

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

ESTUDIO DE RELACIONES ESPECTRALES V/H ASOCIADO AL
SISTEMA DE FALLAS DE QUITO

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN
ESTRUCTURAS

EDUARDO SEBASTIÁN LÓPEZ MORENO
eduardolopez.eslm@yahoo.es

DIRECTOR: ING. PHD. ROBERTO AGUIAR FALCONÍ
rraguiar@espe.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. MSC. DIEGO SOSA CAIZA
diego87_16@hotmail.com

Quito, Julio 2016

DECLARACIÓN

Yo Eduardo Sebastián López Moreno, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Eduardo Sebastián López Moreno

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Eduardo Sebastián López Moreno, bajo nuestra supervisión.

**Ing. PhD. Roberto
Aguiar Falconí
DIRECTOR DE PROYECTO**

**Ing. MSc. Diego Andrés
Sosa Caiza
CO-DIRECTOR DE PROYECTO**

AGRADECIMIENTO

A Dios y la Madre Dolorosa por cuidarme siempre y llenar mi vida de bendiciones.

A mi Director Dr. Roberto Aguiar, por haberme permitido participar en esta línea de investigación, y compartirme su invaluable tiempo y conocimiento en sesiones de trabajo continuas a lo largo del cronograma de este proyecto, constituye un honor el haber podido trabajar con tan prestigioso investigador y formador.

Al Ing. Diego Quizanga, por ser una guía y asesoramiento en este proyecto y por su amistad a lo largo de la Maestría y de la cotidianidad.

Al Ing. Diego Sosa, por su confianza y comentarios constructivos en el desarrollo de este proyecto.

A los profesores de la Escuela Politécnica Nacional, por todo lo que he aprendido de ellos.

A mi hermano y futuro colega Milton López y a mi amigo y colega Ing. Diego Orozco, por su apoyo e interés en compartir momentos en el desarrollo de este proyecto de tesis.

A toda mi familia por estar siempre a mi lado con su apoyo y amor incondicional.

A mi amada esposa Dámariz Robalino, por darme su confianza y amor a lo largo de este camino.

DEDICATORIA

A mi hijo Sebas y esposa Dámariz.

A mis padres Milton y Teresa

*“No puedes volver atrás
y crear un nuevo comienzo,
pero puedes empezar ahora
y crear un nuevo final”*

Autor desconocido

CONTENIDO

DECLARACIÓN	1
CERTIFICACIÓN	2
AGRADECIMIENTO.....	3
DEDICATORIA.....	4
RESUMEN	16
ABSTRACT	18
PRESENTACIÓN	20
Capítulo 1	1
1 Introducción.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Objetivos específicos.....	7
1.3 Alcance	9
1.4 Metodología	10
Capítulo 2.....	12
2 Estado del arte de espectros de diseño de aceleración vertical.....	12
2.1 NCh433.....	12
2.2 NCh2369.....	13
2.3 NSR-10	16
2.4 NORMA TÉCNICA E.030.....	17
2.5 INPRES-CIRSOC 103.....	19
2.6 ASCE/SEI 7-10	21
2.7 NEC 15.....	23
2.8 RESUMEN	25
Capítulo 3.....	28

3	MODELO VERTICAL DE BOZORGNIA & CAMPBELL (2013)	28
3.1	Introducción ECUACIONES DE ATENUACION	28
3.2	Introducción	32
3.3	DESCRIPCION DE LA BASE DE DATOS	33
3.4	DESCRIPCION DEL MODELO	35
3.4.1	enfoque del analisis de regresion	36
3.4.2	Medida de Movimientos de intensidad Fuerte	37
3.4.3	Modelo de Movimiento del Suelo	37
3.4.4	Término de magnitud	38
3.4.5	Término de atenuación geométrica	38
3.4.6	Término de mecanismo de falla	39
3.4.7	Término de hanging wall	39
3.4.8	Término de respuesta superficial de sitio	40
3.4.9	Término de cuenca sedimentaria	40
3.4.10	Término de profundidad hipocentral	40
3.4.11	Término de buzamiento	41
3.4.12	Término de atenuación inelastica	41
3.5	INCERTIDUMBRE	41
3.6	LIMITACIONES DEL MODELO	43
	Capítulo 4	45
4	Modelo VERTICAL de CHOIU & YOUNGS (2013)	45
4.1	Introducción	45
4.2	Descripción de la base de datos de los modelos de Choiu y Youngs (2013)	48
4.2.1	Selección de datos	48
4.2.2	Relacion $z_{1.0} - V_{s30}$	50
4.3	DESCRIPCION DEL MODELO	51
4.4	MODELO ALEATORIO	53
4.5	LIMITACIONES DEL MODELO	54

Capítulo 5.....	55
5 Modelo VERTICAL de ZEYNEP GULERCE et., al (2013).....	55
5.1 Introducción.....	55
5.2 Descripción de la base de datos de los modelos de Abrahamson y Silva (2013).....	57
5.3 DESCRIPCION DEL MODELO.....	58
5.3.1 Modelo base.....	59
5.3.2 factor de estilo de falla (SOF).....	60
5.3.3 Factor de respuesta de sitio.....	61
5.3.4 Modelo de escalamiento de hanging wall (HW).....	61
5.3.5 Modelo de profundidad de falla.....	62
5.3.6 Modelo de escalamiento de réplicas.....	62
5.3.7 Modelo regional.....	62
5.4 INCERTIDUMBRE.....	63
5.5 LIMITACIONES DEL MODELO.....	65
Capítulo 6.....	66
6 CÁLCULO DE RELACIONES ESPECTRALES V/H.....	66
6.1 Introducción.....	66
6.2 MODELO NEOTECTÓNICO Y PERIODOS DE RECURRENCIA PARA LA CIUDAD DE QUITO.....	70
6.3 EL ÁREA DE ESTUDIO.....	76
6.3.1 VELOCIDAD MEDIA DE CORTE VS30 EN QUITO.....	80
6.3.2 LA MALLA OBTENIDA.....	82
6.4 ANALISIS POR ZONAS.....	84
6.4.1 PSa PseUDO ESPECTROS (COMPONENTE HORIZONTAL).....	84
6.4.2 PSa PseUDO ESPECTROS (COMPONENTE VERTICAL).....	84
6.4.3 PSa PseUDO ESPECTROS (COMPONENTE HORIZONTAL & VERTICAL).....	102
6.4.4 RELACIONES ESPECTRALES V/H.....	112

6.5	ANALISIS POR DISTANCIAS R_{RUP}	133
6.5.1	PSa PseUDO ESPECTROS (COMPONENTE HORIZONTAL).....	133
6.5.2	PSa PseUDO ESPECTROS (COMPONENTE VERTICAL)	137
6.5.3	PSa PseUDO ESPECTROS (COMPONENTE VERTICAL COMPARACION).....	142
6.5.4	RELACIONES ESPECTRALES V/H.....	145
Capítulo 7	.....	150
7	PROGRAMA	150
7.1	Introducción.....	150
7.2	GUIA DE USO.....	150
7.3	EJEMPLO DE APLICACIÓN	152
Conclusiones	.....	162
recomendaciones	.....	166
referencias bibliográficas	.....	167
Anexos	.....	171
Anexo 1	.....	172
Anexo 2	.....	177
Anexo 3	.....	183

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 Mapa de intensidades del sismo del 16 de abril de 2016... Actualización del mapa presentado en el informe especial N°12.....	5
FIGURA 3.1 Ángulos que definen el tipo de falla.....	30
FIGURA 3.2 Distancias usadas en ecuaciones de atenuación.....	31
FIGURA 3.3 Magnitud vs R_{RUP} (km) (CB13).....	35
FIGURA 4.1 Distribución de los Registros de Movimiento Vertical..... Magnitud- R_{RUP} [Km].....	49
FIGURA 4.2 Número de Registros Válidos como función del Periodo..... Espectral.....	49
FIGURA 6.1 Procedimiento para DSHA.....	67
FIGURA 6.2 PSa componente horizontal NS y PSa componente Vertical V.....	69
FIGURA 6.3 PSa componente horizontal EW y PSa componente Vertical V.....	69
FIGURA 6.4 Relación V/H (NS) y Relación V/H (EW).....	70
FIGURA 6.5 Nuevo mapa neotectónico de la ciudad de Quito.....	73
FIGURA 6.6 Longitud de superficie de ruptura.....	73
FIGURA 6.7 Plano de falla.....	74
FIGURA 6.8 Tasa acumulada de sismos para los segmentos de las fallas..... ciegas de Quito (gráfica desarrollada con una $b=0.9$ y tasa de deslizamiento..... de 3.5 mm/años).....	75
FIGURA 6.9 Área de Estudio.....	77
FIGURA 6.10 Malla de puntos (sitios de análisis) en área de estudio.....	78
FIGURA 6.11 Área de estudio y planos de falla.....	79
FIGURA 6.12 Estudios realizados por ERN, PLANMAN,..... METRO sobre microzonificación de Valverde.....	81
FIGURA 6.13 Mallas usadas en función del factor V_{s30} adoptado.....	83
FIGURA 6.14 PSa componente vertical, Falla Puengasí, Sector. Sur,..... $V_{s30}=460\text{m/s}$	86
FIGURA 6.15 PSa componente vertical, Falla Puengasí, Sector. Sur,..... $V_{s30}=300\text{m/s}$	87
FIGURA 6.16 PSa componente vertical, Falla Puengasí, Sector. Sur,..... $V_{s30}=200\text{m/s}$	88
FIGURA 6.17 PSa componente vertical, Falla Puengasí, Sector..... Centro-Sur, $V_{s30}=460\text{m/s}$ Modelos, BC13, CY13, GKAS13.....	89

FIGURA 6.18 PSa componente vertical, Falla Puengasí, Sector.....	
Centro-Sur, $V_{s30}=300\text{m/s}$ Modelos, BC13, CY13, GKAS13.....	90
FIGURA 6.19 PSa componente vertical, Falla Puengasí, Sector.....	
Centro-Sur, $V_{s30}=200\text{m/s}$ Modelos, BC13, CY13, GKAS13.....	91
FIGURA 6.20 PSa componente vertical, Falla Puengasí, Sector.....	
Centro, $V_{s30}=460\text{m/s}$ Modelos, BC13, CY13, GKAS13.....	92
FIGURA 6.21 PSa componente vertical, Falla Puengasí, Sector.....	
Centro, $V_{s30}=300\text{m/s}$ Modelos, BC13, CY13, GKAS13.....	93
FIGURA 6.22 PSa componente vertical, Falla Puengasí, Sector.....	
Centro, $V_{s30}=200\text{m/s}$ Modelos, BC13, CY13, GKAS13.....	94
FIGURA 6.23 PSa componente vertical, Falla ILB, Sector Centro.....	
Norte, $V_{s30}=460\text{m/s}$ Modelos, BC13, CY13, GKAS13.....	95
FIGURA 6.24 PSa componente vertical, Falla ILB, Sector Centro.....	
Norte, $V_{s30}=300\text{m/s}$ Modelos, BC13, CY13, GKAS13.....	96
FIGURA 6.25 PSa componente vertical, Falla ILB, Sector Centro.....	
Norte, $V_{s30}=200\text{m/s}$ Modelos, BC13, CY13, GKAS13.....	97
FIGURA 6.26 PSa componente vertical, Falla ILB, Sector Norte,.....	
$V_{s30}=460\text{m/s}$ Modelos, BC13, CY13, GKAS13.....	98
FIGURA 6.27 PSa componente vertical, Falla ILB, Sector Norte,.....	
$V_{s30}=300\text{m/s}$ Modelos, BC13, CY13, GKAS13.....	99
FIGURA 6.28 PSa componente vertical, Falla ILB, Sector Norte,.....	
$V_{s30}=200\text{m/s}$ Modelos, BC13, CY13, GKAS13.....	100
FIGURA 6.29 PSa componente horizontal y vertical, Falla Puengasí,.....	
Sector Sur, $V_{s30}=460\text{m/s}$ Modelos, CB13, CY13, ASK13, BC13, CY13,.....	
GKAS13.....	103
FIGURA 6.30 PSa componente horizontal y vertical, Falla Puengasí,.....	
Sector Sur, $V_{s30}=300\text{m/s}$ Modelos, CB13, CY13, ASK13, BC13, CY13,.....	
GKAS13.....	104
FIGURA 6.31 PSa componente horizontal y vertical, Falla Puengasí,.....	
Sector Sur, $V_{s30}=200\text{m/s}$ Modelos, CB13, CY13, ASK13, BC13, CY13,.....	
GKAS13.....	105
FIGURA 6.32 PSa componente horizontal y vertical, Falla ILB,.....	
Sector Norte, $V_{s30}=460\text{m/s}$ Modelos, CB13, CY13, ASK13, BC13, CY13,.....	
GKAS13.....	106

FIGURA 6.33 PSa componente horizontal y vertical, Falla ILB,.....	
Sector Norte, $V_{s30}=300\text{m/s}$, Modelos, CB13, CY13, ASK13, BC13, CY13,.....	
GKAS13	107
FIGURA 6.34 PSa componente horizontal y vertical, Falla ILB,.....	
Sector Norte, $V_{s30}=200\text{m/s}$, Modelos, CB13, CY13, ASK13, BC13, CY13,.....	
GKAS13	108
FIGURA 6.35 PSa componente horizontal, vertical y horizontal*2/3. Falla.....	
Puengasí, Sector Sur, $V_{s30}=460\text{m/s}$, Modelos, CB13, BC13,	109
FIGURA 6.36 PSa componente horizontal, vertical y horizontal*2/3. Falla.....	
Puengasí, Sector Sur, $V_{s30}=300\text{m/s}$, Modelos, CB13, BC13,	109
FIGURA 6.37 PSa componente horizontal, vertical y horizontal*2/3. Falla.....	
Puengasí, Sector Sur, $V_{s30}=200\text{m/s}$, Modelos, CB13, BC13,	110
FIGURA 6.38 PSa componente horizontal, vertical y horizontal*2/3. Falla.....	
ILB, Sector Norte, $V_{s30}=460\text{m/s}$, Modelos, CB13, BC13,	110
FIGURA 6.39 PSa componente horizontal, vertical y horizontal*2/3. Falla.....	
ILB, Sector Norte, $V_{s30}=300\text{m/s}$, Modelos, CB13, BC13,	111
FIGURA 6.40 PSa componente horizontal, vertical y horizontal*2/3. Falla.....	
ILB, Sector Norte, $V_{s30}=200\text{m/s}$, Modelos, CB13, BC13,	111
FIGURA 6.41 Relación V/H, Falla Puengasí, Sector Sur, Modelo.....	
vertical BC13, Modelo horizontal CB13.....	113
FIGURA 6.42 Relación V/H, Falla Puengasí, Sector Sur, Modelo.....	
vertical CY13, Modelo horizontal CY13.....	114
FIGURA 6.43 Relación V/H, Falla Puengasí, Sector Sur, Modelo.....	
vertical GKAS13, Modelo horizontal ASK13.....	115
FIGURA 6.44 Relación V/H, Falla Puengasí, Sector Centro-sur, Modelo.....	
vertical BC13, Modelo horizontal CB13.....	116
FIGURA 6.45 Relación V/H, Falla Puengasí, Sector Centro-sur, Modelo.....	
vertical CY13, Modelo horizontal CY13.....	117
FIGURA 6.46 Relación V/H, Falla Puengasí, Sector Centro-sur, Modelo.....	
vertical GKAS13, Modelo horizontal ASK13.....	118
FIGURA 6.47 Relación V/H, Falla Puengasí, Sector Centro, Modelo.....	
vertical BC13, Modelo horizontal CB13.....	119

FIGURA 6.48 Relación V/H, Falla Puengasí, Sector Centro, Modelo.....	
vertical CY13, Modelo horizontal CY13.....	120
FIGURA 6.49 Relación V/H, Falla Puengasí, Sector Centro, Modelo.....	
vertical GKAS13, Modelo horizontal ASK13.....	121
FIGURA 6.50 Relación V/H, Falla ILB, Sector Centro-norte, Modelo	
vertical BC13, Modelo horizontal CB13.....	122
FIGURA 6.51 Relación V/H, Falla ILB, Sector Centro-norte, Modelo.....	
vertical CY13, Modelo horizontal CY13.....	123
FIGURA 6.52 Relación V/H, Falla ILB, Sector Centro-norte, Modelo.....	
vertical GKAS13, Modelo horizontal ASK13.....	124
FIGURA 6.53 Relación V/H, Falla ILB, Sector Norte, Modelo vertical BC13,.....	
Modelo horizontal CB13.	125
FIGURA 6.54 Relación V/H, Falla ILB, Sector Norte, Modelo vertical CY13,.....	
Modelo horizontal CY13.	126
FIGURA 6.55 Relación V/H, Falla ILB, Sector Norte, Modelo vertical.....	
GKAS13, Modelo horizontal ASK13.....	127
FIGURA 6.56 Relación V/H, Falla ILB, Sector Norte, $V_{s30}=460\text{m/s}$, Modelo.....	
vertical BC13, CY13, GKAS13, Modelo horizontal CB13, CY13, ASK13.	128
FIGURA 6.57 Relación V/H, Falla ILB, Sector Norte, $V_{s30}=300\text{m/s}$, Modelo.....	
vertical BC13, CY13, GKAS13, Modelo horizontal CB13, CY13, ASK13.	129
FIGURA 6.58 Relación V/H, Falla ILB, Sector Norte, $V_{s30}=200\text{m/s}$, Modelo.....	
vertical BC13, CY13, GKAS13, Modelo horizontal CB13, CY13, ASK13.	130
FIGURA 6.59 PSa componente horizontal, Falla Puengasí, $V_{s30}=460\text{m/s}$,.....	
Modelo, BC13.....	133
FIGURA 6.60 PSa componente horizontal, Falla Puengasí, $V_{s30}=460\text{m/s}$,.....	
Modelo, CY13.....	133
FIGURA 6.61 PSa componente horizontal, Falla Puengasí, $V_{s30}=460\text{m/s}$	134
FIGURA 6.62 PSa componente horizontal, Falla Puengasí, $V_{s30}=300\text{m/s}$	134
FIGURA 6.63 PSa componente horizontal, Falla Puengasí, $V_{s30}=300\text{m/s}$	135
FIGURA 6.64 PSa componente horizontal, Falla Puengasí, $V_{s30}=300\text{m/s}$	135
FIGURA 6.65 PSa componente horizontal, Falla Puengasí, $V_{s30}=200\text{m/s}$	136
FIGURA 6.66 PSa componente horizontal, Falla Puengasí, $V_{s30}=200\text{m/s}$	136
FIGURA 6.67 PSa componente horizontal, Falla Puengasí, $V_{s30}=200\text{m/s}$,.....	
Modelo, ASK13	137

FIGURA 6.68 PSa componente vertical, Falla Puengasí, $V_{s30}=460\text{m/s}$,.....	
Modelo, BC13.....	137
FIGURA 6.69 PSa componente vertical, Falla Puengasí, $V_{s30}=460\text{m/s}$	
Modelo, CY13.....	138
FIGURA 6.70 PSa componente vertical, Falla Puengasí, $V_{s30}=460\text{m/s}$	
Modelo, GKAS13.....	138
FIGURA 6.71 PSa componente vertical, Falla Puengasí, $V_{s30}=300\text{m/s}$	
Modelo, BC13.....	139
FIGURA 6.72 PSa componente vertical, Falla Puengasí, $V_{s30}=300\text{m/s}$	
Modelo, CY13.....	139
FIGURA 6.73 PSa componente vertical, Falla Puengasí, $V_{s30}=300\text{m/s}$	
Modelo, GKAS13.....	140
FIGURA 6.74 PSa componente vertical, Falla Puengasí, $V_{s30}=200\text{m/s}$	
Modelo, BC13.....	140
FIGURA 6.75 PSa componente vertical, Falla Puengasí, $V_{s30}=200\text{m/s}$	
Modelo, CY13.....	141
FIGURA 6.76 PSa componente vertical, Falla Puengasí, $V_{s30}=200\text{m/s}$	
Modelo GKAS13.....	141
FIGURA 6.77 PSa vertical, Falla Puengasí, $V_{s30}=460\text{m/s}$ Modelo, BC13,.....	
CY13, GKAS13	142
FIGURA 6.78 PSa vertical, Falla Puengasí, $V_{s30}=300\text{m/s}$ Modelo, BC13,.....	
CY13, GKAS13	143
FIGURA 6.79 PSa vertical, Falla Puengasí, $V_{s30}=200\text{m/s}$ Modelo, BC13,.....	
CY13, GKAS13	144
FIGURA 6.80 Relaciones V/H, Falla Puengasí, $V_{s30}=460\text{m/s}$, Modelo.....	
BC13/CB13	145
FIGURA 6.81 Relaciones V/H, Falla Puengasí, $V_{s30}=460\text{m/s}$, Modelo.....	
CY13/CY13	145
FIGURA 6.82 Relaciones V/H, Falla Puengasí, $V_{s30}=460\text{m/s}$,.....	
Modelo GKAS13/ASK13	146
FIGURA 6.83 Relaciones V/H, Falla Puengasí, $V_{s30}=300\text{m/s}$,.....	
Modelo BC13/CB13.....	146
FIGURA 6.84 Relaciones V/H, Falla Puengasí, $V_{s30}=300\text{m/s}$,.....	
Modelo CY13/CY13.....	147

FIGURA 6.85 Relaciones V/H, Falla Puengasí, $V_{s30}=300\text{m/s}$,.....	
Modelo GKAS13/ASK13	147
FIGURA 6.86 Relaciones V/H, Falla Puengasí, $V_{s30}=200\text{m/s}$,.....	
Modelo BC13/CB13.....	148
FIGURA 6.87 Relaciones V/H, Falla Puengasí, $V_{s30}=200\text{m/s}$,.....	
Modelo CY13/CY13.....	148
FIGURA 6.88 Relaciones V/H, Falla Puengasí, $V_{s30}=200\text{m/s}$,.....	
Modelo GKAS13/ASK13	149
FIGURA 7.1 Pantalla de Inicio del programa	152
FIGURA 7.2 Datos del sitio de análisis determinístico	153
FIGURA 7.3 Resultados.....	154
FIGURA 7.4 (PSa) Componente Horizontal Modelos	154
FIGURA 7.5 (PSa) Componente Horizontal Comparaciones	155
FIGURA 7.6 (PSa) Componente Vertical Modelos.....	155
FIGURA 7.7 (PSa) Componente Horizontal y Vertical	156
FIGURA 7.8 Relaciones Espectrales V/H	157
FIGURA 7.9 Relaciones Espectrales V/H BC13/CB13	158
FIGURA 7.10 Relaciones Espectrales V/H CY13/CY13	158
FIGURA 7.11 Relaciones Espectrales V/H GKAS13/ASK13	159
FIGURA 7.12 Opciones finales	159
FIGURA 7.13 Caso General en Ecuador	160
FIGURA 7.14 Datos para: Caso General en Ecuador.....	161
FIGURA 7.15 Resultados para: Caso General en Ecuador	161

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 Resumen de las especificaciones para la componente sísmica.....	27
vertical.....	27
TABLA 4.1 Resumen del modelo vertical comparado con el modelo.....	47
horizontal.....	47
TABLA 5.1 Resumen del modelo vertical comparado con el modelo.....	56
horizontal.....	56
TABLA 6.1 Magnitud máxima esperada en cada segmento de las fallas de.....	72
Quito.....	72
TABLA 6.2 Período de Recurrencia, hallados con modelo de Gutenberg.....	75
y Richter Modificado.....	75
TABLA 6.3 Relación V/H, Falla Puengasí, Sector Sur, Modelo BC13/CB13.....	131
TABLA 6.4 Relación V/H, Falla Puengasí, Sector Sur, Vs=460 m/s,.....	132
Comparación de modelos	132
TABLA 6.5 Relación V/H, Falla ILB, Sector Centro-Norte,.....	132
Vs=460 m/s, Comparación de modelos.....	132
TABLA 7.1 Identificación de falla controladora	153

RESUMEN

La ciudad de Quito puede verse afectada por dos tipos de sismos, fundamentalmente, los interplaca tipo thrust que tienen su origen en la costa y los asociados al fallamiento local. Es más en estudios de peligrosidad sísmica que se han realizado, se ha encontrado en la desagregación de la amenaza que la mayor fuente proviene de sismos cuyo epicentro se halle en un radio de 30 km., que tengan una magnitud alrededor de 6.5 y un coeficiente de incertidumbre de $\varepsilon = 2$.

Por lo indicado es relevante dar a conocer que la ciudad de Quito se asienta sobre un sistema de fallas que se extiende aproximadamente a lo largo de 60 km., el modelo neotectónico considera 5 segmentos de fallas ciegas inversas denominadas: Puengasí, Ilumbisí-La Bota, Carcelén el Inca, Bellavista-Catequilla y Tangahuilla, sin embargo, no se tiene un conocimiento adecuado del peligro sísmico asociado a este sistema de fallas para la componente vertical del movimiento del suelo.

Actualmente en el país, la componente vertical del sismo (E_v) está definida por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 15), mediante el escalamiento de la componente horizontal del sismo (E_h) por un factor mínimo de $2/3$, por tanto $E_v \geq 2/3 E_h$, exceptuando estructuras de uso especial o esencial que se encuentren en el campo cercano (0-10km) de una falla superficial, para ese caso, se deberá evaluar la componente vertical del sismo mediante el estudio de respuesta de sitio.

En este estudio, se van a determinar relaciones espectrales V/H asociadas al sistema de fallas de Quito, donde V es el Pseudo espectro de respuesta de aceleración vertical para el 5% de amortiguamiento y H es el Pseudo espectro de respuesta de aceleración horizontal para el 5% de amortiguamiento, utilizando los modelos de movimiento fuerte del suelo correspondientes al programa Next Generation Attenuation (NGA WEST2), que son aplicables para régimen tectónico cortical como el de la ciudad de Quito; en principio se considera a la ciudad dividida en cinco zonas: sur, centro sur, centro, centro norte y norte, posteriormente se consideran distancias $R_{rup}=5\text{km}$, 10km, 15km, 20km, 30km y para cada una de ellas se presentan relaciones espectrales V/H.

De los resultados obtenidos, se observa que la relación espectral V/H depende principalmente de la distancia más cercana entre el sitio y el plano de ruptura R_{rup} y del tipo de suelo en el sitio de análisis. En forma general la relación $V/H \geq 2/3$ es insuficiente en el rango de periodos $0 \leq T \leq 0.3$, puesto que se encontraron valores hasta de $V/H = 1.39$ para el caso de la falla de Puengasí en el sector Sur, en suelo tipo D. En cambio para periodos $0.3 \leq T \leq 3.0$ se obtienen valores menores a $V/H \geq 2/3$ por lo que en este rango se concluye que la relación es ligeramente conservadora.

ABSTRACT

The Quito city can be affected by two types of earthquakes, mainly the thrust interplate type that originated on the coast and local faulting. Indeed studies of seismic hazard that has been made, it has been found in the breakdown of the threat that the greatest source comes from earthquakes whose epicenter is in a radius of 30 km., having a magnitude of about 6.5 and a coefficient uncertainty $\varepsilon = 2$.

It is relevant to indicate that the Quito city sits on a fault system that extends approximately along 60 km, the neotectonic model considers five segments of inverse faults called. Puengasí, Ilumbisí-La Bota , Carcelen el Inca, Bellavista-Catequilla and Tangahuilla, however, do not have adequate knowledge of seismic hazard associated with this fault system for the vertical component of ground motion.

Currently in the country, the vertical component of the earthquake (E_v) is defined by the Ecuadorian Standard Construction (NEC 15) by scaling the horizontal component of the earthquake (E_h) for a minimum factor of $2/3$, therefore $E_v \geq 2 / 3E_h$, except special or essential structures that are used in the near field (0-10km) of a surface fault, for that matter, it should assess the vertical component of the earthquake by studying site response.

In this study, we will determine spectral ratios V / H associated with Quito fault System QFS, where V is the Pseudo spectrum response vertical acceleration for 5% damping and H is the Pseudo response spectrum of horizontal acceleration for 5% damping, using the models of strong ground motion for the (NGA WEST2) Next Generation Attenuation program, which are applicable to crustal tectonic regime as the city of Quito; in principle it is considered the city divided into five zones: south, south-central, central, north central and northern subsequently considered distances $R_{rup} = 5\text{km}, 10\text{km}, 15\text{km}, 20\text{km}, 30\text{km}$ and for each one are calculated spectral ratios V / H .

From the results, it is observed that the spectral ratio V / H depends mainly on the distance R_{rup} and the type of soil at the site of analysis. In general the ratio $V / H \geq 2 / 3$ is insufficient in the range of periods $0 \leq T \leq 0.3$, since values were found up to $V / H = 1.39$ for the case of failure Puengasí in the southern sector, in type D. Instead soil for periods $0.3 \leq T \leq 3.0$ lower values are obtained $V / H \geq 2 / 3$ so that in this range it is concluded that the spectral ratios is slightly conservative.

PRESENTACIÓN

Esta tesis está organizada en ocho capítulos como se muestran a continuación:

Capítulo 1: Introducción.- Presenta la motivación, los objetivos, alcance y la metodología propuestos para este estudio.

Capítulo 2: Estado del arte de espectros de diseño de aceleración vertical.- Presenta un resumen de la forma de considerar la acción Sísmica Vertical y las consideraciones para combinar la acción Sísmica Vertical y Horizontal de las siguientes normas: NCh433, NCh2369, NSR-10, E.030, IMPRES-CIRSOC 103, ASCE/SEI 7-10, NEC-15.

Capítulo 3: Modelo Vertical de Bozorgnia & Campbell (2013).- Para el modelo del movimiento vertical del suelo de Bozorgnia & Campbell se presenta la introducción, la base de datos, la descripción del modelo, la incertidumbre y las limitaciones del modelo. Para el modelo del movimiento horizontal del suelo de Campbell & Bozorgnia únicamente se puntualiza las diferencias existentes con el modelo vertical.

Capítulo 4: Modelo Vertical de Chiu & Youngs (2013).- Para el modelo del movimiento vertical del suelo de Chiu & Youngs se presenta la introducción, la base de datos, la descripción del modelo, la incertidumbre y las limitaciones del modelo. Para el modelo del movimiento horizontal del suelo de Chiu & Youngs únicamente se puntualiza las diferencias existentes con el modelo vertical.

Capítulo 5: Modelo Vertical de Zeynep Gulerce et., al (2013).- Para el modelo del movimiento vertical del suelo de Zeynep Gulerce et., al (2013) se presenta la introducción, la base de datos, la descripción del modelo, la incertidumbre y las limitaciones del modelo. Para el modelo del movimiento horizontal del suelo de Abrahamson & Silva únicamente se puntualiza las diferencias existentes con el modelo vertical.

Capítulo 6: Cálculo de relaciones espectrales V/H.- Presenta los resultados obtenidos de pseudoespectros de aceleración vertical, horizontal y relaciones espectrales V/H asociadas al sistema de fallas de Quito.

Capítulo 7: Programa.- Presenta la guía de uso del programa desarrollado en Excel-Visual Basic para el cálculo de relaciones espectrales.

Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones.- Se proponen las conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Actualmente en el país, la componente vertical del sismo (E_v) está definida por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 15), mediante el escalamiento de la componente horizontal del sismo (E_h) por un factor mínimo de $2/3$, por tanto $E_v \geq 2/3E_h$, exceptuando estructuras de uso especial o esencial que se encuentren en el campo cercano (0-10km) de una falla superficial, para ese caso, se deberá evaluar la componente vertical del sismo mediante el estudio de respuesta de sitio.

Esta correlación de $2/3$ se fundamenta en el trabajo realizado por Newmark 1973, que analizó 33 registros de eventos en los Estados Unidos y obtuvo las relaciones de la aceleración máxima de la componente vertical (PGA_v) entre la aceleración máxima de la componente horizontal (PGA_h).

Posteriores trabajos insistieron en encontrar la correlación adecuada, como por ejemplo; Kawashima et. al 1985, analizaron registros del Japón proponiendo $V/H=1/5$, Ambrasays & Simpson 1995, analizaron 104 registros mundiales, $R<15.0\text{km}$, $M>6$, $A_v>0.1g$ proponiendo $V/H=1.75$; Boomer & Martínez 1996, analizaron 130 registros, $A_v>0.2g$ proponiendo $V/H=1.0$. (Perea & Esteva 2005).

En estudios realizados por otros autores se ha observado que la componente vertical sísmica depende en gran parte de la profundidad, el periodo de oscilación, el tipo de suelo y la distancia epicentral; en distancias epicentrales menores a 30 km generalmente la componente vertical supera a la horizontal. Al estar la ciudad de Quito asentada sobre el sistema de fallas inversas (Quito Fault System QFS)

descritas en el modelo neotectónico de Quito propuesto por Alvarado 2012, es evidente que la componente vertical es muy importante ya que la distancia de la fuente al sitio estará dentro de los 30 km.

La ciudad de Quito puede verse afectada por dos tipos de sismos, fundamentalmente, los interplaca tipo thrust que tienen su origen en la costa y los asociados al fallamiento local, considerando el estudio de Fabricio Yépez y otros expertos en 2001, en el que obtuvieron estimaciones de riesgo sísmico para la ciudad de Quito, evaluando la vulnerabilidad por medio de una zonificación estructural de acuerdo al tipo de material y a la tipología estructural e imponiéndose datos razonables sobre el peligro sísmico, utilizando tres sismos hipotéticos, dos sismos de subducción con magnitudes M_w 7.3 y 8.4 localizado el primero a 80 km al oriente de la ciudad, el segundo a 200 km al oeste y un último sismo asociado a la tectónica local con magnitud $M_w=6.5$ localizado 25 km al noroccidente de la ciudad, asociado a la falla de Catequilla, concluyendo que por los resultados obtenidos usando los 3 eventos sísmicos potenciales, el que produce el mayor daño es el sismo local es decir el asociado a la tectónica cortical; la conclusión de ese trabajo se ve confirmada al analizar los siguientes eventos sísmicos:

- Sismo de Quito de 12 de agosto de 2014 Magnitud $M_w = 5.1$
- Sismo de Quito de 15 de marzo de 2016 Magnitud $M_w = 4.1$
- Sismo de Pedernales de 16 de abril de 2016 Magnitud $M_w = 7.8$

Los dos primeros sismos son de origen tectónico cortical y el tercero es debido a la subducción.

Para el sismo del 12 de agosto la máxima intensidad evaluada fue de 6 EMS al Norte y Nor-oriental de la ciudad de Quito que corresponde a daños leves (no estructurales) a nivel de mampostería (fisuras delgadas en paredes) en edificaciones de bloque o ladrillo. Con esta intensidad, y de acuerdo a los reportes recibidos, la mayoría de personas, tanto dentro como fuera de edificaciones,

sintieron el sismo y generó susto en la población. En la ciudad de Quito, la intensidad promedio fue de 4 EMS que describe a un evento sentido ampliamente por personas al interior de edificaciones, las mismas que observaron objetos livianos en movimiento (vajillas, vasos, lámparas, suenan puertas y ventanas) y se observó movimiento aislado de objetos pesados (muebles, armarios). Con este nivel de intensidad se espera daños no estructurales (fisuras finas en paredes) en muy pocas edificaciones de bloque o ladrillo (generalmente viviendas entre 1 y 2 pisos). (IGEPN)

Para el sismo del 15 de marzo la intensidad máxima alcanzada es 5 EMS en ciertos sectores del norte de la ciudad (Cotocollao y Calderón). Este valor de intensidad indica que el sismo fue sentido ampliamente y pudo causar fisuras delgadas en enlucidos o paredes de mampostería de edificaciones de baja altura (1-3 pisos). En sectores como Ponceano, Comité del Pueblo, San José de Morán, El Condado, El Pinar, Las Casas, La Gasca, Mañosca y La Carolina, al norte de la ciudad, los reportes muestran que el sismo alcanzó una intensidad de 4 EMS. Es decir, el evento fue sentido ampliamente; sin embargo, no causó daños en edificaciones. Es posible haber observado movimiento de objetos pequeños en estanterías, balanceo de lámparas o vibración de ventanas. Los mismos efectos fueron reportados desde barrios del sur y centro-sur de Quito como Luluncoto, Itchimbía, La Magdalena, El Dorado, El Tingo y Centro Histórico. Finalmente, se recibieron reportes desde Sangolquí, Chimbacalle, Santa Rosa, La Ecuatoriana, Villaflores y Chillogallo, que indican que el evento fue sentido de manera leve. Por esta razón se ha asignado una intensidad de 3 EMS. (IGEPN)

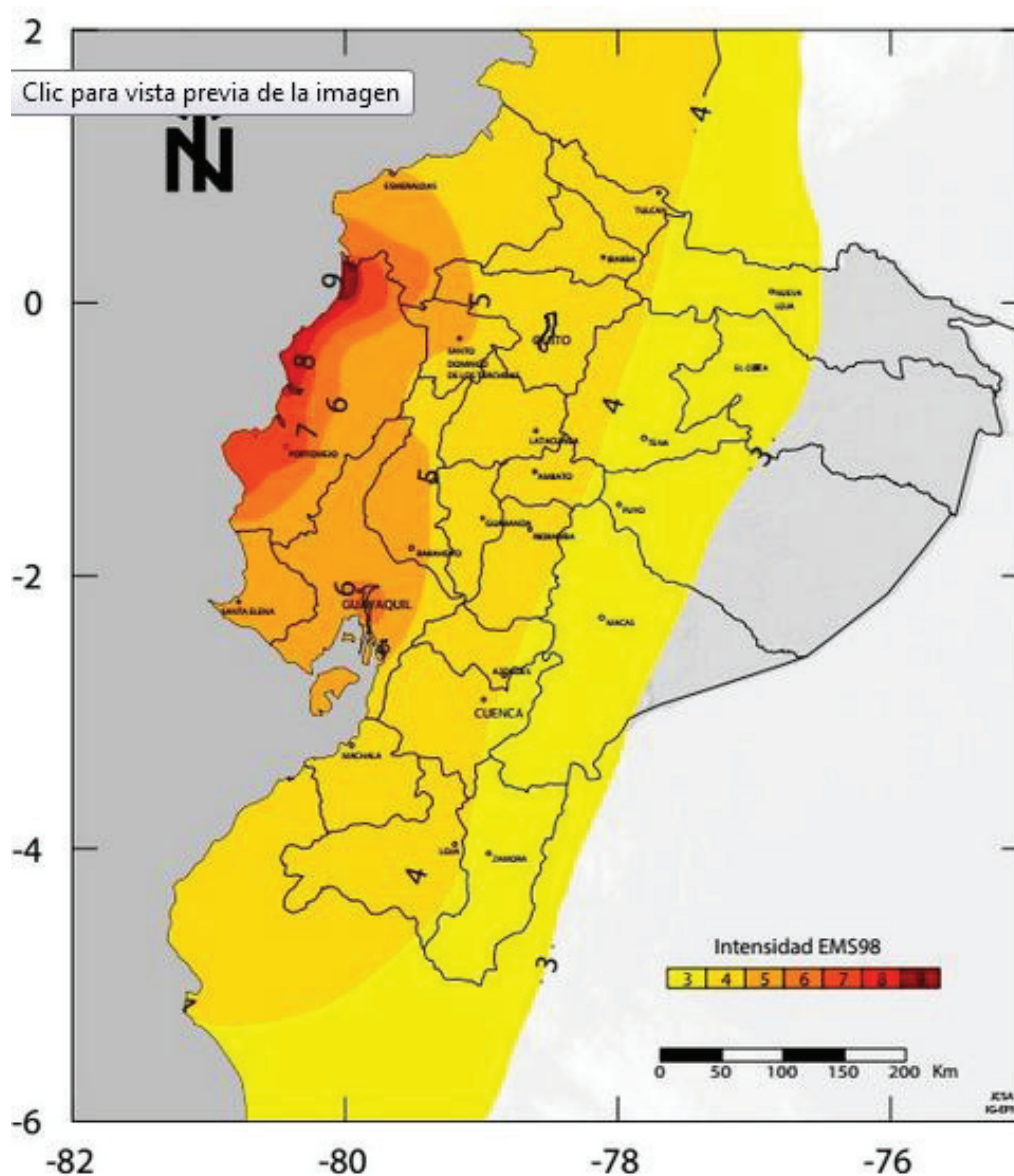
Para el sismo de 16 de abril cuyo hipocentro se ubicó frente a Pedernales (Manabí), a 20 km de profundidad, fue resultado del desplazamiento entre dos placas tectónicas: la placa de Nazca (placa oceánica) que se sumerge bajo la Sudamericana (placa continental), a este proceso se le conoce como subducción.

La intensidad es un indicador de la fuerza del evento, medido en personas, objetos y edificaciones. Para determinar los niveles de intensidad se utilizó la Escala

Macrosísmica Europea (EMS98), que es una actualización de la Escala de Mercalli. Esta escala cuenta con 12 grados. (IGEPN)

A continuación se presenta el mapa de intensidades que es una actualización del informe especial N°12, publicado en la página web del IG-EPN el 17 de abril

FIGURA 1.1 MAPA DE INTENSIDADES DEL SISMO DEL 16 DE ABRIL DE 2016. ACTUALIZACIÓN DEL MAPA PRESENTADO EN EL INFORME ESPECIAL N°12



FUENTE: IGEPN, 2016

La intensidad máxima de 9 EMS está en las zonas de Pedernales y San José de Chamanga. Este valor refleja el colapso observado en muchas edificaciones vulnerables y los daños en edificaciones construidas bajo las recomendaciones de las normas técnicas. En general, en las provincias de la Sierra, la intensidad máxima es 4 EMS que indica que el sismo fue sentido ampliamente por la población. (IGEPN)

Por lo expuesto vemos que es de importancia estudiar las relaciones espectrales V/H asociadas al sistema de fallas de Quito, donde V es el Pseudo espectro de respuesta de aceleración vertical para el 5% de amortiguamiento y H es el Pseudo espectro de respuesta de aceleración horizontal para el 5% de amortiguamiento, de esta forma emitiremos comparaciones respecto a la relación V/H normada en la NEC-15 y a las recomendadas en otros estudios o normativas.

Adicionalmente, tomando en cuenta que la práctica de diseño sismo resistente de las estructuras tradicionalmente supone que las acciones que influyen significativamente en su comportamiento son las cargas gravitacionales y las excitaciones sísmicas horizontales, despreciando las excitaciones sísmicas verticales basadas en los siguientes argumentos:

- Se tiene un margen de seguridad importante en el diseño por cargas gravitatorias, dado que se consideran a éstas con su intensidad máxima y aplicando altos factores de carga.
- No se presenta una amplificación dinámica vertical importante dado que generalmente se tiene una gran rigidez en esa dirección.
- En la mayoría de los casos, la magnitud de la componente vertical es menor que la componente horizontal. (Perea & Esteva 2005).

Observamos que este último argumento es complicado de cumplir para la ciudad de Quito debido a su sistema de fallas, por tal motivo este estudio sirve como punto de partida para motivar futuras líneas de investigación enfocadas en determinar la influencia de la acción sísmica vertical en la respuesta estructural.

Finalmente con este estudio se complementará la línea de investigación desarrollada por Aguiar y Quizanga 2015, quienes determinaron pseudo espectros de respuesta de aceleración horizontal para el 5% de amortiguamiento, generando un aporte importante respecto a la determinación del peligro sísmico de la ciudad de Quito asociado a su sistema de fallas.

1.2 OBJETIVOS

En este estudio, se van a determinar relaciones espectrales V/H asociadas al sistema de fallas de Quito, donde V es el Pseudo espectro de respuesta de aceleración vertical para el 5% de amortiguamiento y H es el Pseudo espectro de respuesta de aceleración horizontal para el 5% de amortiguamiento, utilizando los modelos de movimiento fuerte del suelo correspondientes al programa Next Generation Attenuation (NGA WEST2), que son aplicables para régimen tectónico cortical como el de la ciudad de Quito; en principio se considera a la ciudad dividida en cinco zonas: sur, centro sur, centro, centro norte y norte, posteriormente se consideran distancias $R_{rup}=5\text{km}$, 10km , 15km , 20km , 30km y para cada una de ellas se presentan relaciones espectrales V/H considerando tipo de suelo C, D y E, de acuerdo a la clasificación de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 15). De esta manera se puede evaluar el peligro o amenaza sísmica localmente.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Presentar el estado del arte de la forma de considerar la acción Sísmica Vertical indicada en varias normativas para el análisis estructural.
- Presentar para el modelo del movimiento vertical del suelo de Bozorgnia & Campbell la introducción, la base de datos, la descripción del modelo, la incertidumbre y las limitaciones del modelo. Para el modelo del movimiento horizontal del suelo de Campbell & Bozorgnia puntualizar las diferencias existentes con el modelo vertical.
- Presentar para el modelo del movimiento vertical del suelo de Chou & Youngs la introducción, la base de datos, la descripción del modelo, la incertidumbre y las limitaciones del modelo. Para el modelo del movimiento horizontal del suelo de Chou & Youngs puntualizar las diferencias existentes con el modelo vertical.

- Presentar para el modelo del movimiento vertical del suelo de Zeynep Gulerce et., al (2013) la introducción, la base de datos, la descripción del modelo, la incertidumbre y las limitaciones del modelo. Para el modelo del movimiento horizontal del suelo de Abrahamson & Silva puntualizar las diferencias existentes con el modelo vertical.
- Describir el sistema de fallas de Quito (QFS) propuesto por Alvarado et al. 2012 y para cada segmento que conforman este sistema indicar la longitud de superficie de ruptura (SRL), el área de ruptura, la magnitud máxima esperada (M_w) y el periodo de recurrencia determinada por otros autores.
- Presentar la malla de puntos utilizada por Quizanga 2015, la cual considera al Distrito Metropolitano de Quito dividido en cinco zonas o sectores siguientes: Zona norte, Zona centro norte, Zona centro, Zona centro sur, Zona sur, al igual que considera los respectivos valores de V_{s30} los cuales fueron obtenidos a partir de la evaluación de la microzonificación de suelos de varios estudios.
- Generar una malla de puntos para análisis determinístico en función de R_{rup} , y asociados a cada uno de los segmentos de falla del sistema de fallas de Quito.
- Presentar los resultados obtenidos de pseudo espectros de aceleración vertical, horizontal y relaciones espectrales V/H asociadas al sistema de fallas de Quito y calculados con las ecuaciones de atenuación descritas en este estudio.
- Realizar un programa en Excel-Visual Basic, para obtener relaciones espectrales V/H asociadas al sistema de fallas de Quito.
- Comparar las relaciones espectrales V/H obtenidas con los modelos de movimiento fuerte con la indicada en el numeral 3.4 del NEC 15 y proponer conclusiones y recomendaciones.

1.3 ALCANCE

Este estudio presenta relaciones espectrales V/H asociadas al sistema de fallas de Quito, donde V es el Pseudo espectro de respuesta de aceleración vertical para el 5% de amortiguamiento y H es el Pseudo espectro de respuesta de aceleración horizontal para el 5% de amortiguamiento, con el objetivo de aportar al conocimiento del peligro o amenaza sísmica local.

Es imposible definir en forma exacta el plano de falla que se daría al producirse un sismo en cualquiera de los segmentos de falla pero hay que hacerlo, para definir un modelo numérico de cálculo con el cual se generen espectros, en diferentes puntos de la ciudad, asociados a la ocurrencia de un sismo en uno de los segmentos de falla, con magnitud máxima. Se asumió un escenario tectónico en que cada falla rompe de manera independiente y que el hipocentro siempre estará en el centro de la traza expuesta o proyección vertical de la falla en la superficie.

Los pseudo espectros obtenidos en este estudio podrán aplicarse como espectros de control, se denomina espectro de control al que se obtiene para el trio de parámetros siguiente distancia en un radio de 30km al epicentro, magnitud alrededor de 6.5 y un coeficiente de incertidumbre de $\varepsilon = 2$. Con dicho espectro se puede verificar el desempeño de estructuras ya existentes y diseñadas en la ciudad de Quito de acuerdo a las normativas anteriores que se usaban en el país como el CEC 77, CEC 2000, y también permitirán verificar si existe compatibilidad entre los espectros propuesto por la NEC 15.

De igual manera las relaciones V/H obtenidas en este estudio, podrán aplicarse para verificar si la relación $V/H \geq 2/3$ indicada en el numeral 3.4 del NEC 15 para obtener el espectro de diseño de aceleración vertical es adecuada.

Debido a que a nivel regional no se cuenta con ecuaciones de atenuación propias, este estudio considera que los modelos de movimiento fuerte del suelo correspondientes al programa Next Generation Attenuation (NGA WEST2), son

aplicables para régimen tectónico cortical como el de la ciudad de Quito, basado en el estudio de Lourdes Taipe en 2013.

Este estudio sigue la línea de investigación realizada por Quizanga en 2015, quien determino Pseudo espectro de respuesta de aceleración horizontal para el 5% de amortiguamiento asociado al sistema de fallas de Quito, por tanto es lógico que para calcular los Pseudo espectro de respuesta de aceleración vertical para el 5% de amortiguamiento se utilice la misma malla de puntos la cual considera al Distrito Metropolitano de Quito dividido en cinco zonas o sectores siguientes: Zona norte, Zona centro norte, Zona centro, Zona centro sur, Zona sur, al igual que considera los respectivos valores de V_{s30} obtenidos a partir de la evaluación de la microzonificación de suelos de varios estudios. Lo ideal es disponer localmente de mapas de isovelocidades V_{s30} , sin embargo en la ciudad no existe esta información.

Es conocido que los Pseudo espectro de respuesta de aceleración vertical para el 5% de amortiguamiento son de mayor influencia en el campo cercano (0-10km) de una falla superficial, por lo que se genera una malla de puntos para análisis determinístico en función de $R_{rup}=5\text{km}, 10\text{km}, 15\text{km}, 20\text{km}, 30\text{km}$, para evaluar el peligro sísmico en la ciudad.

1.4 METODOLOGÍA

Se compilara información publicada por diferentes investigadores referentes a la evaluación del peligro sísmico. Para la caracterización del sistema de fallas de Quito se utilizará el mapa neotectónico propuesto por Alvarado et al 2012.

También se recopilara información de las siguientes normas: NCh433, NCh2369, NSR-10, E.030, IMPRES-CIRSOC 103, ASCE/SEI 7-10, NEC-15, para presentar la forma de considerar la acción Sísmica Vertical y las consideraciones para combinar la acción Sísmica Vertical y Horizontal con el objeto de situar el nivel de desarrollo de nuestra norma referente a este tema.

Se presentarán y analizarán los modelos de movimiento fuerte (GMPE's) para la componente vertical y horizontal indicados en los objetivos específicos, los cuales fueron desarrollados por el Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) en el programa Next Generation Attenuation (NGA WEST2).

Utilizando una hoja de cálculo de Excel se calcularán los Pseudo espectro de respuesta de aceleración vertical para el 5% de amortiguamiento y los Pseudo espectro de respuesta de aceleración horizontal para el 5% de amortiguamiento y relaciones espectrales V/H para una malla que considera puntos determinísticos con una separación de 500 m en sentido Norte-Sur y Este-Oeste dentro del área urbana del distrito metropolitano de Quito, posteriormente se presentaran en forma de graficas los pseudo espectros promedios asociados a cada segmento del sistema de Fallas de Quito (QFS), usando diferentes valores de V_{s30} y en diferentes zonas de la ciudad.

Utilizando una hoja de cálculo de Excel se calcularán los Pseudo espectro de respuesta de aceleración vertical para el 5% de amortiguamiento y los Pseudo espectro de respuesta de aceleración horizontal para el 5% de amortiguamiento y relaciones espectrales V/H para una malla que considera puntos determinísticos para distancias $R_{rup}=5\text{km}$, 10km , 15km , 20km , 30km , posteriormente se presentaran en forma de graficas los pseudo espectros calculados.

Las relaciones espectrales V/H se tabularan adecuadamente indicando las variables consideradas y servirán para comparar con la definida en el numeral 3.4 del NEC 15, se emitirán conclusiones, recomendaciones y líneas futuras de estudio.

Finalmente se desarrollará un programa en Excel-Visual Basic para obtener relaciones espectrales V/H asociadas al sistema de fallas de Quito para un punto (coordenada UTM) en específico dentro del Distrito Metropolitano, con el objeto de que el usuario pueda introducir las variables correspondientes a su caso de análisis y de esta manera evaluar el peligro sísmico.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE DE ESPECTROS DE DISEÑO DE ACELERACIÓN VERTICAL

2.1 NCh433

La norma chilena NCh433 de 1996 modificada a 2009 “Diseño sísmico de edificios” en lo referente a sismo vertical especifica lo siguiente:

En el capítulo 5.8 se describe las acciones sísmicas sobre la estructura, en cuanto a la acción sísmica vertical se menciona lo siguiente en el numeral 5.8.2; las marquesinas, balcones, aleros y otros elementos vulnerables a la acción vertical del sismo, se deben diseñar para una fuerza vertical igual a las cargas permanentes más la totalidad de la sobrecarga de uso aumentadas ambas en un 30%, se hace notar que no deja sentado que debe ser tratada como una fuerza reversible.

En el numeral 8.1.3 que corresponde a elementos secundarios indica que para el diseño de los elementos secundarios se deben considerar las siguientes fuerzas sísmicas en conjunto con otras solicitaciones. La componente horizontal debe ser la definida según 8.3 y la componente vertical debe tener una magnitud igual a:

$$F_v = 0.67 \frac{A_0 P_p}{g} \quad (2.1)$$

Dónde:

A_0 aceleración efectiva máxima del suelo.

P_p peso total del elemento secundario, incluyendo la sobrecarga de uso y el contenido cuando corresponda.

g gravedad

Y se debe considerar hacia arriba o hacia abajo según cuál de estas situaciones sea la más desfavorable.

La estructura debe ser analizada, como mínimo, para acciones sísmicas independientes según cada una de dos direcciones horizontales perpendiculares o aproximadamente perpendiculares. En cuanto a la forma de combinar la carga sísmica horizontal con la vertical, no se tiene ninguna disposición.

Las combinaciones básicas para el diseño por última resistencia se las puede encontrar en la norma NCh3171

2.2 NCh2369

La norma chilena NCh2369 de 2003 “Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales” en lo referente a sismo vertical especifica lo siguiente:

En el numeral 5.1 dispone que las estructuras deban ser analizadas, como mínimo, para las acciones sísmicas en dos direcciones horizontales aproximadamente perpendiculares. El efecto de las aceleraciones sísmicas verticales se debe considerar en los casos siguientes:

- a) Barras de suspensión de equipos colgantes y sus elementos soportantes y vigas de acero de construcción soldada, laminada o plegada, con o sin losa colaborante ubicadas en zona sísmica 3, en las que las cargas permanentes representan más del 75% de la carga total.
- b) Estructuras y elementos de hormigón pre comprimido (pretensado y postensado)

Para esos casos la acción sísmica vertical se puede considerar en forma estática, aplicando un coeficiente sísmico vertical parejo, sobre todos los elementos, igual a A_0/g . De este modo la fuerza sísmica vertical debe ser:

$$F_v = \pm \frac{A_0 I P}{g} \quad (2.2)$$

Dónde

- A_o aceleración efectiva máxima del suelo.
 P es la suma de las cargas permanentes y sobrecargas,
 I es el coeficiente de importancia
 g gravedad

- c) Fundaciones y elementos de anclaje y apoyo de estructuras y equipos.
 d) Cualquier otra estructura o elementos en que la variación de la acción sísmica vertical afecte en forma significativa su dimensionamiento, como por ejemplo, las estructuras o elementos en voladizo.

Para esos casos la acción sísmica vertical se puede considerar en forma estática, aplicando un coeficiente sísmico de $2A_o/3g$. De este modo la fuerza sísmica vertical debe ser:

$$F_v = \pm \frac{2}{3} \frac{A_o I P}{g} \quad (2.3)$$

Las variables fueron descritas ya en la ecuación (2.2).

Alternativamente para todos los casos, se puede desarrollar un análisis dinámico vertical con el espectro de aceleraciones para acción sísmica horizontal pero utilizándolo con las siguientes consideraciones: $R=3$, $\xi=3\%$, (razones de amortiguamiento mayores que 0.03 se deben justificar especialmente) y la ordenada espectral no necesita ser mayor que $A_o I$.

$$S_a = \frac{2.75 A_o I}{R} \left(\frac{T'}{T} \right)^n \left(\frac{0.05}{\xi} \right)^{0.4} \quad (2.4)$$

$$S_{av} = \frac{2.75 A_o I}{3} \left(\frac{T'}{T} \right)^n \left(\frac{0.05}{0.03} \right)^{0.4} \leq A_o I \quad (2.5)$$

Dónde:

- S_a aceleración espectral de diseño para acción sísmica horizontal
 S_{av} aceleración espectral de diseño para acción sísmica vertical

- A_0 aceleración efectiva máxima del suelo
- I coeficiente de importancia
- R factor de modificación de la respuesta estructural
- T', n parámetro que depende del tipo de suelo
- ξ razón de amortiguamiento

En los casos citados la norma considera que las fuerzas verticales tienen especial importancia y han causado daños en terremotos. También indica que considerar las aceleraciones verticales de 2/3 de las horizontales está prescrito en normas utilizadas de referencia como la neozelandesa y la norteamericana UBC97, las cuales se basan en registros de sismos reales.

En el numeral 5.1.2 indica que para el diseño de los elementos estructurales resistentes al sismo, en general, no es necesario combinar los efectos debidos a las dos componentes horizontales de la acción sísmica. Se puede proceder como si dichos efectos no fueran concurrentes y, en consecuencia, los elementos se pueden diseñar para el sismo actuando según cada una de las direcciones de análisis considerada separadamente. Hacen excepción a esta regla simplificadora las estructuras que presentan notorias irregularidades torsionales o que tienen en ambas direcciones marcos rígido con columnas comunes a dos líneas resistentes que se intersectan. En tales casos, los elementos se deben diseñar para los esfuerzos obtenidos de considerar el 100% de la sollicitación sísmica que actúa en una dirección más los esfuerzos obtenidos en considerar el 30% de la sollicitación sísmica actuando en la dirección ortogonal a la anterior, y viceversa. Se deben considerar los mayores esfuerzos resultantes de las dos combinaciones anteriores.

En el numeral 4.5 de NCh 2369 se especifica las combinaciones de carga para el método de las tensiones admisibles y de las cargas últimas, en general la acción sísmica es igual a la suma de la acción horizontal más la vertical con iguales factores de carga, a excepción de la combinación siguiente:

$0.9\text{Carga permanente (CP)} + \text{Sobrecarga accidental de operación (SA)} \pm b \text{ Sismo horizontal} \pm 0.3\text{Sismo vertical}.$

Donde, b es igual a 1.1 para estructuras o equipos de acero y 1.4 para estructuras o equipos de hormigón, además especifica que el signo + ó – para el sismo vertical se debe aplicar de modo de conseguir el efecto de disminuir las cargas gravitacionales CP.

2.3 NSR-10

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, en lo referente a sismo vertical especifica lo siguiente:

En el numeral A.2.8 indica que cuando se utilice la componente vertical de los movimientos sísmicos de diseño, como mínimo debe tomarse las $2/3$ partes de los valores correspondientes a los efectos horizontales definidos en el espectro de diseño.

El numeral A.3.6.3 indica la dirección de aplicación de las fuerzas sísmicas, en zonas de amenaza sísmica intermedia o alta deben considerarse los efectos ortogonales, salvo que la estructura tenga diafragmas flexibles o se trate de edificios de un piso en los cuales no haya irregularidades en planta. Los efectos ortogonales pueden tenerse en cuenta suponiendo la concurrencia simultánea del 100% de las fuerzas sísmicas en una dirección y el 30% de las fuerzas sísmicas en la dirección perpendicular. Alternativamente los efectos ortogonales pueden calcularse como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los efectos producidos por el 100% de las fuerzas sísmicas actuando independientemente en las dos direcciones ortogonales, asignándole el signo que conduzca al resultado más conservador. La fuerza sísmica debe combinarse con las cargas gravitacionales de acuerdo con los requisitos del Título B del reglamento NSR-10.

Se observa que no existe una disposición clara que indique la forma de combinar la acción sísmica vertical con acción sísmica horizontal.

Zona de amenaza sísmica intermedia es el conjunto de lugares en donde el coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva para diseño (A_a) o el coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva para diseño (A_v), o ambos, son mayores a 0.10 y ninguno de los dos excede 0.20.

Zona de amenaza sísmica alta es el conjunto de lugares en donde A_a o A_v , o ambos, son mayores que 0.20.

El numeral A.3.6.13 indica que en las zonas de amenaza sísmica alta e intermedia, deben tenerse en cuenta los efectos de los movimientos sísmicos verticales en los siguientes elementos estructurales:

- En los voladizos, considerando una fuerza vertical, ascendente o descendente, en la punta del elemento con un valor igual al 30% de la carga muerta del voladizo en las zonas de amenaza sísmica alta, y del 15% en las zonas de amenaza sísmica intermedia.
- En los elementos construidos con concreto pre esforzado, deben utilizarse combinaciones de carga adicionales a todas aquellas que incluyan carga muerta, utilizando el 50% de la carga muerta

2.4 NORMA TÉCNICA E.030

La norma técnica E.030 con la versión de enero de 2016 es la norma de Diseño Sismo resistente para el Perú, en lo referente a sismo vertical especifica lo siguiente:

En el capítulo 4.1 Consideraciones Generales para el Análisis; especifica que para estructuras regulares, el análisis podrá hacerse considerando que el total de la fuerza sísmica actúa independientemente en dos direcciones ortogonales predominantes. Para estructuras irregulares deberá suponerse que la acción sísmica ocurre en la dirección que resulte más desfavorable para el diseño. Las sollicitaciones sísmicas verticales se considerarán en el diseño de los elementos verticales, en elementos horizontales de gran luz, en elementos post o pre

tensados y en los voladizos o salientes de un edificio. Se considera que la fuerza sísmica vertical actúa en los elementos simultáneamente con la fuerza sísmica horizontal y en el sentido más desfavorable para el análisis.

En el capítulo 4.5.6, se especifica que la fuerza sísmica vertical se considerará como una fracción del peso igual a $2/3$ ZUS.

En elementos horizontales de grandes luces, incluyendo volados, se requerirá un análisis dinámico con los espectros definidos en el numeral 4.6.2 de la siguiente forma:

$$S_a = \frac{Z*U*C*S}{R} g \quad (2.6)$$

$$S_{av} = \frac{2}{3} * \frac{Z*U*C*S}{R} g \quad (2.7)$$

Dónde:

S_a espectro de pseudo aceleraciones horizontales

S_{av} espectro de pseudo aceleraciones verticales

C factor de amplificación sísmica

g aceleración de la gravedad

R coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas

S factor de amplificación del suelo

U factor de uso o importancia

Z factor de zona

También en el capítulo 6, se especifica que para elementos no estructurales, apéndices y equipos, la fuerza sísmica vertical se considerará como $2/3$ de la fuerza horizontal. Para equipos soportados por elementos de grandes luces, incluyendo volados, se requerirá un análisis dinámico con los espectros definidos anteriormente.

Finalmente en el anexo 02 procedimiento sugerido para la determinación de las acciones sísmicas, define en la etapa 3 Análisis Estructural y como parte del paso 13A "Análisis Estático" especifica, considerar fuerzas sísmicas verticales de

acuerdo a 4.5.6 para los elementos en los que sea necesario. Así también para el paso 13B “Análisis Dinámico” específica, considerar fuerzas sísmicas verticales de acuerdo a 4.6.2 usando un espectro con valores iguales a 2/3 del espectro más crítico para las direcciones horizontales, para los elementos que sea necesario.

2.5 INPRES-CIRSOC 103

El INPRES-CIRSOC 103 con la versión de julio de 2013, es el Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes, en lo referente a sismo vertical especifica lo siguiente:

El numeral 3.3 especifica que la componente vertical de la acción sísmica se superpondrá a las acciones sísmicas horizontales:

$$E = E_H + E_v \quad (2.8)$$

Dónde:

- E efecto total de la acción sísmica.
- E_H efecto horizontal de la acción sísmica.
- E_v efecto vertical de la acción sísmica.

La interacción de esta acción sísmica con las acciones gravitatorias se encuentra definida en 3.7.1.

En el numeral 3.5.2 indica que las acciones sísmicas verticales E_v se obtendrán a partir de la pseudo aceleración elástica vertical de acuerdo a la expresión:

$$E_v = \frac{C_a}{2} \gamma_r D \quad (2.9)$$

Dónde:

- γ_r factor de riesgo (similar a coeficiente de importancia)
- C_a parámetro característico del espectro de diseño.
- D_i acción permanente, compuesta por el peso de todos los componentes estructurales o no, equipos e instalaciones fijados permanentemente a la construcción en el nivel i .

En el numeral 6, especifica que adicionalmente a las acciones sísmicas verticales establecidas en 3.5.2, se considerarán acciones sísmicas verticales en componentes sensibles a vibraciones verticales tales como:

- a) Voladizos, balcones y aleros,
- b) Vigas de hormigón pretensado con luces superiores a 10m y esbelteces geométricas (L/h) superiores a 20. Losas de hormigón pretensado con luz superior a 8m y esbeltez geométrica superior a 30. Estructuras que apean columnas o similares.
- c) Estructuras sensibles a acciones verticales, estructuras con salientes similares no incluidas en a) o en b) con período de vibración vertical comprendido entre 0.2 y 1.2 s.

Las fuerzas hacia abajo, se evaluarán según la expresión siguiente y no se superpondrán con E_v

$$F_v = C_a \gamma_r W_i \quad (2.10)$$

Además se diseñarán para resistir una fuerza vertical hacia arriba no inferior a:

$$F_{vup} = -C_a W_i \quad (2.11)$$

Dónde:

F_v fuerza sísmica vertical hacia abajo.

F_{vup} fuerza sísmica vertical hacia arriba.

W_i carga gravitatoria supuesta concentrada en la masa o nivel i.

2.6 ASCE/SEI 7-10

La American Society of Civil Engineer y el Structural Engineering Institute, emitieron el código ASCE/SEI 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, en lo referente a sismo vertical especifica lo siguiente:

En el capítulo 12.4 presenta el efecto de las cargas sísmicas y las combinaciones.

En el numeral 12.4.1 indica la aplicabilidad; todos los miembros de la estructura, incluyendo los que no sean parte del sistema resistente a la fuerza sísmica, será diseñado utilizando los efectos de las cargas sísmicas de la Sección 12.4 a menos que estén exentos por esta norma. Efectos de las cargas sísmicas son los esfuerzos axiales, cortantes y flexión en los miembros, resultantes de la aplicación de las fuerzas sísmicas horizontales y verticales como se establece en la sección 12.4.2.

El numeral 12.4.2 indica que los efectos de la carga sísmica E, deberá ser determinada de acuerdo con:

Para usar en las combinaciones de carga 5 (1.2D+1.0E+L+0.2S) en la sección 2.3.2 o las combinaciones de carga 5 (D+(0.6W or 0.7E)) y 6 (D+0.75L+0.75(0.7E)+0.75S) en la sección 2.4.1, E será determinado con:

$$E = E_h + E_v \quad (2.12)$$

Para usar en la combinacion de carga 7 (0.9D+1.0E) en la sección 2.3.2 o la combinacion 8 (0.6D+0.7E) en la sección 2.4.1, E será determinado con:

$$E = E_h - E_v \quad (2.13)$$

Dónde:

E efectos del sismo.

E_h efecto de la fuerza sísmica horizontal, definida en la sección 12.4.2.1.

E_v efecto de la fuerza sísmica vertical, definida en la sección 12.4.2.2.

El numeral 12.4.2.1 define:

$$E_h = \rho Q_E \quad (2.14)$$

Adicionalmente se tiene:

$$V = C_s W \quad (2.15)$$

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\frac{R}{I_e}} \quad (2.16)$$

Dónde:

- Q_E efectos de las fuerzas sísmicas horizontales de V o de F_p . Cuando sea requerido por la Sección 12.5.3 o 12.5.4, tales efectos serán consecuencia de la aplicación de fuerzas horizontales simultáneamente en dos direcciones en ángulos rectos entre sí.
- ρ factor de redundancia definido en la sección 12.3.4
- V cortante basal
- C_s coeficiente de respuesta sísmica
- W peso sísmico efectivo de acuerdo a la sección 12.8.1.1
- S_{DS} parámetro del espectro de diseño de respuesta de aceleración para periodos cortos obtenido de la sección 11.4.4
- R factor de modificación de la respuesta en la tabla 12.2-1
- I_e factor de importancia determinado de acuerdo a la sección 11.5.1

El numeral 12.4.2.2 define:

$$E_v = 0.2S_{DS}D \quad (2.17)$$

Dónde:

S_{DS} parámetro del espectro de diseño de respuesta de aceleración para periodos cortos obtenido de la sección 11.4.4

D efecto de la carga muerta

Excepción, la fuerza sísmica vertical se permite considerar igual a cero, cuando S_{DS} es igual o menor que 0.125 y en la ecuación (2.13) cuando se determine la demanda en la interface suelo estructura de las cimentaciones.

2.7 NEC 15.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 15 en lo referente a sismo vertical especifica lo siguiente:

El capítulo 3.4 se indican las disposiciones para la componente vertical del sismo de diseño, las mismas que tienen aplicabilidad para los elementos que exceden los límites de las plantas de los pisos, es decir los volados.

De manera general, la componente vertical del sismo puede definirse mediante el escalamiento de la componente horizontal de la aceleración por un factor mínimo de 2/3.

$$E_v \geq \frac{2}{3} E_h \quad (2.18)$$

Dónde:

E_v componente vertical del sismo

E_h componente horizontal del sismo

Para estructuras esenciales o especiales que se encuentren en el campo cercano (0–10 km) de una falla superficial, no se podrá utilizar la formula anterior (2.18). En este caso, se deberá evaluar la componente vertical del sismo mediante el estudio de respuesta de sitio.

Cuando existe la presencia de elementos que exceden los límites de las plantas de los pisos, como son los voladizos horizontales, los efectos de la componente vertical de los sismos debe considerarse, estos se diseñarán para una fuerza neta vertical reversible F_{rev} expresada por:

$$F_{rev} \geq \frac{2}{3} I(\eta Z F_a) W_p \quad (2.19)$$

La expresión toma en cuenta que, al menos en el campo no cercano, la acción máxima de la componente vertical se puede estimar como los dos tercios de la

acción máxima horizontal y que la rigidez de los voladizos horizontales requeriría utilizar un espectro de diseño plano establecido por el valor de $\eta Z F_a$.

Dónde:

W_p peso que actúa en el voladizo.

I coeficiente de importancia definido en el capítulo 4.1 de la NEC 15.

η razón entre la aceleración espectral S_a ($T = 0.1$ s) y el PGA para el período de retorno seleccionado.

Z aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad g .

F_a coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período cortó. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de aceleraciones para diseño en roca, considerando los efectos de sitio.

Finalmente se combinarán las cargas sísmicas horizontales y verticales cuando existen volados o en el caso de edificaciones esenciales o de ocupación especial ubicadas en el campo cercano a una falla geológica.

Los efectos E del sismo serán representados por la combinación de los 3 componentes de la fuerza sísmica de la siguiente manera: E

$$E = E_h + E_v \quad (2.20)$$

$$E_h = \mp \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (2.21)$$

Dónde:

E efectos del sismo.

E_h componente horizontal de la fuerza sísmica.

E_x componente horizontal de la fuerza sísmica según el axis x .

E_y componente horizontal de la fuerza sísmica de dirección perpendicular a E_x .

E_v Componente vertical de la fuerza sísmica.

Las combinaciones básicas para el diseño por última resistencia se las puede encontrar en 3.4.3 de la NEC-SE-CG.

2.8 RESUMEN

En la tabla 2.1 se presenta un resumen comparativo de las especificaciones referentes a la componente sísmica vertical, normadas en algunos de los códigos de diseño sismo resistente de la región.

Para ese propósito, es conveniente intentar homologar las variables utilizadas en los diferentes códigos, por lo que se utiliza la siguiente simbología general, la cual es reemplazada en las ecuaciones anteriormente presentadas en este capítulo:

F_V	fuerza sísmica vertical
F_H	fuerza sísmica horizontal
WT	peso total, incluye carga muerta (CM) y carga viva (CV)
A_o	aceleración efectiva máxima del suelo
C_V	coeficiente sísmico vertical
C_H	coeficiente sísmico horizontal
$A_V(T_V)$	aceleraciones del espectro de diseño de la componente vertical
$A_H(T_H)$	aceleraciones del espectro de diseño de la componente horizontal
I	coeficiente de importancia
R	factor de reducción de fuerzas sísmicas
ξ	factor de amortiguamiento
CM	carga muerta
SDS	parámetro del espectro de diseño de respuesta de aceleración para periodos cortos

Se observa que en los códigos presentados no existe un criterio general para considerar los efectos de la componente vertical, la mayoría consideran estos efectos solo en elementos específicos que tengan una significativa flexibilidad bajo cargas verticales tal como voladizos, losas planas, vigas de gran luz, columnas con grandes esfuerzos axiales y unos pocos la especifican como un caso de carga general a ser considerado en las estructuras.

El efecto de la componente vertical se determina utilizando un coeficiente sísmico vertical o un espectro de diseño vertical, en los dos casos se obtiene a partir de escalar la componente sísmica horizontal por la relación conocida como V/H, también representan el efecto de la carga sísmica como un porcentaje del peso

gravitacional total; se puede notar que ningún código tiene desarrollado un espectro de diseño vertical consistente con el peligro sísmico del sitio.

La relación V/H utilizada es diversa entre los códigos analizados, por ejemplo Argentina considera $V/H = 1/5$, mientras que Perú considera $V/H = 2/3$, en cambio sí es generalizado el considerar una relación V/H homogénea en todo el rango de periodos para escalar el espectro de diseño horizontal; respecto a esto último se sabe que la relación V/H es altamente dependiente del periodo y que en el rango de periodos cortos inclusive la relación V/H puede superar la unidad, mientras que en el rango de periodos largos la relación V/H disminuye notablemente, respecto a este comentario (Estevea) menciona lo siguiente; utilizar una relación V/H constante puede sobreestimar los efectos de la componente vertical, que no necesariamente significa un grado de seguridad estructural más alto, sobre todo si se piensa en un posible cambio de mecanismo de colapso en caso de diseñar vigas más fuertes sin revisar su interacción con las columnas.

La mayoría de códigos especifica la forma de combinar la acción sísmica horizontal con la vertical, algunos tienen mayor detalle como el ASCE/SEI 7-10 y el NCh2369 de 2003 que especifican la forma de incluir los efectos del sismo vertical en las combinaciones de carga básicas.

Finalmente y con agrado observamos que el NEC-15 es el único código que acertadamente dispone para estructuras esenciales o especiales cercanas a una falla geológica realizar estudio de respuesta de sitio, debido a que en el campo cercano la componente vertical del sismo tiene mayores magnitudes que en campo no cercano, esto queda evidenciado en el capítulo 6 de esta tesis en el que se presentan las relaciones V/H en función de R_{rup} .

En el caso de que requiera conocer mayores detalles de los presentados en el resumen de este capítulo, consulte la referencia de cada código.

TABLA 2.1 RESUMEN DE LAS ESPECIFICACIONES PARA LA COMPONENTE SÍSMICA VERTICAL.

NORMA	NCh433 de 1996 modificada a 2009	NCh2369 de 2003	NSR-10	Norma técnica E.030 de 2016	IMPRES-CIRSOC 103 de 2013	ASCE/SEI 7-10	NEC-15
PAÍS	Chile	Chile	Colombia	Perú	Argentina	EEUU	Ecuador
MÉTODO ESTÁTICO	1. $F_v = 0.3 W_T$ 2. $F_v = \pm 0.67 C_H W_T$	1. $F_v = \pm C_H I W_T$ 2. $F_v = \pm 2/3 (C_H I W_T)$ 3. $F_v = \pm 0.5 C_M$	1. $F_v = \pm 0.3 C_M$ 2. $F_v = \pm 0.15 C_M$ 3. $F_v = \pm 0.5 C_M$	1. $F_v = \pm 2/3 (C_H I W_T)$	1. $F_v = -0.2 (C_H I W_T)$ 2. $F_v = +0.2 (C_H W_T)$	1. $F_v = \pm 0.2 (C_H C_M)$	1. $F_v = \pm 2/3 (C_H I W_T)$
MÉTODO DINÁMICO	No especifica	$A_v(T_v) = A_H(T_H)$ Considerar * $R=3$ * $\xi=3\%$	4. $A_v(T_v) = 2/3 (A_H(T_H))$	2. $A_v(T_v) = 2/3 (A_H(T_H))$	3. $A_v(T_v) = 1/5 (A_H(T_H))$	2. $A_v(T_v) = 1/5 (A_H(T_H))$	2. $A_v(T_v) = 2/3 (A_H(T_H))$
APLICABILIDAD NORMADA	1. Marquesinas, balcones, aleros y otros elementos vulnerables a la acción vertical del sismo 2. Elementos secundarios.	1. Barras de suspensión de equipos colgantes, elementos de hormigón precomprimido. 2. Fundaciones, anclajes, voladizos 3. Caso general	1. En los voladizos en la zona de amenaza sísmica alta. 2. En los voladizos en la zona de amenaza sísmica intermedia. 3. Elementos de hormigón precomprimido. 4. Caso general	1. Elementos verticales, horizontales de gran luz, percomprimidos, volados. 2. Elementos horizontales de grandes luces, volados.	1. y 2. Voladizos, balcones. Aleros, elementos de hormigón precomprimido, estructuras que apean columnas, estructuras con salientes con periodo de vibración vertical comprendido entre 0.2 y 1.2s 3. Caso general	1. y 2. Todos los elementos de la estructura, incluyendo los que no sean parte del sistema resistente a fuerza sísmica.	1. y 2. Voladizos
COMBINACIÓN SISMO F_v con SISMO F_H	No especifica	$F = F_H \pm F_v$	No especifica	$F = F_H \pm F_v$	$F = F_H \pm F_v$	$F = F_H \pm F_v$	$F = F_H \pm F_v$
CONSIDERACIÓN CAMPO CERCANO	No especifica	No especifica	No especifica	No especifica	No especifica	No especifica	Estructuras especiales o esenciales a (0-10KM) de una falla superficial no aplica 1. y 2.
COMENTARIO	1. No especifica que F_v debe ser tratada como una fuerza reversible. No toma en cuenta el campo cercano	Para ciertas combinaciones el signo \pm de F_v debe causar el efecto de incrementar las cargas permanentes y para otras debe conseguir el efecto de disminuirlas	Especifica que la carga por fuerza sísmica vertical se aplique en la punta del volado.	No especifica claramente el peso sísmico que se debe considerar para calcular F_v	1. Hacia abajo, 2. Hacia arriba. Para el espectro horizontal, considera factores N_a , N_v en función de cercanía a fallas geológicas.	Se permite considerar $F_v = 0$, cuando $SDS \leq 0.125$	En la norma se debe especificar mejor la aplicabilidad, considerando otros tipos de estructuras sensibles a F_v y los criterios de combinación

ELABORACIÓN: Eduardo López

CAPÍTULO 3

MODELO VERTICAL DE BOZORGNIA & CAMPBELL (2013)

3.1 INTRODUCCIÓN ECUACIONES DE ATENUACION

La atenuación sísmica se refiere a la disminución de las ondas sísmicas debido a su transmisión a través del interior y por la superficie de la tierra. Los modelos de atenuación o también llamados ecuaciones de predicción del movimiento del suelo GMPE o modelos de movimiento fuerte del suelo relacionan las características de un escenario seleccionado (magnitud, distancia, tipo de suelo) con los parámetros del movimiento del terreno (PGA, PGV, PGD, etc)

El proceso de generación de una ecuación de atenuación es:

1. Selección de una forma funcional (Ecuación que describa la dependencia entre la magnitud y la distancia en un movimiento)
2. Selección de una base de datos (registros de aceleración)
3. Regresión (Proceso matemático utilizado para determinar los coeficientes de una ecuación para representar la tendencia de los datos).
4. Validar la ecuación a partir de la comparación entre el modelo planteado y las mediciones conocidas. (Singaucho 2014)

Dos grupos importantes se encuentran trabajando para establecer GMPE de utilización a nivel mundial.

1. Global Earthquake Model

<http://www.globalquakemodel.org/>

2. Next Generation Attenuation Relationships - PEER

<http://peer.berkeley.edu/ngawest/index.html> (Singaucho 2014)

A continuación se hace una breve descripción de los parámetros utilizados como inputs en las GMPE, este resumen corresponde a un extracto realizado al estudio de (Quizanga 2015):

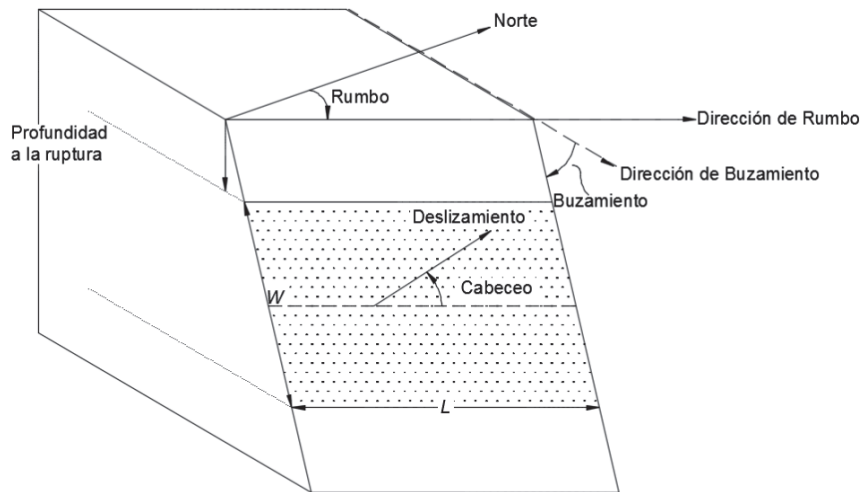
- Magnitud momento (M_w): es la cantidad de energía liberada por un sismo a partir del momento sísmico M_0 , el cual se define así: $M_0 = \mu DA$; M_0 se mide dinas/cm, μ es el módulo de deformación de la roca en dinas/cm², D es el desplazamiento promedio de la falla en cm y A es el área del segmento que sufrió la ruptura expresada en cm².

La magnitud de momento M_w fue desarrollada por Hanks y Kanamori (1979) de la siguiente manera

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \quad (3.1)$$

- Width (W): representa el ancho de la falla, se mide en km
- Length (L): representa la longitud del plano de falla, se mide en km
- Strike (ϕ) : indica la orientación con respecto al Norte, su rango es de 0 a 360 °.
- Dip (δ) : indica la orientación con respecto a la horizontal, su rango es de 0 a 90 °.
- Rake (λ) , : indica el ángulo de desplazamiento de un segmento con respecto a otro, su rango es de -180 a 180 °. El NGA define al rake como el ángulo medido en el plano de falla en sentido anti horario desde la dirección referencia del rumbo hasta la dirección media de deslizamiento.

FIGURA 3.1 ÁNGULOS QUE DEFINEN EL TIPO DE FALLA

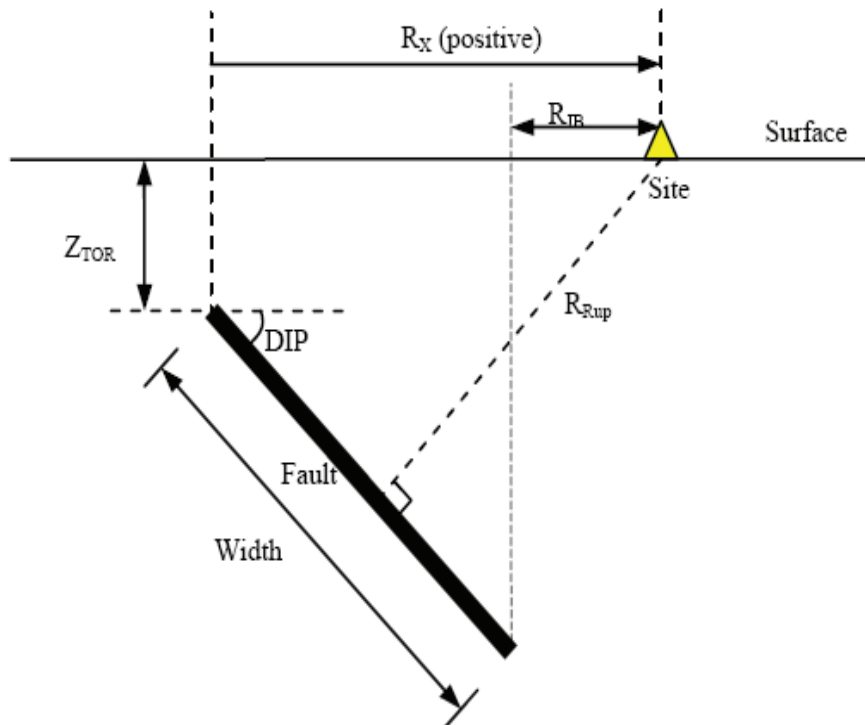


FUENTE: NGA WEST2

- Depth to top of coesismic ruptures (Z_{TOR}): es la distancia más cercana entre la superficie donde se encuentra el sitio de análisis y la parte superior del plano de falla, se mide en km.
- Sediment depth ($Z_{1.0}$): es la profundidad en la cual la onda de corte tienen una velocidad de 1km/s, se mide en m.
- Depth to 2.5 km/s ($Z_{2.5}$): es la profundidad a la que la onda de corte tiene una velocidad horizontal de 2.5 m/s, se mide en m.
- Rupture Distance (R_{RUP}): es la distancia más cercana entre el sitio y el plano de ruptura, se mide esta distancia en km. Para una explicación detallada de los parámetros de distancia al sitio referirse a Methodology for Developing Design Response Spectrum for Use in Seismic Design Recommendations, Division of Engineering Services Geotechnical Services, 2012

- Joyner-Boore distance (R_{JB}): es la distancia más cercana entre la proyección horizontal de la superficie de falla y el sitio, en las GMPE's se mide esta distancia en km. El radio R_{JB} cuando el sitio se encuentra sobre la proyección del plano de falla esta distancia se toma con un valor de 0.
- Horizontal distance (R_X): es la distancia horizontal medida desde la proyección de la parte superior del plano de falla hasta el sitio, es medido en km.
- Hypocentral distance (R_{HYPO}): es la distancia entre el hipocentro y el sitio es medido en km.

FIGURA 3.2 DISTANCIAS USADAS EN ECUACIONES DE ATENUACIÓN



FUENTE: Kanklamanos 2011

- Shear wave velocity (V_{S30}): el parámetro V_{S30} indica la velocidad de onda
- Aleatory variability (σ): indica el grado de dispersión que pueden tener los resultados, generalmente en las GMPE la variable aleatoria “sigma” en la amplitud del movimiento fuerte depende de la magnitud del evento y el grado de la respuesta no lineal del suelo.

3.2 INTRODUCCIÓN

Este capítulo resume el desarrollo de Bozorgnia y Campbell (BC13) para la predicción de las ecuaciones de movimiento (GMPE) para la componente vertical. Esta actualización reemplaza a las ecuaciones desarrolladas por Campbell y Bozorgnia [2003] auspiciado por el programa NGA.

Los autores utilizaron la base de datos del PEER NGA-West 2 registrados para sismos en la corteza superficial en placas tectónicas activas y así determinar las Ecuaciones GMPE de la componente Vertical, considerando:

- Máxima Aceleración del suelo de la componente vertical (PGA) para periodos entre 0.1 a 3 seg
- Máxima Velocidad del Suelo de la Componente Vertical (PGV) para periodos entre 0.1 a 3 seg
- Pseudo-Espectro de Respuesta de Aceleración, con amortiguamiento del 5% para la componente vertical para periodos entre 0.1 a 3 seg.

Al igual que el modelo horizontal desarrollado por [Campbell y Bozorgnia 2013; 2014] incluyeron términos y variables de predicción que modelan:

- Magnitud del Sismo
- Atenuación Geométrica que depende de la Magnitud.
- Tipo de falla que depende de la Magnitud
- Ruptura instantánea que depende de la Magnitud.
- Profundidad del hipocentro que depende de la Magnitud
- Hanging wall (HW)
- Respuesta lineal superficial que depende de la región.
- Respuesta de la cuenca superficial que depende de la región
- Atenuación inelástica que depende de la región, y
- Desviación estándar de componente que dependen de la magnitud y se encuentran dentro o cercano al evento sísmico.

En este modelo, los autores no incluyen la respuesta no lineal de la componente vertical o de la respuesta perimetral de la componente vertical, debido a que luego de las simulaciones los resultados para estos efectos no muestran un grado de confiabilidad adecuados ni evidencia empírica para validar estos efectos y poder incluir en las ecuaciones GMPE-Vertical.

De la misma forma el modelo presentado BC13 considera válido para la estimación de movimiento del suelo de la componente vertical en placas tectónicas activas continentales superficiales con magnitudes entre 3.3 a 8.5, que dependa del tipo de falla y distancias máximas de 300 Km del hipocentro.

Los estudios desarrollados por los autores también establecieron que la relación espectral V/H está en función del periodo y la distancia al hipocentro. En el cual se identifica que para periodos cortos, la relación V/H es mayor que para periodos largos y es generalmente más notorio el incremento de la relación V/H en suelos que en rocas.

El modelo desarrollado por Bozorgnia y Campbell [2004] también desarrollo un método simplificado de la componente vertical y un espectro V/H. sus recomendaciones fueron adoptadas por primera vez en los Estados Unidos como parte de las recomendaciones de diseño Sismico del NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program).

3.3 DESCRIPCION DE LA BASE DE DATOS

El desarrollo de la GMPE de Borzognia y Campbell utilizó la base de datos del programa NGA WEST2.

La base de datos NGA-West 2 contempla más de 21000 registros de sismos de todo el mundo con magnitudes de entre 3.0 a 7.9 minuciosamente descrito por Ancheta et al [2013; 2014]

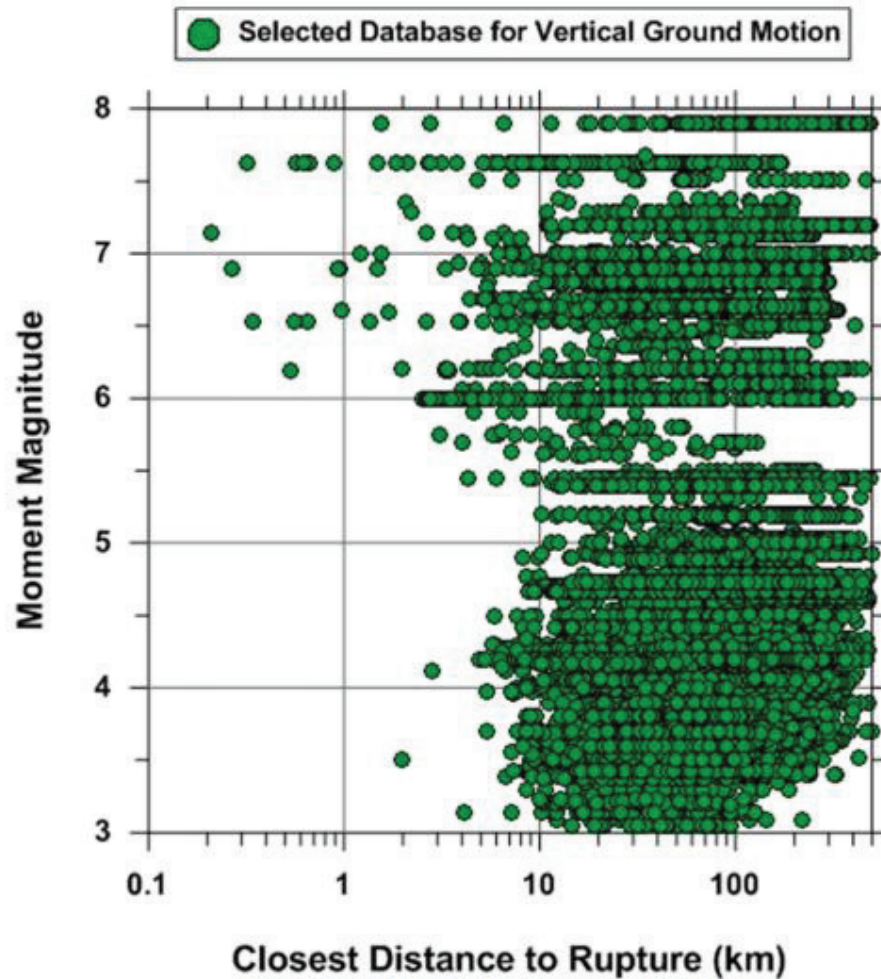
En el modelo Bozorgnia y Campbell (BC13) menciona que se eliminó los registros de sismos o de estaciones sísmicas para conseguir un criterio de selección general aquellos que caen dentro de las siguientes características:

- Registros que solo tenían una componente horizontal o una vertical, la cual excluye el cálculo de la componente horizontal Rot_{D50}
- Registros que no tenían el dato de V_{s30}

- Registros que no tenían el mecanismo Rake o Focal
- Registros con hipocentros mayores a 20 km en placas oceánicas o en regiones continentales estables (SCR)
- Registros del año 1999 pertenecientes al observatorio geológico Lamont Doherty
- Registros con una pobre calidad (Instrumentos designados con calidad "D").
- Réplicas con C_{Rjb} menores a 10 km
- Para aislar el efecto de la atenuación geométrica se excluyeron registros con R_{RUP} menores a 80 km. Sin embargo para modelar atenuación aparente anelástico, se usó una base de datos separada con distancias tan lejanas como 500 km
- Registros que no cumplían el siguiente criterio: $M < 5.5$ y $N < 5$ o $5.5 < M < 6.5$ y $N < 3$, siendo M la magnitud y N el número de registros con $R_{RUP} \leq 80$ km
- Registros de estaciones sísmicas no representativas.
- Registros de la estación Pacoima Dam y Tarzana Cedar Hill debido a que muestran efectos topográficos fuertes.

Después de aplicar los criterios de selección descritos anteriormente, consideraron para un total de 15161 registros obtenidos de 322 eventos sísmicos para el desarrollo de su modelo vertical. En el modelo horizontal se utilizaron los mismos criterios de selección y se obtuvo 15.521 registros obtenidos de 322 eventos diferentes, por lo que se puede considerar que la base de datos esencialmente es la misma.

FIGURA 3.3 MAGNITUD VS R_{RUP} (KM) (CB13)



FUENTE: Borzognia y Campbell 2013

3.4 DESCRIPCION DEL MODELO

Las funciones de forma usadas en el modelo BC13, NGA-West 2 vertical es similar al modelo horizontal presentado por Campbell y Borzognia [2013], los términos usados para la función de forma de la componente vertical fueron verificados mediante un análisis de residuos, aun cuando algunas funciones de forma no fueron utilizadas, los autores mantuvieron estas funciones para ser consistentes con las ecuaciones GMPE-Horizontal. Los valores no utilizados fueron eliminados al igualarles a cero.

3.4.1 ENFOQUE DEL ANALISIS DE REGRESION

Similar a la componente horizontal, los autores para el análisis de regresión usaron la base de datos que tenía una profundidad $R_{RUP} \leq 80 \text{Km}$, un sub grupo de periodos espectrales y utilizando el procedimiento de regresión lineal de dos etapas indicado por Joyner y Boore de 1993, con la única excepción de que en el procedimiento utilizó un análisis no lineal en lugar de una regresión linealizada. En la etapa 1 todos los términos matemáticos fueron ajustados por el método de mínimos cuadrados no lineales, los registros fueron restringidos a fin de tener una media residual de cero incluyendo un término “fuente” para cada sismo, los términos obtenidos en esta etapa son:

- Término de atenuación geométrica
- Término de efectos de hanging wall
- Término de respuesta de sitio
- Término de cuenca sedimentaria

En la etapa 2 todos los términos matemáticos que envuelven la fuente sismogénica fueron ajustados por el método de mínimos cuadrados ponderados, usando los términos de fuente de la etapa 1, los términos obtenidos en esta etapa son:

- Término de magnitud
- Término de mecanismo de falla
- Término de profundidad hipocentral
- Término de buzamiento (Quizanga 2015)

Una vez que la función de forma de todos los términos matemáticos fueron establecidos, se realizó un análisis de regresión lineal para grupos con periodos largos usando efectos de regresión aleatoria [Abrahamson y Youngs, 1992]. Una vez que las ecuaciones GMPE fueron desarrolladas utilizaron efectos de regresión aleatoria en conjunto con la base de datos “lejana” para desarrollar un término de atenuación inelástico que dependa de la región. Finalmente, los autores modificaron una cantidad limitada de coeficientes para suavizar espectros de respuesta desiguales.

3.4.2 MEDIDA DE MOVIMIENTOS DE INTENSIDAD FUERTE

La medida de movimientos de intensidad fuerte implica el estudio de componentes verticales de PGA, PGV y PSA en 17 osciladores con periodos que variaron entre 0.01 a 3 seg. Los periodos espectrales específicos son 0.01, 0.02, 0.03, .05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2 y 3 seg. Como los autores indicaron anteriormente, revisaron los resultados para periodos más largos a los estudiados. Sin embargo el consenso del grupo NGA-West 2 fue que el comportamiento de movimiento vertical del suelo requiere ser investigado a mayor detalle. Adicionalmente, al igual que en el movimiento horizontal, el consenso del grupo fue excluir desplazamientos excesivos de suelo (PGD).

El espectro vertical y sus ecuaciones GMPE-Vertical consideran un amortiguamiento del 5%. Escalando los valores espectrales de la componente vertical para amortiguamientos que varían entre 5% y 30% pueden ser obtenidos del valor espectral con un amortiguamiento del 5% usando factores de amortiguamiento espectral desarrollado por Rezaein et al. [2012].

3.4.3 MODELO DE MOVIMIENTO DEL SUELO

La evaluación del movimiento de suelo vertical reveló que se podía adoptar la función de forma desarrollada para el modelo de movimiento horizontal del NGA-West 2, a excepción de algunos coeficientes no requeridos o no importantes que se igualaron a cero con el objetivo de eliminarlos de la ecuación.

De esta manera la ecuación de Campbell y Borzognia de 2013, para encontrar el logaritmo natural del PGA (g) y del PSA (g) viene dado por la ecuación:

$$\ln Y = \begin{cases} \ln PGA & Y < PGA, T < 0.25 \\ f_{mag} + f_{dis} + f_{ft} + f_{hng} + f_{site} + f_{set} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atm}; & \text{OTRO CASO} \end{cases} \quad (3.2)$$

Dónde:

M = Magnitud de Momento.

R_{RUP} = Distancia más cercana al plano de ruptura (km).

R_{JB} = Distancia Joyner Boore (km).

R_x = Distancia horizontal (km).

λ = Ángulo de cabeceo (rake °).

F_{RV} = Factor de mecanismo de falla inversa e inversa oblicua.
(Usar 1 Si $30 \leq \lambda \leq 150$, y 0 en otros casos)

F_{NM} = Factor de mecanismo de falla normal y normal oblicua.
(Usar 1 Si $-150 \leq \lambda \leq -30$, y 0 en otros casos)

Z_{tor} = Distancia al tope superior del plano de falla (km)

δ = Ángulo de Buzamiento (°)

V_{s30} = Velocidad media de onda de corte en los 30 metros superiores del suelo
(m/s)

A_{1100} = Es el valor medio previsto del PGA en roca (g), cuyo valor del V_{s30} es de 1100 (m/s)

S_j = Es una variable que representa los efectos regionales de sitio, es igual a 1 para sitios localizados en Japón y 0 para otros casos

Z_{HYP} = Profundidad al hipocentro (km)

Cada término de la GMPE en el modelo de Borzognia y Campbell es como sigue:

3.4.4 TÉRMINO DE MAGNITUD

$$f_{mag} = \begin{cases} c_0 + c_1M; & M \leq 4.5 \\ c_0 + c_1M + c_2(M - 4.5); & 4.5 < M \leq 5.5 \\ c_0 + c_1M + c_2(M - 4.5) + c_3(M - 5.5); & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_0 + c_1M + c_2(M - 4.5) + c_3(M - 5.5) + c_4(M - 6.5); & M > 6.5 \end{cases} \quad (3.3)$$

3.4.5 TÉRMINO DE ATENUACIÓN GEOMÉTRICA

$$f_{dis} = (c_5 + c_6M) \ln \left(\sqrt{R_{RUP}^2 + c_7^2} \right) \quad (3.4)$$

3.4.6 TÉRMINO DE MECANISMO DE FALLA

$$f_{flt} = f_{flt,F} f_{flt,M}$$

(3.5)

$$f_{flt,F} = c_8 F_{RV} + c_9 F_{NM}$$

$$f_{flt,M} = \begin{cases} 0; & M \leq 4.5 \\ M - 4.5; & 4.5 < M \leq 5.5 \\ 1; & M > 5.5 \end{cases}$$

3.4.7 TÉRMINO DE HANGING WALL

$$f_{hng} = c_{10} f_{hng,Rx} f_{hng,RUP} f_{hng,M} f_{hng,Z} f_{hng,\delta}$$

(3.6)

$$f_{hng,Rx} = \begin{cases} 0; & R_x < 0 \\ f_1(R_x); & 0 < R_x \leq R_1 \\ \max[f_2(R_x), 0]; & R_x > R_1 \end{cases}$$

$$f_1(R_x) = h_1 + h_2 \left(\frac{R_x}{R_1} \right) + h_3 \left(\frac{R_x}{R_1} \right)^2$$

$$f_2(R_x) = h_4 + h_5 \left(\frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1} \right) + h_6 \left(\frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1} \right)^2$$

$$R_1 = W \cos(\delta)$$

$$R_2 = 62M - 350$$

$$f_{hng,RUP} = \begin{cases} 1; & R_{RUP} = 0 \\ (R_{RUP} - R_{JB})/R_{RUP}; & R_{RUP} > 0 \end{cases}$$

$$f_{hng,M} = \begin{cases} 0; & M \leq 5.5 \\ (M - 5.5)[1 + a_2(M - 6.5)]; & 5.5 < M \leq 6.5 \\ 1 + a_2(M - 6.5); & M > 6.5 \end{cases}$$

$$f_{hng,Z} = \begin{cases} 1 - 0.06 Z_{TOR}; & Z_{TOR} \leq 16.66 \\ 0; & Z_{TOR} > 16.66 \end{cases}$$

$$f_{hng,\delta} = (90 - \delta)/45$$

3.4.8 TÉRMINO DE RESPUESTA SUPERFICIAL DE SITIO

$$f_{SITE} = f_{SITE,G} + S_J f_{SITE,J}$$

(3.7)

$$f_{SITE,G} = \begin{cases} C_{11} \ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right) + k_2 \left\{ \ln \left[A_{1100} + c \left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right)^n \right] - \ln[A_{1100} + c] \right\}; & V_{s30} \leq k_1 \\ (C_{11} + k_2 n) \ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right); & V_{s30} > k_1 \end{cases}$$

$$f_{SITE,J} = \begin{cases} (C_{12} + k_2 n) \left[\ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right) - \ln\left(\frac{200}{k_1}\right) \right]; & V_{s30} \leq 200 \\ (C_{13} + k_2 n) \ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right); & \text{All } V_{s30} \end{cases}$$

3.4.9 TÉRMINO DE CUENCA SEDIMENTARIA

$$f_{sed} = \begin{cases} (c_{14} + c_{15} S_J)(Z_{2.5} - 1); & Z_{2.5} \leq 1 \\ 0; & 1 < Z_{2.5} \leq 3 \\ c_{16} k_3 e^{-0.75} [1 - \exp(-.25(Z_{2.5} - 3))]; & Z_{2.5} > 3 \end{cases}$$

(3.8)

3.4.10 TÉRMINO DE PROFUNDIDAD HIPOCENTRAL

$$f_{hyp} = f_{hyp,H} + f_{hyp,M}$$

(3.9)

$$f_{hyp,H} = \begin{cases} 0; & Z_{HYP} \leq 7 \\ Z_{HYP} - 7; & 7 < Z_{HYP} \leq 20 \\ 13; & Z_{HYP} > 20 \end{cases}$$

$$f_{hyp,M} = \begin{cases} c_{17}; & M \leq 5.5 \\ [c_{17} + (c_{18} - c_{17})(M - 5.5)]; & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_{18}; & M > 6.5 \end{cases}$$

3.4.11 TÉRMINO DE BUZAMIENTO

$$f_{dip} = \begin{cases} c_{19}\delta; & M \leq 4.5 \\ c_{19}(5.5 - M)\delta; & 4.5 < M \leq 5.5 \\ 0; & M > 5.5 \end{cases} \quad (3.10)$$

3.4.12 TÉRMINO DE ATENUACIÓN INELASTICA

$$f_{atn} = \begin{cases} (c_{20} + \Delta c_{20})(R_{RUP} - 80); & R_{RUP} > 80 \\ 0; & R_{RUP} \leq 80 \end{cases} \quad (3.11)$$

3.5 INCERTIDUMBRE

Mediante un análisis de regresión aleatoria de efectos, los autores usaron para derivar el valor de la mediana de Y, esta está definida por la siguiente ecuación:

$$y_{ij} = Y_{ij} + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (3.12)$$

Dónde:

j Es el registro

i Es el evento

y_{ij} Es el valor observado o dato de un registro i en un evento j

Y_{ij} Es el valor calculado mediante la ecuación de atenuación de un registro i en un evento j

η_i Es el residual entre eventos (inter-evento), en otras palabras es la variabilidad de datos entre un evento y el siguiente

ε_{ij} Es la variabilidad de datos dentro de un evento (intra-evento)

La desviación estándar en roca ($V_{S30}=1100$ m/s) determinada a partir de la condición de que los residuales η_i y ε_{ij} tengan una media de cero es una función de la magnitud. Según se muestra en las siguientes ecuaciones que están en función de la magnitud.

Desviación estándar para intra-evento:

$$\tau_{lny} = \begin{cases} \tau_1; & M \leq 4.5 \\ \tau_2 + (\tau_1 - \tau_2)(5.5 - M); & 4.5 < M < 5.5 \\ \tau_2; & M \geq 5.5 \end{cases} \quad (3.13)$$

Desviación estándar para inter-evento:

$$\phi_{lny} = \begin{cases} \phi_1; & M \leq 4.5 \\ \phi_2 + (\phi_1 - \phi_2)(5.5 - M); & 4.5 < M < 5.5 \\ \phi_2; & M \geq 5.5 \end{cases} \quad (3.14)$$

La relación entre f_{site} y $\ln A_{1100}$ se calcula con la siguiente función lineal:

$$\alpha = \frac{\partial site}{\partial \ln 1100} = \begin{cases} k_2 A_{1100} \left\{ \left[A_{1100} + c \left(\frac{V_{S30}}{k_1} \right)^n \right]^{-1} - [A_{1100} + c]^{-1} \right\}; & V_{S30} < k_1 \\ 0; & V_{S30} > k_1 \end{cases} \quad (3.15)$$

La respuesta no lineal del suelo se considera con la siguiente ecuación, para el caso del modelo horizontal, para el caso del modelo vertical $\alpha=0$, debido a que no se considera efectos de no linealidad del suelo para la componente vertical, y como se mencionó anteriormente los autores decidieron mantener las misma forma

funcional y modificar los coeficientes y eliminar igualando a 0 términos no considerados o no influyentes.

$$\tau = \sqrt{\tau_{\ln YB}^2 + \alpha^2 \tau_{\ln PGA_B}^2 + 2\alpha \rho_{\ln PGA, \ln Y} \tau_{\ln YB} \tau_{\ln PGA_B}} \quad (3.16)$$

$$\phi = \sqrt{\phi_{\ln YB}^2 + \phi_{\ln AF}^2 + \alpha^2 \phi_{\ln PGA}^2 + 2\alpha \rho_{\ln PGA, \ln Y} \phi_{\ln YB} \phi_{\ln PGA_B}} \quad (3.17)$$

Donde $\tau_{\ln YB} = \tau_{\ln Y}$ y $\tau_{\ln PGA_B} = \tau_{\ln PGA}$ son las desviaciones estándar de inter-eventos para las medidas de intensidad de interés en la base del perfil de sitio.

Las desviaciones estándar de intra-eventos son:

$$\phi_{\ln YB} = (\phi_{\ln Y}^2 - \phi_{\ln AF}^2)^{1/2} \quad (3.18)$$

$$\phi_{\ln PGA_B} = (\phi_{\ln PGA}^2 - \phi_{\ln AF}^2)^{1/2} \quad (3.19)$$

La desviación estándar total resulta:

$$\sigma = \sqrt{\tau^2 + \phi^2} \quad (3.20)$$

Todos los coeficientes requeridos en las ecuaciones se encuentran indicados en las tablas del anexo 2.

3.6 LIMITACIONES DEL MODELO

Debido a la complejidad de la naturaleza de la función de forma que comprende el modelo de movimiento vertical y debido a la inclusión de nuevas variables, en esta sección los autores presentan la limitación del modelo para que los usuarios puedan evaluar la aplicabilidad del modelo para aplicaciones de ingeniería.

En términos generales, el modelo de movimiento vertical es similar al modelo Horizontal, considerado válido para evaluar eventos superficiales continentales en todo el mundo en regímenes tectónicos cuando se cumple lo siguiente:

- Magnitud mínima $M \geq 3.3$
- Máxima magnitud $M \leq 8.5$ para sismos generados en fallas transcurrentes.
- $M \leq 8.0$ para sismos generados en fallas inversas.
- $M \leq 7.5$ para sismos generados en fallas normales.
- $0 \leq R_{RUP} \leq 300$ km
- $Z_{TOR} \leq 20$ km
- 150 m/s $\leq V_{S30} \leq 1500$ m/s.
- $Z_{2.5} \leq 10$ km.
- $Z_{HYP} \leq 0-20$ km.
- $\delta = 15-90^\circ$.

CAPÍTULO 4

MODELO VERTICAL DE CHOIU & YOUNGS (2013)

4.1 INTRODUCCIÓN

En 2010 PEER (Pacific Earthquake Engineering research center) firmó un contrato de investigación con el CEA (California Earthquake Authority) para llevar a cabo un multidisciplinario proyecto de investigación para mejorar los actuales modelos de atenuación de placas tectónicas activas. Este nuevo proyecto NGA-West 2 (NGA: Next Generation Attenuation) se enfoca en la ingeniería sísmica, incluyendo modelos de direccionalidad, verificación de recientes eventos sísmicos pequeños, moderados y de gran magnitud, escalamiento de ecuaciones para predecir el movimiento del suelo para diferentes niveles de amortiguamiento (GMPE – Ground Motion Prediction Equations), desarrollo de ecuaciones para predecir el movimiento vertical de suelo, estudio de la incertidumbre epistémica y evaluación de los factores de amplificación del suelo en los modelos del NGA versus los factores de sitio generados por el NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program).

El NGA-WEST2 fue concebido para ampliar la base de datos de su programa predecesor y mejorar en cuanto a calidad y consistencia. El NGA WEST2 considera estos criterios descritos por Ancheta et al para la base de datos:

- Un evento es cortical si ocurre dentro de la corteza continental.
- Los eventos considerados dentro de la base de datos tienen un hipocentro con una profundidad menor a 20 km.
- Los eventos se encuentran en regiones tectónicamente activas.
- No se excluyeron eventos ocurridos en una proximidad cercana (tiempo o espacio) de un evento previo. (Quizanga 2015)

El modelo de CHOIU y YOUNGS presenta modelos de atenuación para estimar las amplitudes del movimiento vertical causado por sismos en la corteza superficial ocasionado en las placas tectónicas activas. Este modelo vertical es similar al modelo de atenuación de movimiento horizontal de CHOIU y YOUNGS elaborado en 2013, este utiliza la base de datos del NGA-West 2 del movimiento vertical del suelo, basa su estudio en un análisis estadístico del espectro de respuesta con un amortiguamiento del 5%.

Este modelo vertical desarrollado por los autores tiene la función de forma de las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo horizontal, con una modificación en el periodo lineal de la respuesta del suelo. Al igual que en el modelo horizontal GMPE, se consideraron las diferencias regionales y efectos secundarios entre California y otras regiones con placas tectónicas activas.

Los radios de la respuesta espectral Horizontal / Vertical calculados usando las ecuaciones de movimiento del suelo vertical y del movimiento horizontal muestra un valor mayor cuando el periodo se acerca a 0.05 segundos. El radio mayor varía con valores V_{S30} y menores y también varía con la distancia de ruptura y su magnitud.

La variación aleatoria de la componente vertical y su magnitud tuvo valores similares que los de la componente horizontal.

Este modelo presenta el desarrollo de las ecuaciones de predicción de los movimientos de suelo vertical, elaborado por Choiu y Youngs, el cual utiliza la base de datos del movimiento del suelo de su componente vertical, elaborada por Ancheta et al. [2013] y también simulaciones del movimiento del suelo Donahue y Abrahamson [2013]. Esta base de datos fue provista por el PEER, parte del proyecto NGA West 2.

El desarrollo del modelo que considera los efectos por sector y los factores de amplificación dieron como resultado un análisis de la respuesta sectorial lineal equivalente de la componente de movimiento vertical elaborado por Silva.

La evaluación inicial de los registros obtenidos del programa NGA West 2 para movimiento vertical indicó que a excepción de la respuesta lineal del suelo, el

modelo de la componente horizontal es adecuado para modelar el movimiento vertical del suelo. Por lo tanto, las ecuaciones para la componente vertical fueron obtenidas de las ecuaciones de movimiento horizontal del suelo [Choiu y Youngs, 2013], considerando la misma función de forma (Efectos de Saturación, Mecanismo de Falla, Profundidad de Ruptura, Efectos de Hanging wall, Efectos no lineales del sector, Profundidad de Sedimentación, Desviación Estándar de la Magnitud y Desviación Estándar del Efecto no Lineal) y sus coeficientes. Así mismo, existen diferencias en la atenuación inelástica y el escalamiento de la velocidad dentro de los primeros 30m V_{S30} , a continuación se muestra el resumen del modelo vertical con sus similitudes y diferencias del modelo horizontal:

TABLA 4.1 RESUMEN DEL MODELO VERTICAL COMPARADO CON EL MODELO HORIZONTAL

	Forma Funcional	Estimación de Coeficientes para GMPE Vertical	
		Coeficientes usados del GMPE	Coeficientes estimados de NGA Vertical
Magnitud de Momento	El mismo de GMPE Horizontal	C_2, C_M, C_n	C_3
Tipo de Falla	El mismo de GMPE Horizontal	$C_{1a}, C_{1b}, C_{1c}, C_{1d}$	C_7, C_{7b}
Escalamiento cerca de la	El mismo de GMPE Horizontal		C_5, C_6
Dispersión Geométrica	El mismo de GMPE Horizontal	C_4, C_{4a}, C_{RB}	
Amortiguamiento Cortical	El mismo de GMPE Horizontal	γ_3	$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_{jp-It}, \gamma_{Wn}$
Efecto de Direccionalidad	Removido		
Hanging wall	El mismo de GMPE Horizontal	C_9, C_{9a}, C_{9b}	
Respuesta Lineal del Suelo	Revisada		$\phi_1, \phi_{1jp}, \phi_{1Tw}, \phi_{1a}, \phi_{1ajp}, \phi_{1b}$
Respuesta No Lineal del Suelo	Removido		
Profundidad de Sedimentación	El mismo de GMPE Horizontal	ϕ_6, ϕ_{6jp}	ϕ_5, ϕ_{5jp}

FUENTE: (Choiu & Young, 2013).

El estudio realizado por Chou y Youngs describe los registros verticales utilizados usando un análisis de regresión, seguidamente describen las modificaciones a las ecuaciones del movimiento horizontal y ajustan los parámetros con los registros verticales. Una vez realizado el modelo vertical, comparan los dos modelos generando un ratio de la forma del espectro vertical vs el espectro horizontal (V/H). Las ecuaciones elaboradas para el movimiento vertical, no consideran efectos de direccionalidad por ruptura de la falla en el suelo. Los efectos de respuesta no lineal del suelo determinaron ser insignificantes al analizar los registros del NGS-West 2 para movimiento vertical, por lo tanto no considera efectos de respuesta no lineal del suelo.

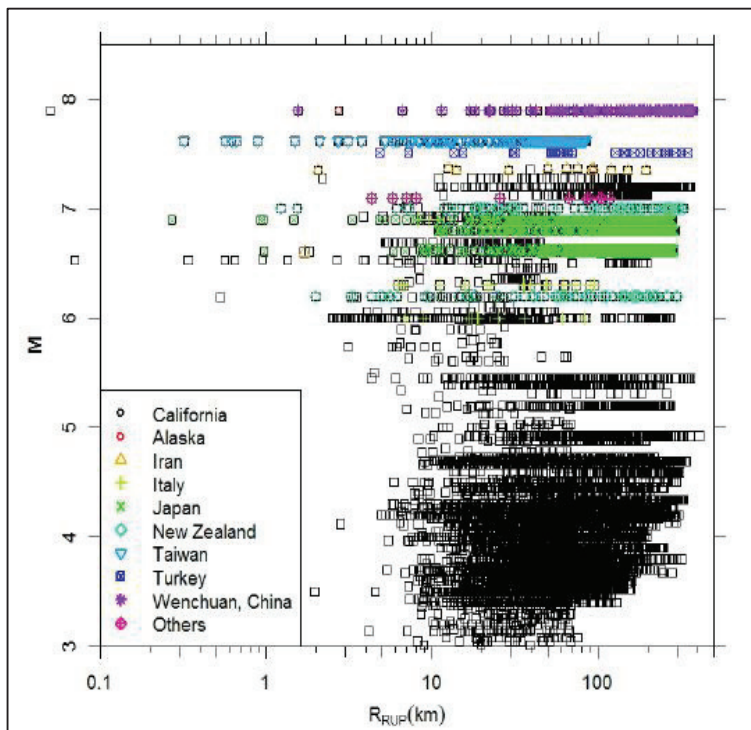
4.2 DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE LOS MODELOS DE CHOIU Y YOUNGS (2013)

4.2.1 SELECCIÓN DE DATOS

El grupo de datos para la componente vertical fue seleccionado del mismo registro de datos utilizado para el modelo de movimiento horizontal. Estos registros de componentes verticales analizaron y eliminaron todos los datos y eliminaron aquellos con una cuestionable calidad o aquellos con una P-Onda tardía que se identificaron en la base de datos de movimiento vertical del PEER NGA-West 2. Adicionalmente, se complementó la base de datos NGA-West 2 con los registros no considerados y que fueron desarrollados para los movimientos horizontales, descritos en el modelo Chou y Youngs [2013]

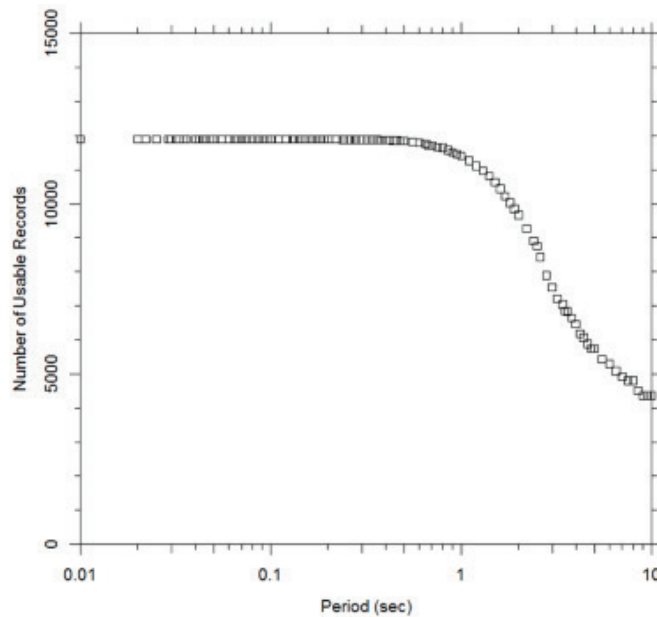
Una vez aplicado lo indicado en el párrafo anterior, un total de 11889 registros de 296 sismos fueron usados para el desarrollo de las Ecuaciones de Predicción de Movimiento Vertical (GMPE). La cantidad de registros verticales comparados con los registros horizontales son relativamente pequeños, debido al hecho de que existen más P-Ondas tardías que S-Ondas tardías en la base de datos NGA-West 2. Un total de 2564 registros fueron seleccionados de 18 sismos no registrados en el estado de California. La figura a continuación muestra el número de registros como una función del periodo espectral.

FIGURA 4.1 DISTRIBUCIÓN DE LOS REGISTROS DE MOVIMIENTO VERTICAL
MAGNITUD- R_{RUP} [KM]



FUENTE: Chiu y Youngs 2013

FIGURA 4.2 NÚMERO DE REGISTROS VÁLIDOS COMO FUNCIÓN DEL PERIODO
ESPECTRAL



FUENTE: Chiu y Youngs 2013

4.2.2 RELACION $Z_{1.0} - V_{S30}$

Para movimiento horizontal, el espesor de los sedimentos de la corteza superficial está representada en las ecuaciones de predicción vertical por:

- La profundidad de la velocidad horizontal de la onda de corte de 1.0Km/seg, $Z_{1.0}$. La base de datos NGA-West 2 contiene los registros para $Z_{1.0}$ del modelo tridimensional que contempla la cuenca sur del estado de California,
- Para sitios con un modelo de velocidad dentro del USGS (United States Geological Survey) para la Bahía de San Francisco.
- Para modelos de velocidad en el Japón dentro del NIED (National Institute for Earth Science and Disaster Prevention)
- Para modelos donde las velocidades horizontales de la onda de corte alcanzan 1.0Km/seg.

Al igual que para las ecuaciones de movimiento horizontal realizadas en 2013, los autores se estimaron $Z_{1.0}$ para sectores sin valores registrados o reportados utilizando relaciones entre $Z_{1.0}$ y V_{S30} . La base de datos del NGA-West 2 muestra una clara diferencia de las relaciones $Z_{1.0}-V_{S30}$ entre California y Japón. Por esta razón se utilizaron relaciones separadas para las dos regiones.

Para California:

$$\ln(Z_1) = \frac{-7.15}{4} \ln \left(\frac{V_{S30}^4 + 571^4}{1360^4 + 571^4} \right) \quad (4-1)$$

Para Japón:

$$\ln(Z_1) = \frac{-5.23}{2} \ln \left(\frac{V_{S30}^2 + 412^4}{1360^4 + 412^2} \right) \quad (4-2)$$

4.3 DESCRIPCION DEL MODELO

La formulación del modelo vertical y sus coeficientes fue obtenida del modelo horizontal elaborado por Chou y Youngs [2013]. El desarrollo del modelo vertical considera dos procesos.

Primero utiliza el modelo de predicción de ecuaciones de movimiento (GMPE – Horizontal) como un modelo inicial y evalúa con los registros de movimiento vertical. Seguidamente determina la formulación del movimiento horizontal del suelo y realiza un escalamiento a una distancia y sus parámetros fuente adecuados para la componente vertical.

Seguidamente las formulaciones fueron adoptadas sin ningún cambio. Sin embargo, las amplificaciones del suelo de los movimientos verticales muestran una reducción de $\ln(V_{S30})$ hasta $V_{S30} < 360$ m/seg en los registros y los resultados del análisis de respuesta. La relación lineal $\ln(V_{S30})$ adoptada en el GMPE-horizontal fue modificado para observar las tendencias en los registros de movimiento vertical. La evidencia de la respuesta no lineal del suelo en los registros de movimiento vertical no fue encontrada. Por lo tanto, los autores asumieron una respuesta lineal del suelo para la componente vertical, no incluyendo efectos de comportamiento no lineal del suelo en la elaboración de las ecuaciones de predicción de movimiento vertical (GMPE-Verticales).

Adicionalmente, el término de direccionalidad de rotura fue removido de GMPE-Vertical debido a que las investigaciones y el conocimiento acerca de los efectos de direccionalidad son muy escasos. Mientras algunos modelos de movimiento horizontal mantienen, otros son modificados en un segundo procedimiento mientras se desarrolla el modelo al intentar ajustar los registros de movimiento vertical.

La existencia del grado de respuesta no lineal para el movimiento vertical es incierto. El análisis de respuesta vertical realizado como parte del proyecto NGA-West 2 sugiere que para $T > 0.3$ seg, la respuesta del suelo es lineal. Para $T < 0.3$ seg, el efecto no lineal del suelo está presente pero no tan fuerte como en la

componente horizontal. Por lo cual [Kamahai, 2012] indica que se requeriría una gran cantidad de datos iniciales de movimiento para ingresar el comportamiento no lineal del suelo. Los autores no encontraron suficiente evidencia de la respuesta no lineal del suelo en los registros verticales, debido a esto los autores asumen una respuesta lineal del suelo para todos los periodos espectrales, no incluyendo la respuesta no lineal del suelo en las ecuaciones GMPE-Vertical.

Las diferencias regionales de la respuesta lineal del suelo entre Japón, Taiwán y California fueron obtenidas del proyecto NGA-West 2. Estas diferencias, los autores modelaron en las ecuaciones GMPE-Vertical considerando coeficientes por cada región, por lo que ϕ_1 para Japón y Taiwán utilizaron (ϕ_{1JP} , ϕ_{1TW}) y los coeficientes ϕ_{1a} y ϕ_{1b} para Japón (ϕ_{1aJP} y ϕ_{1bJP}).

La formulación de movimiento vertical está dada por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \ln(y_{ref\ ij}) = & c_1 + \left\{ c_{1a} + \frac{c_{1c}}{\cosh(2\max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{RVI} \\
 & + \left\{ c_{1b} + \frac{c_{1d}}{\cosh(2\max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{NMI} \\
 & + \left\{ c_7 + \frac{c_{7b}}{\cosh(2\max(M_i - 4.5, 0))} \right\} \Delta Z_{tori} \\
 & + \left\{ c_{11} + \frac{c_{11b}}{\cosh(2\max(M_i - 4.5, 0))} \right\} (\cos\delta_i)^2 + c_2 \ln(M_i - 6) \\
 & + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - M_i)}) \\
 & + c_4 \ln(R_{RUPij} + c_5 \cosh(c_6 \max(M_i - c_{HM}, 0))) \\
 & + (c_{4a} - c_4) \ln\left(\sqrt{R_{RUP}^2 + c_{RB}^2}\right) + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh(\max(M_i - c_{\gamma 3}, 0))} \right\} R_{RUPij} \\
 & + c_9 F_{HWij} \cos\delta_i \left\{ c_{9a} + (1 - c_{9a}) \tanh\left(\frac{R_{xij}}{c_{9b}}\right) \right\} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{R_{BIj}^2 + Z_{TORi}^2}}{R_{RUPij} + 1} \right\} \quad (4-3)
 \end{aligned}$$

$$\ln(y_{ij}) = \ln(y_{ref\ ij}) + \frac{\phi_1}{1 + \left[\frac{V_{S30}}{\phi_{1a}}\right]} \quad (4-4)$$

Dónde:

M = Magnitud de Momento.

R_{RUP} = Distancia más cercana al plano de ruptura (km)

R_{JB} = Distancia Joyner Boore (km).

R_x = Distancia horizontal (km).

F_{HW} = Factor de Hanging Wall (Usar 1 Si $R_x \geq 0$, y 0 en otros casos).

δ = Ángulo de Buzamiento ($^\circ$).

Z_{tor} = Distancia al tope superior del plano de falla.

F_{RV} = Factor de mecanismo de falla inversa (Usar 1 Si $30 \leq \lambda \leq 150$, y 0 en otros casos)

V_{s30} = Velocidad de onda de corte a los 30 metros superiores del suelo (m/s).

ΔDPP = Parámetro de variación de DPP

ΔZ_{tor} = Parámetro de variación de Z_{TOR}

Z_1 = Parámetro de variación de Z_1

Para simplificar las ecuaciones indicadas anteriormente, fueron calculadas para California, a pesar de que el análisis de regresión incluye factores de regionalización para considerar las diferencias regionales en la atenuación inelástica y efectos de sitio. Para aplicar las ecuaciones GMPE-Vertical realizada por los autores en regiones diferentes a California, inicialmente deberían utilizar coeficientes regionales específicos o factores de ajuste indicados a continuación.

4.4 MODELO ALEATORIO

La formulación de variabilidad aleatoria desarrollada por los autores para las ecuaciones GMPE-Horizontal incluye dependencia en la magnitud y el grado de respuesta no lineal. En ese estudio, los autores actualizaron la función de forma y los coeficientes de modelos de variabilidad aleatoria que refleja los cambios por los registros verticales y la ausencia del comportamiento no lineal del suelo en las ecuaciones GMPE-Vertical.

La terminología utilizada para expresar los componentes de variabilidad usa símbolos τ para la componente sísmica interna. El símbolo σ usa para indicar la variabilidad aleatoria total de la siguiente forma:

$$\sigma^2 = \tau^2 + \phi^2 \quad (4-5)$$

Sin embargo, para evitar la confusión con el uso de los símbolos usados por Chou y Youngs [2013], establecieron que, τ se utilice para la componente del hipocentro y epicentro, y con el símbolo σ_T .

Ensayos de movimientos residuales verticales indican un comportamiento similar al encontrado para la componente horizontal, por lo tanto, los autores adoptaron la misma formulación, dada por:

$$\begin{aligned} \sigma_T^2 &= \tau^2 + \phi^2 \\ \tau &= \tau_1 + \frac{\tau_2 - \tau_1}{1.5} (\min(\max(M, 5), 6.5) - 5) \\ \sigma &= \sigma_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{1.5} (\min(\max(M, 5), 6.5) - 5) * \sqrt{\sigma_3 * F_{inferido} + 0.7 * F_{calculado} + 1} \end{aligned} \quad (4-6)$$

Todos los coeficientes requeridos en las ecuaciones se encuentran indicados en las tablas del anexo 1.

4.5 LIMITACIONES DEL MODELO

El alcance del modelo de Chou y Youngs de 2013 está limitado por las siguientes condiciones:

- $3.5 \leq M \leq 8.5$ para sismos generados en fallas transcurrentes
- $3.5 \leq M \leq 8.0$ para sismos generados en fallas inversas o normales.
- $Z_{TOR} \leq 20\text{km}$.
- $0 \leq R_{RUP} \leq 300 \text{ km}$.
- $180 \text{ m/s} \leq V_{S30} \leq 1500 \text{ m/s}$.

CAPÍTULO 5

MODELO VERTICAL DE ZEYNEP GULERCE ET., AL (2013)

5.1 INTRODUCCIÓN

Movimientos de suelo vertical se consideran generalmente en el diseño sísmico para estructuras críticas tales como plantas nucleares o presas. Recientes estudios sugieren que el efecto de movimiento de suelo vertical puede ser significativo para para la respuesta sísmica en puentes de avenidas principales en lugares dentro de los 15Km de falla [Kunnath et al. 2008; Gülerce y Abrahamson 2010]. El diseño del espectro vertical puede ser desarrollado mediante una evaluación probabilística de riesgo sísmico (PSHA) al calcular el riesgo de movimiento de suelo vertical utilizando las ecuaciones GMPE-Vertical o utilizando el modelo de la relación V/H para escalar el espectro horizontal que fue desarrollado por los autores usando los resultados de la componente horizontal PSHA.

Los modelos empíricos desarrollados por los autores se derivan para una máxima aceleración del suelo de la componente vertical con un amortiguamiento del 5% usando un subgrupo de registros del PEER NGA-West 2 [Ancheta et al 2013] y seleccionado por las ecuaciones GMPE-Horizontal de Abrahamson et al. [2013] (ASK 13).

Aun así, la base de datos del NGA-West 2 presenta un incremento considerable en los registros comparados con la base de datos del NGA 2008 [Chiou et al. 2008]. El desarrollo de las ecuaciones GMPE-Vertical que extrapola de largas magnitudes y cortas distancias basa su propuesta en modelos sismológicos y geotécnicos para restringir la extrapolación. Por lo tanto, el enfoque de las ecuaciones GMPE no consideran un ajuste tradicional en las curvas (mínimo número de parámetros para explicar las observaciones), por el contrario este es un modelo de prueba que usa

resultados analíticos de modelos sismológicos y geotécnicos para restringir la extrapolación fuera del rango considerado en los registros empíricos obtenidos.

De esta manera utiliza un modelo analítico de falla finita que restringe los efectos de pared “HW” [Donahue y Abrahamson 2013]. La función de forma de las ecuaciones de movimiento vertical es consistente con las ecuaciones usadas para el modelo horizontal, a excepción de la amplificación no lineal que depende de la zona del sismo y los efectos de profundidad del sismo.

TABLA 5.1 RESUMEN DEL MODELO VERTICAL COMPARADO CON EL MODELO HORIZONTAL

Modelo	Abrahamson <i>et al.</i> (2013)	Gülerce <i>et al.</i> (2013)
Parámetro de la fuente sismogénica		
Magnitud (M)	X	X
Mecanismos de Falla (Función de λ)	X	X
Angulo de Buzamiento (dip)	X	X
Ancho de la ruptura (W)	X	X
Efecto Hanging-Wall (H_W)	X	X
Profundidad del plano de ruptura (Z_{TOR})	X	X
Profundidad del hipocentro (Z_{hyp})	X	X
Tipo de falla	SS, RV, NM	SS, RV, NM
Tipo de distancias		
Distancia R_X	X	X
Distancia Joyner-Boore (R_{jb})	X	X
Distancia al plano de ruptura (R_{rup})	X	X
Distancia (R_Y)	X	X
Distancia (R_{y0})	X	X
Efectos de sitio		
Velocidad de la onda de corte en los primeros 30 m (V_{s30})	X	X

TABLA 5.2 CONTINUACIÓN

Profundidad donde la velocidad de la onda de corte es de 1000m/s ($Z_{1.0}$)	X	
PGA en roca, como base para la respuesta no lineal del sitio	X	
Otros efectos		
Regionalización de la atenuación	Taiwan, China y Japón	Taiwan, China y Japón

ELABORADOR: Eduardo López

5.2 DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE LOS MODELOS DE ABRAHAMSON Y SILVA (2013)

El enfoque de los autores del modelo para evaluar el subconjunto de datos tomados a partir de la base de datos NGA-WEST2 fue considerar todos los eventos (sin excluir las réplicas) en regímenes corticales activos mediante un análisis de regresión. Se hizo este enfoque tomando en cuenta que en promedio el movimiento de suelo para los sismos ocurridos en regiones corticales a distancias menores a 80 km es similar en diferentes lugares de mundo.

A distancias mayores a los 80Km, la diferencia en estructura cortical tiene un efecto significativo en el movimiento de suelo, conllevando a un cambio en la atenuación a largas distancias.

Los criterios de exclusión de ASK13, que se aplicaron sobre la base de datos NGA-WEST2 son similares a los usados en el modelo ASK 13 para la componente horizontal con pequeños cambios que se presentan a continuación:

- Se eliminan los registros donde la componente vertical no está presente o no está procesada.
- Se eliminan los registros en donde la componente vertical es cuestionable por su procedencia.

Resumen de parámetros de exclusión (ASK13) – Para modelo Horizontal

- Eventos no representativos de tectónica cortical
- Registros mayores que la distancia de monitoreo.
- Registros que no se encuentran en campo libre

- Eventos con profundidades hipocentrales cuestionables
- Réplicas de evento Wenchuan
- Registros con pérdidas importantes de metadatos
- Eventos con menos de 3 registros cuando $M > 5$
- Eventos con menos de 10 registros con una buena cobertura en distancia cuando $M < 5$

La base de datos final incluye 15597 registros de 326 sismos. Los valores de la respuesta espectral seleccionados son usados solamente para realizar un análisis de regresión para frecuencias “High-pass corner” mayores a 1.25 veces la frecuencia usada en los registros. Este último requerimiento genera un grupo de datos que varía en función del periodo, el cual también depende del número sismos y número de registros usados en el análisis de regresión.

La reducción de un número significativo de registros que tenían periodos entre 2-3 segundos, indicó que las predicciones de periodos largos están separados de los registros empíricos.

5.3 DESCRIPCION DEL MODELO

La respuesta no lineal de los movimientos de suelo vertical no tiene la suficiente información para ser comprendidos completamente.

Debido a la falta de información en el entendimiento de la respuesta superficial y profunda de los movimientos verticales del suelo, la función de forma es consistente con la función de forma usada por ASK13 para la componente horizontal realizada por los autores, con las siguientes excepciones:

- No se incluye la respuesta no lineal del suelo
- No se incluye la profundidad hacia estratos de roca inferiores.

El modelo del movimiento vertical está dado por:

$$\begin{aligned} \ln Sa(g) = & f_1(M, R_{rup}) + F_{RV}f_7(M) + F_Nf_8(M) + F_{AS}f_{11}(CR_{jb}) + f_5(Sa_{1100}, V_{s30}) \\ & + F_{HW}f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{y0}, W, dip, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) \\ & + Regional(V_{s30}, R_{rup}) \end{aligned}$$

(5.1)

Donde los datos de partida son:

Parámetros asociados a la fuente sismogénica.

M = Magnitud de Momento.

Z_{tor} = Distancia al tope superior del plano de falla (km)

F_{RV} = Factor de mecanismo de falla inversa.

(Usar 1 Si $30 \leq \lambda \leq 150$, y 0 en otros casos)

F_{NM} = Factor de mecanismo de falla normal y normal oblicua.

(Usar 1 Si $-120 \leq \lambda \leq -30$, y 0 en otros casos)

CR_{jb} = Centroide de R_{jb} . definidos por Wooddell y Abrahamson en 2012.

Eventos clase 2 son aquellos que tienen un $CR_{\text{jb}} < 15$ km y están dentro de la ventana de tiempo definida por Garder y Knopoff, corresponde a las réplicas del evento principal.

F_{As} = Factor de réplicas.

(1 para eventos clase2 (réplicas) y considerar 0 para eventos principales)

δ = Ángulo de Buzamiento ($^{\circ}$)

W = Ancho de ruptura de falla (km).

Parámetros asociados a la clasificación del sitio:

V_{s30} = Velocidad de onda de corte a los 30 metros superiores del suelo (m/s)

Z_{HYP} = Profundidad a la que onda de corte tiene un $V_s=1.0$ km/s (km)

Parámetros asociados a las distancias respecto al sitio:

R_{RUP} = Distancia más cercana al plano de ruptura (km).

R_{JB} = Distancia Joyner Boore (km).

R_x = Distancia horizontal (km).

5.3.1 MODELO BASE

El modelo base de magnitud y distancia dependiente de sismos corticoidales es similar al modelo horizontal (AS08) de Abrahamson y Silva [2008], con algunos cambios en la escala de magnitud para magnitudes pequeñas.

$$f_1 \begin{cases} a_1 + a_5(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - M_1)]\ln(R) & M > M_1 \\ + a_{17}Rrup; & \\ a_1 + a_4(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - M_1)]\ln(R) & M_2 \leq M < M_1 \\ + a_{17}Rrup; & \\ a_1 + a_4(M_2 - M_1) + a_8(8.5 - M_2)^2 + a_6(M - M_2)^2 + [a_2 + a_3(M_2 - M_1)]\ln(R) & M < M_2 \\ + a_{17}Rrup; & \end{cases} \quad (5.2)$$

Donde:

$$R = \sqrt{Rrup^2 + c_4^2}$$

Basado en los resultados preliminares de regresión, en la ecuación del modelo base, las magnitudes de rotura se establecieron en $M_1=6.75$ y $M_2=5.0$

5.3.2 FACTOR DE ESTILO DE FALLA (SOF)

Una evaluación preliminar del modelo de estilo de falla del modelo horizontal mostró una diferencia entre los movimientos de suelo para diferentes estilos de falla que no se habían registrado para los registros de baja magnitud de California. Por lo tanto el factor que depende del estilo de falla RV (f_7) y NML (f_8), los autores usaron para sismos con magnitudes mayores a 5, para magnitudes menores a 4 estos factores se ajustaron a cero, la función de los factores se muestra a continuación:

$$f_7(M) = \begin{cases} a_{11}; & M > 5 \\ a_{11}(M - 4) & 4 \leq M \leq 5 \\ 0; & M \leq 4 \end{cases}$$

$$f_8(M) = \begin{cases} a_{12}; & M > 5 \\ a_{12}(M - 4); & 4 \leq M \leq 5 \\ 0; & M \leq 4 \end{cases} \quad (5.3)$$

Efectos no lineales de sitio no se incorporaron en el modelo, por lo tanto los autores asumieron una amplificación lineal vertical para la componente vertical, se muestra a continuación:

5.3.3 FACTOR DE RESPUESTA DE SITIO

$$f_5(V_{s30}) = (a_{10}) \ln \left(\frac{V_{s30}^*}{V_{LIN}} \right) \quad (5.4)$$

Dónde:

$$V_{s30}^* = \begin{cases} V_{s30}; & V_{s30} < V_1 \\ V_1; & V_{s30} \geq V_1 \end{cases}$$

$$V_1 = \begin{cases} 1500; & T \leq 0.5 \text{ sec} \\ \exp \left(-0.35 \ln \left(\frac{T}{0.5} \right) + \ln(1500) \right); & 0.5 \text{ sec} > T > 3 \text{ sec} \\ 800; & T \geq 3 \text{ sec} \end{cases}$$

5.3.4 MODELO DE ESCALAMIENTO DE HANGING WALL (HW)

Donahue y Abrahamson [2013] usaron resultados de simulaciones finitas de falla para restringir la dependencia de los efectos HW, inmersión y distancia. Los resultados indicaron que el mismo modelo de ASK13 es aplicable con pequeñas variaciones mostradas a continuación:

$$f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{yo}, dip, Z_{tor}, M) = a_{13} T_1(dip) T_2(M) T_3(R_x, W, dip) T_4(Z_{TOR}) T_5(R_x, R_{yo}) \quad (5.5)$$

$$T_1(dip) = \begin{cases} (90 - dip)/45; & dip > 30 \\ 60/45; & dip < 30 \end{cases}$$

$$T_2(M) = \begin{cases} 1 + a_{2HW}(M - 6.5) & M \geq 6.5 \\ 1 + a_{2HW}(M - 6.5) - (1 + a_{2HW})(M - 6.5)^2; & 5.5 < M < 6.5 \\ 0; & M \leq 5.5 \end{cases}$$

$$T_3(R_x) = \begin{cases} h_1 + h_2(R_x/R_1) + h_3(R_x/R_1)^2; & R_x < R_1 \\ 1 - \left(\frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1} \right); & R_1 \leq R_x \leq R_2 \\ 0; & R_x > R_2 \end{cases}$$

$$T_4(Z_{TOR}) = \begin{cases} 1 - \frac{Z_{TOR}^2}{100}; & Z_{TOR} \leq 10 \text{ km} \\ 0; & Z_{TOR} \geq 10 \text{ km} \end{cases}$$

$$T_5(R_x, R_{y0}) = \begin{cases} 1; & R_{y0} < R_{y1} \\ 1 - \left(\frac{R_{y0} - R_{y1}}{5}\right); & R_{y0} - R_{y1} < 5 \\ 0; & R_{y0} - R_{y1} \geq 5 \end{cases}$$

$$R_1 = W \cos(dip)$$

$$R_2 = 4R_1$$

$$R_{y1} = R_x \tan(20)$$

$$h_1 = 0.25$$

$$h_2 = 1.5$$

$$h_3 = -0.75$$

Si no se ha medido la distancia R_{y0} el término T_5 puede ser calculado mediante la ecuación:

$$T_5(R_{jb}) = \begin{cases} 1; & R_{jb} = 0 \\ 1 - \left(\frac{R_{jb}}{30}\right); & R_{jb} < 30 \\ 0; & R_{jb} \geq 30 \end{cases}$$

5.3.5 MODELO DE PROFUNDIDAD DE FALLA

$$f_6(Z_{TOR}) = \begin{cases} a_{15} \frac{Z_{TOR}}{100}; & Z_{TOR} < 20 \text{ km} \\ a_{15}; & Z_{TOR} \geq 20 \text{ km} \end{cases} \quad (5.6)$$

5.3.6 MODELO DE ESCALAMIENTO DE RÉPLICAS

$$f_{11}(CR_{jb}) = \begin{cases} a_{14}; & C R_{jb} \leq 5 \\ a_{14} \left[1 - \frac{C R_{jb} - 5}{10}\right]; & 5 < C R_{jb} < 15 \\ 0; & C R_{jb} > 15 \end{cases} \quad (5.7)$$

5.3.7 MODELO REGIONAL

$$Reg(R_{rup}) = F_{TW}(a_{25}R_{rup}) + F_{CN}(a_{28}R_{rup}) + F_{JP}(a_{29}R_{rup}) \quad (5.8)$$

Dónde:

$$F_{TW} = f(x) = \begin{cases} 1, & \text{Taiwán} \\ 0, & \text{Otras Regiones} \end{cases}$$

$$F_{CN} = f(x) = \begin{cases} 1, & \text{China} \\ 0, & \text{Otras Regiones} \end{cases}$$

$$F_{JP} = f(x) = \begin{cases} 1, & \text{Japón} \\ 0, & \text{Otras Regiones} \end{cases}$$

5.4 INCERTIDUMBRE

La desviación estándar para intra-eventos se expresa como una función dependiente de la magnitud mediante la siguiente expresión:

$$\phi_{A,L}(M) = \begin{cases} s_1; & M < 4 \\ s_1 \frac{s_1 - s_2}{2} (M - 4); & 4 \leq M \leq 6 \\ s_2; & M > 6 \end{cases} \quad (5.9)$$

La desviación estándar para inter-eventos así mismo se expresa como una función dependiente de la magnitud mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_{A,L}(M) = \begin{cases} s_3; & M < 5 \\ s_3 \frac{s_4 - s_3}{2} (M - 4); & 5 \leq M \leq 7 \\ s_4; & M > 7 \end{cases} \quad (5.10)$$

La desviación estándar en la respuesta no lineal del suelo depende de la magnitud del evento, esta variabilidad depende del movimiento en roca, por lo que es necesario estimar la desviación estándar en roca, para hallar este valor los autores han empleado las siguientes ecuaciones:

$$\Phi_B(M, T) = \sqrt{\Phi_{A,L}^2(M, T) - \Phi_{Amp}^2(T)} \quad (5.11)$$

Dónde:

Φ_B : La desviación estándar en roca.

Φ_{AL} : La desviación estándar para intra-eventos (lineal), que está en función de la magnitud (M) y el periodo (T).

Φ_{Amp} : La desviación estándar de la amplificación del sitio. Asumida como 0.4 para todos los periodos basados en Kamai,2013

Para la variabilidad inter eventos la desviación estándar en roca es la misma observada en la variabilidad del rango lineal entonces:

$$\tau_B(M, T) = \tau_{A,L}(M, T)$$

Los autores para considerar los efectos de la no linealidad del suelo consideraron las siguientes ecuaciones:

Para intra-eventos

$$\Phi(T, M, Sa_{1100}, Vs_{30}) = \left[\Phi_B^2(M, T) \left(1 + \frac{\partial \ln \text{Amp}(T, Sa_{1100}, Vs_{30})}{\delta \ln Sa_{1100}} \right)^2 + \Phi_{Amp}^2(T) \right]^{1/2} \quad (5.12)$$

Para inter eventos

$$\tau(T, M, Sa_{1100}, Vs_{30}) = \tau_B(M, T) \left(1 + \frac{\partial \ln \text{Amp}(T, Sa_{1100}, Vs_{30})}{\delta \ln Sa_{1100}} \right) \quad (5.13)$$

Dónde:

$$\frac{\tau(T, M, Sa_{1100}, V_{S30})}{\partial \ln Sa_{1100}} = \begin{cases} 0 & \text{Si } V_{S30} \geq V_{Lin} \\ \frac{-b(T) Sa_{1100}}{Sa_{1100} + c} + \frac{-b(T) Sa_{1100}}{Sa_{1100} + c \left(\frac{V_{S30}}{V_{LIN}}\right)^n} & \text{Si } V_{S30} < V_{Lin} \end{cases}$$

(5.14)

Todos los coeficientes requeridos en las ecuaciones se encuentran indicados en las tablas del anexo 3.

5.5 LIMITACIONES DEL MODELO

El alcance del modelo es el siguiente:

- $3.0 \leq M \leq 8.5$ para sismos generados en cualquier tipo de falla cortical.
- $Z_{TOR} \leq 20\text{km}$
- $0 \leq R_{RUP} \leq 300 \text{ km}$
- $180 \text{ m/s} \leq V_{S30} \leq 1500 \text{ m/s}$

Aunque según recomendaciones de los autores no debería usarse un V_{S30} menor a 190 m/s.

CAPÍTULO 6

CÁLCULO DE RELACIONES ESPECTRALES V/H

6.1 INTRODUCCIÓN

La evaluación del peligro sísmico intenta “predecir” la respuesta del suelo (aceleración, velocidad, desplazamiento, espectro de respuesta) ante un evento sísmico (conjunto de eventos), con fines de ingeniería. (Singaucho, 2014)

Existen dos formas de evaluar el peligro: Determinística y Probabilística, utilizando ecuaciones empíricas denominadas Ground Motion Prediction Equations (GMPE).

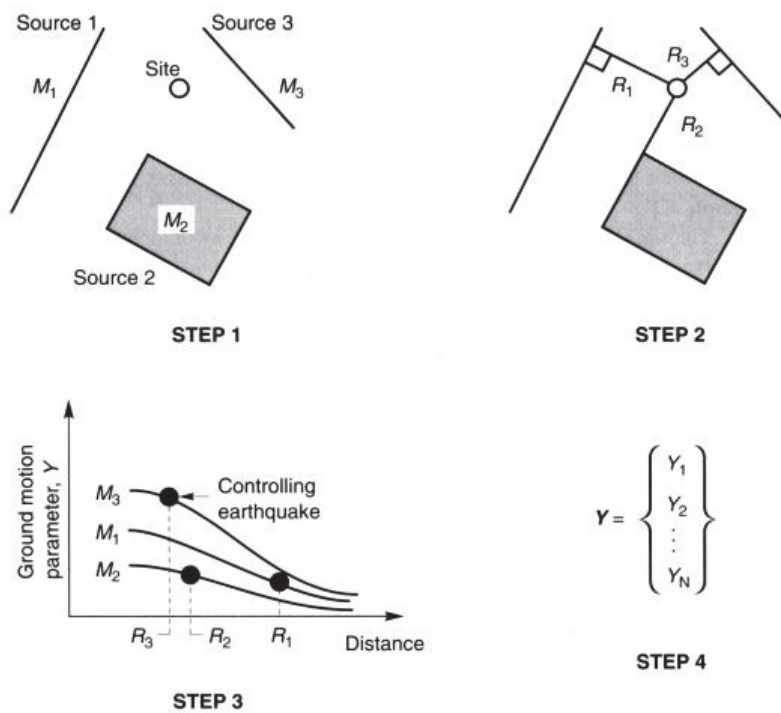
El Peligro Sísmico Determinístico (DSHA), involucra el desarrollo de un escenario particular. Este escenario se basa en la selección de un sismo de una magnitud específica, a una distancia específica del punto de análisis. Un DSHA se puede resumir en 4 pasos:

1. Identificación y caracterización de todas las fuentes sísmicas (fallas) capaces de producir un movimiento del terreno significativo en un sitio de estudio.
2. Selección de la distancia fuente-sitio de estudio para cada zona.
3. Selección del sismo “controlador” (el que produzca el mayor nivel de movimiento).
4. Cálculo del Peligro en términos de un parámetro de movimiento, por medio de una GMPE.

Este tipo de análisis DSHA es bastante útil cuando se necesita verificar los efectos de un sismo pasado, en estructuras existentes o proyectadas. Se utiliza para conocer el peor escenario sísmico que pueda afectar a una obra de infraestructura,

una debilidad de este tipo de análisis es que requiere decisiones multidisciplinarias (no técnicas. E.j. económicas, sociales, funcionales, etc). (Singaucho, 2014)

FIGURA 6.1 PROCEDIMIENTO PARA DSHA



FUENTE: (Kramer,1996)

El otro enfoque que se puede realizar en la evaluación del peligro es el análisis probabilístico. Este tipo de análisis se usó en la Norma NEC-2015 para la elaboración de las curvas de peligro sísmico. (Quizanga, 2015)

El objetivo del PSHA es cuantificar la probabilidad de exceder diferentes niveles de movimiento como el PGA, PGV, PGD en un sitio, dados todos los posibles sismos.

El análisis probabilístico provee un marco en el cuál las incertidumbres (provenientes del tamaño de un sismo, localizaciones, tasa de ocurrencias) pueden ser identificadas, cuantificadas y combinadas de manera racional para brindar un mejor panorama al peligro sísmico (Kramer, 1996)

Para evaluar el peligro sísmico este estudio utilizará un método determinístico pues se obtendrá pseudo espectros de respuesta de aceleración para la componente horizontal y vertical del suelo, calculados en los sitios indicados en el numeral 6.3 (área de estudio) para cada uno de los segmentos del sistema de falla QFS descrito en el numeral 6.2 utilizando las GMPE descritas en el capítulo 3, 4 y 5.

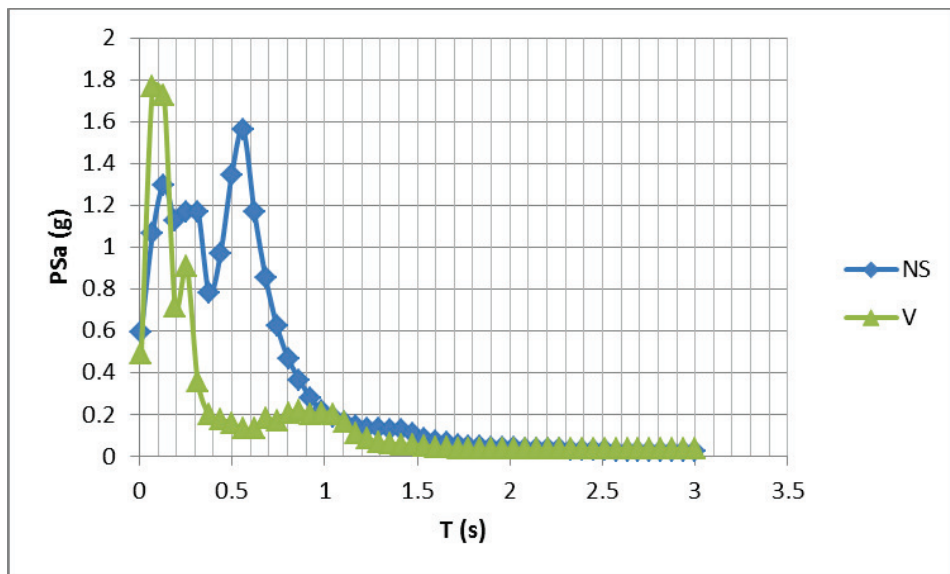
Las relaciones espectrales V/H se obtienen del cociente de la ordenada del pseudo espectro de respuesta vertical para la correspondiente ordenada del pseudo espectro de respuesta horizontal, los resultados de estos últimos se muestran de manera sucinta debido a que ese estudio fue presentado a detalle por (Aguiar y Quizanga, 2015), y su objetivo únicamente es presentarlos ante el lector para que pueda observar las formas espectrales en conjunto en base a las cuales se han determinado las relaciones espectrales V/H para la ciudad de Quito.

Con el fin de que el lector observe la forma típica de un pseudo espectro de aceleración vertical y la relación V/H obtenida a partir de registros reales, por tener a disposición se utiliza el registro del Sismo del Eje Cafetero de Colombia del 25 de enero de 1999, de Magnitud 6.2, profundidad focal muy superficial y asociado al sistema de fallas de Romeral, este es un sismo relativamente similar a los que se esperan para la ciudad de Quito.

En el registro para la componente N-S se tiene un PGA de 580.1 gals, para la componente E-W se tiene un PGA de 518.4 gals, para la componente Vertical V se tiene un PGA de 448.20 gals.

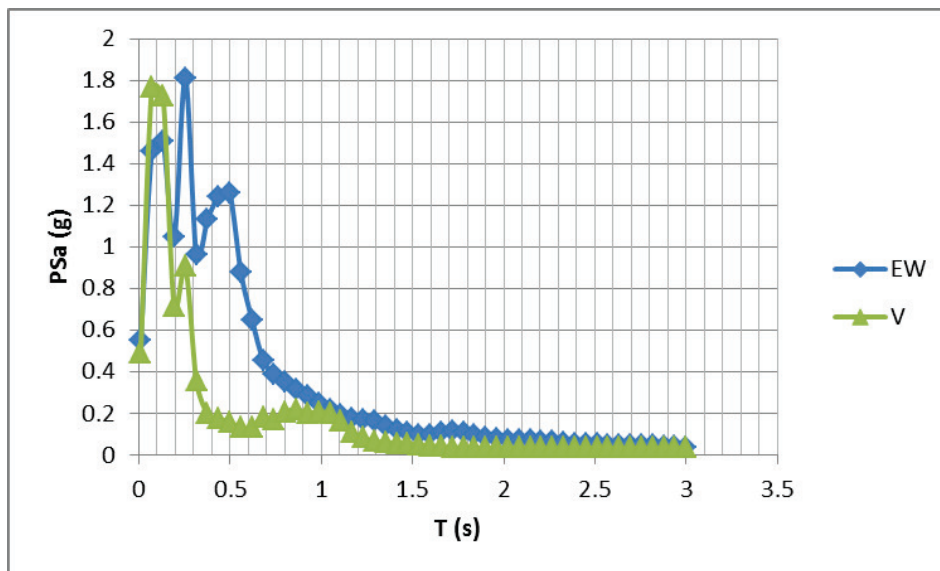
Se utiliza el programa Degtra desarrollado por Mario Ordaz investigador de la UNAM para realizar la corrección de la línea base del registro y posteriormente obtener el pseudo espectro de aceleración que se muestra en las siguientes figuras:

FIGURA 6.2 PSA COMPONENTE HORIZONTAL NS Y PSA COMPONENTE VERTICAL V



ELABORADOR: Eduardo López

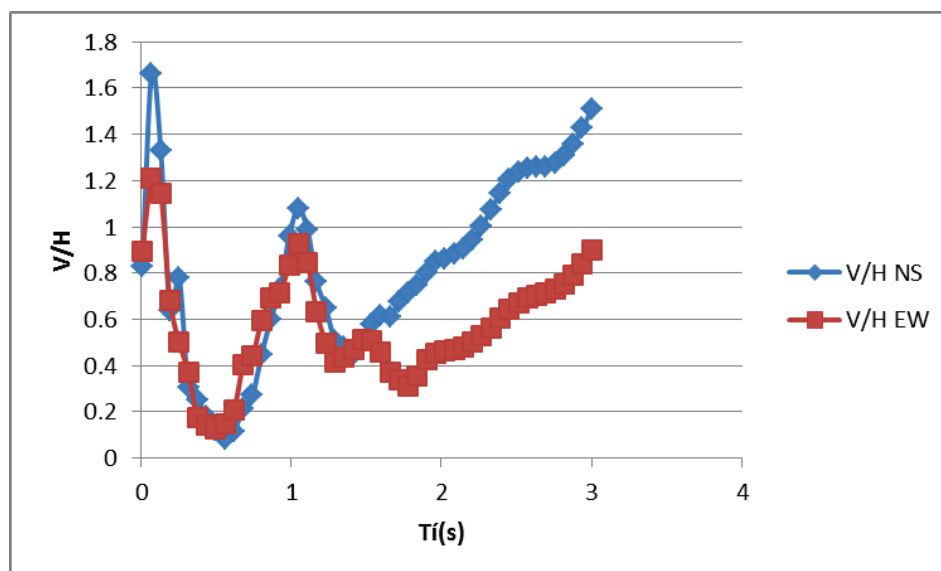
FIGURA 6.3 PSA COMPONENTE HORIZONTAL EW Y PSA COMPONENTE VERTICAL V



ELABORADOR: Eduardo López

Una vez calculado los pseudo espectros se procede a calcular las relaciones V/H, considerando cada componente horizontal, Norte-sur NS y Este-Oeste EW, en la figura 6.4 se presentan las relaciones encontradas.

FIGURA 6.4 RELACIÓN V/H (NS) Y RELACIÓN V/H (EW)



ELABORADOR: Eduardo López

En la figura 6.2 y 6.3 se observa que el pico en la ordenada del pseudo espectro para la componente vertical se da en un periodo de 0.1 s y en la figura 6.4 se observa que las relaciones V/H son variables en función del periodo, se obtiene un valor máximo de $V/H=1.7$ para la componente NS y $V/H=1.2$ para la componente EW. El lector posteriormente podrá observar los PSa y relaciones V/H calculadas con las GMPE.

6.2 MODELO NEOTECTÓNICO Y PERIODOS DE RECURRENCIA PARA LA CIUDAD DE QUITO

Alvarado en conjunto con otros investigadores en 2012, publicaron un estudio en el que se cuantificó la cinemática y determinó la geometría de fallas de Quito, mediante análisis geomorfológicos, geológicos, geodésicos e información sismológica, obteniendo de esta manera el modelo neotectónico de Quito (QFS).

El estudio de Alvarado determinó que el sistema de fallas de Quito consiste en un sistema transcurrente con rumbo NS, y un ángulo de buzamiento de 45° hacia el

oeste de una falla ciega inversa. Su afloramiento en la superficie es un sistema segmento graduado de pliegues con una longitud superior a 60 km. Cada segmento individual tiene una compresión principal y una componente secundaria transcurrente dextral, evidenciado por una geometría tipo “enchelon”. Este primer grupo está mejor expresado en su parte Norte y parece migrar al Noreste, conectándose de este modo a la falla de Guayllabamba (Alvarado et al, 2012).

En otras palabras la falla de Quito es del tipo inversa y tiene componentes transcurrente dextral. (Quizanga, 2015)

En la Figura 6.5., se observa el sistema de fallas de Quito (QFS) y el sistema de fallas cercano de Guayllabamba (GFS) por sus siglas en inglés. Se puede decir también que existen tres cuencas en la ciudad, desde el sur con dirección al norte se tiene las cuencas del: Machangara, Batán y la de San Antonio. (Alvarado, 2012).

En la Figura 6.6., se muestra la longitud de superficie de ruptura (Surface ruptura long SRL) de cada uno de los siguientes segmentos de falla, denominados:

- Puengasí, **P**;
- Ilumbisí La Bota, **ILB**;
- Carcelen el Inca, **CEI**;
- Bellavista Catequilla, **BC**;

Dichos segmentos de falla, definen el mapa neotectónico de la ciudad de Quito. (Alvarado, 2012).

Para este estudio no se ha considerado incluir al segmento Tangahuilla porque se encuentra a una distancia considerable del área de estudio definida en el numeral 6.3 y no se dispone de información de Vs30.

Considerando el ancho (width W) de falla de cada uno de los segmentos de falla, se determinó el área del plano de falla (ruptura área RA), los mismos que se presentan en la Figura 6.7., (Rivas, et al, 2014); al aplicar las ecuaciones de (Leonard, 2010), se halla la magnitud máxima M_w , esperada ya sea en función de la longitud de ruptura SLR o del área de ruptura RA .

$$M_w = 1.52 \log(SLR) + 4.4 \quad (6.1)$$

$$M_w = 1.0 \log(RA) + 4 \quad (6.2)$$

En la tabla 6.1 se indica el área de ruptura, la magnitud máxima hallada en base al área, la longitud de ruptura y la magnitud máxima hallada en base a la longitud. En la última fila se presenta la falla de Tangahuilla que en este estudio no se la considera por encontrarse a una distancia considerable del norte de la ciudad de tal manera que un sismo generado en este segmento de falla no va a reportar ordenadas espectrales importantes.

TABLA 6.1 MAGNITUD MÁXIMA ESPERADA EN CADA SEGMENTO DE LAS FALLAS DE QUITO

Segmento de Falla	Área ruptura (km ²)	Magnitud en base al Área	Longitud de ruptura (km)	Magnitud en base a Longitud
Puengasí	259	6.4	22	6.4
ILB	176	6.2	15	6.2
CEI	82	5.9	7	5.7
BC	191	6.3	17.5	6.3
Tangahuilla	108	6.0	12	6.0

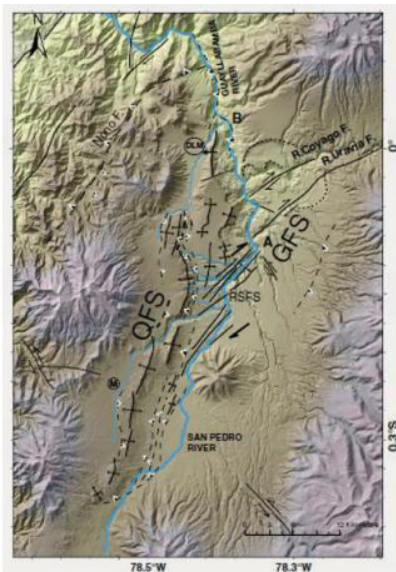
FUENTE: (Rivas et al. 2014)

No se puede definir en forma exacta el plano de falla que se daría al producirse un sismo en cualquiera de los segmentos de falla, pero debe estimarse, para poder calcular pseudo espectros asociados a la ocurrencia de un sismo en uno de los segmentos de falla, con magnitud máxima.

Se asumió un escenario tectónico en que cada falla rompe de manera independiente y que el hipocentro siempre estará en el centro de la traza expuesta o proyección vertical de la falla en la superficie.

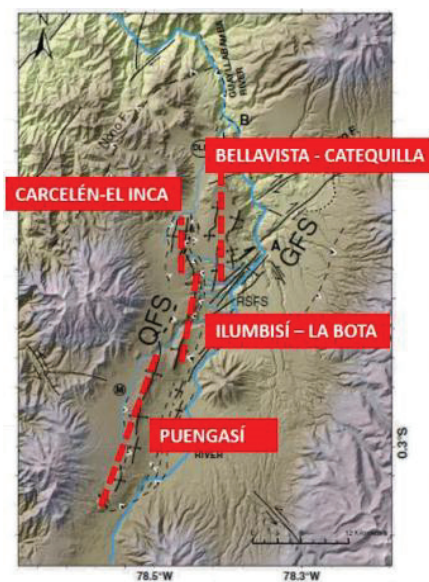
Los sismos que se van a generar en las fallas inversas de Quito son del tipo impulsivo, que son de corta duración pero con un pulso de velocidad muy alto que lo convierten en muy destructores en el campo cercano. (Frau, et al., 2012) y por ende poseen una componente vertical del movimiento del suelo importante.

FIGURA 6.5 NUEVO MAPA NEOTECTÓNICO DE LA CIUDAD DE QUITO.



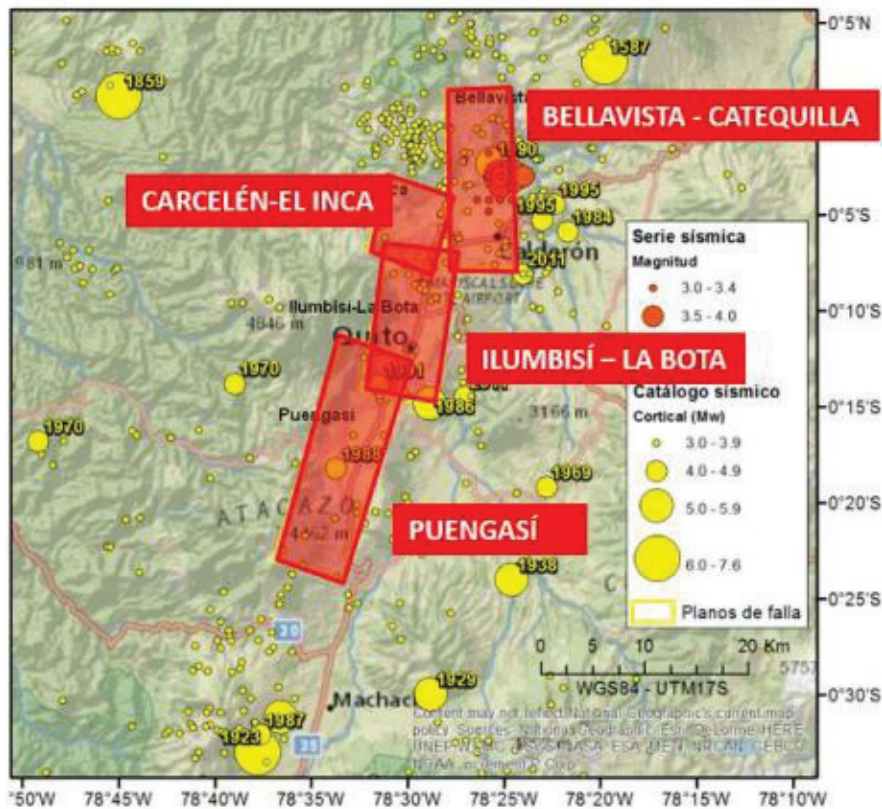
FUENTE: (Alvarado, 2012)

FIGURA 6.6 LONGITUD DE SUPERFICIE DE RUPTURA.



FUENTE: (Alvarado, 2012)

FIGURA 6.7 PLANO DE FALLA



FUENTE: (Rivas et al. 2014)

Al estar la ciudad sobre fallas inversas, la componente vertical, de movimiento del suelo, es muy importante razón por la cual se necesita conocer la forma de los espectros, que se generarían ante la componente horizontal y vertical.

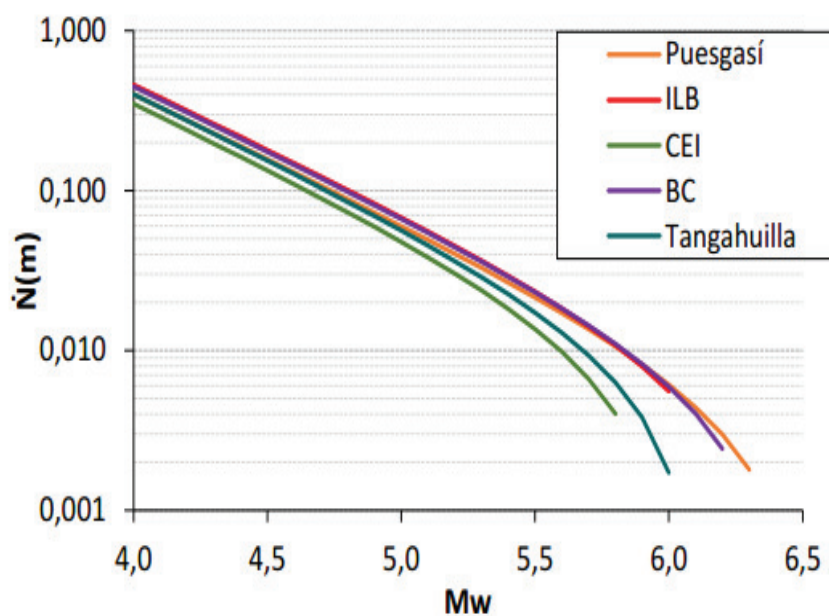
Por otra parte, se ha determinado el Período de Recurrencia, para cada segmento de falla, con el modelo de Gutenberg y Richter Modificado (GR), suponiendo un valor de b entre 0.8 – 1.0, una tasa de deslizamiento entre 3.0 y 4.0 mm/año y considerando que la falla puede romper con sismos que van desde una $M_{min}=4.0$ (lo que implica asumir que la energía liberada en la falla por terremotos de menor magnitud es ínfima en relación a la energía liberada por los terremotos de magnitud $M \geq 4.0$) y una $M_{max} = \text{Magnitud}_{(RA)}$ indicada en la tabla 6.1. Las tasas de sismos y los periodos de recurrencia asociadas a diferentes rangos de magnitudes son los mostrados en la tabla 6.2. (Rivas, et. al, 2014).

TABLA 6.2 PERÍODO DE RECURRENCIA, HALLADOS CON MODELO DE GUTENBERG Y RICHTER MODIFICADO.

Rango de magnitudes	Periodo de recurrencia (años)				
	Puengasí	ILB	CEI	BC	Tangahuilla
[5.0 - 5.5)	20 - 35	18 - 30	27 - 39	18-31	23-34
[5.5 - 6.0)	62 - 87	56 - 75	85-130	58-78	65-97
[6.0 <	164 - 262	179-279			579-1016
Mmax	1224-2190 (Mw6.4)	610-981 (Mw6.2)	549-952 (Mw5.9)	908-1630 (Mw6.3)	579-1016 (Mw6.0)

FUENTE: (Rivas et al. 2014)

FIGURA 6.8 TASA ACUMULADA DE SISMOS PARA LOS SEGMENTOS DE LAS FALLAS CIEGAS DE QUITO (GRÁFICA DESARROLLADA CON UNA $B=0.9$ Y TASA DE DESLIZAMIENTO DE 3.5 MM/AÑOS).



FUENTE: (Rivas et al. 2014)

En la Figura 6.8., se presenta la tasa acumulada $\dot{N}(m)$ en función de la magnitud, en función de la magnitud M_w . La inversa de la tasa acumulada reporta el período de recurrencia, de ahí la importancia de esta gráfica que permite encontrar el período de recurrencia para las rupturas de diferente tamaño que puedan producirse en los diferentes segmentos de las fallas ciegas inversas de Quito.

Se encontrarán espectros asociados a la magnitud máxima indicada en la última fila de la tabla 6.2., de tal manera que están asociados a los períodos de recurrencia que allí se indican. En términos generales se puede decir que el período de recurrencia está alrededor de los 1000 años, en forma específica se tiene un rango de variación del período de recurrencia.

Al estar por el orden de los 1000 años, se puede considerar que para las estructuras de la ciudad de Quito, los espectros que se obtienen a partir de un sismo cuya fuente es uno de los segmentos de las fallas ciegas inversas, con magnitud máxima esperada, es el sismo máximo considerado MCE, y que el sismo de diseño es el que se obtiene con el espectro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-15, o el del estudio de la microzonificación sísmica de Quito (ERN, 2012), que vendría a ser el sismo de diseño DBE.

6.3 EL ÁREA DE ESTUDIO

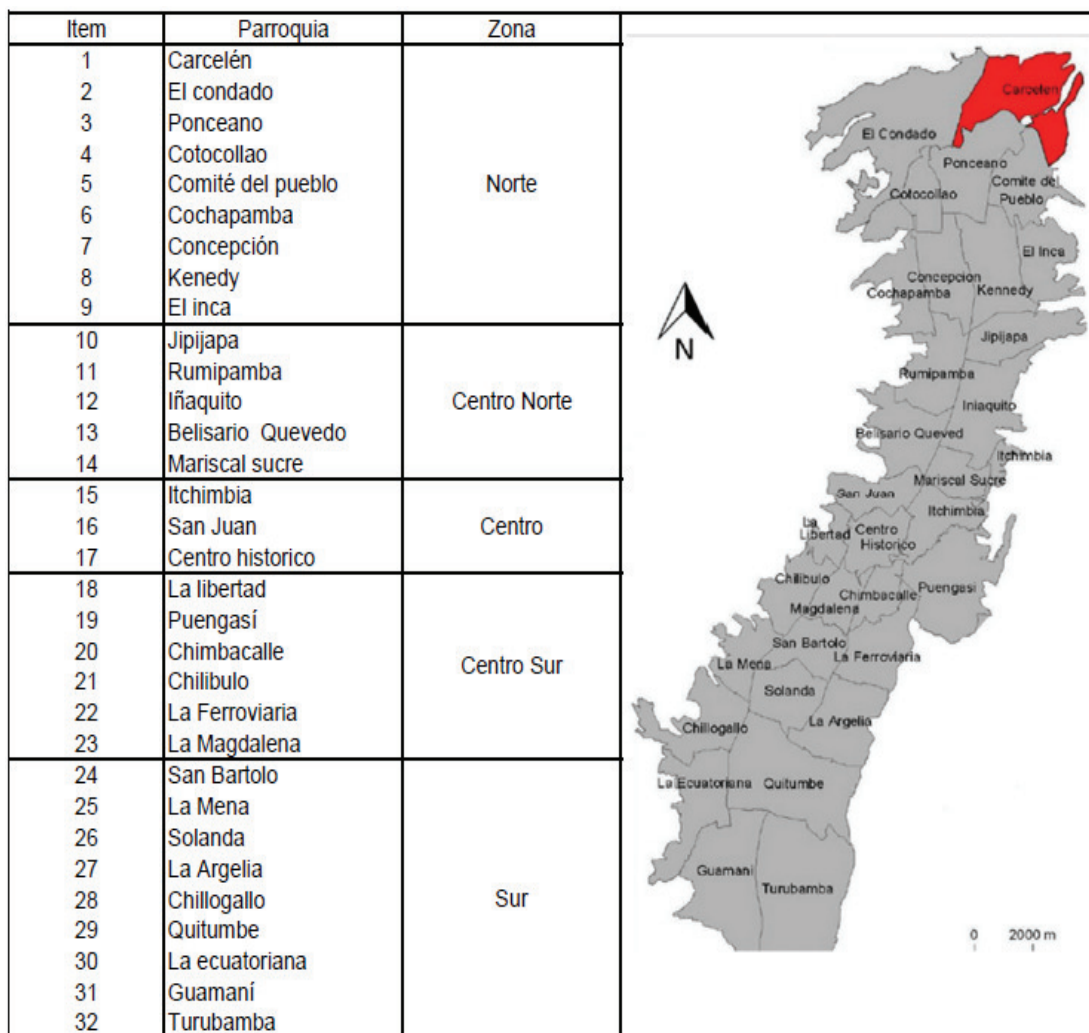
El área de estudio es el distrito metropolitano de Quito, el mismo que va a ser analizado de dos maneras; la primera llamada **análisis por zonas** considerando 5 zonas (Norte, centro norte, centro, centro sur, sur), la segunda llamada **análisis por distancias Rrup** asumiendo distancias más cercanas al plano de ruptura $R_{rup} = 5\text{km}, 10\text{km}, 15\text{km}, 20\text{km}, 30\text{km}$; a continuación se expone con mayor detalle.

El distrito metropolitano de Quito tiene 65 parroquias de las cuales 32 conforman la zona urbana de la ciudad de Quito. El área de estudio está limitada únicamente a estas parroquias que conforman la parte urbana de la ciudad. No se ha considerado incluir en la zona de estudio las parroquias rurales porque para la

determinación del factor V_{s30} no se tiene una cantidad adecuada de información geotécnica que permita estimar los valores de este factor V_{s30} . (Quizanga, 2015)

En la figura 6.9 se presenta las 5 zonas de Quito (Norte, centro norte, centro, centro sur, sur) y las correspondientes parroquias urbanas.

FIGURA 6.9 ÁREA DE ESTUDIO

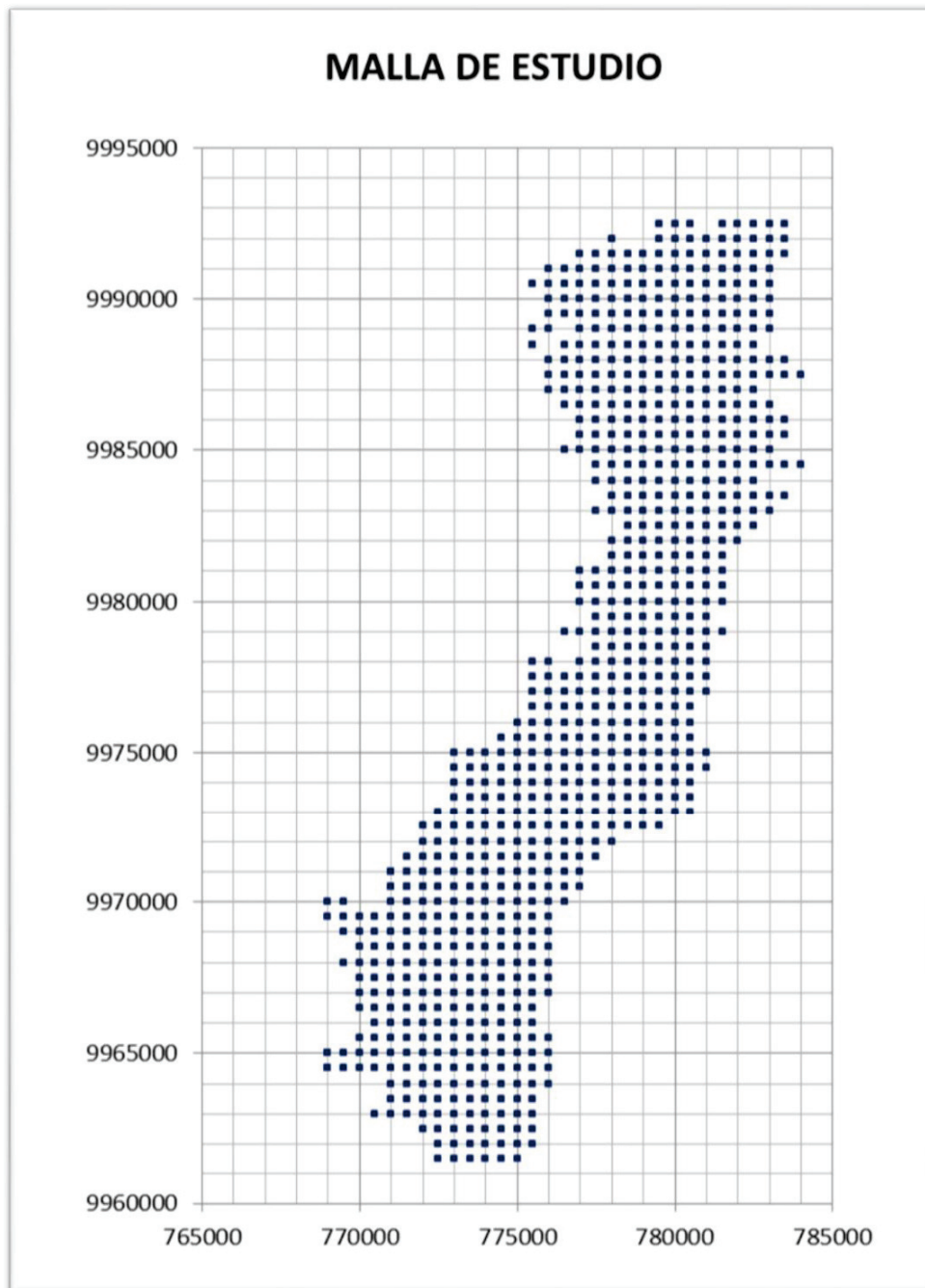


FUENTE: Municipio de Quito

En esta área de estudio, se creó una malla de puntos (sitios de análisis) separados entre sí 500 m en sentido longitudinal ((Norte-Sur) y transversal (Este-Oeste). Se tiene de esta manera un total de 810 puntos (sitios de análisis) dentro de la malla.

La figura 6.10 muestra la malla de 810 puntos (sitios de análisis), definidos por una coordenada UTM (Universal Transverse Mercator).

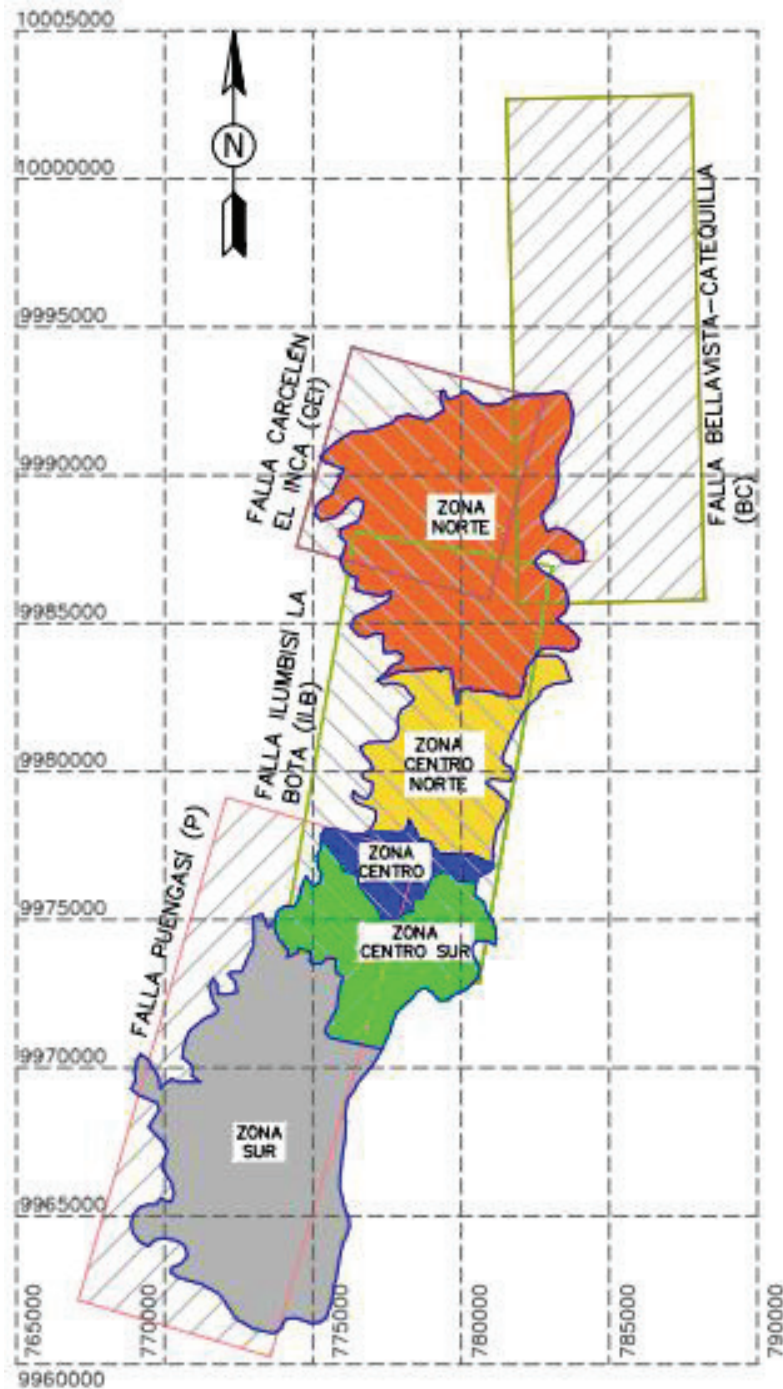
FIGURA 6.10 MALLA DE PUNTOS (SITIOS DE ANÁLISIS) EN ÁREA DE ESTUDIO



FUENTE: (Quizanga, 2015)

La figura 6.11, presenta el área de estudio (Zona Norte, centro norte, centro, centro sur, sur) y los planos de falla del sistema QFS (Bellavista Catequilla BC, Carcelen el Inca CEI, Ilumbisi la Bota ILB, Puengasí P)

FIGURA 6.11 ÁREA DE ESTUDIO Y PLANOS DE FALLA



ELABORACIÓN: Eduardo López, FUENTE: Aguiar 2013, Alvarado et al. 2012,

Para el **análisis por zonas** para cada punto de estudio de la figura 6.10, se debe obtener los parámetros de fuente sísmica (M_w , Z_{TOR} , W , dip , λ), de trayectoria (R_{rup} , R_{JB} , R_x , H_w) y de sitio (V_{s30} , $Z_{1.0}$, $Z_{2.5}$) requeridos por los modelos de movimiento fuerte presentados en el capítulo 3, 4 y 5 y asociados a cada una de las fallas del QFS.

Para el **análisis por zonas** se han determinado pseudo espectros de respuesta de aceleración para la componente horizontal y vertical en cada punto, sin embargo se reporta los pseudo espectros promedios por cada zona y asociados al respectivo factor de sitio y a la falla geológica con la que se reportan las ordenadas espectrales de control, consecuentemente cabe el mismo criterio para las relaciones espectrales V/H.

Para el **análisis por distancias R_{rup}** , se asume directamente puntos de análisis con distancias más cercanas al plano de ruptura $R_{rup}=5\text{km}$, 10km , 15km , 20km , 30km , y se determina también los parámetros de fuente sísmica asociado a cada una de las fallas del QFS y los parámetros de sitio considerando suelo tipo C, D y E de acuerdo al NEC-15. Se presenta directamente los pseudo espectros de respuesta de aceleración para la componente horizontal y vertical obtenida en cada punto, así como también las relaciones espectrales V/H.

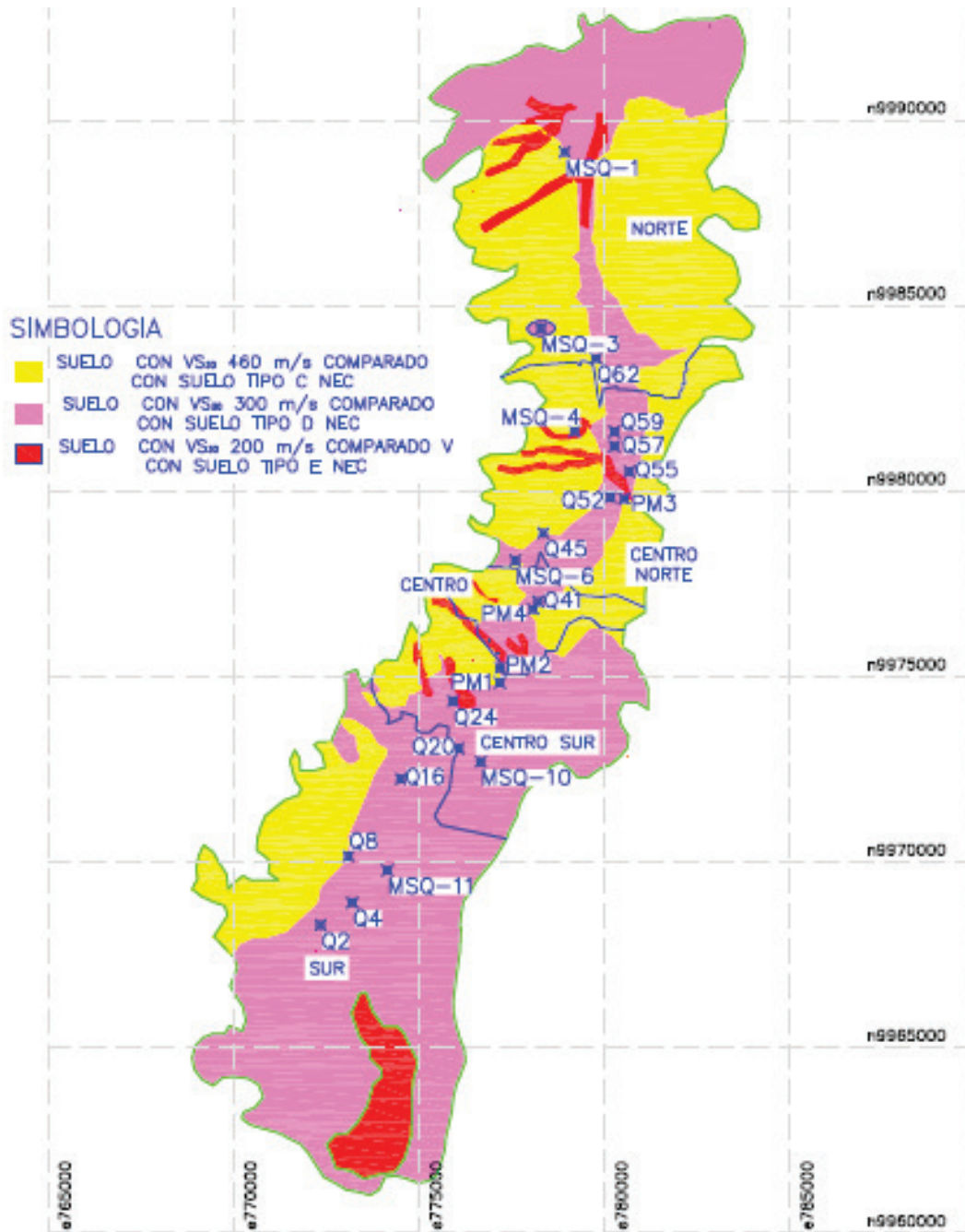
Cabe anotar que estrictamente para la ciudad de Quito no aplica la distancia $R_{rup} = 1\text{km}$, puesto que el valor Z_{TOR} está alrededor de 4 km , por lo que R_{rup} resulta al menos igual a ese valor.

6.3.1 VELOCIDAD MEDIA DE CORTE V_{s30} EN QUITO

Para el **análisis por zonas**, el parámetro de sitio utilizado en los modelos de movimiento fuerte V_{s30} velocidad media de la onda de corte de 0 a 30 metros, fue tomado del estudio de (Aguiar y Quizanga 2015), quienes debido a que en la actualidad no existe un estudio de microzonificación de suelos de acuerdo a los perfiles que menciona la NEC-15, ni tampoco un mapa de isovelocidades de la ciudad de Quito, tomaron los tres estudios de refracción sísmica siguientes: 1. “Estudio para el metro de Quito”, 2. “Reforzamiento sísmico de las edificaciones de los centros educativos municipales del Distrito metropolitano de Quito (Planman, 2012)”, 3. “Microzonificación sísmica de Quito, (ERN, 2012)” y se superpuso la

ubicación de los sondeos de refracción sísmica sobre la microzonificación propuesta por Valverde, 2002, para de esta manera obtener un V_{s30} de referencia.

FIGURA 6.12 ESTUDIOS REALIZADOS POR ERN, PLANMAN, METRO, SOBRE MICROZONIFICACIÓN DE VALVERDE



FUENTE: Quizanga, 2015

Se tienen 25 sondeos en diferentes lugares de la ciudad, se puede observar que la mayoría de sondeos caen dentro de las zonas que Valverde, 2002 clasificó como "S2-CEC200", en esas zonas los sondeos dieron una media de 300 m/s por lo que se considera que es un valor adecuado para ser utilizado en el cálculo de los pseudo espectros, con un razonamiento similar se llegó a determinar los valores V_{s30} que le corresponden al suelo tipo S1 y S3.

A manera de resumen se indica que este estudio considera que la ciudad de Quito tiene velocidades de onda de corte V_{s30} de 460m/s (suelo tipo C NEC-15), 300m/s (suelo tipo D NEC-15) y 200m/s (suelo tipo E NEC-15), como se presenta en la figura 6.12. Para mayor detalle de este parámetro referirse a (Quizanga 2015)

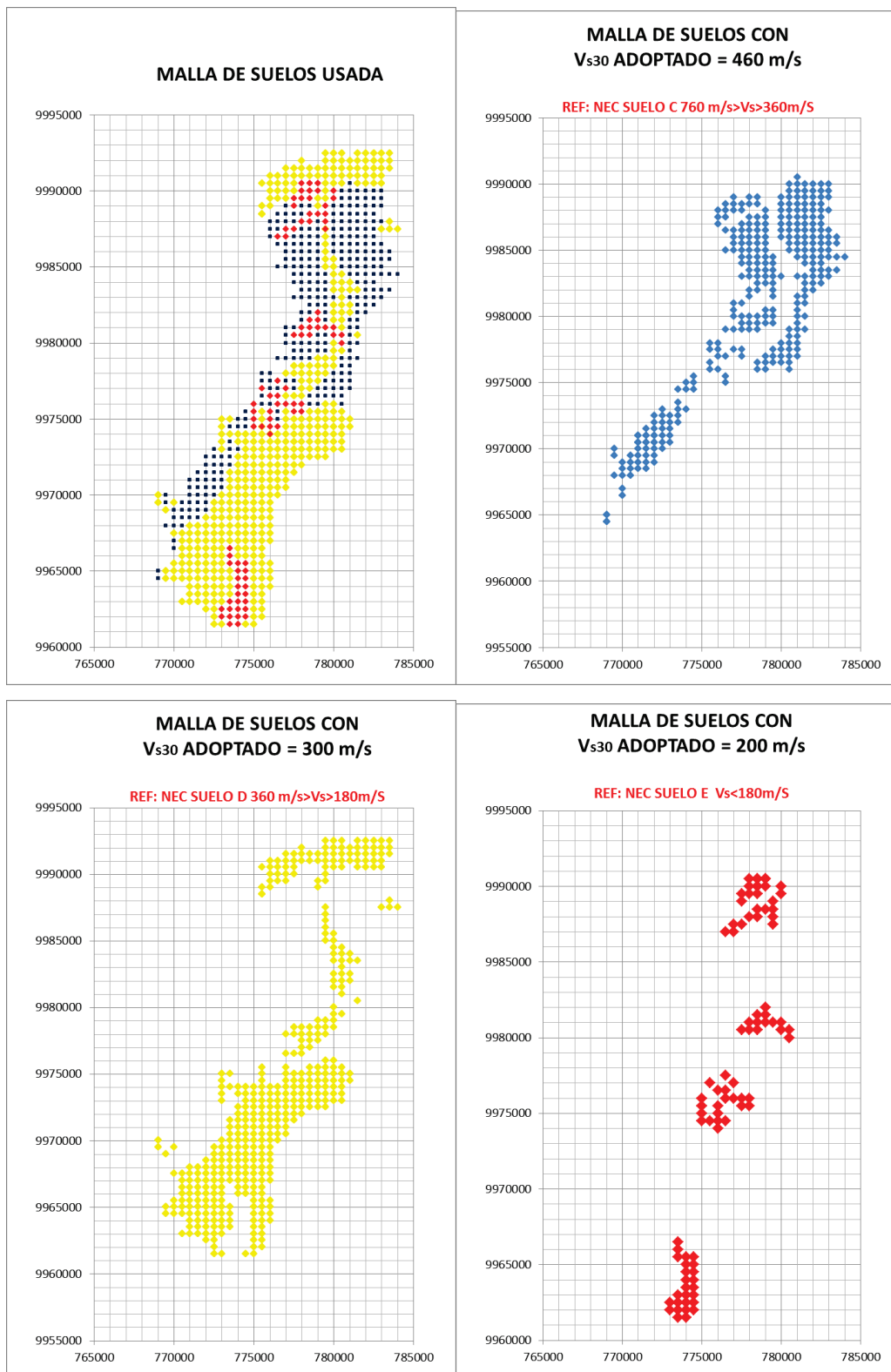
Para el **análisis por distancias R_{rup}** , para cada punto de análisis se decide imponer las mismas velocidades de onda de corte V_{s30} de 460m/s, 300m/s y 200m/s, luego se presentan en una misma gráfica los pseudo espectros para distancias R_{rup} =5km, 10km, 15km, 20km, 30km con igual velocidad de onda de corte, de esta manera se puede evidenciar la influencia de la distancia de la fuente al sitio, la influencia del efecto de sitio y poder emitir comentarios entre los dos análisis utilizados.

6.3.2 LA MALLA OBTENIDA

Para el **análisis por zonas**, la malla de la figura 6.10 se subdivide en función del tipo de suelos indicado en el numeral 6.3.2. Obteniendo de esta manera las 3 mallas indicadas en la figura 6.13, en la cual los puntos azules corresponden a los que se ha asumido V_{s30} =460m/s, los puntos amarillos corresponden a los que se ha asumido V_{s30} =300m/s y los puntos rojos corresponden a los que se ha asumido V_{s30} =200m/s.

Debido a que se van a calcular pseudo espectros promedios por cada una de las 5 zonas de Quito, vale mencionar que las 3 mallas indicadas deben subdividirse por cada zona por lo que se tiene 15 submallas para el análisis por zonas.

FIGURA 6.13 MALLAS USADAS EN FUNCIÓN DEL FACTOR V_{s30} ADOPTADO



FUENTE: Quizanga, 2015

6.4 ANALISIS POR ZONAS

6.4.1 PSa PSEUDO ESPECTROS (COMPONENTE HORIZONTAL)

El estudio de Aguiar y Quizanga 2015, calculó pseudo espectros para la componente horizontal en cada zona de la ciudad ante cada falla del QFS, de esa manera determino que la falla de Puengasi P, es la que genera mayores respuestas de aceleración en tres sectores de la ciudad que son: sur, centro-sur, centro; en el sector centro norte y norte el segmento de falla que genera una aceleración máxima es el de Ilumbisi-La Bota ILB, por tanto los pseudo espectros calculados para dichas fallas y sus correspondientes zonas toman el nombre de pseudo espectros de control para la ciudad de Quito que son únicamente los que se presentaran en este estudio.

En el numeral 6.4.3 se presentan en una misma grafica los pseudo espectros de control de componente horizontal y vertical, con el propósito de que el lector observe las formas y ordenadas espectrales de cada componente, debido a que en función de estas se determinan las relaciones V/H; por tanto no se ve la necesidad de presentarlos en este numeral y el lector podrá referirse a Aguiar y Quizanga, 2015, de requerir detalles.

6.4.2 PSa PSEUDO ESPECTROS (COMPONENTE VERTICAL)

Para la componente vertical, al igual que para la componente horizontal, se presentan únicamente los pseudo espectros de control, es decir los asociados a las fallas P y ILB con sus correspondientes zonas de influencia, para lo cual se utiliza la malla obtenida en el numeral 6.3.2. Para etiquetar los modelos de atenuación para la componente vertical en las gráficas se utiliza las siguientes abreviaciones:

Bozorgnia & Campbell (2013)	BC13
Choiu & Youngs (2013)	CY13
Zeynep Gulerce et., al (2013)	GKAS13

En las figuras se presentan los pseudo espectros de respuesta de aceleración (PSa) para el 5% de amortiguamiento para la componente vertical del movimiento del suelo.

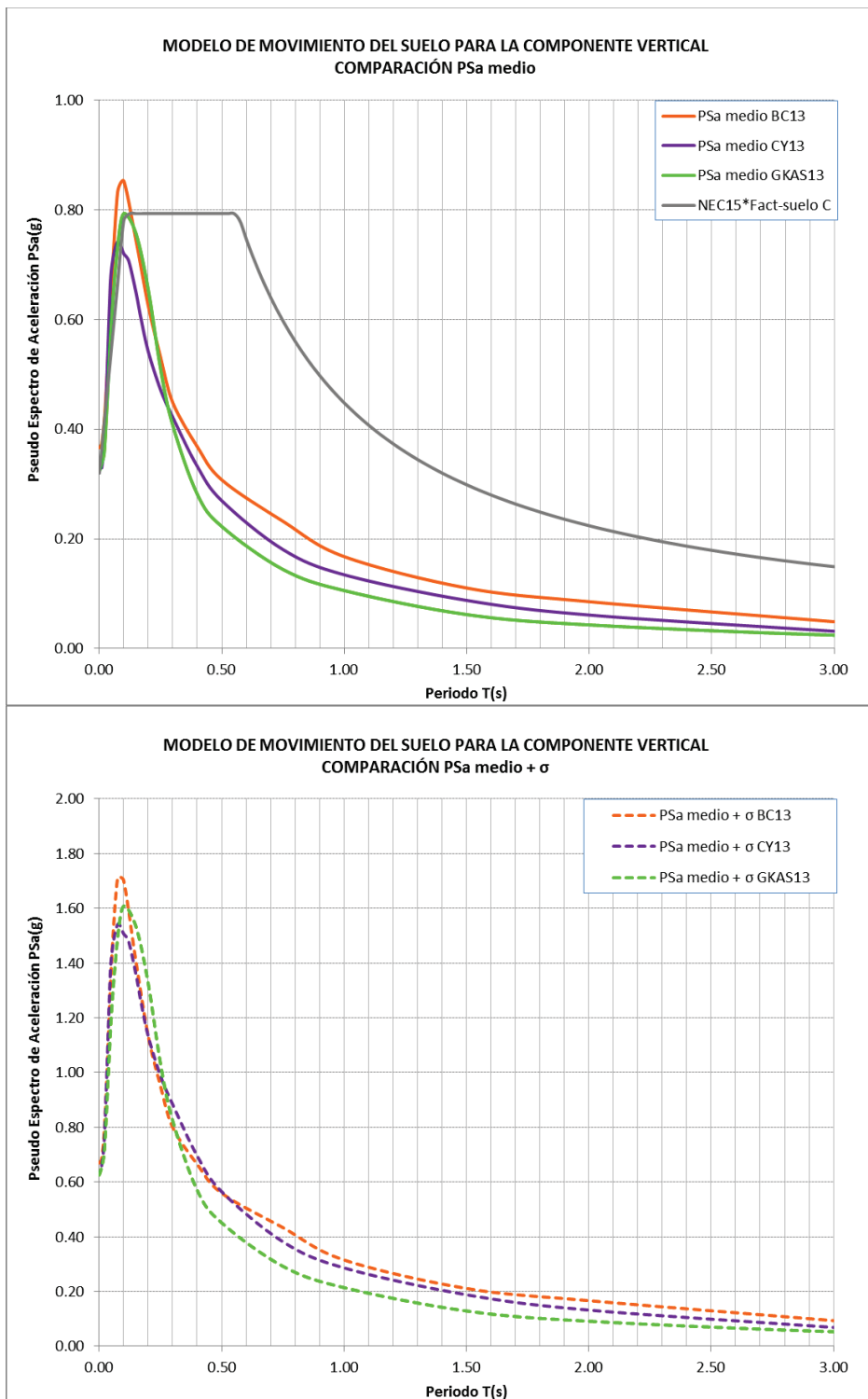
En cada figura, existen 2 graficas, la superior presenta el **PSa medio** para cada modelo; esto significa que no se ha tomado en cuenta el valor de la desviación estándar entonces se tiene un 50% de nivel de confianza, la inferior presenta el **PSa medio + σ** para cada modelo; esto significa que se ha considerado el 100% de la desviación estándar entonces se tiene un 84% de nivel de confianza. El nivel de confianza es la probabilidad de que el valor calculado (en este caso los pseudo espectros de respuesta de aceleración) este dentro de un rango llamado intervalo de confianza.

Adicionalmente en las gráficas del PSa medio, se ha incorporado únicamente como referencia el espectro de diseño de la norma NEC-15 escalado por 2/3 para obtener el espectro de diseño vertical, en las gráficas se encuentra etiquetado como NEC-15*Fact y está elaborado para cada tipo de suelo en función de la velocidad de onda de corte V_{s30} con la que se han calculado los pseudo espectros.

Se recalca que los espectros obtenidos en este estudio son determinísticos por lo que están asociados a una tasa de recurrencia que se mostró en la tabla 2.2 cuando se analizó el modelo neotectónico de Alvarado et al y a un nivel de confianza relacionado con la desviación estándar (σ).

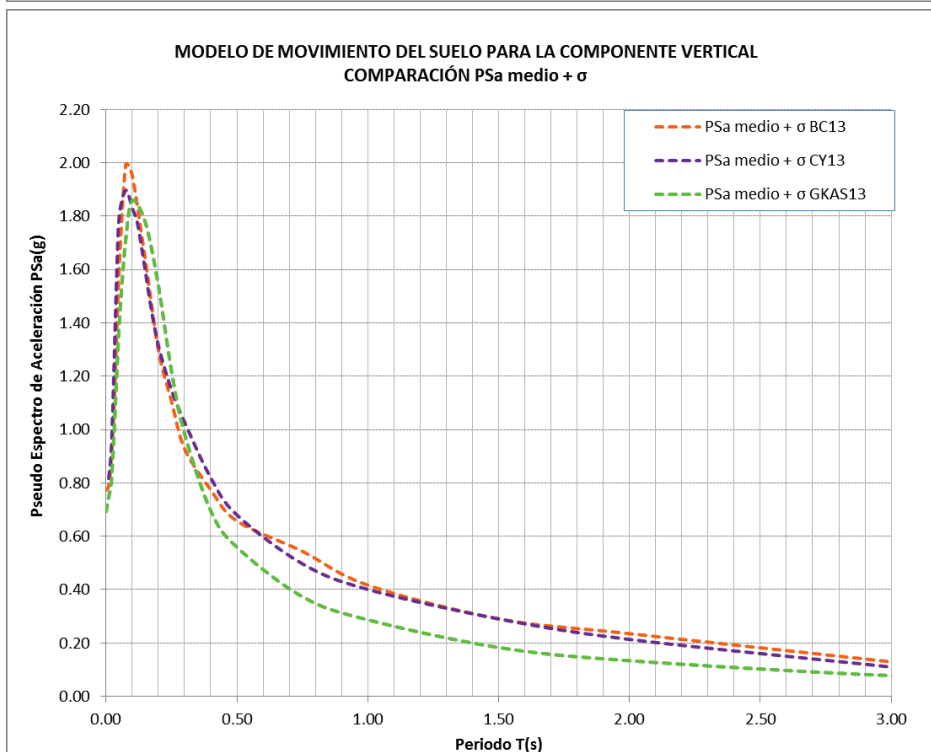
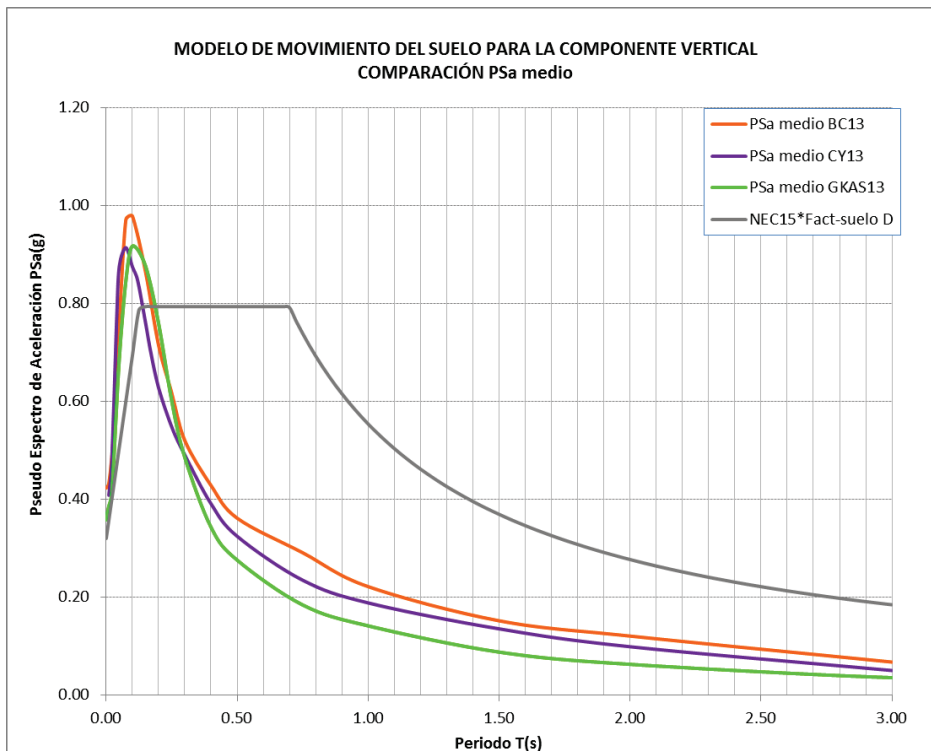
En este punto es importante mencionar que el espectro del NEC-2015 es un espectro obtenido con un método probabilístico es decir para su cálculo se consideraron simulaciones estocásticas de acelerogramas artificiales, y estudios de formas espectrales. (Quizanga 2015). Por tanto estrictamente no se debe comparar modelos determinísticos con modelos probabilísticos, sin embargo se lo incorpora únicamente como referencia para el lector.

FIGURA 6.14 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, SECTOR.
 SUR, $VS_{30}=460\text{M/S}$
 MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



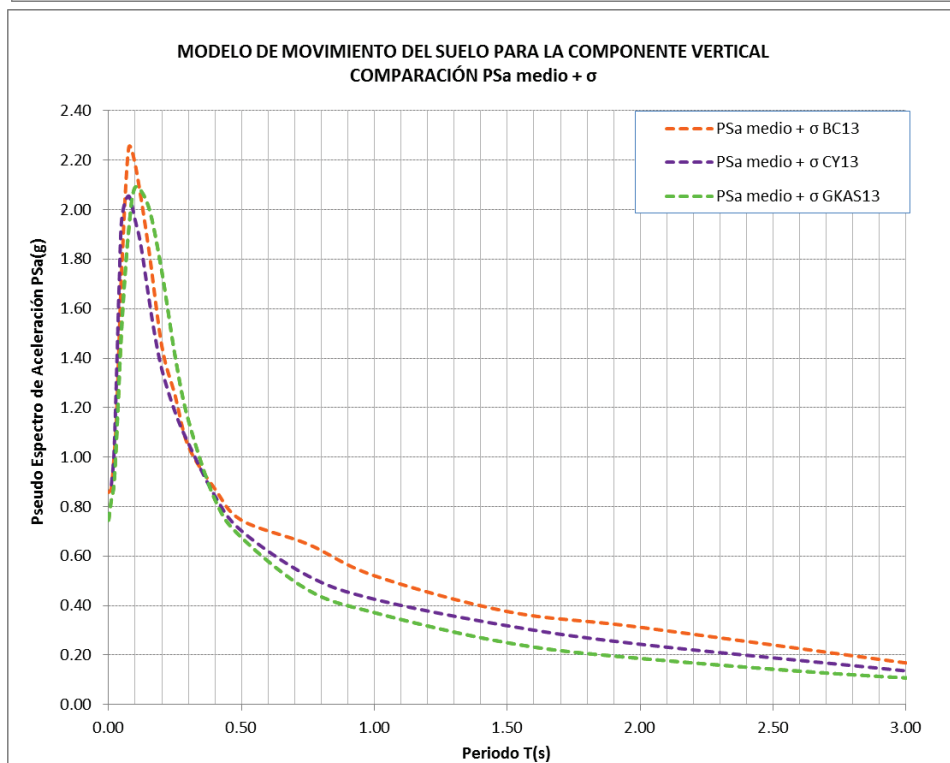
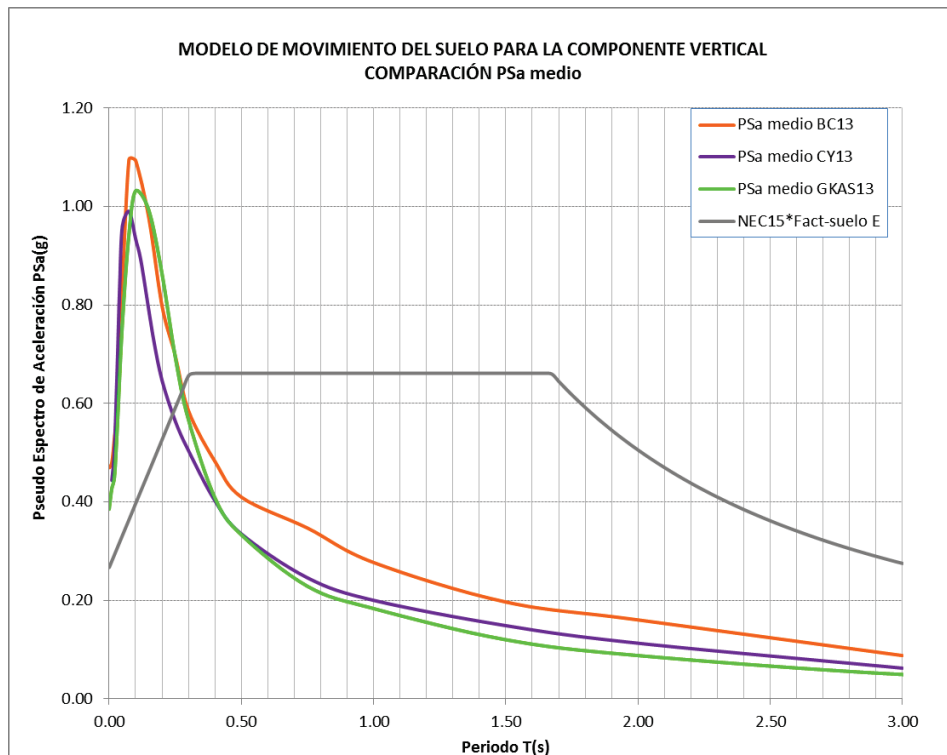
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.15 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, SECTOR.
 SUR, $VS_{30}=300M/S$
 MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



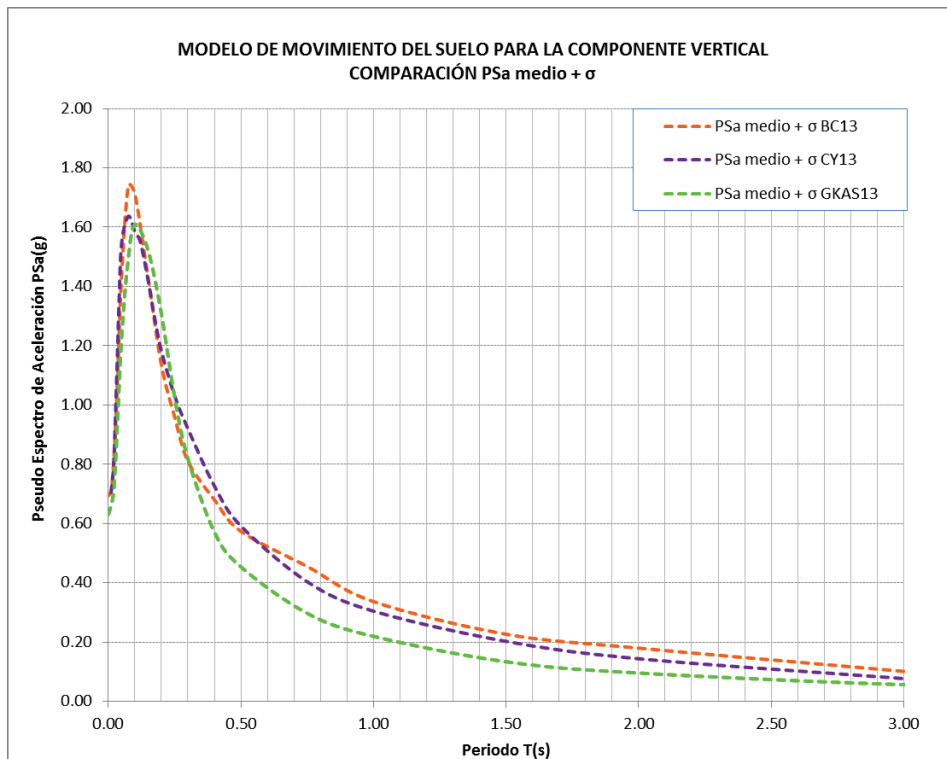
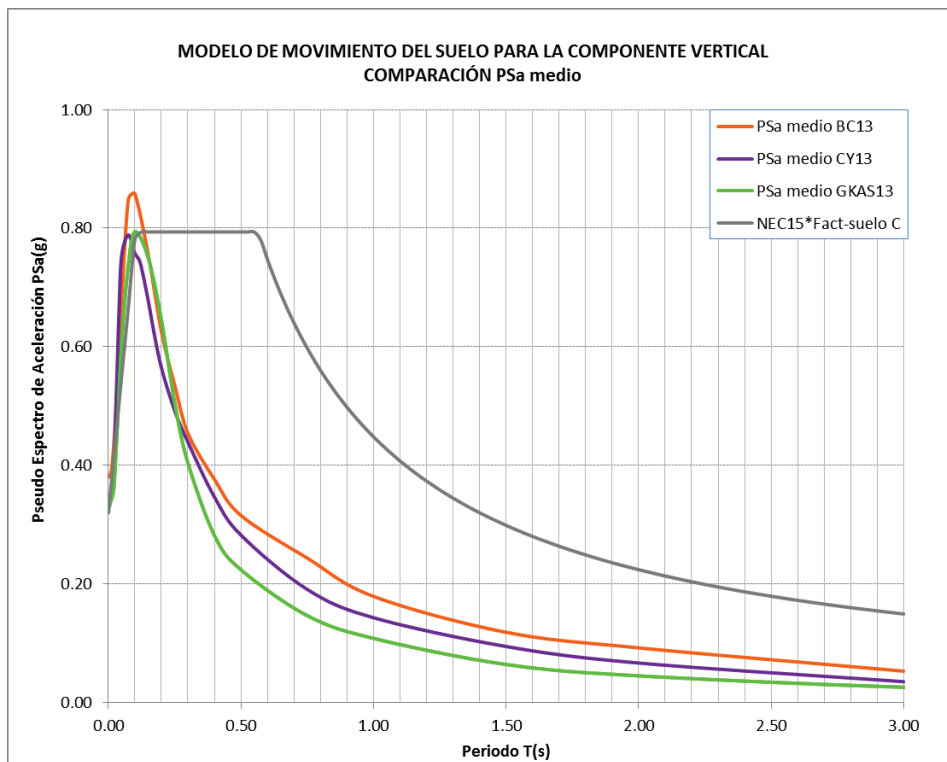
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.16 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, SECTOR.
 SUR, $VS_{30}=200M/S$
 MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



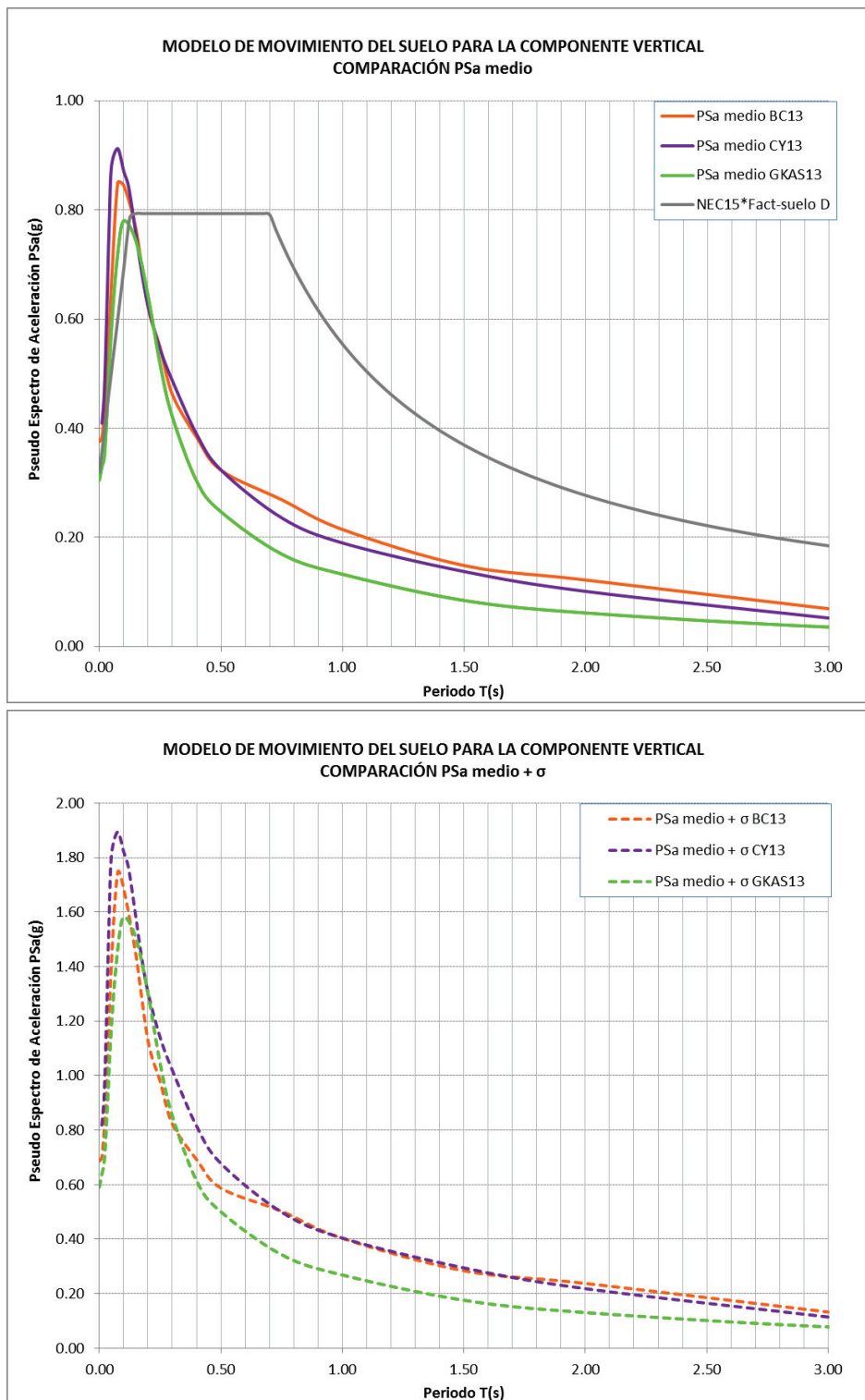
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.17 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, SECTOR CENTRO-SUR, $V_{S30}=460\text{M/S}$ MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



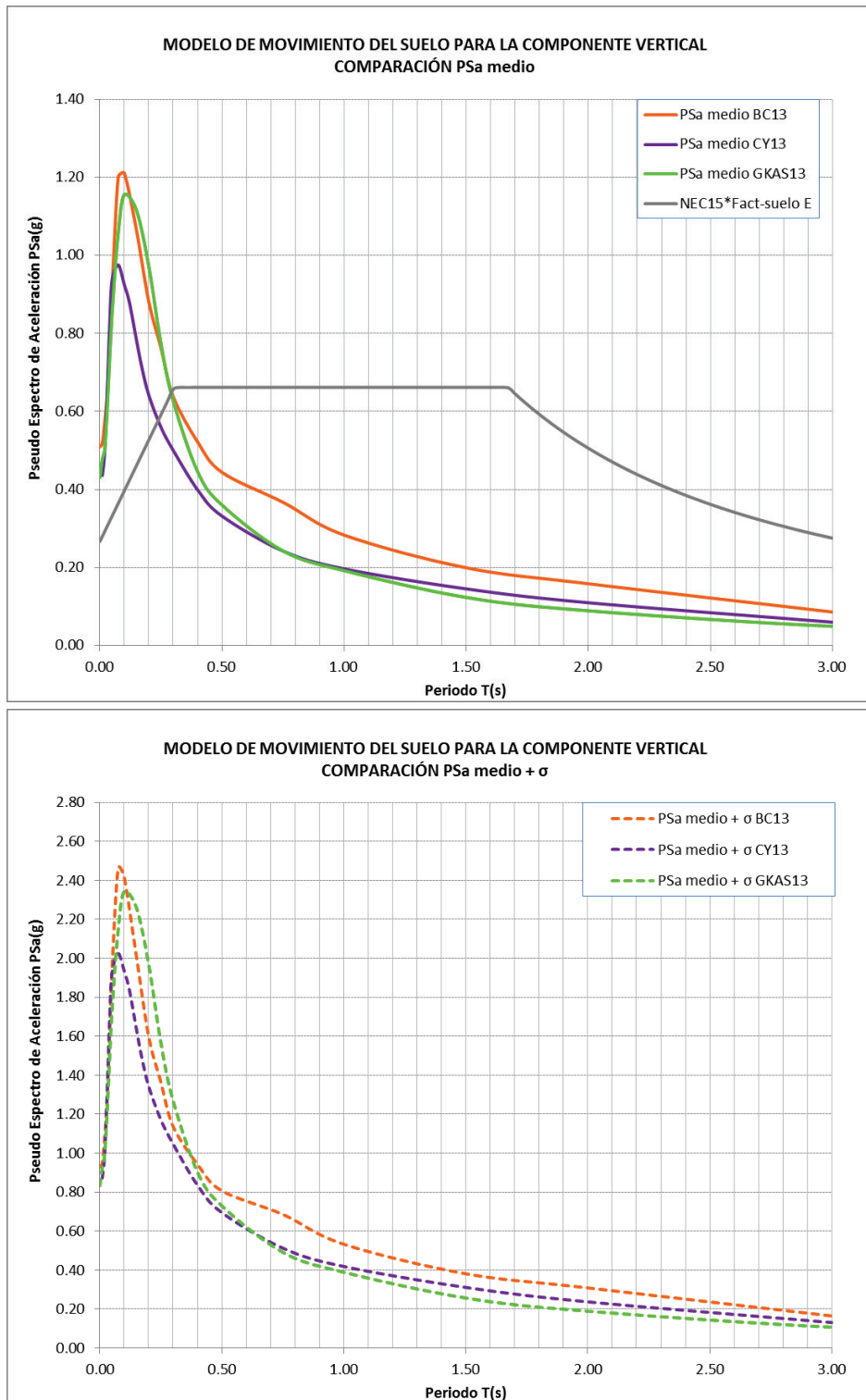
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.18 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, SECTOR CENTRO-SUR, $V_{S30}=300\text{M/S}$ MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.19 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, SECTOR CENTRO-SUR, $V_{S30}=200\text{M/S}$ MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.20 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, SECTOR CENTRO, $VS_{30}=460\text{M/S}$ MODELOS, BC13, CY13, GKAS13

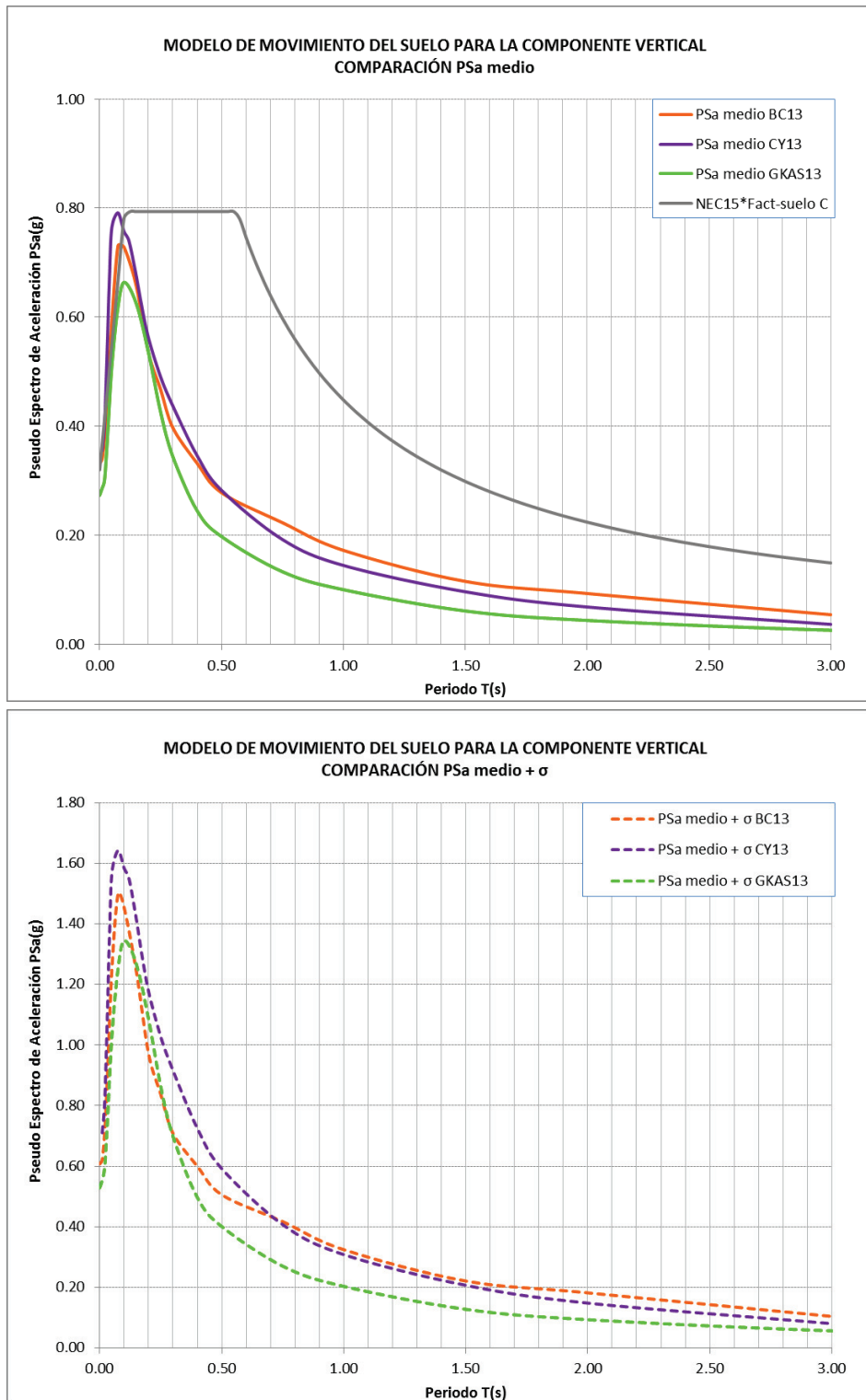
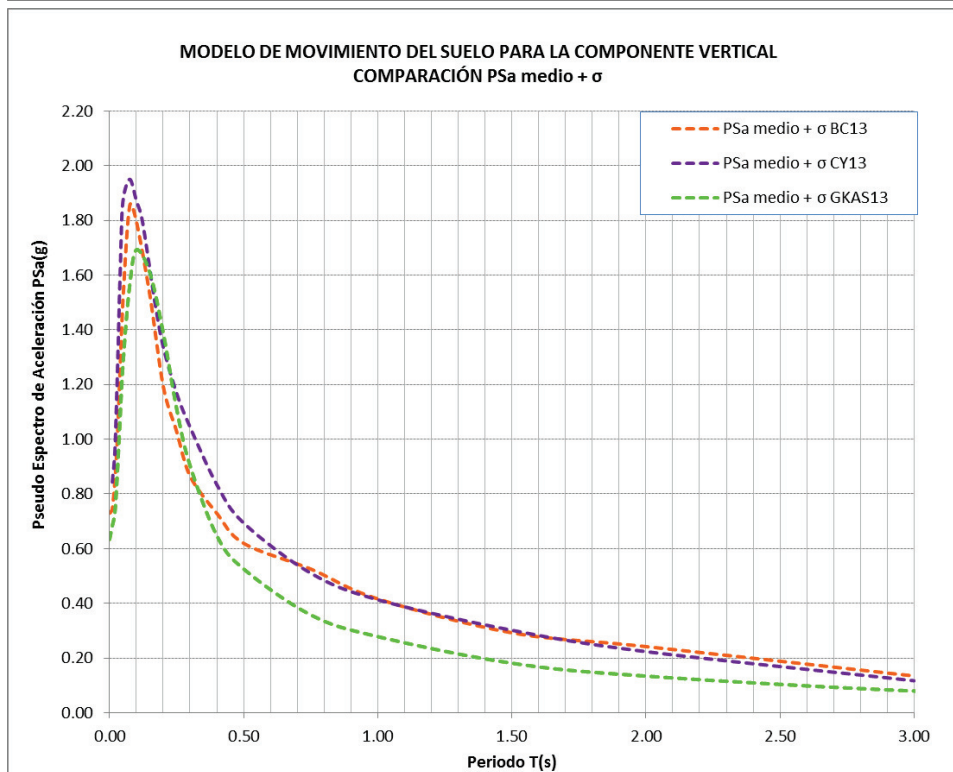
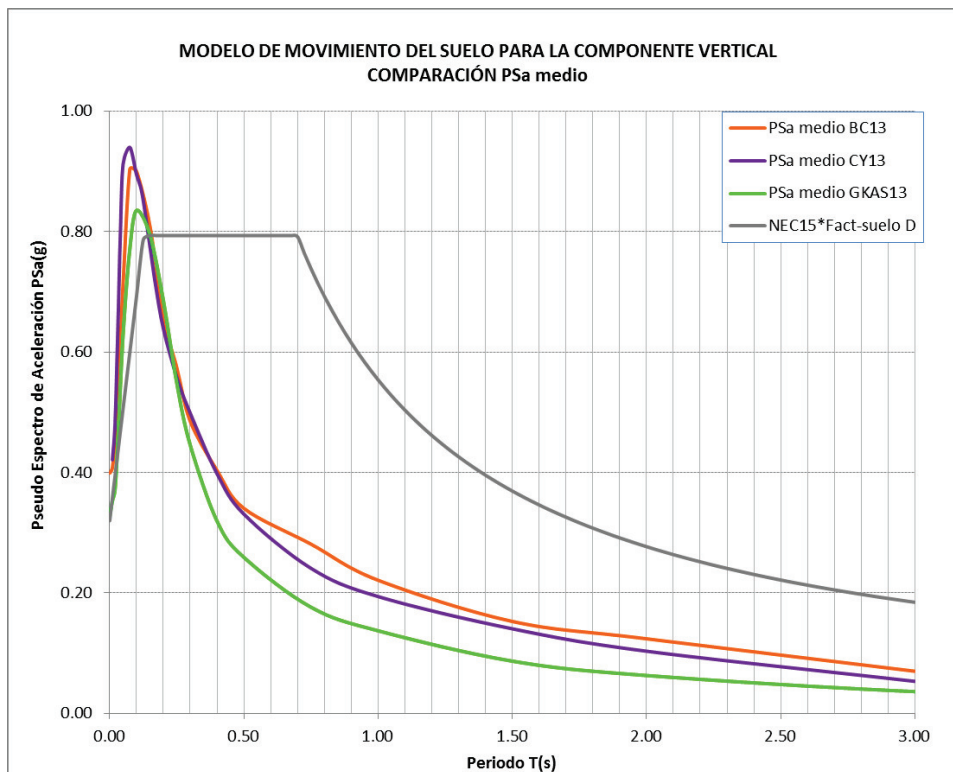
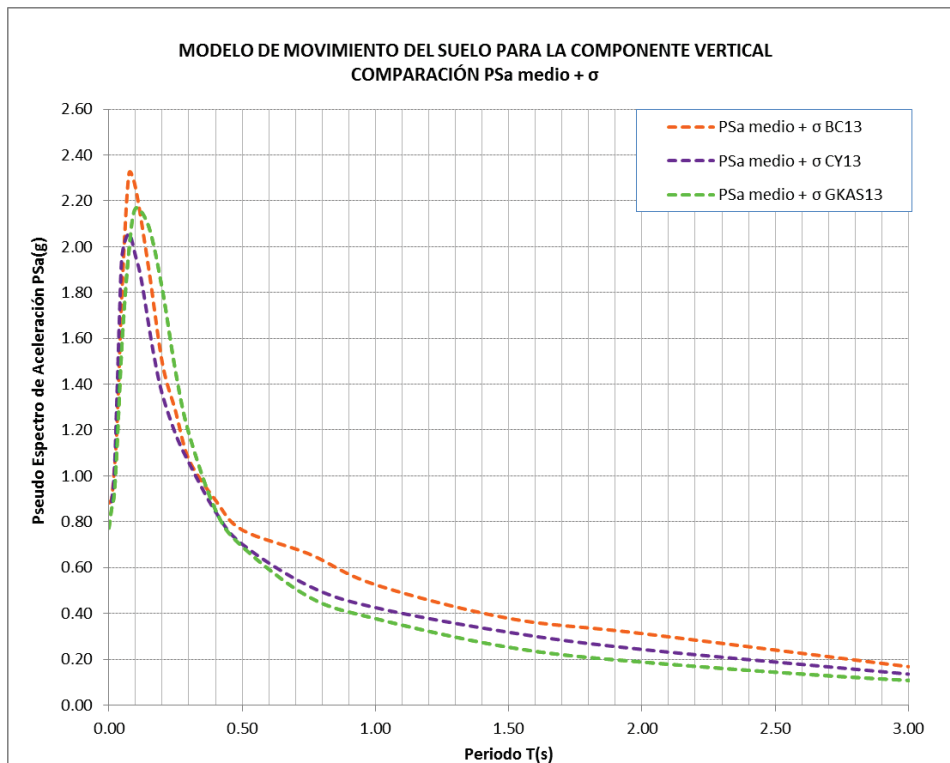
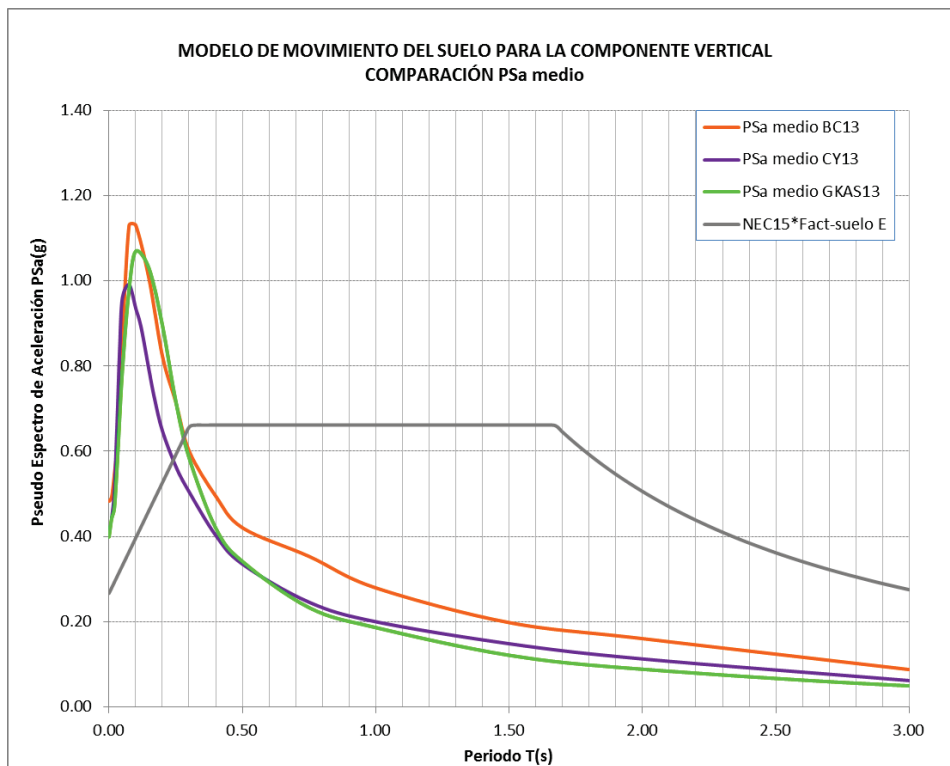


FIGURA 6.21 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, SECTOR CENTRO, $VS_{30}=300\text{M/S}$ MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



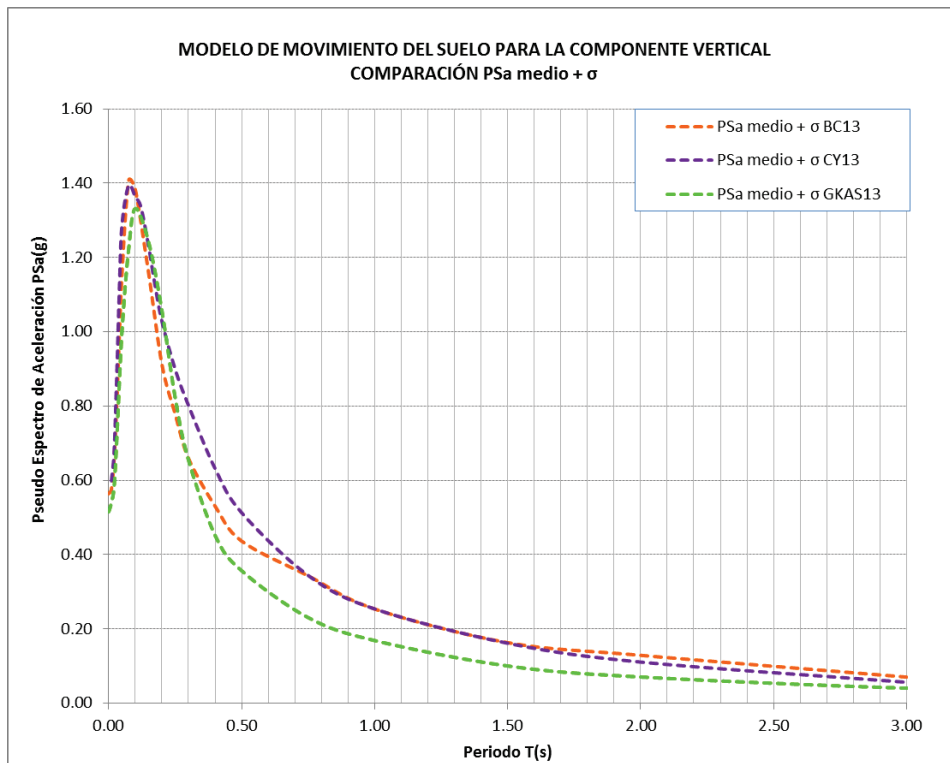
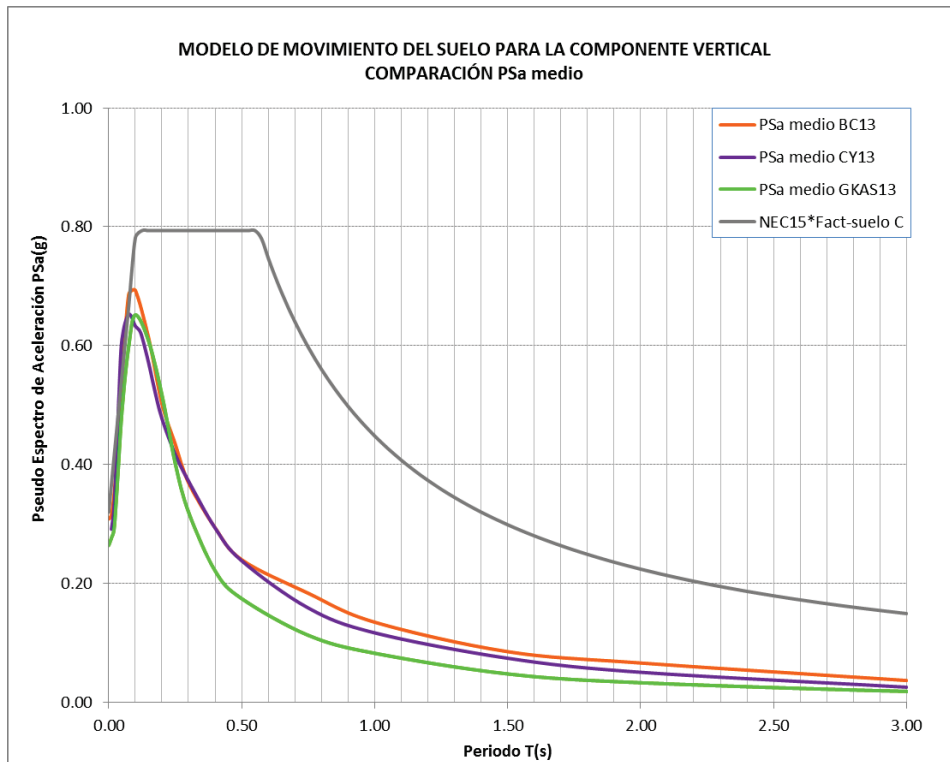
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.22 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, SECTOR CENTRO, $VS_{30}=200M/S$ MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



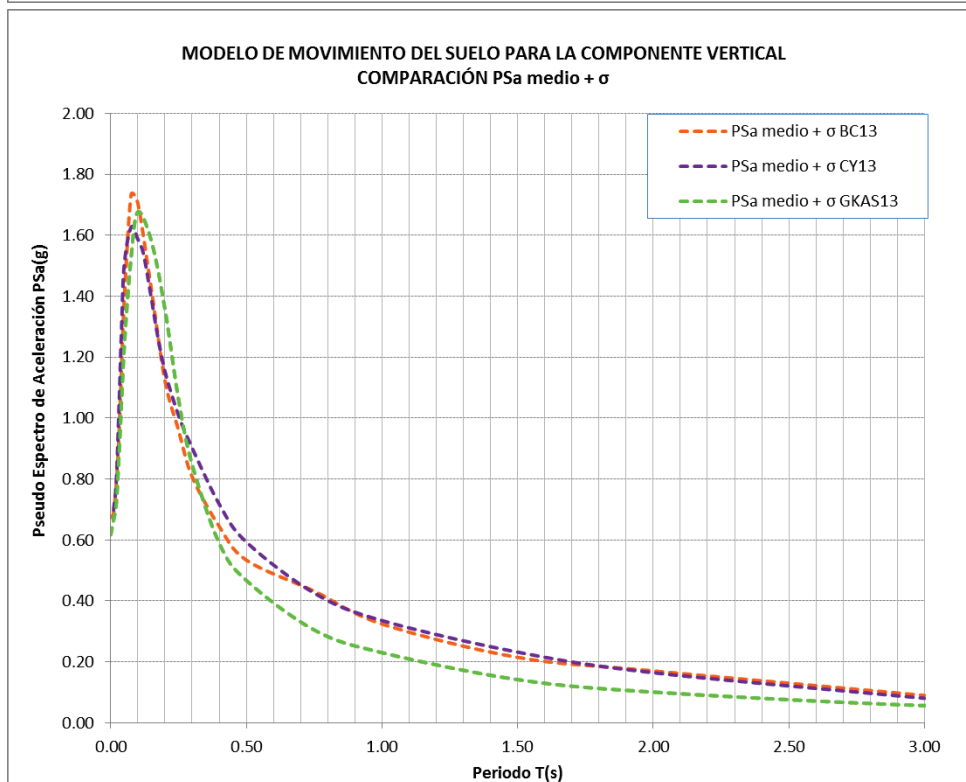
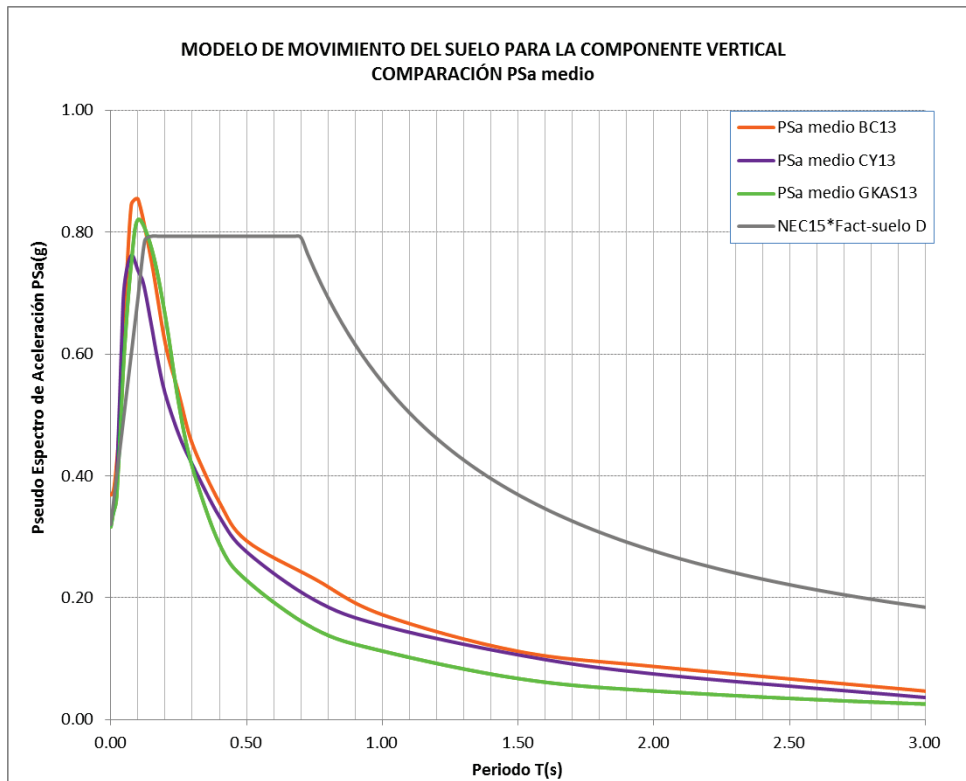
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.23 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA ILB, SECTOR CENTRO NORTE, $V_{S30}=460\text{M/S}$ MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



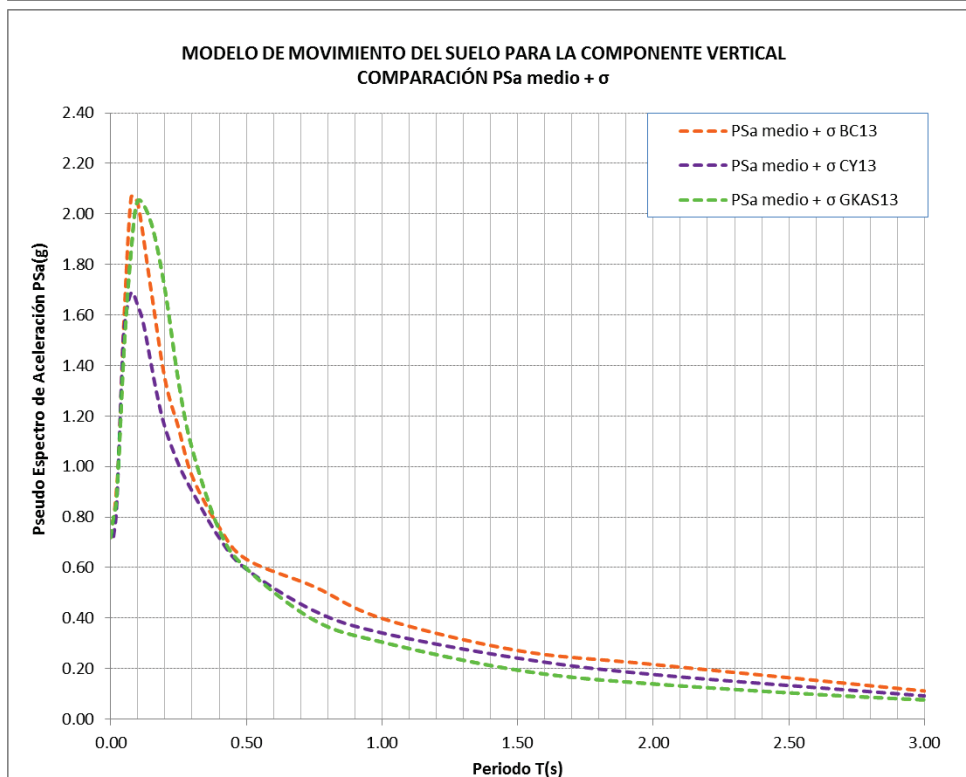
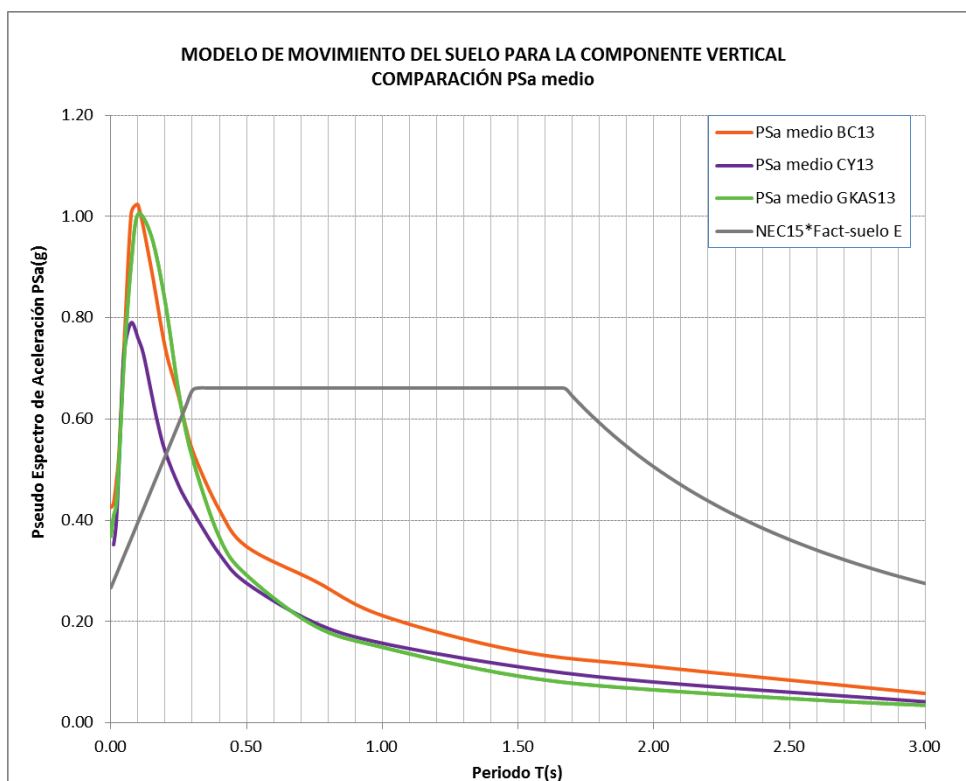
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.24 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA ILB, SECTOR CENTRO NORTE, $V_{S30}=300\text{M/S}$ MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



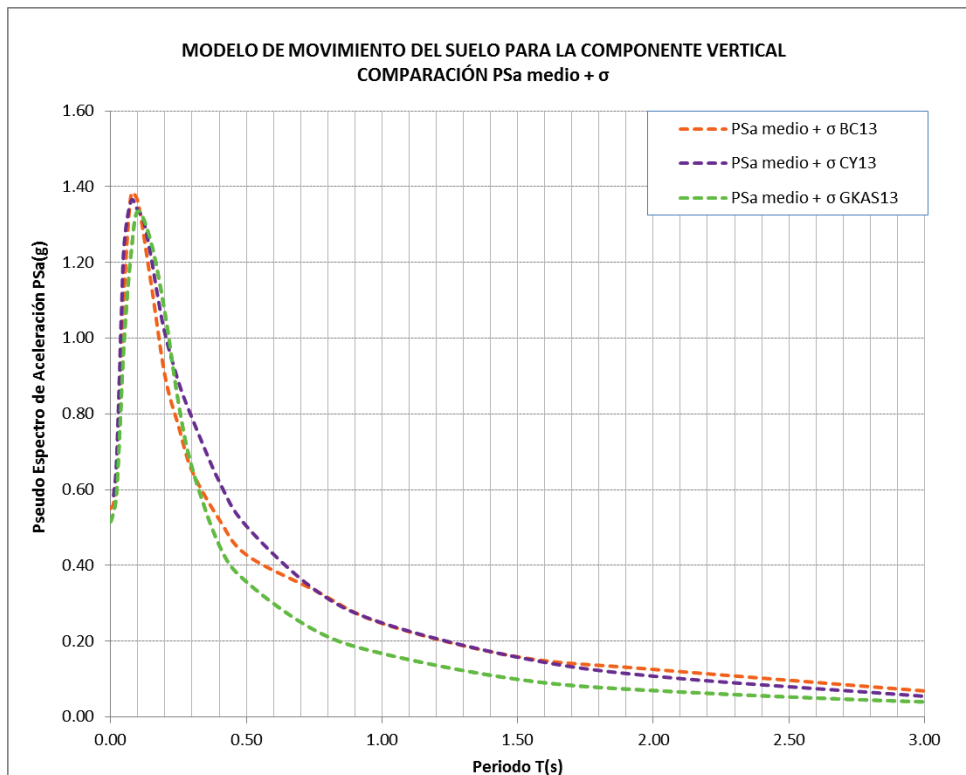
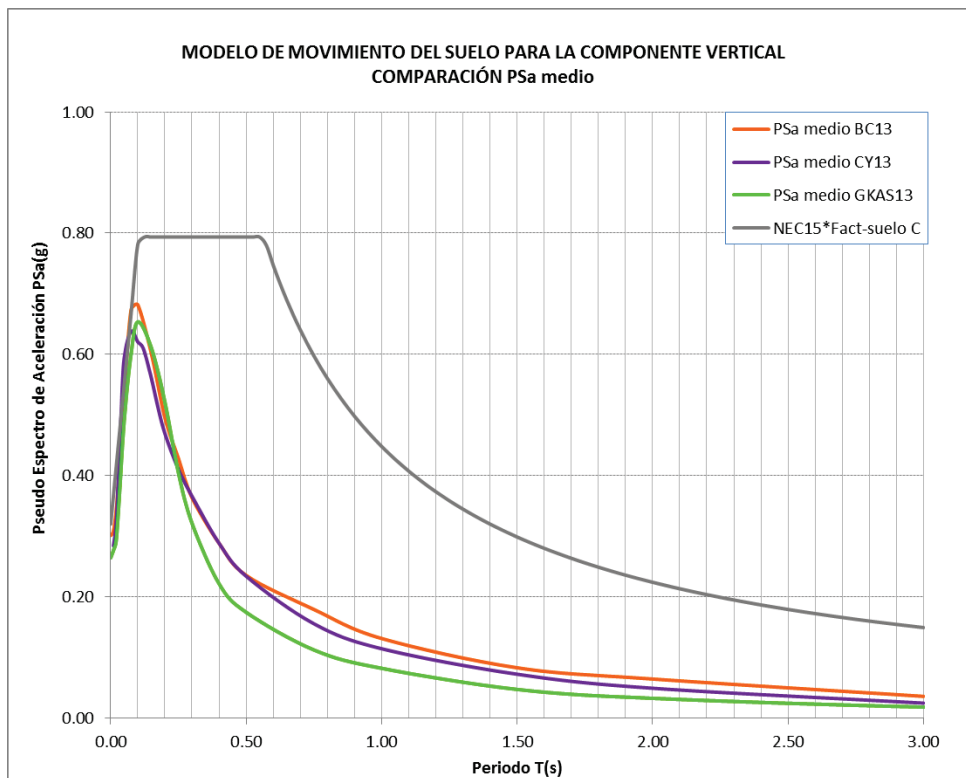
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.25 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA ILB, SECTOR CENTRO NORTE, $V_{S30}=200\text{M/S}$ MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



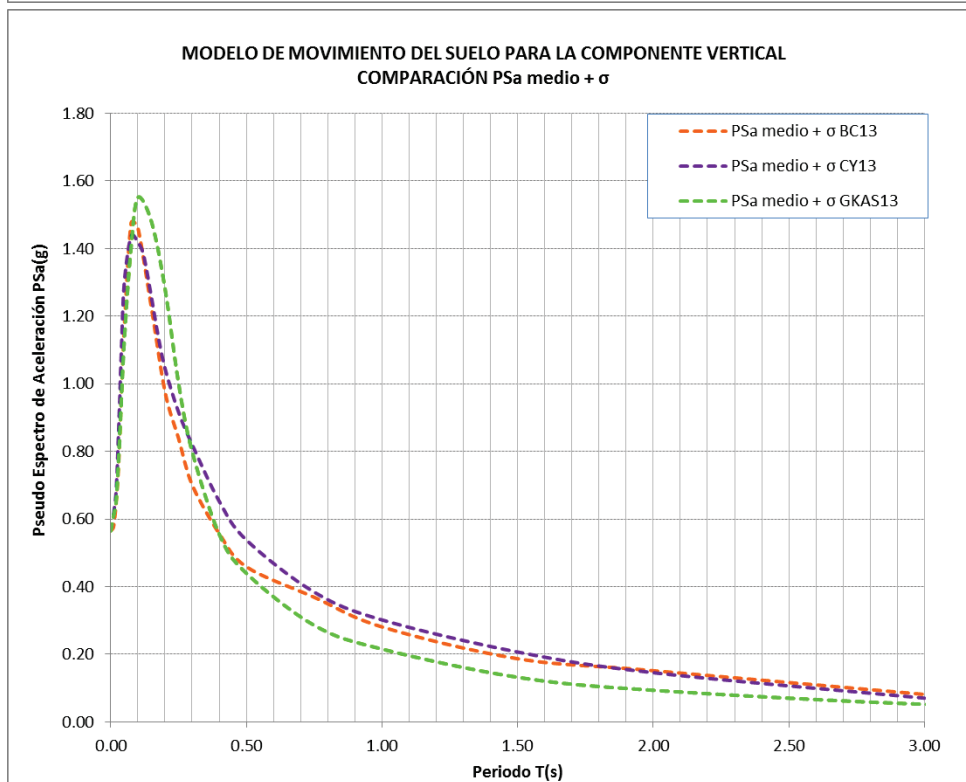
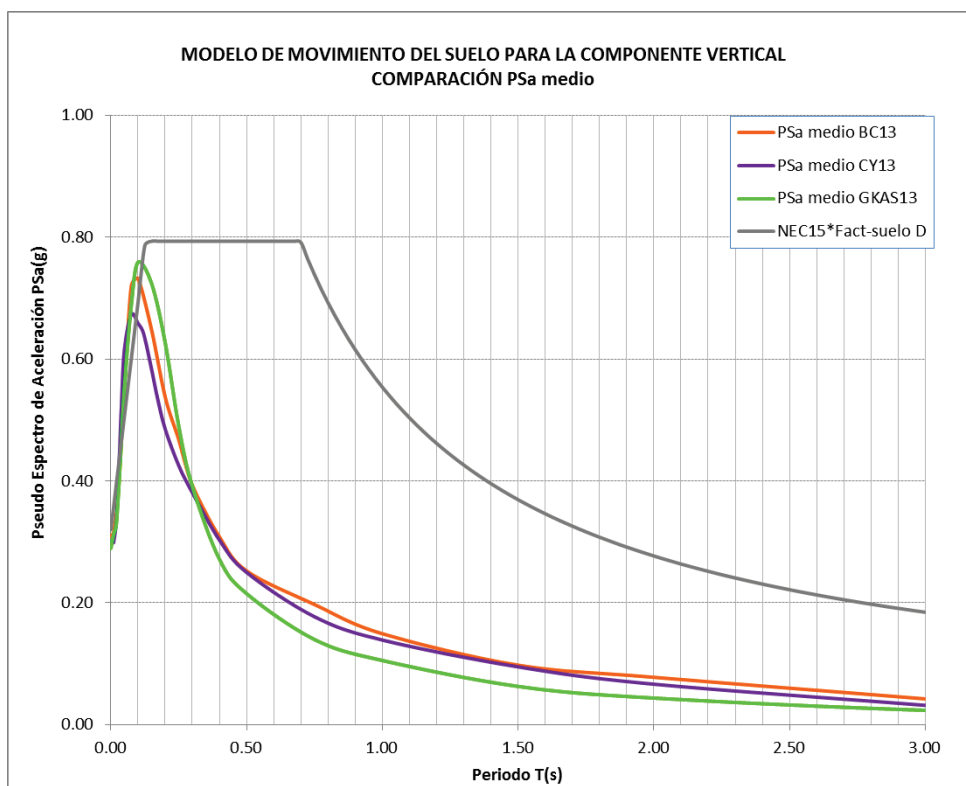
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.26 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA ILB, SECTOR NORTE,
 $VS_{30}=460M/S$ MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



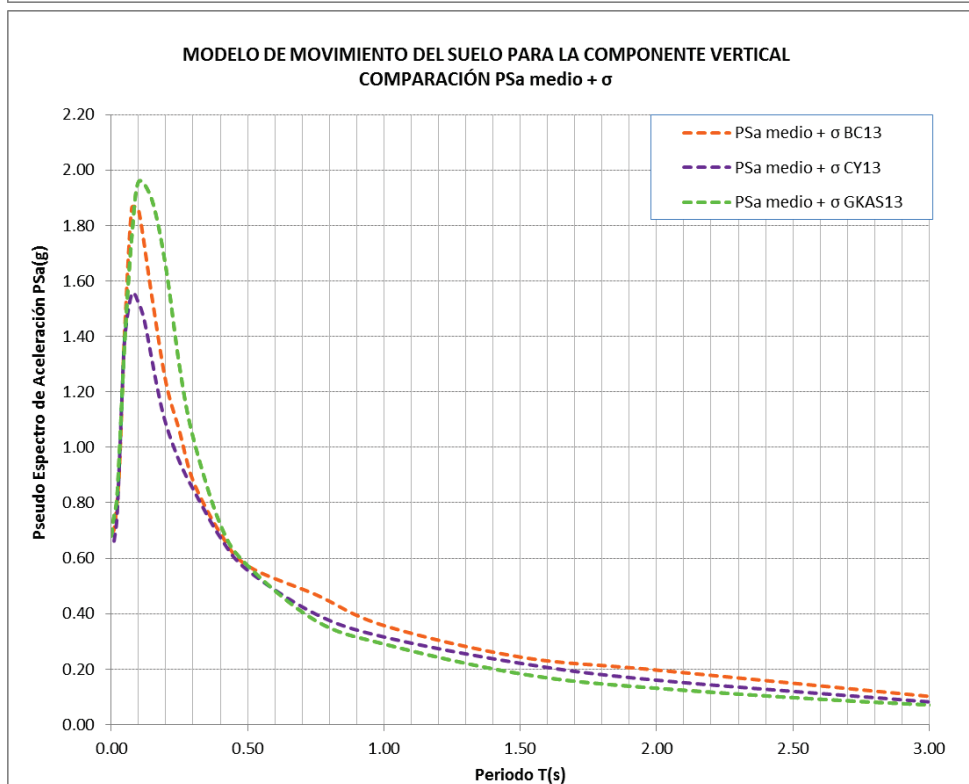
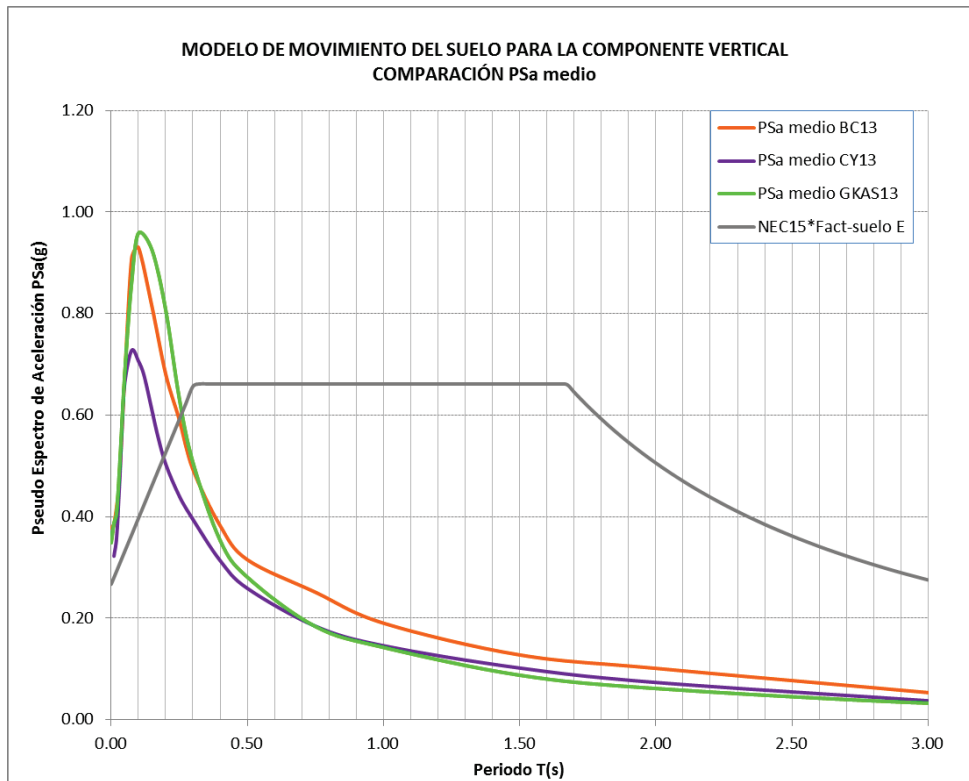
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.27 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA ILB, SECTOR NORTE,
 $VS_{30}=300\text{M/S}$ MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.28 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA ILB, SECTOR NORTE,
 $VS_{30}=200M/S$ MODELOS, BC13, CY13, GKAS13



Elaboración: Eduardo López

De las gráficas presentadas se desprende las siguientes observaciones:

- Se observa que los tres modelos utilizados para la componente vertical, BC13, CY13, ASK13, reportan pseudo espectros con formas y ordenas muy similares entre sí, inclusive cuando se varía las condiciones de tipo de suelo y cuando se considera el 100% de la desviación estándar, por lo que parece razonable indicar que para el cálculo de los pseudo espectros se puede utilizar cualquier modelo y no veo la necesidad de promediarlos o ponderarlos.
- Notamos que las ordenadas espectrales $PSa_{medio} + \sigma$, aproximadamente duplican las ordenadas espectrales PSa_{medio} , por lo que notamos que escoger el nivel de confianza con el que se requiere calcular los pseudo espectros tiene gran incidencia.
- Observamos la forma típica de los pseudo espectros de aceleración vertical, es decir tienen su pico en un periodo aproximado de 0.1s, prácticamente sin meseta, es decir llega a su pico y de inmediato inicia el descenso.
- Observamos el efecto del tipo de suelo, notando que para el suelo tipo C la ordenada espectral es menor que para el suelo tipo D y tipo E, lo cual es adecuado.
- Notamos que los pseudo espectros asociados a la falla de Puengasí reportan mayores ordenas que las asociadas a la falla ILB, podemos inferir que existe mayor peligro sísmico para las zonas sur, centro-sur y centro.
- Respecto al espectro del NEC-15 multiplicado por el factor $2/3$, para suelo tipo C de forma general se puede decir que es similar el PGA y el pico de la ordenada espectral con los PSa_{medios} , para suelo tipo D, el PGA es similar pero el pico de los PSa_{medios} son mayores, para suelo tipo E, el PGA y el pico de la ordenada espectral son considerablemente menores que los PSa_{medios} .
- También se evidencia que para suelo tipo C y D a partir del periodo de 0.2 s y a partir de 0.3 s para suelo tipo E, el espectro del NEC-15 multiplicado por el factor $2/3$ es superior al calculado en los PSa_{medios} .

6.4.3 PSa PSEUDO ESPECTROS (COMPONENTE HORIZONTAL & VERTICAL)

Se presentan en una misma grafica los pseudo espectros de control de componente horizontal y vertical, con el propósito de que el lector observe las formas y ordenadas espectrales de cada componente, debido a que en función de estas se determinan las relaciones V/H.

Para etiquetar los modelos de atenuación en las gráficas se utiliza las siguientes abreviaciones:

Modelos de atenuación para la componente horizontal:

Campbell & Bozorgnia (2013)	CB13
Choiu & Youngs (2013)	CY13
Abrahamson & Silva (2013)	ASK13

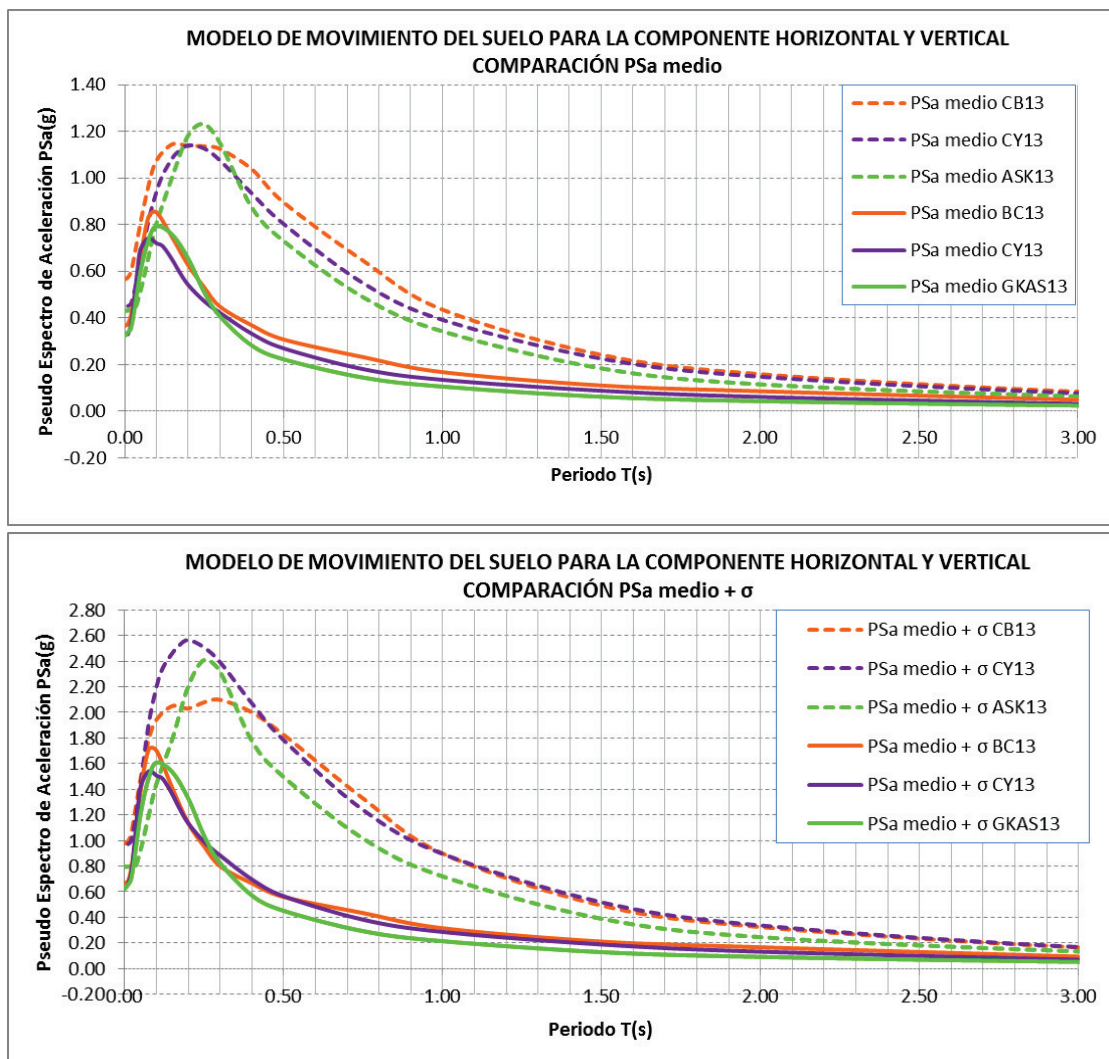
Modelos de atenuación para la componente vertical:

Bozorgnia & Campbell (2013)	BC13
Choiu & Youngs (2013)	CY13
Zeynep Gulerce et., al (2013)	GKAS13

En las figuras 6.35 a 6.40 se presenta el modelo CB13, BC13, y se multiplica el modelo $CB13^{2/3}$ con el propósito de que el lector evalúe la tendencia de escalar los espectros por un factor uniforme, finalmente solo como se referencia se incluye espectro del NEC-15 también multiplicado por $2/3$.

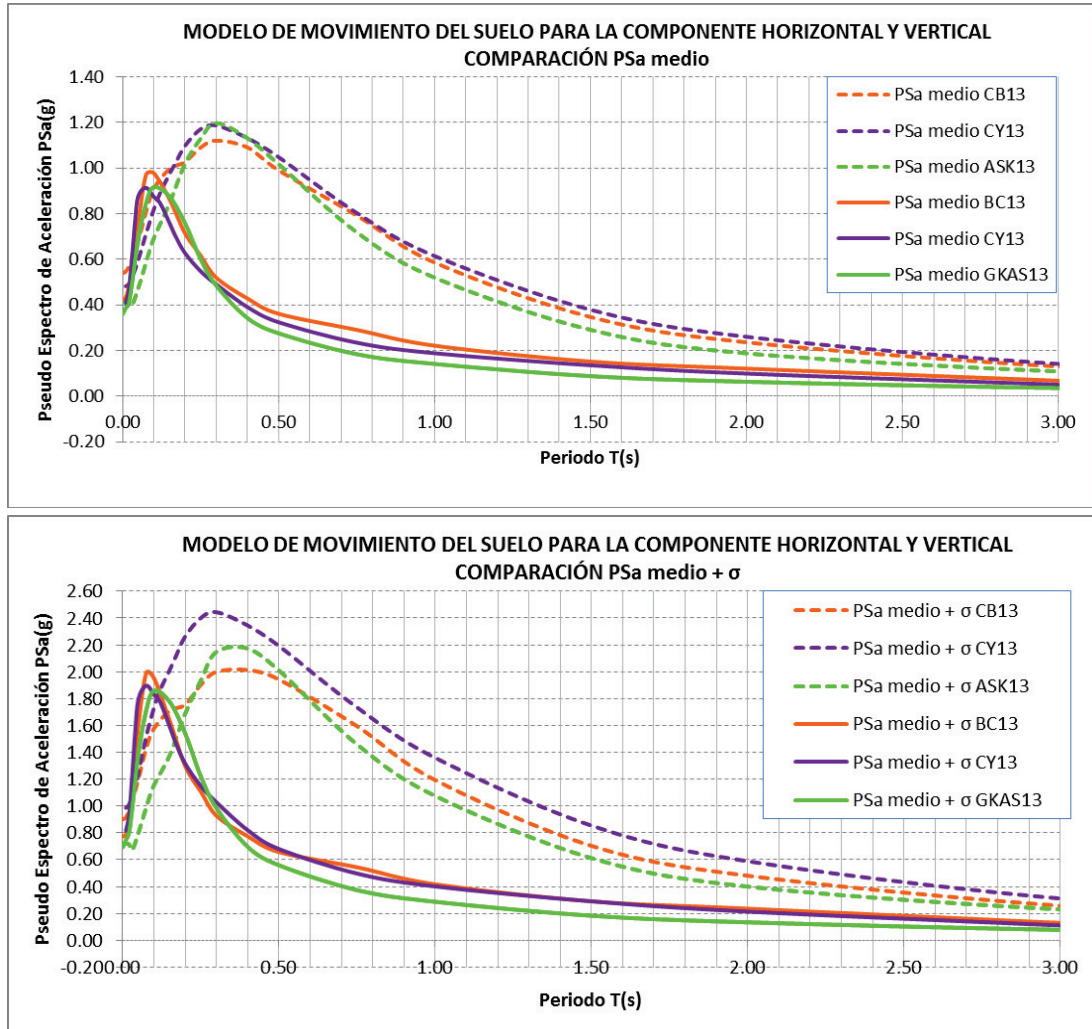
Obviamos este procedimiento para los otros dos modelos de atenuación, puesto que los resultados serán muy similares y el propósito se cumple presentando un solo modelo.

FIGURA 6.29 PSA COMPONENTE HORIZONTAL Y VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, SECTOR SUR, $VS_{30}=460\text{M/S}$ MODELOS, CB13, CY13, ASK13, BC13, CY13, GKAS13



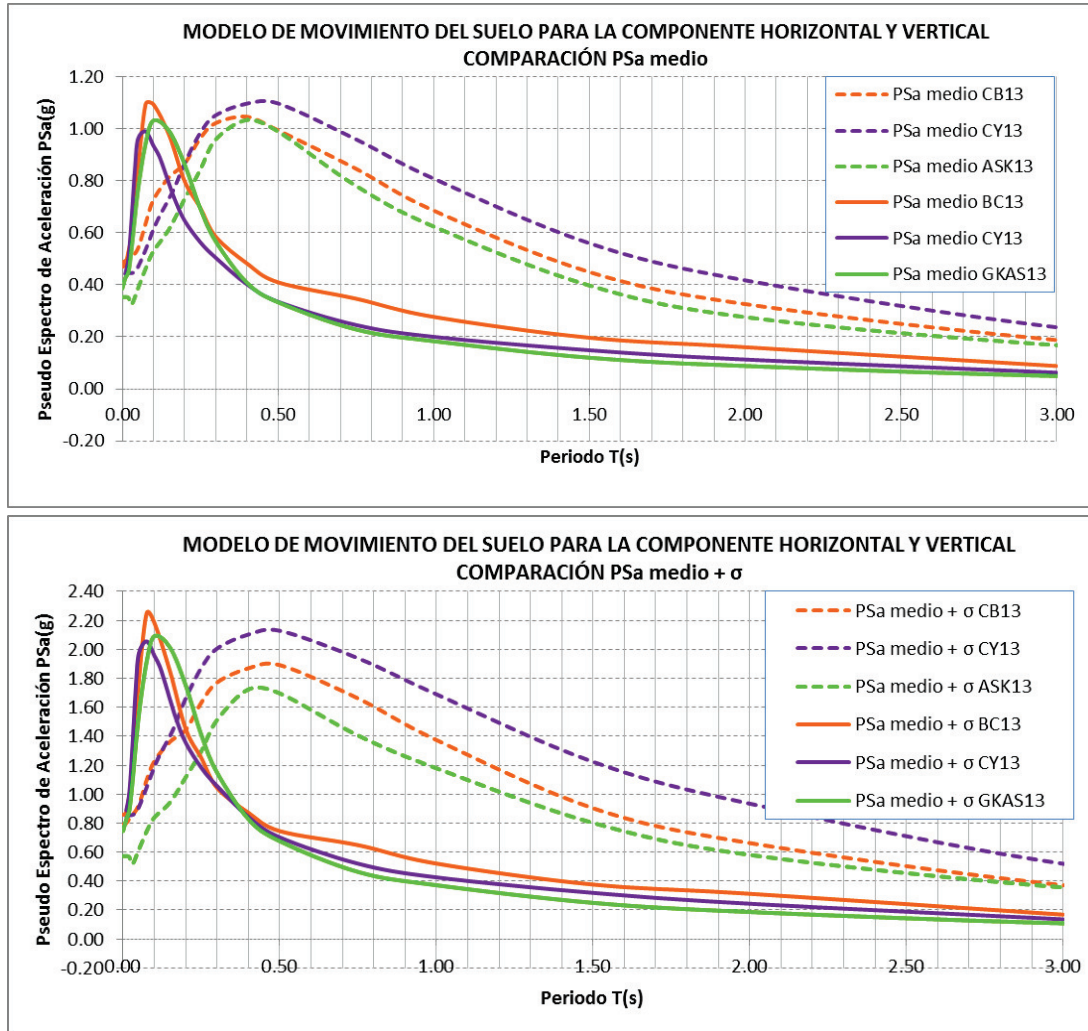
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.30 PSA COMPONENTE HORIZONTAL Y VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, SECTOR SUR, $VS_{30}=300\text{M/S}$ MODELOS, CB13, CY13, ASK13, BC13, CY13, GKAS13



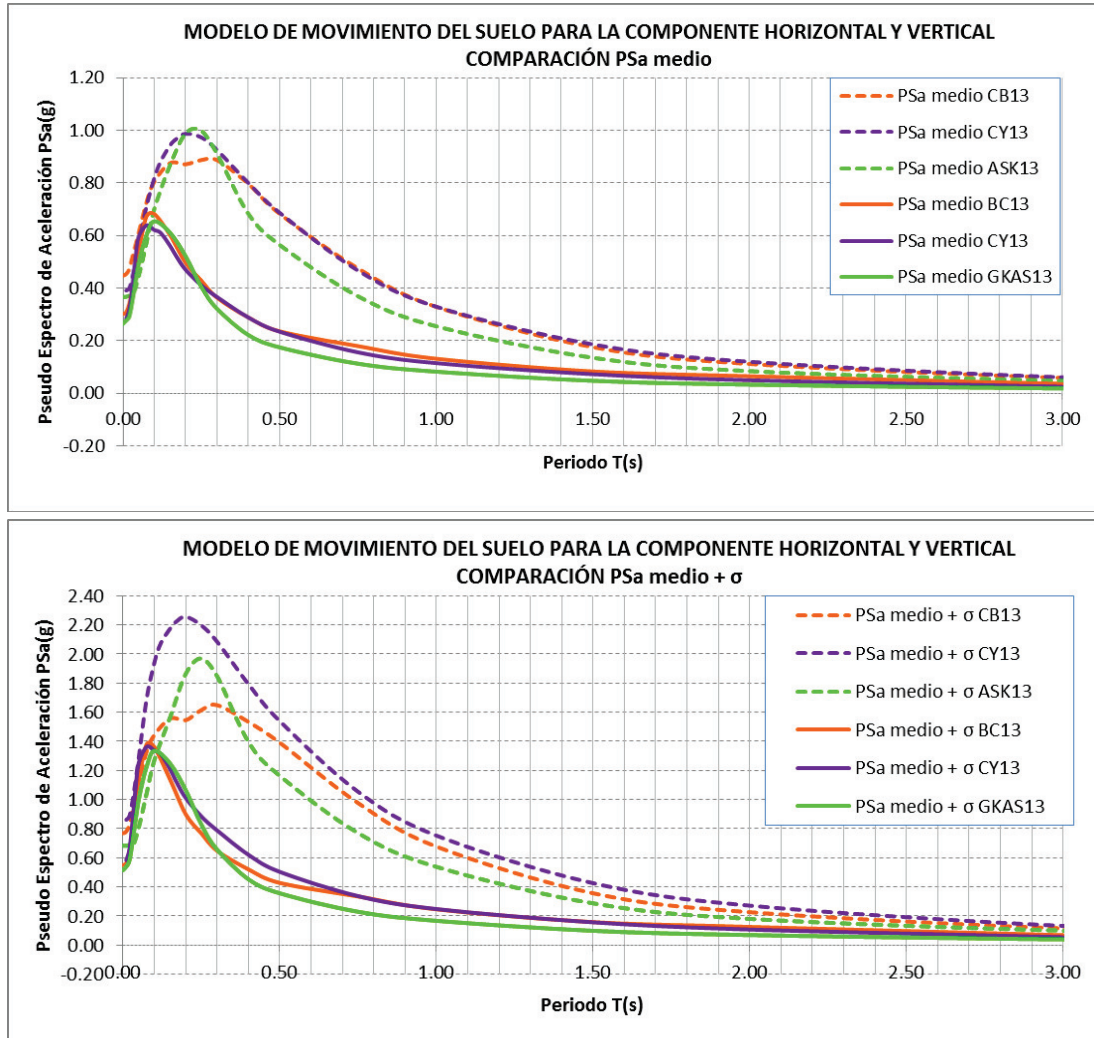
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.31 PSA COMPONENTE HORIZONTAL Y VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, SECTOR SUR, $VS_{30}=200\text{M/S}$ MODELOS, CB13, CY13, ASK13, BC13, CY13, GKAS13



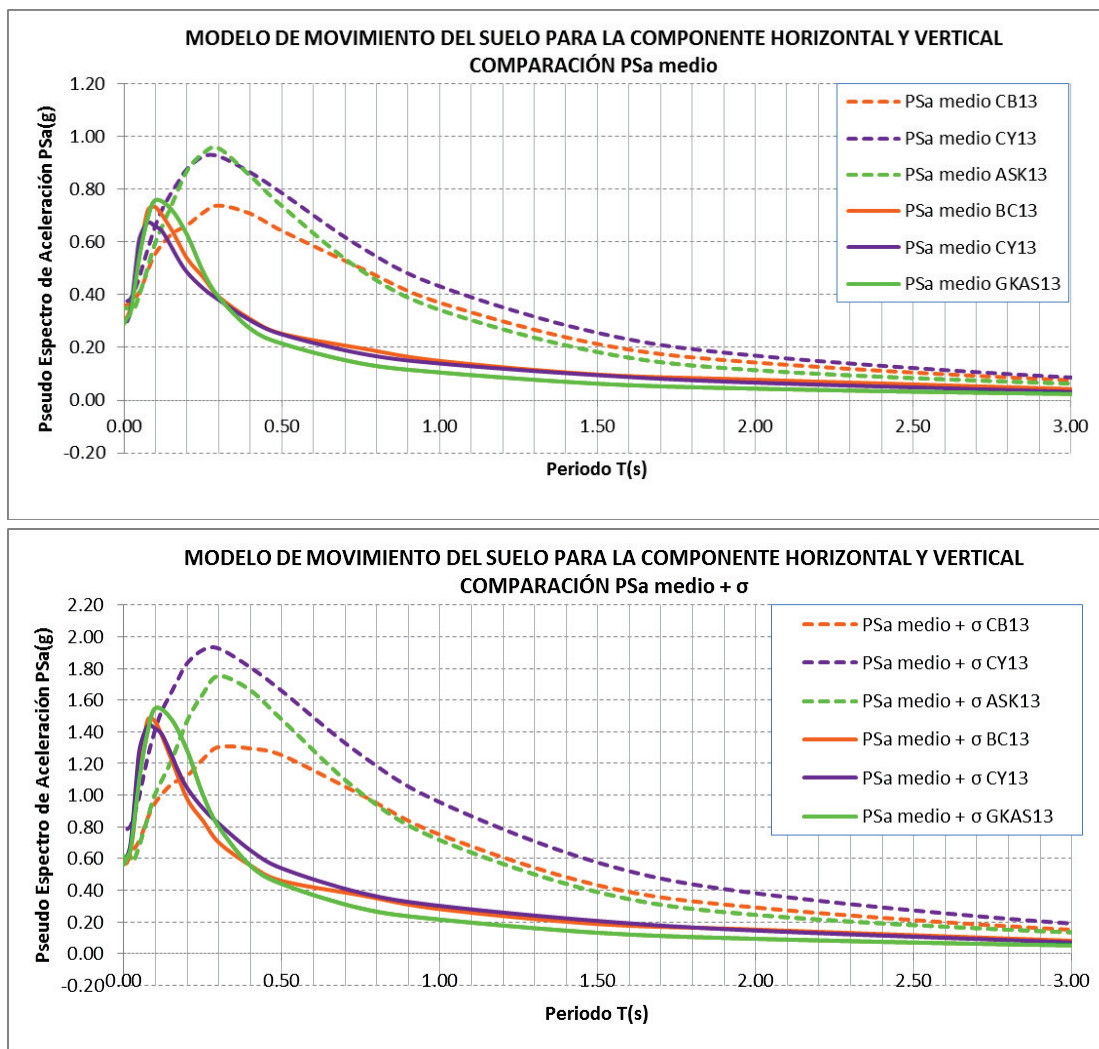
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.32 PSA COMPONENTE HORIZONTAL Y VERTICAL, FALLA ILB, SECTOR NORTE, $VS_{30}=460\text{M/S}$ MODELOS, CB13, CY13, ASK13, BC13, CY13, GKAS13



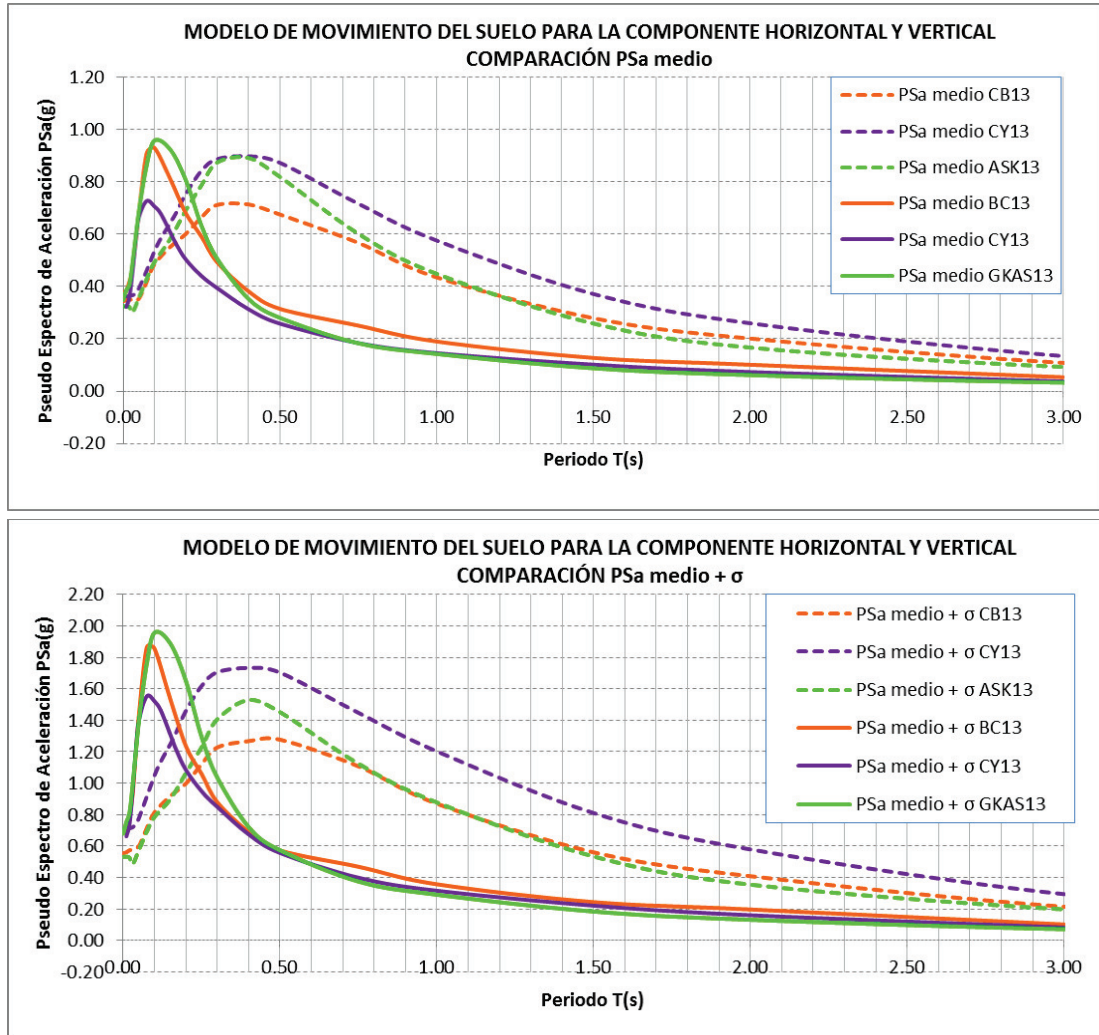
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.33 PSA COMPONENTE HORIZONTAL Y VERTICAL, FALLA ILB, SECTOR NORTE, $VS_{30}=300\text{M/S}$, MODELOS, CB13, CY13, ASK13, BC13, CY13, GKAS13



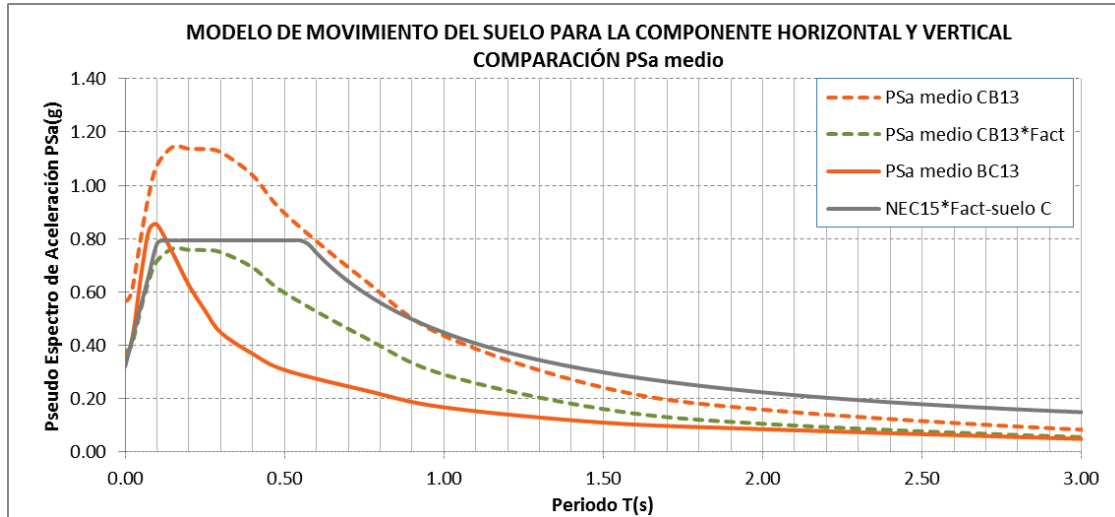
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.34 PSA COMPONENTE HORIZONTAL Y VERTICAL, FALLA ILB, SECTOR NORTE, $VS_{30}=200\text{M/S}$, MODELOS, CB13, CY13, ASK13, BC13, CY13, GKAS13



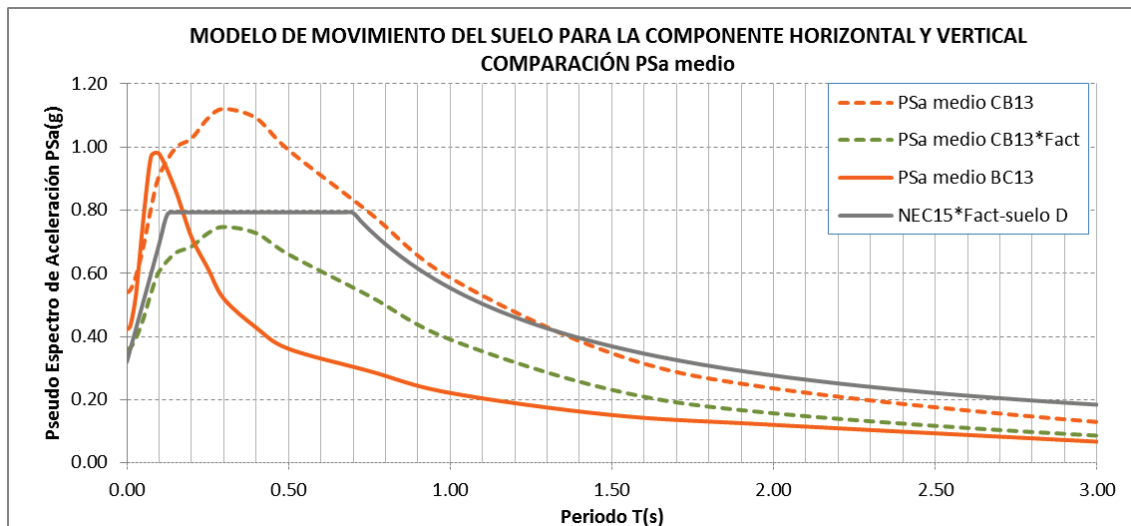
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.35 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, VERTICAL Y HORIZONTAL*2/3. FALLA PUENGASÍ, SECTOR SUR, $V_{S30}=460\text{M/S}$, MODELOS, CB13, BC13,



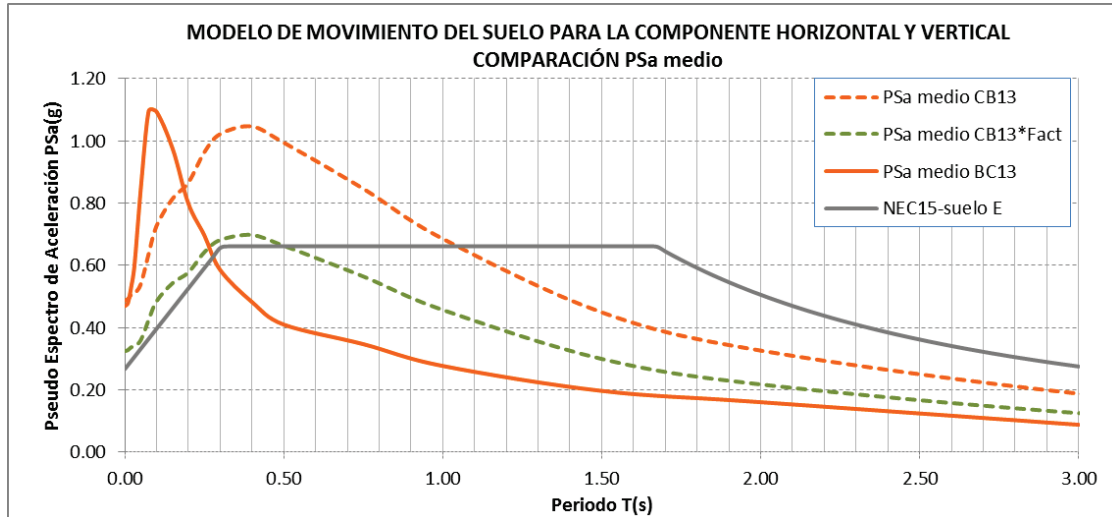
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.36 PSa componente horizontal, vertical y horizontal*2/3. Falla Puengasí, Sector Sur, $V_{S30}=300\text{m/s}$, Modelos, CB13, BC13,



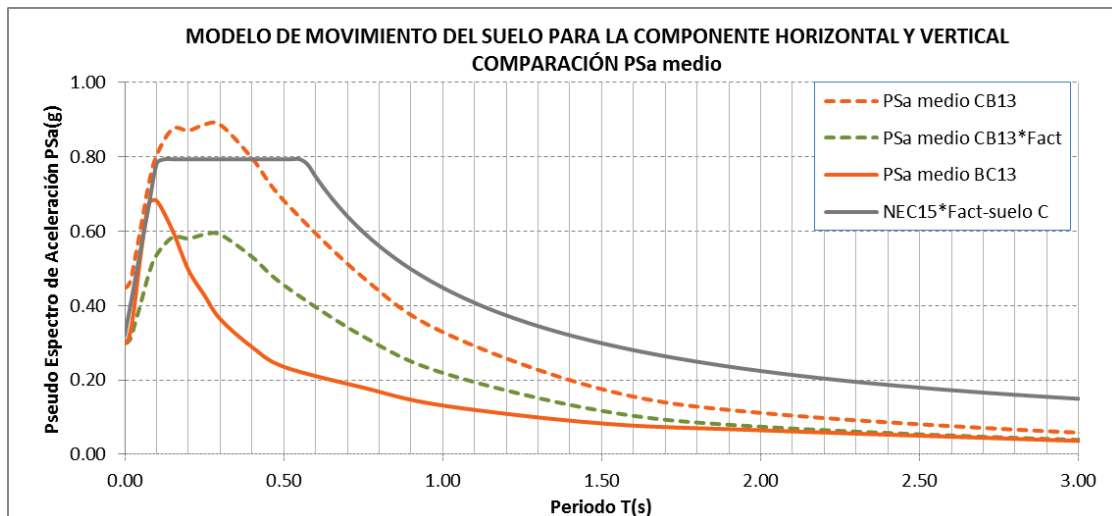
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.37 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, VERTICAL Y HORIZONTAL*2/3. FALLA PUENGASÍ, SECTOR SUR, $VS_{30}=200\text{M/S}$, MODELOS, CB13, BC13,



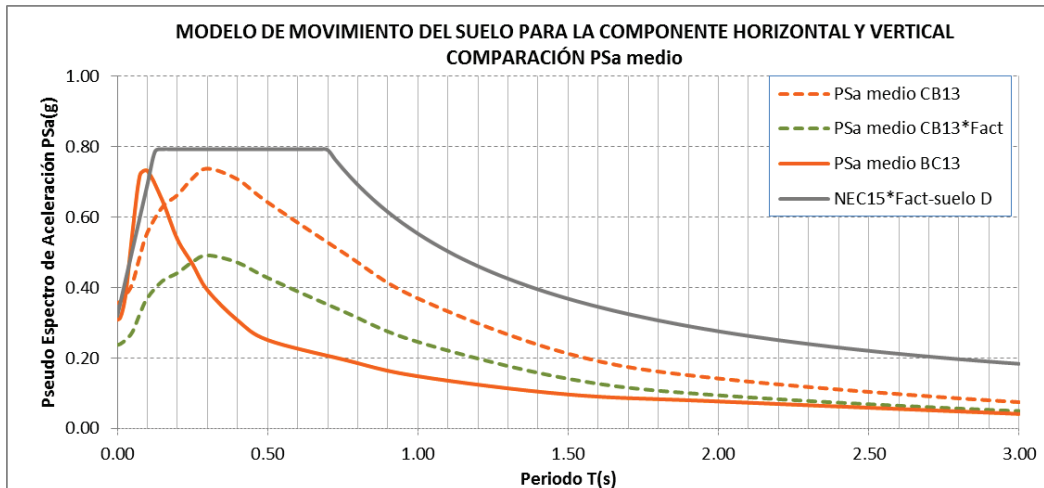
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.38 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, VERTICAL Y HORIZONTAL*2/3. FALLA ILB, SECTOR NORTE, $VS_{30}=460\text{M/S}$, MODELOS, CB13, BC13,



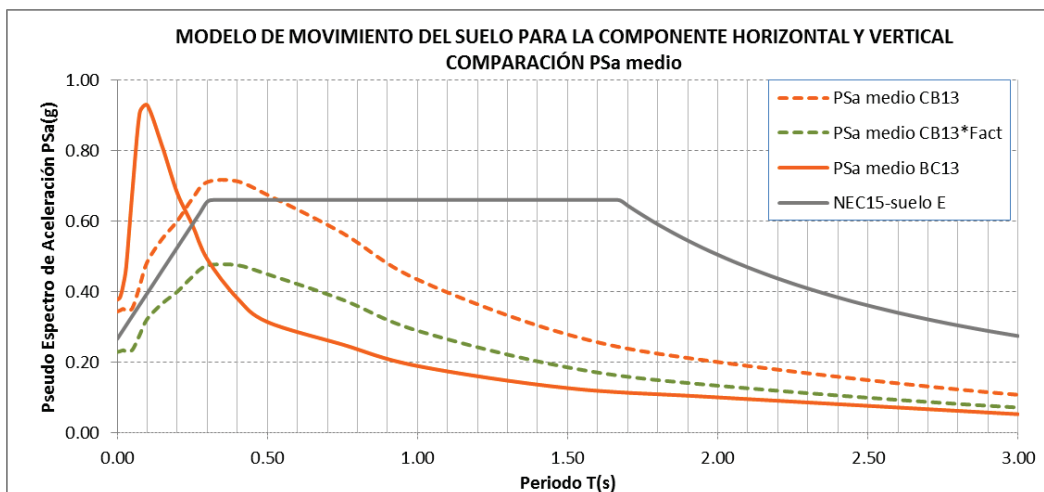
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.39 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, VERTICAL Y HORIZONTAL*2/3. FALLA ILB, SECTOR NORTE, $V_{S30}=300\text{M/S}$, MODELOS, CB13, BC13,



Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.40 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, VERTICAL Y HORIZONTAL*2/3. FALLA ILB, SECTOR NORTE, $V_{S30}=200\text{M/S}$, MODELOS, CB13, BC13,



Elaboración: Eduardo López

De las gráficas presentadas notamos; para el caso de suelo con $V_{S30} = 460\text{m/s}$ el PSa medio CB13 multiplicado por $2/3$ aproximadamente cubre el pico de la ordenada del PSa medio BC13 y a partir de un periodo de 0.3 s las ordenadas del

PSa medio son superiores, para el caso de suelo con $V_{s30} = 300\text{m/s}$ y 200 m/s el PSa medio CB13 multiplicado por $2/3$ es considerablemente inferior al pico de la ordenada del PSa medio BC13 y a partir de un periodo de 0.3 s las ordenadas del PSa medio son superiores,

De forma general podemos concluir que la tendencia de escalar los pseudo espectros por un factor uniforme no es adecuada, puesto que en el rango de periodos cortos se subestima la ordenada espectral y en el rango de periodos largos se sobreestima,

De igual manera verificamos que la forma típica del pseudo espectro de aceleración vertical tiende a llegar a su pico en un periodo de 0.1 a 0.2 s y desciende inmediatamente, mientras que el pseudo espectro de aceleración horizontal forma una meseta que se prolonga hasta al menos un periodo de 0.6 s .

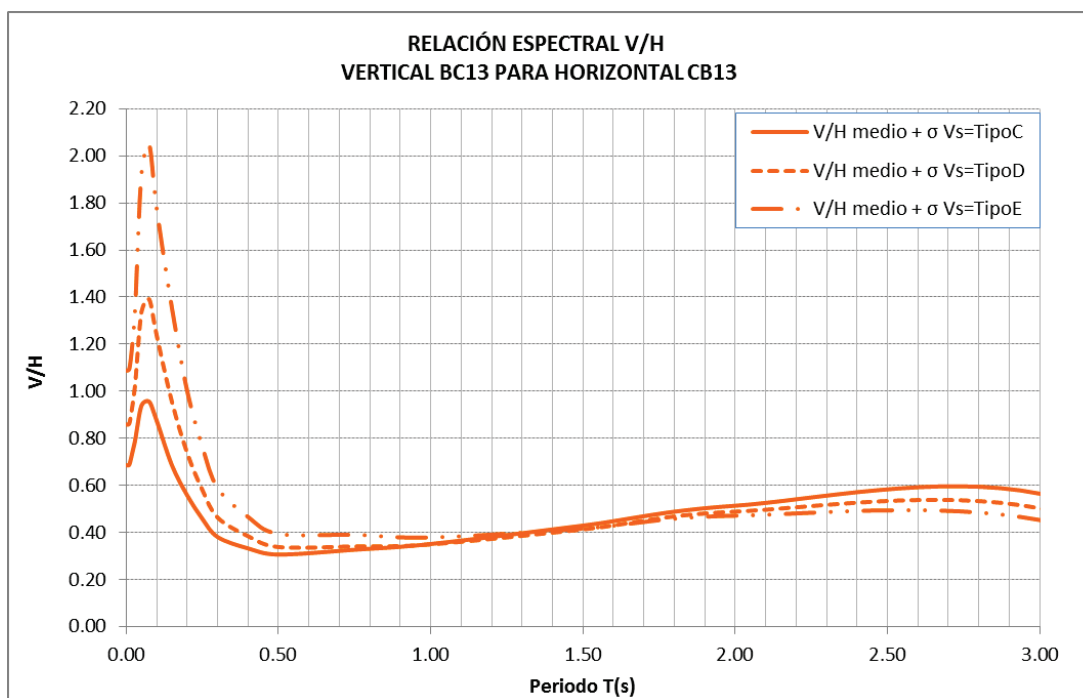
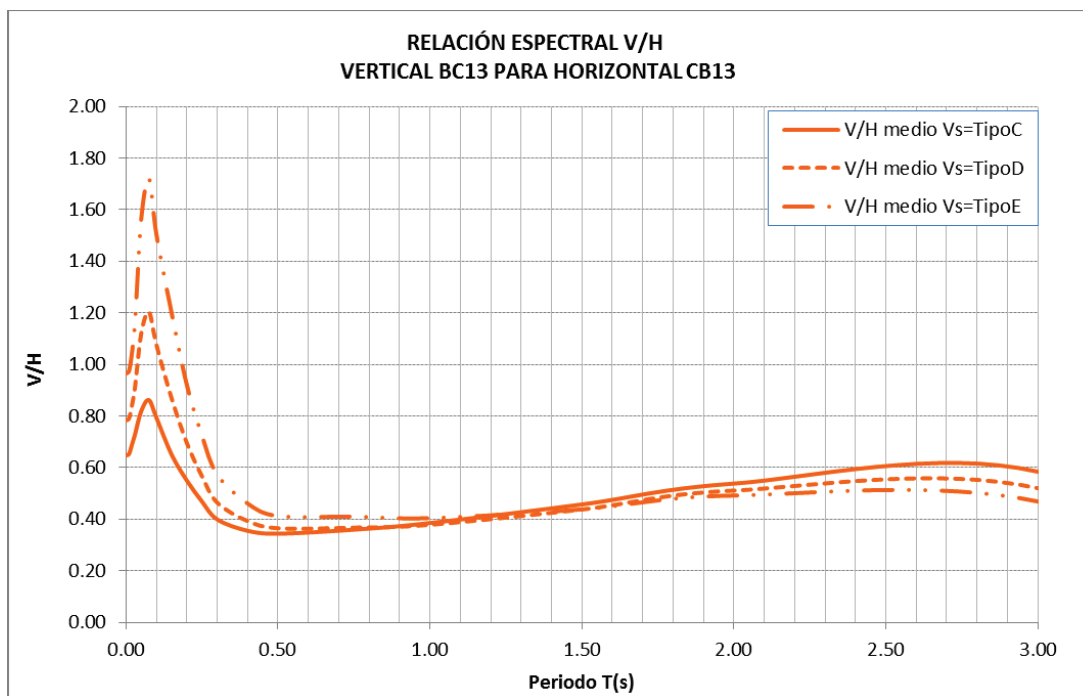
6.4.4 RELACIONES ESPECTRALES V/H

Las relaciones espectrales V/H se obtienen dividiendo la ordenada del pseudo espectro de aceleración vertical para la correspondiente ordenada del pseudo espectro de aceleración horizontal. Los etiquetados como V/H medio se calculan a partir de los PSa medios y los V/H medio + σ se calculan a partir de los PSa medios + σ . Se presentan únicamente las relaciones V/H de control es decir cuya fuente son las fallas de Puengasí y ILB asociadas a sus respectivas zonas de Quito.

Se presentan graficas de relaciones V/H para suelos $V_{s30}=460\text{ m/s}$, (Tipo C) $V_{s30}=300\text{ m/s}$ (Tipo D), $V_{s30}=200\text{ m/s}$ (Tipo E), por cada modelo de atenuación.

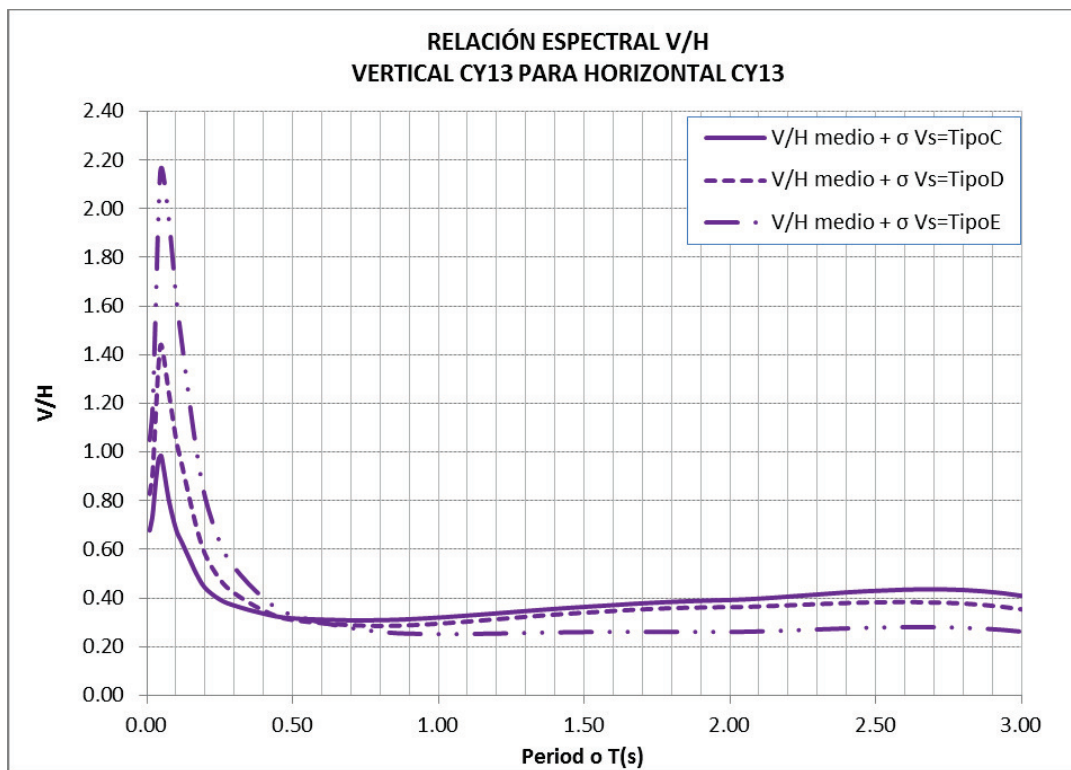
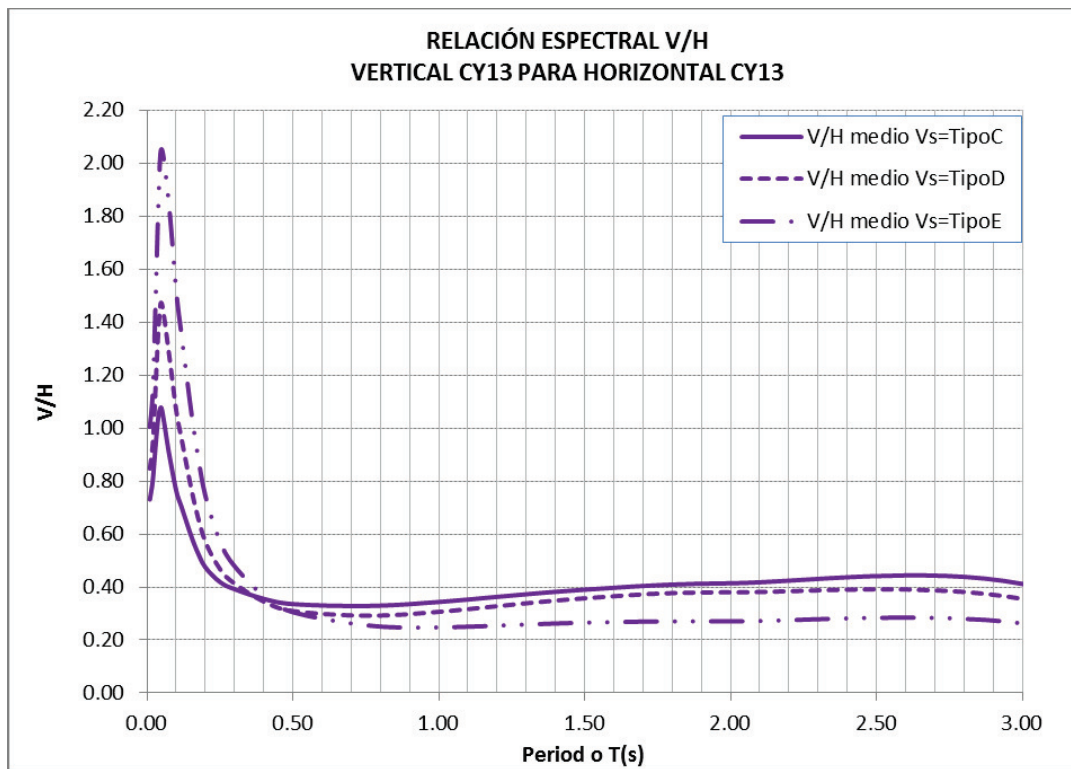
En las figuras 6.56 a 6.58 se presentan los tres modelos utilizados en una misma grafica solo para el sector norte asociado a la falla ILB con el fin de que el lector observe la similitud entre los modelos, esto se realiza por cada tipo de suelo, no es necesario realizar esto para las restantes relaciones V/H de control pues las conclusiones serán las mismas.

FIGURA 6.41 RELACIÓN V/H, FALLA PUENGASÍ, SECTOR SUR, MODELO VERTICAL BC13, MODELO HORIZONTAL CB13.



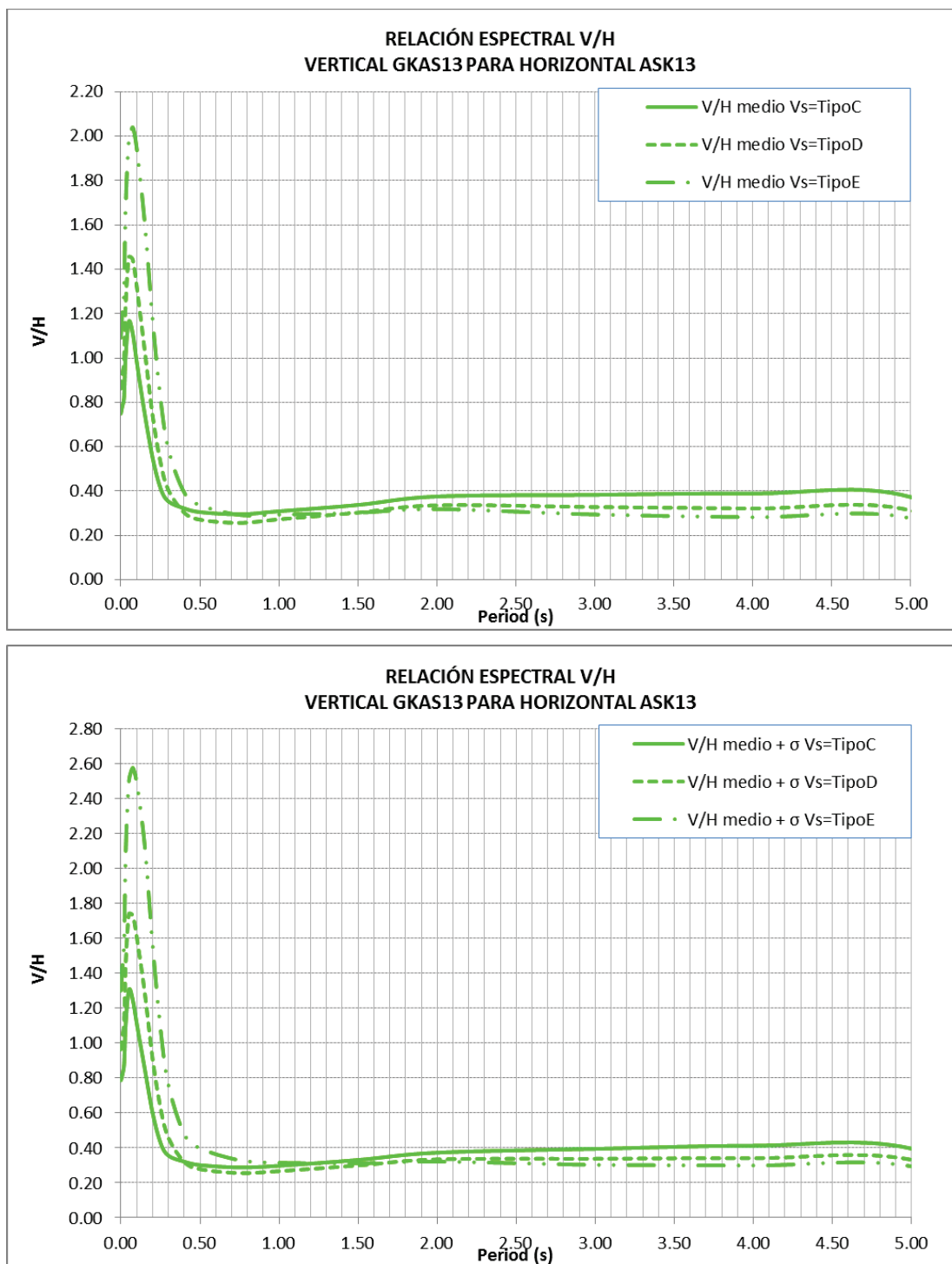
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.42 RELACIÓN V/H, FALLA PUENGASÍ, SECTOR SUR, MODELO VERTICAL CY13, MODELO HORIZONTAL CY13.



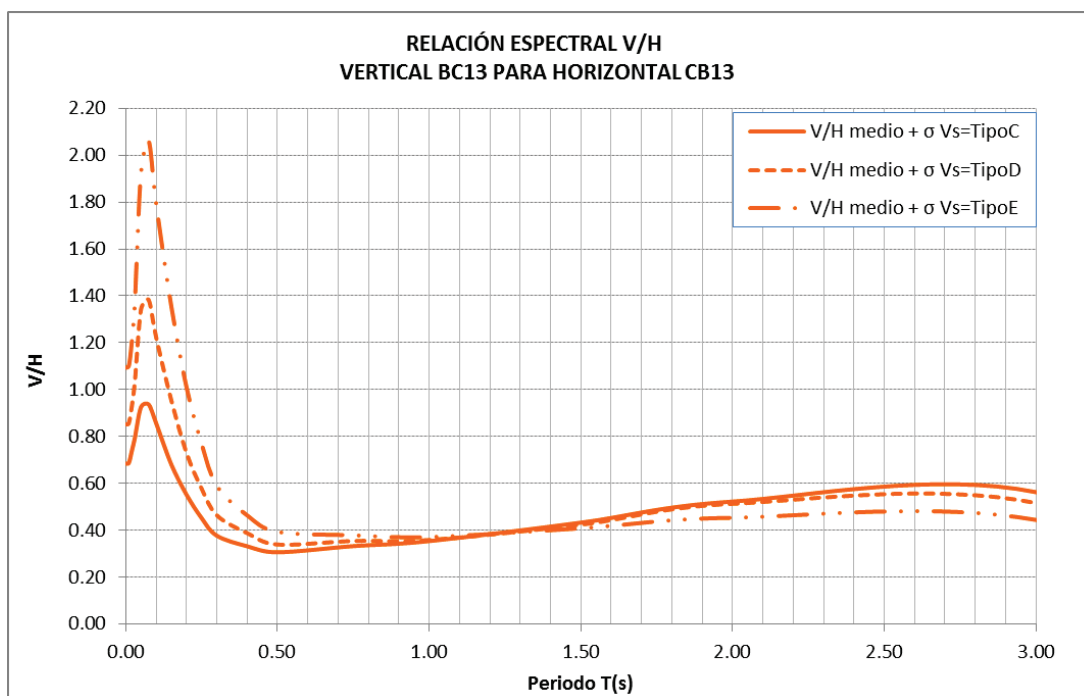
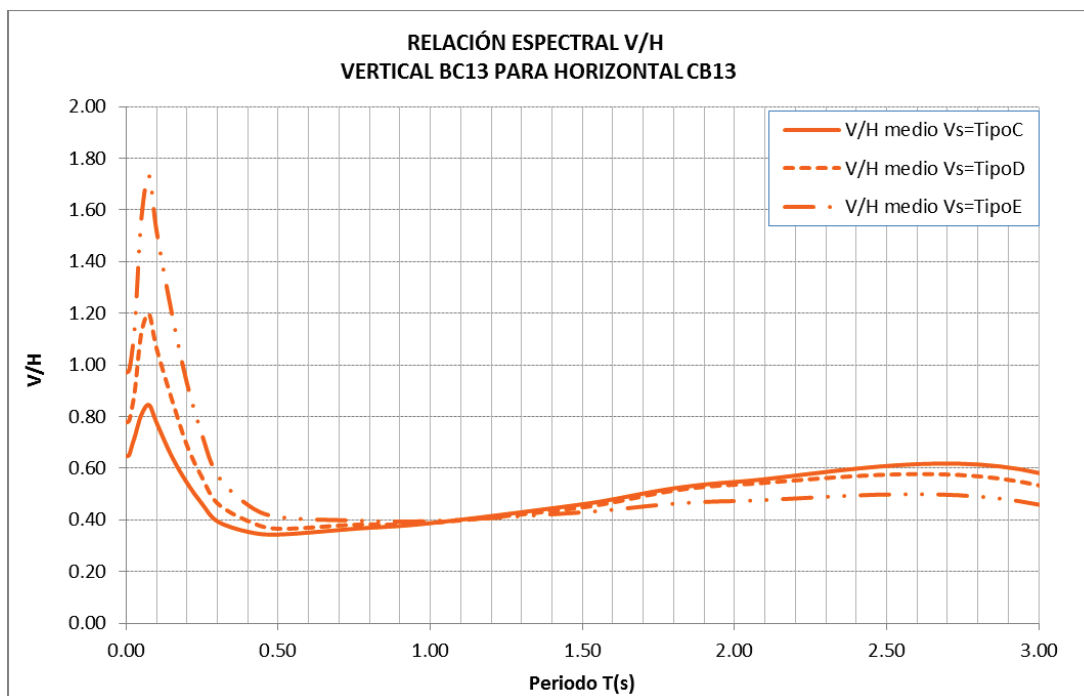
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.43 RELACIÓN V/H, FALLA PUENGASÍ, SECTOR SUR, MODELO VERTICAL GKAS13, MODELO HORIZONTAL ASK13.



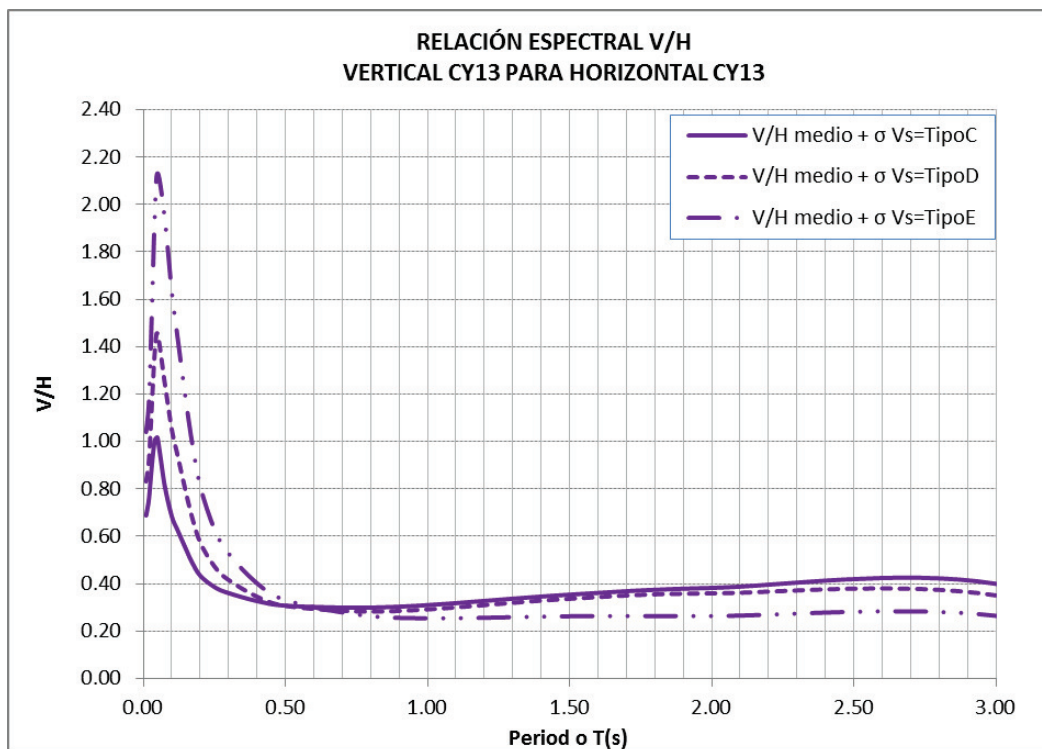
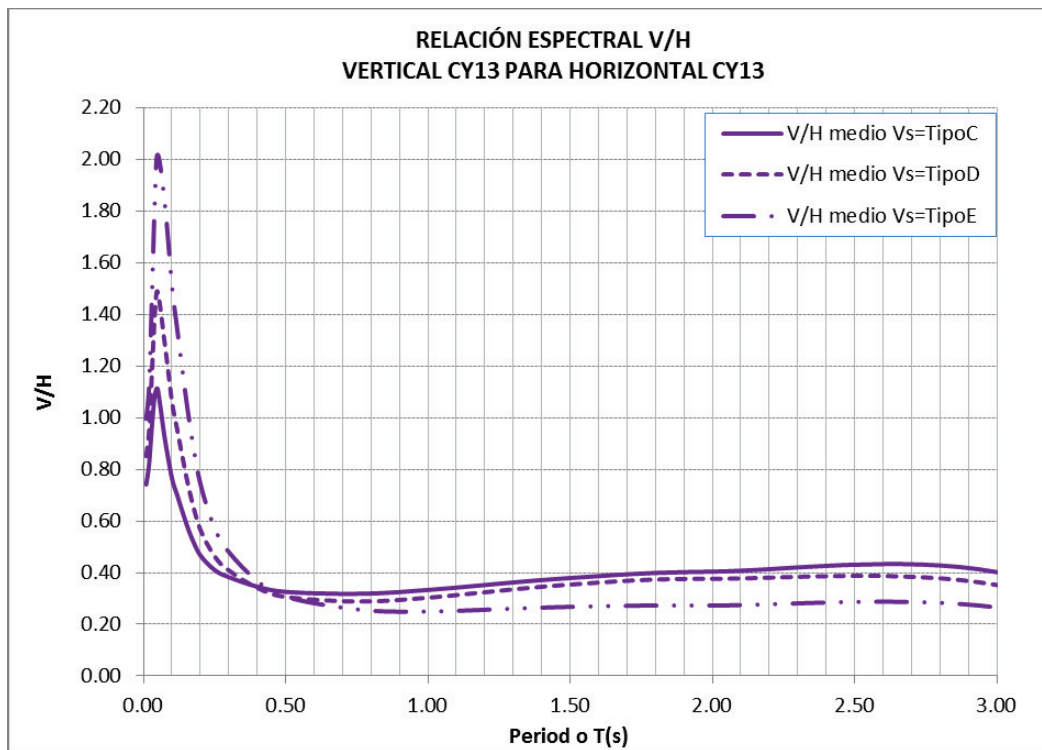
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.44 RELACIÓN V/H, FALLA PUENGASÍ, SECTOR CENTRO-SUR, MODELO VERTICAL BC13, MODELO HORIZONTAL CB13.



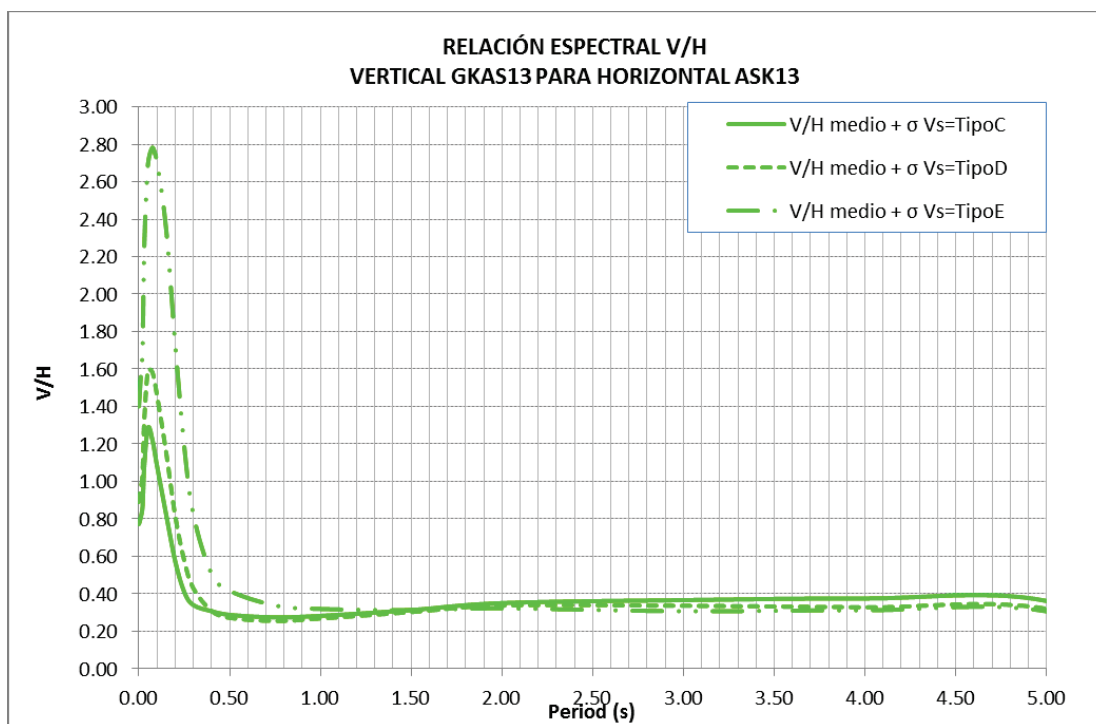
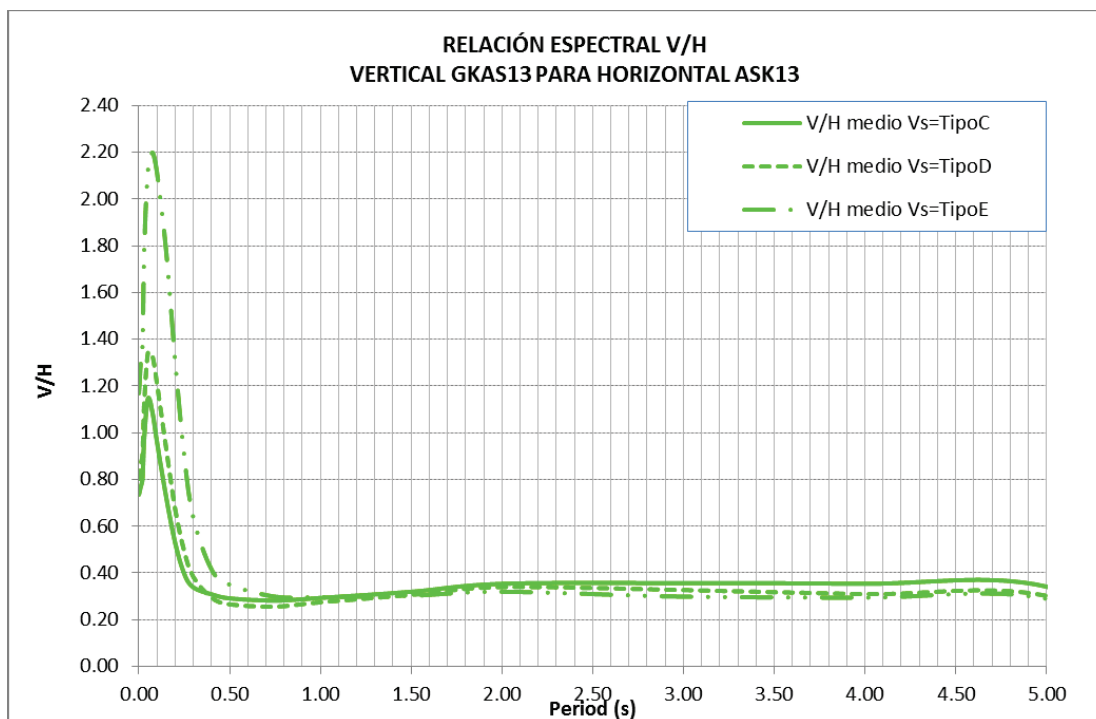
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.45 RELACIÓN V/H, FALLA PUENGASÍ, SECTOR CENTRO-SUR, MODELO VERTICAL CY13, MODELO HORIZONTAL CY13.



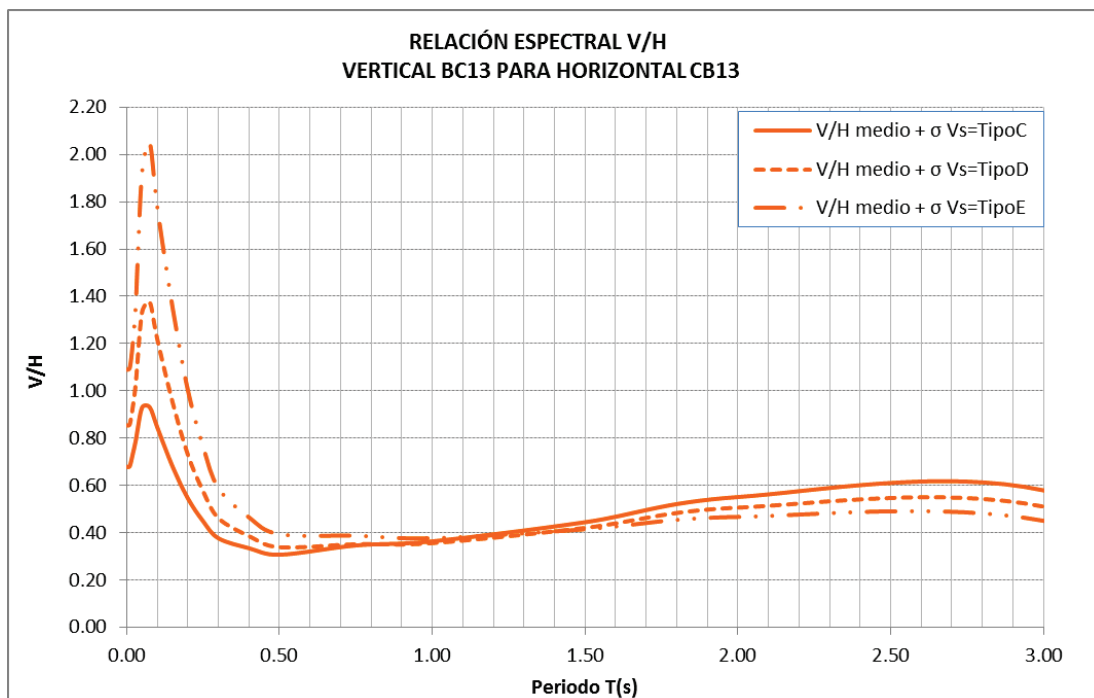
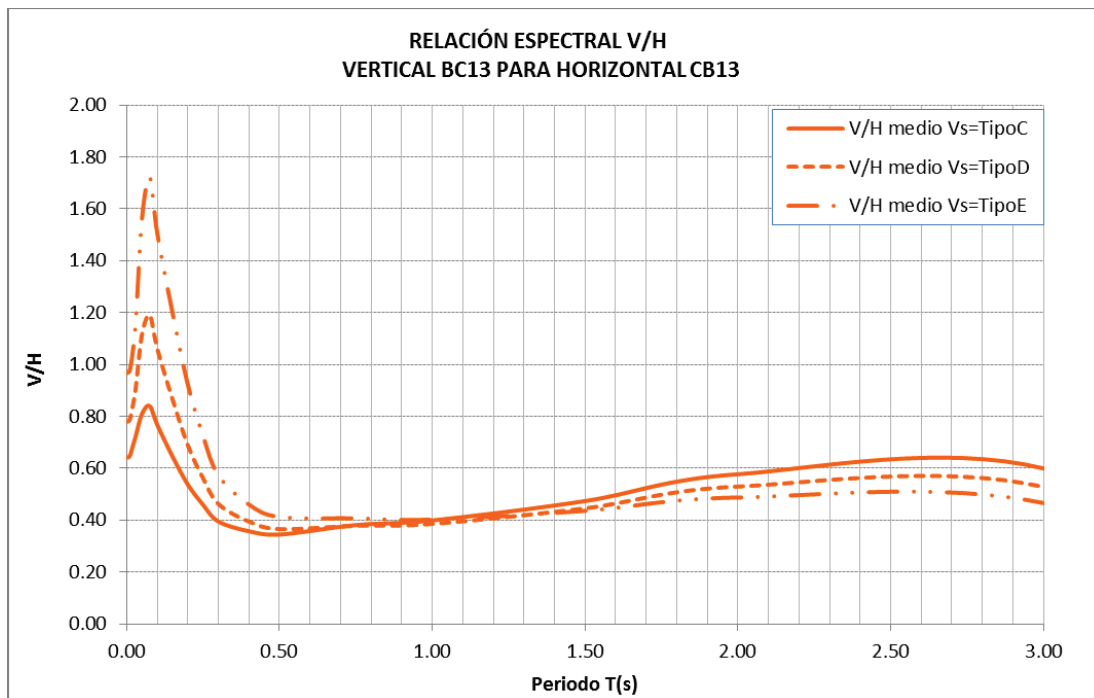
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.46 RELACIÓN V/H, FALLA PUENGASÍ, SECTOR CENTRO-SUR, MODELO VERTICAL GKAS13, MODELO HORIZONTAL ASK13.



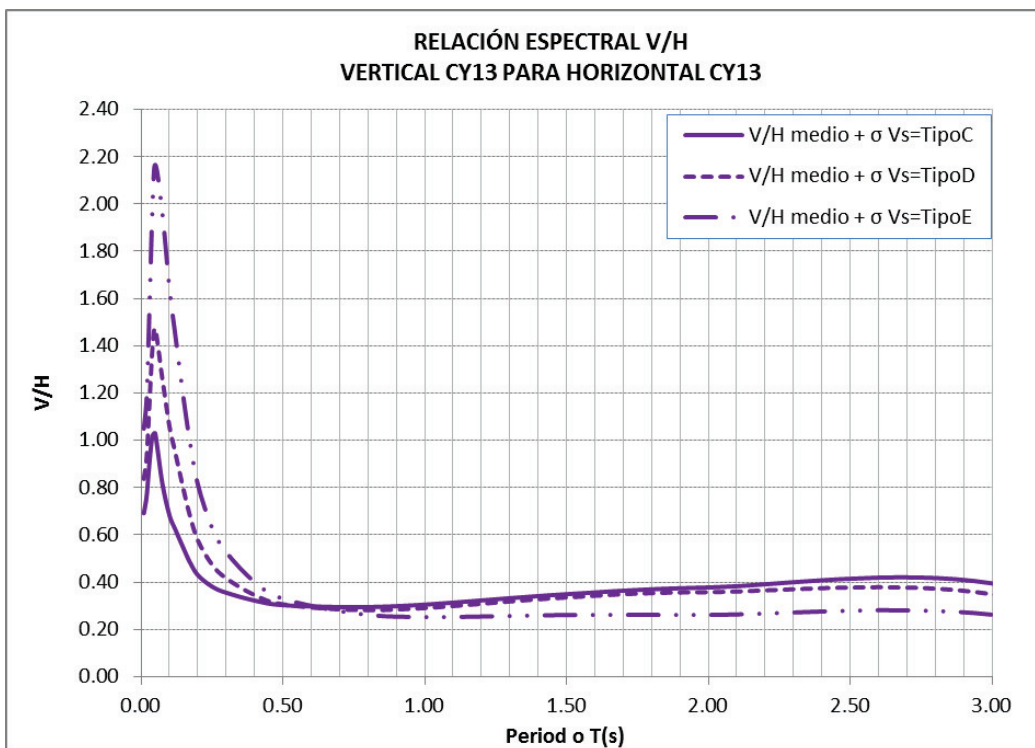
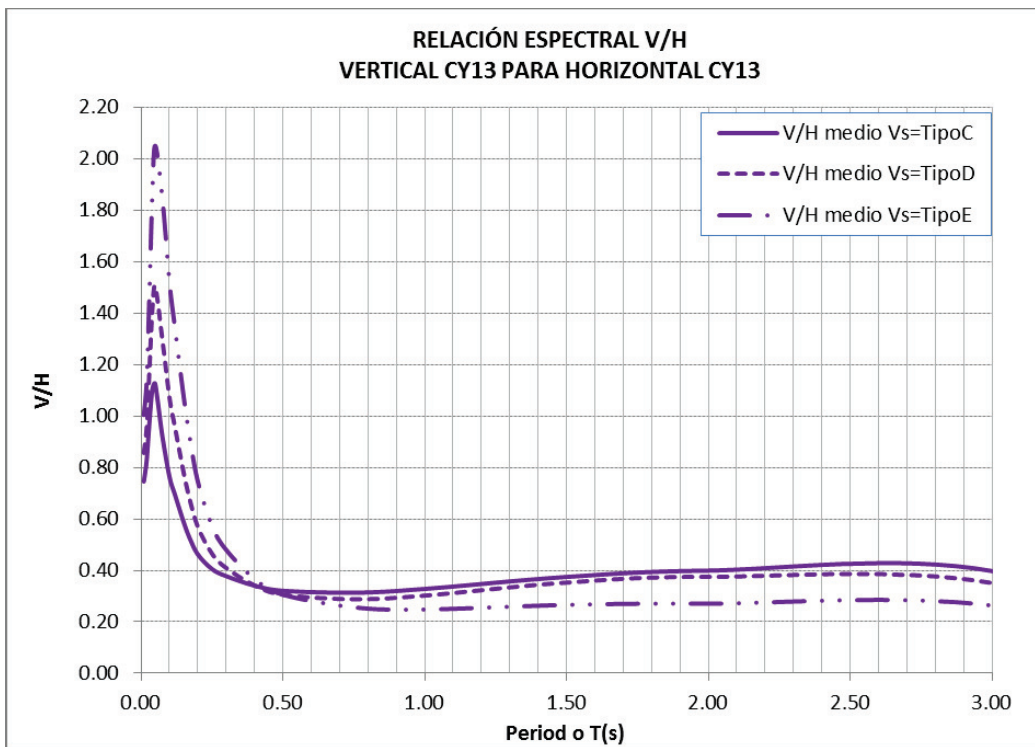
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.47 RELACIÓN V/H, FALLA PUENGASÍ, SECTOR CENTRO, MODELO VERTICAL BC13, MODELO HORIZONTAL CB13.



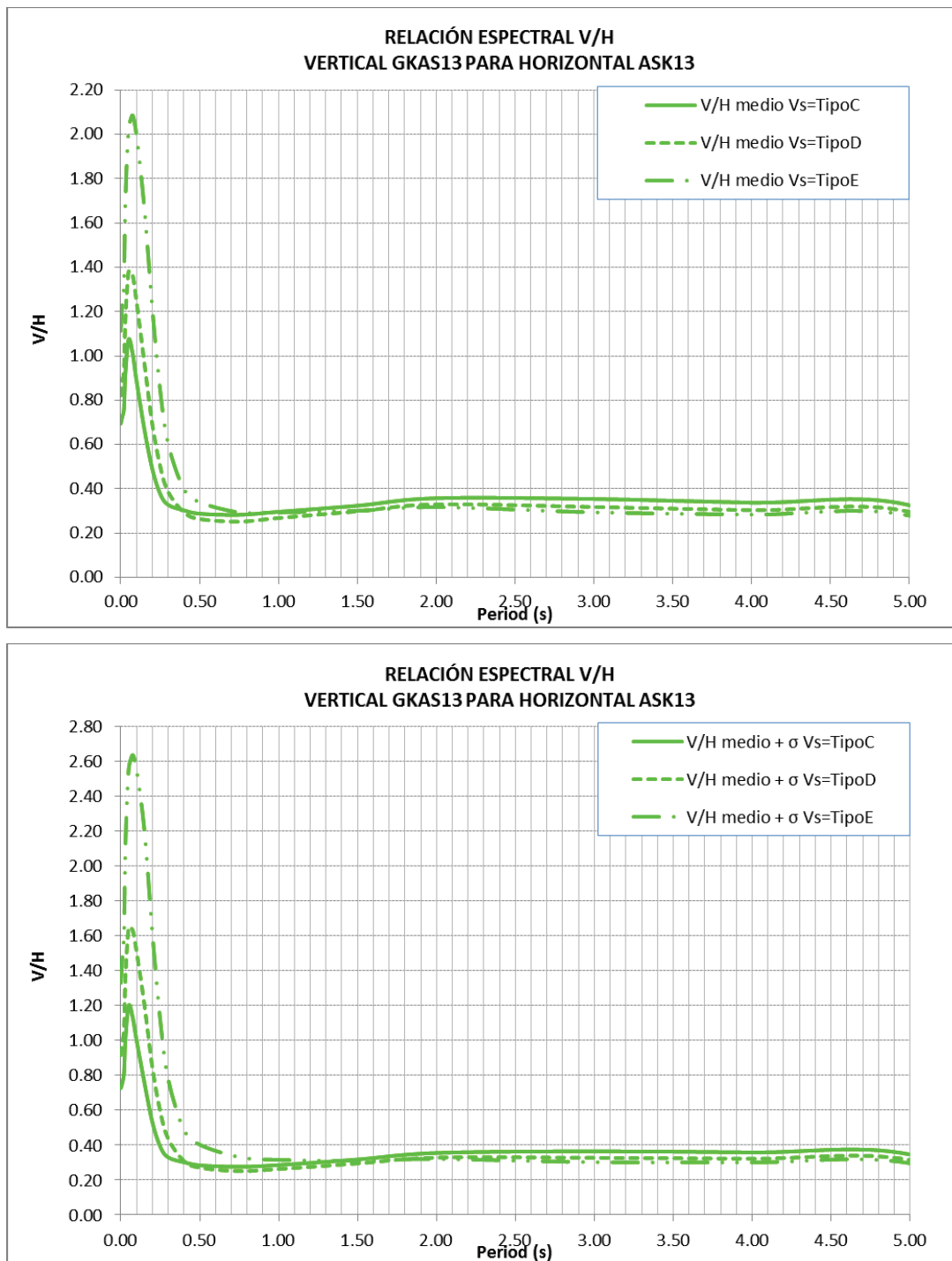
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.48 RELACIÓN V/H, FALLA PUENGASÍ, SECTOR CENTRO, MODELO VERTICAL CY13, MODELO HORIZONTAL CY13.



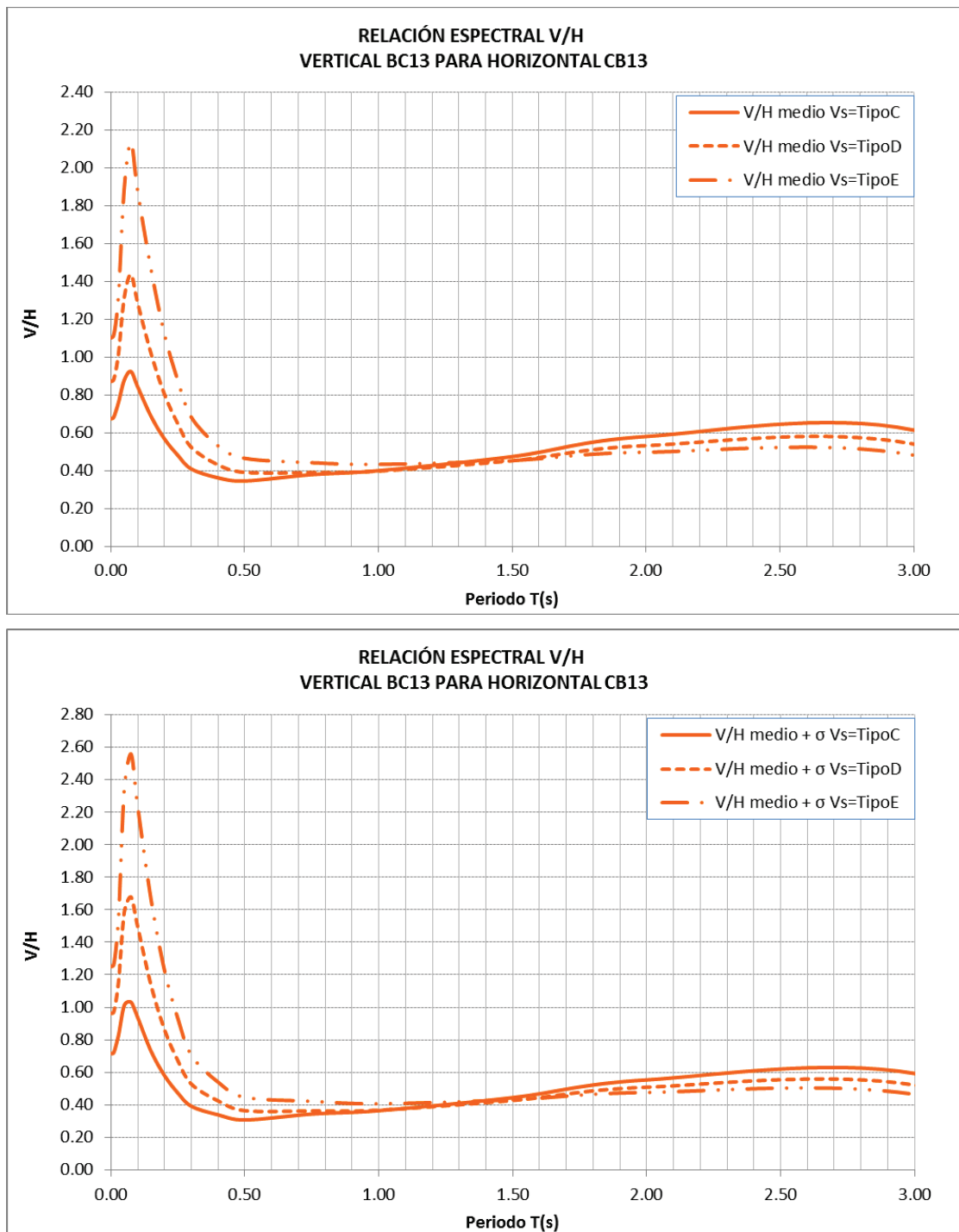
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.49 RELACIÓN V/H, FALLA PUENGASÍ, SECTOR CENTRO, MODELO VERTICAL GKAS13, MODELO HORIZONTAL ASK13.



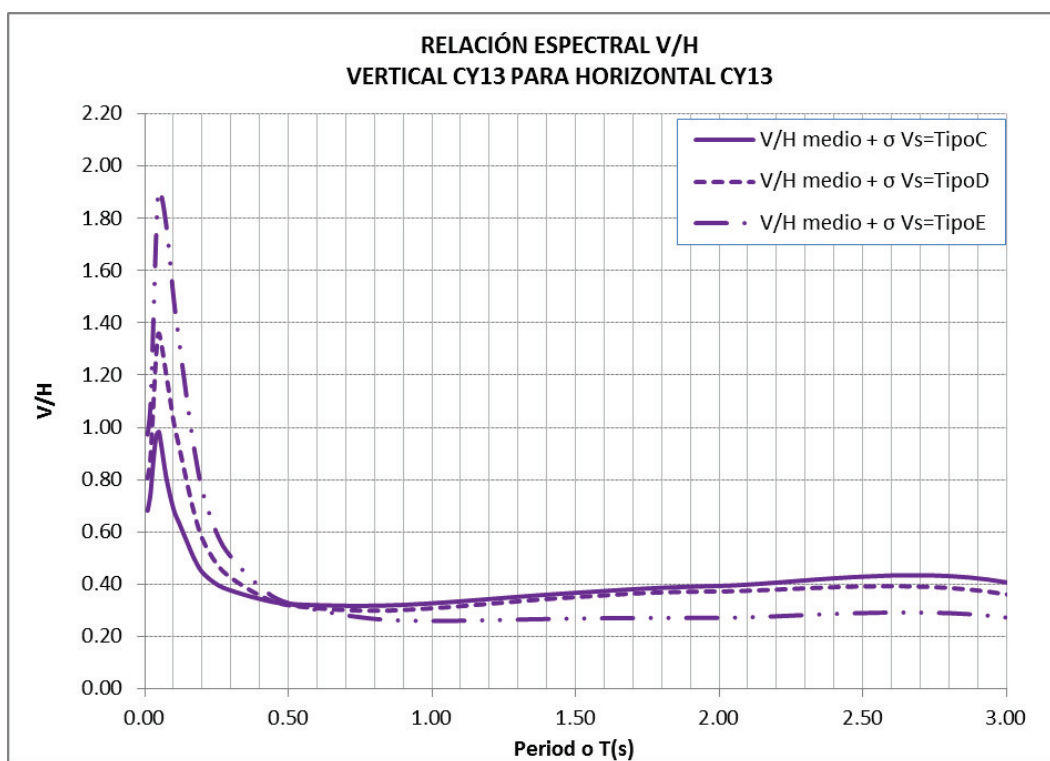
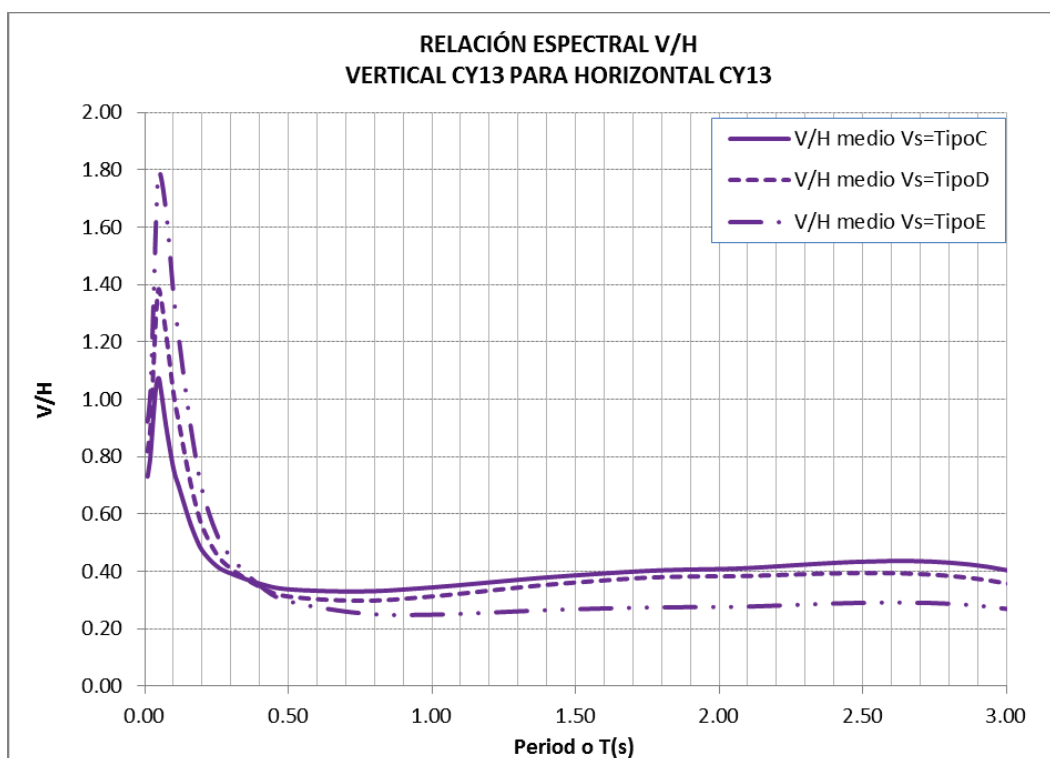
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.50 RELACIÓN V/H, FALLA ILB, SECTOR CENTRO-NORTE, MODELO VERTICAL BC13, MODELO HORIZONTAL CB13.



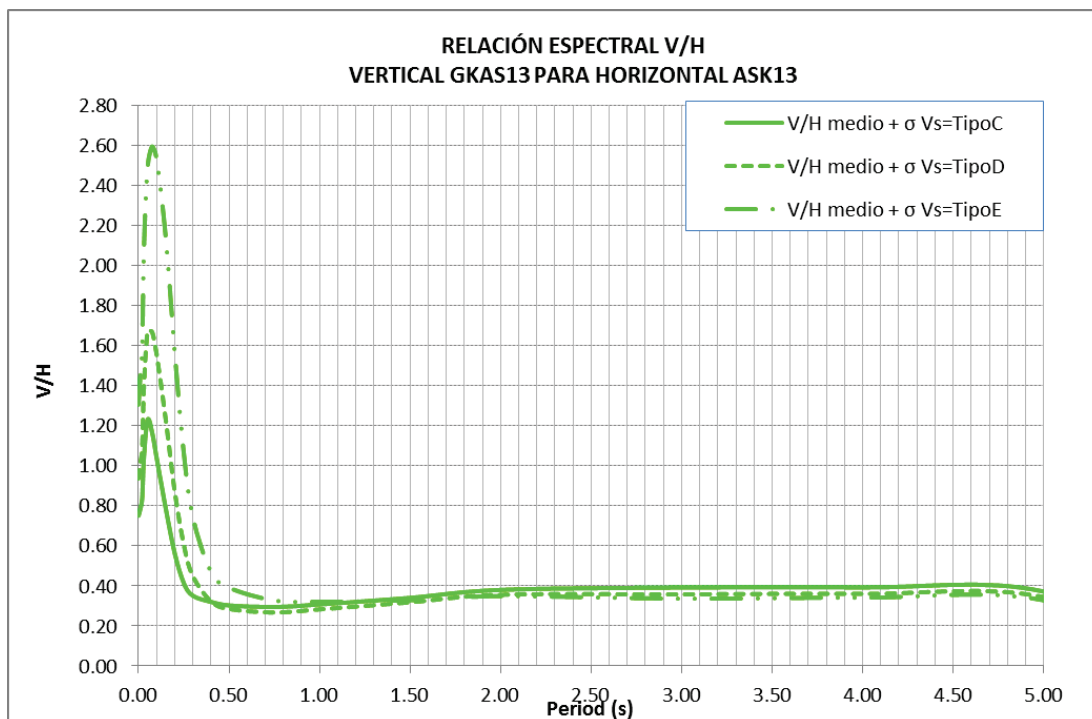
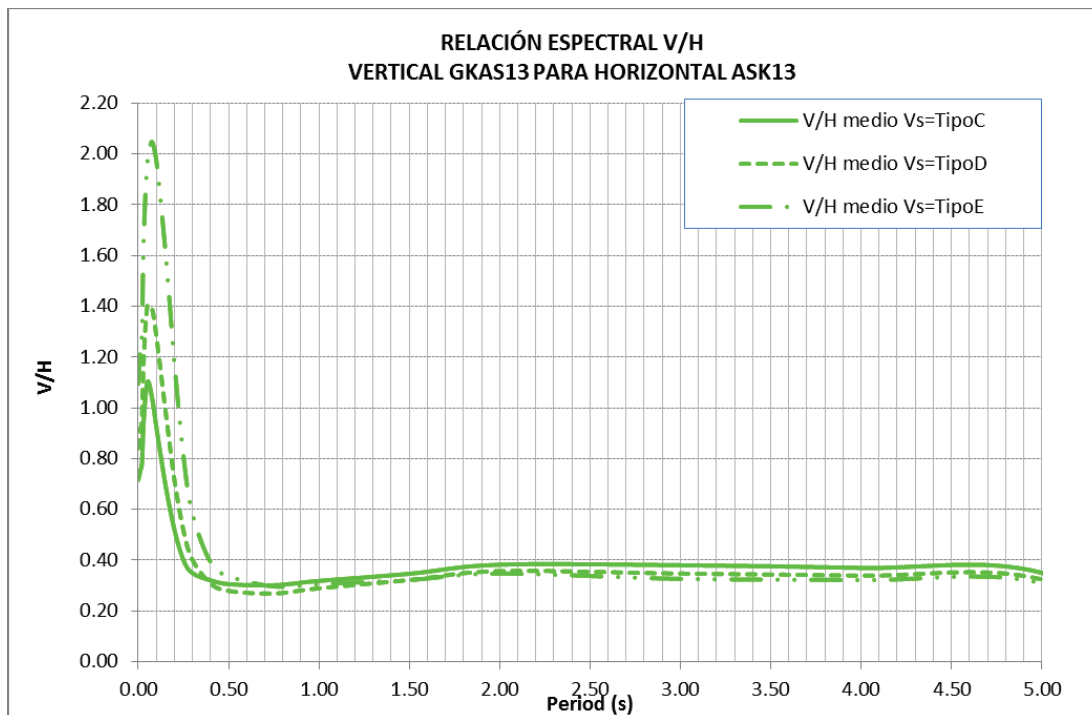
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.51 RELACIÓN V/H, FALLA ILB, SECTOR CENTRO-NORTE, MODELO VERTICAL CY13, MODELO HORIZONTAL CY13.



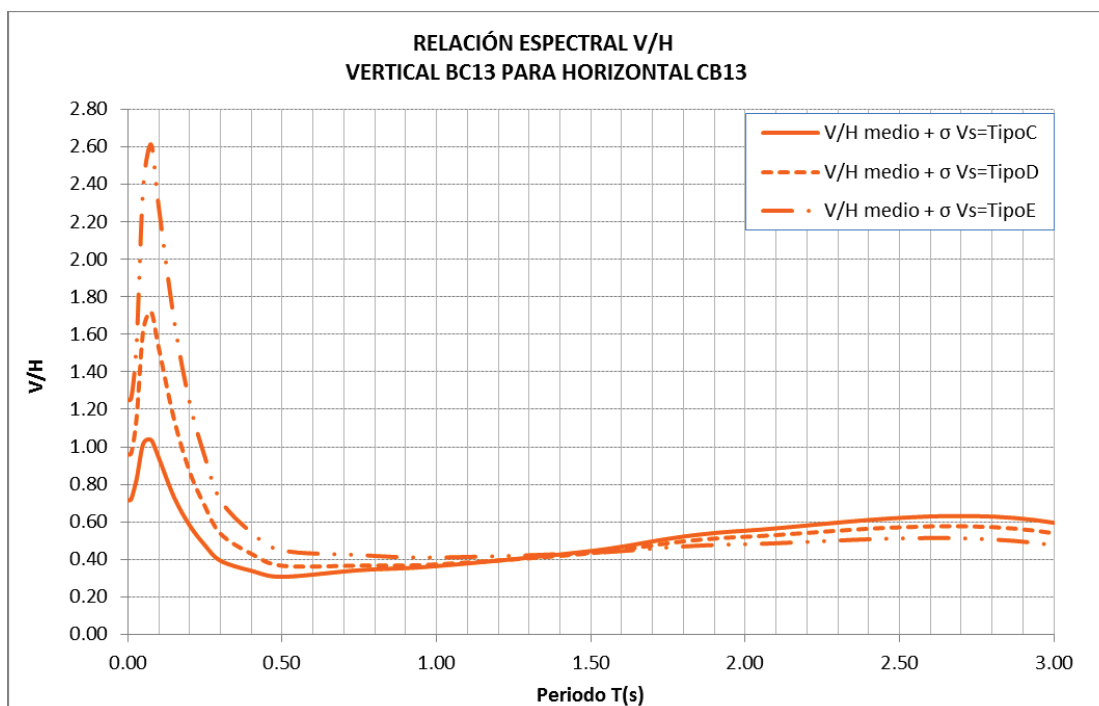
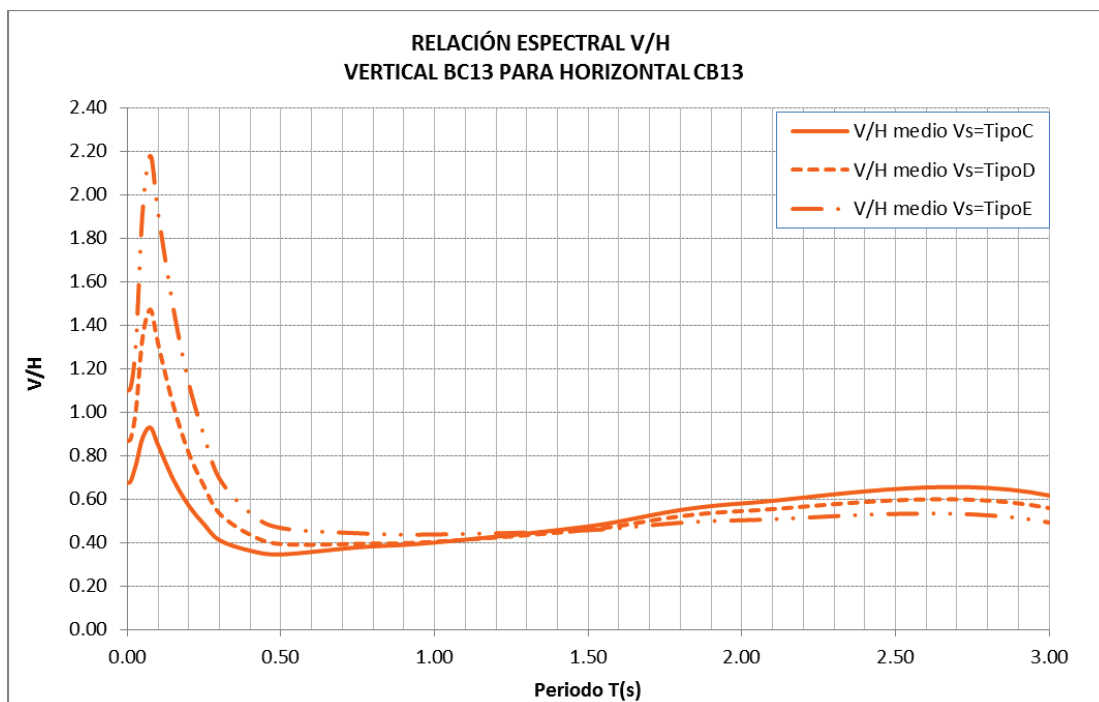
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.52 RELACIÓN V/H, FALLA ILB, SECTOR CENTRO-NORTE, MODELO VERTICAL GKAS13, MODELO HORIZONTAL ASK13.



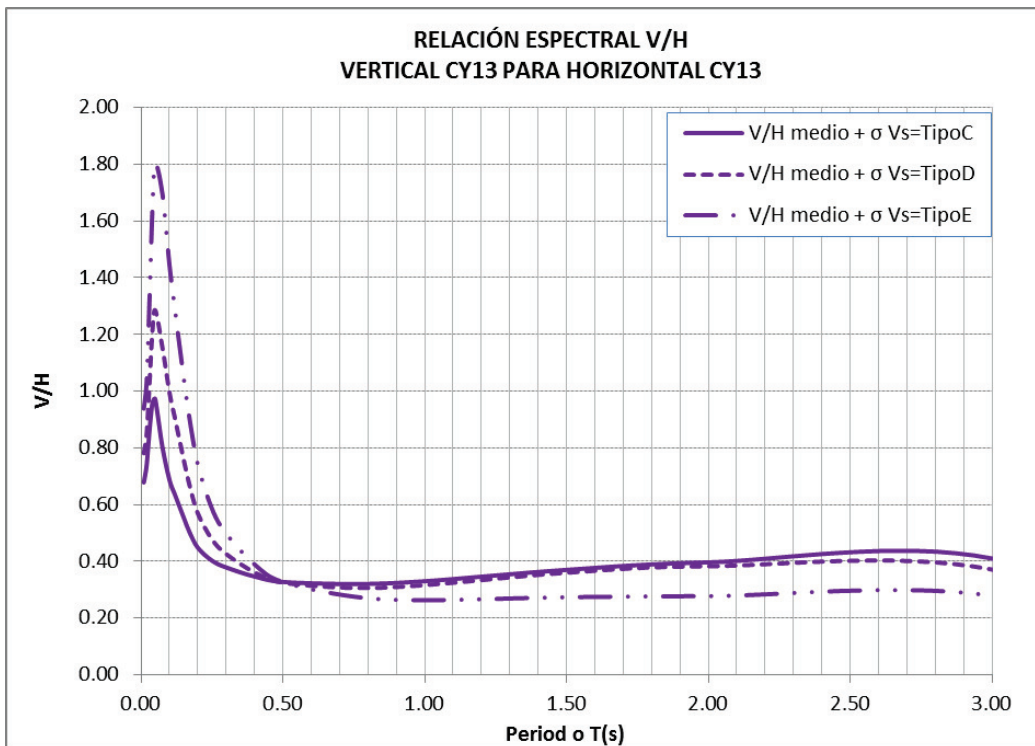
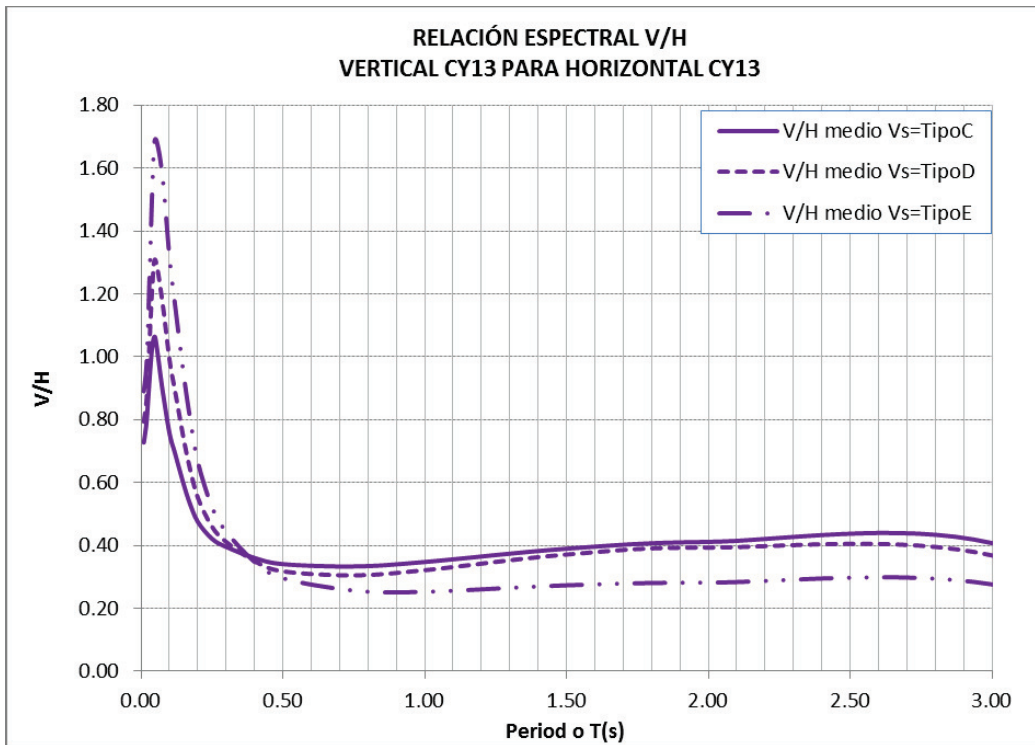
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.53 RELACIÓN V/H, FALLA ILB, SECTOR NORTE, MODELO VERTICAL BC13, MODELO HORIZONTAL CB13.



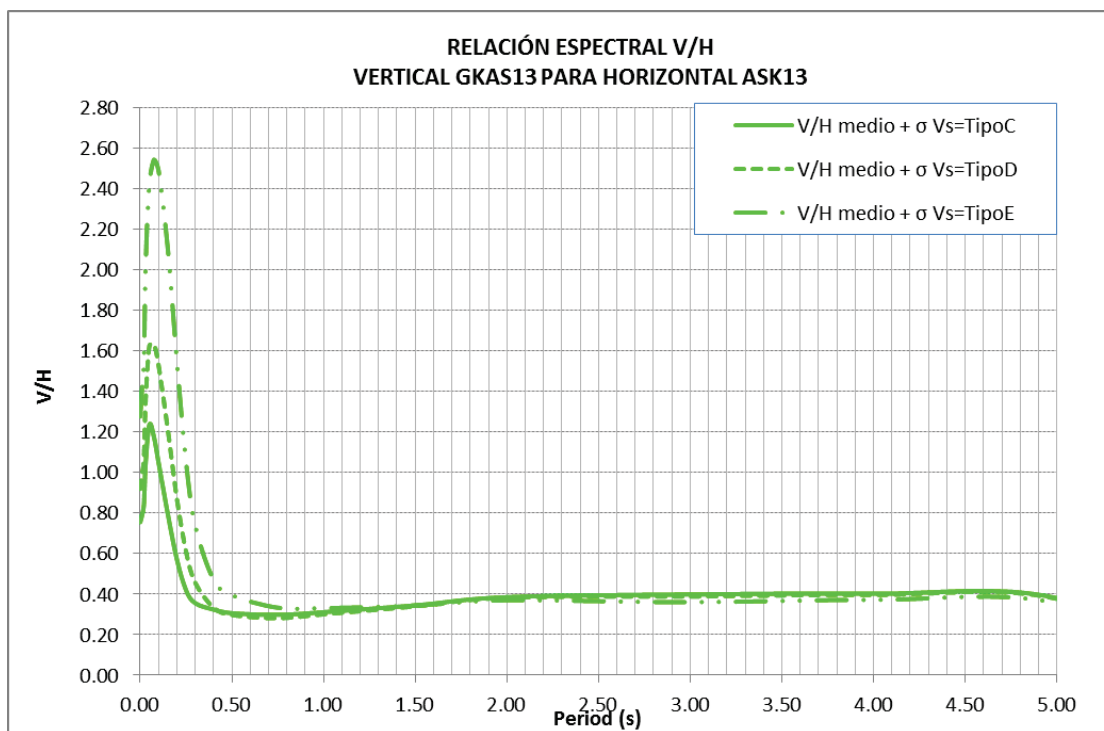
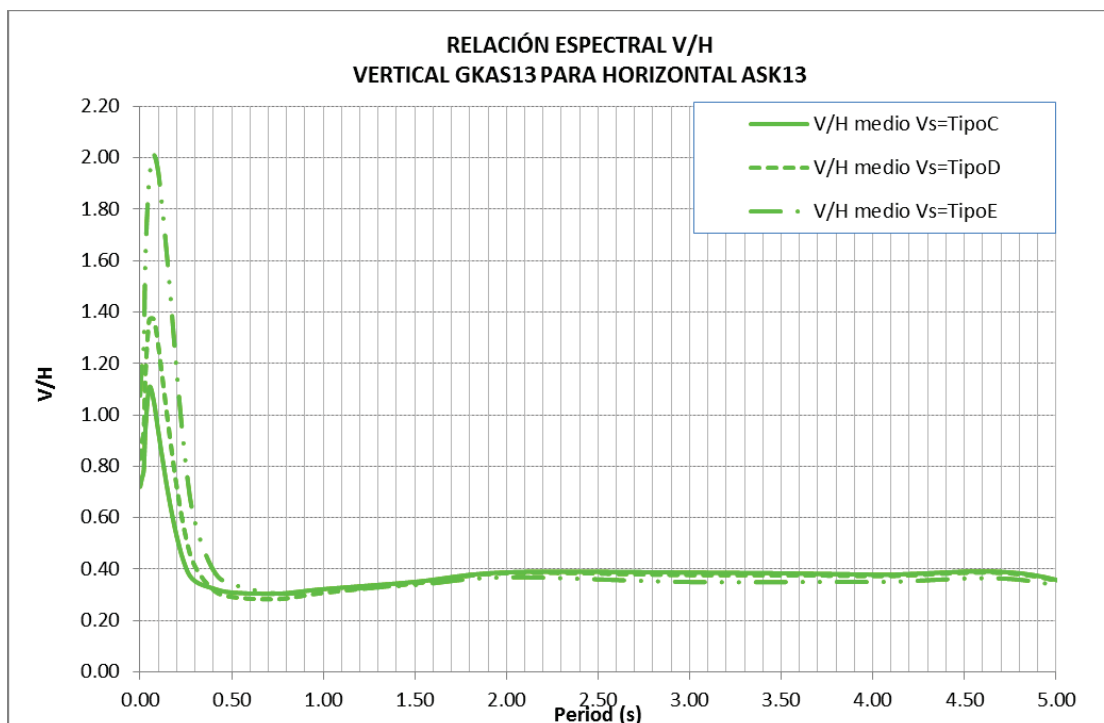
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.54 RELACIÓN V/H, FALLA ILB, SECTOR NORTE, MODELO VERTICAL CY13, MODELO HORIZONTAL CY13.



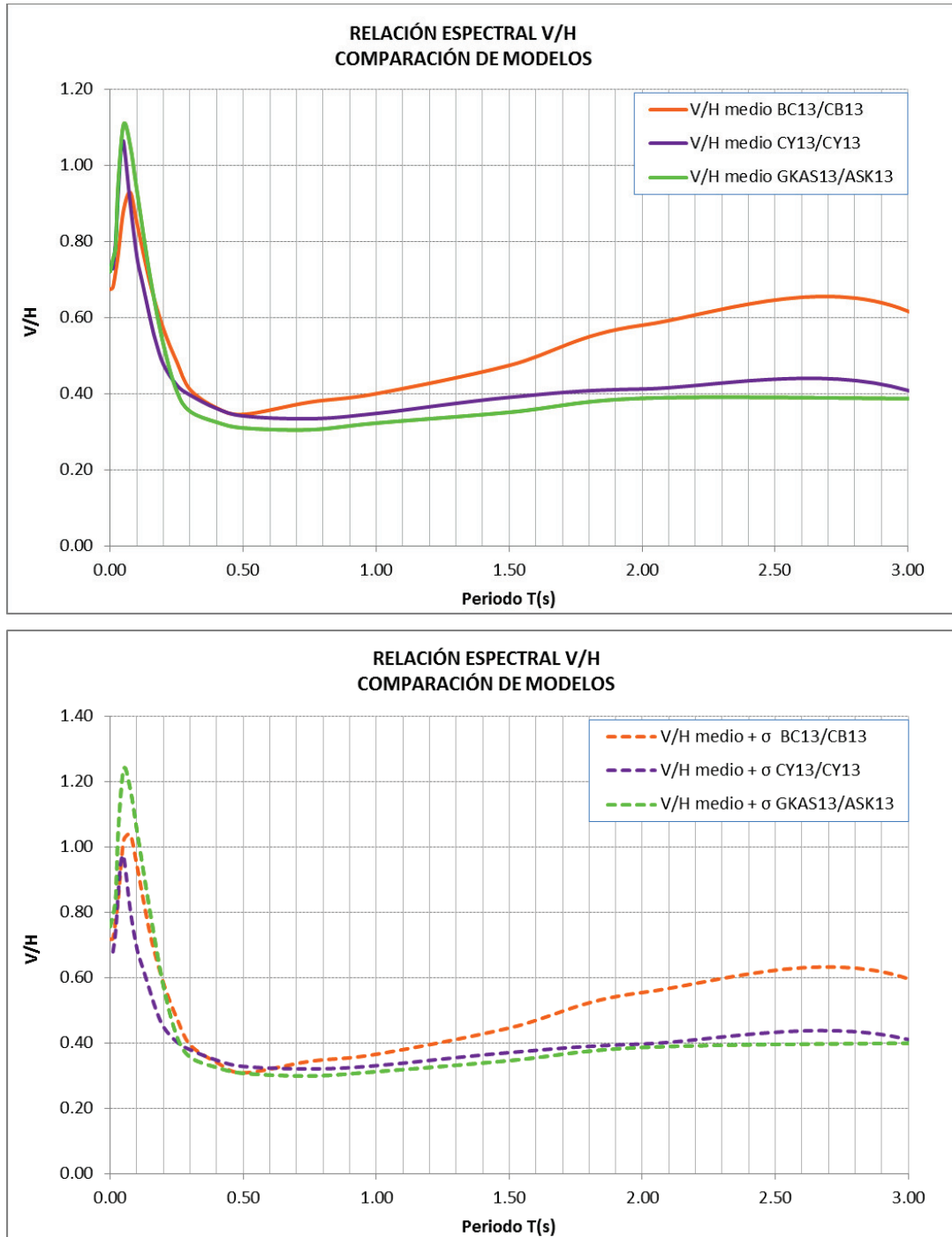
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.55 RELACIÓN V/H, FALLA ILB, SECTOR NORTE, MODELO VERTICAL GKAS13, MODELO HORIZONTAL ASK13.



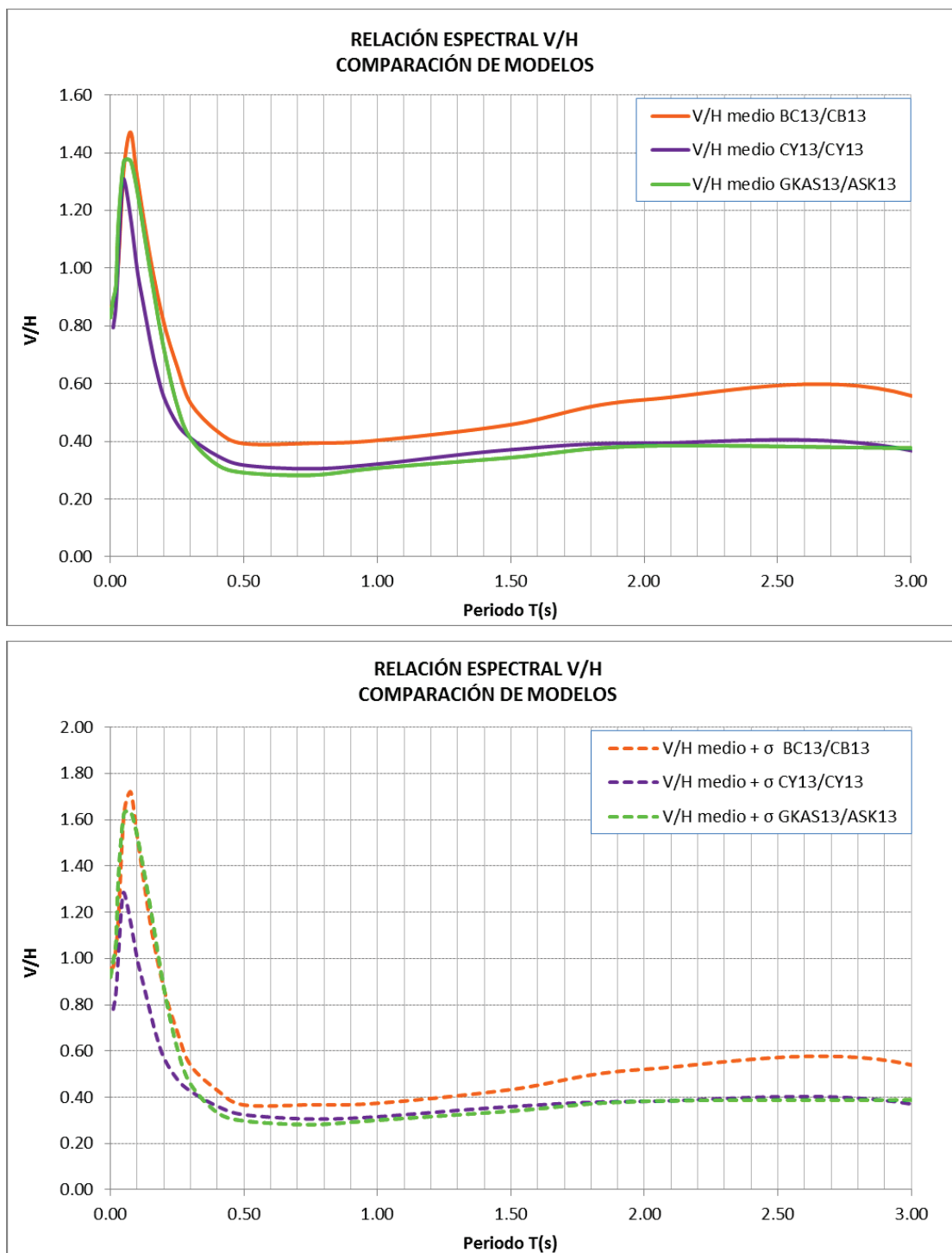
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.56 RELACIÓN V/H, FALLA ILB, SECTOR NORTE, $VS_{30}=460\text{M/S}$, MODELO VERTICAL BC13, CY13, GKAS13, MODELO HORIZONTAL CB13, CY13, ASK13.



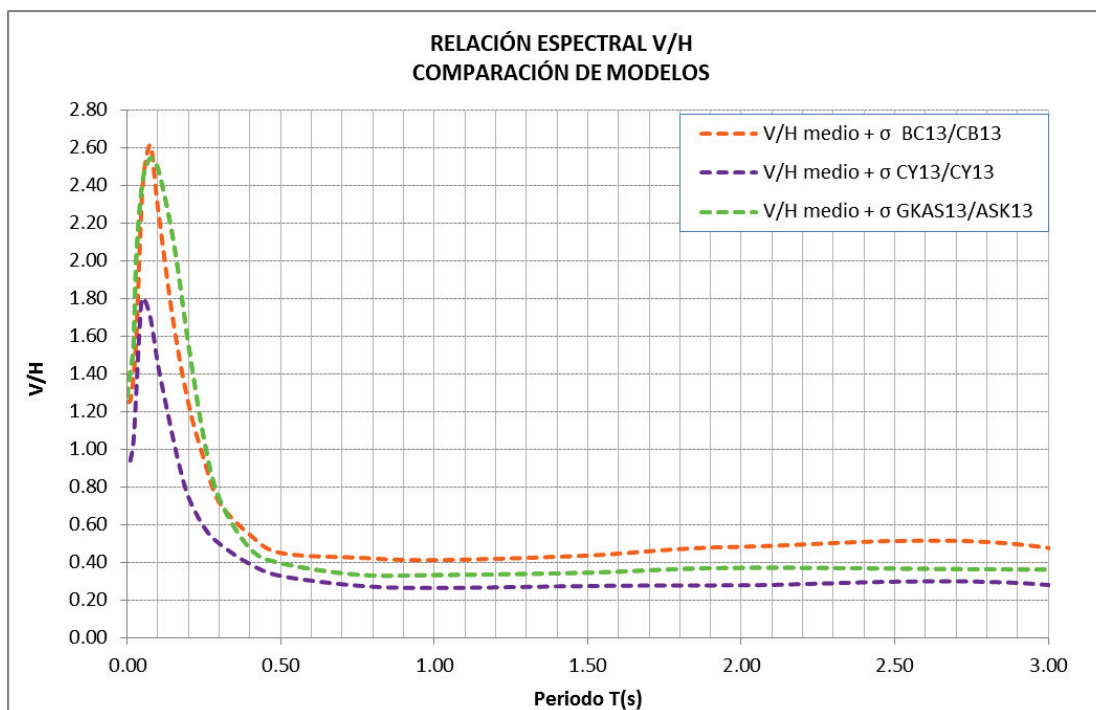
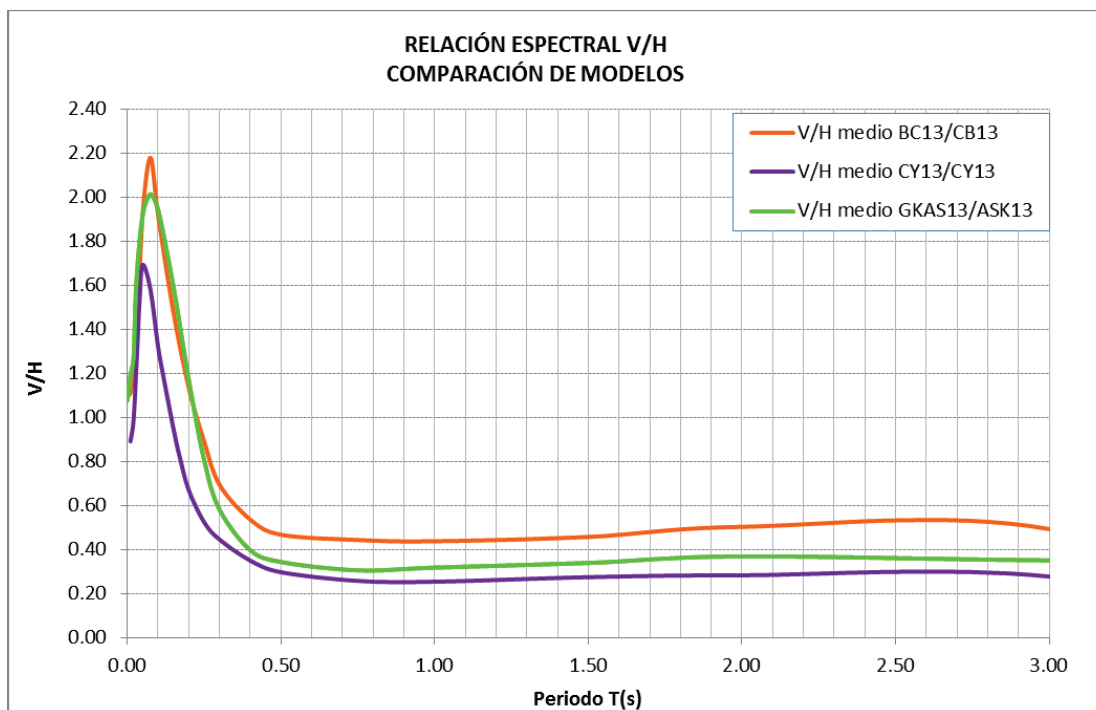
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.57 RELACIÓN V/H, FALLA ILB, SECTOR NORTE, $VS_{30}=300M/S$, MODELO VERTICAL BC13, CY13, GKAS13, MODELO HORIZONTAL CB13, CY13, ASK13.



Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.58 RELACIÓN V/H, FALLA ILB, SECTOR NORTE, $VS_{30}=200M/S$, MODELO VERTICAL BC13, CY13, GKAS13, MODELO HORIZONTAL CB13, CY13, ASK13.



Elaboración: Eduardo López

De las gráficas presentadas de relaciones espectrales V/H se desprenden las siguientes observaciones:

- Las formas de relaciones V/H obtenidas corresponden a las formas típicas presentadas por los investigadores que desarrollaron los modelos de atenuación.
- Cuando se considera 100% de desviación estándar se obtienen relaciones (V/H medio + σ) aproximadamente hasta un 20% superior para el caso BC13/CB13, 10% para el caso CY13/CY13, 32% para el caso GKAS13/ASK13, dependiendo del modelo observamos que no se dan variaciones muy considerables respecto a no considerar la desviación estándar.
- Las relaciones V/H son altamente dependientes del tipo de suelo, como se resume en la siguiente tabla, para el sector Sur asociado a la falla de Puengasí utilizando el modelo BC13/CB13:

TABLA 6.3 RELACIÓN V/H, FALLA PUENGASÍ, SECTOR SUR, MODELO BC13/CB13

Relación V/H, Falla Puengasí, Sector Sur, Modelo BC13/CB13						
T(s)	Vs=460 m/s		Vs=300 m/s		Vs=200 m/s	
	V/H medio	V/H medio + σ	V/H medio	V/H medio + σ	V/H medio	V/H medio + σ
0.001	0.648	0.685	0.783	0.858	0.965	1.088
0.02	0.691	0.739	0.844	0.936	1.049	1.199
0.05	0.819	0.940	1.120	1.337	1.564	1.926
0.075	0.862	0.956	1.203	1.391	1.721	2.049
0.1	0.793	0.875	1.076	1.237	1.504	1.775
0.2	0.550	0.559	0.696	0.739	0.921	1.003
0.3	0.399	0.381	0.464	0.464	0.573	0.589
0.5	0.344	0.306	0.365	0.338	0.412	0.394
1	0.385	0.351	0.378	0.350	0.404	0.379

Elaboración: Eduardo López

- En la tabla 6.3 se observa valores máximos en 0.075 s, para suelo tipo C V/H medio= 0.862, para suelo tipo D V/H medio=1.20, para suelo tipo E V/H medio=1.72. Notamos que desde el periodo 0.2 s para suelo tipo C y desde el periodo 0.3 s para suelo tipo D y E (zona con relleno de color celeste) las relaciones V/H son menores al factor 2/3 que norma la NEC-15.

- Con el fin de comparar los resultados obtenidos por cada modelo se resume en las siguientes tablas:

TABLA 6.4 RELACIÓN V/H, FALLA PUENGASÍ, SECTOR SUR, $V_{S30}=460$ M/S, COMPARACIÓN DE MODELOS

Relación V/H, Falla Puengasí, Sector Sur, $V_s=460$ m/s						
T(s)	BC13 / CB13		CY13 / CY13		GKAS 13 / ASK 13	
	V/H medio	V/H medio + σ	V/H medio	V/H medio + σ	V/H medio	V/H medio + σ
0.001	0.648	0.685	0.731	0.678	0.749	0.787
0.02	0.691	0.739	0.804	0.744	0.818	0.880
0.05	0.819	0.940	1.074	0.983	1.164	1.306
0.075	0.862	0.956	0.909	0.806	1.111	1.246
0.1	0.793	0.875	0.766	0.684	0.986	1.112
0.2	0.550	0.559	0.475	0.442	0.553	0.601
0.3	0.399	0.381	0.392	0.369	0.354	0.356
0.5	0.344	0.306	0.336	0.317	0.305	0.302
1	0.385	0.351	0.344	0.320	0.309	0.298

Elaboración: Eduardo López

TABLA 6.5 RELACIÓN V/H, FALLA ILB, SECTOR CENTRO-NORTE, $V_{S30}=460$ M/S, COMPARACIÓN DE MODELOS

Relación V/H, Falla ILB, Sector Centro-Norte, $V_s=460$ m/s						
T(s)	BC13 / CB13		CY13 / CY13		GKAS 13 / ASK 13	
	V/H medio	V/H medio + σ	V/H medio	V/H medio + σ	V/H medio	V/H medio + σ
0.001	0.674	0.716	0.731	0.681	0.716	0.751
0.02	0.719	0.773	0.805	0.746	0.781	0.838
0.05	0.878	1.014	1.071	0.981	1.101	1.231
0.075	0.923	1.031	0.903	0.809	1.043	1.167
0.1	0.842	0.936	0.760	0.689	0.924	1.040
0.2	0.568	0.580	0.474	0.446	0.520	0.563
0.3	0.409	0.392	0.393	0.376	0.349	0.351
0.5	0.345	0.307	0.338	0.325	0.306	0.303
1	0.399	0.365	0.345	0.327	0.318	0.308

Elaboración: Eduardo López

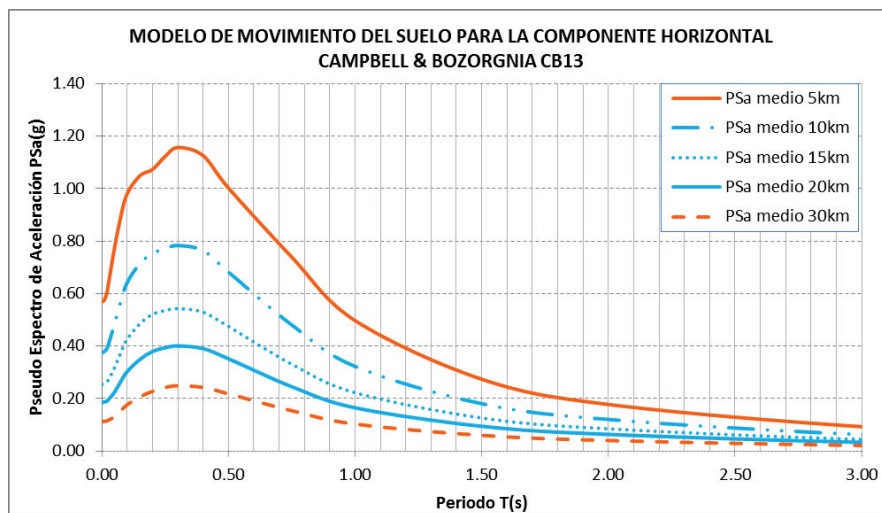
- En la tabla 6.4 y 6.5, en general podemos indicar que los modelos tienen la misma tendencia y a mi criterio el valor de las ordenadas tienen una variación aceptable, el modelo GKAS13/ASK13 es el que reporta mayores ordenadas y el modelo BC13/CB13 el que reporta las menores. De igual manera se encuentra con negrilla los picos y con relleno azul los valores inferiores a 2/3.

6.5 ANALISIS POR DISTANCIAS R_{RUP}

Debido a que el pseudo espectro para la componente vertical es altamente dependiente de la distancia de la fuente al sitio, se calculan los pseudo espectros en función de R_{RUP} según lo expuesto en 6.3. Las abreviaciones y metodología para presentar las gráficas son igual a la utilizada en 6.4.

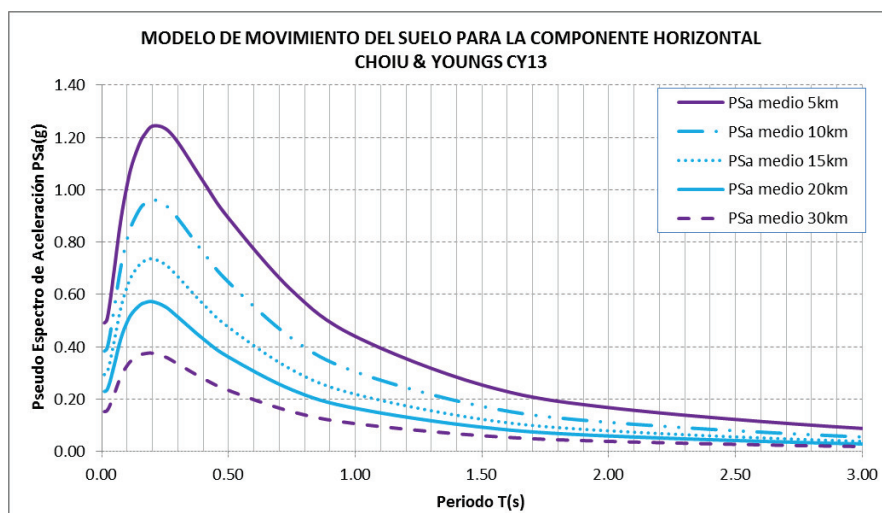
6.5.1 PSa PSEUDO ESPECTROS (COMPONENTE HORIZONTAL)

FIGURA 6.59 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, FALLA PUENGASÍ, $VS_{30}=460M/S$, MODELO, BC13



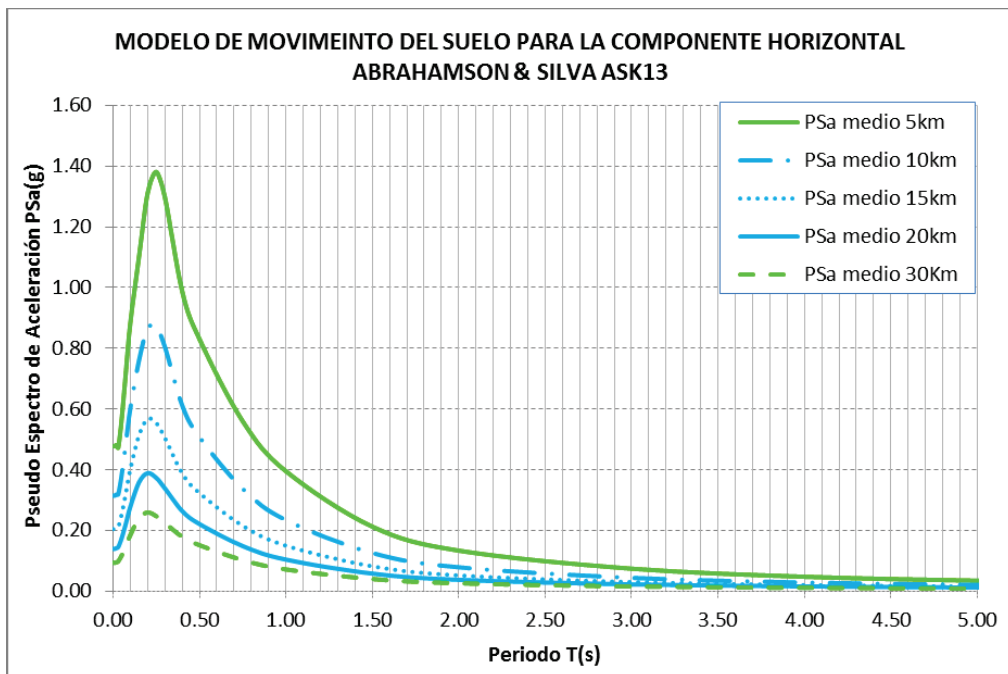
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.60 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, FALLA PUENGASÍ, $VS_{30}=460M/S$, MODELO, CY13



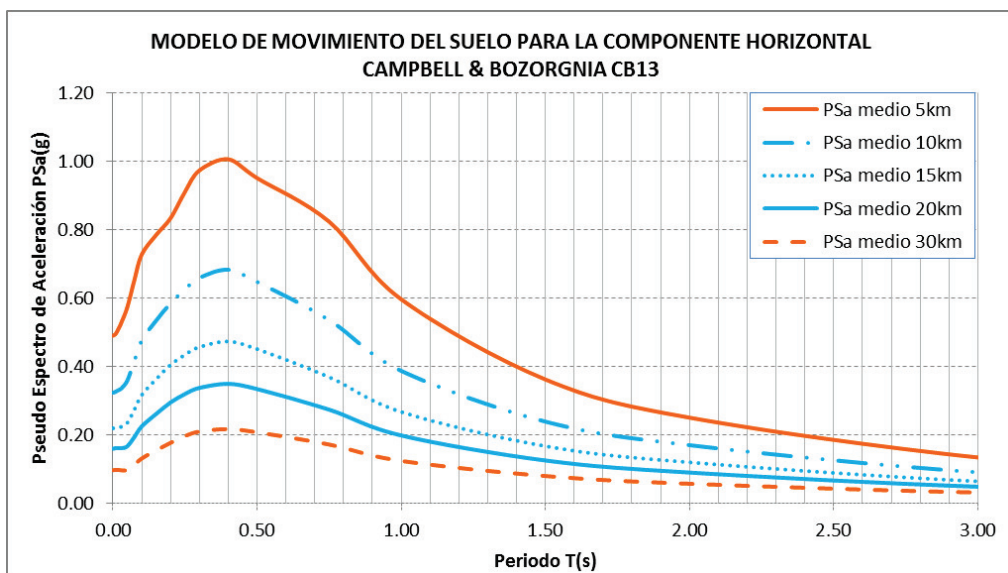
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.61 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, FALLA PUENGASÍ,
 $VS_{30}=460\text{M/S}$
 MODELO, ASK13



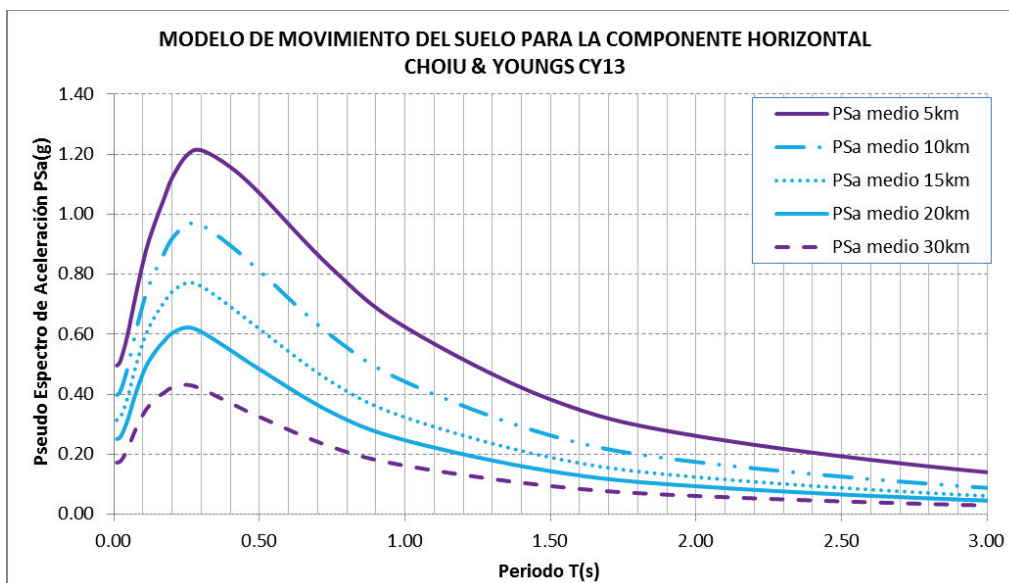
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.62 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, FALLA PUENGASÍ,
 $VS_{30}=300\text{M/S}$
 MODELO, BC13



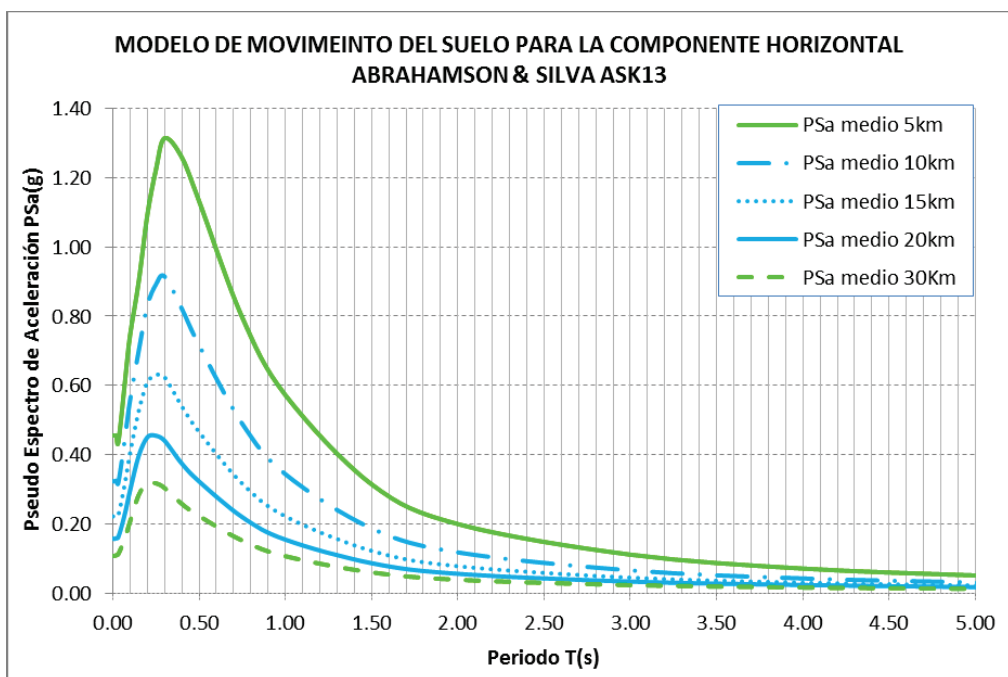
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.63 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, FALLA PUENGASÍ,
 $VS_{30}=300M/S$
 MODELO, CY13



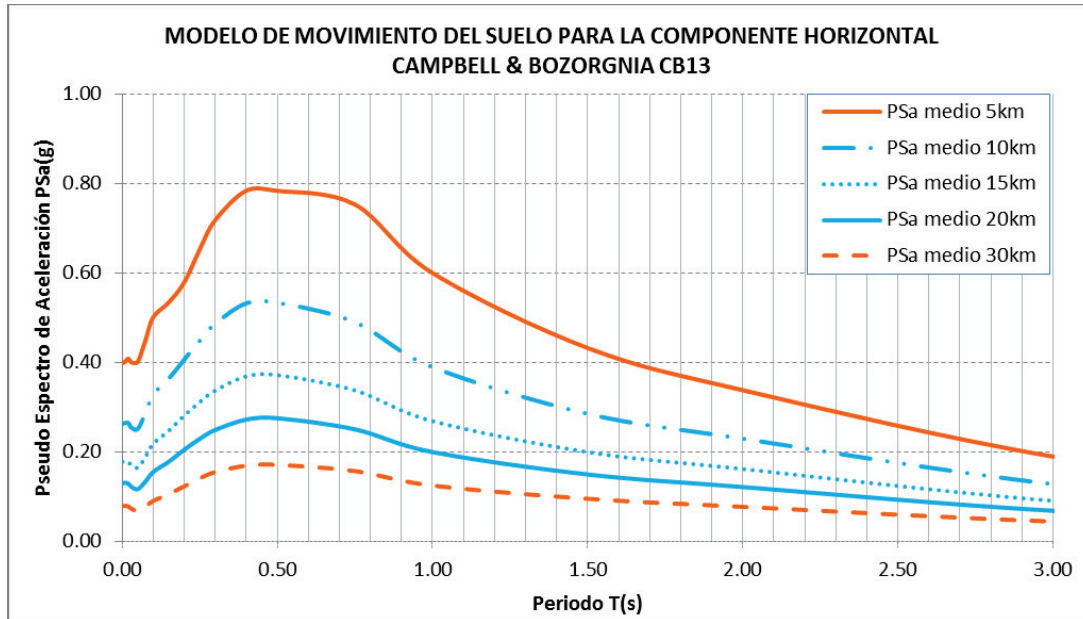
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.64 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, FALLA PUENGASÍ,
 $VS_{30}=300M/S$
 MODELO, ASK13



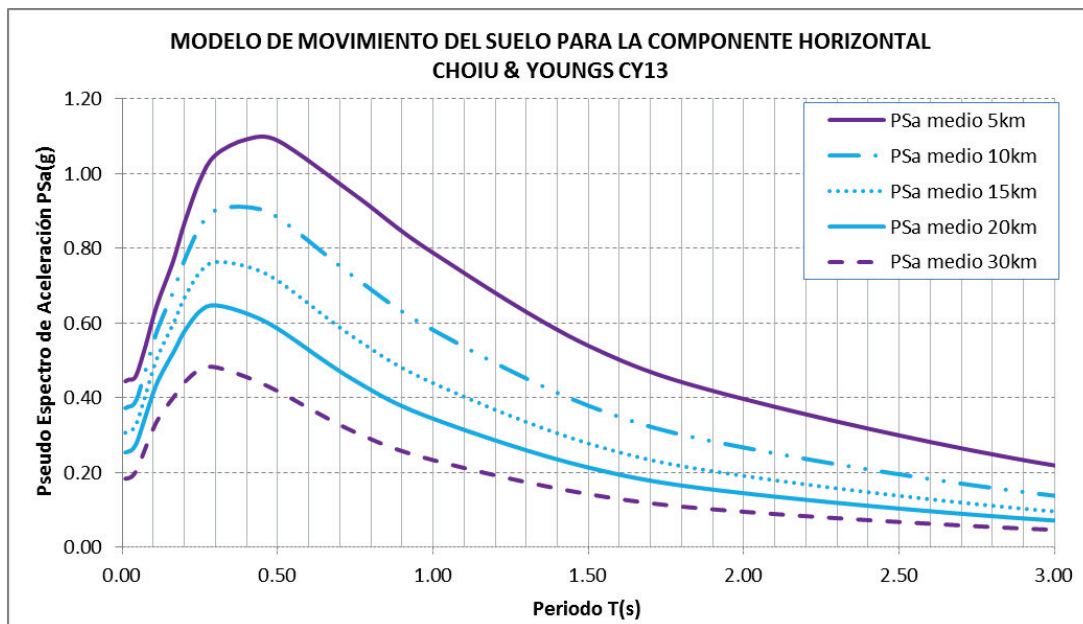
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.65 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, FALLA PUENGASÍ,
 $VS_{30}=200\text{M/S}$
 MODELO, BC13



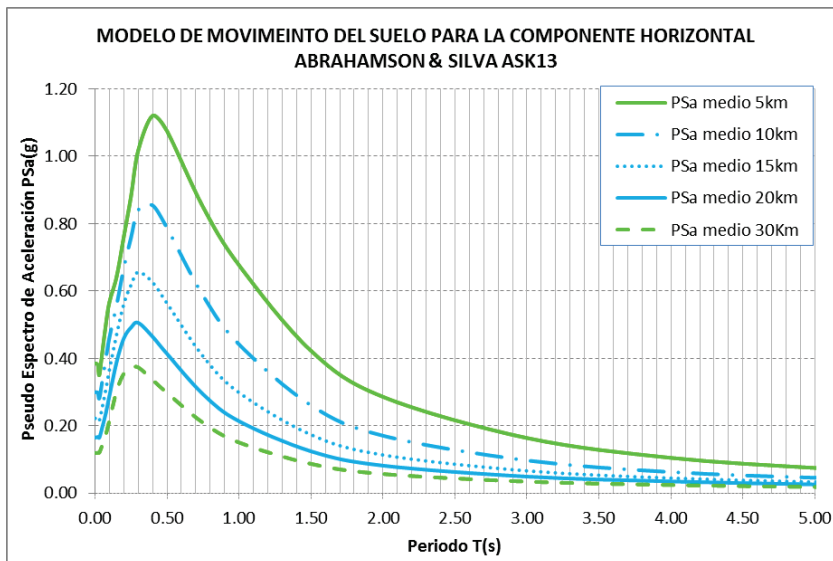
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.66 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, FALLA PUENGASÍ,
 $VS_{30}=200\text{M/S}$
 MODELO, CY13



Elaboración: Eduardo López

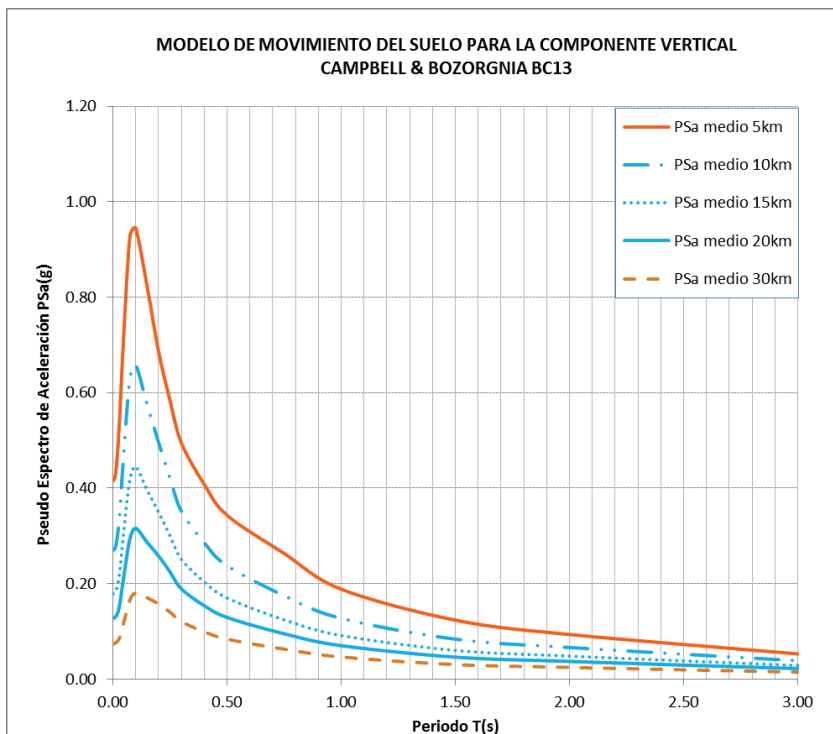
FIGURA 6.67 PSA COMPONENTE HORIZONTAL, FALLA PUENGASÍ, $V_{S_{30}}=200\text{M/S}$,
MODELO, ASK13



Elaboración: Eduardo López

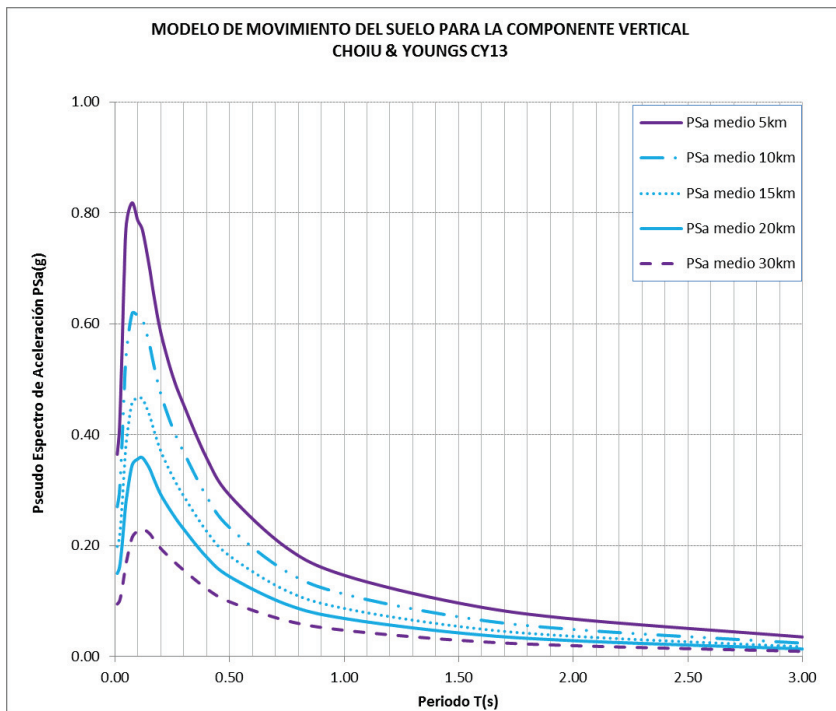
6.5.2 PSa PSEUDO ESPECTROS (COMPONENTE VERTICAL)

FIGURA 6.68 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, $V_{S_{30}}=460\text{M/S}$,
MODELO, BC13



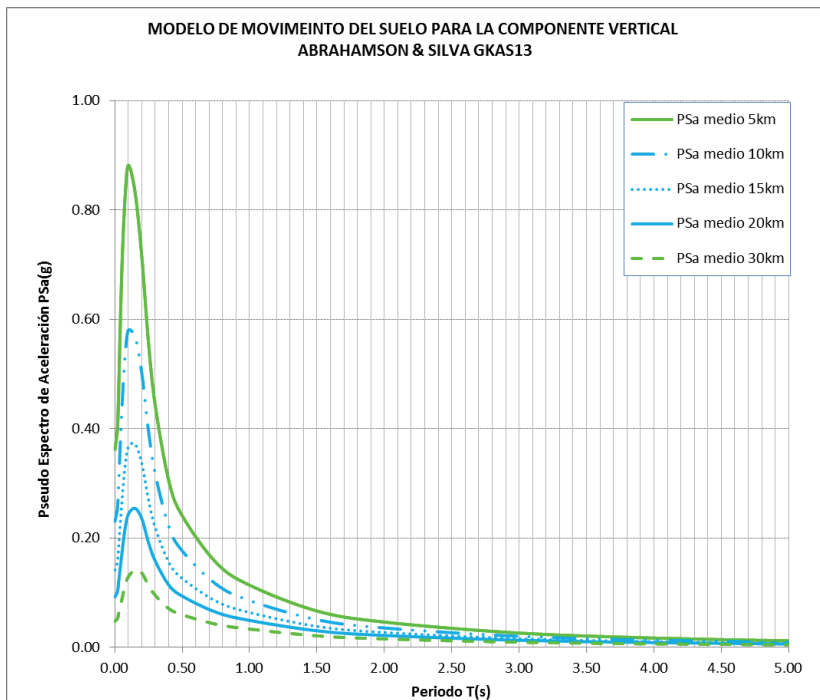
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.69 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=460\text{M/S}$
 MODELO, CY13



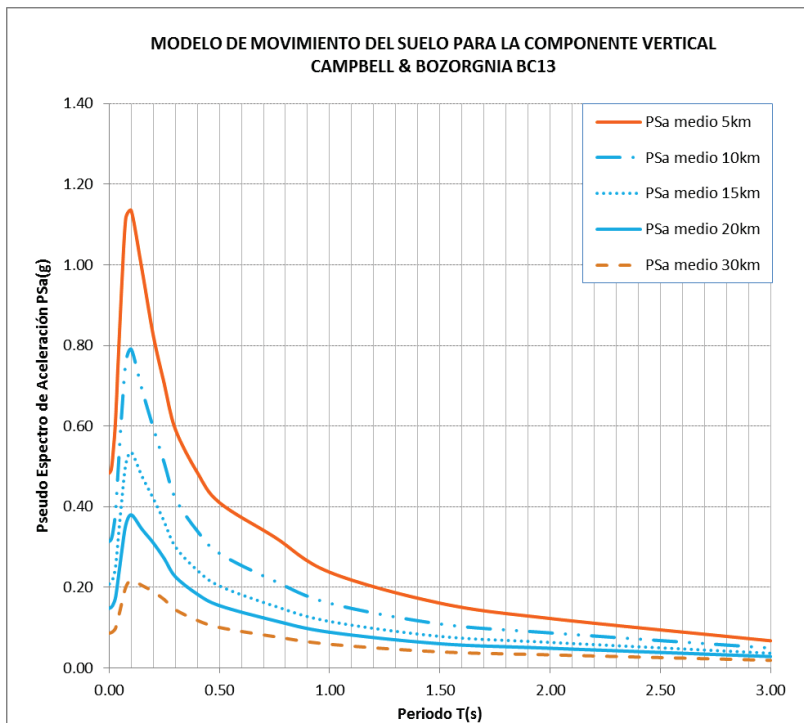
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.70 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=460\text{M/S}$
 MODELO, GKAS13



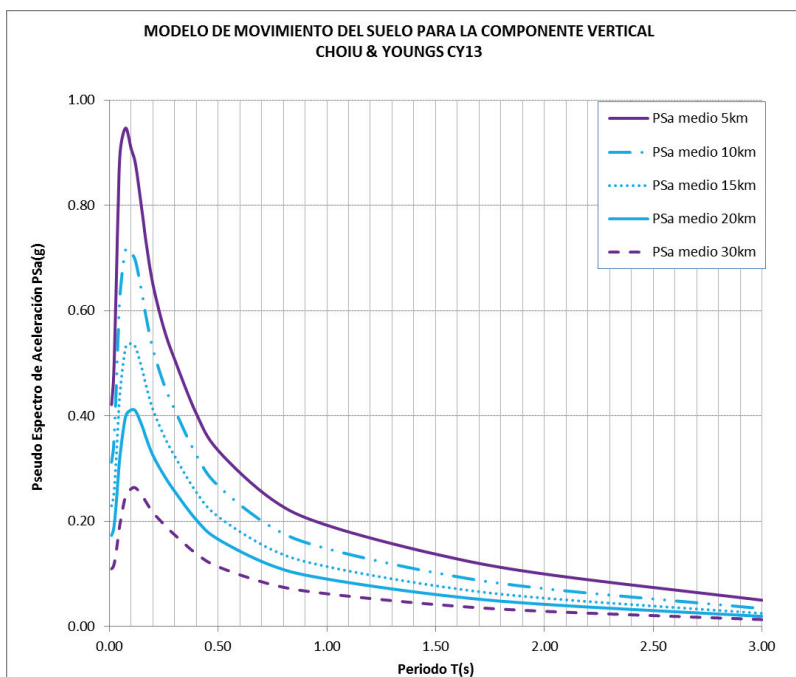
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.71 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=300\text{M/S}$
 MODELO, BC13



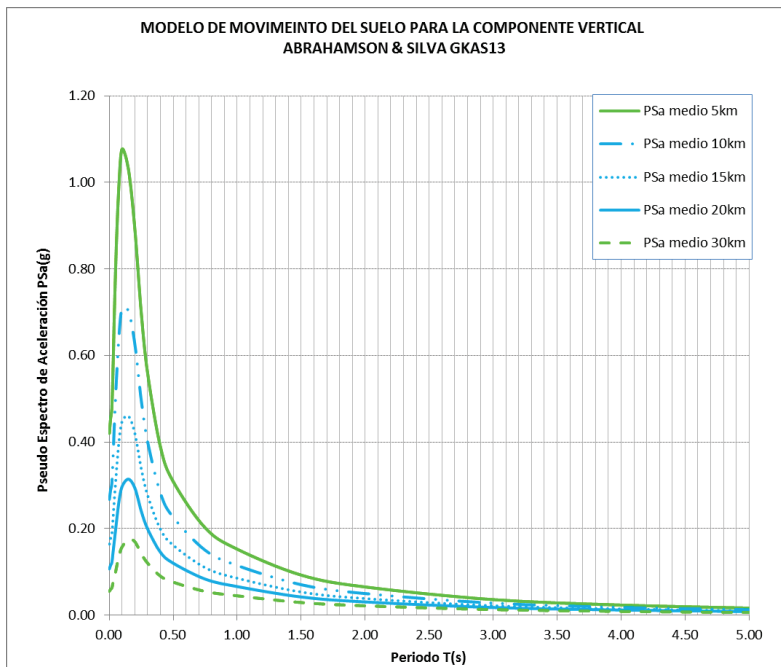
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.72 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=300\text{M/S}$
 MODELO, CY13



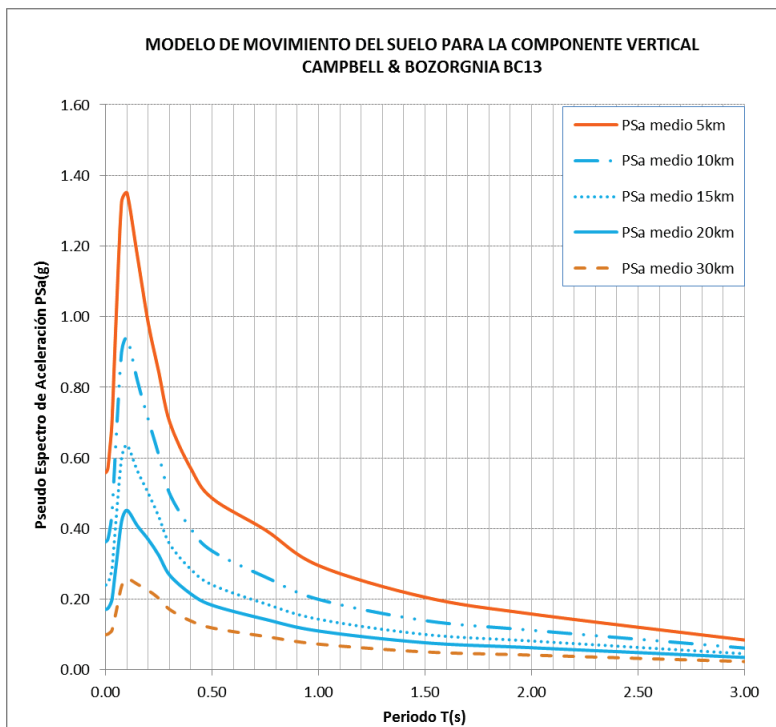
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.73 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=300\text{M/S}$
 MODELO, GKAS13



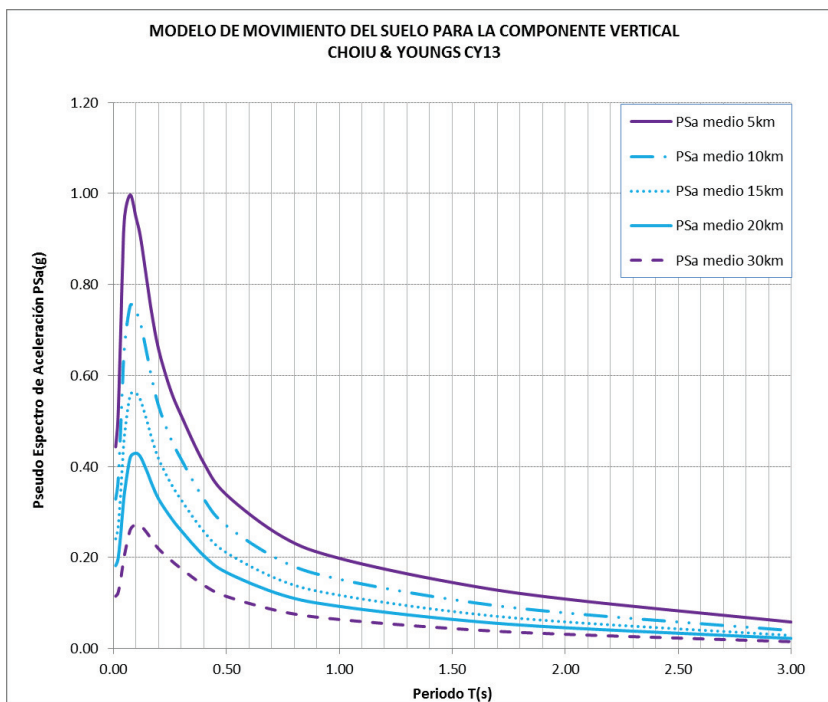
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.74 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=200\text{M/S}$
 MODELO, BC13



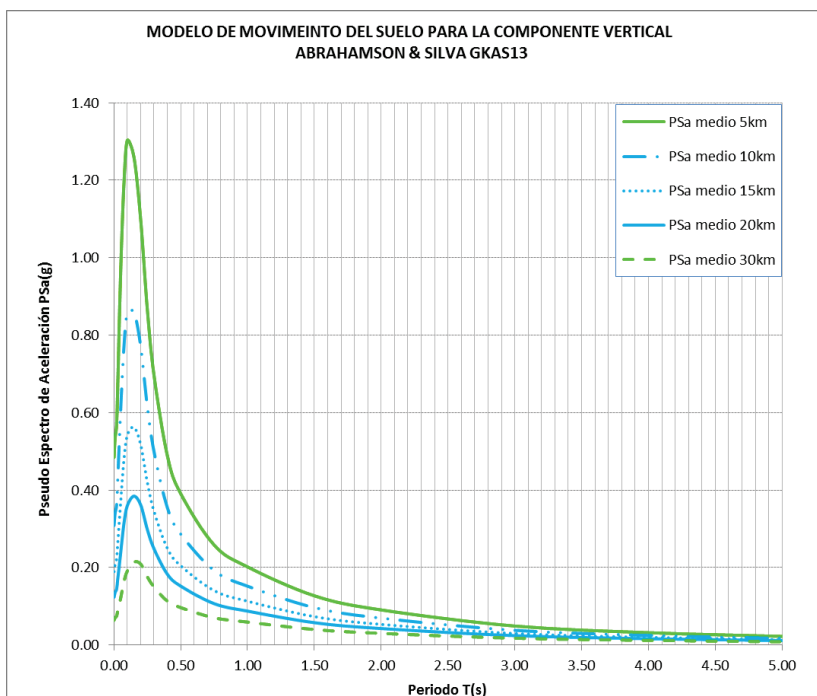
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.75 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=200\text{M/S}$
 MODELO, CY13



Elaboración: Eduardo López

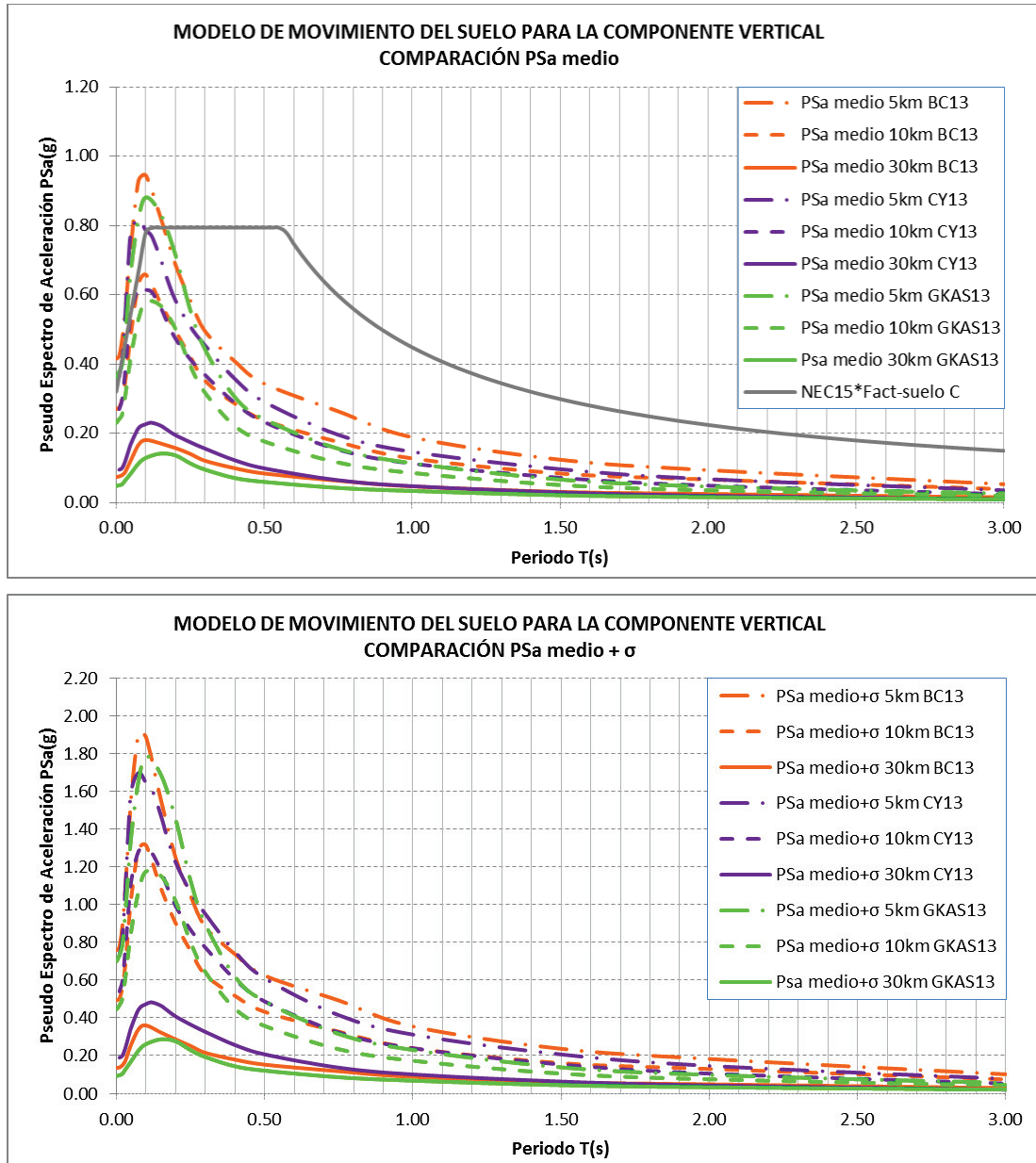
FIGURA 6.76 PSA COMPONENTE VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=200\text{M/S}$
 MODELO GKAS13



Elaboración: Eduardo López

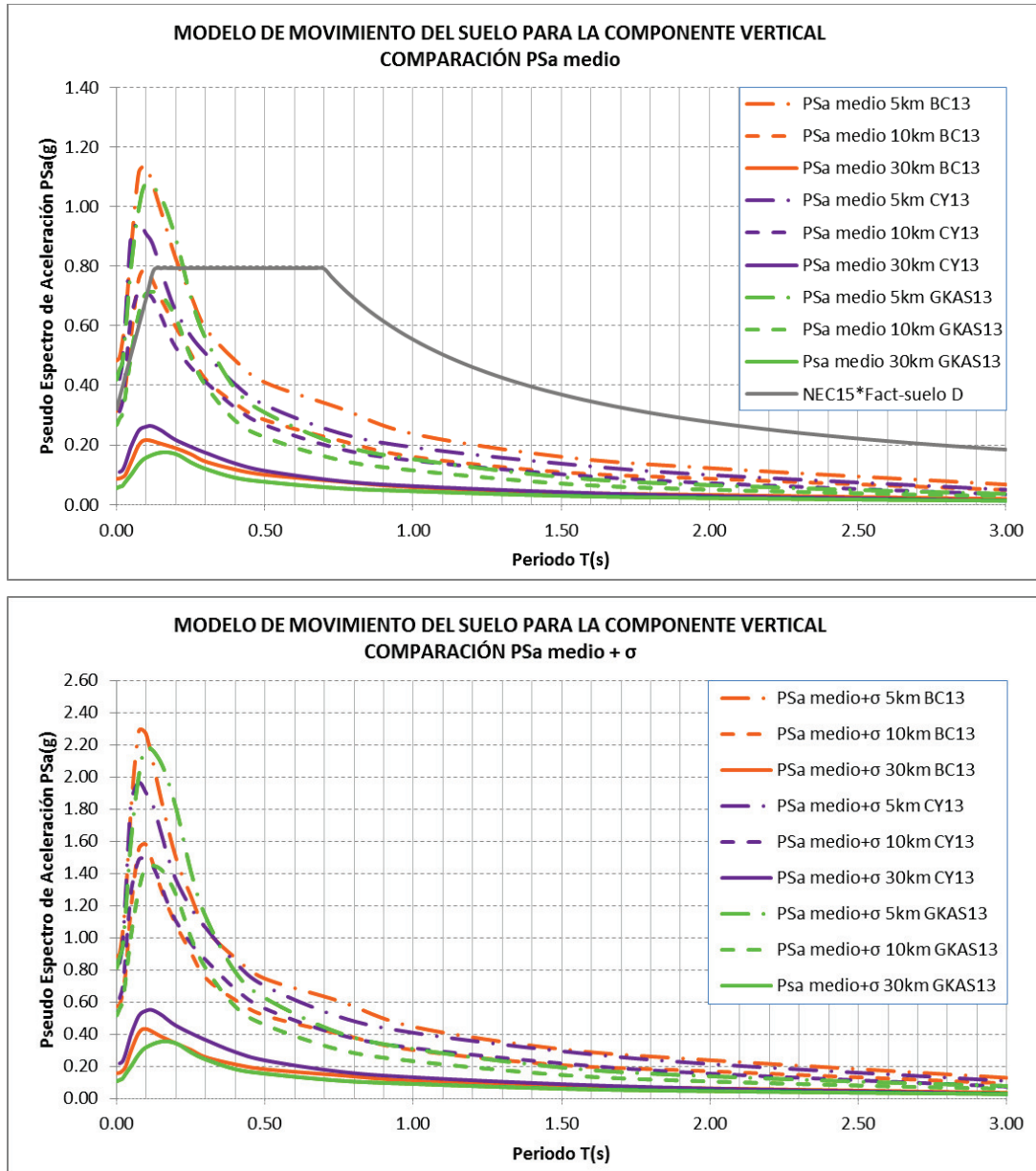
6.5.3 PSa PSEUDO ESPECTROS (COMPONENTE VERTICAL COMPARACION)

FIGURA 6.77 PSA VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=460\text{M/S}$ MODELO, BC13, CY13, GKAS13



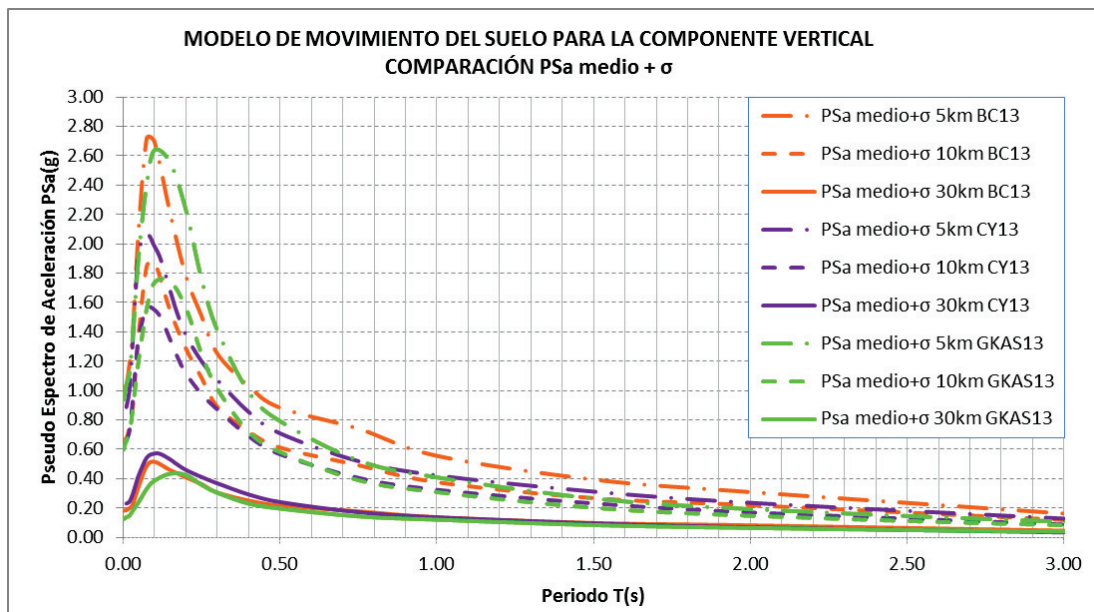
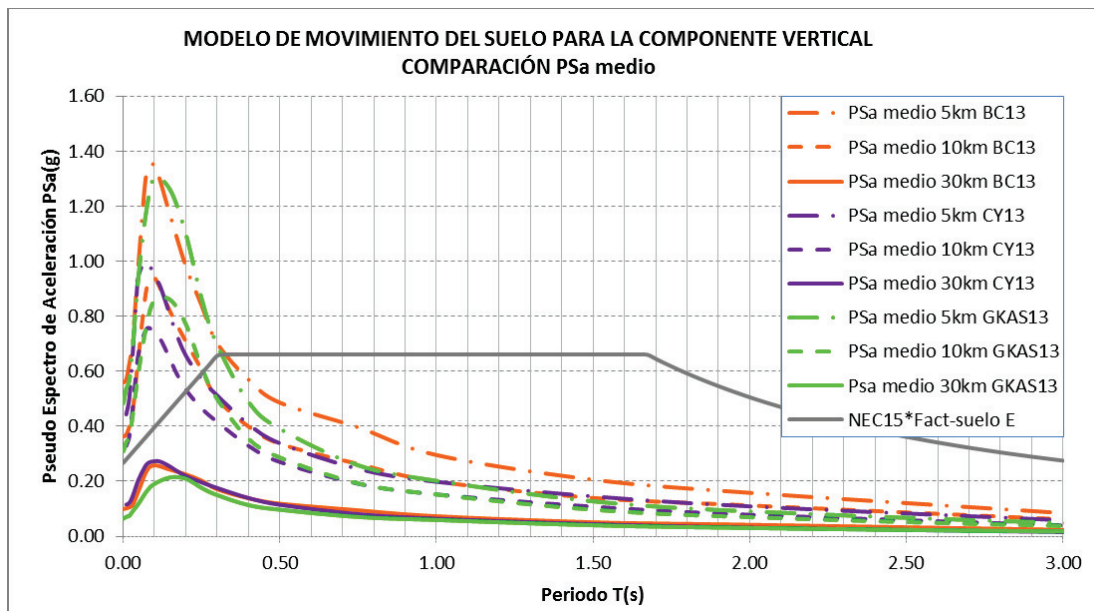
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.78 PSA VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=300\text{M/S}$ MODELO, BC13, CY13, GKAS13



Elaboración: Eduardo López

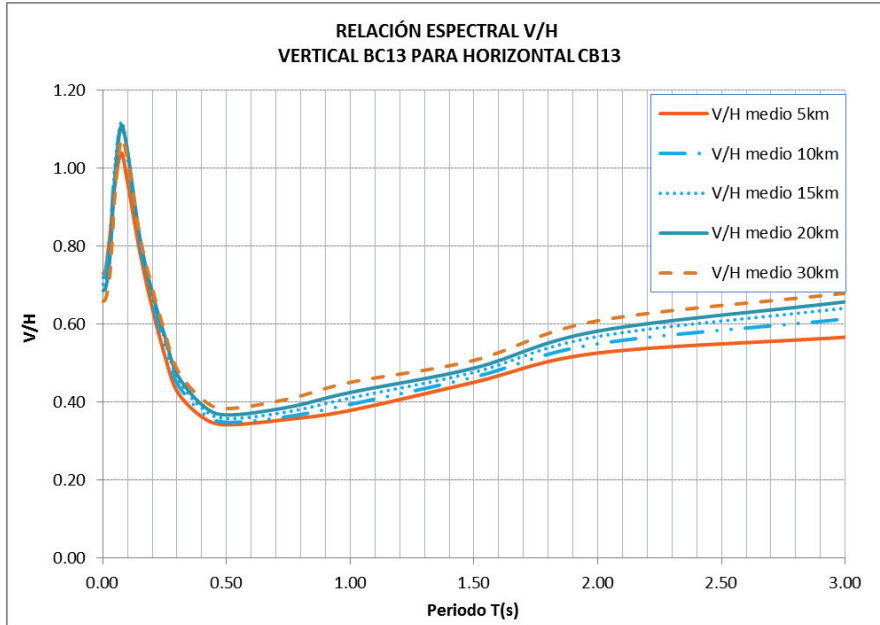
FIGURA 6.79 PSA VERTICAL, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=200\text{M/S}$ MODELO, BC13, CY13, GKAS13



Elaboración: Eduardo López

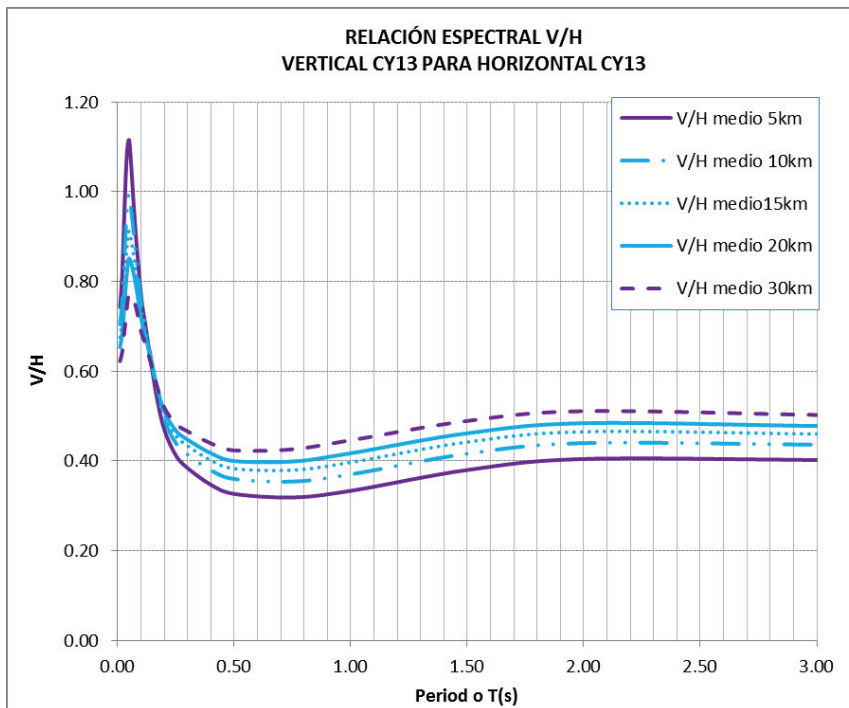
6.5.4 RELACIONES ESPECTRALES V/H

FIGURA 6.80 RELACIONES V/H, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=460\text{M/S}$, MODELO BC13/CB13



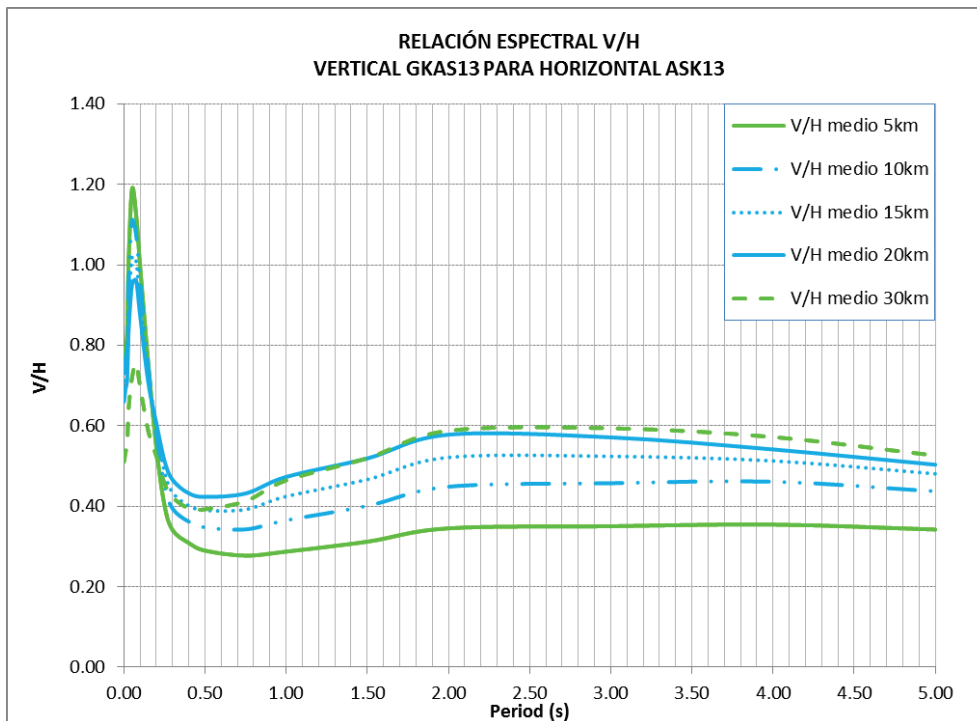
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.81 RELACIONES V/H, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=460\text{M/S}$, MODELO CY13/CY13



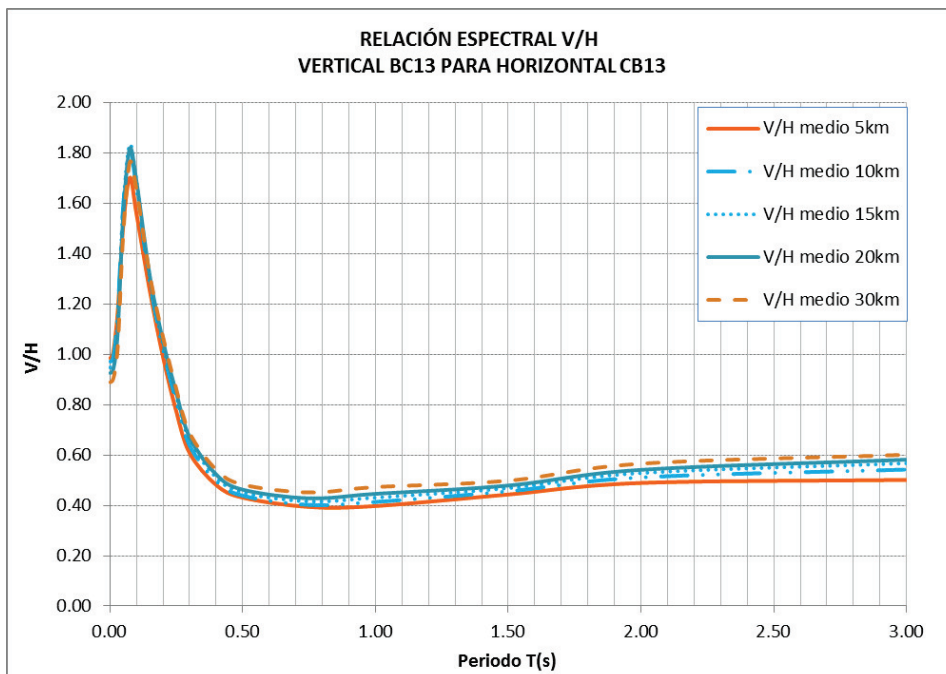
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.82 RELACIONES V/H, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=460\text{M/S}$, MODELO GKAS13/ASK13



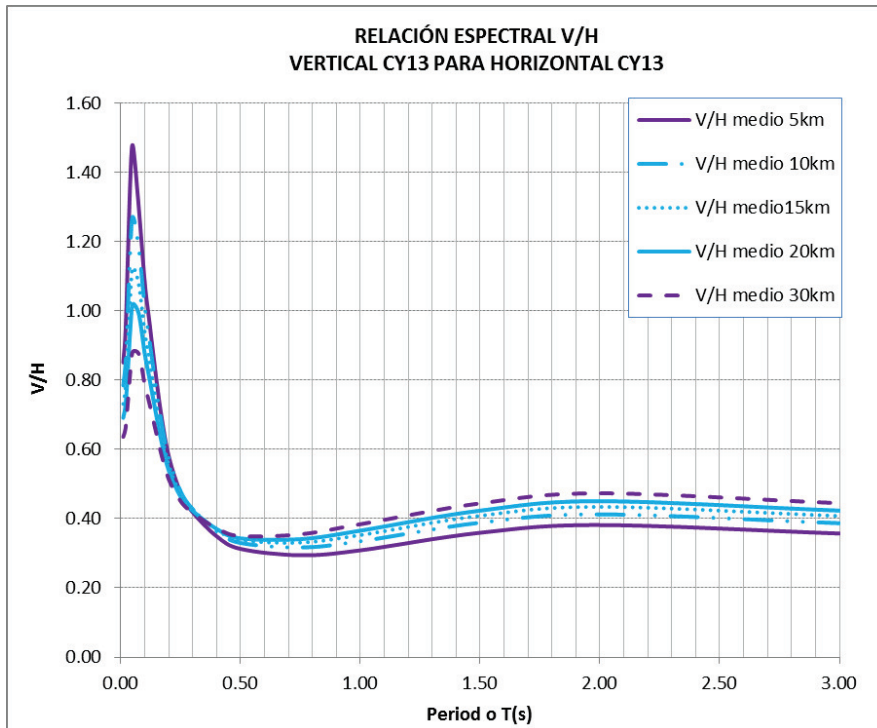
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.83 RELACIONES V/H, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=300\text{M/S}$, MODELO BC13/CB13



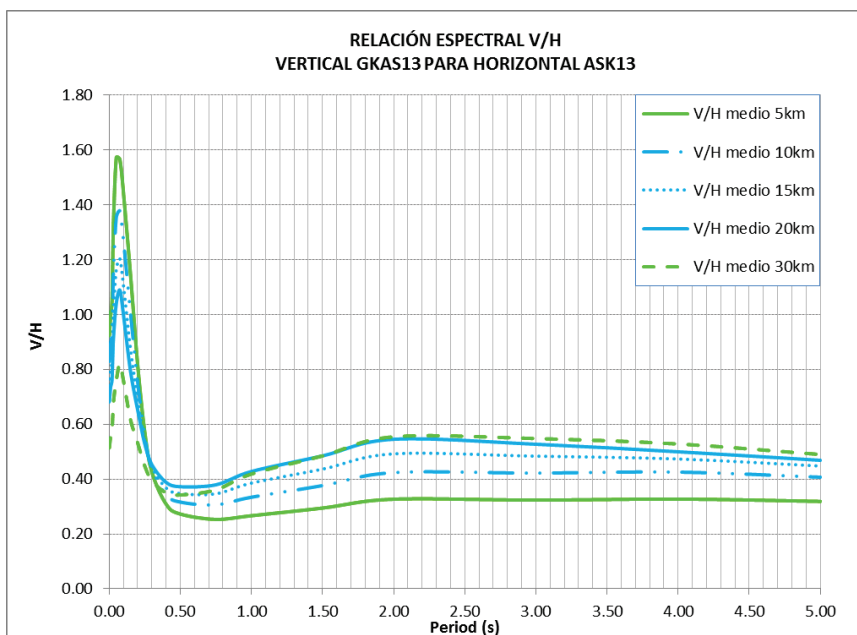
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.84 RELACIONES V/H, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=300\text{M/S}$, MODELO CY13/CY13



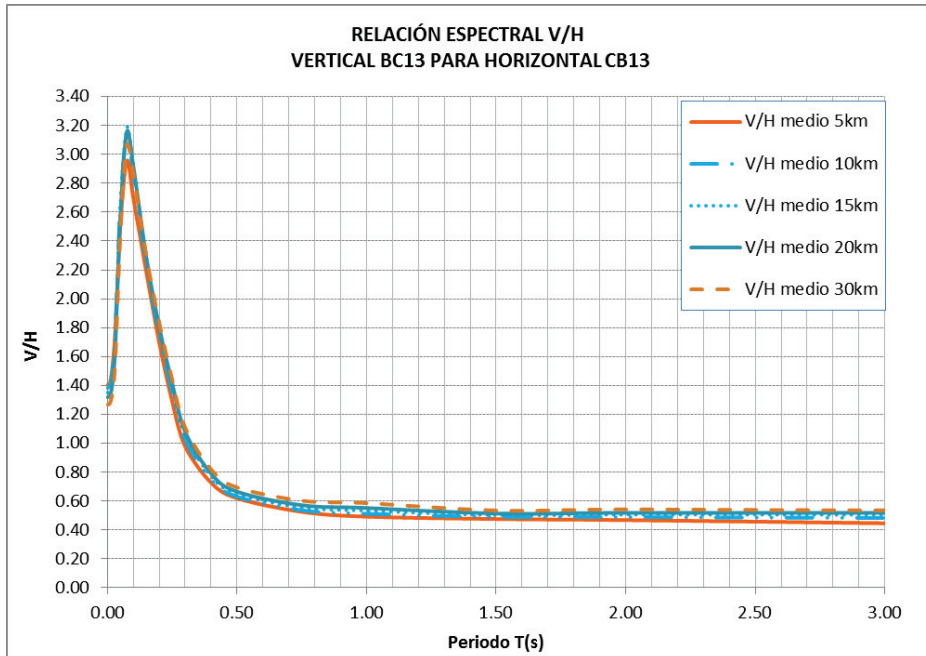
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.85 RELACIONES V/H, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=300\text{M/S}$, MODELO GKAS13/ASK13



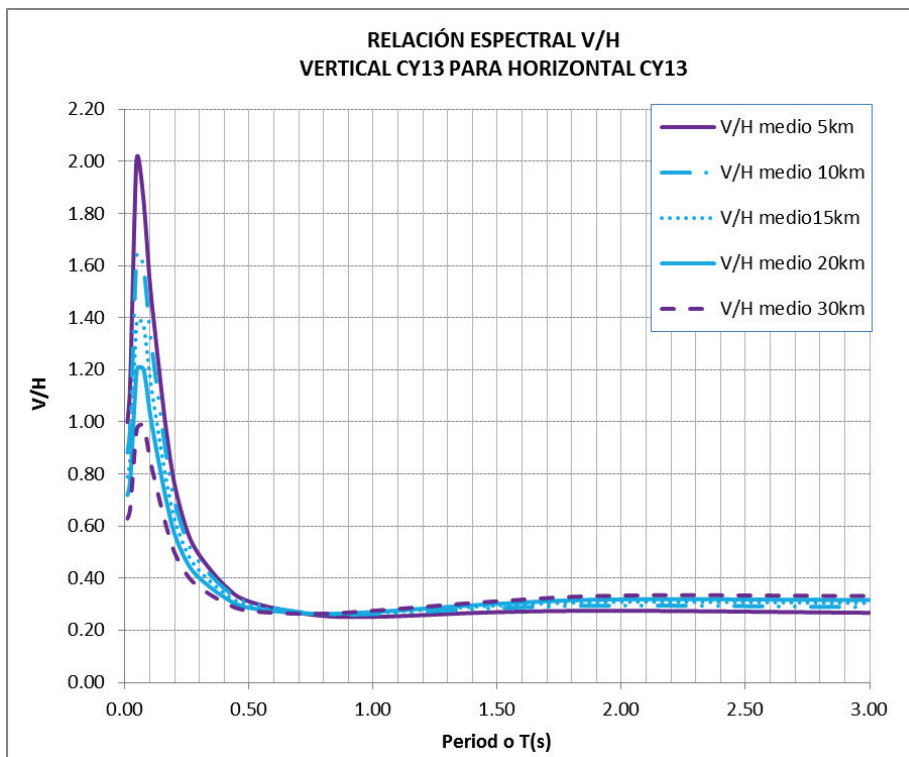
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.86 RELACIONES V/H, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=200\text{M/S}$, MODELO BC13/CB13



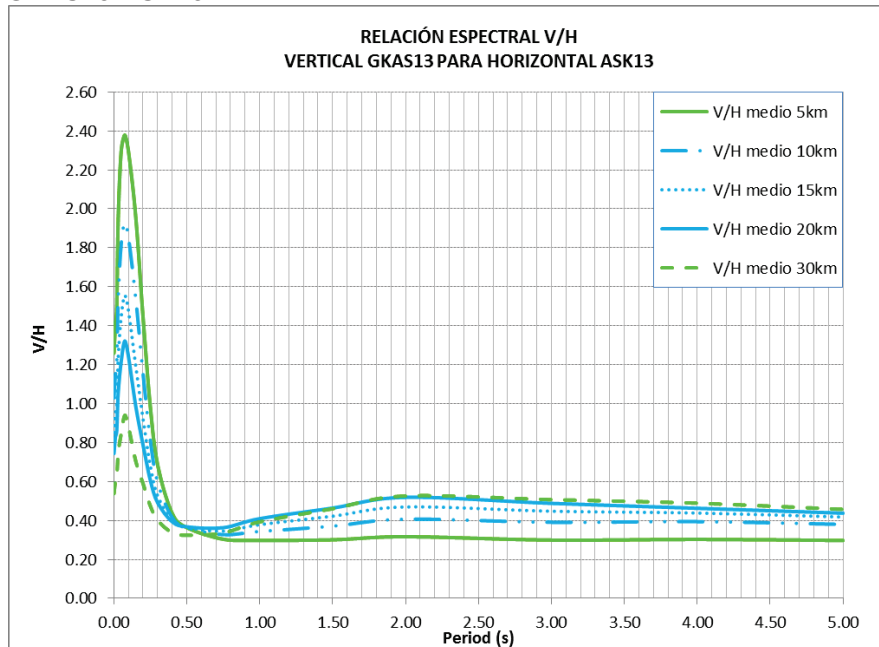
Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.87 RELACIONES V/H, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=200\text{M/S}$, MODELO CY13/CY13



Elaboración: Eduardo López

FIGURA 6.88 RELACIONES V/H, FALLA PUENGASÍ, $V_{S30}=200\text{M/S}$, MODELO GKAS13/ASK13



Elaboración: Eduardo López

De las gráficas obtenidas se desprende las siguientes observaciones:

- Las gráficas calculadas para el análisis por distancias R_{RUP} . tienen las mismas formas típicas que las calculadas para el análisis por zonas.
- El modelo BC13/CB13, en los periodos cortos no muestra una diferencia acentuada de las ordenadas espectrales en función de R_{RUP} , como si lo hacen los otros modelos.
- Para observar el efecto de la distancia en el PSa medio componente vertical, podemos comparar la figura 6.14 con la figura 6.68, 6.69 y 6.70 ya que están calculadas para la misma falla y tipo de suelo. Para el modelo BC13 de la figura 6.14 se tiene una ordenada espectral pico de 0.84 (g) mientras que en la figura 6.68 se tienen un pico de 0.88 (g) para 5km y para 10km se tiene 0.63 (g), este análisis cabe para los modelos CY13 y GKAS13 obteniendo similares resultados a los mencionados.
- Los valores obtenidos para $R_{RUP}=20\text{km}$, 30km son en general menores a los obtenidos para el análisis por zonas y $R_{RUP}=10\text{km}$ es aproximadamente similar al análisis por zonas, $R_{RUP}=5\text{km}$ en todos los casos es superior respecto al análisis por zonas

CAPÍTULO 7

PROGRAMA

7.1 INTRODUCCIÓN

Se desarrolla un programa en Excel-Visual Basic para obtener pseudo espectros de respuesta de aceleración ante la componente horizontal y vertical, así como también las relaciones espectrales V/H.

Es importante contar con esta herramienta ya que se puede desarrollar el análisis determinístico de un punto (coordenada) en específico asociada a las fallas de Quito y consecuentemente se puede investigar el valor de V_{s30} específico para el sitio de análisis.

Para el caso de la ciudad de Quito el pseudo espectro calculado para la falla controladora podrá ser considerado como pseudo espectro de control.

Para el caso de una falla general, será más complicado determinar los inputs ya que a nivel nacional es limitada la información respecto a este tema.

7.2 GUIA DE USO

Al iniciar el programa, se muestra al usuario una ventana, en la cual le permite seleccionar:

- Calcular el PSa (Pseudo Espectro de Respuesta de Aceleración para el 5% de amortiguamiento), en el caso: Ciudad de Quito
- Calcular el PSa (Pseudo Espectro de Respuesta de Aceleración para el 5% de amortiguamiento), en el caso: General para el Ecuador
- Un botón de salir del programa sin realizar ningún cálculo.

Una vez seleccionado el caso que desee el usuario, se debe introducir datos del sitio de análisis determinístico:

- Coordenadas UTM

- El valor promedio de la velocidad de la onda de corte de 0 a 30 m (v_{30} en m/s)
- La falla en la que se encuentra el sitio de análisis (al costado se muestra un mapa a escala con coordenadas UTM para poder localizar y posteriormente poder introducir la falla en el programa)
- % factor de incertidumbre f , indica el porcentaje de desviación estándar (σ) a considerar en el cálculo de los pseudo espectros de respuesta, $f=0$, significa que no se ha tomado en cuenta el valor de la desviación estándar, entonces se tiene un 50% de nivel de confianza. $f=1$, significa que se ha considerado el 100% de la desviación estándar, entonces se tiene un 84% de nivel de confianza.

El nivel de confianza es la probabilidad de que el valor calculado (en este caso pseudo espectros de respuesta de aceleración) este dentro de un rango llamado intervalo de confianza.

- Versión M. Horizontal: se puede escoger 2013 o 2014, debido a que el programa reporta los cálculos correspondientes para el modelo horizontal, sin embargo se recomienda utilizar 2013 debido a que se calculan relaciones espectrales utilizando la versión 2013 del modelo horizontal.

El programa en base a estos datos introducidos previamente, genera gráficas para (PSa) componente horizontal una para cada ecuación: Campell & Bozorgnia CB, Choi & Youngs CY, Abrahamson & Silva ASK, además un gráfico para: Comparacion de PSa media, Comparacion Psa media+sigma, Comparacion PSa-sigma.

Además, en otra pestaña se puede obtener gráficas para las ecuaciones anteriores, pero para (PSa) componente vertical.

Otra pestaña para PSa de componente horizontal y vertical juntas.

Una última pestaña de relaciones espectrales verticales y horizontales (V/H).

Junto a cada gráfica se tiene tres opciones que son:

- Copiar la tabla de datos con los que fueron hechos cada curva, para poder exportarlos a Excel.
- Botón de inicio para regresar a la ventana que se mostró al principio.
- La opción de salir del programa.

7.3 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para visualizar el funcionamiento del programa, se realizará el análisis en la Escuela Politécnica Nacional (EPN).

En la figura 7.1 se muestra la pantalla de inicio del programa, donde se elige el caso a ser calculado, para este análisis de seleccionará Caso Quito.

FIGURA 7.1 PANTALLA DE INICIO DEL PROGRAMA



ELABORADOR: Eduardo López

Una vez seleccionado el caso para empezar el análisis se muestra una segunda ventana en la cual se debe introducir los datos para el sitio de análisis determinístico, para este caso los siguientes que se muestran en la figura 7.2.

Las coordenadas deben ser ingresadas en UTM WGS84, para este caso son:

UTM WGS84	
E	779492 m
N	9976759 m

El valor promedio de la velocidad de la onda de corte de 0 a 30 m (vs30 en m/s), se adoptó de 300m/s.

Para identificar la falla controladora se analizó, con los mismos datos de entrada, pero variando la falla, y se pudo concluir que la falla controladora para este caso es la de PUENGASI, porque obtuvimos un mayor valor de magnitud y el menor Rrup, como se muestra en la tabla 7.1.

TABLA 7.1 IDENTIFICACIÓN DE FALLA CONTROLADORA

FALLA	Mw	Rrup
PUENGASI	6.4	4.24
ILB	6.2	5.461
CEI	5.9	11.505
BC	6.3	13.31

ELABORADOR: Eduardo López

El valor de % de incertidumbre f puede estar entre 0 y 1, 0 significa que no tiene desviación estándar y uno que si, en este caso se considerara desviación estándar, es decir al momento de obtener las gráficas, obtendremos una con línea entre punteada que es la gráfica considerando desviación estándar de 1.

La versión de M.Horizontal se la calculara con la forma funcional y los coeficientes de 2013.

FIGURA 7.2 DATOS DEL SITIO DE ANÁLISIS DETERMINÍSTICO

Caso Quito ×

(PSa) Para el 5% de Amortiguamiento Asociado al Sistema de Fallas de Quito

Datos:

Sitio de Análisis Determinístico

Coordenada E: m

Coordenada N: m

Vs30: m/s

Falla:

% de incetidumbre f: Rango(0-1)

Versión M. Horizontal:

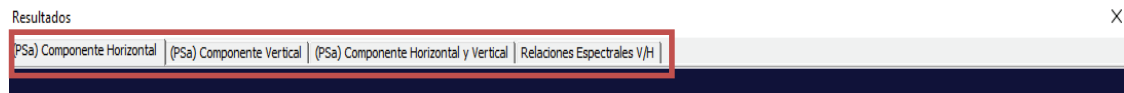
Calcular
Inicio

ELABORADOR: Eduardo López

Cuando ya se haya introducido los datos correctamente, presionamos el botón de calcular.

La pantalla mostrada a continuación nos presenta opciones de resultados para obtener las gráficas en las componentes mostradas en la Figura 7.3.

FIGURA 7.3 RESULTADOS

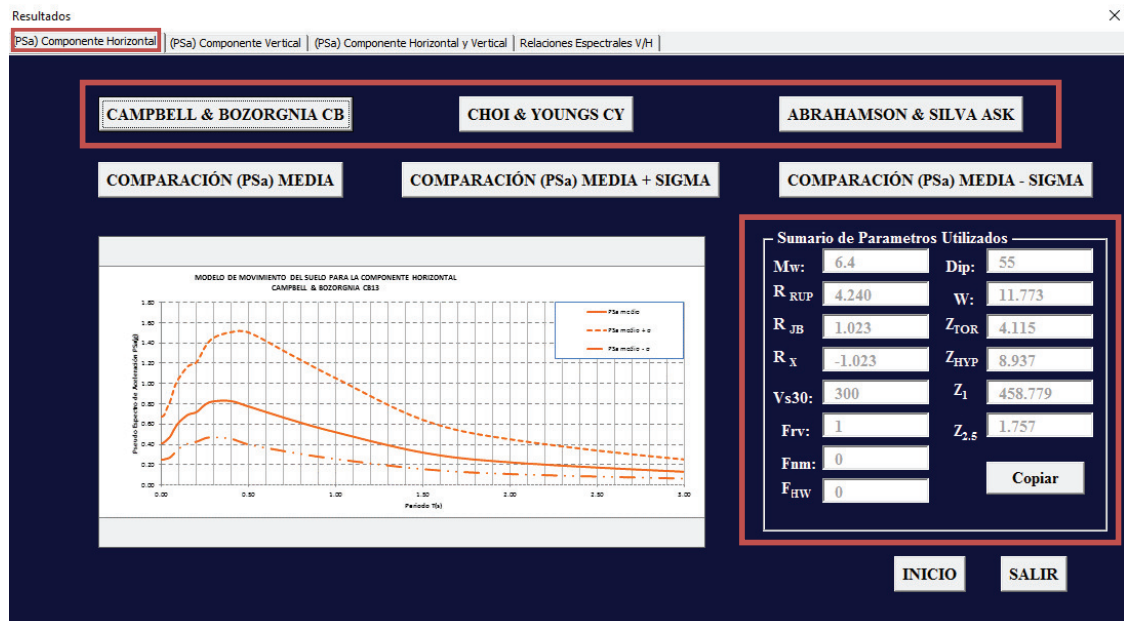


ELABORADOR: Eduardo López

En la primera pestaña: PSa Componente Horizontal obtenemos resultados gráficos uno por cada una de las 3 modelos de componente horizontal utilizados, además un sumario de parámetros utilizados para calcular cada gráfica.

En la figura 7.4 está calculada con CAMPBELL & BOZORGNIA CB.

FIGURA 7.4 (PSA) COMPONENTE HORIZONTAL MODELOS

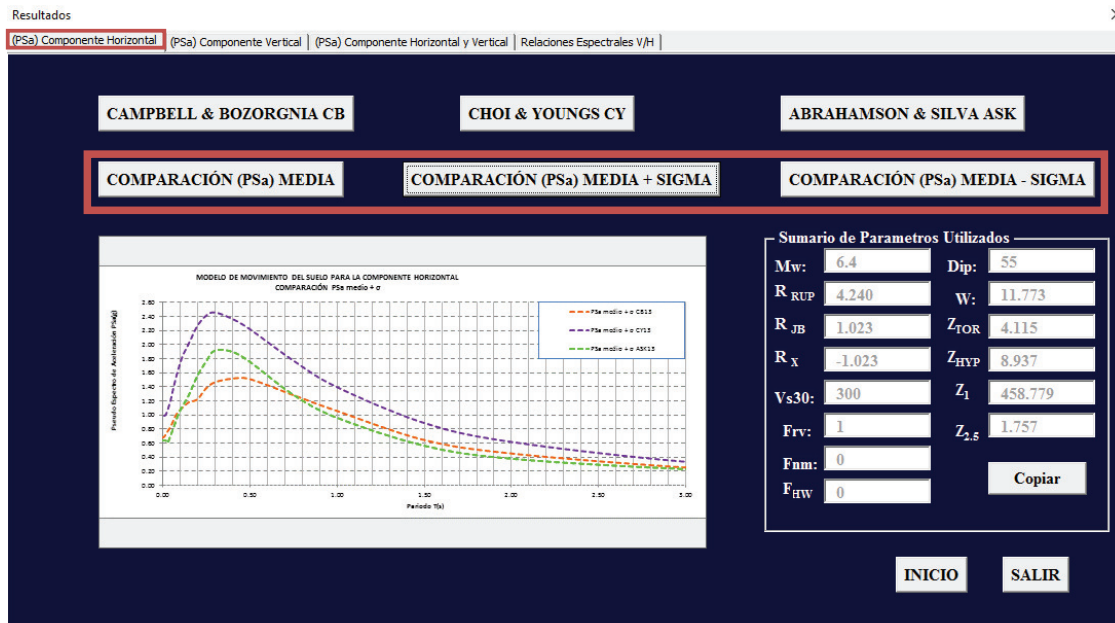


ELABORADOR: Eduardo López

Las tres opciones restantes, son comparaciones de los 3 modelos, ya sea considerando o no la desviación estándar.

Estas misma opción está disponible para las pestañas restantes que son: (PSa) componente vertical, (PSa) componente horizontal y vertical, relaciones espectrales V/H.

FIGURA 7.5 (PSa) COMPONENTE HORIZONTAL COMPARACIONES

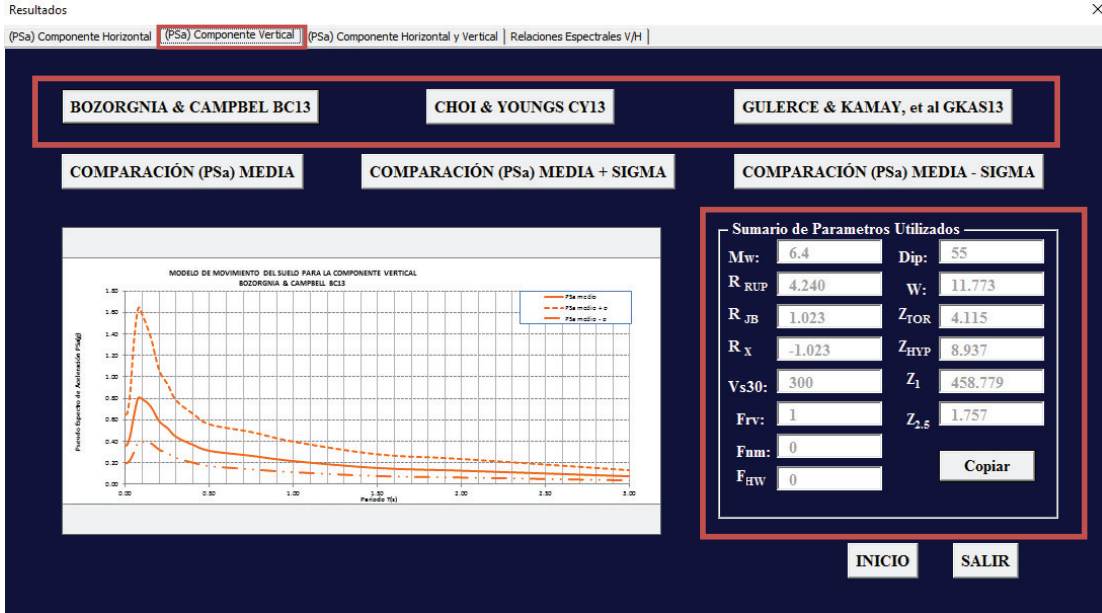


ELABORADOR: Eduardo López

En la segunda pestaña: PSa Componente Vertical obtenemos resultados gráficos uno por cada una de los 3 modelos de componente vertical, además un sumario de parámetros utilizados para calcular cada gráfica.

En la figura 7.6 está calculada con BOZORGNIA & CAMPBELL BC13.

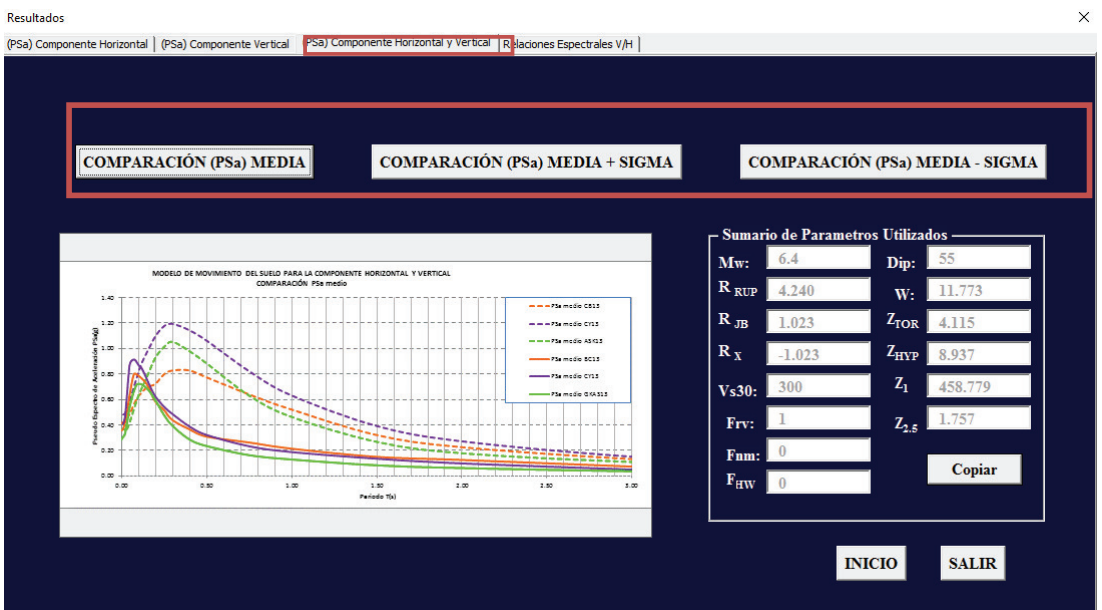
FIGURA 7.6 (PSa) COMPONENTE VERTICAL MODELOS



ELABORADOR: Eduardo López

La tercera pestaña PSa Componente Vertical y Horizontal, nos muestra es un solo gráfico, las 6 gráficas posibles, 3 para la componente horizontal y 3 para la componente vertical, para los 3 casos que se muestran en la figura 7.7.

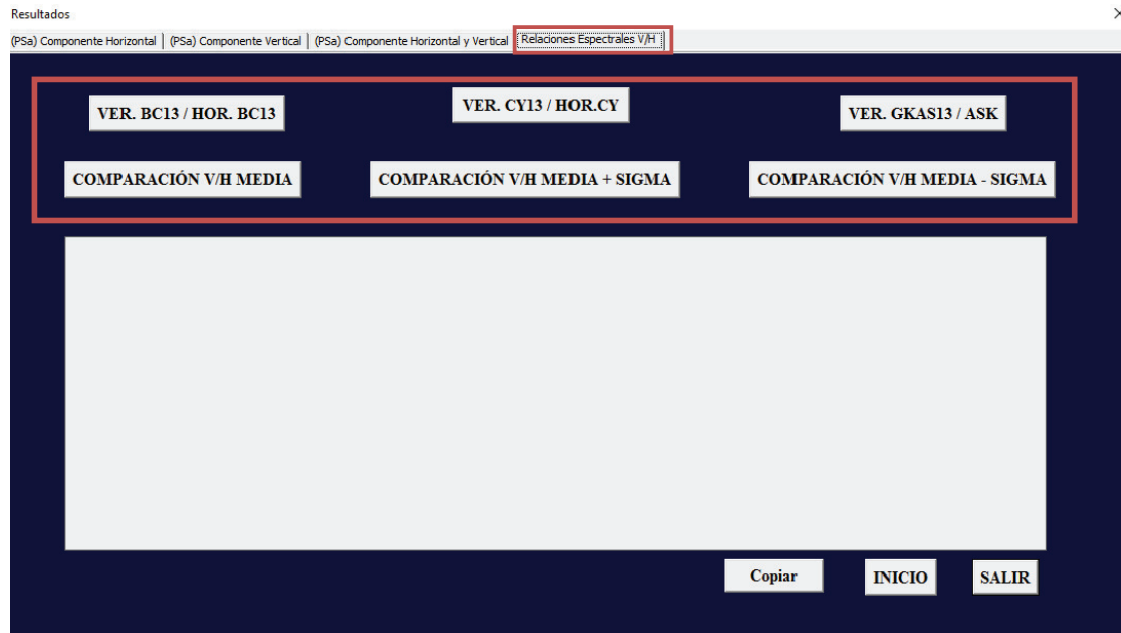
FIGURA 7.7 (PSA) COMPONENTE HORIZONTAL Y VERTICAL



ELABORADOR: Eduardo López

En la pestaña de Relaciones Espectrales V/H, la cual nos presenta una nueva ventana con las diferentes opciones relaciones espectrales entre la componente vertical y horizontal.

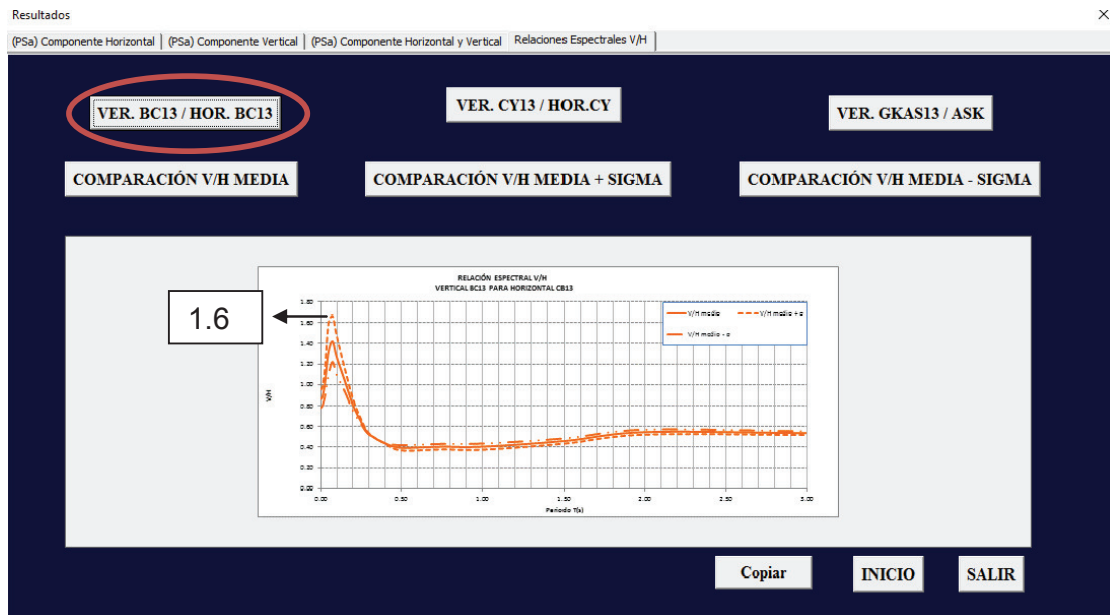
FIGURA 7.8 RELACIONES ESPECTRALES V/H



ELABORADOR: Eduardo López

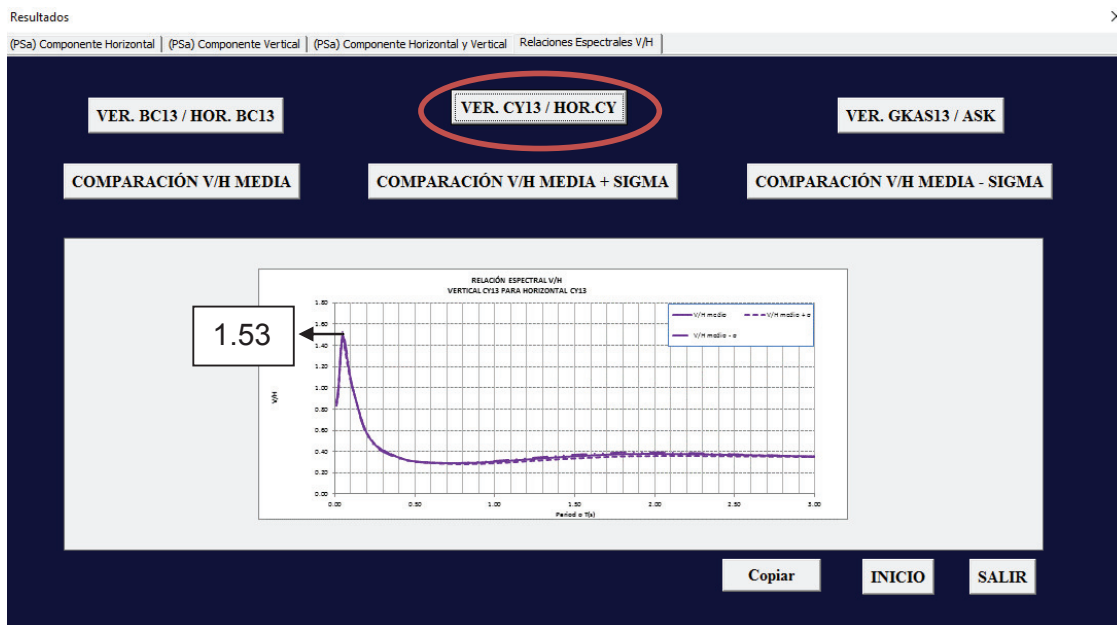
Si presionamos sobre cualquiera de las 6 opciones que nos muestra la Figura 7.8, para este caso de análisis obtuvimos relaciones pico V/H con valores entre 1.5 y 1.6 y para periodos superiores a 0.3 s se obtiene valores V/H menores a 2/3, como se muestra a continuación:

FIGURA 7.9 RELACIONES ESPECTRALES V/H BC13/CB13



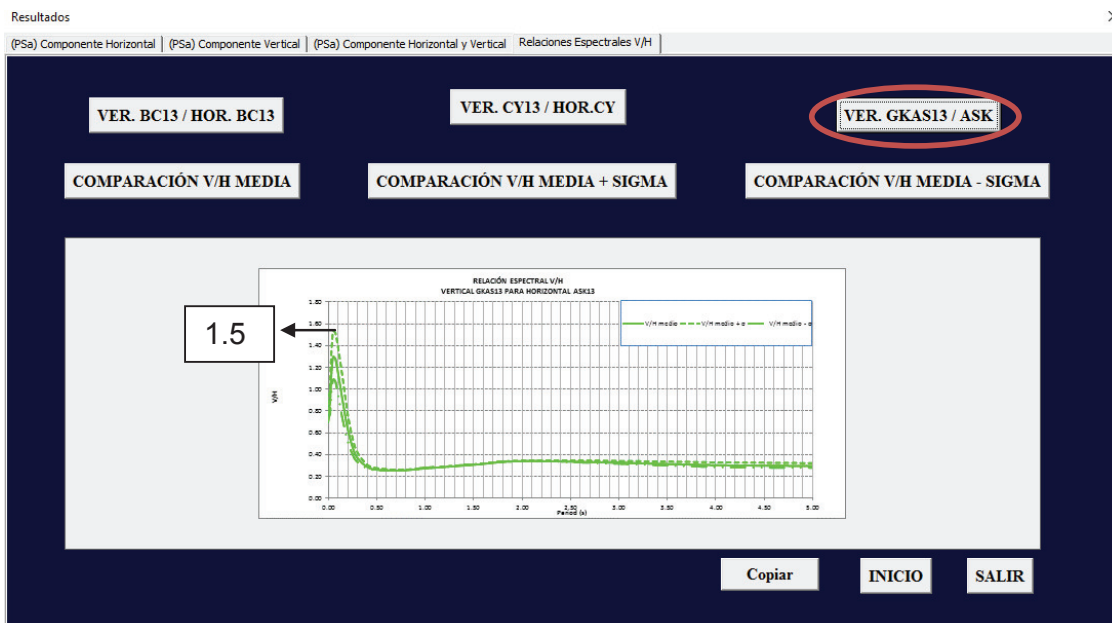
ELABORADOR: Eduardo López

FIGURA 7.10 RELACIONES ESPECTRALES V/H CY13/CY13



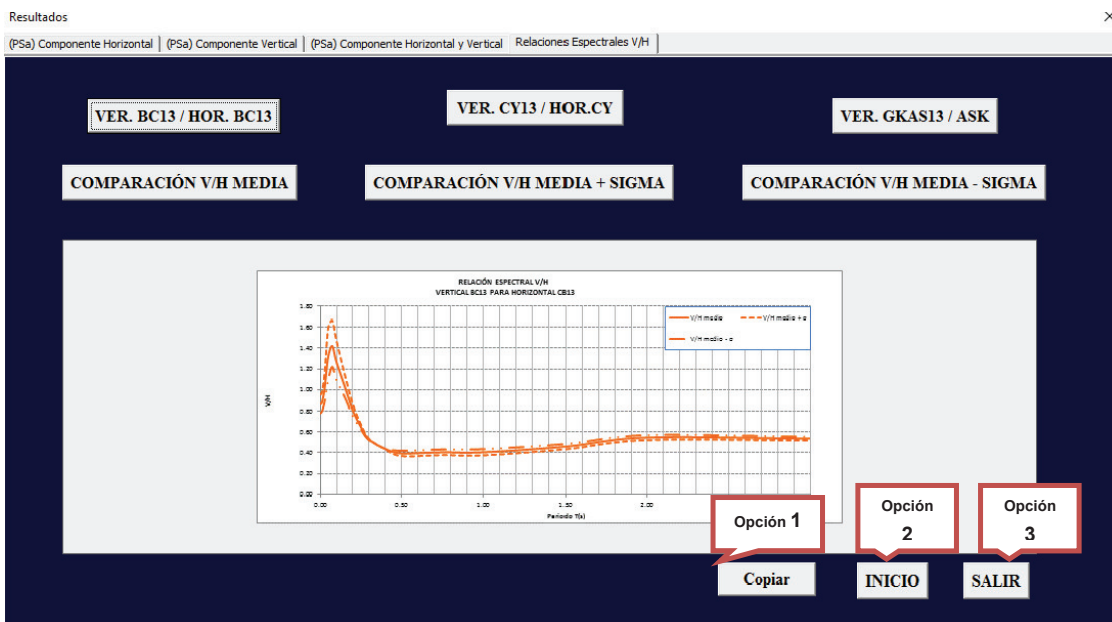
ELABORADOR: Eduardo López

FIGURA 7.11 RELACIONES ESPECTRALES V/H GKAS13/ASK13



Para cada caso tenemos la opción de copiar, con la cual podemos exportar a una hoja de Excel la tabla con la que fue realizada cada gráfica, además tenemos dos opciones más, que son volver a la pantalla de inicio (INICIO), o salir del programa (SALIR).

FIGURA 7.12 OPCIONES FINALES



ELABORADOR: Eduardo López

Además, se dará una breve explicación de la otra opción que teníamos en la ventana inicial, que es el caso general.

Para empezar el análisis se tendrá que dar clic en Caso General Ecuador, como se muestra en la siguiente gráfica:

FIGURA 7.13 CASO GENERAL EN ECUADOR



ELABORADOR: Eduardo López

Como podemos observar en la figura 7.13 para obtener los resultados del Pseudo Espectro de Respuesta de Aceleración, debemos ingresar varios datos, los mismos que deben ser analizados detenidamente por un grupo interdisciplinario de ingenieros, especialmente los parámetros asociados a las fallas requieren modelos neotectónico, por tanto solo con fines ilustrativos se proponen datos arbitrariamente para mostrar el funcionamiento del programa

FIGURA 7.14 DATOS PARA: CASO GENERAL EN ECUADOR

Caso General ×

(PSa) Para el 5% de Amortiguamiento Asociado a una Falla General

Datos:

Mw: <input type="text" value="6.5"/>	F _{HW} : <input type="text" value="0"/>
R _{RUP} : <input type="text" value="4"/> Km	Dip: <input type="text" value="50"/> grados
R _{JB} : <input type="text" value="1"/> Km	W: <input type="text" value="11"/> Km
R _X : <input type="text" value="-1"/> Km	% de incertidumbre f: <input type="text" value="1"/> Rango(0-1)
Vs30: <input type="text" value="300"/> m/s	Versión M. Horizontal: <input type="text" value="2013"/>
Frv: <input type="text" value="1"/>	
Fnm: <input type="text" value="0"/>	

ELABORADOR: Eduardo López

Una vez ingresados todos los datos, el programa muestra una pantalla igual a la del Caso Quito (Figura 7.15), explicado anteriormente, por lo tanto, cada pestaña y botón fue mostrado su funcionamiento previamente.

FIGURA 7.15 RESULTADOS PARA: CASO GENERAL EN ECUADOR

Resultados ×

(PSa) Componente Horizontal | (PSa) Componente Vertical | (PSa) Componente Horizontal y Vertical | Relaciones Espectrales V/H

Sumario de Parametros Utilizados

Mw: <input type="text"/>	Dip: <input type="text"/>
R _{RUP} : <input type="text"/>	W: <input type="text"/>
R _{JB} : <input type="text"/>	Z _{TOR} : <input type="text"/>
R _X : <input type="text"/>	Z _{HYP} : <input type="text"/>
Vs30: <input type="text"/>	Z ₁ : <input type="text"/>
Frv: <input type="text"/>	Z _{2.5} : <input type="text"/>
Fnm: <input type="text"/>	
F _{HW} : <input type="text"/>	<input type="button" value="Copiar"/>

ELABORADOR: Eduardo López

CONCLUSIONES

Se concluye que en los códigos estudiados no existe un criterio general para considerar los efectos de la componente vertical del sismo, la mayoría consideran estos efectos solo en elementos específicos que tengan una significativa flexibilidad bajo cargas verticales tal como voladizos, losas planas, vigas de gran luz, columnas con grandes esfuerzos axiales y unos pocos la especifican como un caso de carga general a ser considerado en las estructuras.

El efecto de la componente vertical se determina utilizando un coeficiente sísmico vertical o un espectro de diseño vertical, en los dos casos se obtiene a partir de escalar la componente sísmica horizontal por la relación V/H, también representan el efecto de la carga sísmica como un porcentaje del peso gravitacional total; se puede notar que ningún código tiene desarrollado un espectro de diseño vertical consistente con el peligro sísmico del sitio.

La relación V/H utilizada es diversa entre los códigos analizados, por ejemplo Argentina considera $V/H = 1/5$, mientras que Perú considera $V/H = 2/3$, en cambio sí es generalizado el considerar una relación V/H homogénea en todo el rango de periodos para escalar el espectro de diseño horizontal; respecto a esto último se sabe que la relación V/H es altamente dependiente del periodo y que en el rango de periodos cortos inclusive la relación V/H puede superar la unidad, mientras que en el rango de periodos largos la relación V/H disminuye notablemente.

La mayoría de códigos especifica la forma de combinar la acción sísmica horizontal con la vertical, algunos tienen mayor detalle como el ASCE/SEI 7-10 y el NCh2369 de 2003 que especifican la forma de incluir los efectos del sismo vertical en las combinaciones de carga básicas.

Con agrado observamos que el NEC-15 es el único código que acertadamente dispone para estructuras esenciales o especiales cercanas a una falla geológica

realizar estudio de respuesta de sitio, debido a que en el campo cercano (0-10km) la componente vertical del sismo tiene mayores magnitudes.

Al estar la ciudad sobre fallas inversas (Quito Fault System QFS) descritas en el modelo neotectónico de Quito propuesto por Alvarado 2012, la componente vertical, de movimiento del suelo es muy importante, razón por la cual se necesita conocer la forma de los espectros, que se generarían ante la componente horizontal y vertical,

En este estudio se ha observado que la componente vertical sísmica depende fundamentalmente del periodo de oscilación, el tipo de suelo y la distancia más cercana al plano de ruptura R_{RUP} .

Los pseudo espectros obtenidos en este estudio podrán aplicarse como espectros de control, se denomina pseudo espectro de control al que se obtiene para el trio de parámetros siguiente distancia en un radio de 30km al epicentro, magnitud alrededor de 6.5 y un coeficiente de incertidumbre de $\varepsilon = 2$.

Al encontrarán pseudo espectros asociados a la magnitud máxima y en términos generales asociados a un período de recurrencia que esta alrededor de los 1000 años, en forma específica se tiene un rango de variación del período de recurrencia, se puede considerar que para las estructuras de la ciudad de Quito, los pseudo espectros que se obtienen a partir de un sismo cuya fuente es uno de los segmentos de las fallas ciegas inversas, con magnitud máxima esperada, es el sismo máximo considerado MCE, y que el sismo de diseño es el que se obtiene con el espectro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-15, o el del estudio de la microzonificación sísmica de Quito (ERN, 2012), que vendría a ser el sismo de diseño DBE.

La falla de Puengasi P, es la que genera mayores respuestas de aceleración en tres sectores de la ciudad que son: sur, centro-sur, centro; en el sector centro norte y norte el segmento de falla que genera una aceleración máxima es el de Ilumbisi-La Bota ILB, por tanto los pseudo espectros calculados para dichas fallas y sus

correspondientes zonas toman el nombre de pseudo espectros de control para la ciudad de Quito que son únicamente los que se presentan en este estudio.

Se concluye que los tres modelos utilizados para obtener los Pseudo espectros de aceleración (PSa) para la componente vertical, BC13, CY13, GKAS13, reportan pseudo espectros con formas y ordenas muy similares entre sí, inclusive cuando se varía las condiciones de tipo de suelo y cuando se considera el 100% de la desviación estándar, por lo que parece razonable indicar que para el cálculo de los pseudo espectros se puede utilizar cualquier modelo.

La forma funcional de los modelos horizontales son consistentes con la forma funcional de los modelos verticales, generalmente con las siguientes excepciones; la respuesta no lineal de sitio no está incluido, la profundidad a la roca madre no está incluido. Tener disponibles modelos horizontales y verticales desarrollados por los mismos autores, utilizando la misma base de datos y con el mismo año de publicación resulta conveniente ya que de esta manera las relaciones V/H reflejaran mejor los efectos influenciados por cada parámetro.

La forma típica de los PSa para la componente vertical tiene su pico en un periodo aproximado de 0.1s sin meseta y de inmediato inicia el descenso, se verifica esto en los determinados a partir de las GMPE y en el obtenido a partir del registro sísmico.

Las formas de relaciones V/H obtenidas corresponden a las formas típicas presentadas por los investigadores que desarrollaron los modelos de atenuación, cuando se considera 100% de desviación estándar se obtienen relaciones (V/H medio + σ) aproximadamente hasta un 20% superior para el caso BC13/CB13, 10% para el caso CY13/CY13, 32% para el caso GKAS13/ASK13, dependiendo del modelo observamos que no se dan variaciones muy considerables respecto a no considerar la desviación estándar.

Se debe considerar que las ecuaciones de atenuación se siguen actualizando, por lo que este estudio en un futuro mediano deberá actualizarse acorde a las

actualizaciones que realice la P.E.E.R, lo ideal es en el futuro contar con GMPE desarrolladas para la región.

Respecto al análisis por zonas las mayores relaciones V/H son para el sector Sur asociado a la falla de Puengasí, utilizando el modelo BC13/CB13 se observa valores máximos en 0.075 s, **para suelo tipo C V/H medio= 0.862, para suelo tipo D V/H medio=1.20, para suelo tipo E V/H medio=1.72**. Notamos que desde el periodo 0.2 s para suelo tipo C y desde el periodo 0.3 s para suelo tipo D y E las relaciones V/H son menores al factor 2/3 que norma la NEC-15.

Respecto al análisis por distancias R_{RUP} concluimos que las gráficas calculadas tienen las mismas formas típicas que las calculadas para el análisis por zonas. Las relaciones V/H obtenidas para $R_{rup}=5\text{km}$ en todos los casos son superiores a las determinadas por zonas, por lo que se evidencia que en el campo cercano es indispensable realizar un análisis de respuesta de sitio como lo estipula el NEC-15. Los valores obtenidos para $R_{RUP}=20\text{km}$, 30km son en general menores a los obtenidos para el análisis por zonas y para $R_{RUP}=10\text{km}$ son aproximadamente similares comparadas con el análisis por zonas, por lo que se concluye que las relaciones V/H y los PSa para la componente vertical presentadas para el análisis por zonas pueden ser usadas como de control siempre y cuando se verifique que el sitio de análisis está a una distancia $R_{RUP}\geq 10\text{km}$.

Para todos los casos analizados para un periodo mayor a 0.3 s la relación V/H es menor a 2/3 que es la normada en la NEC-15, por lo que podemos concluir que a partir de ese periodo la relación 2/3 es ligeramente conservadora, sin embargo también podemos concluir que la tendencia de escalar los pseudo espectros por un factor uniforme no es adecuada, puesto que en el rango de periodos cortos se subestima la ordenada espectral. Por este motivo este estudio no se orienta por recomendar una relación única, más bien sugiere utilizar toda la tabla de datos obtenida para la relación V/H en el caso de que se quiera escalar el espectro de diseño horizontal.

La gráficas presentadas fueron calculadas usando un método determinístico y pueden ser utilizadas como referencia del peligro sísmico en las diferentes zonas

de Quito, sin embargo en este estudio se ha desarrollado un programa de cálculo en Excel visual Basic con el que se puede realizar el análisis para un punto (coordenada UTM) en específico en la ciudad de Quito, con el cual puede obtener los pseudo espectros de control y relaciones V/H, teniendo precaución de en ningún caso utilizar ordenadas menores a las dispuestas en la NEC-15.

RECOMENDACIONES

Este estudio concuerda con otros trabajos realizados a nivel internacional en recomendar que las normas sísmicas a futuro cuenten con un espectro de diseño vertical que incluya investigaciones respecto al factor de reducción para obtener el espectro inelástico acorde a la ductilidad del sistema estructural en el sentido vertical y la determinación del coeficiente de amortiguamiento.

Se recomienda al proyectista estructural que incorpore a su práctica de diseño considerar la acción sísmica vertical, para el caso de la ciudad de Quito siguiendo la norma NEC-15 y debido a la gran influencia de las fallas de Quito utilizando los pseudo espectros de control o las relaciones V/H determinadas en este estudio, se debe tener la precaución de en ningún caso considerar acciones inferiores a las normadas.

Debido a que la evidencia directa de daños por movimientos verticales es difícil de establecer, la influencia de la componente vertical del movimiento del suelo en la respuesta estructural ha seguido siendo un tema de debate, por tanto el estudio realizado plantea un punto de inicio para que trabajos futuros se enfoquen en determinar dicha influencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Abrahamson N., Silva W., Kamai R., (2013), Update of the AS08 Ground-Motion Prediction Equations Based on the NGA-West2 Data Set. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 143 p.

[2] Aguiar, (2014). Espectros de Control para la Ciudad de Quito-Ecuador, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE, Universidad Politécnica de Cataluña, IS-72, 124p., Barcelona

[3] Alvarado A., Audin L., et al., (2014), “Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity”, Tectonics, AGU-PUBLICATIONS, 17 p., Article online.

[4] Alvarado (2013), “La deformación continental en el Ecuador y su implicación en el Peligro Sísmico”, Tercer Encuentro de Ingeniería Civil. Escuela Politécnica Nacional, Quito.

[5] Alvarado, (2012), Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur. These pour obtenir le grade de Docteur. Université de Grenoble.

[6] Ancheta T., Darragh R., et. al., (2013), PEER NGA-WEST-2 Database. Report PEER 2013/03. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.

[7] ASCE/SEI 7-10, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures,

[8] Bozorgnia&Campbell, (2013), NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions., Report PEER 2013/24, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 85-123p.

[9] Campbell K., Bozorgnia Y., (2013), NGA-West2 Campbell-Bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV and 5%-Damped elastic Pseudo-Acceleration response spectra for periods ranging fro 0.01 to 10 sec, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 75 p.

[10] Choiu B., Youngs R., (2013), Uddate of the Choiu and Youngs NGA ground motion model for average horizontal component of peak ground motion and response spectra, PEER Report 2013/07, 105 p., Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA

[11] Choiu B., Youngs R, (2013), NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions., Report PEER 2013/24, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 127-160p.

[12] Douglas J., (2010). "Ground-motion prediction equations 1964–2010", Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 455 p.

[13] ERN-2012, Microzonificación sísmica del distrito metropolitano de Quito. Estudio de la amenaza sísmica a nivel local. Programa de reducción de riesgos urbanos del Distrito Metropolitano de Quito.

[14] Division of Engineering Services Geotechnical Services, (November 2012), Methodology for Developing Design Response Spectrum for Use in Seismic Design Recommendations

[15] E.030 (2016), Norma de Diseño Sismo resistente para el Perú

[16] Frau et al., (2012), Terremotos tipo pulso y efectos de directividad de la ruptura, CeReDeTec, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional,26p.

[17] Gülerce et al., (2013), NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions., Report PEER 2013/24, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 3-48p.

[18] INPRES-CIRSOC 103, (2013), Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes

[19] Leonard M., (2010), "Earthquake fault scaling: Self consistent relating of rupture length width, average displacement, and moment release", Bulletin of the Seismological Society of America, 100 (SA), 1971-1988p.

[20] NCh433 de 1996 modificada a 2009 "Diseño sísmico de edificios"

[21] NCh2369 de 2003 "Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales"

[22] NEC-15, (2015), Norma Ecuatoriana de la Construcción, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, MIDUVI.

[23] NSR-10 (2010), Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente

[24] PEREA, (2002), Introducción al estudio de la componente vertical de movimientos sísmicos y su influencia en el comportamiento estructural. Tesis de Maestría UNAM

[25] PLANMAN (2012), Estudio de Vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de los Centros Educativos Municipales en el Distrito Metropolitano de Quito. Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad. Distrito Metropolitano de Quito, Fase A 153 p., y Fase B, 120 p., Quito.

[26] Quizanga Diego, (2015). Espectros específicos para la ciudad de Quito en función de fallas ciegas inversas, Tesis de Maestría Escuela Politecnica Nacional, 165p.

[27] Rivas A., Aguiar R., et al., (2014), Determinación del período de recurrencia y magnitud máxima para el control de las estructuras en el rango elástico ante un sismo asociado a las fallas inversas de Quito, Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, 19 (2), 201-217p.

[28] Singaicho J.C, (2014), Apuntes de la materia de Riesgo Sísmico dictada en la Maestría en Estructuras de la EPN

[29] Taípe L., (2013), “Análisis de las ecuaciones de predicción de movimiento de suelo para el Ecuador utilizando datos registrados durante el período 2000-2011 en estaciones de banda ancha y acelerógrafos”. Tesis de grado. Facultad de Geología, Minas y Petróleos. Escuela Politécnica Nacional, 148 p., Quito.

[30] Valverde J., Fernández J., et al., (2002), Microzonificación sísmica de los suelos del Distrito Metropolitano de la Ciudad de Quito, Escuela Politécnica Nacional. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 146 p. más Anexos, Quito.

ANEXOS

ANEXO 1**COEFICIENTES MODELO VERTICAL DE CHOI Y
YOUNGS 2013**

Coeficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Chou y Youngs 2013

C2	C4	C4a	CRB
1.06	-2.10	-0.50	50.00

T (s)	c1	c1a	c1b	c1c	c1d	cn	cM	c3	c5	cHM	c6
0.01	-2.262	0.165	-0.373	-0.165	0.198	16.088	4.999	1.862	5.453	3.096	0.508
0.02	-2.263	0.165	-0.377	-0.165	0.218	15.712	4.999	1.852	5.027	3.096	0.508
0.03	-2.139	0.165	-0.443	-0.165	0.348	15.882	4.999	1.807	4.582	3.097	0.508
0.04	-1.945	0.165	-0.512	-0.165	0.473	16.456	4.999	1.786	4.450	3.099	0.508
0.05	-1.742	0.165	-0.554	-0.165	0.543	17.645	4.999	1.783	4.650	3.101	0.508
0.075	-1.353	0.165	-0.593	-0.165	0.562	20.177	5.003	1.843	5.807	3.109	0.508
0.1	-1.219	0.165	-0.576	-0.165	0.463	19.999	5.017	1.916	6.941	3.238	0.508
0.12	-1.201	0.165	-0.558	-0.165	0.400	18.711	5.032	1.970	7.615	3.341	0.508
0.15	-1.239	0.165	-0.535	-0.165	0.334	16.625	5.055	2.047	8.359	3.430	0.508
0.17	-1.286	0.165	-0.519	-0.165	0.296	15.371	5.070	2.096	8.718	3.469	0.508
0.2	-1.360	0.165	-0.494	-0.165	0.244	13.701	5.094	2.164	9.117	3.515	0.508
0.25	-1.463	0.165	-0.452	-0.165	0.162	11.267	5.132	2.263	9.576	3.575	0.507
0.3	-1.553	0.165	-0.412	-0.165	0.088	9.191	5.167	2.344	9.857	3.623	0.505
0.4	-1.732	0.165	-0.353	-0.165	-0.029	6.546	5.232	2.464	10.152	3.695	0.501
0.5	-1.903	0.165	-0.310	-0.165	-0.116	5.231	5.289	2.546	10.297	3.740	0.496
0.75	-2.274	0.165	-0.222	-0.165	-0.271	3.790	5.411	2.672	10.461	3.794	0.485
1	-2.581	0.165	-0.169	-0.165	-0.353	3.302	5.511	2.748	10.540	3.814	0.470
1.5	-3.047	0.165	-0.138	-0.165	-0.345	2.850	5.671	2.836	10.599	3.828	0.440
2	-3.394	0.165	-0.122	-0.165	-0.261	2.542	5.798	2.881	10.605	3.833	0.426
3	-3.881	0.117	-0.105	-0.117	-0.091	2.149	5.998	2.930	10.601	3.836	0.418

Coefficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Chou y Youngs 2013

T (sec)	c7	c7b	c9	c9a	c9b	c11	c11b	cγ1	cγ2	cγ3
0.01	0	0.086	0.923	0.12	6.861	0	-0.45	-0.01	-0.0048	4.254
0.02	0	0.087	0.93	0.122	6.87	0	-0.45	-0.01	-0.0049	4.239
0.03	0	0.096	0.94	0.119	6.911	0	-0.45	-0.01	-0.0051	4.252
0.04	0	0.103	0.966	0.117	7.027	0	-0.45	-0.01	-0.0049	4.296
0.05	0	0.107	0.979	0.118	7.096	0	-0.45	-0.01	-0.0047	4.358
0.075	0	0.095	1.026	0.117	7.33	0	-0.45	-0.01	-0.0037	4.546
0.1	0	0.083	1.018	0.115	7.259	0	-0.45	-0.01	-0.0026	4.76
0.12	0	0.075	1.001	0.113	7.237	0	-0.45	-0.01	-0.0021	4.896
0.15	0	0.065	0.98	0.111	7.211	0	-0.45	-0.01	-0.0018	5.064
0.17	0	0.06	0.965	0.115	7.249	0	-0.45	-0.01	-0.0016	5.137
0.2	0	0.053	0.946	0.121	7.299	0	-0.44	-0.01	-0.0014	5.188
0.25	0	0.043	0.92	0.121	7.369	0	-0.35	-0.01	-0.0012	5.216
0.3	0	0.034	0.883	0.118	6.879	0	-0.27	-0.01	-0.0009	5.195
0.4	0	0.018	0.83	0.106	6.533	0	-0.18	-0.01	-0.0005	5.09
0.5	0	0.006	0.788	0.106	6.526	0	-0.14	-0.01	-0.0004	4.785
0.75	0	-0.02	0.675	0.1	6.5	0	-0.11	-0.01	-0.0009	4.33
1	0	-0.03	0.62	0.1	6.5	0	-0.11	-0	-0.0015	4.167
1.5	0	-0.04	0.51	0.1	6.5	0	-0.1	-0	-0.0022	4.003
2	0	-0.05	0.392	0.1	6.5	0	-0.1	-0	-0.0026	3.895
3	0	-0.06	0.124	0.1	6.5	0	-0.1	-0	-0.0025	3.793

Coeficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Chou y Youngs 2013

T (sec)	ϕ_1	ϕ_{1a}	ϕ_{1b}	ϕ_5	ϕ_6
0.01	0.87	660.7	3	0	300
0.02	0.87	660.6	3	0	300
0.03	0.87	660.3	3	0	300
0.04	0.87	660	3	0	300
0.05	0.87	659.5	3	0	300
0.075	0.87	657.9	3.005	0	300
0.1	0.87	655.6	3.36	0	300
0.12	0.87	653.2	4.062	0	300
0.15	0.87	648.8	4.929	0	300
0.17	0.87	645.4	5.262	0	300
0.2	0.87	639.6	5.553	0	300
0.25	0.8652	628.5	5.854	0	300
0.3	0.8434	616.3	6.061	0	300
0.4	0.7698	590.8	6.292	0	300
0.5	0.7263	566.9	6.379	0	300
0.75	0.736	522.2	6.36	0.046	300
1	0.796	496.2	6.22	0.11	300
1.5	0.9023	472.3	5.716	0.199	300
2	1.0001	462.7	4.952	0.26	300
3	1.1271	455.7	3.347	0.312	300

Coefficientes en el modelo aleatorio obtenidos por Chou y Youngs 2013

T(sec)	τ_1	τ_2	σ_1	σ_2	σ_3	σ_{2lp}
0.01	0.42	0.33	0.4912	0.3762	0.8	0.4528
0.02	0.423	0.3289	0.4904	0.3762	0.8	0.4551
0.03	0.4271	0.3273	0.4988	0.3849	0.8	0.4571
0.04	0.4309	0.3259	0.5049	0.391	0.8	0.4642
0.05	0.4341	0.3247	0.5096	0.3957	0.8	0.4716
0.075	0.4404	0.3223	0.5179	0.4043	0.8	0.5022
0.1	0.445	0.3206	0.5236	0.4104	0.8	0.523
0.12	0.4479	0.3195	0.5221	0.4109	0.8	0.5235
0.15	0.4514	0.3182	0.5202	0.4116	0.8	0.5209
0.17	0.4533	0.3175	0.5191	0.4119	0.8	0.5187
0.2	0.4558	0.3166	0.5177	0.4124	0.8	0.5152
0.25	0.459	0.3154	0.5159	0.413	0.7999	0.51
0.3	0.4615	0.3144	0.5143	0.4135	0.7997	0.5059
0.4	0.4652	0.313	0.5119	0.4144	0.7988	0.5002
0.5	0.4679	0.312	0.51	0.415	0.7966	0.4959
0.75	0.4724	0.3103	0.4973	0.4256	0.7792	0.4985
1	0.4753	0.3093	0.4882	0.4331	0.7504	0.4998
1.5	0.4788	0.3079	0.4755	0.4436	0.7136	0.5001
2	0.4811	0.3071	0.4681	0.4511	0.7035	0.4979
3	0.4838	0.3061	0.4617	0.4617	0.7006	0.4917

ANEXO 2

COEFICIENTES MODELO VERTICAL DE BORZOGNIA Y CAMPBELL 2013

Coefficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Borzogna y Campbell 2013

T(seg)	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
0.01	-4.674	0.977	0.533	-1.485	-0.445	-2.665	0.214	7.136	0	-0.229	0.759	-0.354
0.02	-4.548	0.976	0.549	-1.488	-0.453	-2.699	0.215	6.936	0	-0.27	0.768	-0.344
0.03	-4.05	0.931	0.628	-1.494	-0.464	-2.772	0.216	7.235	0	-0.315	0.766	-0.297
0.05	-3.435	0.887	0.674	-1.388	-0.552	-2.76	0.202	8.334	0	-0.329	0.764	-0.363
0.075	-3.435	0.902	0.726	-1.469	-0.543	-2.575	0.177	8.761	0	-0.29	0.795	-0.427
0.1	-3.93	0.993	0.698	-1.572	-0.47	-2.461	0.166	9.049	0	-0.203	0.842	-0.429
0.15	-5.505	1.267	0.51	-1.669	-0.452	-2.349	0.164	8.633	0	-0.203	0.736	-0.421
0.2	-6.28	1.366	0.447	-1.75	-0.435	-2.335	0.175	8.742	0	-0.203	0.801	-0.429
0.25	-6.789	1.458	0.274	-1.711	-0.41	-2.332	0.183	8.4	0	-0.203	0.715	-0.438
0.3	-7.4	1.528	0.193	-1.77	-0.305	-2.297	0.19	7.643	0	-0.203	0.708	-0.421
0.4	-8.75	1.739	-0.02	-1.594	-0.446	-2.219	0.185	7.059	0	-0.203	0.683	-0.401
0.5	-9.74	1.872	-0.121	-1.577	-0.489	-2.205	0.191	6.375	0	-0.203	0.704	-0.417
0.75	-11.05	2.021	-0.042	-1.757	-0.53	-2.143	0.188	5.166	0.016	-0.203	0.602	-0.49
1	-12.184	2.18	-0.069	-1.707	-0.624	-2.092	0.176	5.642	0.032	-0.115	0.394	-0.539
1.5	-13.451	2.27	0.047	-1.621	-0.686	-1.913	0.144	5.963	0.128	-0.005	0.328	-0.611
2	-13.7	2.271	0.149	-1.512	-0.84	-1.882	0.126	7.584	0.255	0.12	0.112	-0.63
3	-13.9	2.15	0.368	-1.315	-0.853	-1.789	0.105	8.645	0.284	0.17	0.011	-0.562
PGA	-4.729	0.984	0.537	-1.499	-0.443	-2.666	0.214	7.166	0	-0.23	0.759	-0.356
PGV	-3.86	1.51	0.27	-1.299	-0.379	-2.383	0.196	6.274	0.111	-0.128	0.14	-0.395

Coeficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Borzognia y Campbell 2013

T(seg)	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	K1	K2	K3
0.01	1.015	0.372	-0.119	-0.094	0	0.1026	0.045	0.008	865	0	0
0.02	0.95	0.4	-0.145	-0.081	0	0.1059	0.043	0.008	865	0	0
0.03	1.056	0.394	-0.196	-0.091	0	0.1175	0.041	0.008	908	0	0
0.05	1.316	0.422	-0.187	-0.29	0	0.1238	0.041	0.008	1054	0	0
0.075	1.758	0.336	-0.095	-0.261	0	0.1088	0.052	0.007	1086	0	0
0.1	1.411	0.314	-0.1	-0.091	0	0.0918	0.056	0.006	1032	0	0
0.15	1.227	0.289	0.0017	-0.092	0	0.072	0.045	0.007	878	0	0
0.2	0.987	0.29	0.0402	-0.081	0	0.0602	0.049	0.008	748	0	0
0.25	0.577	0.303	0.0468	0.011	0	0.05	0.042	0.006	654	0	0
0.3	0.279	0.336	0.0255	0.092	0	0.0382	0.044	0.005	587	0	0
0.4	0.358	0.358	0.0606	0.122	0	0.0264	0.031	0.005	503	0	0
0.5	0.229	0.432	0.0904	0.287	0	0.0163	0.029	0.005	457	0	0
0.75	0.574	0.459	0.1776	0.292	0	-0.002	0.028	0.005	410	0	0
1	0.98	0.442	0.2389	0.316	0	-0.007	0.028	0.005	400	0	0
1.5	0.819	0.52	0.2758	0.45	0	-0.026	0.029	0.004	400	0	0
2	0.044	0.566	0.3051	0.424	0	-0.041	0.022	0.002	400	0	0
3	-0.396	0.562	0.3482	0.3	0	-0.051	0.032	-0	400	0	0
PGA	1.019	0.373	-0.117	-0.097	0	0.102	0.044	0.008	865	0	0
PGV	0.338	0.407	-0.002	0.382	0	0.0581	0.029	0.008	400	0	0

Coeficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Borzognia y Campbell 2013

T(seg)	a2	h1	h2	h3	h4	h5	h6
0.01	0.168	0.242	1.471	-0.714	1	-0.336	-0.27
0.02	0.166	0.244	1.467	-0.711	1	-0.339	-0.26
0.03	0.167	0.246	1.467	-0.713	1	-0.338	-0.26
0.05	0.173	0.251	1.449	-0.701	1	-0.338	-0.26
0.075	0.198	0.26	1.435	-0.695	1	-0.347	-0.22
0.1	0.174	0.259	1.449	-0.708	1	-0.391	-0.2
0.15	0.198	0.254	1.461	-0.715	1	-0.449	-0.1
0.2	0.204	0.237	1.484	-0.721	1	-0.393	-0.2
0.25	0.185	0.206	1.581	-0.787	1	-0.339	-0.21
0.3	0.164	0.21	1.586	-0.795	1	-0.447	-0.12
0.4	0.16	0.226	1.544	-0.77	1	-0.525	-0.09
0.5	0.184	0.217	1.554	-0.77	1	-0.407	-0.28
0.75	0.216	0.154	1.626	-0.78	1	-0.371	-0.29
1	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.76
1.5	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.76
2	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.76
3	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.76
PGA	0.167	0.241	1.474	-0.715	1	-0.337	-0.27
PGV	0.596	0.117	1.616	-0.733	1	-0.128	-0.76

Coeficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Borzogna y Campbell 2013

T(sec)	C20	$\Delta C20$		
		CA	JI	CH
0.01	-0.0053	0	-0.0018	0.0039
0.02	-0.0052	0	-0.0018	0.0036
0.03	-0.0052	0	-0.002	0.0033
0.05	-0.0062	0	-0.0026	0.0039
0.075	-0.0072	0	-0.0021	0.0048
0.1	-0.0072	0	-0.0018	0.005
0.15	-0.0066	0	-0.0018	0.0048
0.2	-0.0056	0	-0.0022	0.0041
0.25	-0.0049	0	-0.0025	0.0034
0.3	-0.0046	0	-0.0027	0.0031
0.4	-0.0037	0	-0.0024	0.0024
0.5	-0.0031	0	-0.0025	0.0021
0.75	-0.0021	0	-0.0025	0.002
1	-0.0012	0	-0.0023	0.0012
1.5	-0.0004	0	-0.0013	0.0004
2	0	0	-0.0004	0
3	0	0	0	0
PGA	-0.0053	0	-0.0018	0.0039
PGV	-0.0019	0	0.0005	0.0019

**Coeficientes en el modelo aleatorio obtenidos por Borzognia y Campbell
2013**

T(sec)	τ_1	τ_2	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_{LNAF}	ϕ_c	
						M \leq 4.5	M \geq 5.5
0.01	0.462	0.345	0.695	0.494	0.3	0.834	0.602
0.02	0.474	0.375	0.7	0.508	0.3	0.846	0.632
0.03	0.529	0.416	0.722	0.536	0.3	0.895	0.679
0.05	0.576	0.468	0.751	0.584	0.3	0.947	0.749
0.075	0.523	0.427	0.74	0.578	0.3	0.906	0.719
0.1	0.461	0.39	0.723	0.57	0.3	0.858	0.691
0.15	0.391	0.343	0.731	0.536	0.3	0.829	0.636
0.2	0.363	0.308	0.701	0.51	0.3	0.789	0.596
0.25	0.355	0.288	0.687	0.507	0.3	0.773	0.583
0.3	0.355	0.265	0.668	0.514	0.3	0.757	0.579
0.4	0.36	0.28	0.628	0.521	0.3	0.723	0.591
0.5	0.376	0.284	0.606	0.526	0.3	0.713	0.598
0.75	0.416	0.322	0.568	0.536	0.3	0.704	0.625
1	0.472	0.311	0.536	0.55	0.3	0.714	0.632
1.5	0.507	0.329	0.511	0.559	0.3	0.719	0.649
2	0.539	0.345	0.507	0.571	0.3	0.74	0.667
3	0.515	0.335	0.474	0.557	0.3	0.7	0.65
PGA	0.461	0.347	0.694	0.493	0.3	0.833	0.603
PGV	0.334	0.24	0.608	0.442	0.3	0.694	0.503

ANEXO 3

**COEFICIENTES MODELO DE VERTICAL DE GULERCE et
al. 2013**

Coefficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Gulerce et al. 2013.

T(sec)	VLIN	c4	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a8
0.01	660	8	1.045	-1.1	0.4	-0.38	-0.832	1.9	0
0.02	680	8	1.085	-1.1	0.4	-0.38	-0.832	1.9	0
0.03	770	8	1.22	-1.1	0.4	-0.38	-0.832	1.9	0
0.05	800	8	1.55	-1.1	0.4	-0.38	-0.832	1.9	0
0.075	800	8	1.52	-1.004	0.4	-0.38	-0.832	1.9	0
0.1	800	8	1.42	-0.936	0.382	-0.38	-0.795	1.9	0
0.15	740	8	1.26	-0.841	0.357	-0.38	-0.743	1.9	-0.035
0.2	590	8	1.117	-0.773	0.339	-0.38	-0.706	2.022	-0.06
0.25	495	8	1.01	-0.75	0.326	-0.38	-0.677	2.117	-0.08
0.3	430	8	0.93	-0.75	0.314	-0.38	-0.654	2.194	-0.095
0.4	360	8	0.79	-0.75	0.297	-0.38	-0.617	2.317	-0.12
0.5	340	8	0.69	-0.75	0.283	-0.38	-0.588	2.411	-0.14
0.75	330	8	0.46	-0.75	0.258	-0.38	-0.536	2.584	-0.175
1	330	8	0.3	-0.75	0.24	-0.38	-0.499	2.706	-0.2
1.5	330	8	0.038	-0.75	0.211	-0.38	-0.438	2.878	-0.249
2	330	8	-0.142	-0.75	0.19	-0.38	-0.395	3	-0.284
3	330	8	-0.482	-0.75	0.161	-0.38	-0.335	3	-0.334

Coefficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Gulerce et al. 2013.

T(sec)	a10	a11	a12	a13	a14	a15	a17
PGA	-0.35	-0.26	-0.18	0.75	-0.23	1.53	-0.004
0.01	-0.42	-0.26	-0.18	0.75	-0.23	1.53	-0.004
0.02	-0.42	-0.26	-0.18	0.75	-0.23	1.53	-0.004
0.03	-0.42	-0.26	-0.18	0.75	-0.23	1.53	-0.004
0.05	-0.42	-0.26	-0.18	0.75	-0.23	1.53	-0.006
0.075	-0.448	-0.26	-0.18	0.75	-0.23	1.53	-0.007
0.1	-0.469	-0.26	-0.18	0.75	-0.23	1.53	-0.008
0.15	-0.497	-0.217	-0.148	0.75	-0.23	1.53	-0.007
0.2	-0.517	-0.18	-0.126	0.75	-0.163	1.53	-0.006
0.25	-0.533	-0.151	-0.108	0.694	-0.112	1.414	-0.006
0.3	-0.546	-0.127	-0.094	0.649	-0.069	1.32	-0.005
0.4	-0.566	-0.09	-0.072	0.577	-0.003	1.17	-0.004
0.5	-0.582	-0.061	-0.054	0.521	0.049	1.055	-0.003
0.75	-0.61	-0.008	-0.023	0.419	0.143	0.844	-0.002
1	-0.69	0.03	0	0.347	0.21	0.695	-0.001
1.5	-0.78	0.082	0	0.246	0.304	0.484	-0.001
2	-0.81	0.12	0	0.174	0.371	0.335	-0.001
3	-0.761	0.173	0	0.072	0.465	0.125	-0.001

Coeficientes de la ecuación de movimiento fuerte de suelo de Gulerce et al. 2013.

T(sec)	a25	a28	a29
PGA	-0.0029	0.0016	-0.0026
0.01	-0.0029	0.0016	-0.0026
0.02	-0.0034	0.0014	-0.0028
0.03	-0.0049	0.0008	-0.0032
0.05	-0.0068	0.0012	-0.0036
0.075	-0.0069	0.0024	-0.0032
0.1	-0.0066	0.0029	-0.0029
0.15	-0.0057	0.0031	-0.0027
0.2	-0.0048	0.0026	-0.003
0.25	-0.0045	0.0021	-0.0033
0.3	-0.0044	0.0016	-0.0036
0.4	-0.0043	0.0009	-0.0037
0.5	-0.0044	0.0004	-0.0039
0.75	-0.0041	0	-0.0041
1	-0.0036	0	-0.0039
1.5	-0.0023	0	-0.0032
2	-0.0021	0	-0.0028
3	-0.0021	0	-0.0028

Coefficientes en el modelo aleatorio obtenidos por Gulerce et al. 2013.

T(sec)	s1	s2	s3	s4
PGA	0.72	0.534	0.49	0.345
0.01	0.72	0.534	0.49	0.345
0.02	0.72	0.558	0.49	0.345
0.03	0.72	0.572	0.49	0.345
0.05	0.72	0.59	0.49	0.345
0.075	0.72	0.59	0.49	0.345
0.1	0.72	0.59	0.49	0.345
0.15	0.72	0.59	0.49	0.345
0.2	0.698	0.59	0.49	0.345
0.25	0.681	0.59	0.49	0.345
0.3	0.667	0.59	0.49	0.345
0.4	0.644	0.59	0.49	0.345
0.5	0.627	0.59	0.49	0.345
0.75	0.596	0.59	0.49	0.345
1	0.574	0.59	0.49	0.345
1.5	0.543	0.622	0.49	0.345
2	0.521	0.645	0.49	0.345
3	0.489	0.677	0.49	0.345