pero se registra	600.000
2,0–2,9	Potencialmente perceptible	300.000
3,0–3,9	Sentido por algunos	49.000
4,0–4,9	Sentido por la mayoría	6.200
5,0–5,9	Produce daños	800
6,0–6,9	Destrucción en regiones bastante pobladas	266
7,0–7,9	Terremotos importantes. Infligen graves daños	18
≥8,0	Grandes terremotos. Causan destrucción extensa en las comunidades próximas al epicentro	1,4

Figura 104 - Magnitudes de los terremotos e incidencia mundial prevista
Fuente: Tomado de (Tarbuck & Lutgens, 2005)

Fallas activas

Se conoce con el nombre de fallas activas aquellas fallas geológicas ubicadas al interior de las placas tectónicas capaces de producir un evento sísmico, esto se debe a que los movimientos de subducción entre placas terminan generando esfuerzos que producen fallamientos al interior de estas (García, 1998). Para la elaboración de los modelos de amenaza sísmica son relevantes las bases de datos de fallas activas, especialmente en regiones donde la información registrada en los catálogos no logra cubrir el intervalo reconocido de ocurrencia de grandes rupturas sísmicas asociadas a estructuras

neotectónicas corticales (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020).

Para el MNAS 2020 fue importante definir que fallas en Colombia y países vecinos podían ser fuentes generadoras de eventos sísmicos representativos. De acuerdo con el SGC para esta edición del modelo se empleó una versión revisada de la base de datos creada dentro del proyecto South America Risk Assessment (SARA), seleccionando de esta las fallas que cumplieran con los siguientes criterios de selección: 1. La tasa de deformación anual referida a la falla es igual o mayor a 0.1 mm/año, 2. Hubo evidencia de actividad tectónica confirmada en el Pleistoceno tardío y 3. Hubo evidencia de actividad sísmica confirmada o inferida en sismos con magnitud M_W mayor de 5.5.

En total se estudiaron 171 estructuras analizando en cada una de ellas sus características geométricas y geodinámicas; las fallas consideradas y su distribución magnitud-frecuencia pueden ser consultadas en el anexo F del MNAS 2020. (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020). En este anexo se muestran curvas que indican el comportamiento de las tasas de recurrencia en sismos/año en función de su magnitud en escala M_W , figuras importantes para saber de forma rápida cada cuantos años podemos esperar un sismo de una magnitud determinada.

Anexo B – Análisis básico de carga para los edificios

Tabla 23 - Análisis de carga viva y muerta edificio de 5 pisos

Área	Descripción	Magnitud	Unidad	Referencia
Losas de entrepiso - PISO 1 al PISO 4	<u>Carga muerta</u>			
	Tableros de yeso de 8 mm	0.05	kN/m ²	Tabla B.3.4.1-1
	Sistema de suspensión en acero formado en frío	0.10	kN/m ²	Diseñador
	Ductos hidráulicos, eléctricos y de voz y datos	0.10	kN/m ²	Diseñador
	Acabados de piso	1.10	kN/m ²	Tabla B.3.4.1-3
	Muros interiores en particiones livianas	2.00	kN/m ²	Tabla B.3.4.3-1
	Viguetas en dos direcciones (0.10x0.45) c/1.00 m	2.16	kN/m ²	Diseñador
	Total carga muerta losas de entrepiso	5.51	kN/m ²	
	<u>Carga viva</u>			
	Residencial	1.80	kN/m ²	Tabla B.4.2.1-1
Total carga viva losas de entrepiso	1.80	kN/m ²		

Área	Descripción	Magnitud	Unidad	Referencia
Losa de cubierta - PISO 5	<u>Carga muerta</u>			
	Tableros de yeso de 8 mm	0.06	kN/m ²	Tabla B.3.4.1-1
	Sistema de suspensión en acero formado en frío	0.10	kN/m ²	Diseñador
	Ductos hidráulicos, eléctricos y de voz y datos	0.10	kN/m ²	Diseñador
	Afinado en mortero (50mm)	1.05	kN/m ²	Tabla B.3.2-1
	Impermeabilización en membrana superficie lisa	0.10	kN/m ²	Tabla B.3.4.1-4
	Viguetas en dos direcciones (0.10x0.45) c/1.00 m	2.16	kN/m ²	Diseñador
	Total carga muerta losa de cubierta	3.57	kN/m ²	
	<u>Carga viva</u>			
	Residencial	1.80	kN/m ²	Tabla B.4.2.1-1
Total carga viva losa de cubierta	1.80	kN/m ²		

Área	Descripción	Magnitud	Unidad	Referencia
Vigas fachada PISO 1 al 4	<u>Carga muerta</u>			
	Muros para fachada (0.15 m) h = 2.50 m, h equivalente = 1.70 m	4.25	kN/m	Tabla B.3.4.2-4
	Total carga muerta vigas fachada de entrepiso	4.25	kN/m	

Área	Descripción	Magnitud	Unidad	Referencia
Vigas fachada PISO 5	<u>Carga muerta</u>			
	Muros para fachada (0.10 m) h = 1.00 m	1.80	kN/m	Tabla B.3.4.2-4
	Total carga muerta vigas fachada de cubierta	1.80	kN/m	

Fuente: Autor

Tabla 24 - Análisis de carga viva y muerta edificio de 15 pisos

Área	Descripción	Magnitud	Unidad	Referencia
Losas de entrepiso - PISO 2 al PISO 10	<u>Carga muerta</u>			
	Tableros de yeso de 8 mm	0.06	kN/m ²	Tabla B.3.4.1-1
	Sistema de suspensión en acero formado en frio	0.10	kN/m ²	Diseñador
	Ductos hidráulicos, eléctricos y de voz y datos	0.10	kN/m ²	Diseñador
	Acabados de piso	1.10	kN/m ²	Tabla B.3.4.1-3
	Muros interiores en particiones livianas	2.00	kN/m ²	Tabla B.3.4.3-1
	Viguetas (0.11x0.50) c/1.00m	2.64	kN/m ²	Diseñador
	Total carga muerta losa entrepiso	6.00	kN/m ²	
	<u>Carga viva</u>			
	Residencial	1.80	kN/m ²	Tabla B.4.2.1-1
Total carga viva losa entrepiso	1.80	kN/m ²		
Losas de entrepiso - PISO 11 al PISO 14	<u>Carga muerta</u>			
	Tableros de yeso de 8 mm	0.06	kN/m ²	Tabla B.3.4.1-1
	Sistema de suspensión en acero formado en frio	0.10	kN/m ²	Diseñador
	Ductos hidráulicos, eléctricos y de voz y datos	0.10	kN/m ²	Diseñador
	Acabados de piso	1.10	kN/m ²	Tabla B.3.4.1-3
	Muros interiores en particiones livianas	2.00	kN/m ²	Tabla B.3.4.3-1
	Viguetas (0.10x0.45) c/1.00m	2.16	kN/m ²	Diseñador
	Total carga muerta losa entrepiso	5.52	kN/m ²	
	<u>Carga viva</u>			
	Residencial	1.80	kN/m ²	Tabla B.4.2.1-1
Total carga viva losa entrepiso	1.80	kN/m ²		
Losa de cubierta - PISO 15	<u>Carga muerta</u>			
	Tableros de yeso de 8 mm	0.06	kN/m ²	Tabla B.3.4.1-1
	Sistema de suspensión en acero formado en frio	0.10	kN/m ²	Diseñador
	Ductos hidráulicos, eléctricos y de voz y datos	0.10	kN/m ²	Diseñador
	Afinado en mortero (50mm)	1.05	kN/m ²	Tabla B.3.2-1
	Impermeabilización en membrana superficie lisa	0.10	kN/m ²	Tabla B.3.4.1-4
	Viguetas (0.10x0.45) c/1.00m	2.16	kN/m ²	Diseñador
	Total carga muerta losa cubierta	3.57	kN/m ²	
	<u>Carga viva</u>			
	Residencial	1.80	kN/m ²	Tabla B.4.2.1-1
Total carga viva losa cubierta	1.80	kN/m ²		
Vigas fachada PISO 2 al PISO 14	<u>Carga muerta</u>			
	Muros para fachada (0.15 m) h = 2.50 m, h equivalente = 1.70 m	4.25	kN/m	Tabla B.3.4.2-4
	Total carga muerta vigas fachada de entrepiso	4.25	kN/m	
Vigas fachada PISO 15	<u>Carga muerta</u>			
	Muros para antepechos de fachada (0.10 m) h = 1.00 m	1.80	kN/m	Tabla B.3.4.2-4
	Total carga muerta vigas fachada de cubierta	1.80	kN/m	

Fuente: Autor

Anexo C - Base de datos de movimiento fuerte MNAS 2020

Tabla 25 - Base de datos de movimiento fuerte MNAS 2020

Tabla B.2 MNAS 2020 - Eventos corticales							
No.	ID	Prof,[km]	Mw	Lat,[°]	Lon,[°]	Plano	M.F.
1	CO_19940606204742	12.0	6.8	2.91	-75.98	1	S
2	CO_19940913100134	14.0	6.0	7.11	-76.67	1	S
3	CO_19950119150505	17.0	6.5	5.05	-72.94	1	R
4	CO_19950120135924	54.1	5.2	5.17	-72.94	1	R
5	CO_19950122104129	21.7	5.6	5.11	-72.95	1	S
6	CO_19950423235543	43.2	5.2	5.18	-72.49	1	R
7	CO_19951003015125	24.0	7.0	-2.79	-77.82	1	R
8	CO_19961104172500	14.0	6.3	7.36	-77.38	1	S
9	CO_19980623013633	28.1	5.7	10.57	-76.35	2	S
10	CO_19990125181918	17.0	6.1	4.45	-75.66	2	S
11	CO_20000117122008	43.3	5.6	6.72	-72	1	R
12	CO_20000523163648	40.9	5.2	2.15	-78.35	1	S
13	CO_20001008201230	10.0	5.1	0.36	-78.1	1	R
14	CO_20010908224510	24.6	5.1	8.35	-74.83	1	S
15	CO_20020426013626	24.9	5.1	6.59	-73.58	1	S
16	CO_20040220111558	39.7	4.8	10.75	-73.85	1	R
17	CO_20040818070652	22.9	5.1	2.22	-76.62	1	S
18	CO_20070306130508	15.0	5.2	2.09	-76.54	1	S
19	CO_20070424085334	50.6	5.1	5.62	-75.9	2	N
20	CO_20070620190407	24.3	5.2	7.12	-72.22	1	S
21	CO_20070716225823	30.6	5.2	7.16	-72.18	1	R
22	CO_20080524192044	14.7	5.9	4.37	-73.71	2	S
23	CO_20090912200625	10.0	6.4	10.73	-67.97	1	S
24	CO_20100326015638	15.0	5.0	-1.29	-78.34	2	S
25	CO_20100605011959	18.1	4.8	5.02	-72.43	1	R
26	CO_20100729193445	33.1	5.1	3.91	-75.1	1	S
27	CO_20110302185048	33.6	5.8	8.59	-76.92	1	S
28	CO_20130516162918	33.4	4.8	12.04	-73.46	2	N
29	CO_20130806025012	31.3	4.9	7.19	-77.29	1	S
30	CO_20130825233555	24.7	4.9	7.64	-75	2	S
31	CO_20140105033638	32.8	5.5	4.61	-76.69	2	N
32	CO_20140109125017	15.4	5.0	3.02	-75.93	1	S
33	CO_20140217094136	41.1	5.3	6.54	-71.71	1	S
34	CO_20140219111014	19.6	5.3	9.67	-69.75	1	S
35	CO_20140221114325	25.6	5.1	12.5	-70.72	2	N
36	CO_20141020193321	3.1	5.6	0.75	-77.93	2	S
37	CO_20141128043623	51.4	5.1	8.74	-77.46	2	S
38	CO_20150205042151	5.0	5.3	8.24	-72.14	1	S
39	CO_20150509143151	38.7	4.9	11.48	-72.12	2	S
40	CO_20150729001025	12.0	5.9	8.23	-77.32	1	S
41	CO_20150907055117	13.6	4.9	8.61	-77.83	1	R
42	CO_20151012043541	10.0	4.9	7.54	-77.48	1	R
43	CO_20151128105911	15.4	4.8	3.89	-71.17	2	S
44	CO_20151229025406	5.7	5.1	6.86	-76.7	1	S
45	CO_20160411092928	22.8	5.3	7.03	-76.61	1	S
46	CO_20160914015832	18.0	5.9	7.37	-76.17	1	S
47	CO_20161031002012	33.0	5.6	3.45	-74.5	1	R
48	CO_20170206130245	38.0	5.5	3.45	-74.67	1	R
49	CO_20170418174956	14.0	5.9	-2.71	-75.3	1	R

Tabla B.3 MNAS 2018 - Eventos del nido sísmico de Bucaramanga							
No.	ID	Prof.[km]	Mw	Lat,[°]	Lon,[°]	Plano	M.F.
1	CO_19941210152420	161.4	5.2	6.75	-72.98	1	R
2	CO_19950520221900	146.8	5.2	5.51	-73.81	2	N
3	CO_19970101043553	160.9	5.3	6.74	-72.93	1	S
4	CO_19990318235411	65.1	5.1	10.02	-73.49	1	S
5	CO_19991108055121	161.1	5.4	6.7	-72.9	1	S
6	CO_20011119210124	161.0	5.3	6.73	-72.9	2	S
7	CO_20040618145954	150.8	4.8	6.64	-73.06	1	S
8	CO_20041003083030	159.0	4.8	6.75	-72.99	2	S
9	CO_20050225064124	158.7	5.3	6.71	-73.01	2	S
10	CO_20060101094315	69.6	5.1	11.8	-71.24	2	N
11	CO_20060110031441	156.5	5.0	6.68	-72.94	1	S
12	CO_20060508150739	164.4	4.9	6.73	-72.98	1	S
13	CO_20070506044714	161.3	5.4	6.73	-72.96	1	S
14	CO_20080217211502	156.0	5.4	6.73	-72.98	1	S
15	CO_20090420085402	123.7	5.1	7.68	-73.39	1	S
16	CO_20091027162553	159.4	5.1	6.71	-72.95	1	S
17	CO_20120224134317	164.1	5.1	6.65	-73.01	1	R
18	CO_20120901050945	163.4	5.1	6.65	-72.98	1	S
19	CO_20130725120926	157.3	5.0	6.68	-73.09	2	S
20	CO_20140207203711	158.3	5.3	6.79	-73.07	1	R
21	CO_20140314232636	131.2	5.0	10.27	-72.95	1	S
22	CO_20141125202015	158.8	5.0	6.83	-73.1	1	S
23	CO_20141214014930	149.4	4.8	5.45	-73.7	2	N
24	CO_20150310205544	155.0	6.2	6.78	-72.99	2	N
25	CO_20150322222737	154.6	4.9	6.8	-73.15	1	S
26	CO_20151014074719	125.7	5.1	7.65	-73.3	1	S

Tabla B.4 MNAS 2018 - Eventos de la zona de Benioff							
No.	ID	Prof.[km]	Mw	Lat,[°]	Lon,[°]	Plano	M.F.
1	CO_19950208184027	74.0	6.3	4.05	-76.59	2	N
2	CO_19950819214333	120.0	6.5	5.11	-75.59	2	N
3	CO_19960911062847	109.0	5.3	4.18	-76.53	1	S
4	CO_19970219182514	103.3	5.8	4.5	-76.45	1	R
5	CO_19970902121325	206.0	6.7	3.8	-75.72	1	R
6	CO_19971211075630	178.0	6.3	3.91	-75.77	1	S
7	CO_20010922032339	174.2	5.9	3.85	-75.91	1	S
8	CO_20050308155943	61.3	5.0	4.41	-75.95	1	S
9	CO_20050421033924	101.9	5.2	4.99	-76.26	1	S
10	CO_20080913093201	133.1	5.7	4.8	-75.52	2	N
11	CO_20090908082601	83.8	4.8	4.63	-76.63	1	R
12	CO_20091218143003	163.5	5.1	3.05	-76.27	2	S
13	CO_20100129175223	130.7	4.9	4.66	-76.01	2	N
14	CO_20100626184014	118.6	5.2	-4.83	-77.27	2	N
15	CO_20100812115416	209.9	7.1	-1.27	-77.32	2	N
16	CO_20101009140447	122.8	5.2	-2.74	-76.71	2	N
17	CO_20110815025319	176.8	5.7	-1.79	-76.99	2	N
18	CO_20120930163135	163.9	7.2	1.92	-76.4	2	N
19	CO_20130209141608	147.2	7.0	1.13	-77.41	1	S
20	CO_20130827232205	69.4	4.8	3.75	-76.68	1	S
21	CO_20150221222646	95.0	5.2	4.67	-76.18	2	S
22	CO_20150222125624	149.0	5.6	2.73	-76.5	2	N

Tabla B.5 MNAS 2018 - Eventos interplaca de la subducción del pacífico							
No.	ID	Prof.[km]	Mw	Lat.[°]	Lon.[°]	Plano	M.F.
1	CO_19980804185920	20.0	7.1	-0.59	-80.31	1	R
2	CO_20001108070000	17.0	6.5	7.09	-77.8	1	R
3	CO_20030822052915	31.4	5.0	3.08	-77.87	2	N
4	CO_20041115090656	15.0	7.2	4.71	-77.47	1	R
5	CO_20060123205046	23.4	6.2	6.86	-77.78	1	R
6	CO_20060124021544	25.0	5.4	6.83	-77.68	1	R
7	CO_20060129174914	15.6	5.2	6.77	-77.73	1	R
8	CO_20070910014914	29.3	6.7	2.96	-77.95	2	N
9	CO_20100911185524	50.1	5.2	-4.35	-80.59	1	R
10	CO_20101125041940	26.1	5.4	0.38	-79.97	1	S
11	CO_20110817080204	21.0	5.0	5.65	-77.64	1	R
12	CO_20110913043848	15.0	5.2	5.67	-77.59	1	R
M13	CO_20110913044935	12.8	5.5	5.65	-77.56	1	R
14	CO_20120110180712	36.8	5.1	-0.88	-80.42	1	R
15	CO_20140309202955	25.9	5.6	1.52	-79.56	1	R
16	CO_20140616063932	7.3	5.7	1.65	-79.38	1	R
17	CO_20150530062605	13.0	5.4	1.22	-79.57	1	R
18	CO_20150719111621	10.0	5.0	2.76	-78.9	1	R
19	EC_20160416235837	21.0	7.8	0.35	-79.93	1	R
20	EC_20160518075703	16.0	6.7	0.43	-79.79	1	R
21	EC_20160518164644	30.0	6.9	0.5	-79.62	1	R

Fuente: (Servicio Geológico Colombiano & Global Earthquake Model, 2020)

Anexo D – Espectro horizontal objetivo en la localización de la estructura

Tabla 26 - Valores aceleración espectral y periodo del espectro horizontal objetivo

No.	Sa	T (seg)	No.	Sa	T (seg)
1	0.850	0.000	44	0.097	4.300
2	0.850	0.100	45	0.092	4.400
3	0.850	0.200	46	0.088	4.500
4	0.850	0.300	47	0.084	4.600
5	0.850	0.400	48	0.081	4.700
6	0.850	0.500	49	0.078	4.800
7	0.850	0.600	50	0.074	4.900
8	0.850	0.700	51	0.072	5.000
9	0.850	0.800	52	0.069	5.100
10	0.850	0.900	53	0.066	5.200
11	0.850	1.000	54	0.064	5.300
12	0.813	1.100	55	0.061	5.400
13	0.745	1.200	56	0.059	5.500
14	0.688	1.300	57	0.057	5.600
15	0.639	1.400	58	0.055	5.700
16	0.596	1.500	59	0.053	5.800
17	0.559	1.600	60	0.051	5.900
18	0.526	1.700	61	0.050	6.000
19	0.497	1.800	62	0.048	6.100
20	0.471	1.900	63	0.047	6.200
21	0.447	2.000	64	0.045	6.300
22	0.405	2.100	65	0.044	6.400
23	0.369	2.200	66	0.042	6.500
24	0.338	2.300	67	0.041	6.600
25	0.310	2.400	68	0.040	6.700
26	0.286	2.500	69	0.039	6.800
27	0.264	2.600	70	0.038	6.900
28	0.245	2.700			
29	0.228	2.800			
30	0.213	2.900			
31	0.199	3.000			
32	0.186	3.100			
33	0.175	3.200			
34	0.164	3.300			
35	0.155	3.400			
36	0.146	3.500			
37	0.138	3.600			
38	0.131	3.700			
39	0.124	3.800			
40	0.118	3.900			
41	0.112	4.000			
42	0.106	4.100			
43	0.101	4.200			

Fuente: Autor

Anexo E – Características de los arreglos correspondientes a los registros entregados por el SGC

Lo primero es aclarar que para diferenciar la información, el SGC identificó cada uno de los 118 eventos sísmicos del Anexo B con un código que inicia con dos letras mayúsculas seguidas de catorce números, las letras corresponden a las iniciales del país donde se ubicó el epicentro y los números en su orden al año, mes, día, hora, minutos y segundos en que ocurrió el sismo; adicionalmente, como el mismo evento fue registrado por más de una estación, la diferencia entre registros se establece anteponiendo al código anterior la abreviatura de la estación que lo registró, por ejemplo CFILA_CO_19940913100134. Además de la información anterior, se recibieron cuatro archivos en Excel denominados FlatFile (uno por ambiente tectónico), estos archivos contienen información adicional de cada registro de los eventos sísmicos como se explicará más adelante.

Con base en los tipos de arreglos para manejo de datos utilizados por MATLAB, es importante señalar que cada uno de los 1.786 registros entregados por el SGC contiene 13 arreglos organizados según lo siguientes tipos: Los Canales del 1 al 6 que representan los registros de aceleración para las componentes horizontales y vertical están en arreglos tipo estructura (De interés el Canal 1 y Canal 3 como componentes horizontales H1 y H2 respectivamente y Canal 2 como componente vertical V); el código del evento, el código de la estación que lo registró y el nombre del archivo están en arreglos tipo caracter; y los datos restantes en arreglo tipo double.

A su vez, cada Canal del 1 al 6 contiene 6 arreglos, de estos se usaron el arreglo tipo double DT que corresponde al intervalo de tiempo con que el equipo de cada estación registró el movimiento, el arreglo double Señal_Procesada que contiene los datos de aceleraciones en fracciones de g para cada instante de tiempo y el arreglo double Frecuencias_Filtrado que indican los rangos de frecuencias en Hertz considerados durante el procesamiento y filtrado de cada señal.

Aunque entre los datos suministrados se encuentra el tipo de falla en la que se generó cada evento sísmico, no se consideró esta variable en el análisis teniendo en cuenta que en

investigaciones anteriores se ha demostrado que su incidencia en la magnitud de la relación V/H es muy débil (Bozorgnia & Campbell, 2004). A continuación se presentan ejemplos en las Figuras 105 y 106 del contenido de cada uno de los archivos y de los tipos de arreglos que contienen la información indicada.

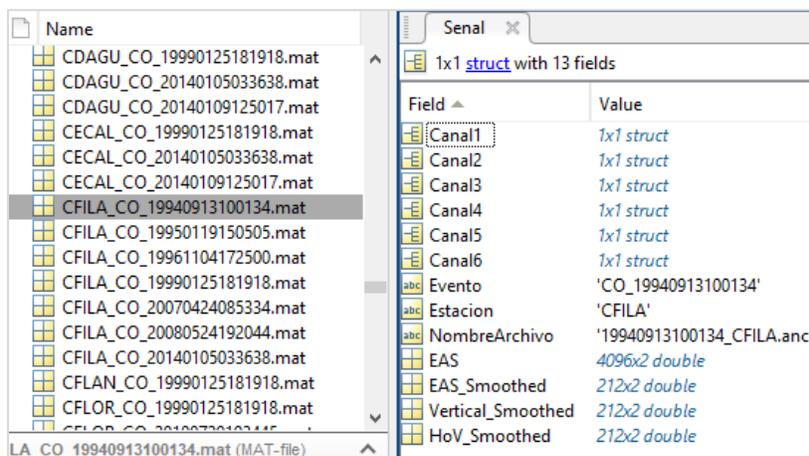


Figura 105 - Ejemplo del registro CFILA_CO_19940913100134 en el Current Folder de MATLAB, a la derecha los 13 arreglos que contiene y el tipo de cada uno de ellos

Fuente: Autor

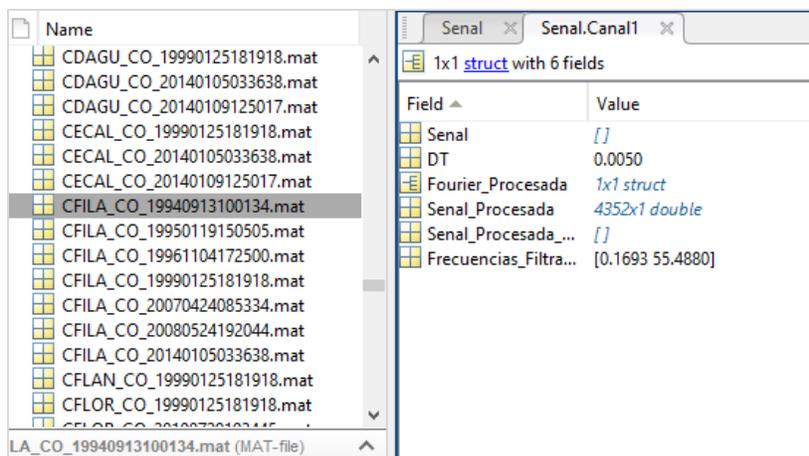


Figura 106 - Ejemplo del contenido del arreglo tipo estructura correspondiente al Canal 1 del registro CFILA_CO_19940913100134, se evidencia los 6 arreglos indicados en líneas anteriores

Fuente: Autor

Los datos de profundidad del hipocentro, distancia epicentral, magnitud Mw, ambiente tectónico y parámetro Vs30 estaban como datos en formato numérico o de texto en los archivos de Excel FlatFile.

Anexo F – Resultados adicionales para la relación V/H en función de PGA por ambiente tectónico incluyendo todos los perfiles de suelo

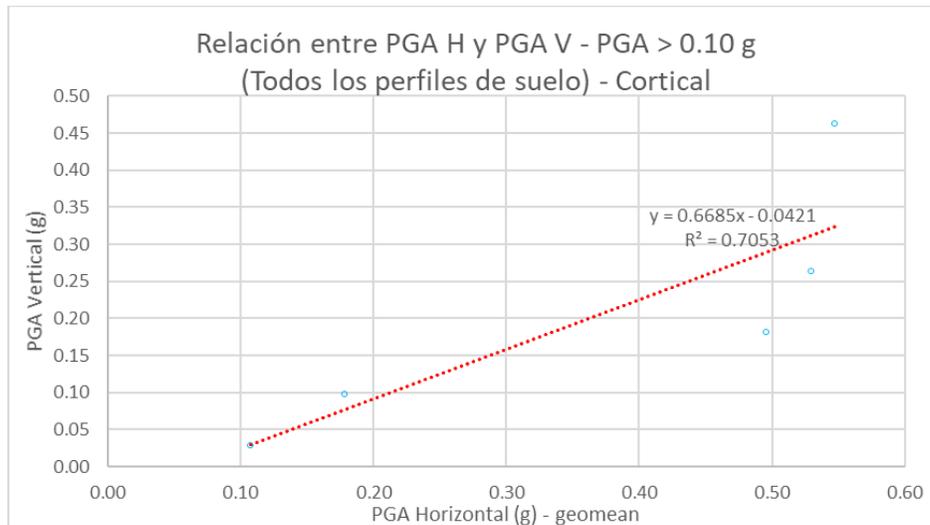


Figura 107 - Relación entre PGA H y PGA V todos los perfiles de suelo ambiente Cortical PGA H > 0.10 g
Fuente: Autor

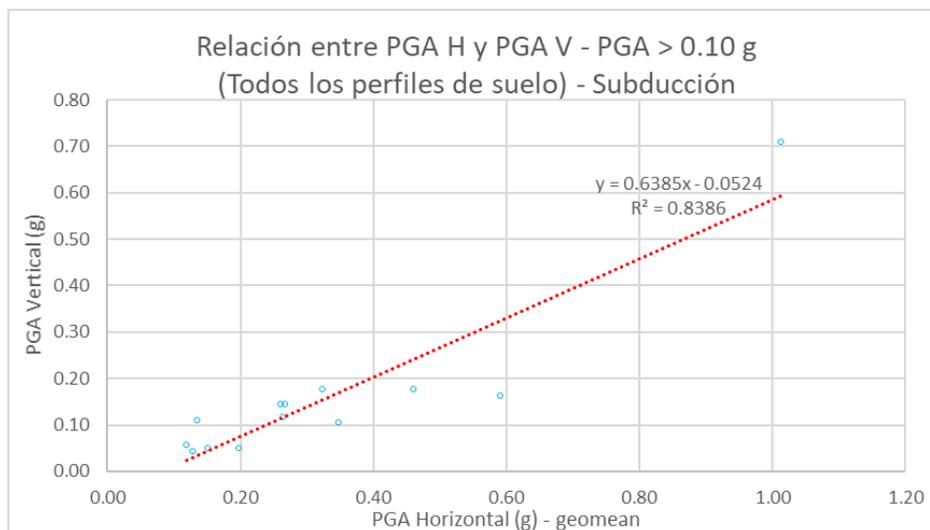


Figura 108 - Relación entre PGA H y PGA V todos los perfiles de suelo ambiente de Subducción PGA H > 0.10 g
Fuente: Autor

Anexo G – Resultados adicionales para la relación V/H en función de Sa por ambiente tectónico incluyendo todos los perfiles de suelo

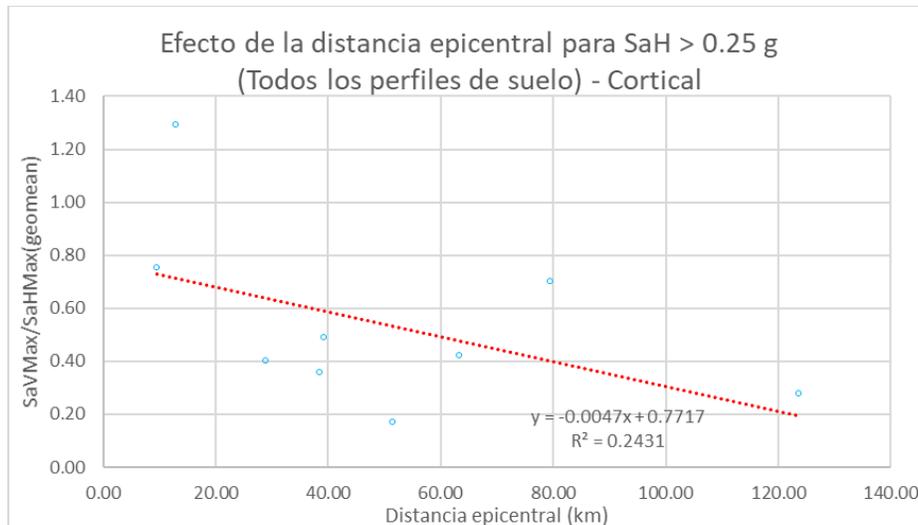


Figura 109 - Efecto de la distancia epicentral para SaH > 0.25g todos los perfiles de suelo del ambiente cortical
Fuente: Autor.

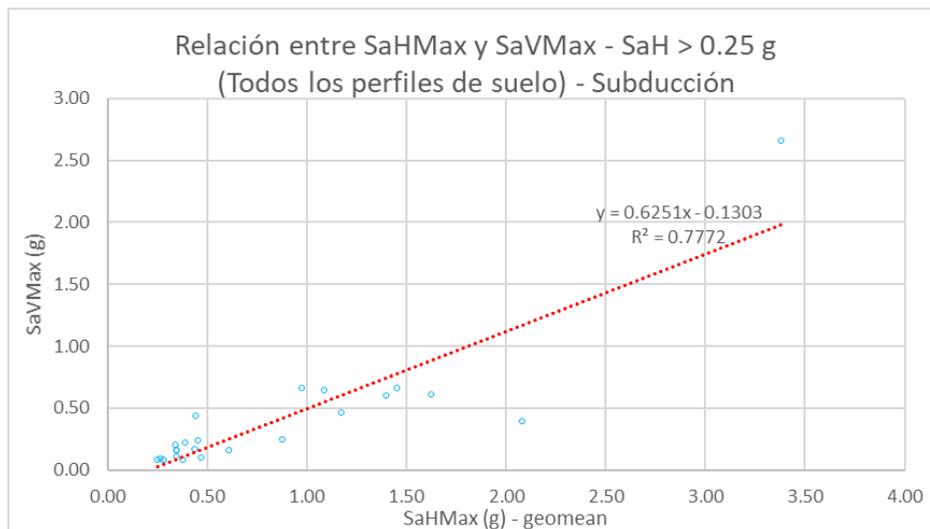
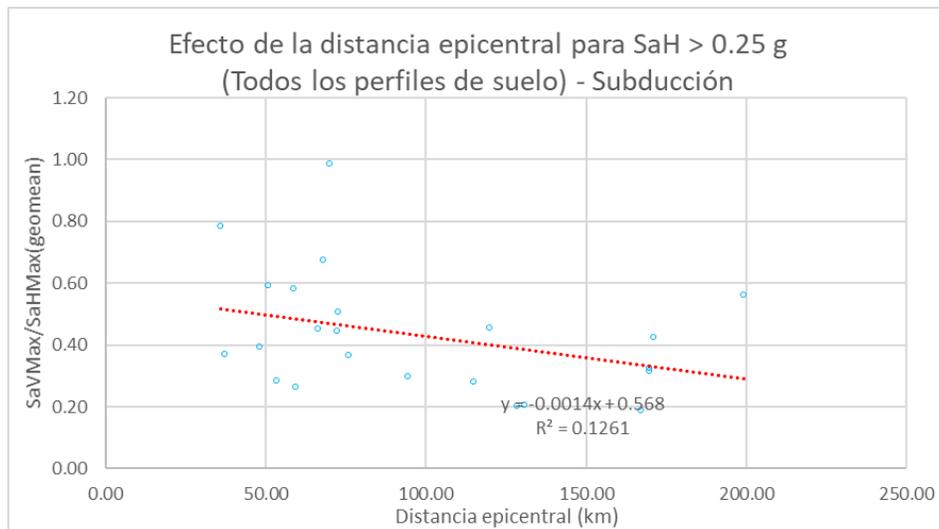


Figura 110 - Relación entre SaH y SaV todos los perfiles de suelo ambiente Subducción, se incluyen solo registros con SaH > 0.25 g
Fuente: Autor



*Figura 111 - Efecto de la distancia epicentral para SaH > 0.25g todos los perfiles de suelo ambiente
Subducción
Fuente: Autor*

Anexo H – Resultados adicionales para la relación V/H en función de PGA por tipo de suelo incluyendo todos los ambientes tectónicos

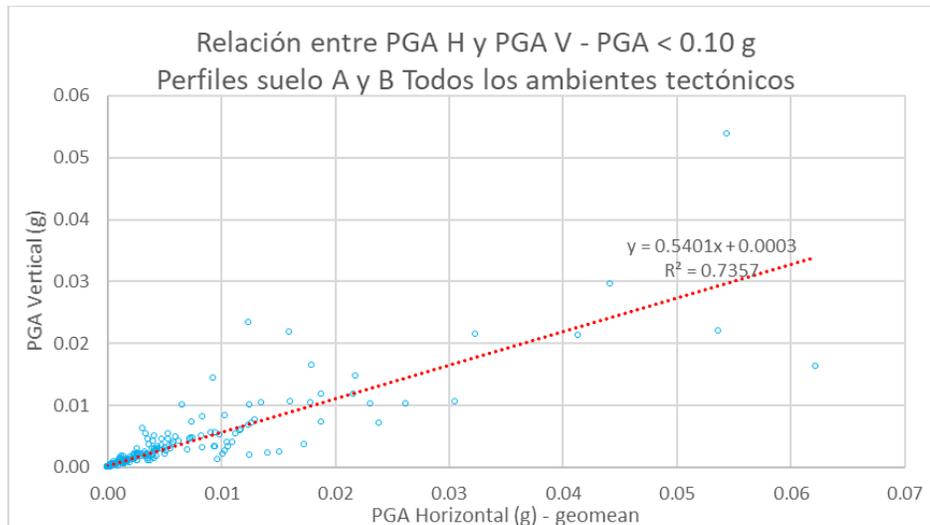


Figura 112 - Relación entre PGA H y PGA V perfiles de suelo A y B incluyendo todos los ambientes tectónicos con PGA H < 0.10 g
Fuente: Autor

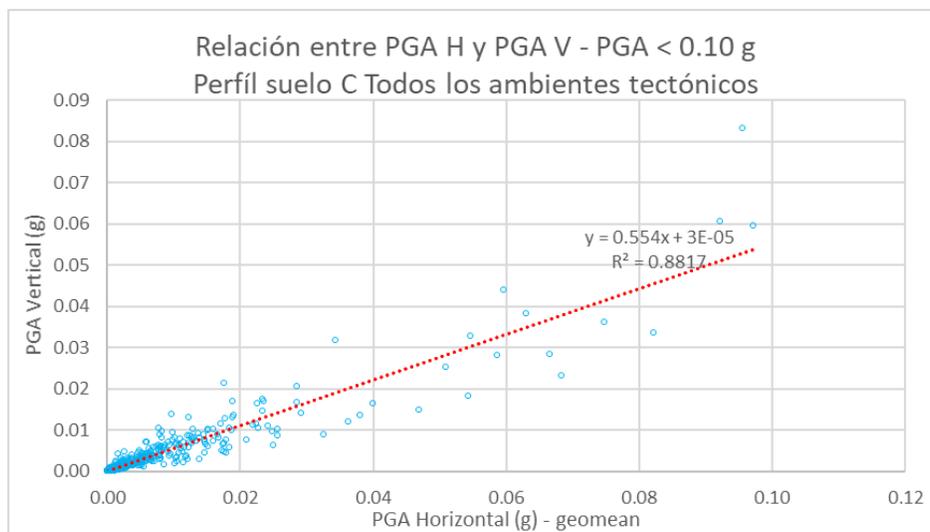


Figura 113 - Relación entre PGA H y PGA V perfil de suelo C incluyendo todos los ambientes tectónicos con PGA H < 0.10 g
Fuente: Autor

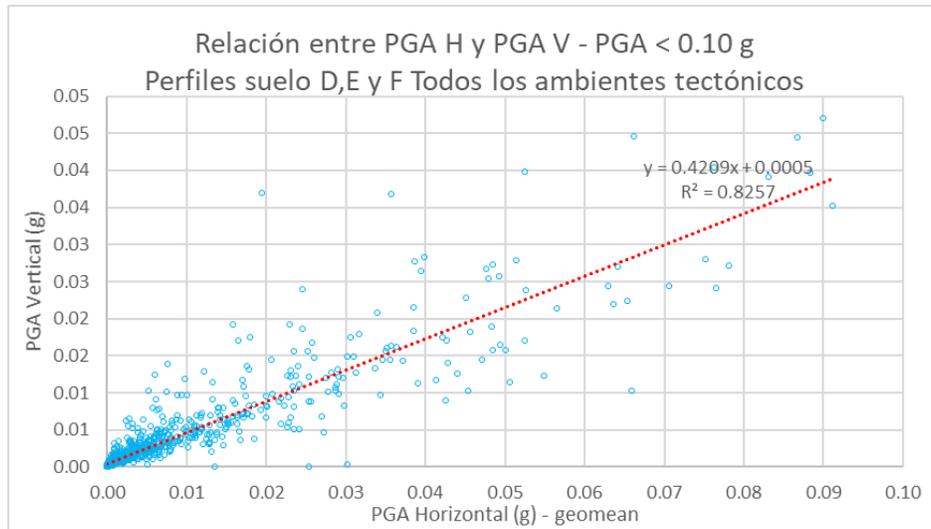
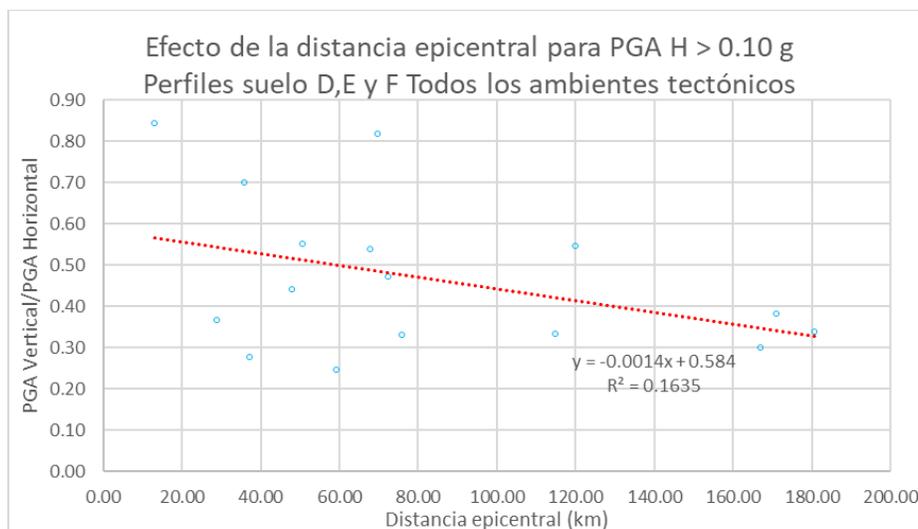
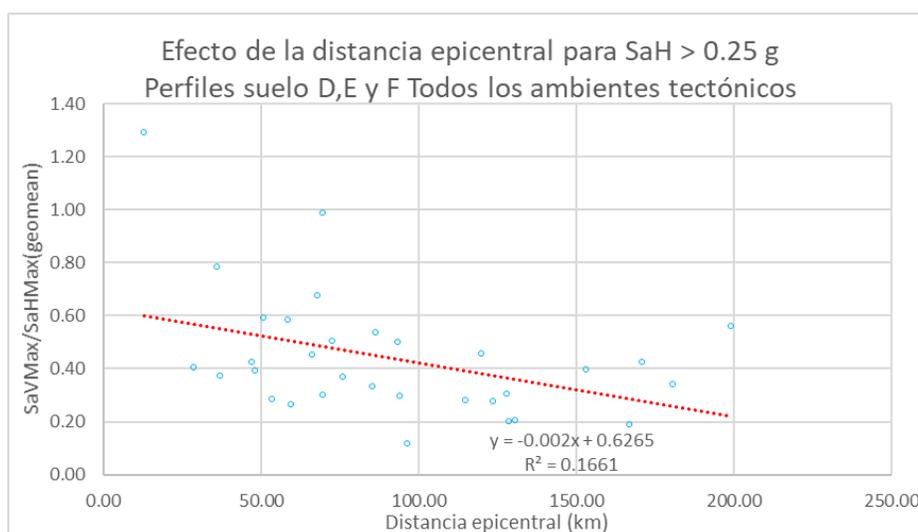


Figura 114 - Relación entre PGA H y PGA V perfiles de suelo D, E y F incluyendo todos los ambientes tectónicos con PGA H < 0.10 g
Fuente: Autor

Anexo I – Resultados adicionales para la relación V/H en función de PGA por tipo de suelo incluyendo todos los ambientes tectónicos



*Figura 115 - Efecto de la distancia epicentral para PGA H > 0.10 g y perfiles de suelo D, E y F incluyendo todos los ambientes tectónicos
Fuente: (Autor)*



*Figura 116 - Efecto de la distancia epicentral para SaH H > 0.25 g y perfiles de suelo D, E y F incluyendo todos los ambientes tectónicos
Fuente: (Autor)*

Anexo J – Comparación de relaciones espectrales para el ambiente Cortical considerando la incidencia de registros con DistEpi<60km



Figura 117 - Comparación de relaciones espectrales para el ambiente Cortical considerando la incidencia de los registros con distancia epicentral menor a 60 km

Fuente: Autor

Anexo K – Comparación de relaciones espectrales para el ambiente Cortical considerando la incidencia de registros con $DistEpi < 100 km$

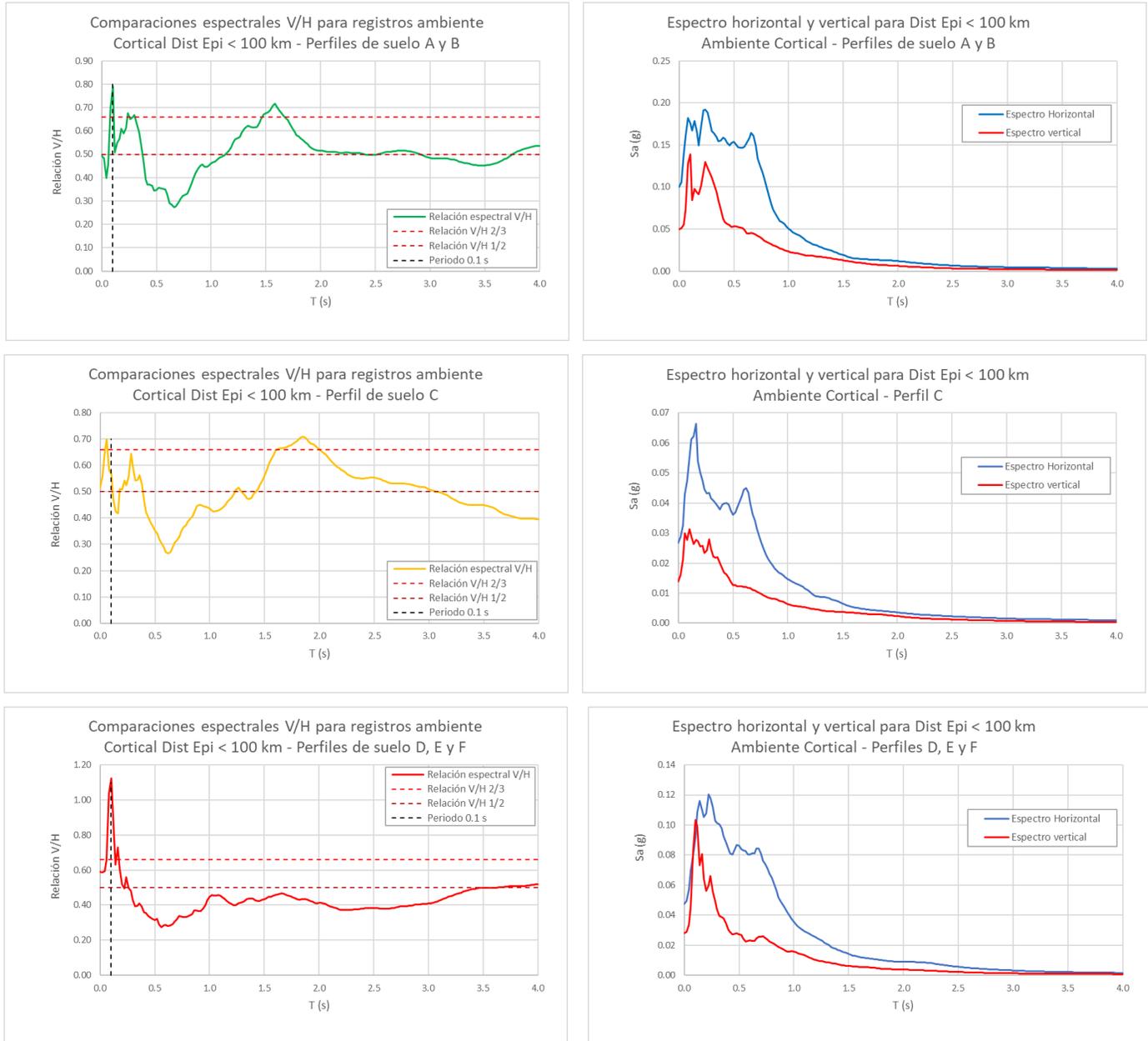


Figura 118 - Comparación de relaciones espectrales para el ambiente Cortical considerando la incidencia de los registros con distancia epicentral menor a 100 km

Fuente: Autor

Anexo L – Comparación de relaciones espectrales para el ambiente Cortical considerando la incidencia de todos los registros

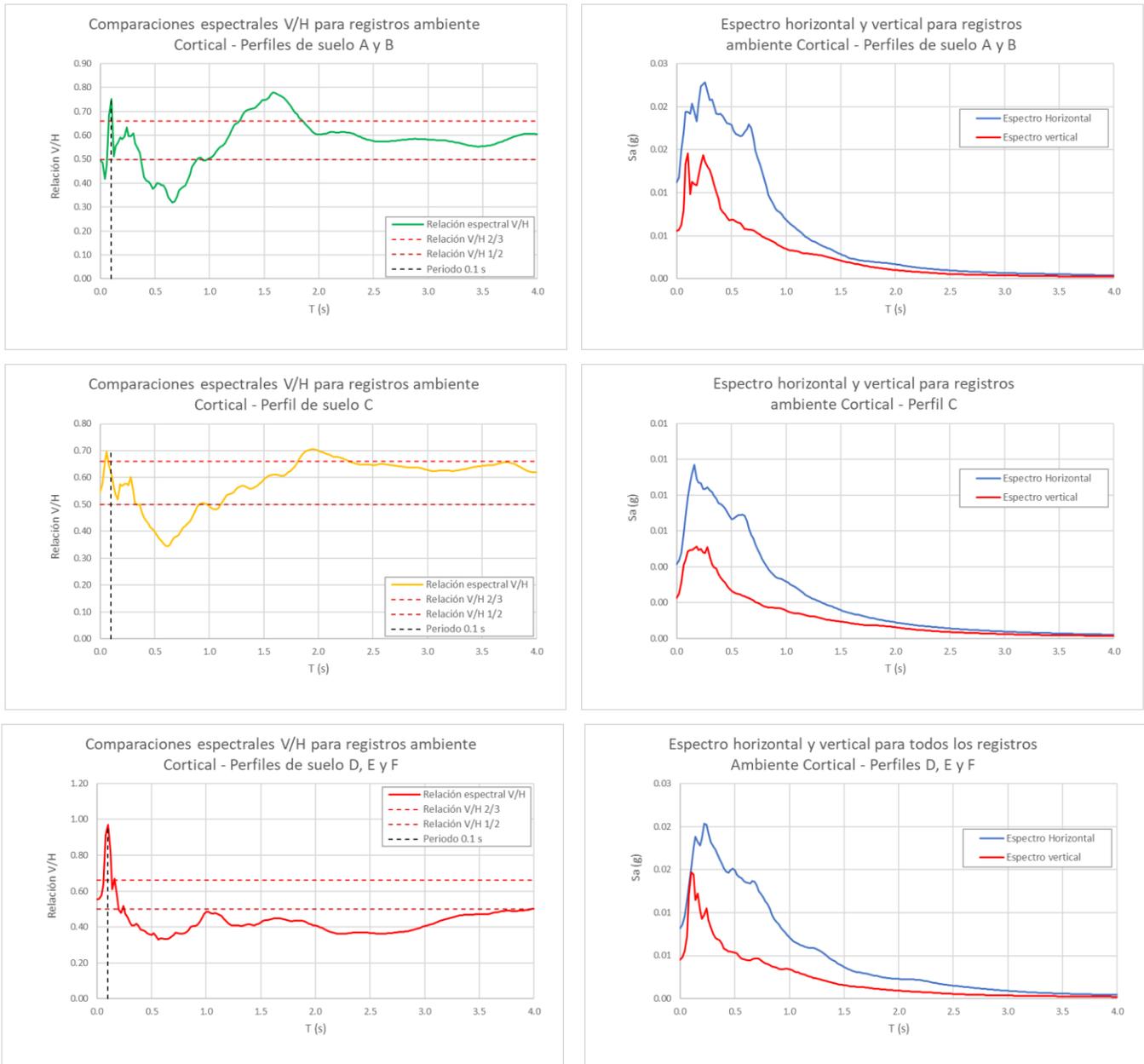
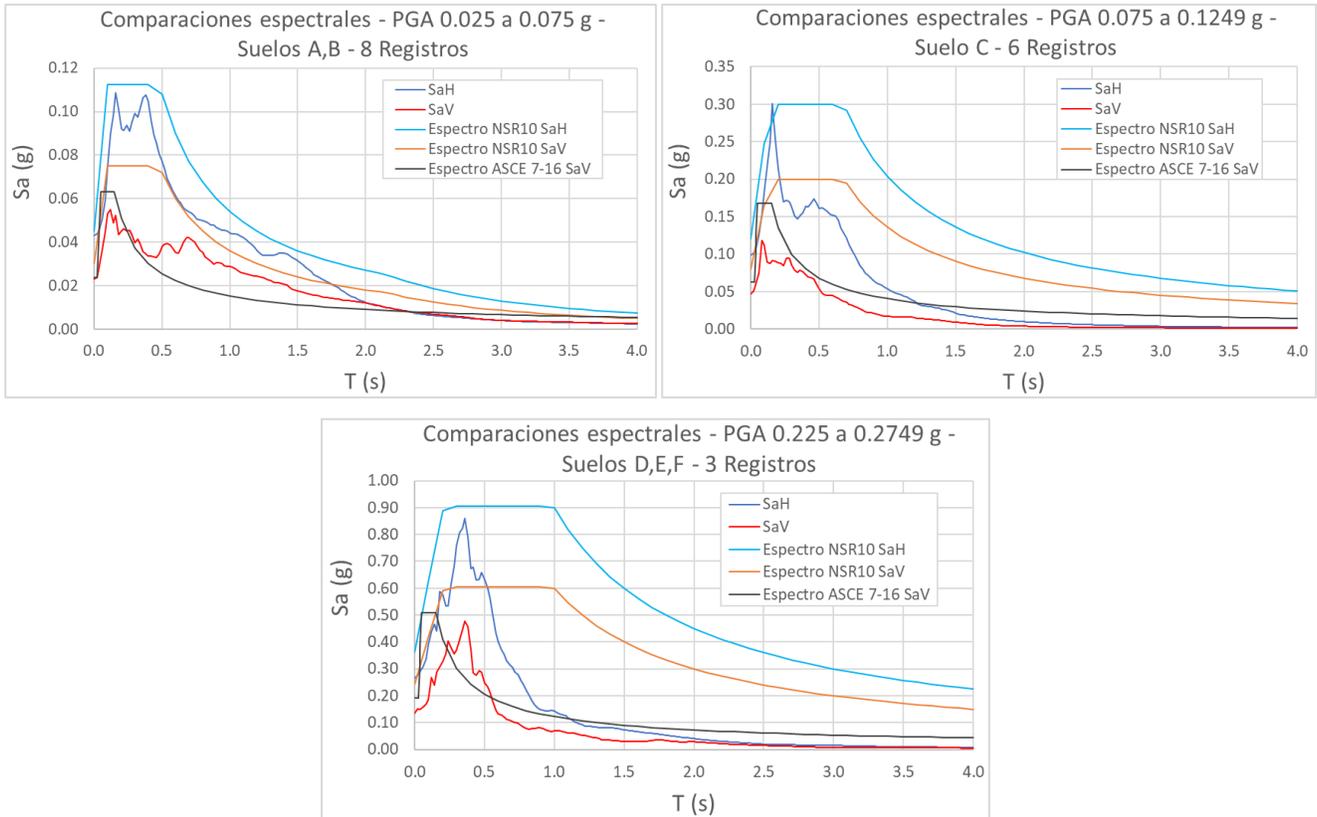


Figura 119 - Comparación de relaciones espectrales para el ambiente Cortical considerando la incidencia de todos los registros
Fuente: Autor

Anexo M – Comparación de algunas formas espectrales de registros reales con respecto a las formas espectrales de NSR-10 y ASCE 7-16



Las imágenes incluidas en este anexo son solo de referencia en cuanto existen pocos datos como para ser incorporadas en el texto y concluir sobre ellas. La metodología para construirlas consistió en obtener el espectro de amenaza por NSR-10 para unas características específicas de sitio, posteriormente escoger de los registros del SGC – MNAS 2020 espectros que cumplieran con esas características para comparar los espectros definidos en la norma con los espectros generados por movimientos del terreno ocurridos en nuestro territorio. Sin embargo, durante el ejercicio se evidenció que existen pocos registros con aceleraciones relevantes que pudieran incluirse en segmentos de PGA y condiciones de sitio para obtener resultados consistentes. En los pocos ejemplos que lograron construirse se genera la impresión de que los espectros normativos cumplen los rangos de aceleración espectral impuestos por los movimientos del terreno registrados, en las imágenes anteriores se dejan algunos ejemplos.

Anexo N – Resultados de las relaciones V/H para las solicitaciones de P, V y M en el edificio de 5 pisos ADE

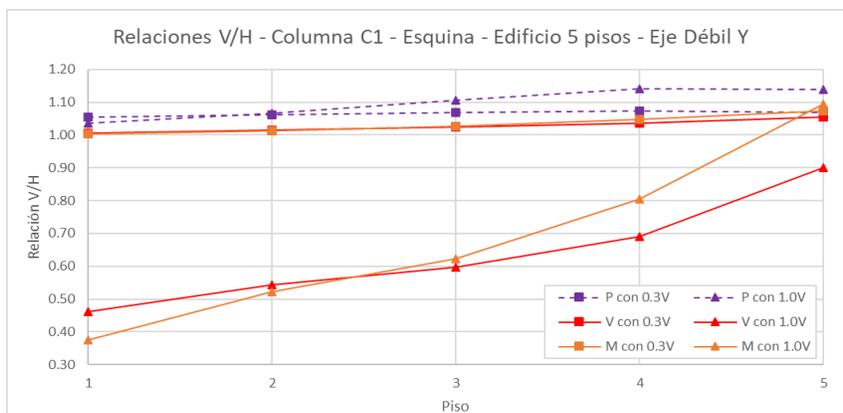


Figura 120 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C1 edificio 5 pisos (Y) ADE
Fuente: Autor

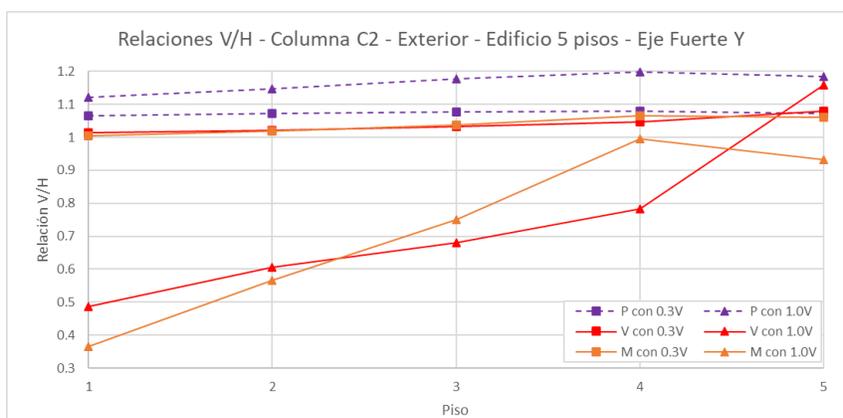


Figura 121 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C2 edificio 5 pisos (Y) ADE
Fuente: Autor

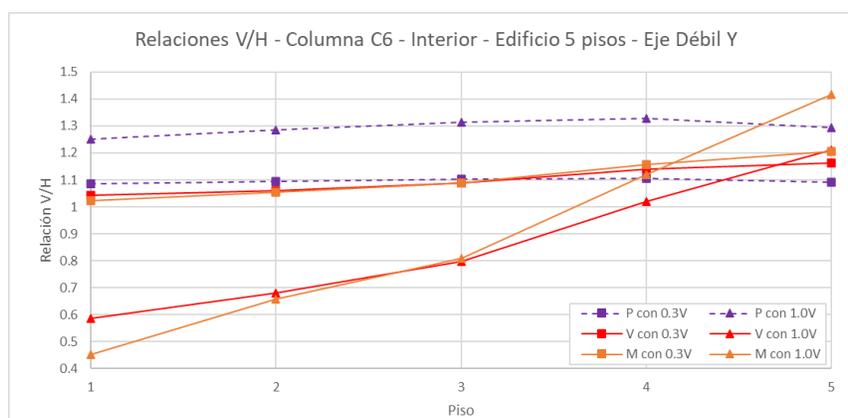


Figura 122 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C6 edificio 5 pisos (Y) ADE
Fuente: Autor

COLUMNA DE ESQUINA C1					
Indicadores eje fuerte en X (V2-M3)	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
P con 0.3V	1.05	1.06	1.07	1.07	1.07
P con 1.0V	1.04	1.07	1.11	1.14	1.14
V con 0.3V	1.00	1.01	1.03	1.04	1.08
V con 1.0V	0.42	0.53	0.60	0.69	1.11
M con 0.3V	1.00	1.01	1.03	1.06	1.05
M con 1.0V	0.34	0.49	0.67	0.91	0.84

COLUMNA DE ESQUINA C1					
Indicadores eje débil en Y (V3-M2)	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
P con 0.3V	1.05	1.06	1.07	1.07	1.07
P con 1.0V	1.04	1.07	1.11	1.14	1.14
V con 0.3V	1.01	1.01	1.02	1.04	1.05
V con 1.0V	0.46	0.54	0.60	0.69	0.90
M con 0.3V	1.00	1.01	1.03	1.05	1.07
M con 1.0V	0.37	0.52	0.62	0.80	1.09

COLUMNA EXTERIOR C2					
Indicadores eje débil en X (V2-M3)	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
P con 0.3V	1.07	1.08	1.08	1.08	1.08
P con 1.0V	1.18	1.21	1.23	1.25	1.23
V con 0.3V	1.03	1.04	1.06	1.10	1.13
V con 1.0V	0.50	0.58	0.65	0.83	1.02
M con 0.3V	1.02	1.04	1.07	1.12	1.17
M con 1.0V	0.40	0.56	0.67	0.91	1.21

COLUMNA EXTERIOR C2					
Indicadores eje fuerte en Y (V3-M2)	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
P con 0.3V	1.06	1.07	1.08	1.08	1.07
P con 1.0V	1.12	1.15	1.18	1.20	1.19
V con 0.3V	1.02	1.02	1.03	1.05	1.08
V con 1.0V	0.49	0.61	0.68	0.78	1.16
M con 0.3V	1.01	1.02	1.04	1.07	1.06
M con 1.0V	0.37	0.57	0.75	1.00	0.93

COLUMNA C6 INTERIOR					
Indicadores eje fuerte en X (V2-M3)	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
P con 0.3V	1.08	1.09	1.10	1.10	1.09
P con 1.0V	1.26	1.29	1.32	1.34	1.30
V con 0.3V	1.03	1.04	1.06	1.10	1.15
V con 1.0V	0.49	0.58	0.67	0.83	1.17
M con 0.3V	1.01	1.04	1.07	1.14	1.22
M con 1.0V	0.37	0.55	0.71	1.08	1.57

COLUMNA C6 INTERIOR					
Indicadores eje débil en Y (V3-M2)	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
P con 0.3V	1.08	1.09	1.10	1.10	1.09

COLUMNA C6 INTERIOR					
P con 1.0V	1.25	1.29	1.32	1.33	1.29
V con 0.3V	1.04	1.06	1.09	1.14	1.16
V con 1.0V	0.59	0.68	0.80	1.02	1.21
M con 0.3V	1.02	1.05	1.09	1.16	1.21
M con 1.0V	0.45	0.66	0.81	1.12	1.42

VIGA EJE 1 ENTRE EJES B Y C					
Indicadores extremos de la viga	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
V extremo VG	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02
M extremo VG	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02
VIGA EJE 1 ENTRE EJES B Y C					
Indicadores centro de la viga	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
V centro VG	1.03	1.03	1.04	1.06	1.07
M centro VG	1.07	1.09	1.12	1.11	1.11

VIGA EJE 2 ENTRE EJES B Y C					
Indicadores extremos de la viga	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
V extremo VG	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02
M extremo VG	1.01	1.01	1.01	1.02	1.01
VIGA EJE 2 ENTRE EJES B Y C					
Indicadores centro de la viga	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
V centro VG	1.03	1.03	1.04	1.06	1.06
M centro VG	1.06	1.07	1.09	1.08	1.08

Anexo O – Resultados de las relaciones V/H para las solicitaciones de P, V y M en el edificio de 15 pisos ADE

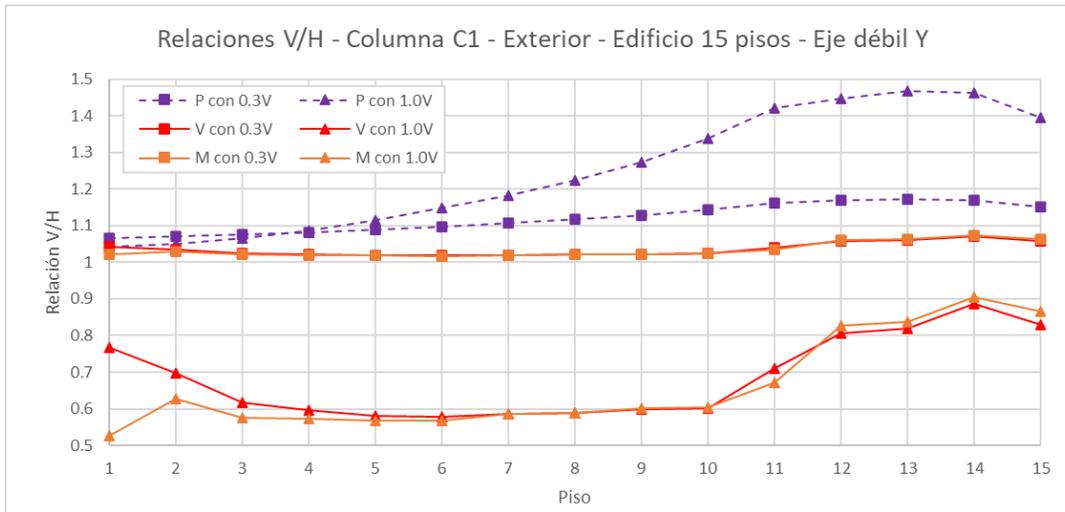


Figura 123 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C1 edificio 15 pisos (Y).
Fuente: Autor

Nota: A diferencia de los resultados similares mostrados para el edificio de 5 pisos, en los cuales se indicaban los resultados para el elemento con respecto a su eje de menor inercia, en este caso no se indicarán los resultados de los otros elementos analizados M1 y M5 en cuanto estos elementos no están modelados para resistir solicitaciones en su eje débil.

COLUMNA EXTERIOR C1															
Indicadores eje fuerte en X (V2-M3)	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
P con 0.3V	1.06	1.07	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.15	1.17	1.18	1.18	1.18	1.16
P con 1.0V	1.01	1.02	1.04	1.07	1.11	1.16	1.21	1.26	1.33	1.40	1.49	1.53	1.55	1.54	1.45
V con 0.3V	1.03	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07	1.09	1.10	1.12	1.11
V con 1.0V	0.56	0.53	0.51	0.52	0.53	0.56	0.59	0.63	0.66	0.70	0.77	0.87	0.92	1.00	1.02
M con 0.3V	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07	1.09	1.10	1.12	1.12
M con 1.0V	0.41	0.48	0.48	0.50	0.52	0.55	0.59	0.62	0.66	0.70	0.74	0.89	0.94	1.03	1.05
COLUMNA EXTERIOR C1															
Indicadores eje débil en Y (V3-M2)	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
P con 0.3V	1.06	1.07	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.16	1.17	1.17	1.17	1.15
P con 1.0V	1.04	1.05	1.07	1.09	1.11	1.15	1.18	1.22	1.27	1.34	1.42	1.45	1.47	1.46	1.40
V con 0.3V	1.04	1.03	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.04	1.06	1.06	1.07	1.06
V con 1.0V	0.77	0.70	0.62	0.60	0.58	0.58	0.59	0.59	0.60	0.60	0.71	0.81	0.82	0.89	0.83
M con 0.3V	1.02	1.03	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.06	1.06	1.07	1.06
M con 1.0V	0.53	0.63	0.58	0.57	0.57	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.67	0.83	0.84	0.90	0.87

MURO DE ESQUINA M1															
100% sismo en X y 30% sismo en Y	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
P con 0.3V	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05
P con 1.0V	1.05	1.18	1.22	1.17	1.15	1.14	1.12	1.10	1.10	1.12	1.14	1.06	0.96	0.89	0.86
V con 0.3V	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.06	1.04	1.04	1.06	1.08	1.09
V con 1.0V	0.38	0.46	0.46	0.49	0.52	0.53	0.57	0.62	0.66	0.83	0.66	0.66	0.81	0.94	1.07
M con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.04	1.06	1.04	1.05	1.08	1.07	1.06

MURO DE ESQUINA M1															
M con 1.0V	0.32	0.38	0.40	0.43	0.47	0.49	0.55	0.62	0.68	0.79	0.65	0.74	0.94	0.87	0.82
MURO DE ESQUINA M1															
30% sismo en X y 100% sismo en Y	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
P con 0.3V	1.04	1.05	1.06	1.06	1.07	1.07	1.08	1.08	1.08	1.09	1.09	1.09	1.08	1.06	1.06
P con 1.0V	0.78	0.84	0.89	0.95	0.99	1.03	1.07	1.11	1.14	1.14	1.15	1.20	1.11	0.99	0.96
V con 0.3V	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.03	1.04	1.05	1.07	1.10	1.07	1.06	1.09	1.10	1.09
V con 1.0V	0.70	0.62	0.70	0.76	0.82	0.86	0.90	0.99	1.09	1.24	1.05	0.96	1.14	1.20	1.05
M con 0.3V	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.07	1.09	1.07	1.06	1.09	1.10	1.08
M con 1.0V	0.88	0.70	0.76	0.79	0.84	0.87	0.89	0.98	1.07	1.23	1.11	0.93	1.13	1.22	1.04

MURO INTERIOR M5															
100% sismo en X y 30% sismo en Y	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
P con 0.3V	1.06	1.07	1.07	1.07	1.08	1.08	1.08	1.09	1.09	1.09	1.10	1.10	1.09	1.07	1.06
P con 1.0V	1.11	1.20	1.19	1.16	1.15	1.15	1.14	1.14	1.15	1.17	1.22	1.14	1.05	0.96	0.88
V con 0.3V	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.04	1.05	1.15
V con 1.0V	0.35	0.39	0.35	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.32	0.33	0.34	0.39	0.39	0.43	0.80
M con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.06
M con 1.0V	0.32	0.35	0.34	0.33	0.33	0.32	0.37	0.37	0.37	0.41	0.42	0.41	0.42	0.43	0.69
MURO INTERIOR M5															
30% sismo en X y 100% sismo en Y	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
P con 0.3V	1.04	1.05	1.06	1.06	1.07	1.07	1.08	1.09	1.09	1.10	1.10	1.11	1.10	1.08	1.07
P con 1.0V	0.84	0.89	0.94	0.99	1.02	1.06	1.10	1.14	1.17	1.19	1.21	1.27	1.20	1.08	0.99
V con 0.3V	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02	1.03	1.04	1.06	1.05	1.06	1.11	1.14	1.13

MURO INTERIOR M5															
V con 1.0V	0.72	0.63	0.71	0.76	0.82	0.85	0.87	0.95	1.03	1.08	1.00	0.88	1.14	1.20	0.68
M con 0.3V	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.06	1.06	1.07
M con 1.0V	0.89	0.72	0.78	0.80	0.84	0.87	0.90	0.97	1.03	1.04	0.94	0.95	1.09	1.07	0.82

VIGA EJE 1 ENTRE EJES B Y C															
Indicadores extremos de la viga	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
V extremo VG	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.02
M extremo VG	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02
VIGA EJE 1 ENTRE EJES B Y C															
Indicadores centro de la viga	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
V centro VG	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.03	1.03	1.04	1.04	1.03
M centro VG	1.06	1.05	1.06	1.06	1.06	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11	1.14	1.15	1.16	1.16	1.14

VIGA EJE 2 ENTRE EJES B Y C															
Indicadores extremos de la viga	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
V extremo VG	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00
M extremo VG	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
VIGA EJE 2 ENTRE EJES B Y C															
Indicadores centro de la viga	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
V centro VG	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
M centro VG	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.06	1.06	1.02

Anexo P – Resultados de la desagregación de la amenaza sísmica para los edificios de 5 y 15 pisos

ANÁLISIS DE DESAGREGACIÓN SÍSMICA	
Localización	
Ciudad:	Cali
T ret:	475 años
T est:	0.50 s
Sa:	0.369 g

Seleccionar Período de Retorno

Seleccionar Período Estructural

Opciones:

Mostrar valores de: Contribución (Porcentaje) Calcular Guardar Hoja en PDF

Cuadro de Desagregación Sísmica para Cali - Período de Retorno: 475años - Período Estructural: 0.5 segundos.

Intensidad / Contribución	Distancia Focal (Km)																			
	0	26	53	79	105	132	158	184	211	237	263	289	316	342	368	395	421	447	474	500
Magnitud (Mw)	8.90	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	8.64	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.15%	0.52%	0.69%	0.36%	0.11%	0.39%	0.25%	0.07%	0.04%	0.10%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%
	8.38	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.41%	1.40%	2.34%	1.30%	0.53%	1.37%	0.76%	0.25%	0.16%	0.12%	0.00%	0.01%	0.09%	0.04%	0.00%
	8.13	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.55%	1.82%	3.61%	2.01%	0.85%	1.75%	0.84%	0.26%	0.15%	0.03%	0.00%	0.00%	0.11%	0.05%	0.00%
	7.87	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.64%	2.02%	4.87%	2.24%	1.24%	1.16%	0.48%	0.06%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.01%	0.00%
	7.61	0.00%	0.03%	0.08%	0.03%	0.70%	2.06%	4.91%	1.73%	0.85%	0.42%	0.12%	0.34%	0.19%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	7.35	0.00%	0.18%	0.43%	0.09%	1.06%	1.64%	3.02%	0.63%	0.15%	0.04%	0.00%	0.08%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	7.10	0.00%	0.27%	0.55%	0.07%	0.59%	0.74%	1.08%	0.09%	0.00%	0.34%	0.12%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	6.84	0.19%	1.33%	0.65%	0.04%	0.24%	0.09%	0.10%	0.00%	0.12%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	6.58	0.50%	2.43%	0.50%	0.01%	0.09%	0.00%	0.71%	0.05%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	6.32	0.91%	2.94%	0.22%	0.00%	0.01%	0.24%	0.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	6.06	1.52%	3.30%	0.02%	0.00%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	5.81	2.37%	3.20%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	5.55	3.31%	2.64%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	5.29	4.05%	1.41%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	5.03	3.73%	0.20%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	4.77	2.37%	0.51%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
4.52	0.71%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
4.26	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
4.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

Figura 124 - Cuadro de desagregación sísmica para Cali, edificio 5 pisos
Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, 2009)

PARES DE MAGNITUD Y DISTANCIA PARA LOS 10 PRIMEROS MÁXIMOS DE LA DESAGREGACIÓN

Desagregación Sísmica para Cali - Período de Retorno: 475 años - Período Estructural: 0.5 segundos.

Máximo	Contribución	Distancia (km)	Magnitud (Mw)
1	4.91%	158 - 184 km	7.61
2	4.87%	158 - 184 km	7.87
3	4.05%	0 - 26 km	5.29
4	3.73%	0 - 26 km	5.03
5	3.61%	158 - 184 km	8.13
6	3.31%	0 - 26 km	5.55
7	3.30%	26 - 53 km	6.06
8	3.20%	26 - 53 km	5.81
9	3.02%	158 - 184 km	7.35
10	2.94%	26 - 53 km	6.32

TOTAL = 36.94% Para los 10 primeros máximos

GRÁFICA DEL ESPECTRO Sa

Parámetros para NSR-10	
Ciudad:	Cali
Tipo de Suelo	D
Coef. Importancia	1

Nota: Para comparar el espectro de la NSR-10 con los espectros para cada periodo de retorno se recomienda utilizar tipo de suelo "B" y factor de importancia 1

Incluir en el Gráfico de Espectro de Aceleración	
<input checked="" type="checkbox"/> Incluir NSR-10	<input type="button" value="Actualizar Espectro"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Período de retorno 31 años	
<input checked="" type="checkbox"/> Período de retorno 225 años	
<input checked="" type="checkbox"/> Período de retorno 475 años	
<input checked="" type="checkbox"/> Período de retorno 1000 años	
<input checked="" type="checkbox"/> Período de retorno 2500 años	

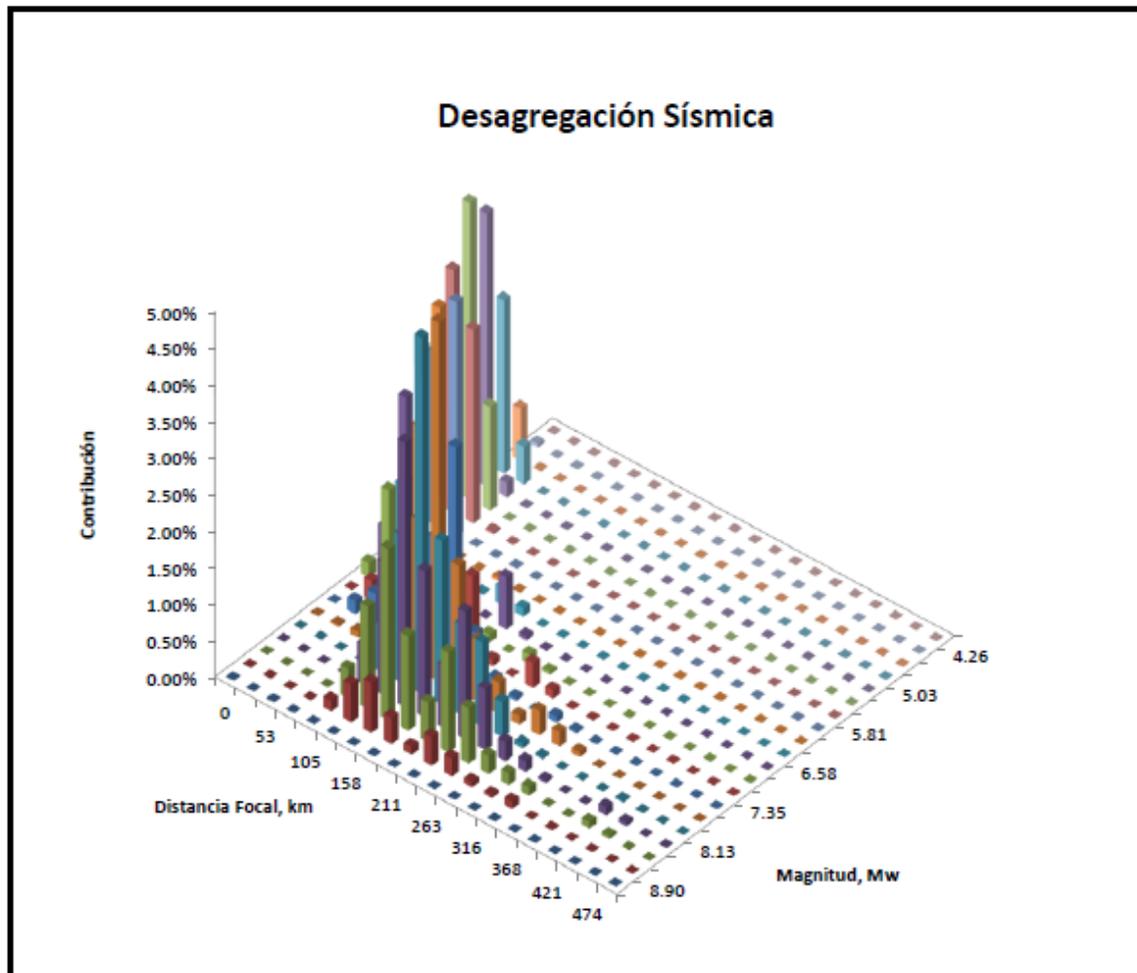


Figura 125 - Pares de magnitud y distancia para los 10 primeros máximos de la desagregación y gráfico de la misma
Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, 2009)

ANALISIS DE DESAGREGACION SISMICA

Localización	
Ciudad:	Cali
T ret:	475 años
T est:	1.00 s
Sa:	0.268 g

Seleccionar Período de Retorno
 Seleccionar Período Estructural

Opciones:	
Mostrar valores de:	Contribución (Porcentaje)
<input type="button" value="Calcular"/>	<input type="button" value="Guardar Hoja en PDF"/>

Cuadro de Desagregación Sísmica para Cali - Período de Retorno: 475 años - Período Estructural: 1 segundos.

Intensidad / Contribución	Distancia Focal (Km)																				
	0	26	53	79	105	132	158	184	211	237	263	289	316	342	368	395	421	447	474	500	
Magnitud (Mw)	8.90	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
	8.64	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.16%	0.58%	0.81%	0.44%	0.14%	0.54%	0.37%	0.13%	0.08%	0.21%	0.00%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	
	8.38	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.45%	1.58%	2.78%	1.63%	0.72%	2.02%	1.23%	0.51%	0.37%	0.38%	0.00%	0.03%	0.16%	0.06%	0.00%	0.00%
	8.13	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.61%	2.05%	4.33%	2.56%	1.20%	2.82%	1.56%	0.62%	0.40%	0.21%	0.00%	0.01%	0.18%	0.07%	0.00%	0.00%
	7.87	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.70%	2.29%	5.87%	2.96%	1.83%	1.99%	1.01%	0.28%	0.14%	0.23%	0.00%	0.00%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%
	7.61	0.00%	0.03%	0.08%	0.02%	0.77%	2.30%	5.84%	2.40%	1.36%	0.89%	1.32%	0.31%	0.10%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	7.35	0.00%	0.18%	0.40%	0.09%	1.17%	1.95%	3.30%	0.93%	0.33%	0.04%	0.28%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	7.10	0.00%	0.26%	0.48%	0.06%	0.71%	1.09%	1.03%	0.03%	0.29%	0.10%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	6.84	0.20%	1.27%	0.52%	0.03%	0.18%	0.30%	0.03%	0.11%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	6.58	0.51%	2.19%	0.30%	0.01%	0.01%	0.38%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	6.32	0.88%	2.41%	0.07%	0.00%	0.06%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	6.06	1.41%	2.28%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	5.81	1.92%	1.87%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	5.55	2.08%	0.95%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	5.29	1.54%	0.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	5.03	0.45%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	4.77	0.25%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
4.52	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
4.26	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
4.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

Figura 126 - Cuadro de desagregación sísmica para Cali, edificio 15 pisos
 Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, 2009)

PARES DE MAGNITUD Y DISTANCIA PARA LOS 10 PRIMEROS MÁXIMOS DE LA DESAGREGACIÓN

Desagregación Sísmica para Cali - Período de Retorno: 475 años - Período Estructural: 1 segundos.

Máximo	Contribución	Distancia (km)	Magnitud (Mw)
1	5.87%	158 - 184 km	7.87
2	5.84%	158 - 184 km	7.61
3	4.33%	158 - 184 km	8.13
4	3.30%	158 - 184 km	7.35
5	2.96%	184 - 211 km	7.87
6	2.82%	237 - 263 km	8.13
7	2.78%	158 - 184 km	8.38
8	2.56%	184 - 211 km	8.13
9	2.41%	26 - 53 km	6.32
10	2.40%	184 - 211 km	7.61

TOTAL = 35.27% Para los 10 primeros máximos

GRÁFICA DEL ESPECTRO Sa

Parámetros para NSR-10	
Ciudad:	Cali
Tipo de Suelo	D
Coef. Importancia	1

Nota: Para comparar el espectro de la NSR-10 con los espectros para cada periodo de retorno se recomienda utilizar tipo de suelo "B" y factor de importancia 1

Incluir en el Gráfico de Espectro de Aceleración	
<input checked="" type="checkbox"/> Incluir NSR-10	<input type="button" value="Actualizar Espectro"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Período de retorno 31 años	
<input checked="" type="checkbox"/> Período de retorno 225 años	
<input checked="" type="checkbox"/> Período de retorno 475 años	
<input checked="" type="checkbox"/> Período de retorno 1000 años	
<input checked="" type="checkbox"/> Período de retorno 2500 años	

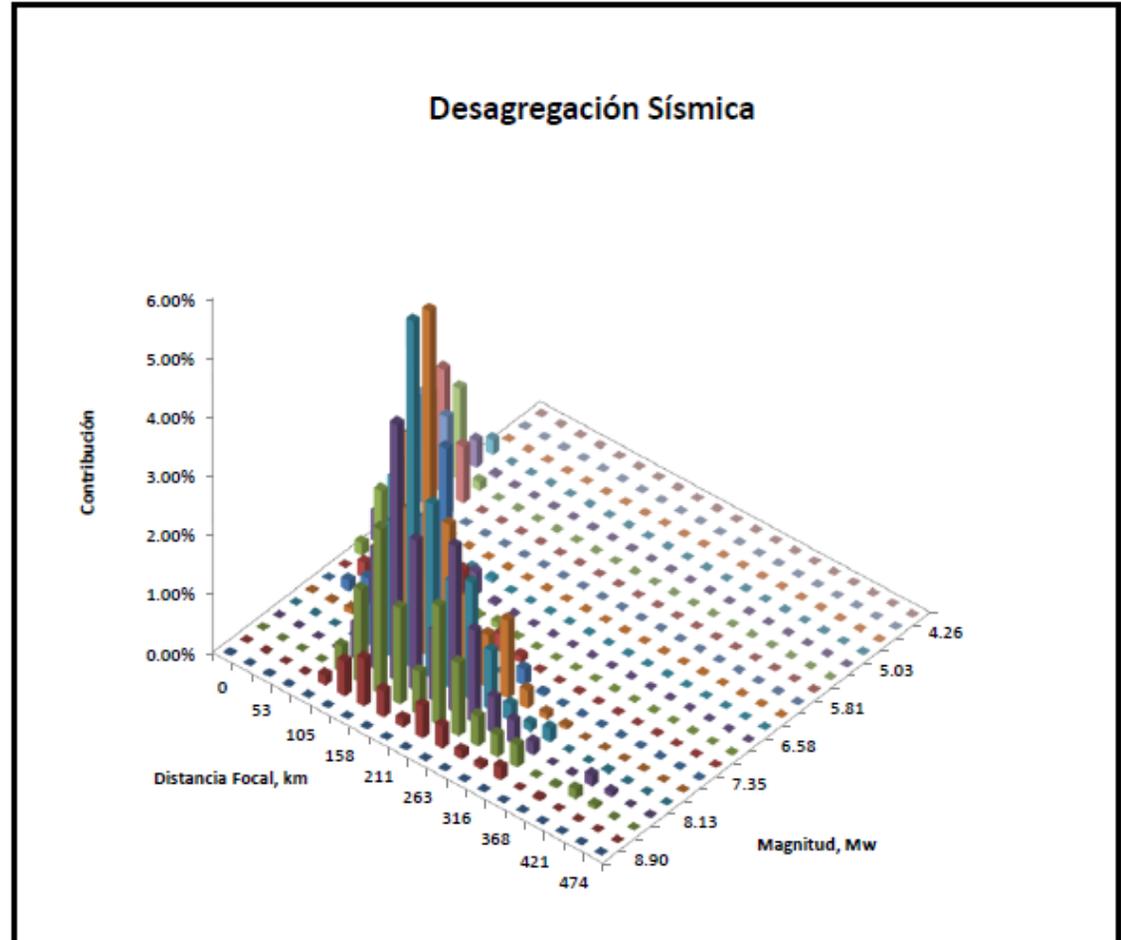


Figura 127 - Pares de magnitud y distancia para los 10 primeros máximos de la desagregación y gráfico de la misma Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, 2009)

Anexo Q – Ejemplo del procedimiento de búsqueda y criterios de selección de señales en la base de datos del PEER

Se indicó que una de las bases de datos más importantes para la obtención de acelerogramas de movimientos fuertes del terreno es la del PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2021), por ello se priorizó la misma para la búsqueda de los movimientos del terreno que más se asemejaran a los criterios definidos en la desagregación de la amenaza sísmica y al espectro objetivo definido para el presente trabajo. La búsqueda en esta base de datos se realizó de la siguiente manera:

1. Se ingresó a la página del PEER a través del link <https://ngawest2.berkeley.edu/site>. Para ello el usuario debe encontrarse previamente registrado con el fin de poder tener acceso a los registros sísmicos deseados.
2. Seleccionar la base de datos NGA-West 2 (véase la Figura 128), que es la que incluye un gran conjunto de datos de movimientos del suelo de la corteza superficial para varios regímenes tectónicos del mundo, los cuales tienen variedad de magnitudes, distancias, tipos de perfil de suelos, tipos de fallas, entre otros.

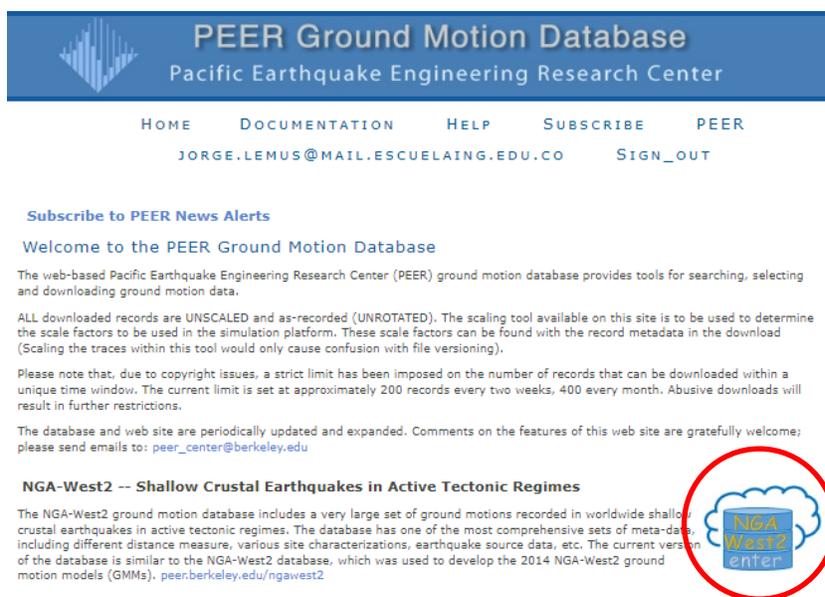


Figura 128 - Imagen de referencia 1 proceso búsqueda señales PEER
Fuente: (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2021)

3. En el paso siguiente la herramienta ofrece varias posibilidades para obtener señales escaladas con respecto a un espectro objetivo. Este espectro puede definirse a través de los criterios propios del PEER, un espectro definido por el usuario, definición del espectro con los criterios normativos de ASCE 7-16 y una opción adicional para obtener acelerogramas no escalados; esta última fue la opción tomada para el presente trabajo, esto para no perder el conocimiento de las señales y las modificaciones que estas sufren cuando se realiza el proceso de escalado (véase la Figura 129).

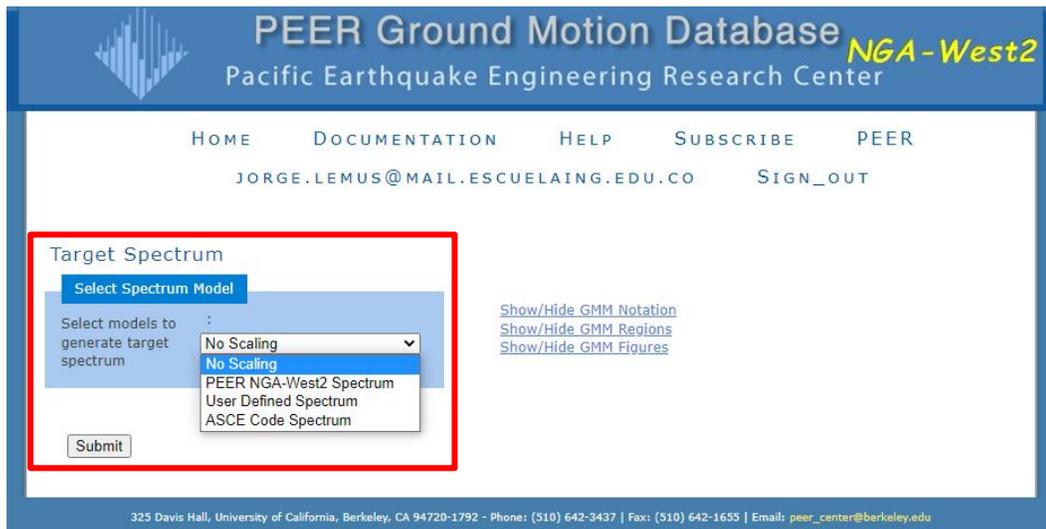


Figura 129 - Imagen de referencia 2 proceso búsqueda señales PEER
Fuente: (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2021)

4. A continuación se introdujeron, en la ventana definida por el programa, los datos relevantes obtenidos en la desagregación de la amenaza sísmica para cada uno de los rangos de parejas de datos con contribuciones relevantes. Un ejemplo para ilustrar son los datos de una de las combinaciones de rangos de parejas de datos obtenidas para el edificio de 5 pisos, en la cual se obtuvo un rango de valores para magnitud M_w de 4.8 a 5.8 y de distancia focal de 0 a 26 kilómetros. A estos datos se agregó un rango definido en función del perfil de suelo para el parámetro V_{s30} , que para este caso corresponde a un rango de velocidades de onda de corte de 180 a 360 m/s, velocidades propias de un perfil de suelo tipo D de acuerdo con los criterios establecidos en NSR-10.

Al ejecutar la opción de buscar registros aparecerán tantos como se encuentre disponibles en la base de datos, o en su defecto el número de registros indicados en los

criterios de búsqueda. La base de datos del PEER permite refinar aún más la búsqueda con otros criterios como el nombre de la estación que registró el movimiento, el nombre del movimiento, el tipo de falla, entre otros (véase la Figura 130); sin embargo, aspectos como el último limitan la cantidad de registros disponibles para su análisis.

The image shows a web-based search interface for PEER data. It is divided into two main sections: 'Search' and 'Suite'. At the top, there are buttons for 'Load Sample Input Values' and 'Clear Input Values'. The 'Search' section contains a blue header with a 'Search' button and a note: 'These characteristics are defined in the NGA-West2 Flatfile. You need to re-run Search when any of these parameters are updated.' Below this are 'Record Characteristics' (RSN(s), Event Name, Station Name) and 'Search Parameters' (Fault Type, Magnitude, R_JB(km), R_rup(km), Vs30(m/s), D5-95(sec), Pulse). The 'Search Parameters' section is highlighted with a red box. The 'Suite' section contains a blue header with a 'Suite' button and three dropdown menus: Spectral Ordinate (SRSS), Damping Ratio (5%), and Suite Average (Arithmetic). At the bottom of the 'Search' section, there is an 'Additional Characteristics' section with 'Max No. Records' set to 100 (<=100).

Figura 130 - Imagen de referencia 3 proceso búsqueda señales PEER
Fuente: (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2021)

- De la lista de registros disponibles, la base de datos suministra las señales corregidas de tres componentes, dos horizontales y una vertical. De estos registros se indican entre otros los siguientes datos: Intensidad de Arias, el nombre del evento, el año de ocurrencia, la estación que lo registró, la magnitud M_w , el mecanismo de falla, la distancia hasta el punto de ruptura, el parámetro V_{s30} , entre otros que brindan información relevante para la adecuada selección de los registros.

Es recomendable en cada uno de los eventos mostrados usar la opción *view* (véase la Figura 131), la cual permite antes de descargar los registros de las tres componentes del acelerograma conocer sus espectros de aceleración para un amortiguamiento definido (en nuestro caso del 5%). Esto es muy importante en cuanto disminuye la posibilidad de seleccionar registros que requieran factores muy grandes de escala o que en su defecto simplemente no puedan escalarse. Para ello es necesario tener en mente el espectro objetivo y conocer cuáles son los rangos de periodos en los cuales las ordenadas espectrales deben guardar ciertas proporciones.

Record ID	Station	Magnitude	Other Parameters	Location	Date	Other Parameters	Other Parameters	Other Parameters
12	SRSS	102	- 1.0 -	Northern Calif-07	1975	5.2	21.8	0.1
13	SRSS	127	- 1.0 -	Fruili, Italy-03	1976	5.5	14.5	0.0
14	SRSS	147	- 1.0	Coyote Lake	1979	5.74	2.1	0.5
15	SRSS	148	- 1.0	Coyote Lake	1979	5.74	2.4	0.4
16	SRSS	149	- 1.0	Coyote Lake	1979	5.74	5.0	0.6
17	SRSS	154	- 1.0 -	Coyote Lake	1979	5.74	6.9	0.1
18	SRSS	193	- 1.0 -	Imperial Valley-07	1979	5.01	6.2	0.0
19	SRSS	194	- 1.0 -	Imperial Valley-07	1979	5.01	3.3	0.0
20	SRSS	195	- 1.0 -	Imperial Valley-07	1979	5.01	4.6	0.0
21	SRSS	197	- 1.0 -	Imperial Valley-07	1979	5.01	2.3	0.0
22	SRSS	198	- 1.0 -	Imperial Valley-07	1979	5.01	4.9	0.0

Figura 131 - Imagen de referencia 4 proceso búsqueda señales PEER
Fuente: (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2021)

Al revisar uno de los eventos preseleccionados para el edificio de 5 pisos, el cual corresponde al evento Coyote Lake registrado por la estación Gilroy Array #4 y usar la opción *view* pueden observarse los espectros de aceleración, así mismo, los valores de las ordenadas espectrales para cada periodo. Como ya es conocido cual es el espectro objetivo, es fácil identificar para los rangos de periodos de 0.8T y 1.2T los rangos en los que deben oscilar las aceleraciones espectrales de los espectros de los registros para validar por ejemplo que no sean inferiores al 80% de la aceleración del espectro objetivo en el rango anterior.

Para el ejemplo que se está ilustrando, se evidenció que para un periodo de 0.65 s la aceleración espectral de una de las componentes horizontales es de 0.36 g, esto permite saber que para este punto de chequeo la ordenada espectral correspondiente al 80% del espectro objetivo es de 0.68 g, lo que sugeriría para este punto en particular un factor de escala ligeramente inferior a 2. Esta verificación por supuesto debe revisarse para 0.8T y para los valores intermedios entre este valor de periodo y 1.2T, este chequeo rápido de órdenes de magnitud permitirá ir preseleccionando señales para disminuir el número de estas que serán usadas en el escalado.

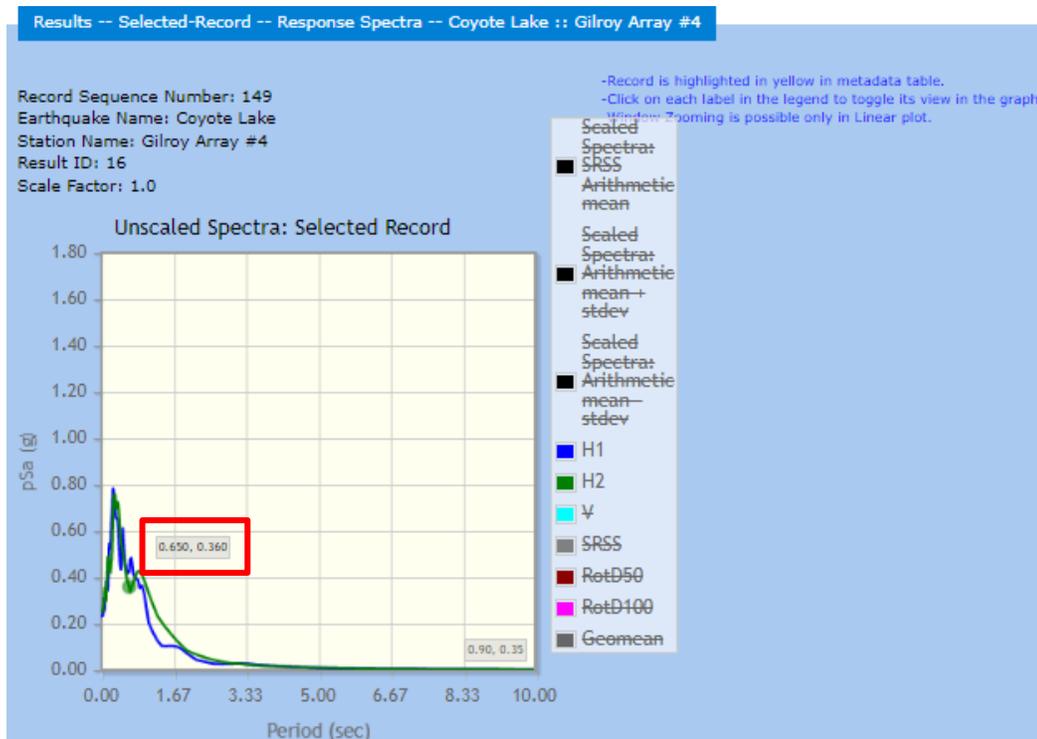


Figura 132 - Imagen de referencia 5 proceso búsqueda señales PEER
Fuente: (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2021)

Para terminar, un parámetro en el que se recomienda colocar atención es en la Intensidad de Arias. Generalmente los mayores valores de este parámetro, que está asociado al contenido de energía de un registro sísmico y al daño que el mismo puede generar sobre las estructuras, sugieren registros con magnitudes de aceleraciones espectrales que facilitan su proceso de selección y escalado con respecto al espectro objetivo. De esta manera se seleccionaron las señales que se indican en los siguientes anexos para cada una de las estructuras.

Anexo R – Movimientos del terreno preseleccionados para los edificios de 5 y 15 pisos

Distancia (km)	Magnitud (Mw)	Parámetro Vs30
0 - 26 km	4.8 a 5.8	180 a 360 m/s

Result ID	Record Seq. #	Scale Factor	Arias Intensity (m/s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Rjb(km)	Rrup(km)	Vs30(m/s)	Lowest useable freq (Hz)	H1 Acc. File Name	H2 Acc. File Name	Vertical Acc. File Name
8	96	1	0.4	Managua, Nicaragua-02	1972	Managua, ESSO	5.2	strike slip	4.33	4.98	288.77	0.125	MANAGUA_B-ESO090.AT2	MANAGUA_B-ESO180.AT2	MANAGUA_B-ESODWN.AT2
16	149	1	0.6	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #4	5.74	strike slip	4.79	5.7	221.78	0.15	COYOTELK_G04270.AT2	COYOTELK_G04360.AT2	COYOTELK_G04-UP.AT2
35	235	1	1.3	Mammoth Lakes-02	1980	Mammoth Lakes H. S.	5.69	strike slip	1.45	9.12	346.82	0.1625	MAMMOTH.J_J-MLS254.AT2	MAMMOTH.J_J-MLS344.AT2	MAMMOTH.J_J-MLS-UP.AT2
52	405	1	0.9	Coalinga-05	1983	Burnett Construction Hollister	5.77	Reverse	8.3	11.5	352.2	0.375	COALINGA_D-BNT270.AT2	COALINGA_D-BNT360.AT2	COALINGA_D-BNT-UP.AT2
61	499	1	0.2	Hollister-04	1986	Differential Array #2	5.45	strike slip	13.11	14.11	215.54	0.1	HOLLISTR_D-HD3255.AT2	HOLLISTR_D-HD3345.AT2	HOLLISTR_D-HD3-UP.AT2
64	547	1	0.5	Chalfant Valley-01	1986	Zack Brothers Ranch	5.77	strike slip	6.07	6.39	316.19	0.1125	CHALFANT.B_B-ZAK270.AT2	CHALFANT.B_B-ZAK360.AT2	CHALFANT.B_B-ZAK-UP.AT2
87	1728	1	2.1	Northridge-06	1994	Rinaldi Receiving Sta	5.28	Reverse	3.39	12.96	282.25	1.25	NORTH392_RRS228.AT2	NORTH392_RRS318.AT2	NORTH392_RRS-UP.AT2
96	1853	1	1.1	Yountville	2000	Napa Fire Station #3	5	strike slip	8.48	11.5	328.57	0.078	YOUNTVL_2016A090.AT2	YOUNTVL_2016B360.AT2	YOUNTVL_2016C-UP.AT2

Distancia (km)	Magnitud (Mw)	Parámetro Vs30
26 - 53 km	5.6 a 6.5	180 a 360 m/s

Result ID	Record Seq. #	Scale Factor	Arias Intensity (m/s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Rjb(km)	Rrup(km)	Vs30(m/s)	Lowest useable freq (Hz)	H1 Acc. File Name	H2 Acc. File Name	Vertical Acc. File Name
18	338	1	1.5	Coalinga-01	1983	Parkfield - Fault Zone 14	6.36	Reverse	28.11	29.48	246.07	0.1625	COALINGA.H_H-Z14000.AT2	COALINGA.H_H-Z14090.AT2	COALINGA.H_H-Z14-UP.AT2
76	700	1	2.4	Whittier Narrows-01	1987	Tarzana - Cedar Hill	5.99	Reverse Oblique	38.24	41.22	257.21	0.2875	WHITTIER.A_A-TAR000.AT2	WHITTIER.A_A-TAR090.AT2	WHITTIER.A_A-TAR-UP.AT2
79	902	1	0.6	Big Bear-01	1992	Desert Hot Springs	6.46	strike slip	39.52	40.54	359	0.3	BIGBEAR_DSP090.AT2	BIGBEAR_DSP360.AT2	BIGBEAR_DSP-UP.AT2

Distancia (km)	Magnitud (Mw)	Parámetro Vs30
158 - 184 km	7.1 a 8.3	180 a 360 m/s

Result ID	Record Seq. #	Scale Factor	Arias Intensity (m/s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Rjb(km)	Rrup(km)	Vs30(m/s)	Lowest useable freq (Hz)	H1 Acc. File Name	H2 Acc. File Name	Vertical Acc. File Name
1	847	1	0.2	Landers	1992	Compton - Castlegate St	7.28	strike slip	161.23	161.23	266.9	0.05	LANDERS_CAS000.AT2	LANDERS_CAS270.AT2	LANDERS_CAS-UP.AT2
46	6020	1	0.1	El Mayor-Cucapah, Mexico	2010	Mt. San Jacinto Campus	7.2	strike slip	170.78	170.78	244	0.025	SIERRA.MEX_MSJ-14.AT2	SIERRA.MEX_MSJ-104.AT2	SIERRA.MEX_MSJ-UP.AT2

Nota: De estos movimientos se seleccionaron 7 para el ADL (5 pisos). Fuente: (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2021)

Distancia (km)	Magnitud (Mw)	Parámetro Vs30
26 - 53 km	6.0 a 6.5	180 a 360 m/s

Result ID	Record Seq. #	Scale Factor	Arias Intensity (m/s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Rjb(km)	Rrup(km)	Vs30(m/s)	Lowest useable freq (Hz)	H1 Acc. File Name	H2 Acc. File Name	Vertical Acc. File Name
2	20	1	0.5	Northern Calif-03	1954	Ferndale City Hall	6.5	strike slip	26.72	27.02	219.31	0.125	NCALIF.FH_H-FRN044.AT2	NCALIF.FH_H-FRN314.AT2	NCALIF.FH_H-FRN-UP.AT2
13	338	1	1.5	Coalinga-01	1983	Parkfield - Fault Zone 14	6.36	Reverse	28.11	29.48	246.07	0.1625	COALINGA.H_H-Z14000.AT2	COALINGA.H_H-Z14090.AT2	COALINGA.H_H-Z14-UP.AT2
28	462	1	0.2	Morgan Hill	1984	Hollister City Hall	6.19	strike slip	30.76	30.76	198.77	0.0875	MORGAN_HCH001.AT2	MORGAN_HCH271.AT2	MORGAN_HCH-UP.AT2
40	902	1	0.6	Big Bear-01	1992	Desert Hot Springs	6.46	strike slip	39.52	40.54	359	0.3	BIGBEAR_DSP090.AT2	BIGBEAR_DSP360.AT2	BIGBEAR_DSP-UP.AT2
55	2458	1	0.3	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY025	6.2	Reverse	27.88	28.67	277.5	0.08	CHICHI.03_CHY025N.AT2	CHICHI.03_CHY025E.AT2	CHICHI.03_CHY025V.AT2
62	2509	1	0.3	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	CHY104	6.2	Reverse	34.4	35.05	223.24	0.0625	CHICHI.03_CHY104N.AT2	CHICHI.03_CHY104W.AT2	CHICHI.03_CHY104V.AT2
64	2613	1	0.1	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	TCU059	6.2	Reverse	51.81	52.24	272.67	0.06	CHICHI.03_TCU059N.AT2	CHICHI.03_TCU059E.AT2	CHICHI.03_TCU059V.AT2

Distancia (km)	Magnitud (Mw)	Parámetro Vs30
156 - 263 km	7.0 a 8.5	180 a 360 m/s

Result ID	Record Seq. #	Scale Factor	Arias Intensity (m/s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Rjb(km)	Rrup(km)	Vs30(m/s)	Lowest useable freq (Hz)	H1 Acc. File Name	H2 Acc. File Name	Vertical Acc. File Name
2	141	1	0.1	Tabas, Iran	1978	Kashmar	7.35	Reverse	193.91	194.55	280.26	0.15625	TABAS_KSH-L1.AT2	TABAS_KSH-T1.AT2	TABAS_KSH-V1.AT2
5	844	1	0.2	Landers	1992	Burbank - N Buena Vista	7.28	strike slip	157.94	157.94	320.57	0.2	LANDERS_BUE250.AT2	LANDERS_BUE340.AT2	LANDERS_BUE-UP.AT2
6	847	1	0.2	Landers	1992	Compton - Castlegate St	7.28	strike slip	161.23	161.23	266.9	0.05	LANDERS_CAS000.AT2	LANDERS_CAS270.AT2	LANDERS_CAS-UP.AT2
8	861	1	0.1	Landers	1992	Huntington Bch - Waikiki	7.28	strike slip	156	156	270.54	0.05	LANDERS_WAI200.AT2	LANDERS_WAI290.AT2	LANDERS_WAI-UP.AT2
18	874	1	0.2	Landers	1992	LB - Orange Ave	7.28	strike slip	160.85	160.85	344.72	0.05	LANDERS_OR2010.AT2	LANDERS_OR2280.AT2	LANDERS_OR2-UP.AT2
19	878	1	0.2	Landers	1992	Lakewood - Del Amo Blvd	7.28	strike slip	157.41	157.41	267.35	0.04	LANDERS_DEL000.AT2	LANDERS_DEL090.AT2	LANDERS_DEL-UP.AT2
30	2116	1	0.1	Denali, Alaska	2002	TAPS Pump Station #12	7.9	strike slip	164.66	164.66	338.6	0.13	DENALI_PS12-72.AT2	DENALI_PS12342.AT2	DENALI_PS12-UP.AT2
43	1840	1	0.2	Hector Mine	1999	Narrows Dam	7.13	strike slip	169.83	169.83	298.68	0.052	HECTOR_WHD090.AT2	HECTOR_WHD360.AT2	HECTOR_WHD-UP.AT2

Nota: De estos movimientos se seleccionaron 7 para el ADL (15 pisos). Fuente: (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2021)

Anexo S – Escalado de las tres componentes de uno de los registros de evento sísmico usado en el edificio de 5 pisos

A continuación se ilustra como ejemplo la hoja formulada en Microsoft Excel para el escalado uniforme de registros sísmicos. Este procedimiento fue desarrollado para cada uno de los registros preseleccionados para las dos estructuras, en total 28 registros con sus tres componentes fueron escalados para verificar factores de escalas, formas espectrales, errores, entre otros parámetros que permitieran seleccionar los 14 registros a usar en las dos estructuras. Este ejemplo corresponde al Registro del evento Big Bear 01 (1992) registrado en la estación Desert Hot Springs.

Escalado Uniforme NSR-10 A2.7.1 c y d			Espectro objetivo (EO) 80% EO				Señal H1 Señal H2 Señal V							Error H1 Error H2	
Parámetro	Magnitud		No.	T (seg)	Sa (g)	Sa (g)	T (seg)	Sa (g)	F.E	Sa (g)	F.E	Sa (g)	F.E	e=(Sai.obj-Sai.e)^2	
Tc =	1.05		1	0.000	0.850	0.680	0.000	0.225	0.419	0.180	0.334	0.120	0.223	0.186	0.266
TL =	2.00		2	0.050	0.850	0.680	0.050	0.238	0.442	0.186	0.346	0.147	0.274	0.167	0.254
Aa =	0.25		3	0.100	0.850	0.680	0.100	0.266	0.495	0.279	0.519	0.250	0.464	0.126	0.110
Av =	0.25		4	0.150	0.850	0.680	0.150	0.458	0.851	0.345	0.641	0.248	0.461	0.000	0.044
Fa =	1.36		5	0.200	0.850	0.680	0.200	0.363	0.675	0.494	0.918	0.261	0.485	0.031	0.005
Fv =	2.98		6	0.250	0.850	0.680	0.250	0.374	0.695	0.440	0.818	0.191	0.356	0.024	0.001
I =	1.00		7	0.300	0.850	0.680	0.300	0.492	0.916	0.466	0.867	0.229	0.425	0.004	0.000
ΔT =	0.05		8	0.350	0.850	0.680	0.350	0.586	1.090	0.530	0.987	0.279	0.520	0.058	0.019
T estructura	0.55		9	0.400	0.850	0.680	0.400	0.639	1.189	0.589	1.095	0.314	0.585	0.115	0.060
1.2T	0.66	0.66	10	0.450	0.850	0.680	0.450	0.694	1.292	0.571	1.063	0.194	0.361	0.195	0.045
0.8T	0.44	0.44	11	0.500	0.850	0.680	0.500	0.368	0.685	0.417	0.776	0.164	0.306	0.027	0.005
0.2T	0.11	0.11	12	0.550	0.850	0.680	0.550	0.378	0.704	0.417	0.776	0.135	0.252	0.021	0.006
1.5T	0.83	0.83	13	0.600	0.850	0.680	0.600	0.526	0.978	0.379	0.705	0.147	0.273	0.016	0.021
Rango inf	0.00		14	0.650	0.850	0.680	0.650	0.517	0.961	0.366	0.681	0.115	0.214	0.012	0.029
Rango sup	1.00		15	0.700	0.850	0.680	0.700	0.374	0.696	0.313	0.582	0.166	0.308	0.024	0.072
Amorti.	5%		16	0.750	0.850	0.680	0.750	0.307	0.571	0.293	0.545	0.174	0.324	0.078	0.093
			17	0.800	0.850	0.680	0.800	0.308	0.572	0.312	0.580	0.183	0.340	0.077	0.073
			18	0.850	0.850	0.680	0.850	0.289	0.537	0.380	0.707	0.223	0.415	0.098	0.020
			19	0.900	0.850	0.680	0.900	0.286	0.531	0.364	0.676	0.233	0.433	0.101	0.030
			20	0.950	0.850	0.680	0.950	0.371	0.689	0.330	0.615	0.212	0.394	0.026	0.055
			21	1.000	0.850	0.680	1.000	0.406	0.756	0.298	0.555	0.183	0.341	0.009	0.087
			22	1.050	0.850	0.680	1.050	0.355	0.660	0.249	0.462	0.153	0.284	0.036	0.150
			23	1.100	0.813	0.650	1.100	0.291	0.542	0.207	0.385	0.121	0.225	0.073	0.183
			24	1.150	0.777	0.622	1.150	0.267	0.497	0.200	0.372	0.113	0.210	0.079	0.165
			25	1.200	0.745	0.596	1.200	0.259	0.481	0.218	0.405	0.111	0.207	0.070	0.116
			26	1.250	0.715	0.572	1.250	0.227	0.422	0.235	0.438	0.114	0.212	0.086	0.077
			27	1.300	0.688	0.550	1.300	0.178	0.332	0.230	0.428	0.112	0.208	0.127	0.067
			28	1.350	0.662	0.530	1.350	0.144	0.269	0.206	0.382	0.099	0.184	0.155	0.078
			29	1.400	0.639	0.511	1.400	0.125	0.233	0.190	0.353	0.082	0.153	0.164	0.082
			30	1.450	0.617	0.493	1.450	0.107	0.198	0.166	0.309	0.069	0.129	0.175	0.095
			31	1.500	0.596	0.477	1.500	0.104	0.193	0.139	0.259	0.054	0.100	0.163	0.114
			32	1.550	0.577	0.461	1.550	0.100	0.186	0.118	0.219	0.042	0.077	0.153	0.128
			33	1.600	0.559	0.447	1.600	0.094	0.176	0.107	0.199	0.039	0.073	0.147	0.129
			34	1.650	0.542	0.433	1.650	0.090	0.168	0.098	0.183	0.037	0.069	0.140	0.129
			35	1.700	0.526	0.421	1.700	0.090	0.168	0.090	0.167	0.034	0.064	0.128	0.129
			36	1.750	0.511	0.409	1.750	0.092	0.171	0.082	0.152	0.031	0.058	0.116	0.129
			37	1.800	0.497	0.397	1.800	0.093	0.174	0.074	0.138	0.030	0.055	0.104	0.129
			38	1.850	0.483	0.387	1.850	0.092	0.171	0.067	0.124	0.028	0.053	0.097	0.129
			39	1.900	0.471	0.376	1.900	0.088	0.165	0.060	0.112	0.028	0.053	0.094	0.129
			40	1.950	0.458	0.367	1.950	0.085	0.159	0.054	0.100	0.028	0.051	0.090	0.129

Cuadro de comprobaciones		
	T	T
	3.50	5.00
Sa para $T_0 < T < T_0$		
Sa para $T_c < T < T_c$	0.850	0.255
Sa para $T > T_L$		0.072

40	1.950	0.458	0.367
41	2.000	0.447	0.358
42	2.050	0.425	0.340
43	2.100	0.405	0.324
44	2.150	0.387	0.309
45	2.200	0.369	0.296
46	2.250	0.353	0.283
47	2.300	0.338	0.270
48	2.350	0.324	0.259
49	2.400	0.310	0.248
50	2.450	0.298	0.238
51	2.500	0.286	0.229
52	2.550	0.275	0.220
53	2.600	0.264	0.212
54	2.650	0.255	0.204
55	2.700	0.245	0.196
56	2.750	0.236	0.189
57	2.800	0.228	0.182
58	2.850	0.220	0.176
59	2.900	0.213	0.170
60	2.950	0.205	0.164
61	3.000	0.199	0.159
62	3.050	0.192	0.154
63	3.100	0.186	0.149
64	3.150	0.180	0.144
65	3.200	0.175	0.140
66	3.250	0.169	0.135
67	3.300	0.164	0.131
68	3.350	0.159	0.127
69	3.400	0.155	0.124
70	3.450	0.150	0.120
71	3.500	0.146	0.117
72	3.550	0.142	0.114
73	3.600	0.138	0.110
74	3.650	0.134	0.107
75	3.700	0.131	0.104
76	3.750	0.127	0.102
77	3.800	0.124	0.099
78	3.850	0.121	0.097
79	3.900	0.118	0.094
80	3.950	0.115	0.092
81	4.000	0.112	0.089

1.950	0.085	0.159	0.054	0.100	0.028	0.051
2.000	0.079	0.147	0.055	0.101	0.026	0.048
2.050	0.069	0.129	0.057	0.106	0.024	0.044
2.100	0.062	0.116	0.058	0.108	0.022	0.040
2.150	0.056	0.104	0.057	0.106	0.020	0.037
2.200	0.050	0.093	0.055	0.102	0.018	0.033
2.250	0.044	0.083	0.052	0.096	0.016	0.030
2.300	0.042	0.077	0.048	0.089	0.015	0.028
2.350	0.041	0.075	0.044	0.081	0.014	0.025
2.400	0.040	0.074	0.039	0.073	0.014	0.025
2.450	0.040	0.075	0.036	0.067	0.014	0.026
2.500	0.040	0.075	0.036	0.067	0.014	0.026
2.550	0.039	0.072	0.036	0.066	0.014	0.026
2.600	0.039	0.073	0.035	0.065	0.013	0.024
2.650	0.038	0.070	0.034	0.063	0.012	0.023
2.700	0.035	0.065	0.033	0.061	0.011	0.021
2.750	0.031	0.058	0.032	0.059	0.011	0.021
2.800	0.028	0.053	0.030	0.056	0.011	0.020
2.850	0.029	0.054	0.029	0.054	0.011	0.020
2.900	0.029	0.053	0.027	0.051	0.010	0.019
2.950	0.027	0.051	0.026	0.048	0.010	0.018
3.000	0.028	0.052	0.024	0.045	0.009	0.017
3.050	0.028	0.052	0.023	0.042	0.008	0.015
3.100	0.028	0.051	0.021	0.039	0.007	0.014
3.150	0.027	0.050	0.020	0.036	0.006	0.012
3.200	0.026	0.048	0.018	0.034	0.006	0.011
3.250	0.024	0.045	0.018	0.033	0.006	0.011
3.300	0.023	0.042	0.017	0.031	0.006	0.011
3.350	0.021	0.039	0.016	0.029	0.006	0.011
3.400	0.019	0.036	0.015	0.027	0.006	0.010
3.450	0.019	0.035	0.014	0.025	0.006	0.010
3.500	0.018	0.033	0.013	0.024	0.005	0.010
3.550	0.017	0.032	0.012	0.023	0.005	0.010
3.600	0.017	0.032	0.012	0.022	0.005	0.010
3.650	0.017	0.032	0.011	0.021	0.005	0.009
3.700	0.017	0.032	0.011	0.020	0.005	0.009
3.750	0.017	0.031	0.010	0.019	0.005	0.009
3.800	0.016	0.030	0.010	0.018	0.005	0.008
3.850	0.016	0.029	0.009	0.017	0.004	0.008
3.900	0.015	0.028	0.009	0.017	0.004	0.008
3.950	0.014	0.027	0.008	0.016	0.004	0.008
4.000	0.014	0.026	0.008	0.015	0.004	0.007

0.090	0.129
0.090	0.119
0.088	0.102
0.084	0.089
0.080	0.079
0.077	0.072
0.073	0.066
0.068	0.062
0.062	0.059
0.056	0.056
0.050	0.053
0.045	0.048
0.041	0.044
0.037	0.040
0.034	0.037
0.033	0.034
0.032	0.032
0.031	0.030
0.028	0.028
0.025	0.026
0.024	0.025
0.022	0.024
0.020	0.023
0.018	0.022
0.017	0.021
0.016	0.020
0.015	0.019
0.015	0.018
0.014	0.017
0.014	0.016
0.013	0.016
0.013	0.015
0.012	0.014
0.011	0.013
0.010	0.013
0.010	0.012
0.009	0.012
0.009	0.011
0.008	0.011
0.008	0.010
0.008	0.010
0.007	0.009

Error

4.915	5.001
-------	-------

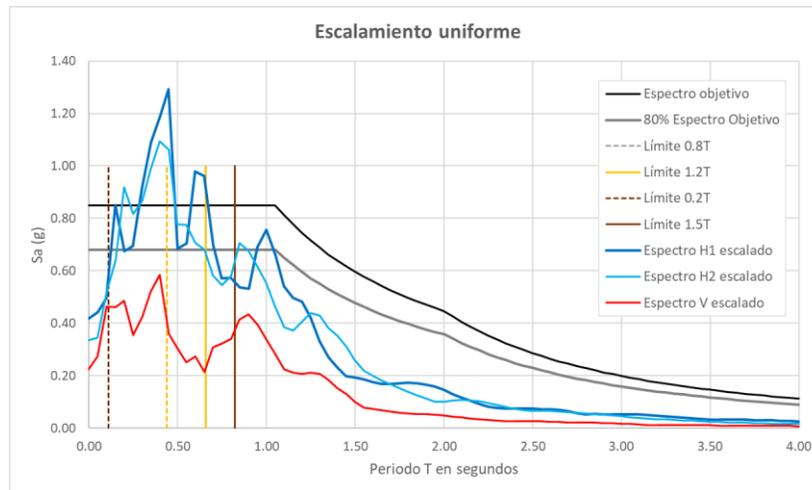
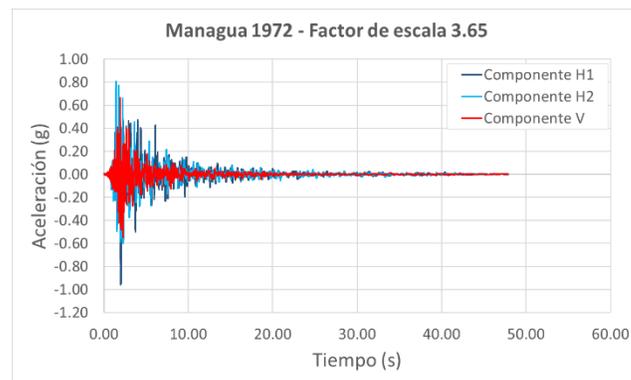
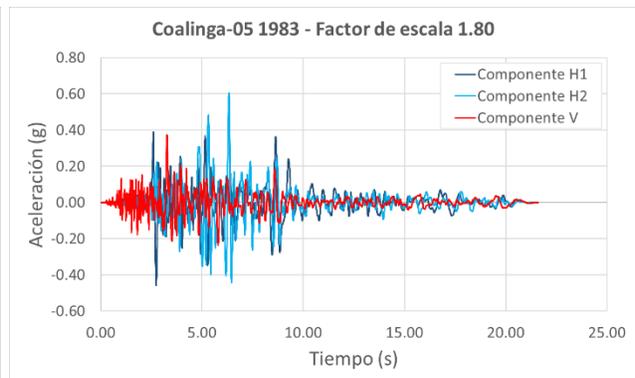
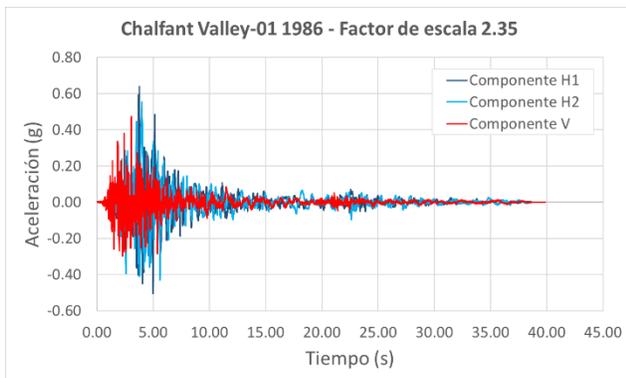
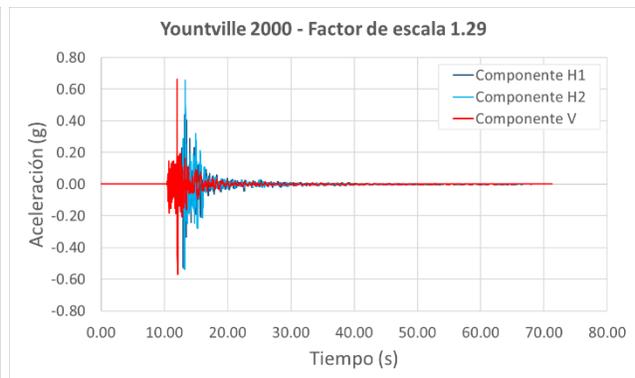
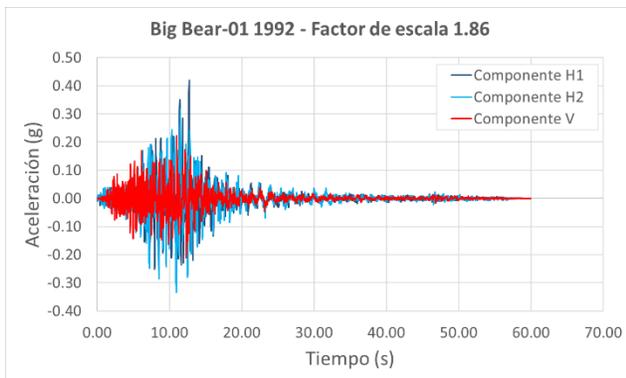
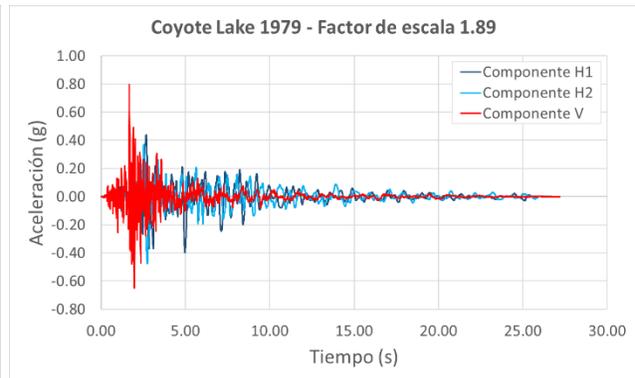
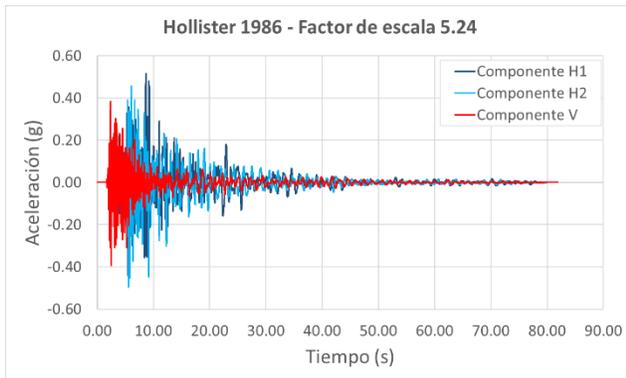
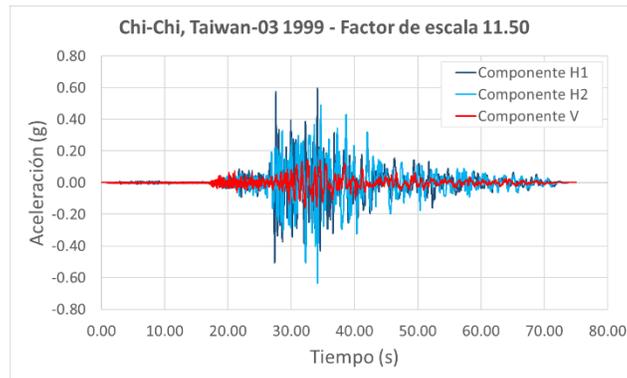
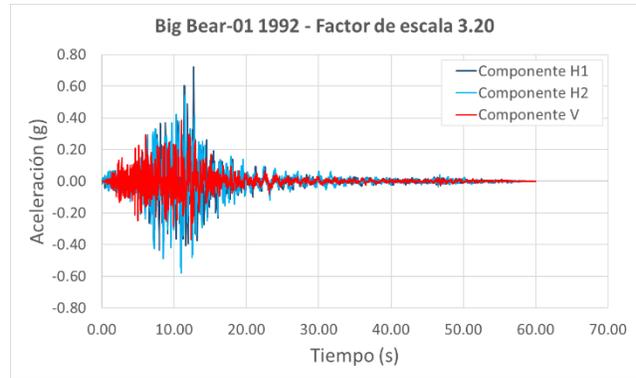
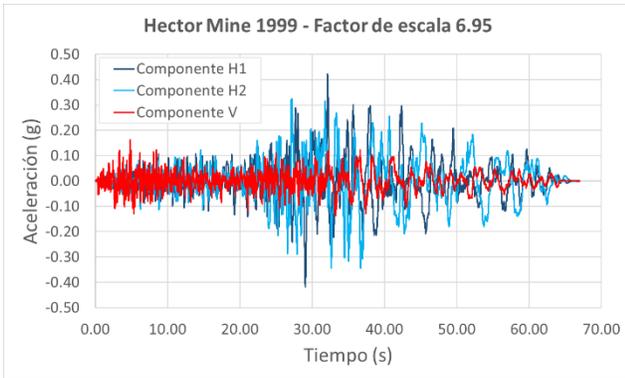
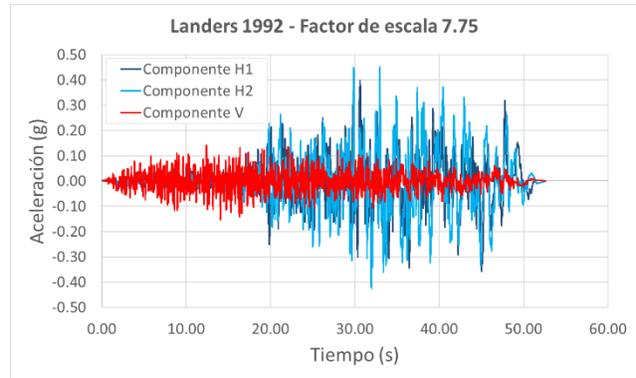
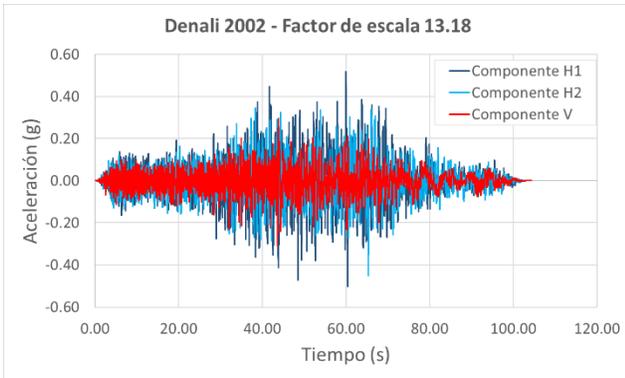
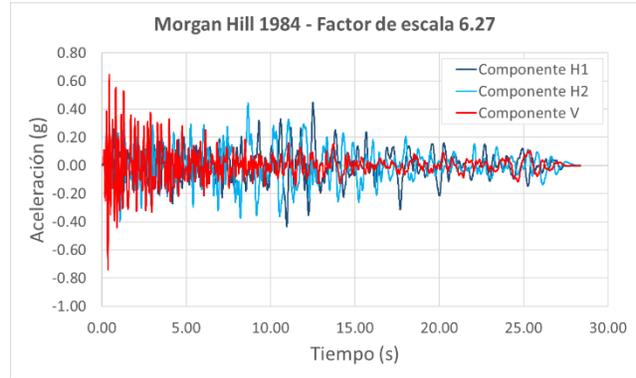
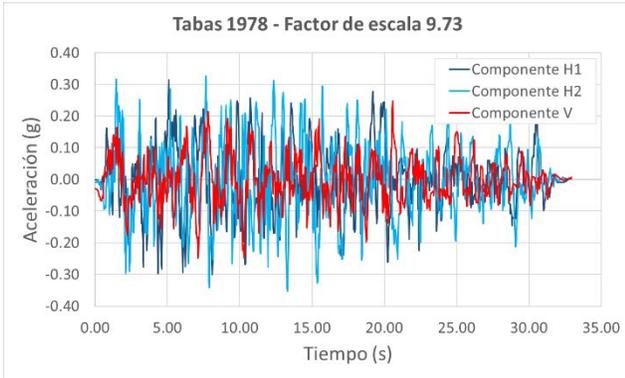


Figura 133 - Ejemplo del proceso gráfico de verificación del escalado de las señales para obtener el factor de escala. Registro evento Big Bear 01 (1992)
Fuente: Autor

Anexo T – Registros sísmicos escalados para edificio de 5 pisos



Anexo U – Registros sísmicos escalados para edificio de 15 pisos



Anexo V – Resultados de las relaciones V/H para las solicitaciones de P, V y M en el edificio de 5 pisos ADL

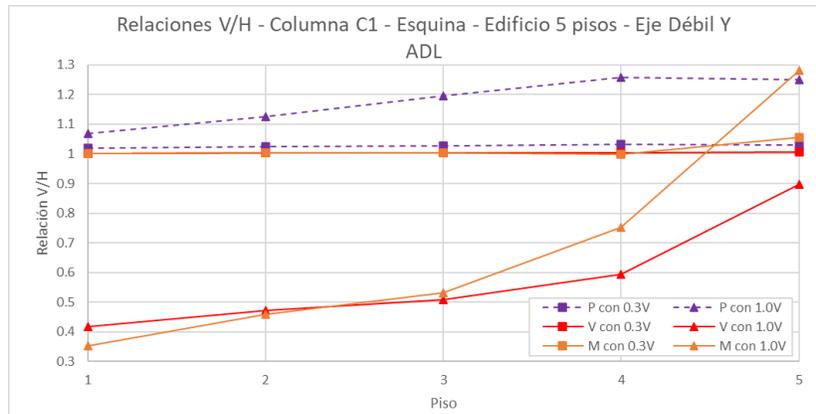


Figura 134 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C1 edificio 5 pisos (Y) ADL

Fuente: Autor

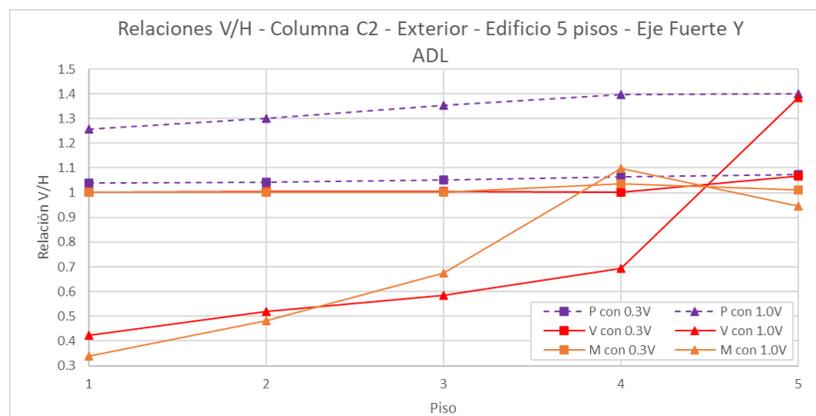


Figura 135 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C2 edificio 5 pisos (Y) ADL

Fuente: Autor

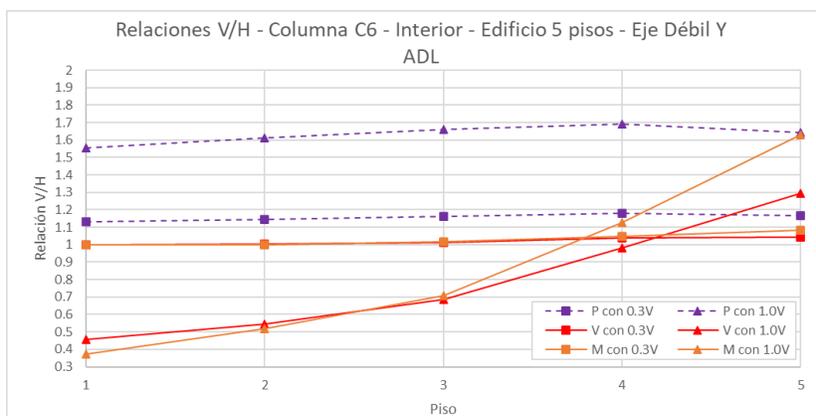


Figura 136 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C6 edificio 5 pisos (Y) ADL

Fuente: Autor

COLUMNA DE ESQUINA C1					
Indicadores eje fuerte en X (V2-M3)	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
P con 0.3V	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04
P con 1.0V	1.10	1.16	1.23	1.29	1.28
V con 0.3V	1.00	1.00	1.01	0.99	1.00
V con 1.0V	0.39	0.48	0.54	0.61	1.19
M con 0.3V	1.00	1.00	0.99	1.00	1.01
M con 1.0V	0.33	0.45	0.55	0.86	0.77

COLUMNA DE ESQUINA C1					
Indicadores eje débil en Y (V3-M2)	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
P con 0.3V	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03
P con 1.0V	1.07	1.13	1.20	1.26	1.25
V con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01
V con 1.0V	0.42	0.47	0.51	0.59	0.90
M con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.05
M con 1.0V	0.35	0.46	0.53	0.75	1.28

COLUMNA EXTERIOR C2					
Indicadores eje débil en X (V2-M3)	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
P con 0.3V	1.06	1.07	1.08	1.10	1.10
P con 1.0V	1.37	1.42	1.46	1.49	1.48
V con 0.3V	1.00	1.01	1.01	1.00	1.01
V con 1.0V	0.43	0.47	0.51	0.64	0.82
M con 0.3V	1.00	1.01	1.01	1.00	1.01
M con 1.0V	0.36	0.46	0.53	0.71	1.04

COLUMNA EXTERIOR C2					
Indicadores eje fuerte en Y (V3-M2)	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
P con 0.3V	1.04	1.04	1.05	1.07	1.07
P con 1.0V	1.26	1.30	1.35	1.40	1.40
V con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.07
V con 1.0V	0.42	0.52	0.58	0.69	1.39
M con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.04	1.01
M con 1.0V	0.34	0.48	0.68	1.10	0.95

COLUMNA C6 INTERIOR					
Indicadores eje fuerte en X (V2-M3)	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
P con 0.3V	1.14	1.16	1.18	1.19	1.18
P con 1.0V	1.57	1.63	1.68	1.70	1.66
V con 0.3V	1.00	1.01	1.01	1.00	1.02
V con 1.0V	0.41	0.50	0.59	0.76	1.24
M con 0.3V	1.00	1.01	1.00	1.01	1.19
M con 1.0V	0.34	0.47	0.61	1.03	2.00

COLUMNA C6 INTERIOR					
Indicadores eje débil en Y (V3-M2)	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
P con 0.3V	1.13	1.15	1.16	1.18	1.17

COLUMNA C6 INTERIOR					
P con 1.0V	1.55	1.61	1.66	1.69	1.64
V con 0.3V	1.00	1.00	1.01	1.04	1.04
V con 1.0V	0.46	0.55	0.69	0.98	1.29
M con 0.3V	1.00	1.00	1.02	1.05	1.08
M con 1.0V	0.37	0.52	0.71	1.13	1.63

VIGA EJE 1 ENTRE EJES B Y C					
Indicadores extremos de la viga	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
V extremo VG	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
M extremo VG	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
VIGA EJE 1 ENTRE EJES B Y C					
Indicadores centro de la viga	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
V centro VG	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01
M centro VG	1.12	1.13	1.15	1.16	1.14

VIGA EJE 2 ENTRE EJES B Y C					
Indicadores extremos de la viga	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
V extremo VG	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
M extremo VG	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
VIGA EJE 2 ENTRE EJES B Y C					
Indicadores centro de la viga	Relación V/H				
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5
V centro VG	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
M centro VG	1.11	1.14	1.16	1.18	1.15

Anexo W – Resultados de las relaciones V/H para las solicitaciones de P, V y M en el edificio de 15 pisos ADL

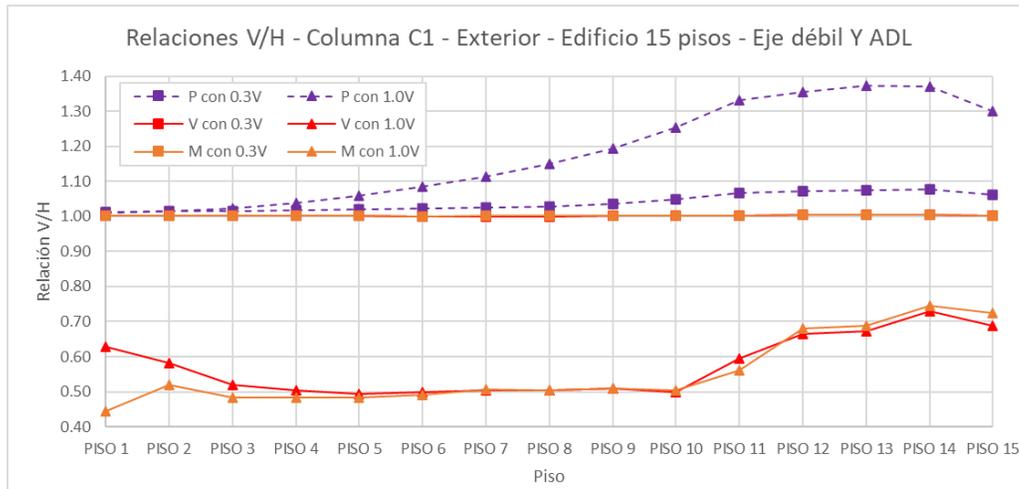


Figura 137 - Efecto componente V para V, M y P de la columna C1 edificio 15 pisos (Y) ADL

Fuente: Autor

Nota: A diferencia de los resultados similares mostrados para el edificio de 5 pisos, en los cuales se indicaban los resultados para el elemento con respecto a su eje de menor inercia, en este caso no se indicarán los resultados de los otros elementos analizados M1 y M5 en cuanto estos elementos no están modelados para resistir solicitaciones en su eje débil.

COLUMNA EXTERIOR C1															
Indicadores eje fuerte en X (V2-M3)	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
P con 0.3V	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.05	1.07	1.09	1.09	1.10	1.09	1.06
P con 1.0V	0.97	0.98	1.00	1.03	1.06	1.11	1.16	1.21	1.27	1.34	1.42	1.45	1.47	1.47	1.38
V con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
V con 1.0V	0.47	0.45	0.44	0.45	0.45	0.47	0.49	0.51	0.54	0.56	0.61	0.68	0.73	0.80	0.82
M con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
M con 1.0V	0.37	0.42	0.42	0.43	0.44	0.46	0.49	0.51	0.54	0.56	0.59	0.69	0.74	0.83	0.86

COLUMNA EXTERIOR C1															
Indicadores eje débil en Y (V3-M2)	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
P con 0.3V	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.04	1.05	1.07	1.07	1.08	1.08	1.06
P con 1.0V	1.01	1.01	1.02	1.04	1.06	1.09	1.11	1.15	1.19	1.25	1.33	1.35	1.37	1.37	1.30
V con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
V con 1.0V	0.63	0.58	0.52	0.50	0.49	0.50	0.51	0.50	0.51	0.50	0.59	0.66	0.67	0.73	0.69
M con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
M con 1.0V	0.44	0.52	0.48	0.48	0.48	0.49	0.51	0.51	0.51	0.50	0.56	0.68	0.69	0.75	0.72

MURO DE ESQUINA M1															
100% sismo en X y 30% sismo en Y	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
P con 0.3V	1.00	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.01	1.02	1.02	1.01	1.01	1.00	1.00
P con 1.0V	1.04	1.14	1.20	1.17	1.14	1.12	1.09	1.07	1.06	1.08	1.11	1.01	0.88	0.77	0.74
V con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01
V con 1.0V	0.31	0.36	0.37	0.39	0.41	0.42	0.45	0.49	0.52	0.69	0.50	0.50	0.63	0.78	0.98
M con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00
M con 1.0V	0.29	0.32	0.33	0.36	0.38	0.40	0.43	0.48	0.53	0.62	0.49	0.57	0.82	0.75	0.67

MURO DE ESQUINA M1															
30% sismo en X y 100% sismo en Y	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
P con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02	1.02	1.03	1.02	1.01	1.01
P con 1.0V	0.73	0.79	0.85	0.90	0.94	0.98	1.02	1.07	1.10	1.11	1.13	1.17	1.07	0.92	0.88
V con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.03	1.00
V con 1.0V	0.75	0.58	0.68	0.73	0.78	0.81	0.83	0.90	0.98	1.11	0.94	0.87	1.02	1.13	0.97
M con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.01	1.01	1.01
M con 1.0V	0.90	0.75	0.81	0.81	0.82	0.83	0.83	0.90	0.97	1.07	0.97	0.84	1.04	1.16	0.98

MURO INTERIOR M5															
100% sismo en X y 30% sismo en Y	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
P con 0.3V	1.00	1.01	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.02	1.01	1.01	1.00
P con 1.0V	1.10	1.18	1.20	1.17	1.15	1.14	1.13	1.12	1.12	1.14	1.20	1.09	0.96	0.85	0.76
V con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
V con 1.0V	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.26	0.25	0.26	0.26	0.25	0.25	0.41
M con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.03	1.03
M con 1.0V	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.26	0.27	0.26	0.24	0.27	0.93
MURO INTERIOR M5															
30% sismo en X y 100% sismo en Y	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
P con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02	1.04	1.02	1.02	1.01
P con 1.0V	0.80	0.86	0.91	0.96	1.00	1.03	1.07	1.11	1.14	1.16	1.17	1.22	1.14	1.00	0.90
V con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02
V con 1.0V	0.76	0.60	0.74	0.80	0.85	0.86	0.86	0.89	0.92	0.97	0.89	0.80	0.91	1.02	0.33
M con 0.3V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.03	1.02
M con 1.0V	0.90	0.77	0.84	0.85	0.87	0.87	0.86	0.92	0.93	0.99	0.96	0.72	0.83	1.24	0.30

VIGA EJE 1 ENTRE EJES B Y C															
Indicadores extremos de la viga	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
V extremo VG	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
M extremo VG	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
VIGA EJE 1 ENTRE EJES B Y C															
Indicadores centro de la viga	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
V centro VG	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
M centro VG	1.04	1.04	1.05	1.06	1.06	1.07	1.07	1.08	1.08	1.09	1.11	1.12	1.13	1.13	1.10

VIGA EJE 2 ENTRE EJES B Y C															
Indicadores extremos de la viga	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
V extremo VG	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
M extremo VG	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
VIGA EJE 2 ENTRE EJES B Y C															
Indicadores centro de la viga	Relación V/H														
	PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4	PISO 5	PISO 6	PISO 7	PISO 8	PISO 9	PISO 10	PISO 11	PISO 12	PISO 13	PISO 14	PISO 15
V centro VG	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
M centro VG	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02	1.04	1.05	1.06	1.05	1.04	1.06	1.06	1.06	1.01

Anexo X – Chequeo del diseño a flexo-compresión de la columna C6 cuando se considera la componente V

En este anexo se realiza un ejercicio rápido y general con el fin de generar una introducción a objetivos de futuros trabajos de investigación. Partimos del hecho de que el diseño de la columna inicialmente se revisó para los efectos que induce la componente sísmica H para un Análisis Dinámico Espectral (ADE). Para su diseño, se empleó el software ETABS con el fin de obtener el diagrama de interacción correspondiente de la columna. En la Figura 138 se muestra un esquema de la sección transversal de la misma, algunas características son: a. Dimensiones 0.50m x 0.80m, b. Concreto con resistencia especificada a la compresión de 28 MPa, c. Cuantía de acero longitudinal del 1% suministrada a través de 20 barras de refuerzo N°5 con esfuerzo a la fluencia de 420 MPa.

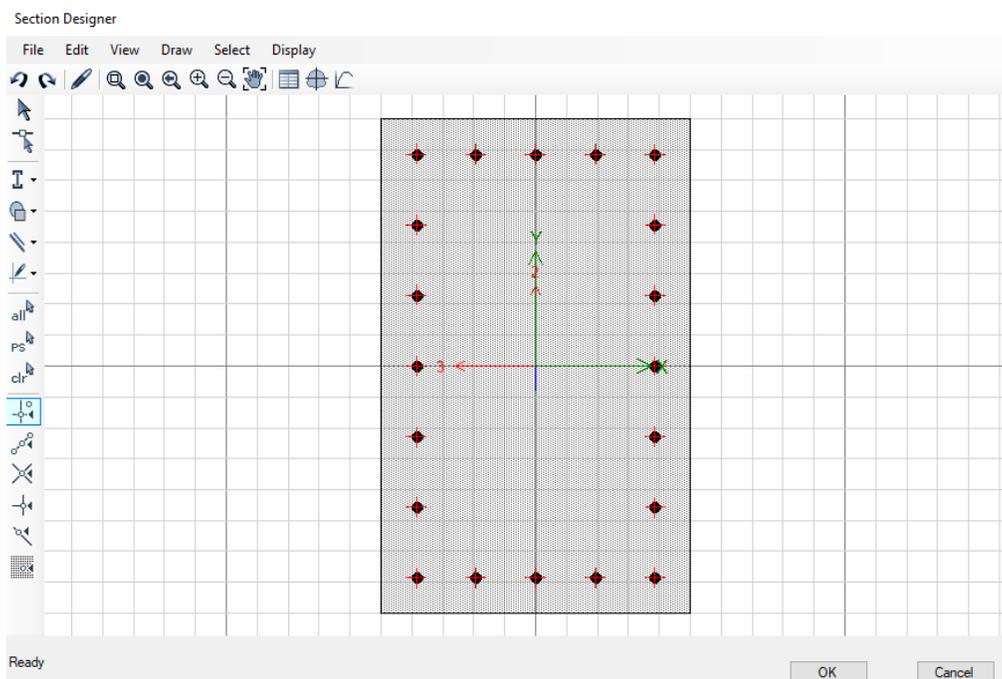


Figura 138 - Sección transversal de la columna típica usada en el arquetipo de 5 pisos

Fuente: Autor

En el arquetipo de 5 pisos todas las columnas corresponden al diseño anteriormente indicado, es decir, existe una columna de sección transversal típica con la cuantía de refuerzo mínima de acuerdo con los criterios exigidos en el reglamento NSR-10; esta

configuración, como se indicó, satisface todas las solicitaciones impuestas sobre el elemento cuando se considera la componente H en un ADE. Cobra relevancia ahora verificar si las solicitaciones obtenidas cuando se incorpora la componente V como los 2/3 de H exceden la capacidad de esta para resistirlas, para verificar esta condición se puede observar la Figura 139.

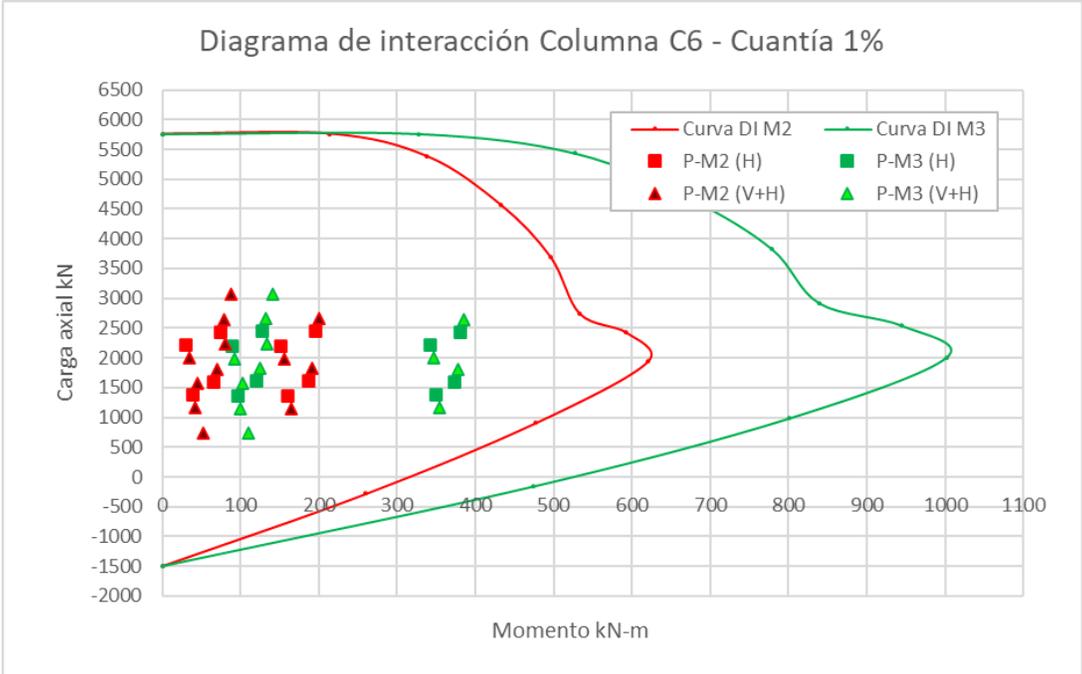


Figura 139 - Diagrama de interacción columna C6, incluye solicitaciones sísmicas (ADE)

Fuente: Autor

En la Figura 139, la línea de color rojo representa el diagrama de interacción en el eje de menor inercia de la columna, mientras que la línea de color verde indica el diagrama de interacción para el eje de mayor inercia, el cual en este caso coincide con el eje global X. Así mismo, los resultados de flexión y carga axial de las combinaciones que no incluyen la componente vertical están representados a través de cuadrados en color rojo para las solicitaciones P-M2, y en color verde para las que corresponden a P-M3; cuando se incluyen resultados que consideran el efecto de la componente V y H, la figura geométrica empleada es un triángulo, los colores por su parte guardan los tonos indicados en la convención anterior (rojo y verde) pero en intensidades distintas para garantizar su diferenciación.

En los resultados obtenidos para esta revisión, se puede evidenciar que para la columna más cargada y con mayor incremento de carga axial, los puntos que representan las parejas de datos de P y M siguen estando dentro de los límites de las curvas de interacción, en este sentido, a simple vista no es necesario realizar modificaciones en la configuración inicial del elemento para resistir los incrementos calculados en el presente trabajo de investigación.

Conviene ahora revisar los resultados obtenidos para la misma columna pero a través del ADL, para ello y conservando la misma metodología, se elaboró la Figura 140.

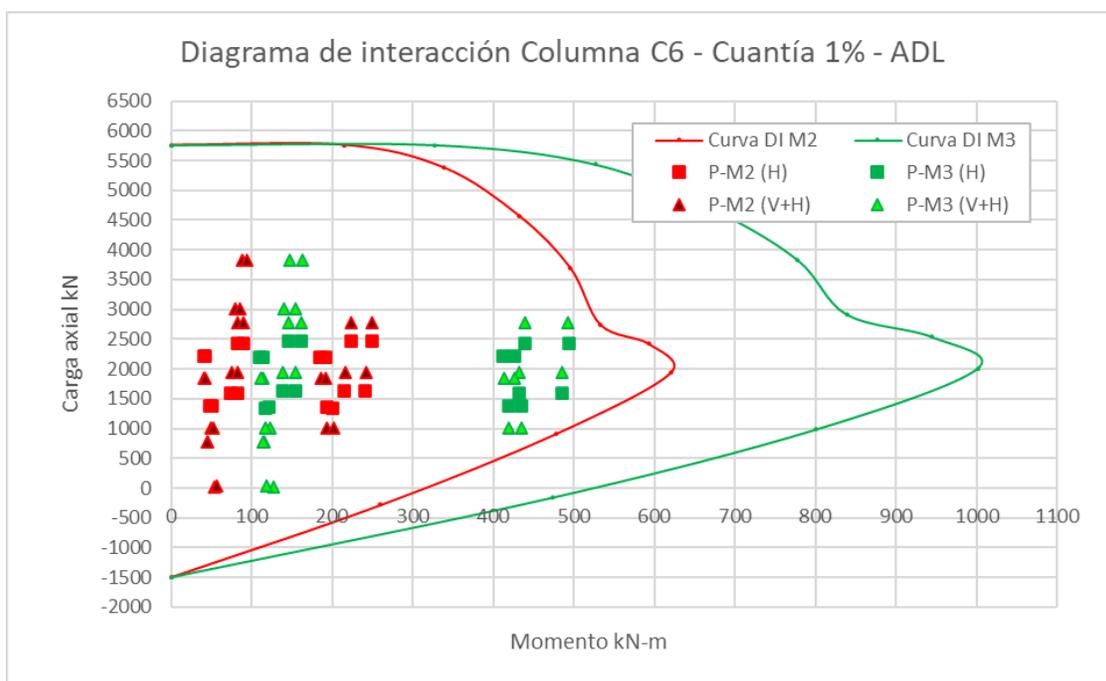


Figura 140 - Diagrama de interacción columna C6, incluye solicitaciones sísmicas (ADL)

Fuente: Autor

Aquí puede observarse que los puntos que representan las parejas de datos P-M siguen ubicándose al interior de las curvas de interacción; sin embargo, al igual que en el ADE, los resultados que incluyen el efecto de la componente vertical se van ubicando en la parte superior al interior del diagrama P-M, condición que es más relevante como puede evidenciarse en el ADL. Esto sugiere cargas axiales mayores, por supuesto más alejadas de la carga axial balanceada, lo que a su vez supone una posible falla más del lado de la compresión que de la tensión. Adicionalmente, en análisis no lineales, y tomando como

referencia lo indicado en el estándar ASCE 41-17 particularmente en el capítulo de concreto, la magnitud de la carga axial tiene un rol importante en la determinación de la ductilidad de la estructura. Lo que nos advierten entonces estos resultados, es que las mayores cargas axiales derivadas del efecto de la componente vertical podrían posiblemente en algún momento disminuir la ductilidad de la estructura. Es por esto por lo que una de las recomendaciones del presente trabajo de investigación, apunta a que en futuros trabajos se realice un estudio basado en Análisis Dinámicos No Lineales incluyendo la componente vertical de los eventos sísmicos, lo anterior con el fin de que puedan obtenerse conclusiones con menos subjetividad y más aproximadas a la realidad.

Para efectos de cualquier revisión, en las Tabla 27 y 28 se muestran los resultados de las solicitaciones obtenidas para el ADE y para el ADL en distintas combinaciones de carga.

Tabla 27 - Resultados para combinaciones que incluyen sismo en la columna C6 piso 1
(ADE)

Resultados de combinaciones de carga que incluyen solo H			
Combinación	P (kN)	M2 (kN-m)	M3 (kN-m)
DI (1.2D+1.0EX+0.3EY+1.0L)	2217.15	30.14	342.13
DI (1.2D+1.0EX+0.3EY+1.0L)	2436.73	74.06	381.33
DI (1.2D+0.3EX+1.0EY+1.0L)	2198.31	151.58	88.97
DI (1.2D+0.3EX+1.0EY+1.0L)	2455.57	195.51	128.17
DI (0.9D+1.0EX+0.3EY)	1376.71	38.37	349.50
DI (0.9D+1.0EX+0.3EY)	1596.30	65.83	373.96
DI (0.9D+0.3EX+1.0EY)	1357.87	159.82	96.34
DI (0.9D+0.3EX+1.0EY)	1615.14	187.27	120.80
Resultados de combinaciones de carga que incluyen V y H			
Combinación	P (kN)	M2 (kN-m)	M3 (kN-m)
DIV (0.9D+0.3EX+0.3EY-1.0SV)	741.50	52.64	109.80
DIV (0.9D+0.3EX+0.3EY-1.0SV)	2231.51	80.10	134.26
DIV (0.9D+1.0EX+0.3EY-0.3SV)	1169.72	42.66	353.55
DIV (0.9D+1.0EX+0.3EY-0.3SV)	1803.29	70.12	378.01
DIV (0.9D+0.3EX+1.0EY-0.3SV)	1150.88	164.11	100.39
DIV (0.9D+0.3EX+1.0EY-0.3SV)	1822.13	191.56	124.85
DIV (1.2D+0.3EX+1.0EY+1.0L+0.3SV)	1991.31	155.87	93.02
DIV (1.2D+0.3EX+1.0EY+1.0L+0.3SV)	2662.57	199.80	132.22
DIV (1.2D+1.0EX+0.3EY+1.0L+0.3SV)	2010.15	34.43	346.18
DIV (1.2D+1.0EX+0.3EY+1.0L+0.3SV)	2643.72	78.35	385.38
DIV (1.2D+0.3EX+0.3EY+1.0L+1.0SV)	1581.94	44.41	102.43
DIV (1.2D+0.3EX+0.3EY+1.0L+1.0SV)	3071.94	88.33	141.63

Fuente: Autor

Tabla 28 - Resultados para combinaciones que incluyen sismo en la columna C6 piso 1
(ADL)

Resultados de combinaciones de carga que incluyen solo H			
Combinación	P (kN)	M2 (kN-m)	M3 (kN-m)
DI (0.9D+0.3EH1X+1.0EH2Y)	1357.81	193.58	121.74
DI (0.9D+0.3EH1X+1.0EH2Y)	1623.11	215.55	154.34
DI (0.9D+0.3EH2X+1.0EH1Y)	1345.80	200.18	117.39
DI (0.9D+0.3EH2X+1.0EH1Y)	1622.59	241.02	138.30
DI (0.9D+1.0EH1X+0.3EH2Y)	1376.88	48.47	434.36
DI (0.9D+1.0EH1X+0.3EH2Y)	1593.87	74.29	485.93
DI (0.9D+1.0EH2X+0.3EH1Y)	1383.76	50.45	419.88
DI (0.9D+1.0EH2X+0.3EH1Y)	1594.83	81.92	432.53
DI (1.2D+0.3EH1X+1.0EH2Y+1.0L)	2198.24	185.35	114.37
DI (1.2D+0.3EH1X+1.0EH2Y+1.0L)	2463.54	223.78	161.71
DI (1.2D+0.3EH2X+1.0EH1Y+1.0L)	2186.24	191.95	110.02
DI (1.2D+0.3EH2X+1.0EH1Y+1.0L)	2463.02	249.26	145.67
DI (1.2D+1.0EH1X+0.3EH2Y+1.0L)	2217.31	40.24	426.98
DI (1.2D+1.0EH1X+0.3EH2Y+1.0L)	2434.30	82.52	493.31
DI (1.2D+1.0EH2X+0.3EH1Y+1.0L)	2224.19	42.22	412.51
DI (1.2D+1.0EH2X+0.3EH1Y+1.0L)	2435.26	90.15	439.90
Resultados de combinaciones de carga que incluyen V y H			
Combinación	P (kN)	M2 (kN-m)	M3 (kN-m)
DIV (0.9D+0.3EH1X+1.0EH2Y-0.3SV)	1010.87	193.35	122.92
DIV (0.9D+0.3EH1X+1.0EH2Y-0.3SV)	1952.06	216.49	154.47
DIV (0.9D+0.3EH1X+0.3EH2Y-1.0SV)	28.83	52.98	126.68
DIV (0.9D+0.3EH1X+0.3EH2Y-1.0SV)	3018.34	79.65	155.07
DIV (0.9D+0.3EH2X+1.0EH1Y-0.3SV)	1008.70	201.51	117.17
DIV (0.9D+0.3EH2X+1.0EH1Y-0.3SV)	1950.79	241.52	138.57
DIV (0.9D+0.3EH2X+0.3EH1Y-1.0SV)	29.91	56.23	118.29
DIV (0.9D+0.3EH2X+0.3EH1Y-1.0SV)	3017.98	85.71	140.15
DIV (0.9D+1.0EH1X+0.3EH2Y-0.3SV)	1013.95	49.21	435.22
DIV (0.9D+1.0EH1X+0.3EH2Y-0.3SV)	1945.99	75.55	486.00
DIV (0.9D+1.0EH2X+0.3EH1Y-0.3SV)	1015.82	52.01	419.55
DIV (0.9D+1.0EH2X+0.3EH1Y-0.3SV)	1948.66	82.59	432.67
DIV (1.2D+0.3EH1X+1.0EH2Y+1.0L+0.3SV)	1851.89	186.18	114.04
DIV (1.2D+0.3EH1X+1.0EH2Y+1.0L+0.3SV)	2780.09	223.51	161.73
DIV (1.2D+0.3EH1X+0.3EH2Y+1.0L+1.0SV)	782.33	44.81	115.03
DIV (1.2D+0.3EH1X+0.3EH2Y+1.0L+1.0SV)	3829.87	87.60	163.63
DIV (1.2D+0.3EH2X+1.0EH1Y+1.0L+0.3SV)	1846.40	191.23	110.84
DIV (1.2D+0.3EH2X+1.0EH1Y+1.0L+0.3SV)	2781.91	248.85	145.75
DIV (1.2D+0.3EH2X+0.3EH1Y+1.0L+1.0SV)	781.97	44.59	113.46
DIV (1.2D+0.3EH2X+0.3EH1Y+1.0L+1.0SV)	3828.78	93.29	147.56
DIV (1.2D+1.0EH1X+0.3EH2Y+1.0L+0.3SV)	1851.37	41.23	426.36
DIV (1.2D+1.0EH1X+0.3EH2Y+1.0L+0.3SV)	2776.44	82.77	493.24
DIV (1.2D+1.0EH2X+0.3EH1Y+1.0L+0.3SV)	1853.42	42.00	413.10
DIV (1.2D+1.0EH2X+0.3EH1Y+1.0L+0.3SV)	2778.27	90.18	439.86

Fuente: Autor