



Peligrosidad sísmica del área urbana y rural de la ciudad de Ambato

Serrano Moreta, Paola Carolina

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Maestría de Investigación en Ingeniería Civil

Trabajo de titulación, previo a la obtención del Título de Magíster en Ingeniería Civil con

Mención en Estructuras

Ing. Aguiar Falconí, Roberto Rodrigo, PhD

18 de Febrero de 2023



Plagiarism Checker X Originality Report

Similarity Found: 3%

TESIS_PAOLA_SERRANO_6.0

Date: martes, junio 20, 2023

Statistics: 714 words Plagiarized / 28131 Total words

Remarks: Low Plagiarism Detected - Your Document needs Optional Improvement.



.....

Ing. Aguiar Falconí, Roberto Rodrigo, PhD

Director



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, "**Peligrosidad sísmica del área urbana y rural de la ciudad de Ambato**" fue realizado por la señora/ **Serrano Moreta, Paola Carolina**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de febrero del 2023



Ing. Aguiar Falconi, Roberto Rodrigo, PhD.

CC: 1703641827



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Serrano Moreta, Paola Carolina** con cédula de ciudadanía n° 1803710308, declaro que el contenido, ideas y criterio del trabajo de titulación: **“Peligrosidad sísmica del área urbana y rural de la ciudad de Ambato”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 18 de febrero del 2023

Serrano Moreta, Paola Carolina

CC: 1803710308



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Autorización de Publicación

Yo, **Serrano Moreta, Paola Carolina** con cédula de ciudadanía n° 1803710308, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación:” **Peligrosidad sísmica del área urbana y rural de la ciudad de Ambato**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 18 de febrero del 2023

Serrano Moreta, Paola Carolina

CC: 1803710308

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado a Washington y Lorena mis padres quienes me brindaron apoyo y confianza para alcanzar un logro más en mi vida profesional, gracias por saber guiarme siempre de la mano de Dios.

Paola Serrano.

Agradecimiento

En primer lugar, agradezco a Dios por la vida, salud y fuerza para cumplir cada reto en la vida, a mi director de tesis Dr. Roberto Aguiar por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto brindándome su ayuda, a mi compañero Christian quien estuvo en todo momento apoyándome, Nacho mi amigo fiel, su amor incondicional y compañía me motivo y alentó a levantarme cada día con una sonrisa en mi rostro, gracias y finalmente a mis padres quienes me cuidaron y apoyaron en este reto de mi vida profesional a más de enseñarme que todo en la vida es posible si tenemos nuestra confianza puesta en Dios.

Paola Serrano

Índice

Dedicatoria	6
Agradecimiento.....	7
Índice.....	8
Índice de tablas.....	14
Índice de figuras	16
Resumen	25
Abstract	26
Capítulo 1	27
Generalidades	27
Antecedentes	27
Planteamiento del problema.....	28
Justificación de la importancia y alcance de la investigación	29
Objetivos	31
Objetivo general.....	31
Objetivos específicos.....	31
Hipótesis de la investigación	31
Capítulo 2	33
Marco Teórico	33
Marco Legal	33
Marco referencial.....	34

Atenuación de las ondas sísmicas	36
Fuentes sísmicas	37
Fuente sísmica de Interfase.....	37
Fuente sísmica de In-slab.....	37
Corteza Continental.....	37
Descripción de las fallas Geológicas.....	39
Características y elementos de una Falla <i>Geológica</i>	40
.....	43
Clasificación geométrica de las fallas	43
Falla Normal o falla con movimiento normal.....	43
Falla Inversa o falla con movimiento inverso	44
Falla Transcurrente	45
Parámetros de cálculo	46
Ecuaciones de Atenuación	50
Parámetros utilizados en las ecuaciones de atenuación	52
Parámetros de fuente.....	52
Parámetros de sitio	52
Parámetros de trayectoria	53
Descripción de los modelos	54
Componente Vertical del movimiento del suelo	54
Códigos Internacionales	56
Metodología Probabilista	59

Fases de cálculo	62
Análisis de sismicidad	62
Sismo de 1906.....	65
Sismicidad en la Costa Ecuatoriana.....	67
Catalogo del proyecto	68
Completitud de la información sísmica	68
Método Gráfico	69
Método Stepp	69
Capítulo 3	71
Metodología de la Investigación.....	71
Área de Influencia	71
Método Determinístico.....	78
Ecuaciones de movimientos fuertes	78
Componente horizontal del movimiento del suelo	78
Modelo de Campbell y Bozorgnia (2014).....	79
Limitaciones del modelo	79
Ecuaciones del modelo.....	80
Modelo de Abrahamson (2014)	80
Limitaciones del modelo	81
Ecuaciones del modelo.....	81
Modelo de Chiou Youngs (2014).....	82
Limitaciones del modelo	83

Ecuaciones del modelo.....	83
Modelo de Zhao (2016).....	85
Ecuaciones del modelo.....	87
Modelo de Boore y Atkinson (2008)	88
Limitaciones del modelo	89
Ecuaciones del modelo.....	89
Modelo de Idriss (2014).....	90
Limitaciones del modelo	90
Ecuaciones del modelo.....	90
Comparación de modelos.....	91
Componente vertical del movimiento del suelo	93
Modelo de Campbell y Bozorgnia (2016).....	93
Análisis de regresión.....	94
Medidas de intensidad de movimiento de suelo	94
Limitaciones del modelo	94
Ecuaciones del modelo.....	95
Modelo de Gulerce et al (2017)	96
Limitaciones del modelo	96
Ecuaciones del modelo.....	96
Método Probabilístico.....	97
Zonas fuentes.....	97
Curvas de peligro sísmico.....	104

Factores de sitio de NEHRP (2015)	105
Desagregación sísmica.....	107
Capítulo 4	108
Resultados y discusión	108
Metodología determinística para encontrar espectros de aceleración horizontal para la ciudad de Ambato	108
Periodo de recurrencia.....	111
Cálculo de espectros	116
Espectros de aceleración horizontal del suelo para la ciudad de Ambato	116
Resultados en perfil sísmico C	116
Resultados en perfil sísmico D	129
Resultados en perfil sísmico C	136
Resultados en perfil sísmico D	142
Norma Ecuatoriana de la Construcción	147
Espectro Envolvente	151
Espectros de aceleración vertical del suelo para la ciudad de Ambato	155
Resultados en perfil sísmico C	155
Resultados en perfil sísmico D	162
Resultados en perfil sísmico C	167
Resultados en perfil sísmico D	173
Norma Ecuatoriana de la Construcción	178
Metodología Probabilística de la peligrosidad sísmica de Ambato.....	181

Espectros de peligro sísmico uniforme	185
Curvas de peligro sísmico.....	189
Factores de sitio de NEHRP (2015)	191
Desagregación sísmica.....	195
Capítulo 5	197
Conclusiones y Recomendaciones	197
Conclusiones.....	197
Recomendaciones.....	200
Bibliografía.....	201

Índice de tablas

Tabla 1.	<i>Relaciones de aceleración vertical a horizontal propuestas</i>	56
Tabla 2.	<i>Clasificación de suelos considerada por Zhao et al. (2015) y similitud con NEHRP.....</i>	86
Tabla 3.	<i>Cuadro comparativo de las variables utilizadas en los modelos GMPE.....</i>	92
Tabla 4.	<i>Cuadro comparativo de las variables utilizadas en los modelos GMPE.....</i>	92
Tabla 5.	<i>Parámetros de sismicidad.....</i>	100
Tabla 6.	<i>Parámetros de sismicidad de las zonas fuentes del modelo de Beauval et al. (2018).....</i>	103
Tabla 7.	<i>Factores de Amplificación para el PGA.....</i>	106
Tabla 8.	<i>Factores de Amplificación para periodos cortos.....</i>	106
Tabla 9.	<i>Factores de Amplificación para periodos largos.....</i>	106
Tabla 10.	<i>Parámetros de las Fallas ciegas que atraviesan el área urbana y rural de la ciudad de Ambato.....</i>	111
Tabla 11.	<i>Períodos de recurrencia encontrados con el Método del Terremoto Característico para las fallas consideradas en el estudio.....</i>	112
Tabla 12.	<i>Período de recurrencia, hallada con el modelo de GR modificado en la falla Ambato.....</i>	112
Tabla 13.	<i>Períodos de recurrencia, hallado con modelo de GR modificado para las fallas de Huachi y Titora.....</i>	113
Tabla 14.	<i>Períodos de recurrencia, hallado con modelo de GR modificado para las fallas F10 y F11.....</i>	114
Tabla 15.	<i>Períodos de recurrencia, hallado con modelo de GR modificado para las fallas F16 y F28.....</i>	114
Tabla 16.	<i>Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico C.....</i>	128

Tabla 17.	<i>Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico D.....</i>	135
Tabla 18.	<i>Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico C.....</i>	141
Tabla 19.	<i>Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico D.....</i>	146
Tabla 20.	<i>Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico C</i>	161
Tabla 21.	<i>Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico D.....</i>	166
Tabla 22.	<i>Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico C.....</i>	172
Tabla 23.	<i>Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico D.....</i>	177
Tabla 24.	<i>Datos geográficos y poblacionales de la ciudad de estudio</i>	182
Tabla 25.	<i>Combinación de modelos de movimientos fuertes seleccionados para el régimen tectónico en estudio</i>	183
Tabla 26.	<i>Espectros hallados para cada grupo para un suelo tipo "C"</i>	185
Tabla 27.	<i>Espectros hallados para cada grupo para un suelo tipo "D"</i>	185
Tabla 28.	<i>Espectros de Peligro Sísmico Uniforme suelo tipo "C"- Modelo 4.....</i>	188
Tabla 29.	<i>Espectros de Peligro Sísmico Uniforme suelo tipo "D"- Modelo 7.....</i>	189
Tabla 30.	<i>Aceleraciones espectrales para un perfil de suelo tipo "C"</i>	191
Tabla 31.	<i>Valores de sitio para un perfil de suelo tipo "C"</i>	192
Tabla 32.	<i>Aceleraciones espectrales para un perfil de suelo tipo "D"</i>	193
Tabla 33.	<i>Valores de sitio para un perfil de suelo tipo "D"</i>	194
Tabla 34.	<i>Valores de Distancia-Magnitud y tasa anual de excedencia para el modelo cuatro, para un periodo de 1 segundo.....</i>	196

Índice de figuras

Figura 1	<i>Factores que intervienen en la evaluación de la Peligrosidad sísmica</i>	35
Figura 2	<i>Distancia Fuente-Emplazamiento</i>	36
Figura 3	<i>Fuente de actividad sísmica</i>	38
Figura 4	<i>Zonas generadoras de sismos</i>	38
Figura 5	<i>Geometría y parámetros de la Falla</i>	41
Figura 6	<i>Geometría de la falla</i>	42
Figura 7	<i>Falla Normal</i>	44
Figura 8	<i>Fallas Normales</i>	44
Figura 9	<i>Falla Inversa</i>	45
Figura 10	<i>Falla Inversa</i>	45
Figura 11	<i>Falla Transcurrente</i>	46
Figura 12	<i>Falla Transcurrente</i>	46
Figura 13	<i>Modelo del terremoto característico</i>	47
Figura 14	<i>Parámetros de fuente</i>	53
Figura 15	<i>Parámetros de trayectoria</i>	53
Figura 16	<i>Representación de las placas tectónicas del Ecuador</i>	63
Figura 17	<i>Geodinámica de la peligrosidad sísmica del Ecuador</i>	64
Figura 18	<i>Sismos Interplaca tipo Thrust que están altamente acoplados en zona norte de Ecuador</i>	65
Figura 19	<i>Magnitudes y energía liberada de los sismos de 1906, 1958, y 1979</i>	66
Figura 20	<i>Réplicas del terremoto del 16 de abril del 2016</i>	67
Figura 21	<i>Fallas Geológicas zona Urbana</i>	72
Figura 22	<i>Fallas Geológicas zona rural y urbana</i>	73
Figura 23	<i>Ubicación de los sitios seleccionados para el estudio Geofísico</i>	75

Figura 24	<i>Clasificación de los suelos de la zona urbana de la ciudad de Ambato desde el punto de vista sísmico</i>	76
Figura 25	<i>Estudios de Peligrosidad sísmica del área urbana de la ciudad de Ambato</i>	77
Figura 26	<i>Definición de la trayectoria volcánica</i>	87
Figura 27	<i>Zonas Fuentes</i>	98
Figura 28	<i>Zonas Fuentes Interfase y corticales</i>	101
Figura 29	<i>Zonas Fuentes intraplaca</i>	102
Figura 30	<i>Malla de puntos</i>	108
Figura 31	<i>Malla de puntos de la ciudad de Ambato</i>	109
Figura 32	<i>Malla de puntos de la ciudad de Ambato</i>	109
Figura 33	<i>Periodo de Recurrencia modelo del Terremoto Característico</i>	115
Figura 34	<i>Periodo de Recurrencia modelo de Gutenberg y Richter modificado</i>	115
Figura 35	<i>Malla de puntos Ambato suelo tipo "C"</i>	116
Figura 36	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla Ambato-área urbana, $V_{s30}=380$ m/s</i>	117
Figura 37	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla Ambato-área rural, $V_{s30}=380$ m/s</i>	118
Figura 38	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "C", en la Falla de Huachi-área urbana, $V_{s30}=380$ m/s</i>	119
Figura 39	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "C", en la Falla de Huachi-área rural, $V_{s30}=380$ m/s</i>	120
Figura 40	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla de Totoras-área urbana, $V_{s30}=380$ m/s</i>	120
Figura 41	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla de Totoras-área rural, $V_{s30}=380$ m/s</i>	121

Figura 42	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo “C”, en la Falla F-10 área urbana, Vs30=380 m/s</i>	122
Figura 43	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo “C”, en la Falla de F-10 rural, Vs30=380 m/s</i>	122
Figura 44	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo “C”, en la Falla F-11 área urbana, Vs30=380 m/s</i>	123
Figura 45	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo “C”, en la Falla F-11 área rural, Vs30=380 m/s</i>	124
Figura 46	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo “C”, en la Falla F-16 área urbana, Vs30=380 m/s</i>	124
Figura 47	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo “C”, en la Falla F-16 área rural, Vs30=380 m/s</i>	125
Figura 48	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo “C”, en la Falla F-28 área urbana, Vs30=380 m/s</i>	126
Figura 49	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo “C”, en la Falla F-28 área rural, Vs30=380 m/s</i>	126
Figura 50	<i>Promedio seis ecuaciones suelo tipo “C”, en la Falla Ambato, Vs30=380 m/s</i>	128
Figura 51	<i>Malla de puntos Ambato suelo tipo “D”</i>	129
Figura 52	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo “D”, en la Falla Ambato, Vs30=300 m/s</i>	130
Figura 53	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo “D”, en la Falla de Huachi, Vs30=300 m/s</i>	131
Figura 54	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo “D”, en la Falla de Totoras, Vs30=300 m/s</i>	131

Figura 55	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "D", en la Falla de F-10, Vs30=300 m/s.....</i>	132
Figura 56	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "D", en la Falla de F-11, Vs30=300 m/s.....</i>	132
Figura 57	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "D", en la Falla de F-16, Vs30=300 m/s.....</i>	133
Figura 58	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "D", en la Falla de F-28, Vs30=300 m/s.....</i>	133
Figura 59	<i>Promedio seis ecuaciones suelo tipo "D", en la Falla Ambato, Vs30=300 m/s.....</i>	134
Figura 60	<i>Malla de puntos Ambato suelo tipo "C"</i>	136
Figura 61	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla Ambato, Vs30=380 m/s.....</i>	136
Figura 62	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "C", en la Falla de Huachi, Vs30=380 m/s.....</i>	137
Figura 63	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla de Totoras, Vs30=380 m/s.....</i>	137
Figura 64	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "C", en la Falla F-10, Vs30=380 m/s.....</i>	138
Figura 65	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "C", en la Falla F-11, Vs30=380 m/s.....</i>	138
Figura 66	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "C", en la Falla F-16, Vs30=380 m/s.....</i>	139
Figura 67	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6. suelo tipo "C", en la Falla F-28, Vs30=380 m/s.....</i>	139

Figura 68	<i>Promedio seis ecuaciones suelo tipo "C", en la Falla Ambato, Vs30=380 m/s</i>	140
Figura 69	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla Ambato, Vs30=300 m/s</i>	142
Figura 70	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "D", en la Falla de Huachi, Vs30=300 m/s</i>	143
Figura 71	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla de Totoras, Vs30=300 m/s</i>	143
Figura 72	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "D", en la Falla F-10, Vs30=300 m/s</i>	144
Figura 73	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "D", en la Falla f-11, Vs30=300 m/s</i>	144
Figura 74	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "D", en la Falla F-16, Vs30=300 m/s</i>	145
Figura 75	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "D", en la Falla F-28, Vs30=300 m/s</i>	145
Figura 76	<i>Promedio seis ecuaciones suelo tipo "D", en la Falla Ambato, Vs30=300 m/s</i>	146
Figura 77	<i>Espectro para un perfil de suelo C, sismo en la falla Huachi, espectro promedio de los estudios 2018 y 2020</i>	148
Figura 78	<i>Espectro para un perfil de suelo C, sismo en la falla Ambato, espectro promedio de los estudios 2018 y 2020</i>	148
Figura 79	<i>Espectro para un perfil de suelo C, sismo en la falla de Totoras, espectro promedio de los estudios 2018 y 2020</i>	149
Figura 80	<i>Espectro para un perfil de suelo D, sismo en la falla Huachi, espectro promedio de los estudios 2018 y 2020</i>	150

Figura 81	<i>Espectro para un perfil de suelo D, sismo en la falla Ambato, espectro promedio de los estudios 2018 y 2020.....</i>	150
Figura 82	<i>Espectro para un perfil de suelo D, sismo en la falla de Totoras, espectro promedio de los estudios 2018 y 2020.....</i>	151
Figura 83	<i>Espectro para un perfil de suelo C, sismo en la falla de Huachi, espectro envolvente promedio de los estudios 2018 y 2020.....</i>	152
Figura 84	<i>Espectro para un perfil de suelo C, sismo en la falla Ambato, espectro envolvente promedio de los estudios 2018 y 2020.....</i>	152
Figura 85	<i>Espectro para un perfil de suelo C, sismo en la falla de Totoras, espectro envolvente promedio de los estudios 2018 y 2020.....</i>	153
Figura 86	<i>Comparación de espectros envolventes con los reportados en NEC 15, perfil de suelo sísmico “C”.....</i>	153
Figura 87	<i>Comparación de espectros envolventes con los reportados en NEC 15, perfil de suelo sísmico “D”.....</i>	154
Figura 88	155	
Figura 89	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo “C”, en la Falla Ambato, $V_{s30}=380$ m/s.....</i>	156
Figura 90	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo “C”, en la Falla de Huachi, $V_{s30}=380$ m/s.....</i>	156
Figura 91	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo “C”, en la Falla de Totoras, $V_{s30}=380$ m/s.....</i>	157
Figura 92	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo “C”, en la Falla de F-10, $V_{s30}=380$ m/s.....</i>	158
Figura 93	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo “C”, en la Falla de F-11, $V_{s30}=380$ m/s.....</i>	158

Figura 94	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "C", en la Falla de F-16, Vs30=380 m/s.....</i>	159
Figura 95	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "C", en la Falla de F-28, Vs30=380 m/s.....</i>	159
Figura 96	<i>Promedio seis ecuaciones suelo tipo "C", en la Falla Ambato, Vs30=380 m/s.....</i>	160
Figura 97	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla Ambato, Vs30=300 m/s.....</i>	162
Figura 98	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "D", en la Falla de Huachi, Vs30=300 m/s.....</i>	162
Figura 99	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla de Totoras, Vs30=300 m/s.....</i>	163
Figura 100	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "D", en la Falla F-10, Vs30=300 m/s.....</i>	163
Figura 101	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "D", en la Falla F11, Vs30=300 m/s.....</i>	164
Figura 102	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "D", en la Falla F-16, Vs30=300 m/s.....</i>	164
Figura 103	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "D", en la Falla F-28, Vs30=300 m/s.....</i>	165
Figura 104	<i>Promedio seis ecuaciones suelo tipo "D", en la Falla Ambato, Vs30=300 m/s</i>	165
Figura 105	<i>Malla de puntos Ambato zona urbana y rural suelo tipo "C".....</i>	167
Figura 106	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla Ambato, Vs30=380 m/s.....</i>	168

Figura 107	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "C", en la Falla de Huachi, Vs30=380 m/s.....</i>	168
Figura 108	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla de Totoras, Vs30=380 m/s.....</i>	169
Figura 109	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "C", en la Falla F-10, Vs30=380 m/s.....</i>	169
Figura 110	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "C", en la Falla F-11, Vs30=380 m/s.....</i>	170
Figura 111	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "C", en la Falla F-16, Vs30=380 m/s.....</i>	170
Figura 112	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "C", en la Falla F-28, Vs30=380 m/s.....</i>	171
Figura 113	172	
Figura 114	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla Ambato, Vs30=300 m/s.....</i>	173
Figura 115	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "D", en la Falla de Huachi, Vs30=300 m/s.....</i>	174
Figura 116	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla de Totoras, Vs30=300 m/s.....</i>	174
Figura 117	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "D", en la Falla F-10, Vs30=300 m/s.....</i>	175
Figura 118	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "D", en la Falla F-11, Vs30=300 m/s.....</i>	175
Figura 119	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "D", en la Falla F-16, Vs30=300 m/s.....</i>	176

Figura 120	<i>Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "D", en la Falla F-28, $V_{s30}=300$ m/s.....</i>	176
Figura 121	<i>Promedio seis ecuaciones suelo tipo "D", en la Falla Ambato, $V_{s30}=300$ m/s 177</i>	
Figura 122	<i>Comparación de espectros envolventes con los reportados en NEC 15, perfil de suelo sísmico "C", zona urbana.....</i>	179
Figura 123	<i>Comparación de espectros envolventes con los reportados en NEC 15, perfil de suelo sísmico "C", zona rural.....</i>	179
Figura 124	<i>Comparación de espectros envolventes con los reportados en NEC 15, perfil de suelo sísmico "D", zona urbana.....</i>	180
Figura 125	<i>Comparación de espectros envolventes con los reportados en NEC 15, perfil de suelo sísmico "D", zona rural.....</i>	180
Figura 126	<i>Zona uno en estudio- Huachi la Magdalena.....</i>	182
Figura 127	<i>Zona dos en estudio- Miraflores.....</i>	182
Figura 128	<i>Espectros de Peligro Sísmico Uniforme suelo tipo "C".....</i>	185
Figura 129	<i>Espectros de Peligro Sísmico Uniforme suelo tipo "D".....</i>	186
Figura 130	<i>Espectros de Peligro Sísmico Uniforme suelo tipo "C"- Modelo 4.....</i>	187
Figura 131	<i>Espectros de Peligro Sísmico Uniforme suelo tipo "D"- Modelo 7.....</i>	187
Figura 132	<i>Curvas de Peligrosidad Sísmica, para Huachi la Magdalena, suelo tipo "C" $V_{s30}=380$m/s - Modelo 4.....</i>	189
Figura 133	<i>Curvas de Peligrosidad Sísmica, para Huachi la Magdalena, suelo tipo "D" $V_{s30}=316$m/s - Modelo 7.....</i>	190
Figura 134	<i>Espectro de peligro uniforme Perfil de suelo tipo "C"-Modelo cuatro.....</i>	192
Figura 135	<i>Espectro de peligro uniforme Perfil de suelo tipo "D"-Modelo Siete.....</i>	194
Figura 136	<i>Resultados de la desegregación de peligro sísmico-Modelo cuatro.....</i>	195

Resumen

En el 2018, se realizó la microzonificación sísmica del área urbana de la ciudad de Ambato, trabajando para el efecto con la mejor información sísmica disponible a la fecha. Este trabajo se lo hizo como una consultoría de la Risk & Safety para el Municipio de Ambato. Como fue consultoría se realizaron estudios geofísicos y geotécnicos del área urbana de la ciudad de Ambato. (Aguiar y Rivas 2018). En esta tesis se actualizará el estudio realizado en 2018, incorporando nuevas ecuaciones de movimientos fuertes que han sido publicadas en los últimos años. **Adicionalmente se va a realizar el estudio de la microzonificación del área rural de la ciudad de Ambato**, cuya extensión es aproximadamente 4 veces el área urbana, no se tiene financiamiento para realizar estudios geofísicos y geotécnicos del área rural, por lo que se realizarán dos hipótesis, la primera considerar que los suelos del área rural son tipo C, y la segunda considerar que son tipo D. Lo importante del trabajo en primer lugar es actualizar los estudios de microzonificación del área urbana y segundo dejar establecida la metodología de trabajo, con la mejor información sísmica disponible para el área rural de la ciudad de Ambato. El estudio comprende la determinación de espectros para la componente horizontal de movimiento del suelo; espectros para la componente vertical de movimiento del suelo; todo esto para el área urbana y el área rural de la ciudad de Ambato, y su respectivo análisis por la metodología Probabilística

Palabras clave: Ecuaciones de movimientos fuertes, microzonificación sísmica, espectros ,componente horizontal, componente vertical

Abstract

In 2018, the seismic microzonification of the urban area of the city of Ambato was carried out, working for this purpose with the best seismic information available to date. This work was done as a Risk & Safety consultancy for the Municipality of Ambato. As it was a consultancy, were made geophysical and geotechnical studies of the urban area of the city of Ambato. In this thesis, the study carried out in 2018 will be updated, incorporating new strong motions equations that have been published in recent years. **Additionally, this study will be carried out on the microzoning of the rural area of the city of Ambato**, whose extension is approximately 4 times the urban area. There is no funding to make geophysical and geotechnical studies of the rural area, so two hypotheses will be made, the first is to consider that the soils of the rural area are type C, and the second is to consider that they are type D. The main objective of this work is to update the microzonation studies of the urban area and to establish the methodology of work, with the best seismic information available for the rural area of the city of Ambato. The study includes the determination of spectra for the horizontal component of ground movement; spectra for the vertical component of ground movement; all this for the urban and rural areas of the city of Ambato, and their respective analysis by the Probabilistic methodology.

Keywords: Strong motions equations, seismic microzonification, spectra, horizontal component, vertical component

Capítulo 1

Generalidades

Antecedentes

En la Maestría de Estructuras de la Politécnica Nacional, en el 2015, Diego Quizanga obtuvo el título de Máster con la determinación de espectros para la **componente horizontal** de la ciudad de Quito, empleando la metodología determinística. (Quizanga, 2015). Posteriormente, en el 2016, Eduardo López se graduó de Máster con la determinación de espectros para la **componente vertical** de la ciudad de Quito, siguiendo la metodología determinística. (López, 2016). Las dos tesis fueron dirigidas por el Dr. Roberto Aguiar.

En el 2018, Risk & Safety realizó la microzonificación sísmica del **área urbana de la ciudad de Ambato**, como consultoría para el Municipio de la ciudad de Ambato. Por lo tanto, contaba con financiamiento lo que le permitió hacer estudios geofísicos y geotécnicos. Los estudios se justificaron plenamente ya que el área urbana de la ciudad de Ambato se halla muy cerca o sobre tres fallas ciegas activas que son: Totorá, Huachi y Ambato, de tal forma que existe una alta peligrosidad sísmica de la ciudad. (Aguiar & Rivas, 2018).

El crecimiento de la ciudad de Ambato ha llevado a que la zona urbana esté prácticamente conectada con la zona rural. Por lo tanto, es importante realizar un estudio de peligrosidad sísmica de la zona rural porque también se encuentra sobre fallas ciegas activas que no tienen nombre pero que se identifican como fallas F10, F11, F16 y F28.

Varios estudios de peligrosidad sísmica del Ecuador han sido realizados con las ecuaciones de movimientos fuertes de Zhao *et al.* (2006) pero actualmente hay una nueva publicación de este grupo de investigadores que trabajan con registros de sismos obtenidos

en cangahua y se va a emplear en el estudio. Zhao *et al.* (2015, 2016). Son trabajos muy buenos.

Los modelos de movimientos fuertes se complementa con los trabajos de Campbell y Bozorgnia que se abrevia (2014) C&B, Abrahamson, Silva y Kamai (2014) ASK; Chou y Youngs (2014) CY, modelos utilizados en el estudio de peligrosidad sísmica del área urbana de la ciudad de Ambato, complementando el estudio con los modelos de Boore y Atkinson (2008) B&A, y el modelo Idriss (2014), para la actualización del estudio realizado en el año 2018, y el desarrollo del estudio del área rural de la ciudad de Ambato. Para la obtención de los espectros de control para la componente vertical se utiliza los modelos de atenuación de Campbell y Bozorgnia (2016), que se abreviara C&B y Gülerce et al (2017).

Planteamiento del problema

El principal objetivo de la investigación de peligrosidad sísmica es caracterizar con la mayor precisión posible los niveles de movimiento del suelo que debe soportar un determinado edificio, con el fin de relacionar el nivel de demanda con el nivel de desempeño del edificio para que los daños causados por un evento sísmico . se puede comprobar Los países limítrofes con Ecuador han desarrollado y publicado sus mapas de amenaza sísmica en sus propios estándares, Colombia dispone de una Norma Sismorresistente y Perú se rige por la Norma Técnica de edificación contenida en el Reglamento Nacional de Edificaciones.

Ubicado en el noroeste de América del Sur en el Cinturón de Fuego del Pacífico, Ecuador es uno de los países más densamente poblados de la región y se ve afectado por una intensa actividad sísmica, principalmente debido a la subducción de la placa oceánica. de Nazca y la presencia de un sistema de fallas activas.

El resultado de uno de los más recientes estudios de amenaza sísmica publicados en Ecuador corresponde al Mapa de Zona Sísmica de la Norma Ecuatoriana de Construcción NEC, realizado con un enfoque probabilista y, reflejando el movimiento esperado con un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años o periodo de retorno de 475 años. Con respecto a la modelización de zonas sismogénicas, (Aguilar R. , 2010), propone una zonificación sísmica para los dos regímenes cortical y de subducción, (Alvarado, 2012) publica una propuesta de zonificación sísmica para dos regímenes y finalmente (Chunga y otros, 2010) plantea la zonificación del régimen cortical basada en la integración de datos geológicos, sismológicos y morfoestructurales. (Parra H. et al.)

No existen estudios de amenaza que hayan utilizado los modelos de zonas fuentes mencionados anteriormente, por lo que no se analizaron los parámetros de sismicidad que los caracteriza, ni de la estimación de la magnitud máxima en cada uno de ellos. (Parra H. et al.)

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el peligro sísmico a nivel local de manera determinística y probabilística para la determinación de la vulnerabilidad de las estructuras existentes en cualquier sector del Cantón Ambato, ya sea urbano o rural, previa selección de las fallas geológicas más cercanas al sitio de estudio, con la ayuda de ecuaciones de atenuación seleccionadas y un estudio estratigráfico del área.

Justificación de la importancia y alcance de la investigación

La mejor manera de mitigar los desastres naturales es brindar al ingeniero estructural información confiable sobre los espectros a considerar en el diseño sísmico de estructuras, la cual se obtiene de información: geológica y sísmica (2023) fecha. Un factor importante es que los modelos de amortiguamiento del movimiento del suelo, también conocidos como

ecuaciones fuertes de movimiento, se rigen al régimen tectónico en el cual se halla la ciudad de Ambato.

Al respecto, cabe señalar que Ambato se ubica cerca de los volcanes Tungurahua y Cotopaxi. Por lo tanto, se debe utilizar un modelo de amortiguamiento del movimiento del suelo que tenga en cuenta esta variable. La mayoría de los modelos existentes no tienen en cuenta la presencia de volcanes al calcular la ley de atenuación o los espectros de respuesta.

Los estudios de peligrosidad sísmica no sirven únicamente a las nuevas construcciones, sino también para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras existentes, lo que es fundamental. El estudio que se ejecutó en el área urbana de la ciudad de Ambato por (Aguiar & Rivas, 2018), se respaldan por una serie de estudios y cálculos, los cuales se pueden revisar en la referencia que se presenta como parte de esta investigación los cuales se utilizarán como base para el desarrollo del estudio de peligrosidad sísmica.

La microzonificación sísmica del área urbana de la ciudad de Ambato se realizó en 2018, de manera determinística y probabilística. Esta última forma de cálculo es la que se presenta en la primera parte de esta investigación; para el efecto se consideran tres fallas geológicas y tres ecuaciones de movimientos fuertes. Se determinaron periodos de recurrencia para cada falla geológica, se utilizan dos métodos, siendo el primero el modelo del Terremoto Característico y el modelo de Gutenberg y Richter modificado.

En este estudio se consideran 7 fallas geológicas y seis modelos de movimientos fuertes del suelo, con los cuales se obtendrán espectros de aceleración horizontal del suelo en una malla de puntos separados cada 500 m, para cada perfil de suelo, y se encontrarán

espectros promedios para perfiles de suelo C, D, E, los mismos que se comparan con los espectros del estudio de 2018.

En base a los resultados del presente estudio y en los datos que se presentan en 2018, se proponen nuevas formas espectrales para el área urbana y rural de la ciudad de Ambato, mismas que se denominan: “Espectro Envolvente”, las mismas que se comparan con los espectros que reporta la normativa sísmica vigente en Ecuador, NEC-15. En la segunda etapa se realiza el estudio de manera probabilista se trabaja con zonas fuentes, se realiza una actualización de la zona urbana y desarrollo de la zona rural y finalmente se obtiene las curvas y la desagregación de la Peligrosidad sísmica.

Objetivos

Objetivo general

Determinar los espectros de control, con el fin de cuantificar la peligrosidad sísmica de la ciudad de Ambato – Ecuador, mediante un estudio Determinístico y Probabilístico.

Objetivos específicos

- Seleccionar las fallas geológicas activas que engloban el Régimen Tectónico con relación al área de influencia
- Seleccionar las ecuaciones de atenuación que mejor se ajusten en la determinación del peligro sísmico
- Comparar los espectros que se obtengan en el estudio con los de NEC 2015
- Desarrollar un programa en Matlab para la determinación de espectros de aceleración para la componente horizontal.
- Determinar las curvas y desagregación de la Peligrosidad sísmica

Hipótesis de la investigación

- La ciudad de Ambato está construida sobre un sistema de fallas activas, un estudio de peligrosidad sísmica proporciona los espectros adecuados para su diseño
- Mediante el desarrollo de la metodología probabilística y determinística, se obtienen los espectros de control, curvas de peligrosidad sísmica para la ciudad de Ambato

Capítulo 2

Marco Teórico

Marco Legal

- NEHRP. (2015). Recommended seismic provisions for new buildings and other structures, Volume I. FEMA P-1050-1.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC – SE – DS 2015. Peligro Sísmico, diseño sismo resistente. Quito
- ASCE/SEI. (2016), ASCE 41-17 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. American Society of Civil Engineers
- ACI-318 (2019), “Building Code Requirements for Structural Concrete” (Comité 318). Instituto Americano del Hormigon
- AISC/ANSI. (2016). ANSI/AISC 341-16 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction.

Marco referencial

La amenaza o peligro sísmico se define como el movimiento esperado en un lugar debido a sismos en su entorno. Los factores que intervienen en el movimiento sísmico se pueden definir de la siguiente manera: (Parra H. y otros)

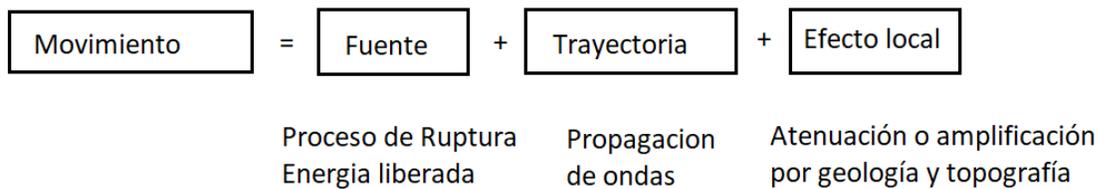
- Factor temporal, indica la periodicidad con la que se presenta los terremotos de acuerdo con la fuente sísmica.
- Factor de tamaño, corresponde con la energía que se puede liberar en cada fuente
- Factor de distancia fuente-emplazamiento, corresponde a la probabilidad de que se produzca un terremoto en un rango de distancia.
- Factor de trayectoria fuente-emplazamiento, representa la atenuación del movimiento sísmico
- Factor de sitio, depende de las características del sitio en estudio como; topográficas, litológicas y estructurales

El factor temporal y tamaño corresponden al modelo de recurrencia de la sismicidad de cada fuente, en función de su magnitud y se incluye en el cálculo de la peligrosidad mediante una función de densidad de probabilidad en magnitudes. El modelo más empleado es de la Ley de Gutenberg-Richter. Los factores de distancia y magnitud intervienen en el modelo de predicción de movimientos fuertes. (Parra et al.)

Por lo tanto, la evaluación del peligro sísmico se puede evaluar como la suma de tres factores: la fuente del sísmica, el debilitamiento de la onda sísmica o la propagación del movimiento fuerte y el efecto de sitio.

Figura 1

Factores que intervienen en la evaluación de la Peligrosidad sísmica



Nota: El gráfico representa los factores que intervienen en la evaluación de la Peligrosidad sísmica, Tomado de (Parra H. y otros)

El software utilizado en la evaluación del riesgo sísmico se calcula sin tener en cuenta los factores del sitio, es decir en suelo tipo roca, posteriormente se los lleva a sitio mediante el uso de coeficientes de amplificación. En los estudios de Peligrosidad sísmica no tienen en cuenta el efecto local del suelo, si no que sumen que el movimiento se caracteriza en suelo o roca, sin embargo, para estudios específicos es necesario estimar la amplificación local. (Parra et al.)

Los métodos para el cálculo de la peligrosidad sísmica se pueden clasificar en determinística y probabilista.

Los métodos deterministas tienen en cuenta valores específicos de los factores de origen, ruta y efecto local, en el que se considera. Es decir, se estima que un terremoto específico es el causante de mayor movimiento posible en el sitio de estudio, para lo cual es necesario introducir parámetros tanto físicos y morfológicos, los cuales permiten

describir la falla que genera el terremoto, al igual que la magnitud máxima que podría generar.

La ventaja de este método es el estimar el movimiento de un escenario conocido, es decir la intensidad, distancia de un terremoto de cierta magnitud. (Parra et al.)

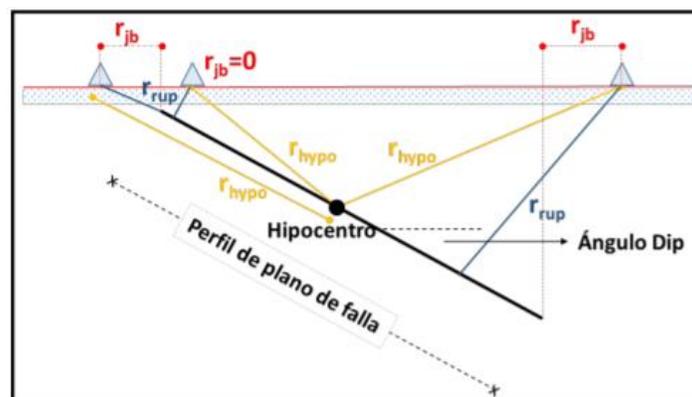
Atenuación de las ondas sísmicas

Al calcular el riesgo sísmico, se debe considerar el efecto de la propagación de ondas sísmicas a través del medio, y esto se hace con modelos de movimiento del suelo, también llamados ecuaciones de predicción del movimiento del suelo.

Este efecto se aborda utilizando modelos empíricos que incluyen un parámetro que representa el movimiento en un punto dado, generalmente la aceleración pico o espectral con los parámetros que establecen el tamaño del sismo en la fuente como es la magnitud, la distancia fuente-emplazamiento y la desviación típica de los datos respecto al modelo, entre otros. (Parra H. et al.)

Figura 2

Distancia Fuente-Emplazamiento



Donde:

r_{hypo} : Distancia desde el sitio al hipocentro del terremoto

r_{jb} : Distancia desde el sitio a la proyección vertical en superficie del plano de ruptura.

r_{rup} : Distancia mínima desde el sitio al plano de ruptura.

Nota: La grafica representa los diferentes tipos de distancia que se manejan en las ecuaciones de atenuación. Tomado de (Parra H. y otros)

Fuentes sísmicas

Se definen las siguientes fuentes generadores de sismos.

Fuente sísmica de Interfase

Se encuentra al inicio de la subducción, difiere de la subducción más profunda en los siguientes aspectos:

- En esta zona se bloquea parte del movimiento de Nazca, lo que ocasiona la deformación de la placa más densa que subduce, se eleve el margen continental y acumule tensión (Parra H. y otros)
- El Ángulo de inmersión del techo de la placa oceánica es menor al de la subducción más profunda, lo que indica el origen de la fuente sísmica in-slab. (Parra H. y otros)

La profundidad de esta fuente sísmica alcanza de 40-70 kilómetros

Fuente sísmica de In-slab

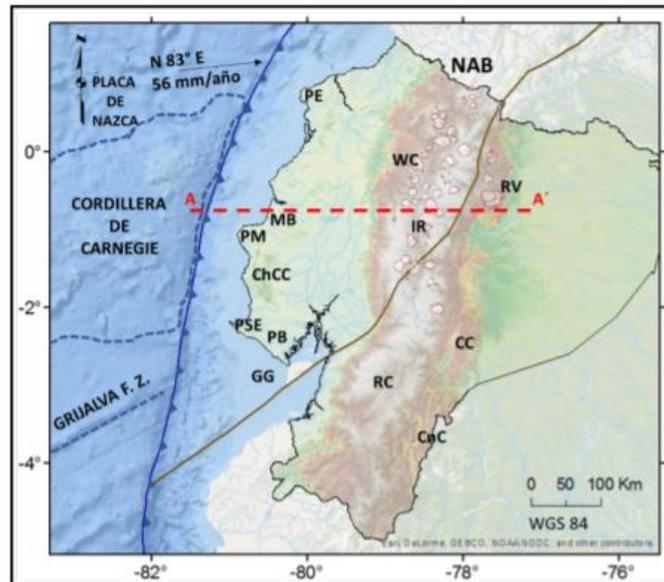
Se extiende desde el límite de la fuente sísmica de interfase hasta 400-500 km al este de la trinchera y a una profundidad de 200 km. La pendiente del slab presenta una mayor inclinación que la subducción interfase.

Corteza Continental

Su origen está en el margen continental y está formado por la placa continental y el NAB, que tendría una dirección de movimiento NE, posiblemente a través de un sistema de fallas activas. (Parra H. y otros)

Figura 3

Fuente de actividad sísmica



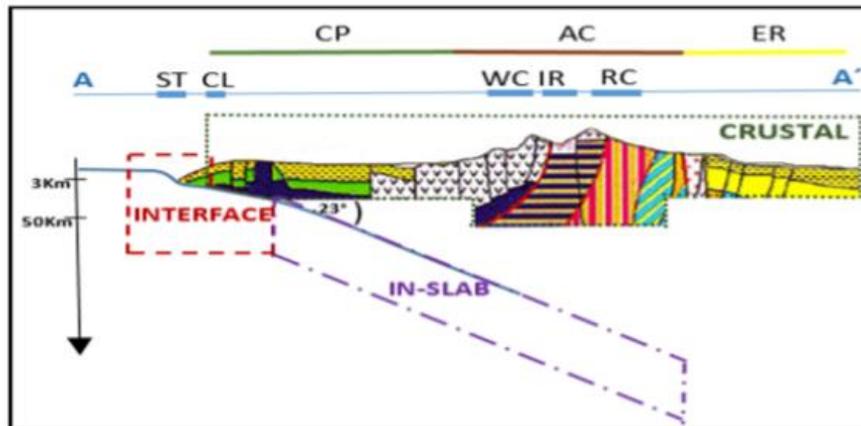
A continuación, se presenta la notación que se ha utilizado

NAB: Bloque Norandino; **NABL:** Limite del bloque Norandino; **PE:** península de Esmeraldas; **PM:** península de Manabí; **PSE:** península de Santa Elena; **GG:** golfo de Guayaquil; **BB:** cuenca de Borbón; **MB:** cuenca de Manabí; **PB:** cuenca de Progreso; **ChCC:** cordillera Chongón Colonche; **WC:** cordillera Occidental; **IR:** región Interandina; **RC:** cordillera Real; **RV:** volcán Reventador; **CC:** cordillera de Cutucú; **CnC:** cordillera del Cóndor.

La figura representa las fuentes generadoras de sismos, zonas interfase, in-slab y continental. Tomado de (Beauval et al., 2018)

Figura 4

Zonas generadoras de sismos



A continuación, se presenta la notación que se ha utilizado

CP: plano Costero; **AC:** cordillera de los Andes; **ER:** región Oriental; **ST:** trinchera de subducción; **CL:** línea de costa; **WC:** cordillera Occidental; **IR:** región Interandina; **RC:** cordillera Real.

La figura representa el esquema de las zonas generadoras de sismos Interface, In-slab y corteza continental.

Descripción de las fallas Geológicas

Una falla es una estructura tectónica, en donde se ha producido un deslizamiento diferencial de los materiales adyacentes y por ende una fractura (Chicaiza, 2016)

En Sismología se centra en el estudio de fallas activas y en fallas capaces (Chicaiza, 2016). Se puede definir como una falla activa si al menos se ha producido un evento sísmico en determinado tiempo, según (Chunga et al., 2010) una falla Capaz es aquella que deforma la superficie del terreno, como consecuencia de altas tasas de movimientos cristales y la generación de fuertes terremotos con magnitud mayor o igual a seis.

Para tratar las fallas como fuentes sísmicas independientes, es necesario considerar dos aspectos, primero, el conocimiento de la ocurrencia de sismos relacionados con las

fallas del sitio y la localización de estructuras sísmicas activas, es decir, la determinación de terremotos a través de estudios de Paleosismicidad determinar la deformación acumulada en estas, a través de medidas GPS.

Al considerar la falla como fuente sísmica independiente, permite incorporar en su estudio parámetros de cálculo probabilista como son mecanismos focales, tasas de deslizamiento, geometría del plano de ruptura, periodo de recurrencia, etc.

Uno de los planteamientos a seguir para considerar una falla como fuente sísmica independiente, índice en: (Rivas, 2014)

- Cambio de la Geometría de la fuente sísmica

La geometría de las zonas es definida por áreas en las que se integra las fallas según las características y potencial sísmico con tipologías similares, sin embargo, con este nuevo planteamiento, el cálculo de las fallas será como elementos independientes, ya sea como áreas que definen el plano de la falla o líneas que definen la traza de la falla proyectada en la superficie

- Cambio de la fuente de información para caracterizar el potencial sísmico

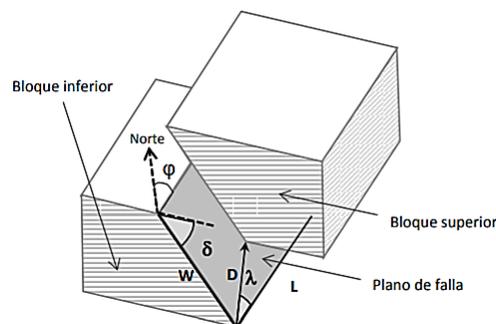
El potencial sísmico de la zona sismogénica se caracteriza por la frecuencia de los sismos \dot{N}_m y su proporción de estos en función de su tamaño β ; estos parámetros se ajustan a través de modelos de recurrencia, en el caso de las fallas los parámetros que caracterizan el potencial sísmico (\dot{N}_m y β), con dificultad se hallan en un catálogo sísmico las estas características, por lo que se derivan de las características geométricas y cinemáticas de las mismas, como es el área del plano de falla y la tasa de deslizamiento. (Rivas, 2014)

Características y elementos de una Falla *Geológica*

Considerando una falla como fuente sísmica activa e independiente, se modeliza el plano de falla, en la cual se asume que se produce la ruptura, sabiendo que se generaran superficies irregulares de ruptura, al no poseer de forma precisa los datos geométricos de la falla, de manera general se utiliza un plano rectangular. Los parámetros geométricos que se utilizan para tal modelización se muestran en la figura 5

Figura 5

Geometría y parámetros de la Falla



Nota: El grafico presenta los parámetros geométricos de la falla, como el buzamiento, la traza de la falla y la profundidad. Tomado de (Rivas, 2014)

Donde: L es el largo de la falla; W es el ancho; D es el desplazamiento co-sísmico; θ el azimut que varía entre 0 y 360° ; δ el ángulo de buzamiento, es el ángulo que forma el plano de falla con la horizontal y varía entre 0 y 90° , también conocido como dip; λ es el vector de deslizamiento que se encuentra entre 0 y 360°

Para la modelización de la falla, es necesario considerar las coordenadas del punto inicial (X_i, Y_i) y final (X_f, Y_f) de la traza de la falla, la profundidad mínima y máxima (Z_{min}, Z_{max}) , y el ángulo de buzamiento δ .

A continuación, se expone se el proceso de modelización de la falla: (Rivas, Contribución metodológica para incorporar fallas activas en la modelización de la fuente dirigida a estimaciones de Peligrosidad sísmica, Aplicación al Sur de España, 2014)

Por medio de la diferencia de profundidades y el ángulo de buzamiento, se obtendrá el ancho de la falla W

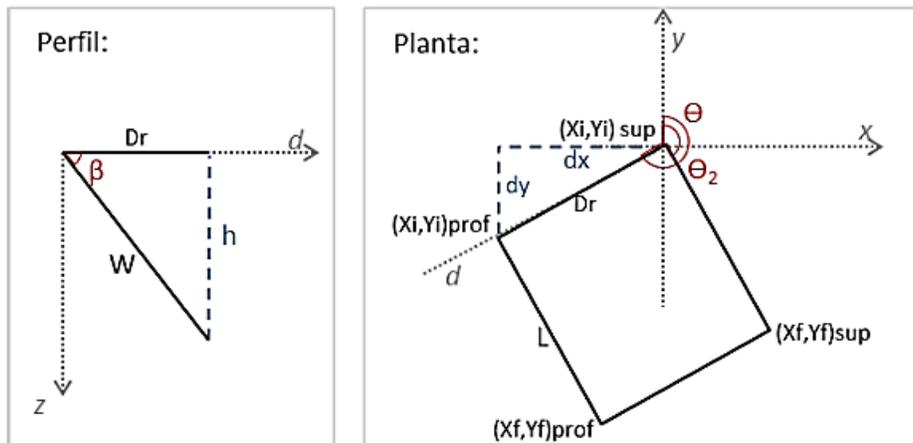
$$W = \frac{Z_{max} - Z_{min}}{\text{sen } \delta} \quad (1)$$

Con las coordenadas de la traza de la falla, se obtiene el acimut u orientación de la falla θ

$$\theta = \text{arctag}\left(\frac{X_f - X_i}{Y_f - Y_i}\right) \quad (2)$$

Figura 6

Geometría de la falla



Nota: El gráfico presenta un esquema de la geometría de la falla y los parámetros necesarios para obtener el plano de ruptura. Tomado de (Rivas, 2014)

En la figura 6 muestra esquema de cálculo para obtener, la orientación y el ancho de la falla, el ancho D_r y la dirección θ_2 .

$$D_r = W * \cos(\beta) \quad (3)$$

$$\theta_2 = \theta + 90^\circ \quad (4)$$

El siguiente paso es calcular la diferencia de coordenadas entre los puntos superficiales y profundos.

$$dx = D_r * \text{sen}(\theta_2) \quad (5)$$

$$dy = D_r * \cos(\theta_2) \quad (6)$$

Una vez obtenida la diferencia de coordenadas, se procede a calcular las coordenadas de los puntos profundos.

$$X_{i(\text{prof})} = X_{i(\text{sup})} + dx \quad ; \quad Y_{i(\text{prof})} = Y_{i(\text{sup})} + dy \quad (7)$$

$$X_{f(\text{prof})} = X_{f(\text{sup})} + dx \quad ; \quad Y_{f(\text{prof})} = Y_{f(\text{sup})} + dy \quad (8)$$

Clasificación geométrica de las fallas

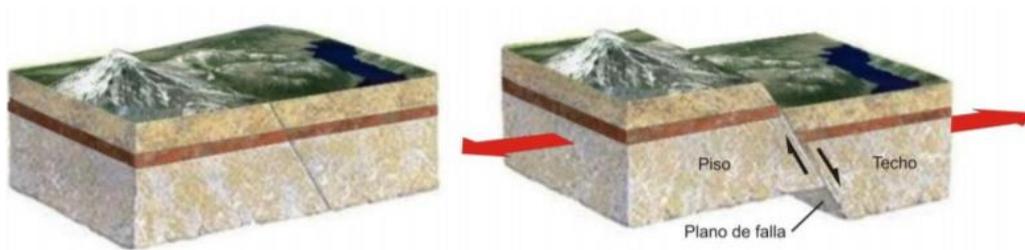
as fallas geológicas se pueden clasificar de la siguiente manera:

Falla Normal o falla con movimiento normal

Cuando uno de los bloques se mueve hacia abajo en relación con el otro bloque, esto ocurre en respuesta a los esfuerzos de tracción. El bloque sobre el plano de falla se llama superior y se desliza hacia abajo; mientras que el bloque que se eleva se llama piso y está por debajo del plano de falla. (Chicaiza, 2016)

Figura 7

Falla Normal



Nota: La grafica representa un esquema general del deslizamiento que se produce con una falla Norma. Tomado de (Sísmica-INPRES, 2018)

Figura 8

Fallas Normales



Nota: La gráfica representa un esquema general del deslizamiento que se produce con una falla Norma. Tomado de (Sísmica-INPRES, 2018)

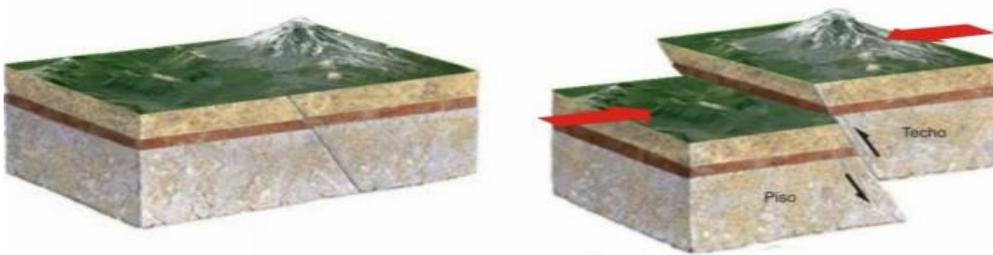
Falla Inversa o falla con movimiento inverso

A diferencia de la falla normal, en este tipo de fallas en respuesta al desplazamiento se genera esfuerzos de compresión. Uno de los bloques se mueve hacia arriba en relación

con el otro bloque. El ángulo entre la horizontal y el plano de falla por lo general es de 30° , cuando presenta un buzamiento o inclinación inferior a 45° se denominan cabalgamiento.

Figura 9

Falla Inversa



Nota: La gráfica representa un esquema general del deslizamiento que se produce con una falla Inversa. Tomado de (Sísmica-INPRES, 2018)

Figura 10

Falla Inversa



Nota: Tomado de (Sísmica-INPRES, 2018)

Falla Transcurrente

Este tipo de falla se desarrolla a lo largo del plano vertical, mientras que el desplazamiento del bloque es horizontal es decir el desplazamiento es paralelo al rumbo de la falla. Se distinguen dos tipos de fallas: laterales derechas o dextrales, son aquellas

donde el movimiento de los bloques es hacia la derecha, y las fallas laterales izquierdas o siniestrales, el movimiento es opuesto a las dextrales.

Figura 11

Falla Transcurrente



Nota: La gráfica representa un esquema general del deslizamiento que se produce con una falla Transcurrente. Tomado de (Sísmica-INPRES, 2018)

Figura 12

Falla Transcurrente



Nota: Tomado de (Sísmica-INPRES, 2018)

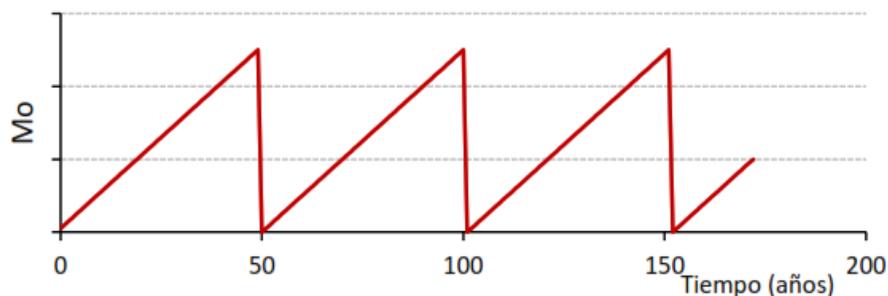
Parámetros de cálculo

Se presentan dos métodos para obtener los parámetros del modelo de recurrencia, para una falla geológica a partir de sus parámetros físicos y son el modelo del Terremoto Característico y el de Gutenberg y Richter modificado.

Un modelo de terremoto llamado TC asume que ocurren rupturas completas de todo el plano o segmento de falla, de modo que la falla se rompe con la mayor intensidad, es decir, para terremotos de la misma magnitud y periodicidad. (Rivas, 2014)

Figura 13

Modelo del terremoto característico



Nota: El gráfico ilustra la teoría del terremoto característico mediante el momento sísmico acumulado y liberado de una falla en un periodo de tiempo. Tomado de (Rivas, 2014)

Este es un modelo simple que iguala el momento sísmico acumulado en la falla con el momento sísmico liberado en el máximo terremoto de la falla M_0 (Rivas, 2014). Por medio de las ecuaciones empíricas de Wells y Coppersmith 1994 se puede establecer parámetros de sismicidad como es la magnitud máxima que se esperaría, impidiendo que se produzcan sismos inferiores al máximo determinado

Por medio de la expresión de Hanks y Kanamori (1979), se establece una relación entre el momento sísmico y la magnitud máxima de dicho terremoto expresada en magnitud

momento M_W (dato), la cual permite conocer la magnitud máxima que se espera en la fuente y la energía que se libera en el terremoto.

$$M_W = \frac{2}{3} \log(M_0) - 10.7 \quad \rightarrow M_0 = 10^{\frac{(M_W + 10.7)3}{2}} \quad (9)$$

Mediante el modelo de Brune (1968), se puede establecer el momento total acumulado, de acuerdo con la hipótesis de toda la energía en el plano de falla se está acumulado de manera uniforme

$$\dot{M}_0 = \mu \dot{u} A \quad (10)$$

Donde μ es el módulo de rigidez o de cizalla ($\mu \approx 3 * 10^9 \frac{kgf}{m^2}$), \dot{u} es la tasa de deslizamiento y A es el área del plano de falla.

El modelo TC es un modelo totalmente periódico, en el que la energía acumulada es igual a la energía liberada en el TC. Por lo tanto, conociendo el M_0 que se liberaría en el terremoto y la tasa de acumulación anual de momento sísmico de la falla \dot{M}_0 , se obtiene el período de recurrencia Tr , es decir el tiempo que transcurre entre dos eventos característicos con la siguiente ecuación. (Rivas, 2014)

$$Tr = \frac{M_0}{\dot{M}_0} \quad (11)$$

Por otro lado, para determinar el periodo de recurrencia para una falla geológica, se puede contemplar la utilización de otros modelos como es el de **Gutenberg y Richter modificado**. El cual establece una proporción constante entre el número de sismos grandes y pequeños para una zona y en un periodo, con la posibilidad de que la falla produzca terremotos de diferente magnitud con periodos de ocurrencia diferentes. (Aguar y Serrano, Metodología para evaluar la peligrosidad Sísmica del área urbana y rural de la ciudad de Ambato en forma determinística, 2020) Es decir, la tasa de momento sísmico

acumulado será liberada por medio de sismos de diferente magnitud, por lo que varía desde una magnitud mínima próxima a cero y un magnitud máxima, la cual es definida de acuerdo al tamaño del plano de falla.

Mediante la expresión propuesta por Anderson (1979), se establece las relaciones entre las dos variables. la tasa de momento sísmica y los modelos de recurrencia:

$$M_o = \int_{M_{min}}^{M_{max}} \dot{n}(m) * M_o(m) dm \quad (12)$$

Donde la tasa de momento sísmico que se está acumulando e la falla, será igual a la tasa simple de sismos que se producen al año de magnitudes entre M_{min} , M_{msx} , $\dot{n}(m)$ por el momento sísmico que se libera en cada uno de los sismos.

$$\dot{n}(m) = \dot{N}_{M_{min}} * \beta * \left[\frac{e^{-\beta(m)}}{e^{-\beta(M_{min})} - e^{-\beta(M_{max})}} \right] \quad (13)$$

Remplazando, se tiene:

$$\dot{M}_o = \int_{M_{min}}^{M_{max}} \dot{N}_{M_{min}} * \beta * \left[\frac{e^{-\beta(m)}}{e^{-\beta(M_{min})} - e^{-\beta(M_{max})}} \right] * M_o(m) dm \quad (14)$$

Por medio de la expresión propuesta por Hanks y Kanamori (1979), se puede Obtener el momento sísmico liberado en sismos de diferente magnitud.

$$M_o(m) = e^{(\bar{c} + dm)} \quad (15)$$

Desarrollando la expresión se tiene:

$$\dot{N}(m) = \dot{N}_{M_{min}} * \left[\frac{e^{-\beta(m)} - e^{-\beta(M_{max})}}{e^{-\beta(M_{min})} - e^{-\beta(M_{max})}} \right] \quad (16)$$

$$\dot{N}_{M_{min}} = \frac{\dot{M}_o (\bar{d} - \beta) (e^{-\beta M_{min}} - e^{-\beta M_{max}})}{\beta [e^{-\beta M_{max}} M_o(M_{max}) - e^{-\beta M_{min}} M_o(M_{min})]} \quad (17)$$

$$M_0(M_{min}) = e^{(\bar{c} + \bar{d} M_{min})} \quad M_0(M_{max}) = e^{(\bar{c} + \bar{d} M_{max})} \quad (18)$$

$$\bar{c} = 16.05 * \ln(10) \quad \bar{d} = 1.5 * \ln(10) \quad (19)$$

Ecuaciones de Atenuación

En el caso de un sismo, la intensidad del movimiento disminuye cuanto más se aleja del epicentro, a este efecto se le llama atenuación sísmica, a mayor distancia, la magnitud del movimiento sísmico disminuye en relación con la distancia hipocentral (terremotos profundos). Por lo que se puede definir a las ecuaciones de atenuación (GMPE'S) como la capacidad del suelo para atenuar el movimiento generado por las ondas sísmicas conforme estas se alejan del foco sísmico. Una ecuación de atenuación es empírica por lo que se obtienen realizando estudios de regresión sobre muestras de aceleración pico, en la cual se relaciona parámetros como la distancia al hipocentro o al epicentro del sismo, la magnitud del evento, medio que se propaga, Velocidades y Desplazamientos del sismo que lo origina. (Diaz, 2013)

Se han realizado una gran cantidad de estudios, por lo que el tener una recopilación de toda esta información ayudara a tener un mejor planteamiento de las ecuaciones de movimientos fuertes desarrolladas a nivel mundial. Douglas (2008) hizo una recopilación de todas las ecuaciones de atenuación las cuales tienen una gran base de datos y un fundamento teórico bastante sólido, en la cual se describe 165 modelos para PGA como variable dependiente y 100 ecuaciones obtenidas a partir de ordenadas espectrales.

La predicción empírica del movimiento del suelo parte de la relación existente entre una variable dependiente y de variables independientes que representan las tres

contribuciones principales al movimiento sísmico del suelo, que son: la fuente, la propagación y los efectos de sitio (Schmidt, 2014)

Todos los modelos de ecuaciones de movimientos fuertes utilizados para definir la aceleración horizontal y vertical del movimiento del suelo son modelos bastante desarrollados, debido a la gran cantidad de datos y teoría que los respaldan. Por lo que los modelos forman parte del programa actualizado Next Generations Attenuation, NGA WEST2, el cual tiene los siguientes objetivos:

- Actualización de los modelos NGA-WEST 1
- Desarrollo de ecuaciones para la componente vertical
- Estudio de los efectos de directividad sísmica de la fuente
- Incorporación de la incertidumbre epistémica a los modelos
- Actualizar los efectos de respuesta lineal y no lineal del sitio
- Definir los efectos ocasionados por el bloque Hanging-Wall (bloque levantado)

Existe una gran cantidad de modelos utilizados para definir la aceleración horizontal del movimiento del suelo, sin embargo, para la aceleración vertical y desplazamiento horizontal del suelo se reducen de manera considerable.

Al elegir las ecuaciones de movimientos fuertes es necesario considerar las recomendaciones propuestas por Cotton *et al.* (2006) y Bommer *et al.* (2010), ya que no todas las ecuaciones son aplicables de acuerdo con el sitio en estudio, es necesario considerar: (Aguiar y Rivas, 2018)

- Los datos utilizados para el desarrollo del modelo de atenuación sean accesibles para su uso
- El modelo cuente con el respaldo suficiente para hallar espectros de respuesta elástica.

- El modelo se derive de un ambiente tectónico similar al de la zona de interés.
- La forma funcional sea completa en cuanto a variables o dependencias no lineales de magnitud
- Su rango de aplicabilidad sea bastante amplio como para no realizar extrapolaciones.

Parámetros utilizados en las ecuaciones de atenuación

Parámetros de fuente

M_W : magnitud de momento

W : ancho del plano de ruptura (km)

Dip (δ): Angulo de buzamiento promedio del plano de ruptura ($^\circ$)

$Rake$ (λ): Angulo entre la dirección de deslizamiento entre el plano de falla y la orientación de la falla en la superficie de la tierra ($^\circ$).

Z_{TOR} : Profundidad hasta el borde superior del plano de ruptura

Z_{hyp} : Profundidad hipocentral (focal) del sismo

F_{RV} : Variable que representa fallas inversas e inversas oblicuas.

F_{NM} : Variable que representa fallas normales y normales oblicuas

Parámetros de sitio

V_{s30} : Velocidad de onda de corte a los 30 metro del suelo (m/s)

A_{1100} (g): Valor previsto de PGA sobre roca a una velocidad media de onda de corte.

$Z_{2.5}$: Profundidad debajo del sitio de interés a la cual se halla una velocidad de onda de corte $V_s = 2.5 \text{ km/s}$

$Z_{1.0}$: Profundidad a la que la velocidad de onda de cortes $V_s = 1.0 \text{ km/s}$

Parámetros de trayectoria

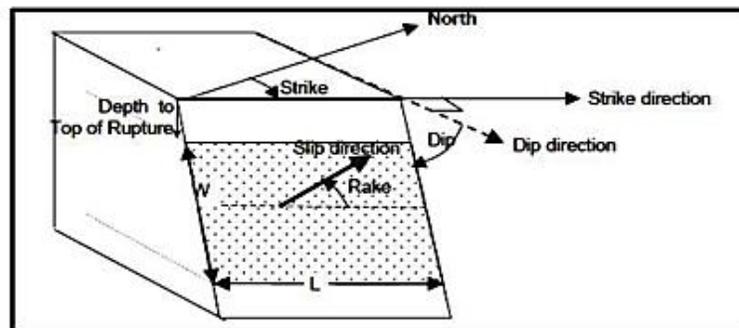
R_{rup} : Distancia mas cercana del sitio al plano de ruptura

R_{jb} : Distancia horizontal más cercana a la proyección del plano de ruptura en la superficie.

R_x : Distancia horizontal más cercana al borde superior del plano de ruptura medio perpendicularmente desde la dirección del rumbo promedio.

Figura 14

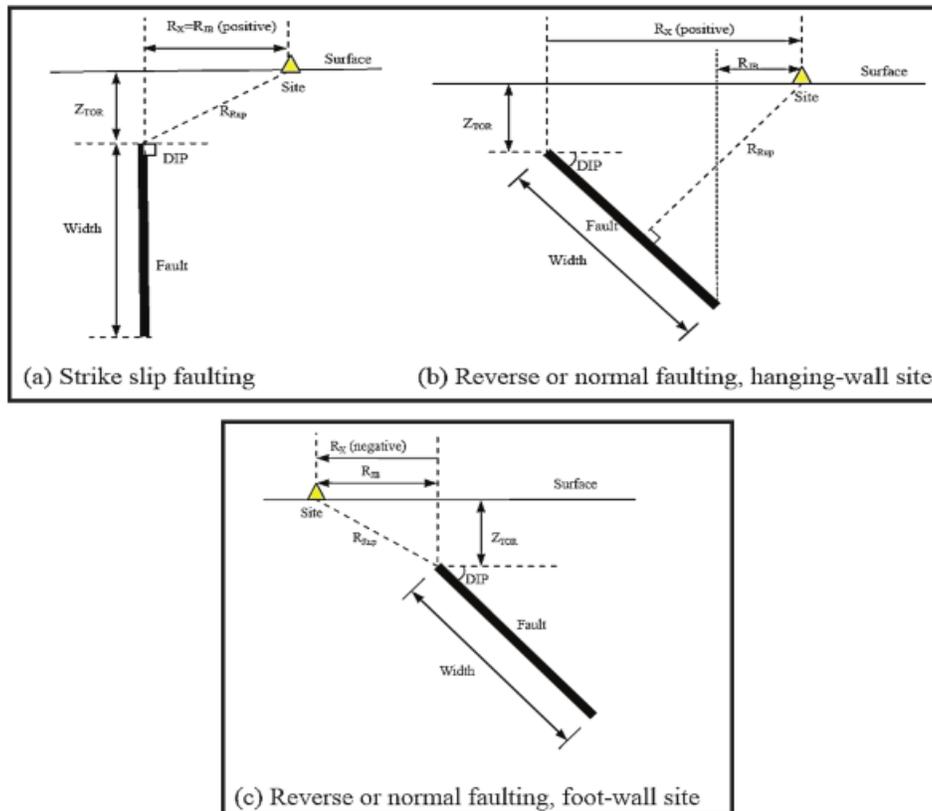
Parámetros de fuente



Nota: El gráfico presenta una representación esquemática de los ángulos que definen el tipo de, ancho y longitud de falla y Z_{tor} . Tomado de (Chicaiza, 2016)

Figura 15

Parámetros de trayectoria



Nota: El gráfico presenta una representación esquemática de los parámetros de trayectoria para fallas normales, inversas y transcurrente. Tomado de (Chicaiza, 2016)

Descripción de los modelos

Para la selección de las ecuaciones de atenuación se ha tomado como referencia los criterios mencionados en la tesis de Pregrado de Taípe (2013), Estudio de microzonificación sísmica de Ambato, Aguiar (2018), (Chicaiza, 2016), (Schmidt,2010)

Componente Vertical del movimiento del suelo

Los estudios relacionados al componente sísmico vertical se han enfocado en obtener las relaciones de intensidad sísmica: aceleración, desplazamientos, velocidad máxima del terreno y/o espectrales de la componente horizontal entre la vertical o viceversa. El objetivo es predecir el efecto de la componente vertical, a través de la componente horizontal, haciendo uso de las relaciones V/H, relacionando variables como la distancia epicentral, magnitud, frecuencia, o periodos, entre otros. (Vilera, 2008)

Newmark *et al.*(1973) fue uno de los pioneros en analizar la componente vertical entre la horizontal, en la cual se establece la relación entre la aceleración, velocidad y desplazamientos máximos del terreno, su estudio se basa en 33 registros obtenidos de Estados Unidos, Finalmente, se encontró que la aceleración vertical era aproximadamente $2/3$ de la horizontal.

Kawashima *et al.*(1985), estudio la relación máxima del terreno de la componente vertical entre la horizontal, en su estudio se concluyó que la aceleración vertical es del orden de $1/5$ de la horizontal. (Tiziano Perea, 2002)

Ambrasays Simpson (1995), su estudio se basa en 104 registros de temblores obtenidos a nivel mundial, los parámetros utilizados para la obtención de datos fueron que la magnitud deberá ser mayor a 6 grados, la aceleración máxima de terreno mínima de 0.1g y los datos fueron generados a una distancia epicentral máxima de 15 km de la fuente, finalmente se concluyó que el cociente de la aceleración máxima del terreno de la componente vertical entre la horizontal puede tomar valores mayores a la unidad hasta 1.75 para magnitud de 7.5. (Tiziano Perea, 2002)

Boomer y Martínez, a través de 130 registros de temblores se analizó el cociente de entre la aceleración máxima del terreno de la componente vertical entre la horizontal, se concluyó en su estudio que el cociente es mayor a la unidad.

Mohammadioun (1996), los registros utilizados para analizar el comportamiento de la componente vertical entre la horizontal son en suelos no lineales y en sitios cercanos a la falla, como resultado de este estudio, se obtuvo que la relación de este comportamiento alcanza valores mayores a 0.75 en suelos no lineales, mientras que en suelos que presentan un comportamiento lineal su relación es menor a 0.75.

En la tabla 1 se presenta un resumen de los diversos valores para la relación H/T desarrollada por diversos autores utilizando dependencias sobre los tipos de suelo con datos de registros sísmicos diferentes.

Tabla 1.

Relaciones de aceleración vertical a horizontal propuestas

Referencia	Características de los registros	V/H
Newmark et al., 1973	33 registros EE. UU.	2/3
Kawashima et al 1985	Registros del Japón	1/5
Ambrasays y Simpson,1995	104 registros mundiales R<15Km, M>6, v>0.1g	1.75
Boomer y Martinez 1996	130 registros	1.00
Mohammadioun 1996	Suelos aluviales cercanos a la falla	0.75

Códigos Internacionales

El código sísmico de Edificios de Canadá, en los ccc cargas gravitacionales, se incrementa una reserva de resistencia para considerar los efectos de a componente vertical de movimientos sísmicos.

Por otra parte, el código (UBC,1997), se establece que en el diseño por resistencias ultimas se deberá considerar el efecto de la componente vertical del movimiento del suelo, este se lo hace a través de una proporción de la carga muerte, mientras que, en el diseño por esfuerzos permisibles, no se considerar dicho efecto.

Los elementos horizontales en voladizos ubicados en las zonas sísmicas 3 y 4, deberán diseñarse con una fuerza neta hacia arriba de $F_v = 0.7 * C_H * FI * CM$. Para un análisis dinámico, la componente vertical se obtiene mediante el escalamiento de la componente horizontal por un factor de 2/3, u otro factor justificado por los datos de sitio, mientras que, para un análisis espectral, se incluirá todos los modos con el fin de alcanzar un 90% de la masa modal efectiva en las direcciones horizontales, aunque no se presenta información para la componente vertical. (Tiziano Perea, 2002).

Para el diseño de edificaciones nuevas, la norma propuesta por NEHRP, establece que únicamente en voladizos horizontales y elementos presforzados horizontales se considerara el efecto de la componente vertical, diseñados para una fuerza mínima hacia arriba de 0.2 veces la carga muerta en adición a las demás combinaciones de carga aplicables, para el resto de elementos horizontales se considera una carga en ambos sentidos de 0.2 veces la carga muerta por un coeficiente definido como la aceleración espectral de diseño a periodo corto. Por otra parte, la norma NHERP (FEMA 368-2000) establece que la fuerza sísmica vertical puede ser calculada con base a la aceleración del movimiento vertical definido como el 67% de la aceleración horizontal de diseño (Tiziano Perea, 2002)

Sin embargo, la relación V/H depende de la distancia epicentral, ya que se observan valores altos para distancias cercanas y bajos para distancias lejanas a la fuente.

Mientras que otros resultados muestran que la relación V/H es fuertemente dependiente del periodo de oscilación, tipo de suelo y la distancia epicentral. A altas frecuencias la relación V/H excede significativamente el valor de relación V/H=2/3 para distancias epicentrales inferiores a 40Km, a distancias más cercanas a la fuente del origen del sismo, más alto es el valor de excedencia, para periodos grandes, la relación V/H demuestra ser más bajo. (Vilera, 2008)

Con esta introducción es necesario mencionar la necesidad de considerar en el diseño estructural la componente vertical del sismo, la regla de los 2/3, no funciona, se lo ha visto en el caso de espectros asociados a fallas de Quito (Aguiar & Rivas, 2018)

En el país la componente vertical del sismo está definido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 15) mediante el escalamiento de la componente horizontal del sismo por el factor de 2/3, exceptuando estructuras de uso especial o esencial que se encuentren en el campo cercano (0-10 km) de una falla superficial, para ese caso, se deberá evaluar la componente vertical del sismo mediante el estudio de respuesta del sitio. (NEC-15, 2015)

La norma ecuatoriana de la construcción en los referentes al sismo vertical especifica lo siguiente:

La componente vertical del sismo puede definirse mediante el escalamiento de la componente horizontal de la aceleración por un factor mínimo e 2/3

$$E_v \geq \frac{2}{3} E_h \quad (20)$$

Donde:

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. 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 diseñaran para una fuerza neta vertical reversible F_{rev} expresada por:

$$F_{rev} \geq \frac{2}{3} I(\eta Z F_a) W_p \quad (21)$$

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 $\eta Z F_a$

Si una ciudad está emplazada sobre una falla inversa, se puede pensar que la componente vertical del suelo va a ser muy grande y va a causar daño considerable en las estructuras que tienen grandes voladizos, sin embargo, en la ciudad de Ambato los volados de los edificios no son tan grandes como la mayor parte de edificios de la zona costera. (Aguiar y Rivas, 2018)

En el presente capítulo se presenta espectros de aceleración para la componente vertical del movimiento del suelo utilizando dos ecuaciones de movimientos fuertes, y son el modelo de Campbell Bozorgnia (2016) y el modelo de Gülerce et al. (2017) (Gülerce et al., 2016).

Metodología Probabilista

Uno de los criterios del diseño sismorresistente se basa en métodos probabilísticos que asumen la intensidad y frecuencia de ocurrencia de un evento sísmico, resulta difícil contar con una base de datos lo suficientemente amplio para estimar con exactitud la ocurrencia de eventos sísmicos, es necesario recurrir a la teoría de probabilidades para considerar las incertidumbres en la estimación de su ocurrencia (Quinde y Reinoso, 2016).

Uno de los pioneros del cálculo probabilístico del riesgo sísmico es Cornell (1968), cuya evaluación incluye la incertidumbre de parámetros, como las leyes de amortiguamiento del movimiento del suelo conocidas como ecuaciones de movimientos fuertes. En 1997 se presentó la metodología PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment), que consiste en identificar los factores que intervienen en el cálculo y su adecuada cuantificación. (Aguiar y Rivas, 2018)

Los resultados del análisis probabilista del riesgo sísmico se presentan mediante curvas de peligro (gráficas de los niveles esperados del movimiento del suelo en función de probabilidad), espectros de peligro uniforme o mapas de amenaza sísmica, en los que se analiza valores como las aceleraciones máximas probables para diferentes periodos de retorno. En la metodología probabilística las fallas geológicas se agrupan de acuerdo con las fuentes sísmicas al igual que los sismos de subducción

En la metodología PSHA se considera el concepto de árbol lógico, que permite considerar varias opciones de cálculo, y en segundo lugar, la distribución de la amenaza sísmica, que muestra las fuentes que más influyen en el cálculo a través de tres parámetros, esta es: la magnitud, la distancia y la incertidumbre. (Aguiar y Rivas, 2018)

En el margen probabilista, la peligrosidad sísmica (H , siglas en inglés), se define como la probabilidad (P) de que se iguale o supere un nivel de movimiento predeterminado (x_o) dentro de un periodo de tiempo dado o periodo de exposición (t), a consecuencia de los terremotos ocurridos en el entorno de emplazamiento de cálculo:

$$H = P[x(s) \geq x_o; t] \quad (22)$$

Siendo $x(s)$, el parámetro que representa el movimiento, que habitualmente se identifica como la aceleración pico de este (PGA) o con alguna aceleración espectral ($S_a(T)$).

Se ha indicado la ecuación de cálculo de la peligrosidad sísmica en la metodología probabilística en forma conceptual. Ahora la ecuación que se utiliza para evaluar la peligrosidad sísmica es: (Aguiar y Rivas, 2018)

$$\lambda(y > Y) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(y > Y) = \sum_{i=1}^N v_i \iiint P_i[y > Y|m, r, \varepsilon] f_{M_i}(m) f_{M_i}(r) f_{\varepsilon_i}(\varepsilon) dm dr d\varepsilon \quad (23)$$

Donde $\lambda(y > Y)$:es la tasa anual de excedencia del nivel del movimiento Y, debido a la ocurrencia del sismo en las N fuentes sísmicas que es igual a la suma de las tasas anuales de excedencia en cada zona fuente $\lambda_i(y > Y)$ las mismas que presentan una tasa anual de sismos v_i ; el termino $P_i[y > Y|m, r, \varepsilon]$ da la probabilidad de excedencia condicionada al trio de variables $|m, r, \varepsilon|$, que representan la magnitud, distancia y épsilon; $f_{M_i}(m) f_{M_i}(r) f_{\varepsilon_i}(\varepsilon)$ corresponden a las funciones de densidad de probabilidad de la magnitud, distancia y épsilon.

Al considerar que la sismicidad es distribuida de manera aleatoria en el tiempo y espacio para una zona determinada, se asume el modelo de Poisson para su representación, se identifica a la amenaza como la probabilidad de excedencia del movimiento en un periodo de exposición de t años a través de la siguiente expresión: (Parra et al., Estimación de la Peligrosidad Sísmica en Ecuador Continental)

$$P(x > x_0 \text{ en } t \text{ años}) = 1 - e^{-(x > x_0)t} = 1 - e^{-t/T} \quad (24)$$

Las normas sismorresistentes adoptan un tiempo de exposición (t) de 50 años, variando la probabilidad de excedencia (P) dependiendo de la importancia de la estructura, considerado una estructura típica con una probabilidad de excedencia del 10% en un periodo de 50 años equivale a considerar un periodo de retorno de 475 años, para una

estructura de importancia especial y estructuras más críticas se considera un periodo de retorno de 975, 2475 años respectivamente.

Dos tipos de incertidumbres se presentan en las diferentes fases de cálculo de la amenaza: la primera es la definición de zonas sismogénicas y las relaciones de recurrencia seguido de la influencia de las condiciones locales, como se mencionó en la sección anterior para cuantificarlas hacemos uso de la metodología de árbol lógico, el cual permite considerar diferentes nodos que corresponden a diferentes estados del proceso. Una investigación completa de la amenaza consta de varias tareas mencionadas a continuación. (Parra et al.)

- Análisis de sismicidad y tectónica del área de estudio
- Elaboración del catálogo sísmico
- Definición de fuentes sísmicas
- Elaboración del modelo de atenuación
- Cálculo de la peligrosidad
- Desagregación e identificación de los sismos de control

Fases de cálculo

Análisis de sismicidad

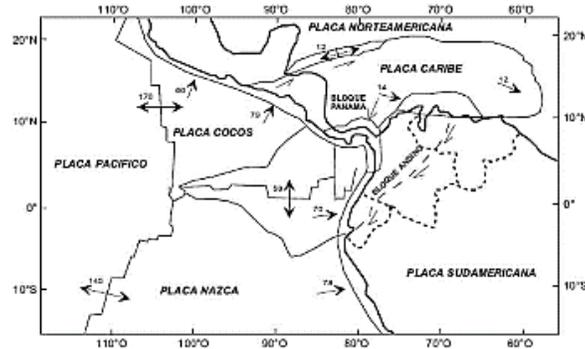
Ecuador es uno de los países más densamente poblados de la región, por lo que debido a que se encuentra en el cinturón de fuego del Pacífico se ve afectado por actividad sísmica. Parte del territorio forma parte del Bloque Andino, el cual pertenece a la placa sudamericana, el cual se encuentra en interacción con Placa de Nazca, Cocos y el Caribe, el movimiento en esta zona está en un rango aproximado de 50-60 mm/año, mientras que, para la placa continental, el movimiento se encuentra alrededor de 2-5 mm/año. (Parra H. y otros)

Por otra parte, el sur del Ecuador interactúa entre la placa Sudamericana y la Placa de Nazca, creando en el Ecuador tres inclinaciones de la subducción de la placa de Nazca en la Placa Continental. Este comportamiento Dinámico creó un sistema de fallas llamado Sistema mayor Dextral. (Alvarado, 2012)

Ese sistema de fallas, junto con la subducción a lo largo de la costa del país, son las principales fuentes de terremotos. (Quinde, 2014)

Figura 16

Representación de las placas tectónicas del Ecuador



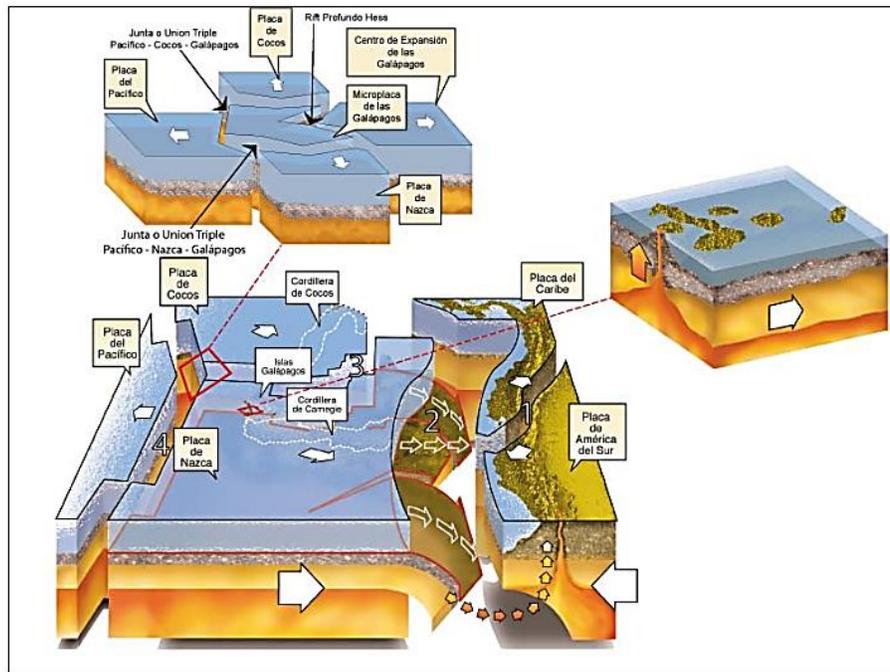
Nota: La figura representa la tectónica de placas del Ecuador. Tomado de: (Quinde, 2014)

La tectónica de placas cerca de la costa de Ecuador es una de las más complejas, lo que significa que la zona de subducción ecuatoriana no sea uniforme como se observa en la figura 2. El movimiento de la placa de Nazca contra las placas de América del Sur y la placa del Caribe ha generado el mega falla Guayaquil-Caracas denominada falla transcurrente Dextral. Toullkeridis (2009) lo identificó con el número 1, en la figura 2, se estima que el movimiento de esta falla es de 3 a 4.5 mm/año, sin embargo, existen otros estudios que indican un movimiento de 15 mm por año en el norte de Ecuador y 13 mm por año en el sur de Colombia. Con el número 2 se identifica la subducción de la placa oceánica de Nazca, con el número 3 hace referencia a la Creta de Carnegie, que es una cordillera submarina que se originó en el punto caliente de Galápagos y que se está expandiendo

hasta llegar a la fosa ecuatoriana, se cree que debido a este movimiento tectónico hay una reducción de la sismicidad en la región Interandina. (Aguiar R. , 2010)

Figura 17

Geodinámica de la peligrosidad sísmica del Ecuador.



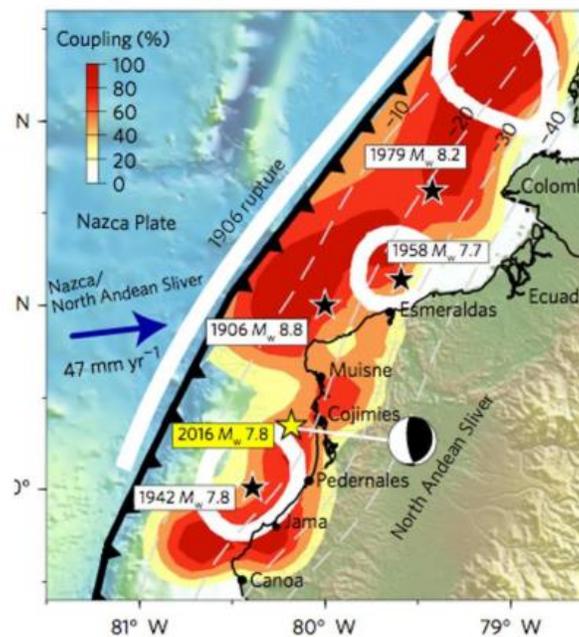
Nota: La figura representa la Geodinámica de la peligrosidad sísmica del Ecuador. Tomado de: **(Toulkeridis, 2009)**

Para evaluar la peligrosidad sísmica es necesario considerar que la sismicidad registrada en el pasado se va a dar en un futuro, En la figura 3 se puede apreciar que en la costa Norte del Ecuador en los últimos 120 años se han registrado 6 sismos de magnitud mayor o igual a 7 por lo que se puede llegar a la conclusión que aproximadamente cada 20 años se presenta un terremoto interplaca de bajo Angulo de buzamiento (Aguiar R. , Espectros de Peligro Sísmico Uniforme Metodología Probabilística, 2018). Por lo que se analizara lo sucedido en el Ecuador el último siglo, para empezar en la figura 4.5.3 se observa que el epicentro del terremoto de 1906 con una magnitud estimada de 8.6 y 8.8 es el de mayor magnitud registrado en el Ecuador, seguido del sismo con una magnitud de 7.8

presentada en el año 1942, de igual magnitud que el presentado en Bahía de Caráquez el 16 de abril de 2016, con el epicentro en la misma zona, se hablara del tema más adelante, Además se presenta los epicentros de los terremotos de 1958 con una magnitud de 7.7 y el del año 1979 con una magnitud de 7.1 los cuales no se presentan en la figura.

Figura 18

Sismos Interplaca tipo Thrust que están altamente acoplados en zona norte de Ecuador.



Nota: La grafica representa los diversos sismos presentes en las costas ecuatorianas.

Tomado de : (Aguiar R. , 2018)

Sismo de 1906

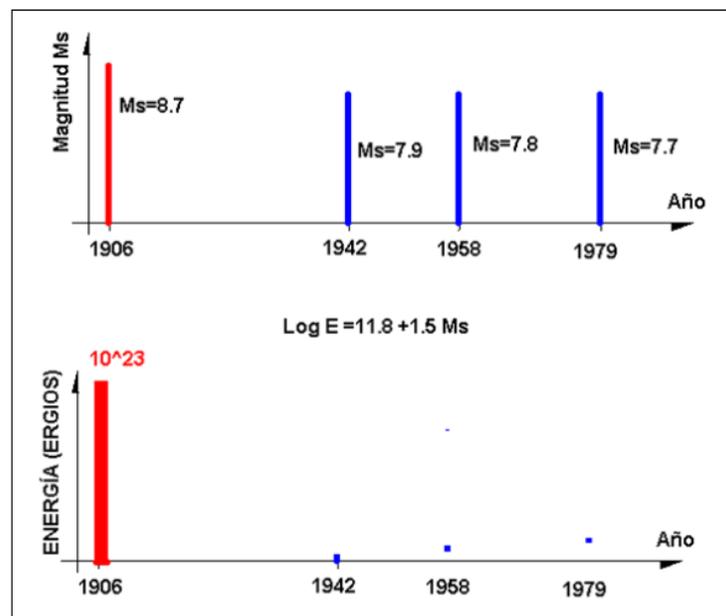
En 1906 se registraron tres sismos en el mundo, el primero ocurrió el 31 de enero, frente a la costa de Esmeraldas con una magnitud estimada de 8.8, luego el 18 de abril en San Francisco, Estados Unidos con una magnitud entre 7 y 8. Y finalmente el 16 de agosto en Chile con una magnitud entre 8.2 - 8.4.

Según Rudolph (1911) el terremoto de 1906 se produjo en las costas de Ecuador y Colombia extendiéndose desde Bahía de Caráquez al sur de Ecuador hasta Guapo y la desembocadura del río Timbique en el norte de Colombia, con una extensión de alrededor de 450 Km. En Quito este sismo fue sentido, pero solo horizontalmente, Además destaca el hecho de que en Tumbaco era imposible permanecer en pie durante el sismo, pero las edificaciones de manera tuvieron un buen comportamiento ya que por su flexibilidad resistieron bastante bien el sismo el cual tuvo lugar cerca de 5 minutos. (Aguiar R. , 2010)

La zona de ruptura del terremoto de 1906 está marcado en blanco, se indica en la figura, dentro de esta área de ruptura se encuentran las áreas de ruptura de los sismos de 1942, 1958 y 1979, por lo que se puede decir que se ha acumulado una gran cantidad de energía a lo largo de la costa ecuatoriana, provocando una alta peligrosidad sísmica..

Figura 19

Magnitudes y energía liberada de los sismos de 1906, 1958, y 1979.



Nota: En la figura representa el diagrama de la energía liberada por estos sismos. Tomado de (Aguiar R. , 2010)

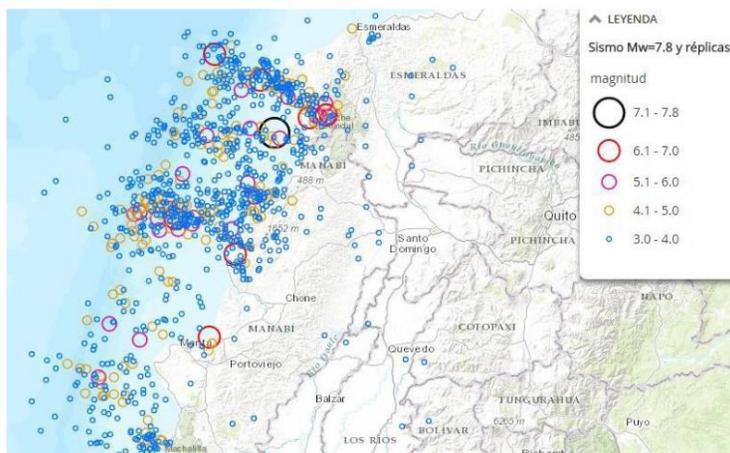
Sismicidad en la Costa Ecuatoriana

El 16 de abril de 2016, un terremoto de magnitud 7.8 con Epicentro en Pedernales sacudió las costas ecuatorianas, en la zona del epicentro las ordenadas espectrales fueron tres veces más grandes con respecto a las obtenidas en la última normativa sísmica 2015, siendo la causa de esta travesía, dejando daño a nivel de estructuras, y un sin número de muertos, por lo que es necesario una actualización de la normativa.

Es necesario conocer que después de un terremoto que ha liberado una gran cantidad de energía, se va a producir réplicas de considerable magnitud y que las estructuras que tuvieron daño en el evento principal van a incrementar su afectación, por lo que es necesario efectuar un apuntalamiento de las mismas, de no hacerlo el daño será de tal magnitud que será imposible rehabilitar la estructura. (Aguiar R. , 2017)

Figura 20

Réplicas del terremoto del 16 de abril del 2016



Nota: La grafica representa las réplicas que se dieron en las principales provincias de Manabí. Tomado de: (Aguiar R. , 2018)

Se puede decir que el epicentro y magnitud del terremoto de 1942 es similar al del 2016, el número de muertos es tres veces más grande en este último y se debe a que en 1942 se tenía menor población por ende un menor número de construcciones, existe una gran peligrosidad sísmica ya que cada 20 años se tiene un terremoto muy destructivo, por lo que frente a tal realidad es necesario construir edificaciones más seguras ante la acción de terremotos.

Catálogo del proyecto

Para realizar un correcto estudio de Peligrosidad Sísmica es necesario la creación de un catálogo sísmico, en el que se debe emplear una base de datos homogénea y completa, por lo que el primer paso es conocer la sismicidad de la zona de estudio con el fin de identificar la ocurrencia de Terremotos en el pasado y establecer un Patrón de sismicidad.

Un catálogo sísmico se considera completo en un determinado rango de magnitud, si contiene todos los sismos que presuntamente hayan ocurrido en ese rango, el problema es que a medida que disminuye la magnitud se pierde información al remontarnos en el tiempo, por lo que, para magnitudes moderadas o bajas, el catálogo solo suele ser completo en las épocas más recientes. (Quinde y Reinoso, 2016)

Es necesario estimar el año de referencia a partir del cual se puede suponer que los sismos de un determinado intervalo de magnitud han sido registrados completamente, así se realizara la corrección por falta de completitud de la información contenida en el Catálogo Sísmico, registrando la pérdida de los sismos de menor magnitud a medida que se remonta en el tiempo.

Completitud de la información sísmica

Al observar los catálogos sísmicos, los periodos comprendidos para estudio resultan catálogos muy bajos o incompletos lo que además puede causar tasas de recurrencia que pueden llegar a variar.

Para resolver el problema de la falta de datos, para sismos de determinados rangos y magnitud, en diferentes ventanas de tiempo, se plantean dos métodos: gráfico y el propuesto por Stepp (1973)

Método Gráfico

Permite observar la magnitud mínima de completéz, la misma que define el límite inferior, a partir del cual, el catálogo se considera completo, para llevar a cabo este método lo primero es separar los sismos de acuerdo a la zona fuente, una vez realizado se clasifica nuevamente los sismos, pero a partir de los rangos de magnitud, se procede a contar el total de sismos en ese rango de magnitud y finalmente se presenta un gráfico en el que se evidencia el año y el número de sismos dividido para el total de sismos de ese rango y se halla el número de sismos normalizados a la unidad de función del año.

Método Stepp

Su concepto es similar el método de Stepp en cuanto al análisis de la pendiente, es un método clásico que analiza el comportamiento de la desviación estándar a través del tiempo para diferentes intervalos de magnitudes. (Quinde y Reinoso, 2016)

El procedimiento de cálculo es el siguiente, i) se agrupan los sismos de acuerdo con los rangos de magnitud, ii) se encuentra el número de sismos en diferentes periodos de tiempo acumulados, pero empezando por el ultimo sismo registrado, sea k_i el numero de sismos para un intervalo de tiempo T_i , iii) se halla la media de sismos R_i , dividiendo el numero de sismos para el intervalo de tiempo acumulado, iv) se encuentra la desviación estándar S_r , dividiendo el valor medio de sismos para el intervalo de tiempo acumulado, v)

se dibuja el intervalo de tiempo acumulado con la desviación estándar pero en escala logarítmica , vi) Se dibuja la recta $1/T_i$, esta recta se sube o se baja de forma paralela hasta ver el mejor ajuste con los puntos $\log T_i, \log R_i$. Esto significa que a la recta se multiplica por una constante quedando a/T_i , siendo a la constante con la cual se obtiene el mejor ajuste, vii) finalmente en forma visual se ve el punto de la desviación estándar donde se puede considerar que se tiene un buen ajuste con la recta a/T_i . (Aguiar R. , 2018)

$$R_i = \frac{k_i}{T_i} \quad S_i = \sqrt{\frac{R_i}{T_i}} \quad (25)$$

Capítulo 3

Metodología de la Investigación

Área de Influencia

La provincia de Tungurahua se encuentra ubicada en el centro de la Sierra, su capital es Ambato, en su extensión territorial es la provincia más pequeña del Ecuador, al estar ubicada en la provincia de Tungurahua se encuentra limitado en el norte, por la provincia de Cotopaxi y provincia del Napo; al sur, por la provincia de Chimborazo y Morona Santiago, al oeste por la provincia de Bolívar y Cotopaxi y al este; por los cantones: Pillaro, Cevallos, Pelileo Mocha y Tisaleo y la provincia de Pastaza.

En su estructura política está conformada por parroquias urbanas y rurales; la zona urbana agrupa 9 parroquias; Atocha-Ficoa, Celiano Monge, Huachi Chico, Huachi Loreto, La Merced, La Península, La Matriz, Pishilata y San Francisco, mientras que la zona urbana está conformada por 18 parroquias; Ambatillo, Atahualpa, Augusto N. Martínez, Constantino Fernández, Huachi Grande, Izamba, Juan Benigno Vela, Montalvo, Pasa, Picaihua, Pilahuin, Quisapincha, San Bartolomé de Pinllo, Santa Rosa, Totoras, Cunchibamba, Unamuncho.

La ciudad de Ambato se encuentra en una zona volcánica y sísmicamente activa. Si hablamos de la sismicidad histórica de la ciudad de Ambato, los eventos sísmicos registrados son el de 1687, 1698, 1786, 17947 y 1949 este último ocurrió el 5 de agosto de 1949 fue uno de los sismos con mayor intensidad debido al daño que causo a las viviendas, iglesias, escuelas, etc. Una de las estructuras en colapsar fue la Iglesia Catedral, en la cual colapso la cúpula, matando a más de 70 niños.

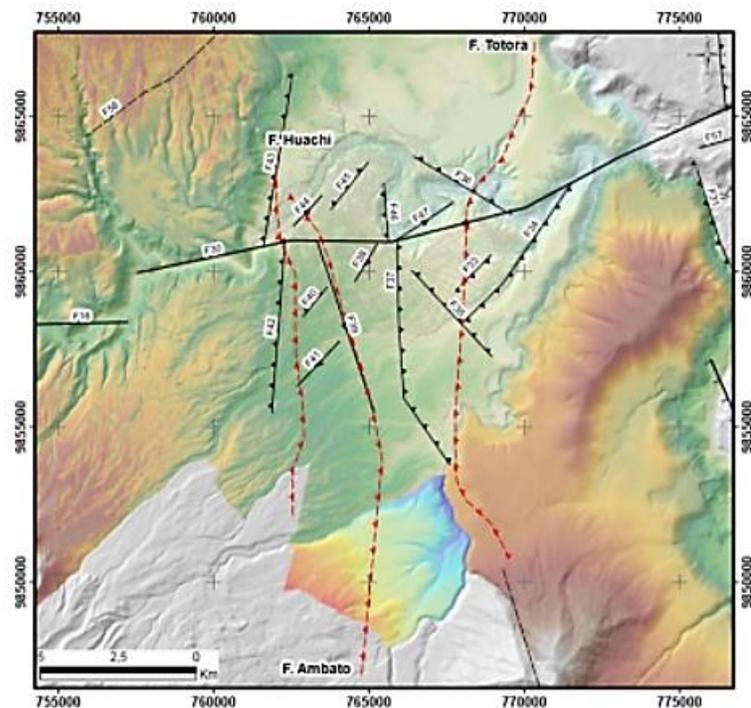
La ciudad de Ambato se encuentra sobre un sistema de fallas geológicas ciegas, es decir que no tienen afloramiento superficial, por lo que la mayor parte de proyectistas

estructurales desconocen se puede presentar un terremoto a menos de 20 km de profundidad.

Lo más importante para evaluar la Peligrosidad sísmica del área urbana de la ciudad de Ambato es el considerar que esta atravesada por tres fallas, que se muestran en la figura 18, en la parte superior izquierda de la figura se tiene la falla Huachi ($M=6.3$) que es una falla inversa de una longitud aproximada de 12,04 km; a la derecha se ve la falla Totoras ($M=6.5$) la cual es la falla más grande, es una falla transcurrente inversa, y con una longitud de 17,65 km; en la parte inferior se tiene la falla denominada Ambato ($M=6.5$), que tiene 16,3 km y se trata de una falla inversa. (Eguez et al., 2003) (Aguiar y Serrano , 2020)

Figura 21

Fallas Geológicas zona Urbana

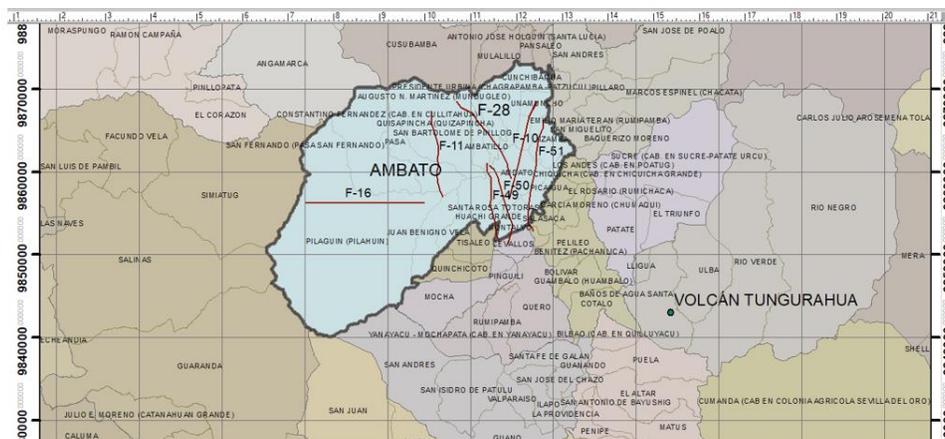


Nota: El gráfico presenta las fallas geológicas que atraviesan la zona urbana de la ciudad de Ambato. Tomado de (Eguez et al., 2003) (Chunga y Mulas, 2018)

Para evaluar la peligrosidad sísmica en el área rural de la ciudad de Ambato fue necesario considerar otras fallas ya que las tres mencionadas no afectaban de manera directa al área rural, por lo que las fallas que afectan la zona rural son 4 las fallas F10, F11, F16, F28 y se muestran en la figura 19, sin embargo, debe considerar las 7 fallas que están indicadas en la figura 19

Figura 22

Fallas Geológicas zona rural y urbana



Nota: El gráfico presenta las fallas geológicas seleccionadas en el estudio para evaluar la peligrosidad sísmica del área urbana y rural de Ambato.

El área rural de la ciudad de Ambato es por lo menos unas cuatro veces que el área urbana, por este motivo no se puede evaluar la peligrosidad sísmica solo con las fallas mostrada sen la figura 17. Esas están muy bien para solo el área urbana (Aguiar & Rivas, 2018)

Estas siete fallas que atraviesan la ciudad de Ambato pueden generar sismos impulsivos, que son de corta duración, pero sumamente destructivos, por lo que es necesario el correcto diseño sísmico de las estructuras, para su cálculo se debe conocer Espectro de diseño (DBE) y el Espectro Máximo Considerado (MCE), con el cual se puede encontrar desplazamientos y derivas de piso.

Como punto de partida de esta investigación se detallará un resumen del estudio de peligrosidad sísmica realizado por Aguiar y Rivas (2018), en la zona urbana de la ciudad de Ambato.

El terremoto de Pedernales de 2016, en Ecuador, puso en evidencia que la velocidad de onda de corte no es suficiente para clasificar los suelos, debido a que los suelos de Bahía de Caráquez son perfiles tipo "C" y durante el sismo hubo un efecto de amplificación de las ondas sísmicas que hicieron que las estructuras entren en el rango no lineal. Esta preocupación hizo que se determine los periodos de vibración de los suelos de Ambato. Es necesario conocer el rol del periodo de la vibración del suelo en el desempeño sísmico, si se considera clasificar los suelos de acuerdo con la velocidad de onda de en los 30 primeros metros, es necesario complementar la clasificación con el periodo corte de vibración del suelo. (Aguiar y Rivas, 2018)

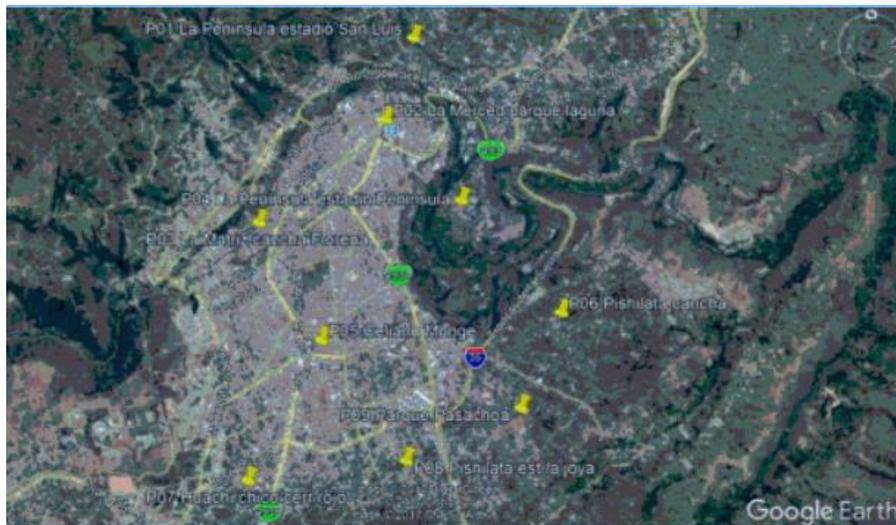
Debido a este antecedente, para la clasificación de los suelos de la ciudad de Ambato, se realizaron los siguientes trabajos: i) Utilizando la Técnica de Nakamura (1989), se obtuvo los períodos de vibración de los suelos, se presenta en la figura 3a. la mayor parte de los suelos tienen un periodo menor a 0.27 segundos y que las zonas donde el periodo es mayor, se llega a períodos que están alrededor de 0.40 segundos, , ii) utilizando sísmica de refracción se determinó las velocidades, la mayor parte de los suelos tienen velocidades V_{s30} , mayores a 300 m/s. iii) se hizo una clasificación SUCS de los suelos y se determinó el valor del número de golpes del ensayo de penetración estándar, SPT; iv) se obtuvo el valor de la cohesión y el ángulo de fricción interna, mediante ensayos triaxiales y de corte directo

Se realizaron estudios geofísicos para lo cual se seleccionó 9 sitios de la zona urbana de Ambato presentados en la figura 1. El punto P01 (La Península estadio San Luis) y el P04 (La Península estadio la Península) se hallan en la Zona 1; el P02 (La Merced parque Laguna) y P03 (La Matriz Cancha Floreana) se encuentran en la Zona 2; el P05 (Celiano

Monge) y P07 (Huachi Chico Cerro Rojo) en la Zona 3; el P06 (Pishilata Cancha), P08 (Pishilata Estadio la Joya) y P09 (Parque Pasachoa) se hallan en la Zona 4. (Aguiar y Serrano , 2020)

Figura 23

Ubicación de los sitios seleccionados para el estudio Geofísico



Nota: El grafico representa los sitios donde se hicieron los estudios de suelos. Tomado de (Aguiar R. , 2018)

Con los resultados presentados, se puede decir que los suelos de la ciudad de Ambato son suelos bastante compactos por lo que se podría pensar que no presentara amplificación de las ondas sísmicas como sucedió en Bahía de Caráquez, en los que el

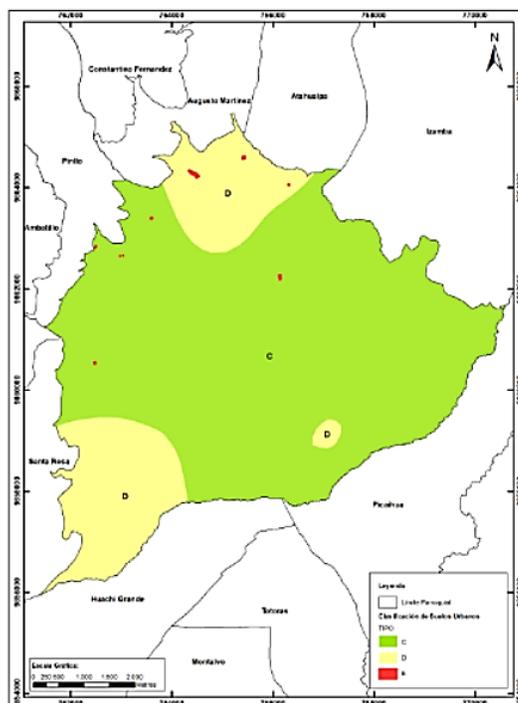
periodo de vibración del suelo resulto mayor que el periodo de vibración de la estructura, causal de daño de la mayor parte de la Puntilla de Bahía de Caráquez.

Al clasificar los suelos de la ciudad de Ambato, de acuerdo con la clasificación de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, este presenta dos tipos de suelos, identificados como perfil de suelo tipo C y tipo D.

Los suelos tipo C, la velocidad de la onda de corte en los 30 primeros metros es mayor a 360 m/s, y el número de golpes del SPT es mayor a 50, mientras que, en los suelos tipo D, la velocidad de la onda de corte es menor a 360 M/s y el número de golpes del SPT menor a 50. (NEC-15, 2015)

Figura 24

Clasificación de los suelos de la zona urbana de la ciudad de Ambato desde el punto de vista sísmico

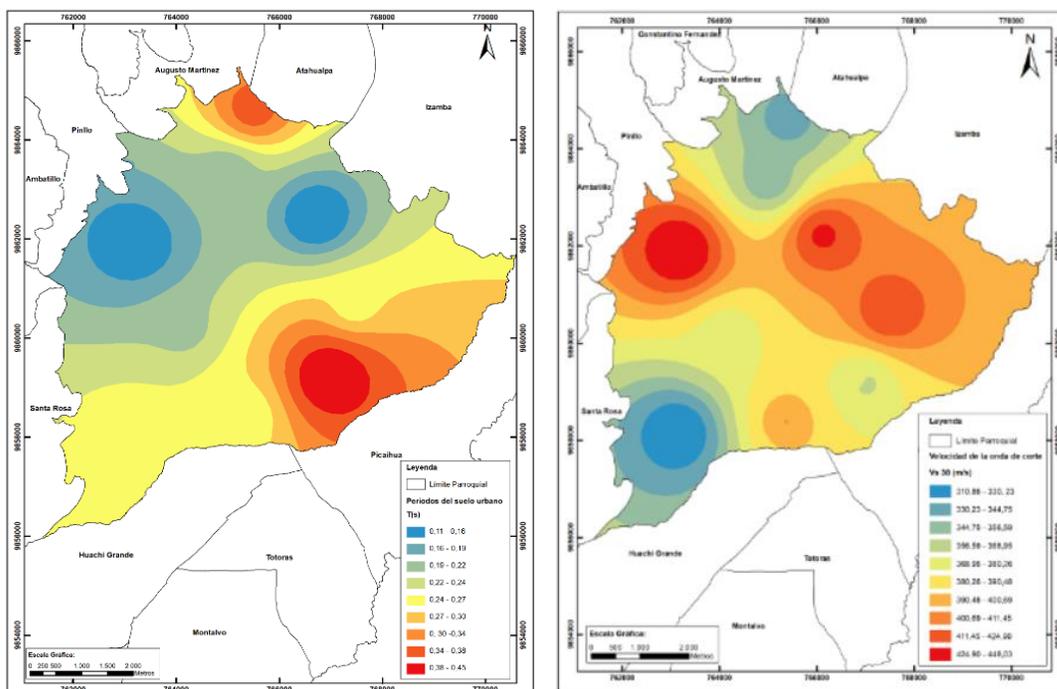


Nota: El gráfico representa la clasificación de los suelos de la zona urbana de la ciudad de Ambato. Tomado de (Aguiar y Rivas, 2018)

En la figura 5a se presenta las curvas de igual periodo, en los que se identifica que la ciudad de Ambato tiene periodos de suelo inferior a 0.27 segundos, mientras que en la figura 3b se elaboró las curvas, de acuerdo con la velocidad de onda de corte, los suelos tienen velocidad mayor a 300m/s, lo que se podría decir que son suelos con características buenas desde el punto de vista estructural.

Figura 25

Estudios de Peligrosidad sísmica del área urbana de la ciudad de Ambato



Nota: El gráfico representa Ambato a) Periodo de vibración del suelo; b) Velocidad de onda de corte en los 30 primeros metros. Tomado de (Aguiar y Rivas, 2018)

Además, de las curvas de velocidad de onda de corte y periodo de vibración del suelo, se determinaron espectros de control, mediante un estudio de peligrosidad sísmica

Determinístico; esto se lo realizo para los dos perfiles de suelo, tipo C y tipo D , para lo cual se construyó una malla de puntos equidistantes cada 500 metros en sentido Norte-sur y en sentido Este-Oeste y se procedió a clasificar de acuerdo al tipo de suelo, se halló espectros de control en cada punto de la malla, para su análisis en este caso se identificó que la zona urbana de la ciudad de Ambato está afectada por 3 fallas como son la falla denominada Ambato, Falla de Huachi y la Falla de Totoras, se consideró que las tres fallas generan un sismo de magnitud máxima, se determinó los espectros promedios en cada perfil de suelo y se determinó que la falla que genera mayores ordenadas espectrales corresponde a la falla de Totoras. (2020)

Para la obtención de los espectros de control de aceleración horizontal de movimiento de suelo se utilizaron las ecuaciones de movimientos fuertes de: Campbell y Bozorgnia (2014); Chou y Youngs (2014); Abrahamson *et al.* (2014). Los modelos indicados trabajaron con la base de datos del PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center)

El cálculo de los espectros se hizo para los dos grupos de suelos , por lo que para el perfil de suelo "C" se obtuvieron espectros en cada punto de la malla y se encontró el espectro promedio para el perfil con cada una de las ecuaciones de movimientos fuertes, considerando que se produce un sismo de magnitud máxima en cada una de las fallas indicadas, de igual manera se procedió con el perfil de suelo tipo "D".

Método Determinístico

Ecuaciones de movimientos fuertes

Componente horizontal del movimiento del suelo

A continuación, se describen las ecuaciones utilizadas para describir la componente horizontal del movimiento del suelo

Modelo de Campbell y Bozorgnia (2014)

Se abrevia C&B (2014) fue desarrollado como parte del proyecto Next Generation Attenuation of Ground Motion (NGA), este modelo es una actualización de C&B (2008), en el cual se incluía términos y variables predictoras que modelaban el ajuste de la magnitud, atenuación geométrica, tipo de falla, efectos de hanging wall, respuesta lineales y no lineales del sitio de poca profundidad y respuesta de la cuenca. En este modelo actualizado (2014), se incluyen nuevos términos y variables predictoras; incluyendo un nuevo modelo de hanging wall y relacionando parámetros como: profundidad hipo central, buzamiento de la ruptura, dependencia de la cuenca, dependencia regional de la atenuación anelastica y desviaciones estándar entre y dentro del evento. (Chicaiza, 2016)

Limitaciones del modelo

El modelo de C&B (2014) es aplicable en sismos corticales producidos en regiones tectónicamente activas y en la corteza continental alrededor del mundo, toma en cuenta las siguientes limitaciones: (Campbell et al., 2014)

- $3.3 \leq M \leq 8.5$ para sismos generados en fallas Transcurrentes
- $3.3 \leq M \leq 8.0$ para sismos generados en fallas inversas
- $3.3 \leq M \leq 7.5$ para sismos generados en fallas Normales
- $0 \leq R_{RUP} \leq 300 \text{ km}$
- $0 \leq Z_{TOR} \leq 20 \text{ km}$
- $150 \text{ m/seg} \leq V_{s30} \leq 1500 \text{ m/seg}$
- $0 \leq Z_{2.5} \leq 10 \text{ km}$
- $0 \leq Z_{HYP} \leq 20 \text{ km}$
- $15^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$

Ecuaciones del modelo

La ecuación con que se halla el espectro elástico para un 5% de amortiguamiento es la siguiente:

$$\ln Y = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atn} \quad (26)$$

Donde:

Y : aceleración espectral expresada como una fracción de la gravedad

f_{mag} : función de magnitud

f_{dis} : término atenuación geométrica

f_{flt} : término tipo de falla

f_{hng} : término Hanging-wall

f_{site} : término respuesta del sitio superficial

f_{sed} : término respuesta de la Cuenca

f_{hyp} : término profundidad Hipocentral

f_{dip} : término Buzamiento de la ruptura

f_{atn} : Término de atenuación Anelástica

Modelo de Abrahamson (2014)

Este modelo incluye los siguientes parámetros como la respuesta no lineal del sitio la cual se basa en la aceleración espectral en roca, la magnitud ha sido ajustada a magnitud de momento mayor a 5, efecto de hanging wall ha sido ajustada con la magnitud, ángulo de buzamiento y distancia, el tipo de falla es dado por una función dependiente de la magnitud. (Chicaiza, 2016)

Limitaciones del modelo

El modelo ASK 14 se considera valido en sismos superficiales originados en la corteza, alrededor del mundo y en regiones tectónicamente activas, por lo cual, se aplican las siguientes condiciones: (Abrahamson et al., 2014)

- $3.0 \leq M \leq 8.5$
- $0 \leq R_{RUP} \leq 300 \text{ km}$
- $180 \text{ m/seg} \leq V_{s30} \leq 1500 \text{ m/seg}$
- $Z_{TOR} \leq 20 \text{ km}$

Ecuaciones del modelo

La ecuación del modelo de ASK (2014) con la cual se halla espectros de respuesta elástica para 5% de amortiguamiento es la siguiente.

$$\begin{aligned} \ln Y = & f_1(M, R_{rup}) + F_{RV} * f_7 + F_N * f_8(M) + F_{AS} * f_{11}(CR_{jb}) + f_5(Sa_{1100}, Vs_{30}) \\ & + F_{HW} * f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{y0}, W, dip, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) + f_{10}(Z_{1.0}, Vs_{30}) \\ & + Regional(Vs_{30} + R_{rup}) \end{aligned} \quad (27)$$

Donde:

Y : aceleración espectral expresada como una fracción de la gravedad

f_1 : función de modelo base

M : magnitud

R_{rup} : distancia más cercana al plano de falla

F_{RV} : factor para terremotos con fallas inversas

f_7 : función del tipo de falla

F_N : factor para terremotos con fallas normales

F_{AS} : factor para fallas normales

$f_{11}(CR_{jb})$: función de replicas

$f_5(Sa_{1100}, Vs_{30})$: función de sitio

$f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{y0}, W, dip, Z_{TOR}, M)$: function de Hanging Wall

R_{jb} : distancia Joyner-Boore (Km)

R_x : distancia horizontal desde el borde superior de ruptura (Km)

R_{y0} : distancia horizontal desde el final de la ruptura medida paralela a la falla

W : ancho de ruptura (Km)

$f_6(Z_{TOR})$: función de profundidad al borde superior del plano de ruptura

$f_{10}(Z_{1.0}, Vs_{30})$: función de profundidad de cuenca

$Regional(Vs_{30} + R_{rup})$: función de regionalización

Modelo de Chiou Youngs (2014)

Este modelo empírico válido es para movimientos sísmicos en regiones tectónicas activas. Esta relación provee aceleraciones pico, velocidad pico y 5% de amortiguamiento para periodos espectrales de 0.01 a 10 segundos.

Como parte de la actualización del programa NGA West, Brian S.J. Chiou & Robert R. Youngs reformaron su modelo propuesto por Chiou & Youngs (2014) relacionando parámetros como el efecto del tipo de falla, ajuste de Hanging wall, ajuste de la profundidad

y tope de la ruptura, el efecto de la profundidad de sedimentos y la inclusión de dos términos: el ángulo de buzamiento y la directividad de la ruptura, cálculo de Z_{TOR} para fallas inversas y para fallas normales

Además, incorpora en la evaluación de los espectros de aceleración o ecuaciones de atenuación del movimiento del suelo, la directividad de las ondas sísmicas, factor que es muy importante para sitios que se encuentran muy cerca de las fallas, como es el caso de Ambato. (Aguiar & Rivas, 2018)

Limitaciones del modelo

El modelo es aplicable para sismos superficiales en regiones tectónicamente activas de corteza, con las siguientes limitaciones: (Chiou & Youngs, 2014)

- $3.5 \leq M_w \leq 8.5$ para sismo generados en fallas Transcurrete
- $3.5 \leq M_w \leq 8.0$ para sismo generados en fallas Inversas y Normales
- $Z_{TOR} \leq 20 \text{ km}$
- $0 \leq R_{RUP} \leq 300 \text{ km}$
- $180 \text{ m/seg} \leq V_{s30} \leq 1500 \text{ m/seg}$

Ecuaciones del modelo

La ecuación del modelo de CSY (2014) con la cual se halla espectros de respuesta elástica para 5% de amortiguamiento es la siguiente

$$\begin{aligned}
= & c_1 + \left\{ c_{1a} + \frac{c_{1c}}{\cosh(2 \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{Rvi} + \left\{ c_{1b} + \frac{c_{1d}}{\cosh(2 \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{NMi} \\
& + \left\{ c_7 + \frac{c_{7b}}{\cosh(2 \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} \Delta Z_{tori} \\
& + \left\{ c_{11} + \frac{c_{11b}}{\cosh(2 \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} (\cos \delta i)^2 + c_2 (M_i - 6) \\
& + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - M_i)}) \\
& + c_4 \ln(R_{RUPij} + c_5 \cosh(c_6 \max(M_i - c_{HM,0}))) + (c_{4a} \\
& - c_4) \ln\left(\sqrt{R_{RUPij}^2 + c_{RB}^2}\right) + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh(\max(M_i - c_{\gamma 3}, 0))} \right\} R_{RUPij} \\
& + c_8 \max\left(1 \right. \\
& \left. + \frac{\max(R_{RUPij} - 40, 0)}{30}, 0\right) \min\left(\frac{\max(M_i - 5.5, 0)}{0.8}, 1\right) e^{-c_{8a}(M_i - c_{8b})^2} \Delta D_{PPIj} \\
& + c_9 F_{HWij} \cos \delta \left\{ c_{9a} + (1 - c_{9a}) \tanh\left(\frac{R_{xij}}{c_{9b}}\right) \right\} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{R_{JBij}^2 + Z_{TORi}^2}}{R_{RUPij} + 1} \right\} \quad (28)
\end{aligned}$$

Donde:

M : magnitud de momento

R_{RUP} : Distancia mas cercana al plano de ruptura (Km)

R_{JB} : Distancia Joyner Boore al plano de ruptura (Km)

R_x : Distancia horizontal más cercana (proyección en la superficie) al borde superior del plano de ruptura medido perpendicularmente desde la dirección del rumbo promedio (Km).

F_{HW} : Factor de Hanging Wall: 1 si $R_x \geq 0$ y 0 $R_x \leq 0$

δ : Angulo de buzamiento (°)

Z_{TOR} : Profundidad hasta el borde superior del plano de ruptura (Km)

F_{RV} : Factor de mecanismo de falla

F_{NM} : Fallas normales

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

$Z_{1.0}$: Profundidad cuando la velocidad de onda de corte es 1.0 Km/seg (m)

$\Delta Z_{1.0}$: Parámetro de la variación de Z_{TOR}

DPP : Parámetro del efecto de directividad

ΔDPP : Parámetro de variación de DPP

Modelo de Zhao (2016)

Para los sismos corticales, Zhao *et al.* (2016), clasifica los eventos en dos grupos, los primeros denominados sismos corticales cuando la fuente se halla a menos de 25 Km y sismos de manto cuando la fuente se halla a distancias mayores de 25 Km y la subducción de halla a mayor profundidad.

Para la determinación de las ecuaciones de movimientos fuertes, trabajaron con 6482 registros de 76 sismos de corteza superficial y 47 de manto superior. La mayor parte de ellos son sismos registrados en Japón, con magnitudes mayores a 4.9.

El subíndice cr indica que se trata de sismos de corteza y el subíndice um de manto superior, con esta aclaración se indican las funciones sin el subíndice; f_m representa el efecto de fuente que es función de la magnitud, de la profundidad focal y del tipo de falla; g_{cr}, g_{um} es la tasa de atenuación geométrica que es función de la distancia y la magnitud, el modelo considera ecuaciones para el campo cercano (g_N) y para larga distancia (g_{crL}); e_{cr}, e_{um} , es la tasa de atenuación anelástica; e_{cr}^v es la tasa de atenuación anelastica

asociada con la ruta volcánica (esto se comenta más adelante); A^{cr} , A^{um} , son funciones de sitio. (Aguiar y Serrano, 2020)

La clasificación de los suelos, que ellos consideran en su estudio, se indica en la tabla 1; en la primera columna se tiene la nomenclatura para los tipos de suelo en el modelo de Zhao et al. (2016) y en la última columna, la similitud que tienen con la clasificación de NHERP (2015). En la segunda columna se presenta la descripción del suelo; en la tercera la clasificación en función del período de vibración del suelo que es lo interesante y en la cuarta el V_{s30} . Lo importante es reconocer que el período del suelo influye en la clasificación de los suelos y si se tienen períodos de suelo mayores a 0.6 s, empezar a preocuparse por los problemas de amplificación de las ondas sísmicas. (Aguiar y Serrano, 2020)

Tabla 2.

Clasificación de suelos considerada por Zhao et al. (2016) y similitud con NEHRP

Perfil de suelo	Descripción	Período	V_{s30} (m/s)	Perfil de suelo NEHRP
SC I	Roca	$T < 0.2 s$	$V_{s30} > 600$	A+B+C
SC II	Suelo Duro	$0.2 \leq T < 0.4 s$	$300 < V_{s30} \leq 600$	C
SC III	Suelo Mediano	$0.4 \leq T < 0.6 s$	$200 < V_{s30} \leq 300$	D
SC IV	Suelo suave	$T \geq 0.6 s$	$V_{s30} \leq 200$	E+F
SC IV1		$0.6 \leq T < 1.0 s$	$120 < V_{s30} \leq 200$	E
SC IV2		$T \geq 1.0 s$	$V_{s30} \leq 120$	F

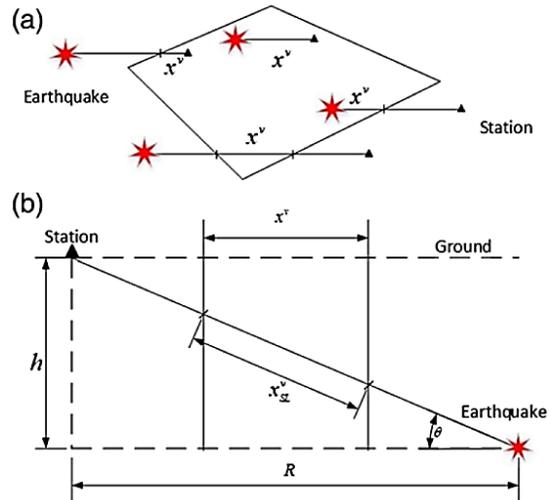
El otro aspecto importante del modelo de Zhao et al. (2016) tiene que ver con la consideración del vulcanismo en el modelo, para ello se definen 4 casos, que se muestran en la figura 26, y en forma resumida son: i) Epicentro fuera de la zona volcánica (ZV) y estación o punto de interés dentro de ZV; ii) Estación y epicentro dentro de ZV; iii) Epicentro

en ZV y estación fuera de ZV; iv) Estación y epicentro fuera de ZV pero que atraviesa la ZV.

En todos los casos la distancia x^v queda dentro de ZV.

Figura 26

Definición de la trayectoria volcánica



Nota: El gráfico, literal a presenta una definición de la trayectoria volcánica para cuatro casos, mientras que el literal b presenta a la distancia volcánica horizontal e inclinada.

Tomado de (Zhao et al., 2016)

Ecuaciones del modelo

Las ecuaciones del modelo de Zhao (2016) para sismos de corteza y para sismos de manto, son las siguientes:

- **SISMOS DE CORTEZA**

(29)

$$\log_e(y_{i,j}) = f_{mcr} + g_{cr} \log_e(r_{i,j}) + g_{cr} \log_e(x_{i,j} + 200.0) + g_N(x_{i,j}) + e_{cr}x_{i,j} + e^v_{cr}x^v_{i,j} + \gamma_{cr} + \log_e(A^{cr}) + \xi_{i,j} + \eta_i$$

- **SISMOS DE MANTO**

$$\begin{aligned}
\log_e(y_{i,j}) = & f_{mum} + g_{um} \log_e(r_{i,j}) + g_{crl} \log_e(x_{i,j} + 200.0) + g_N(x_{i,j}) + e_{um}x_{i,j} \\
& + e^{v_{cr}}x^v_{i,j} + \gamma_{cr} + \log_e(A^{um}) + \xi_{i,j} \\
& + \eta_i
\end{aligned}
\tag{30}$$

Donde:

f_{mcr} : función de magnitud para sismos de corteza

f_{mum} : función de magnitud para sismos de manto

$g_N(x_{i,j})$: función de atenuación geométrica

$\log_e(A^{um})$: función de efectos de sitio para sismos de manto

$\log_e(A^{cr})$: función de efectos de sitio para sismos de corteza

$e^{v_{cr}}x^v_{i,j}$: variables del modelo (ruta volcánica)

$g_{um} \log_e(r_{i,j})$: termino de extensión geométrica

Modelo de Boore y Atkinson (2008)

La fuente de datos de movimiento de tierra para el desarrollo de los GMPE en este estudio es la base de datos compilada en el proyecto PEER NGA, el objetivo de este proyecto es desarrollar GMPE empíricos utilizando varios equipos de investigación para permitir diferentes interpretaciones, los investigadores eran libres de decidir si utilizar toda la base de datos NGA o restringir su análisis a un subconjunto seleccionado. También se utilizaron datos compilados por J. Boatwright y L. Seekins para tres pequeños eventos, y datos del 2004 Parkfield, California (Boore & Atkinson, 2008)

La cantidad de datos utilizados en el análisis de regresión es un tema importante ya que influye en la fiabilidad de los resultados, especialmente en rasgos de magnitud y distancia que son importantes para el análisis de riesgo sísmico.

Las variables independientes en el análisis de regresión son el momento de magnitud M , la distancia más cercana a la proyección de superficie del plano de falla RJB, y la velocidad de onda de cortante promedio en el tiempo sobre los 30 metros superiores V_{s30} para la caracterización del sitio.

Limitaciones del modelo

- $5 \leq M \leq 8$
- $R_{JB} < 200 \text{ Km}$
- $V_{s30}: 180 - 1300 \text{ m/s}$

Ecuaciones del modelo

La ecuación del modelo de Boore y Atkinson (2008) para sismos corticales, es la siguiente:

$$\ln Y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{s30}, R_{JB}, M) + \varepsilon\sigma_T \quad (31)$$

Donde:

F_M : es la escala de magnitud

F_D : es la función de distancia

F_S : es la amplificación del suelo

M : es la magnitud de momento

R_{JB} : es la distancia Joyner-Boore, definida como la distancia más cercana a la proyección de la superficie de la falla, la cual es aproximadamente igual a la distancia epicentral para eventos de magnitud seis

V_{s30} : es la velocidad de onda de corte desde la superficie hasta una profundidad de 30 metros

ε : es el número fraccionario de desviación estándar de un solo valor de $\ln Y$ ($\varepsilon = -1.5$ la desviación estándar sería $\varepsilon = 1.5$)

Modelo de Idriss (2014)

Un modelo empírico para estimar la aceleración pico horizontal promedio (PGA) (5% de amortiguación espectral) se desarrolla utilizando los datos parte de los "sitios cuasi-lineales" V_{s30} bin (V_{s30}) = 450 a 2000 m / seg). Estos datos, por un total de 2353, se obtuvieron durante 152 terremotos, 73 de que ocurrió en California, uno en Nevada, 5 en Japón, el choque principal de Wenchuan y sus 53 réplicas en China, 2 en Nueva Zelanda y 17 en otros países (Canadá, México, Taiwán, Italia, Turquía e Irán). (I.M. Idriss, 2014)

Limitaciones del modelo

Este modelo toma en cuenta:

- $450 \leq V_{s30} \leq 1200$ m/s y profundidades de roca
- $5 \leq M \leq 8.5$
- $R_{JB} < 150$ Km
- Periodo 0.02 seg a 10 seg

Ecuaciones del modelo

La ecuación del modelo de Idriss (2014) para sismos corticales, es la siguiente:

$$\ln(PSA) = \alpha_1 + \alpha_2(M) + \alpha_3(8.5 - M)^2 - (\beta_1 + \beta_2 M) * \ln(R_{rup} + 10) + \varepsilon \ln(V_{s30}) + \gamma R_{rup} + \varphi F$$

Donde:

PSA : expresado en g el 5% pseudoaceleración amortiguada

M : es la magnitud del momento

R_{rup} : expresado en Km, es la distancia más cercana a la superficie de ruptura

V_{s30} : expresada en m/seg, es la velocidad media de onda de corte en los 30 metros superiores debajo de la superficie del suelo.

F : se refiere al mecanismo de falla, cuando F es cero, se refiere a Strike slip, cuando $F=1$ se refiere a reverse mechanisms

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2$; coeficientes calculados por regresión

Comparación de modelos

Ahora con toda la información indicada en el presente apartado, se ha realizado un cuadro comparativo en el que se indican las variables involucradas en el formulario. que se muestra en la tabla 3, el objetivo principal es identificar el modelo más completo y útil de acuerdo con las características sismogénicas de la zona de estudio, en la primera fila se tiene la función Magnitud M , al ser un parámetro básico y primordial todos los modelos presentan esta variable, en la segunda fila se encuentra la función Z_{TOR} , es la distancia desde la superficie al borde superior de la falla, a continuación se presenta la función que representa el tipo de falla: puede ser una falla inversa, normal y transcurrente representado por el parámetro de falla F_{RV}, F_{NM}, SS respectivamente, en la cuarta fila se identifica la variable R_{rup} es la distancia del sitio de interés al plano de falla o a la distancia más corta a la falla;

continuando con la función R_{JB} es la distancia en el plano horizontal desde el sitio a la parte inferior de la falla, en la sexta fila se encuentra la función R_x , es la distancia horizontal desde el sitio a la parte superior de la falla, continuando con la función R_{yo} , es la distancia al final de la ruptura paralela a la falla, continua con la función Hanging Wall representada por la variable F_{HW} , la función de velocidad de onda de corte en los 30 primeros metros identificado por el parámetro V_{s30} , continuando con las variables $Z_{2.5}$, Z_1 que representa la profundidad a la cual la velocidad de la onda de corte es 2500 m/s, o 1000 m/s; la función Z_{hyp} es la profundidad al hipocentro; y finalmente la función X^v , es la distancia entre el epicentro y el sitio en la Zona Volcánica.

Por otra parte, en la tabla 4 se presenta la base de datos considerados en cada modelo.

Tabla 3.

Cuadro comparativo de las variables utilizadas en los modelos GMPE.

Parámetro	C&B-14	C&Y-14	ASK-14	Zhao-16	B&A-08	Idris-14
M	X	X	X	X	X	X
Z_{TOR}	X	X	X	---	---	---
F_{RV}, F_{NM}, SS	X	X	X	X	X	X
R_{rup}	X	X	X	X	---	X
R_{JB}	X	X	X	X	X	---
R_x	X	X	X	X	---	X
R_{yo}	---	---	X	---	---	---
F_{HW}	X	X	X	---	X	---
V_{s30}	X	X	X	X	---	X
$Z_{2.5}(X); Z_1(XX)$	X	XX	XX	---	XX	---
Z_{hyp}	X	X	---	X	---	X
X^v	---	---	---	X	---	---

Tabla 4.

Cuadro comparativo de las variables utilizadas en los modelos GMPE.

Parámetro	C&B -2014	C&Y -2014	ASK -2014	Z et al. -2016	B&A -2008	I -2014
Magnitud Mínima	3.30	3.50	3.00	x	5.00	5.00
Magnitud Máxima	8.50	8.00	8.50	x	8.50	8.50
Magnitud máxima fala transcurrente	8.50	8.50	8.50	x	8.50	8.50
Magnitud máxima fala inversa	8.00	8.00	8.50	x	8.50	8.00
Magnitud máxima fala normal	7.50	8.00	8.50	x	7.00	8.00
Número de registros de fallas Normales	8313	12,244	26	1658	x	70
Número de registros de fallas Inversas	322	2,587	79	3117	x	1490
Número de registros de fallas transcurrentes	1561	x	221	1182	x	899
Datos de Sismos	California, wordwide earthquakes	California	California, Japón, China, Taiwan	J, USA, Iran	California	California, Taiwan, USA, Canada, Georgia, Greece, Iran, Italy Mexico, Turkey
R _{rup} (Km)	(0 - 300)	(0 - 300)	(0 - 300)	x	(0 - 400)	(0.2 - 175)
V _{s30} (m/s)	(150-1500)	(180-1500)	(180-1500)	$200 \leq V_{s30}$ > 600	$180 \leq V_{s30}$ > 1300	$450 \leq V_{s30}$ > 1200
Z _{TOR} (Km)	≤ 20	≤ 20	≤ 20	x	x	x
Z _{HYP} (Km)	≤ 20	x	x	x	x	x
Z _{2.5 - Z_{1.0}} (Km)	(0 - 10)	(0 - 10)	x	x	(0 - 3)	x

Componente vertical del movimiento del suelo

A continuación, se describen los modelos a utilizar

Modelo de Campbell y Bozorgnia (2016)

La base de datos de movimiento de tierra utilizada en este estudio es un subconjunto de la base de datos que fue desarrollado como parte del Proyecto PEER NGA-West2 (Ancheta et al. 2014). Toda la base de datos NGA-West2 incluye más de 21,000 registros de tres componentes de terremotos corticales superficiales en regiones tectónicamente activas con magnitudes de M=3.0-7.9. Aunque la base de datos incluye registros a

distancias superiores a 1000 km, el límite práctico utilizado en este estudio es de 500 km en términos de las distancias más cercanas al plano de ruptura de falla (R_{RUP})

Las funciones utilizadas en nuestro NGA-West2 vertical GMM son las mismas que los utilizados para GMM horizontal, como se presenta en Campbell y Bozorgnia (2014). La conveniencia de usar las mismas formas funcionales para el componente vertical, así como cualquier excepción y modificación requerida para modelar el componente vertical, son discutido en las siguientes secciones.

Análisis de regresión

Similar al caso del componente horizontal, el análisis de regresión usando base de datos cercanas a fuente de ($R_{RUP} \leq 80\text{km}$) se realizó empleando ambos métodos: primero procedimientos no lineales de regresión por etapas adaptado de Joyner y Boore (1993) y el segundo efecto mixto de regresión (Abrahamson y Youngs 1992). Se utilizó las dos regresiones para ayudar a desarrollar el modelo inicial de fuente cercana, después del cual al finalizar se utilizó el modelo de regresión de efectos mixtos.

Medidas de intensidad de movimiento de suelo

Los GMIM abordados en este estudio son las componentes verticales de PGA, PGV y PSA para 21 períodos (T) de la siguiente manera: 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 7.5 y 10 seg. Similar al caso del movimiento horizontal, El consenso de los desarrolladores de GMM NGA-West2 fue excluir el terreno máximo desplazamiento (PGD) debido a su fuerte dependencia del filtro de paso bajo utilizado para procesar los registros de movimiento de suelo. Las ordenadas verticales de PSA y el GMM asociado son para un amortiguamiento viscoso del 5%.

Limitaciones del modelo

- $3 \leq M \leq 5$

- $R_{JB} < 300 \text{ Km}$
- Falla strike – slip $M \leq 8.5$
- Falla reverse $M \leq 8.0$
- Falla normal $M \leq 7.5$
- V_{s30} : 180 – 1500 m/s
- Z_{TOR} : 0 – 20 km
- Z_{HYP} : 0 – 20 km
- δ : 15 – 90 km

Ecuaciones del modelo

La ecuación utilizada para un 5% de amortiguamiento es la siguiente:

$$\ln Y_V = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atn} \quad (31)$$

Donde:

Y_V : es el logaritmo natural de la predicción mediana del GMIM vertical

f_{mag} : función de magnitud

f_{dis} : término atenuación geométrica

f_{flt} : término tipo de falla

f_{hng} : término Hanging-wall

f_{site} : término respuesta del sitio superficial

f_{sed} : término respuesta de la Cuenca

f_{hyp} : término profundidad Hipocentral

f_{dip} : término Buzamiento de la ruptura

f_{atn} : Término de atenuación Anelástica

Las ecuaciones son las mismas que los de Campbell y Bozorgnia para encontrar la aceleración horizontal, lo que cambia son los coeficientes de algunas variables

Modelo de Gülerce et al (2017)

Modelos empíricos de movimiento del suelo para la componente vertical de movimiento de suelo para regiones tectónicamente activas se derivan del uso de PEER NGA-West2 base de datos. El modelo es aplicable a magnitudes 3.0-8.0, distancias de 0-300 km y períodos espectrales de 0-10 seg.

Los parámetros de entrada del modelo son los mismos utilizados por Abrahamson et al. (2014) excepto que los efectos de la respuesta no lineal del sitio y estratos de roca inferiores no se evalúan, pero se consideran insignificantes.

El modelo de movimiento vertical desarrollado en este estudio. se puede combinar con el modelo de componentes horizontales propuesto por Abrahamson et al. (2014) para producir una relación V / H. Para aplicaciones donde el espectro horizontal es derivado del promedio ponderado de varios modelos de movimiento horizontal del suelo. (Gülerce et al., 2016),

Limitaciones del modelo

- $3.0 \leq M \leq 8.0$
- $Z_{TOR} \leq 20 \text{ Km}$
- $0 \leq R_{rup} \leq 300 \text{ km}$
- $180 \text{ m/s} \leq V_{s30} \leq 1500 \text{ m/s}$

Ecuaciones del modelo

El modelo de movimiento vertical esta dado por:

$$\begin{aligned}
 \ln S_{a(g)} = & f_1(M, R_{RUP}) + F_{RV}f_7(M) + F_Nf_8(M) + F_{AS}f_{11}(CR_{jb}) + f_5(V_{S30}) \\
 & + F_{HW}f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{y0}, W, dip, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) \\
 & + \text{Regional}(V_{S30}, R_{rup})
 \end{aligned} \tag{32}$$

Donde:

M : Magnitud de Momento

Z_{TOR} : Distancia al tope superior del plano de falla (Km)

F_{RV} : Factor de mecanismo de falla inversa

F_N : Factor de mecanismo de falla normal y normal oblicua

CR_{jb} : Centroides de R_{jb} definidos por Wooddell y Abrahamson en 2012

F_{AS} : Factor de replicas

W : Ancho de ruptura de falla (Km)

Método Probabilístico

Zonas fuentes

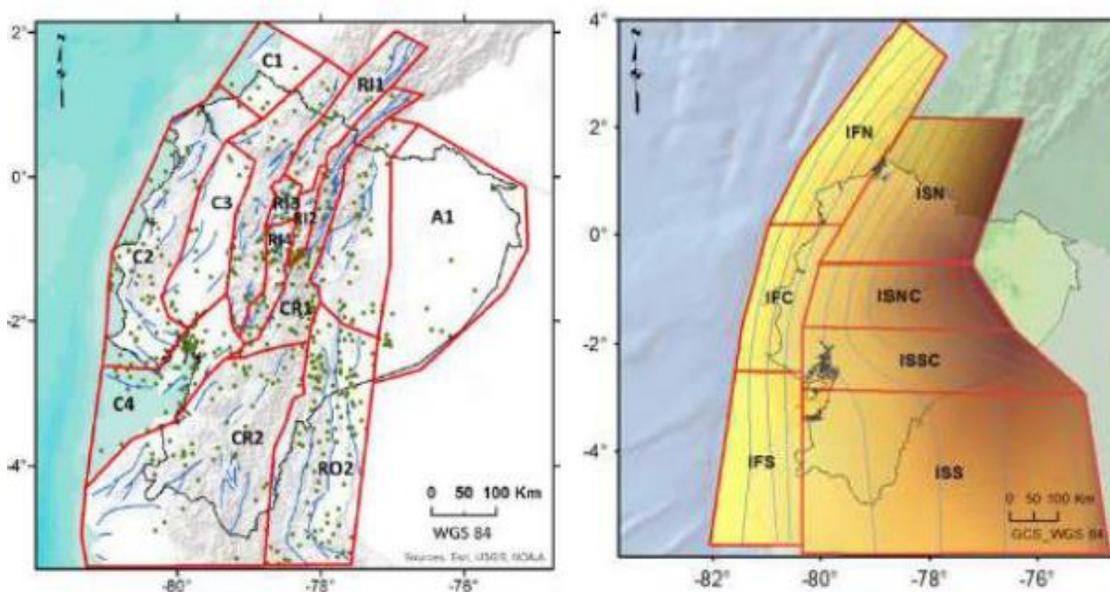
Se define las zonas fuentes o zonas de sismo genética a grandes volúmenes de litosfera en los cuales se tiene una sismicidad homogénea que es independiente de otras. Por lo que todos los puntos del interior de la zona fuente llevan asociado un modelo de recurrencia en el que se espera una mínima y máxima magnitud, al igual que una tasa de ocurrencia que son propios de la zona fuente. (Aguiar & Rivas, 2018)

Para definir una zona fuente es necesario conocer el origen de los sismos, para lo cual se tiene tres tipos como se mencionó en los primeros capítulos: interplaca, intraplaca y corticales, la sismicidad y geología son otros factores importantes para delimitar una zona fuente.

Se definirá las zonas fuentes propuesta por Parra (2016) y las propuestas por Beauval et al. (2018).

Parra (2016), considera 14 zonas fuentes asociados a sismos corticales, 3 zonas interplaca de bajo ángulo de buzamiento identificadas en la figura 4.5.8 con las iniciales (IFN, IFC, IFS) este tipo de sismo se caracteriza por generar mega terremotos de magnitud mayor a 8, y finalmente 4 zonas fuentes intraplaca que corresponden a una actividad sísmica de subducción profunda, a partir de 40 km lo que produce sismos de magnitud moderada y alta indicados en la figura 4.5.8 b con la denominación: ISN, ISNC, ISSC, ISS (Parra H. et al.).

Figura 27



Zonas Fuentes

(a)

(b)

Nota: La gráfica representa las zonas fuentes a la izquierda para sismos corticales, y a la derecha para sismos Interplaca e Intraplaca Tomado de: **(Parra et al.)**

Parra (2016) ajustó un modelo de recurrencia trabajando con los sismos registrados en cada zona, se halló parámetros del modelo de Gutenberg y Richter, se evaluó para cada fuente sísmica, en la tabla 5 se indica los valores utilizados para evaluar la amenaza sísmica utilizando el programa denominado CRISIS.

Las zonas que se muestran con (*) se han realizado dobles ajustes por lo que se tiene dos juegos de parámetros que se identifican con la nomenclatura A y B en el código de la zona. La magnitud mínima m_0 en los tramos A es de 4.0, coincidiendo con la m_0 asumida para todas las zonas. Sin embargo, el valor de m_0 para los tramos B es superior, marcando el umbral de las rectas de menor pendiente

Tabla 5

Parámetros de sismicidad

ÁREA FUENTE	CÓD.	ÁREA	m_0	M_{max}	Δ	α	β	$\sigma \beta$	$\dot{N}(m_0)$	$\dot{N}(m_0)/\text{ÁREA}$
Sismicidad Cortical										
Costa 1	C1	12950	4.0	5.9	1.2	10.74	1.99	1.65	0.32	2.47E-05
Costa 2A *	C2A	41619	4.0	4.8	0.0	17.42	2.96	0.29	2.54	6.10E-05
Costa 2B *	C2B	41619	4.9	6.8	0.4	10.96	1.59	0.70	0.27	6.44E-06
Costa 3	C3	19402	4.0	7.0	0.2	15.65	3.03	0.95	0.68	3.49E-05
Costa 4A *	C4A	24492	4.0	4.6	0.0	17.85	3.33	0.43	1.82	7.44E-05
Costa 4B *	C4B	24492	4.7	6.9	0.3	13.29	2.30	1.14	0.24	9.60E-06
Western Cordillera	CO1	24433	4.0	6.7	0.5	15.72	2.88	0.52	1.31	5.35E-05
Región Interandina 1	RI1	14389	4.0	6.9	0.4	7.96	0.98	0.31	0.26	1.79E-05
Región Interandina 2	RI2	3035	4.0	5.8	0.8	18.52	3.77	0.95	0.62	2.04E-04
Región Interandina 3	RI3	2778	4.0	6.6	0.3	9.41	1.47	0.47	0.34	1.20E-04
Región Interandina 4	RI4	6200	4.0	6.7	0.9	11.29	1.60	0.27	0.60	9.71E-05
Cordillera Real 1	CR1	18107	4.0	6.8	0.6	13.25	1.86	0.21	1.51	8.36E-05
Cordillera Real 2	CR2	74991	4.0	6.9	0.4	18.16	3.45	0.54	1.55	2.07E-05
Región Oriental 1	RO1	27569	4.0	6.8	0.3	15.59	2.83	0.46	1.40	5.07E-05
Región Oriental 2	RO2	47101	4.0	7.1	0.4	15.09	2.15	0.19	2.95	6.25E-05
Región Amazónica	A1	60682	4.0	5.0	0.2	12.68	2.43	1.21	0.38	6.23E-06
Sismicidad Interfase										
Interfase Norte A *	IFN_A	59914	4.0	5.9	0.0	14.06	1.87	0.10	6.61	1.10E-04
Interfase Norte B *	IFN_B	59914	6.0	8.8	0.7	8.74	1.00	0.37	0.14	2.37E-06
Interfase Centro A *	IFC_A	39396	4.0	5.3	0.0	14.55	2.09	0.14	4.48	1.14E-04
Interfase Centro B *	IFC_B	39396	5.4	7.9	0.1	10.29	1.30	0.39	0.24	6.12E-06
Interfase Sur	IFS	59122	4.0	7.5	0.4	13.99	1.87	0.11	6.21	1.05E-04
Sismicidad In-Slab										
In-slab Norte	ISN	81870	4.0	7.2	0.4	10.49	1.54	0.29	0.69	8.43E-06
In-slab Norte Centro	ISNC	49806	4.0	7.0	0.5	12.18	1.64	0.17	2.65	5.33E-05
In-slab Sur Centro	ISSC	66315	4.0	7.5	0.1	13.47	1.82	0.12	4.44	6.70E-05
In-slab Sur	ISS	202155	4.0	7.7	0.2	13.21	1.67	0.09	6.41	3.17E-05

Notación

*, Zonas con ajustes dobles; **AREA**: área de la zona fuente (km²); m_0 : magnitud mínima para la tasa; M_{max} : M_w : máxima esperada; α y β : parámetros de la relación Guetenberg-Richter; $\sigma \beta$: sigma de Beta; $\dot{N}(m_0)$: tasa de eventos con $M_w \geq m_0$; $\frac{\dot{N}(m_0)}{AREA}$: tasa de eventos $M_w \geq m_0$ dividido entre el área de la zona fuente. (Parra H. et al.)

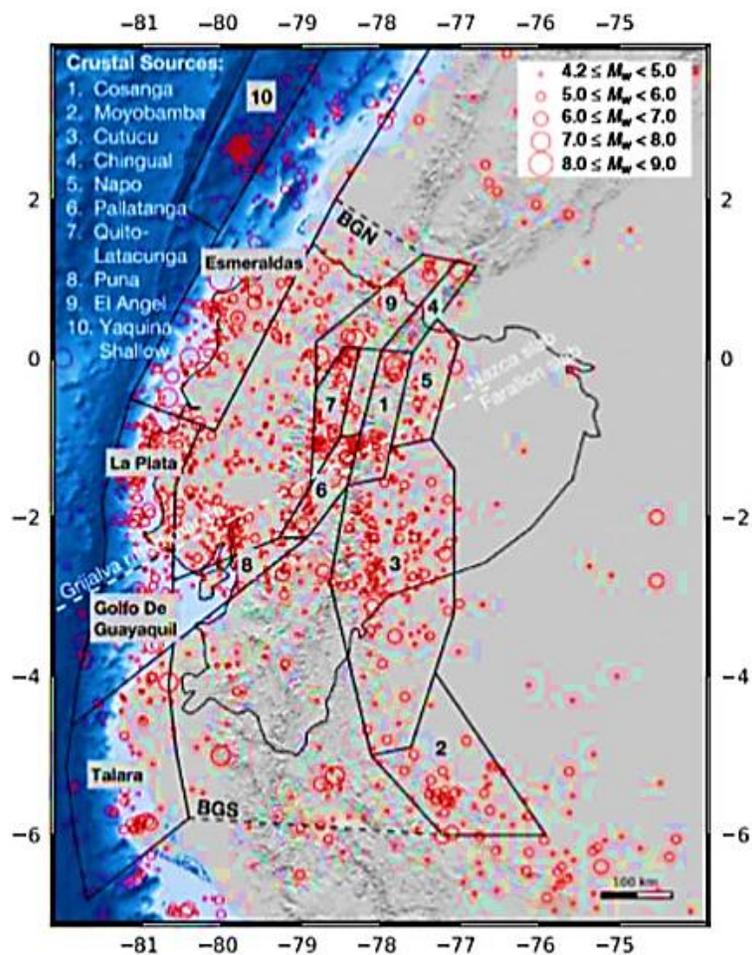
El nuevo modelo de Beauval et al. (2018), incorpora 4 zonas fuentes para los sismos interfase o interplaca, denominados de norte a sur, de la siguiente manera: Esmeraldas, La

Plata, Golfo de Guayaquil y Talara, en la figura 4.5.9 se puede identificar juntamente con las 10 zonas fuentes asociadas a sismos corticales. (Aguiar y Rivas, 2018)

La zona fuente Esmeraldas, tiene 50 km, más de longitud al sur, reduciendo la zona fuente denominada La Plata, en la zona sur se tenía una sola zona fuente y ahora se tiene dos: Golfo de Guayaquil y Talara.

Figura 28

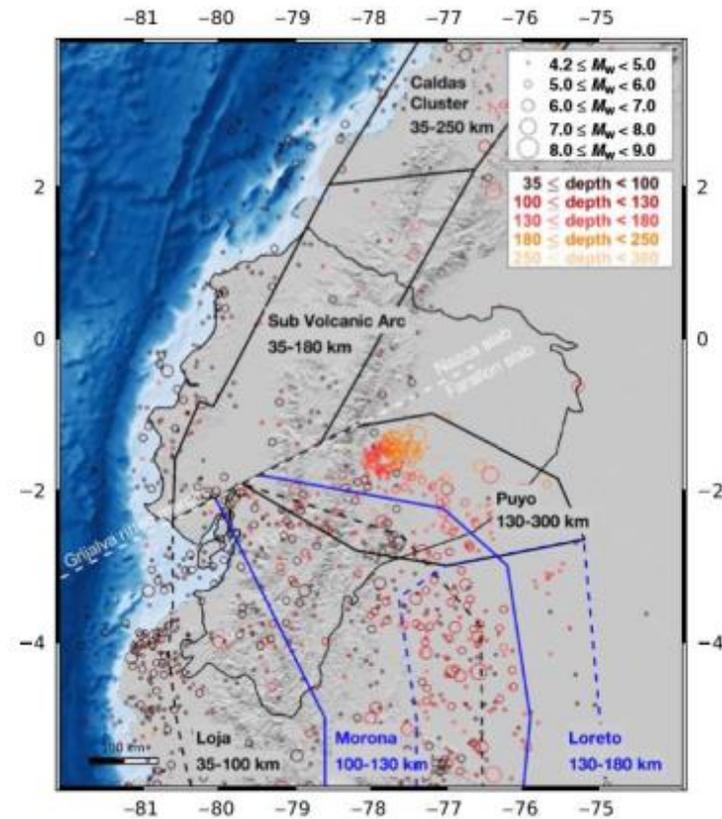
Zonas Fuentes Interfase y corticales



Nota: Tomado de: (Beauval et al., 2018)

Figura 29

Zonas Fuentes intraplaca



Nota: Tomado de: (Beauval et al., 2018)

En total se tiene 22 zonas fuentes: 4 Interfase o Interplaca, 6 Intraplaca, 10 corticales y 2 zonas fuentes de sismicidad de fondo denominadas BGN y BGS, donde van todos los sismos que no se pueden asignar a una de las áreas fuertes.

A continuación, se indican los parámetros de la sismicidad, para cada zona fuente del modelo de Beauval et al. (2018)

Tabla 6

Parámetros de sismicidad de las zonas fuentes del modelo de Beauval et al. (2018)

Catalog	Author	Type Magnitude	Minimum Magnitude	Maximum Magnitude	Minimum Year	Maximum Year	Total Number of Events
GEM	Various	M_w	5.1	7.8	1920	2000	106
GEM	Global CMT	M_w	5.56	8.09	1965	2013	101
GEM supp	Various	Proxy M_w	6.12	8.35	1906	1928	5
Global CMT	Global CMT	M_w	4.8	5.8	1977	2013	169
ISC	Global CMT	M_w	4.9	6.3	2007	2014	7
ISC	ISC	Proxy M_w from MS	6.4	6.5	1952	1953	2
ISC	ISC	Proxy M_w from m_b^*	4.28	6.16	1964	2014	2022*
ISC	NEIC	Proxy M_w from M_s	4.2	4.2	1990	1990	1
ISC	NEIC	Proxy M_w from m_b^*	4.28	5.6	1985	2014	25*
ISC	NEIS	Proxy M_w from m_b^*	4.28	5.21	1971	1978	44*
ISC	USCGS	Proxy M_w from m_b^*	4.28	6.02	1965	1965	18*
ISC	ABEI	m_b surrogate for M_w	7.1	7.2	1917	1937	2
ISC	AN2	M_s surrogate for M_w	7	7	1907	1912	2
ISC	P&S	M_w	7.2	7.2	1901	1901	1
ISC	PAS	M_s surrogate for M_w	6.5	6.8	1954	1958	4
ISC	PAS	M_s surrogate for M_w	5.5	6.8	1930	1950	21

Fuente: (Beauval et al., 2018)

Dónde: a , b , son parámetros del modelo de Gutenberg-Richter (GR) encontrados utilizando el catálogo BSSA 2013; $\lambda_{MW \geq 4.5}$ es la tasa de excedencia anual de sismos de magnitud mayor o igual a 4.5; M_0 es la magnitud mínima empleada para el modelo de GR; Número de eventos mayor a M_0 considerados en el modelo; M_{maxobs} es la magnitud máxima observada o registrada; M_{max} es la magnitud máxima que limita el modelo de GR; Rango de profundidad de la fuente: (*) Una función de densidad de probabilidad para la profundidad se construye a partir de las profundidades de los terremotos que pertenecen a cada fuente, distribuyendo los sismos entre las profundidades mínima y máxima; (†) Valor de b estimado en toda la Cordillera y planicie costera; (‡) Magnitud M_w estimada del terremoto de 1906, en el catálogo ISC-GEM (DI Giacomo et al. 2015); (§) el modelo de recurrencia se construye a partir de sismos que caen dentro del volumen de litosfera de la zona fuente, luego se distribuyen sobre un plano de falla de inmersión que se extiende desde la profundidad mínima a la máxima; (||) zonas fuentes que definen la sismicidad de fondo. (Beauval et al., 2018)

Curvas de peligro sísmico

Las curvas de peligrosidad sísmica representan la probabilidad de excedencia de distintos niveles de movimiento del parámetro elegido, que pueden obtenerse ya sea para la PGA como para diferentes SA(T) (Alvarado, 2012)

Mediante la ecuación 31 se puede escribir la probabilidad q , la aceleración del suelo a , para un periodo de tiempo (un año), excede un valor definido a la aceleración a_o .

$$q = P(a \geq a_o), 1\text{año}. \quad (31)$$

La probabilidad de excedencia se relaciona con el periodo de recurrencia PR mediante la ecuación 32 la cual es aproximadamente igual a la inversa de la tasa anual de excedencia de $a \geq a_o$

$$PR = \frac{1}{q} \approx \frac{1}{\lambda} \quad (32)$$

Se define a q_o a la probabilidad de excedencia, de que como mínimo se tenga un evento que tenga una aceleración mayor o igual al valor de a_o , en un tiempo t , mostrada en la siguiente ecuación.

$$q_o = 1 - (1 - q)^t \quad (33)$$

Al remplazar la ecuación (32) en (33) se obtiene:

$$q_o = 1 - \left(1 - \frac{1}{PR}\right)^t \quad (34)$$

Las normativas sísmicas como la Norma ecuatoriana de la construcción (NEC15), presentan espectros para una probabilidad de excedencia del 10% ($q_o = 0.10$) en 50 años

($t=50$ años), si reemplazamos estos dos valores en la ecuación (34) se obtiene el periodo de retorno de 475 años.

$$q_o = 1 - \left(1 - \frac{1}{PR}\right)^t \quad (35)$$

$$0.10 = 1 - \left(1 - \frac{1}{PR}\right)^{50}$$

$$PR = 475 \text{ años}$$

Podemos decir que el periodo de retorno está asociada a una recurrencia media para que ocurra un evento o sismo que supere un valor a_o fijado. (Aguiar R. , 2018)

Factores de sitio de NEHRP (2015)

Con el fin de hallar los factores de amplificación de las ondas sísmicas de acuerdo con el tipo de suelo se utilizará las recomendaciones de NEHRP 2015, en el cual, de acuerdo con las propiedades del suelo, el suelo se clasifica como suelo tipo A, B, C, D, E o F.

A continuación, se presentan los valores de amplificación para PGA, los cuales guardan relación con el valor de la aceleración PGA, ya sea en roca o en suelo bueno, en la tabla 26, en la cual en la primera columna se tiene los valores para cada tipo de suelo cuando PGA es menor o igual a 0.1g, y en la última columna se presentan los valores cuando PGA es mayor o igual a 0.6g.

En la tabla 7 se presentan los valores de amplificación para periodos cortos, en la primera columna se tiene los valores para periodos menores a 1s y mayores a cero, mientras que en la última columna se presentan los factores de amplificación para periodos mayores a 1.50 segundos, por lo que se puede decir que mientras más baja es la

aceleración espectral, mayor será el factor de amplificación, en la metodología ASCE7 16 estos valores se los conoce como F_a .

Finalmente, en la tabla 9 Se presentan los factores de amplificación para periodos mayores o igual a 1.0 segundos , en la metodología ASCE7 16 estos valores se los conoce como F_v

Al tener suelos tipo “E o F” se recomienda, hacer un mejoramiento de suelo

Tabla 7

Factores de Amplificación para el PGA

Fuente: NEHRP 2015

Suelo	≤ 0.1	$PGA = 0.2$	$PGA = 0.3$	$PGA = 0.4$	$PGA = 0.5$	$PGA \geq 0.6$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1
E	2.4	4.9	1.6	1.4	1.2	1.1

Tabla 8

Factores de Amplificación para periodos cortos

Fuente: NEHRP 2015

Suelo	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$	$S_s \geq 1.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.2	1.2	1.0	1.0
E	2.4	4.9	1.3	-	-	-

Tabla 9

Factores de Amplificación para periodos largos

Fuente: NEHRP 2015

Suelo	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 = 0.5$	$S_1 \geq 0.6$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4

D	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
E	4.2	-	-	-	-	-

Desagregación sísmica

La desagregación de la amenaza sísmica es la combinación de parámetros como la magnitud, y la distancia de la fuente al sitio de interés, los cuales contribuyen a un nivel de peligro sísmico específico.

El peligro sísmico puede expresarse en términos del espectro de respuesta , en donde los eventos identificados que están asociados con alas frecuencias pueden ser empleados como escenarios para evaluar las estructuras nuevas o existentes. Por lo que mediante este estudio se puede identificar eventos o escenarios que producen un peligro para varios sitios seleccionados, o en si para un solo lugar en estudio. (Pozos Estrada y otros, 2014)

Se puede decir que el objetivo principal de la desagregación de la peligrosidad sísmica es identificar el terremoto que contribuye con mayor excedencia de movimiento del suelo.

Para lograr este objetivo se realiza la descomposición de la peligrosidad total en contribuciones parciales, identificando que combinación de magnitud y distancia está contribuyendo más a la excedencia total del movimiento (Aguiar R. , 2018)

Capítulo 4

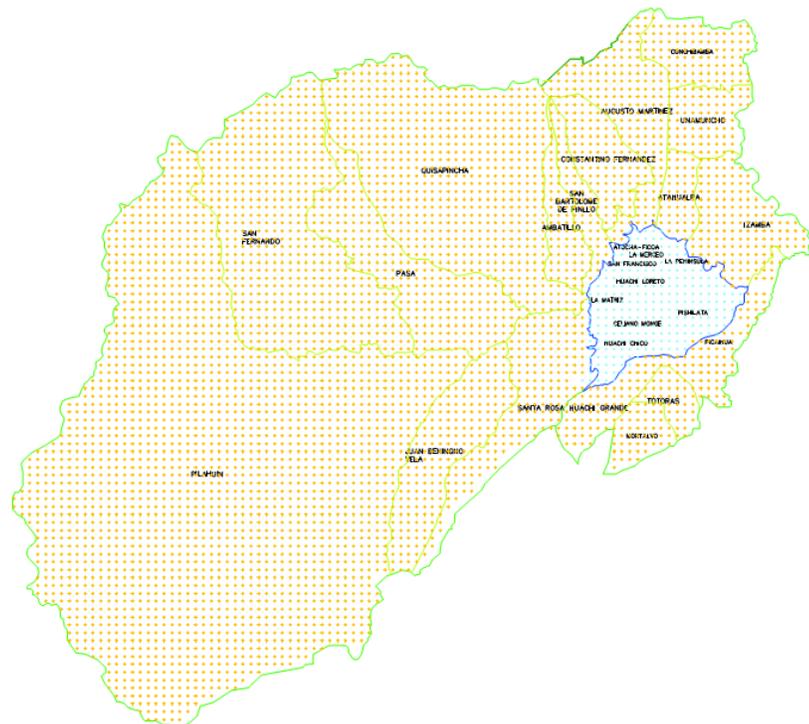
Resultados y discusión

Metodología determinística para encontrar espectros de aceleración horizontal para la ciudad de Ambato

Para determinar los espectros de control para la componente horizontal del movimiento del suelo, es mediante un estudio de peligrosidad sísmica Determinístico; para lo cual se ha creado una malla de puntos equidistantes cada 500 metros tanto en el sentido Norte- Sur y Este -Oeste dentro del área urbana y rural de la ciudad de Ambato, se muestra la figura 30 y se clasifico de acuerdo con el tipo de suelo.

Figura 30

Malla de puntos

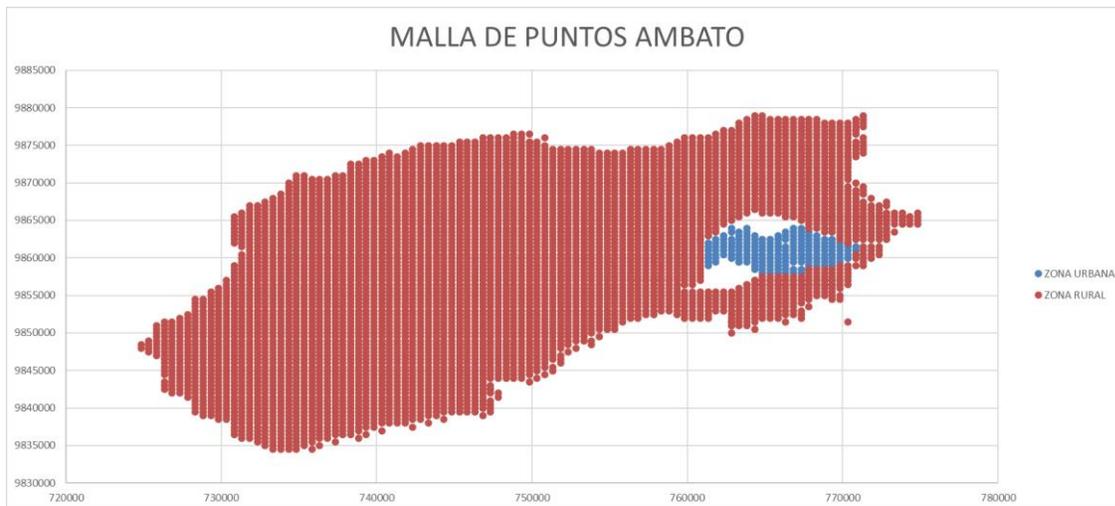


Nota: El grafico presenta la malla de puntos equidistante cada 500 m, para zona urbana y rural de la ciudad de Ambato

En este caso se clasifico toda la zona rural como suelo tipo "C", y suelo tipo "D", debido a la falta de ensayos para la clasificación del suelo

Figura 31

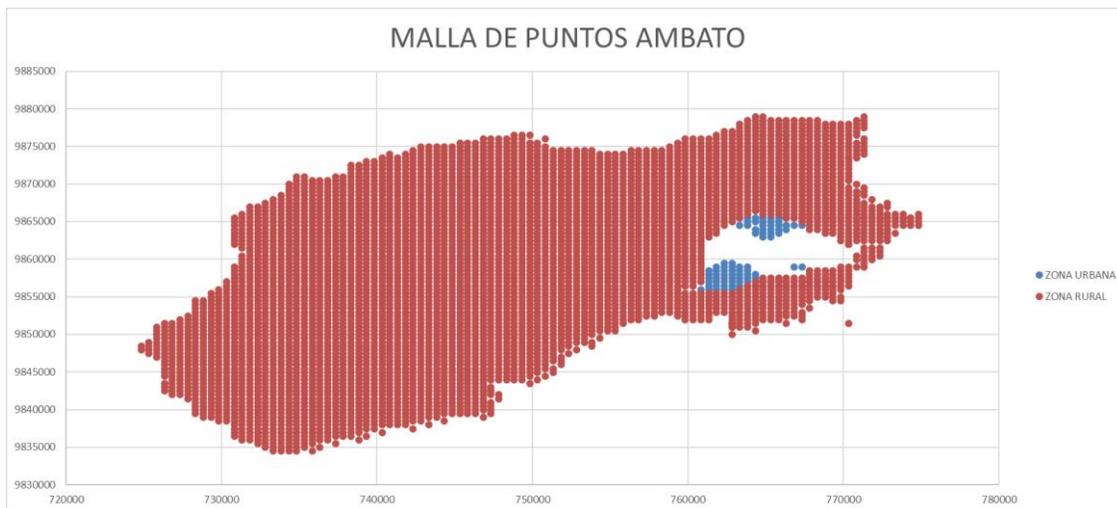
Malla de puntos de la ciudad de Ambato



Nota: El grafico presenta la clasificación de los suelos, de color azul se presentan los suelos de la zona Urbana, con un perfil de suelo tipo "C", mientras de color rojo se encuentran los suelos de la zona rural, de igual manera para un perfil de suelo tipo "C".

Figura 32

Malla de puntos de la ciudad de Ambato



Nota: El grafico presenta la clasificación de los suelos, de color azul se presentan los suelos de la zona Urbana, con un perfil de suelo tipo “D”, mientras de color rojo se encuentran los suelos de la zona rural, de igual manera para un perfil de suelo tipo “D”.

Se observo en la figura 30 que la parroquia de Pilahuin con un área de 419,5 km² consta con más de 2000 puntos equidistantes cada 500 metros al ser un área extensa para su estudio se hizo dos análisis el uno considerando la parroquia y el otro sin considerarla

En la tabla 10, se presentan las fallas que van a considerarse en el Método Determinístico para hallar los espectros ante la componente horizontal de movimiento del suelo. Ahí se indica la magnitud máxima esperada en cada falla hallada con las ecuaciones propuestas por Leonard (2010) y la ecuación de Wells & Coppersmith (1994) indicada en el capítulo dos, para el cálculo de la magnitud se utilizó como parámetro base la longitud de la rotura en la superficie de la falla (L) y el Área (A). Para las siete fallas se encontró la magnitud, se obtuvo un promedio y se redondeó al valor máximo superior (Aguir & Serrano, 2020)

Tabla 10

Parámetros de las Fallas ciegas que atraviesan el área urbana y rural de la ciudad de Ambato

FALLA	δ	λ	M	L (Km)	A (Km ²)	W (Km)	TIPO
Ambato	45	90	6.5	16.3	97.80	6	Inversa Ciega
Huachi	45	90	6.3	12.04	72.24	6	Inversa Ciega
Totoras	45	90	6.5	17.65	105.90	6	Transcurrente Inversa Ciega
F-10	45	90	6.1	15.0	120	8	Inversa
F11	45	90	6.6	11.0	99	9	Inversa
F-16	85	5	6.2	18.0	144	8	Cizalla Dextral
F-28	45	90	6.0	13.0	91	7	Normal

Periodo de recurrencia

Para conocer el periodo de recurrencia de los sismos de magnitud máxima, se tiene dos formas : i) Método del Terremoto Característico; ii) Método de Gutenberg y Richter modificado, los mismos que se presentan a continuación.

Las variables todavía no definidas son: μ es el módulo de rigidez o de cizalla ($\mu \approx 3 * 10^9 \frac{kgf}{m^2}$), \dot{u} es la tasa de deslizamiento; A es el área del plano de falla; M_w es la magnitud de momento.

En la tabla 11 se presenta el Periodo de Recurrencia hallado con el modelo del **Terremoto Característico**, para las fallas que se han indicado en la tabla 10 , con una tasa de movimiento de 3.5 mm/año y un módulo de deformación en roca de $3 * 10^9 \frac{kgf}{m^2}$

Tabla 11

Períodos de recurrencia encontrados con el Método del Terremoto Característico para las fallas consideradas en el estudio.

Falla	M_0 (Dyn*cm)	M_0 (N*m)	$A=L*w$ (m^2)	\dot{M}_0 (kgf m/año)	\dot{M}_0 (N m /año)	T_r (años)
Huachi	$3.16*10^{25}$	$3.16*10^{18}$	$72.24*10^6$	$7.585*10^{15}$	$7.585*10^{16}$	425.1
Ambato	$6.3*10^{25}$	$6.3*10^{18}$	$97.8*10^6$	$1.027*10^{15}$	$1.027*10^{16}$	626.5
Totora	$6.3*10^{25}$	$6.3*10^{18}$	$105.9*10^6$	$1.112*10^{15}$	$1.112*10^{16}$	578.6
F10	$4.47*10^{25}$	$4.47*10^{18}$	$120*10^6$	$1.260*10^{15}$	$1.260*10^{16}$	361.5
F11	$3.16*10^{25}$	$3.16*10^{18}$	$99*10^6$	$1.040*10^{15}$	$1.040*10^{16}$	310.2
F16	$6.31*10^{25}$	$6.31*10^{18}$	$144*10^6$	$1.512*10^{15}$	$1.512*10^{16}$	425.5
F28	$3.16*10^{25}$	$3.16*10^{18}$	$91*10^6$	$9.555*10^{15}$	$9.555*10^{16}$	337.4

Se puede considerar que la falla geológica puede producir terremotos de diferente magnitud, con periodos de recurrencia diferente, para lo cual es necesario evaluar desde el punto de vista de otros autores como es el modelo de **Gutenberg y Richter modificado**.

Las fallas indicadas en la figura 22, se encuentran en la zona fuente 6, conocida como *Falla de Pallatanga*, del modelo de Beauval *et al.* (2018). Se hace referencia a este trabajo ya que se va a trabajar con los parámetros de sismicidad $a = 2.8012$; $b = 0.73$, del modelo clásico de Gutenberg y Richter $\log N = a - b M$. Los valores anotados fueron hallados para la zona fuente 6. (Aguiar & Serrano , Metodología para evaluar la peligrosidad Sismica del area urbana y rural de la ciudad de Ambato en forma deterministica, 2020)

A continuación, se presenta los periodos de recurrencia hallados para las 7 fallas geológicas

Tabla 12

Período de recurrencia, hallada con el modelo de GR modificado en la falla Ambato

M	TASA ANUAL ACUMULADA	TASA ANUAL NO ACUMULADA	PERÍODO DE RECURRENCIA
	$\dot{N}_{(m)}$	$\hat{N}_{(m)}$	A
4.5	0.0490	0.0289	34.65
5.0	0.0201	0.0125	80.31
5.5	0.0077	0.0054	186.11
6.0	0.0023	0.0023	431.28
6.5	0.0000	0.0001	676.45

En la tabla 12, se presenta el cálculo del período de recurrencia, en la falla Ambato y a continuación se describe su contenido, para entender la forma de cálculo.

En la primera columna se presenta la magnitud (m) considerada; en la segunda columna la tasa anual acumulada $\dot{N}_{(m)}$ de sismos mayor a la magnitud (m); en la tercera columna, la tasa anual $\hat{N}_{(m)}$ no acumulada de sismos que se obtiene restando la tasa anual acumulada de dos magnitudes consecutivas, finalmente se tiene el período de recurrencia que no es más que la inversa de la tasa anual no acumulada. (Aguiar & Serrano , 2020)

Tabla 13

Períodos de recurrencia, hallado con modelo de GR modificado para las fallas de Huachi y Totoras

Falla de Huachi				Falla de Totoras			
m	$\dot{N}_{(m)}$	$\hat{N}_{(m)}$	T_r	m	$\dot{N}_{(m)}$	$\hat{N}_{(m)}$	T_r
4.5	0.0510	0.0305	32.82	4.5	0.0530	0.0312	32.04
5.0	0.0205	0.0131	76.05	5.0	0.0218	0.0135	74.25

5.5	0.0074	0.0057	176.24	5.5	0.0083	0.0058	172.06
6.0	0.0017	0.0017	276.43	6.0	0.0025	0.0025	398.73
6.3	0.0000	0.0000	336.54	6.5	0.0000	0.0000	625.40

Tabla 14

Períodos de recurrencia, hallado con modelo de GR modificado para las fallas F10 y F11

Falla F10				Falla F11			
m	$\dot{N}_{(m)}$	$\hat{N}_{(m)}$	T_r	m	$\dot{N}_{(m)}$	$\hat{N}_{(m)}$	T_r
4.5	0.0720	0.0427	23.43	4.5	0.0700	0.0418	23.91
5.0	0.0293	0.0184	54.30	5.0	0.0282	0.0180	55.41
5.5	0.0109	0.0079	125.82	5.5	0.0101	0.0078	128.40
6.0	0.0030	0.0030	338.63	6.0	0.0023	0.0023	201.40
6.4	0.0000	0.0000	551.44	6.3	0.0000	0.0000	274.40

Tabla 15

Períodos de recurrencia, hallado con modelo de GR modificado para las fallas F16 y F28..

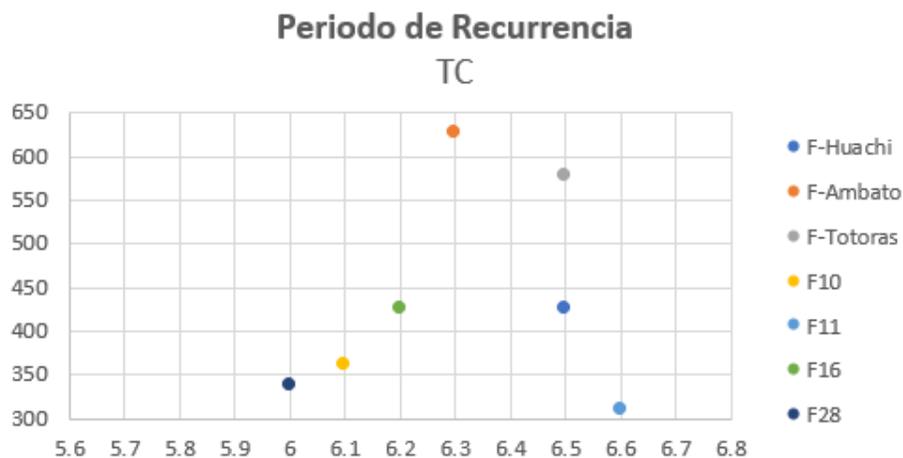
Falla F16				Falla F28			
m	$\dot{N}_{(m)}$	$\hat{N}_{(m)}$	T_r	m	$\dot{N}_{(m)}$	$\hat{N}_{(m)}$	T_r
4.5	0.0720	0.0424	23.58	4.5	0.0650	0.0388	25.75
5.0	0.0296	0.0183	54.65	5.0	0.0262	0.0168	59.67
5.5	0.0113	0.0079	126.66	5.5	0.0094	0.0072	138.28
6.0	0.0034	0.0034	293.51	6.0	0.0022	0.0022	216.89
6.5	0.0000	0.0000	460.37	6.3	0.0000	0.0000	295.50

En las tablas 12 a 15 se muestra el período de recurrencia hallado para las otras 6 fallas geológicas . El período de recurrencia para tener un sismo con magnitud máxima en alguna de las fallas que pueden afectar al área urbana y rural de Ambato varía entre 274 y 676 años.

En la figura 33, se presenta en forma gráfica los resultados del período de recurrencia, hallados para cada una de las fallas ciegas que atraviesan la ciudad de Ambato. En la figura 33, se tienen los resultados con el Método del Terremoto Característica y en la figura 34, con el de Gutenberg y Richter.

Figura 33

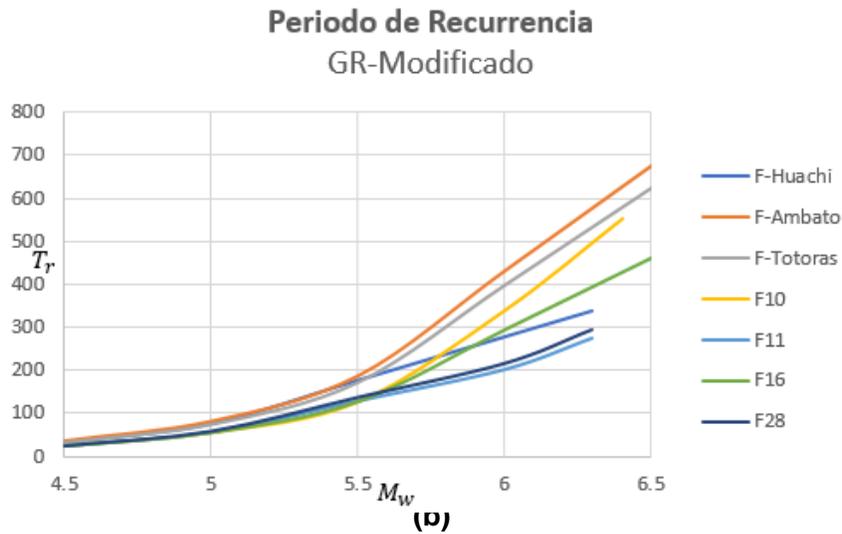
Periodo de Recurrencia modelo del Terremoto Característico



Nota: El grafico presenta el periodo de recurrencia hallado a través del modelo del Terremoto Característico, para cada falla geológica que atraviesa la ciudad de Ambato.

Figura 34

Periodo de Recurrencia modelo de Gutenberg y Richter modificado



Nota: El grafico presenta el periodo de recurrencia hallado a través del modelo de Gutenberg y Richter modificado, para cada falla geológica que atraviesa la ciudad de Ambato.

Cálculo de espectros

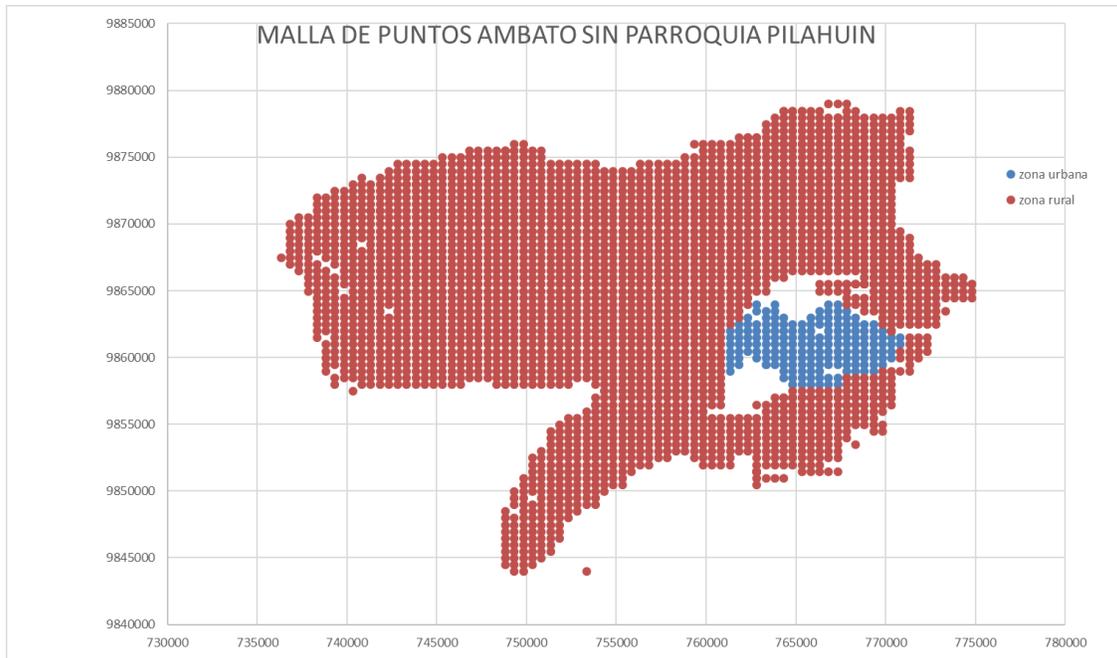
Espectros de aceleración horizontal del suelo para la ciudad de Ambato

Resultados en perfil sísmico C

Al presentarse un sismo de magnitud 6.5, en la falla Ambato los espectros promedios de los modelos seleccionados de toda la malla de puntos de la ciudad de Ambato zona urbana y rural sin considerar la parroquia Pilahuin, indicados en la figura 31

Figura 35

Malla de puntos Ambato suelo tipo "C"

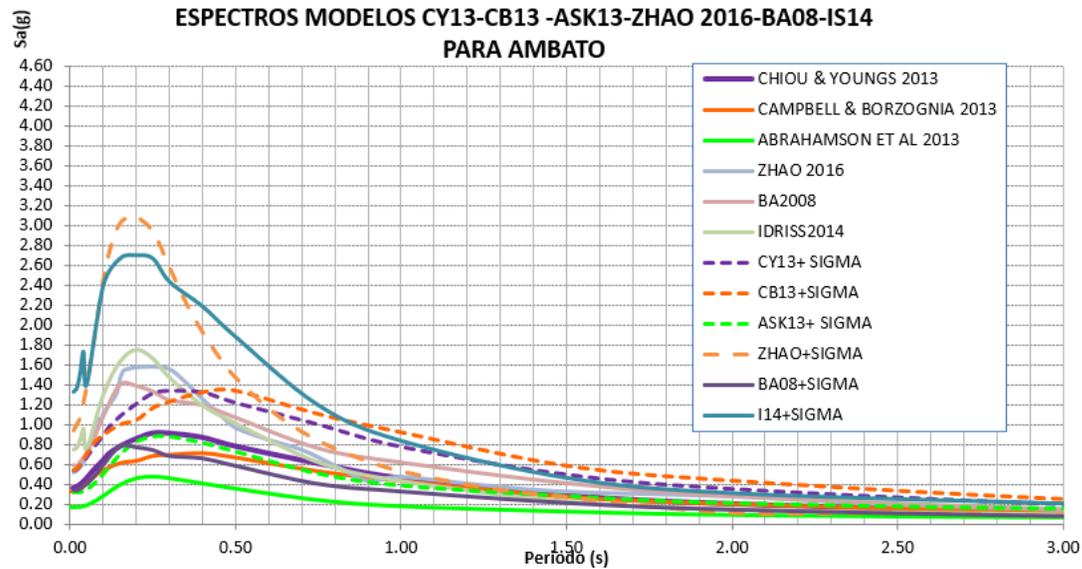


Nota: El grafico presenta la malla de puntos de la zona urbana y rural de la ciudad de Ambato, sin incluir la parroquia Pilahuin, para un perfil tipo "C"

Una vez identificada la malla de puntos cada 500m en los dos sentidos, se encontró los espectros en cada uno de los modelos mencionados en el anterior apartado en el área urbana, considerando un sismo de magnitud máxima de 6.5 correspondiente a la Falla Ambato, y en la figura 37 se tiene los espectros promedios para el área rural, se obtuvo los espectros promedio para el área urbana y rural a los que les llamaremos "valores medios". Se presenta los valores medios (50%), y valores medios más una desviación estándar.

Figura 36

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla Ambato-área urbana, $V_{s30}=380$ m/s

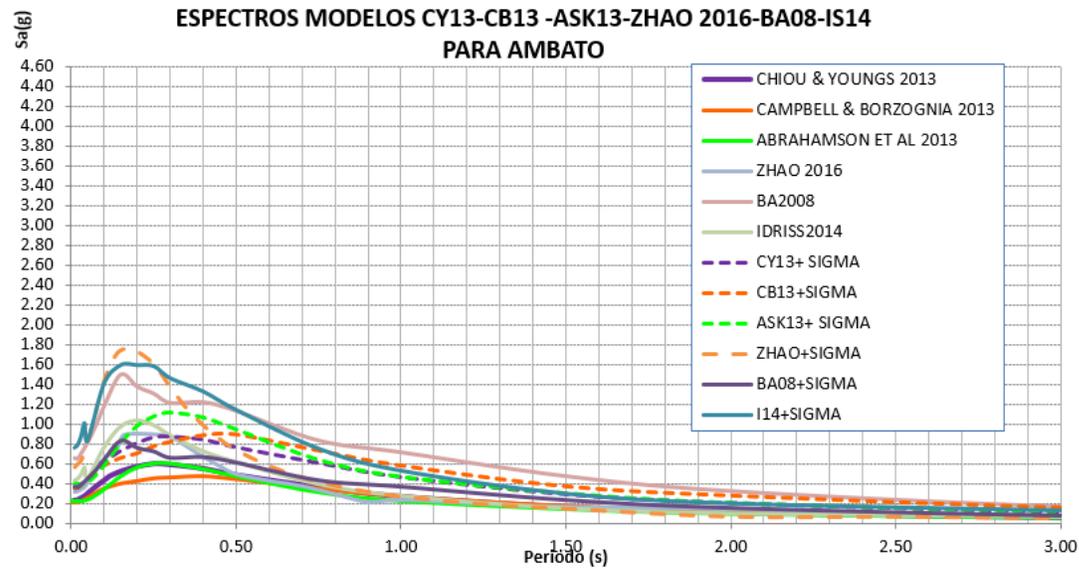


Nota: El gráfico presenta los valores medios obtenidos para la falla Ambato área urbana, en línea continua se muestra los valores medios para las seis ecuaciones de movimientos fuertes y con línea entre cortada se presentan los valores medios más la desviación estándar.

En la figura 38 se presenta los valores medios para un sismo de magnitud 6.3, correspondiente a la falla de Huachi y en la figura 40, corresponde al caso de que el sismo se genera en la falla de Totoras con una magnitud de 6.5

Figura 37

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla Ambato-área rural, $V_{s30}=380$ m/s



En la figura 36 y 37, se presenta los espectros medios, el nivel de confianza es del 54% y en línea entrecortada se presentan los espectros medios más una desviación estándar, el cual tiene una confiabilidad del 84% (Aguar y Serrano , 2020)

Figura 38

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "C", en la Falla de Huachi-área urbana, $V_{s30}=380$ m/s

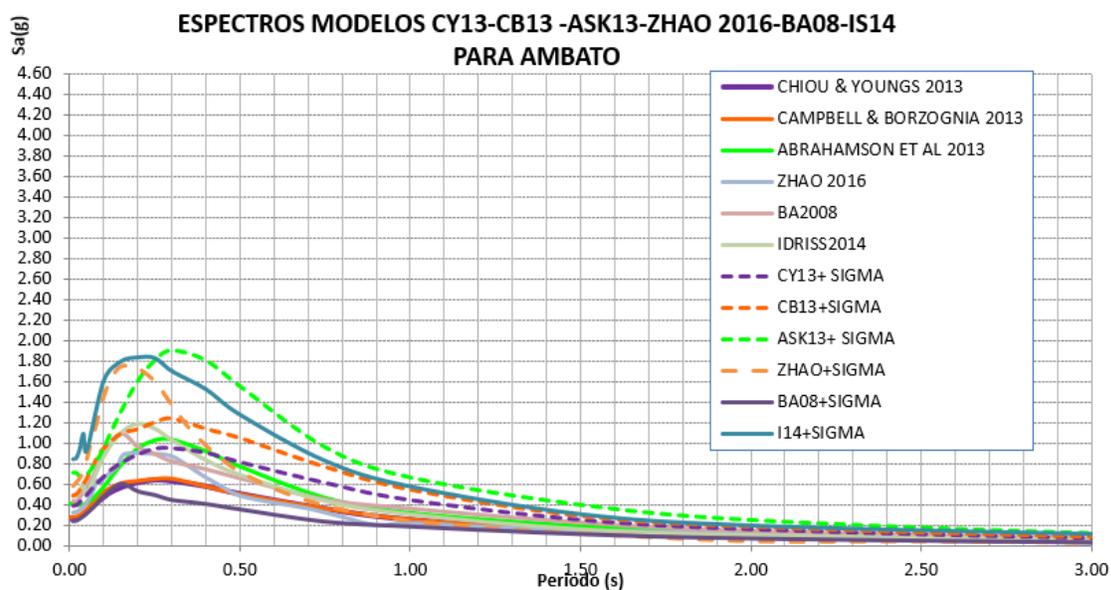
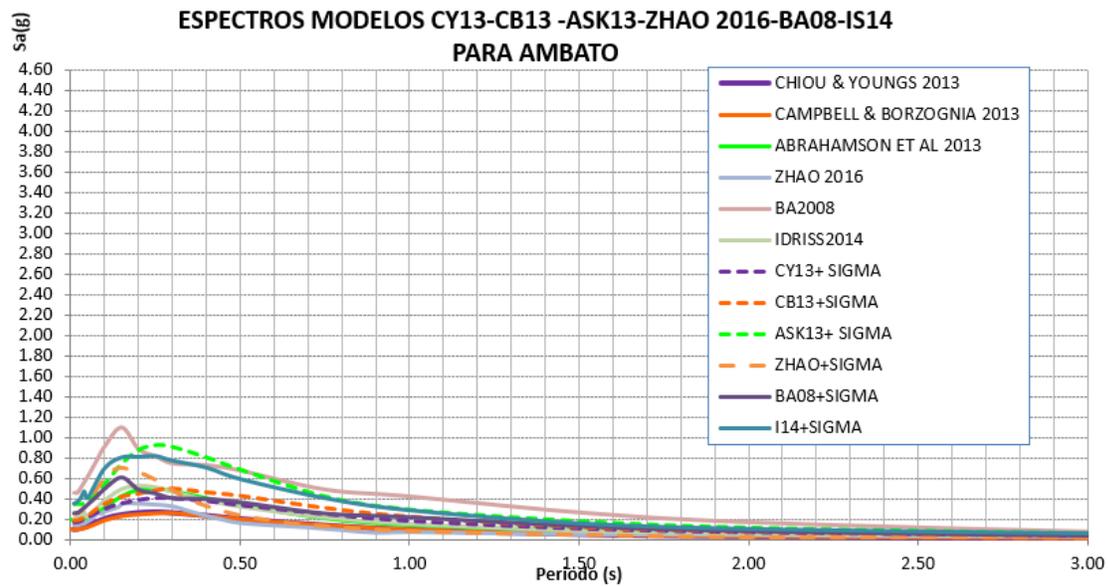


Figura 39

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "C", en la Falla de Huachi-área rural, $V_{s30}=380$ m/s



Ahora, en la figura 40, se presentan los espectros de respuesta elásticos en el caso de que se produzca un sismo de magnitud 6.5 correspondiente a la Falla de Totoras; los espectros presentados en la figura 40, son para el área urbana y los de la 41, para el área rural respectivamente.

Figura 40

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla de Totoras-área urbana, $V_{s30}=380$ m/s

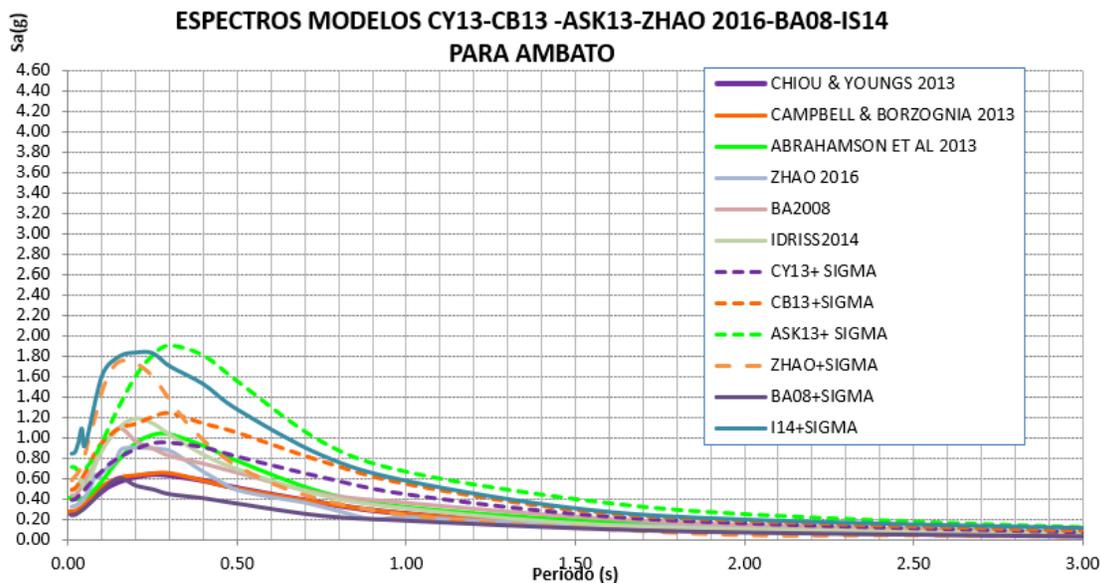
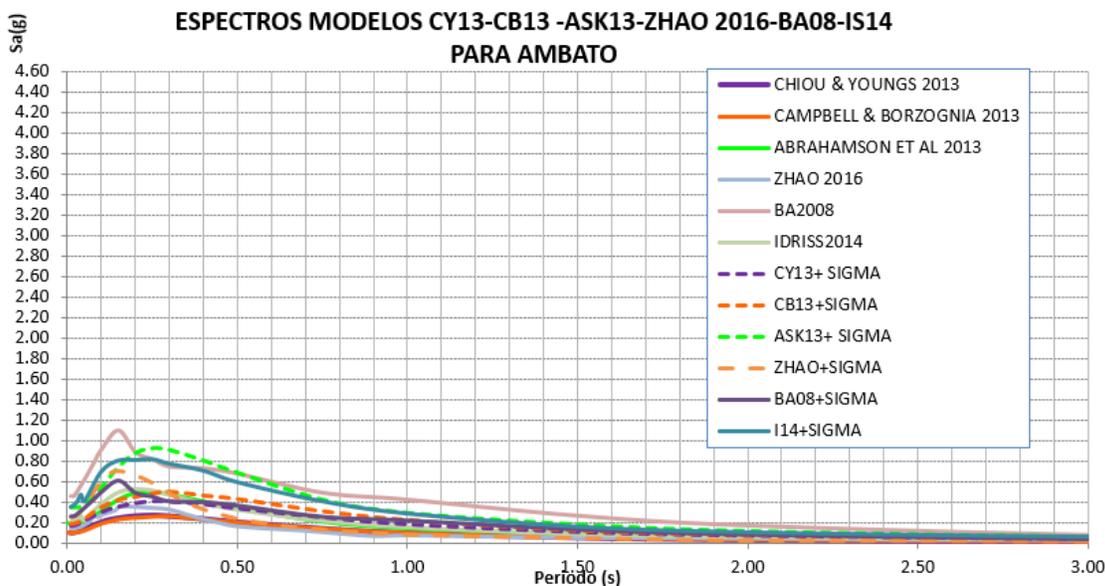


Figura 41

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla de Totoras-área rural, $V_{s30}=380$ m/s



En el estudio de microzonificación sísmica del área urbana realizada en el año 2018, se consideró en su estudio las tres fallas: Ambato, Huachi y Totoras, como se puede observar en las figuras 36 a la 41, las fallas no generan espectros altos en la zona rural, debido a su posición afectan de manera directa a la zona urbana.

Ahora se van a considerar otras fallas, algunas de ellas se encuentran en el límite del área urbana como son las fallas F10 y F11. En la figura 42 se presentan los espectros asociados a la Falla F10; como se encuentra en el límite entre el área urbana y rural sus espectros son parecidos en estas dos áreas y tiene menores valores a las encontradas con las tres fallas precedentes, de tal manera que estuvo bien no considerarla en el estudio realizado en 2018, para el área urbana. (Aguiar y Serrano , 2020)

Figura 42

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "C", en la Falla F-10 área urbana, $V_{s30}=380$ m/s

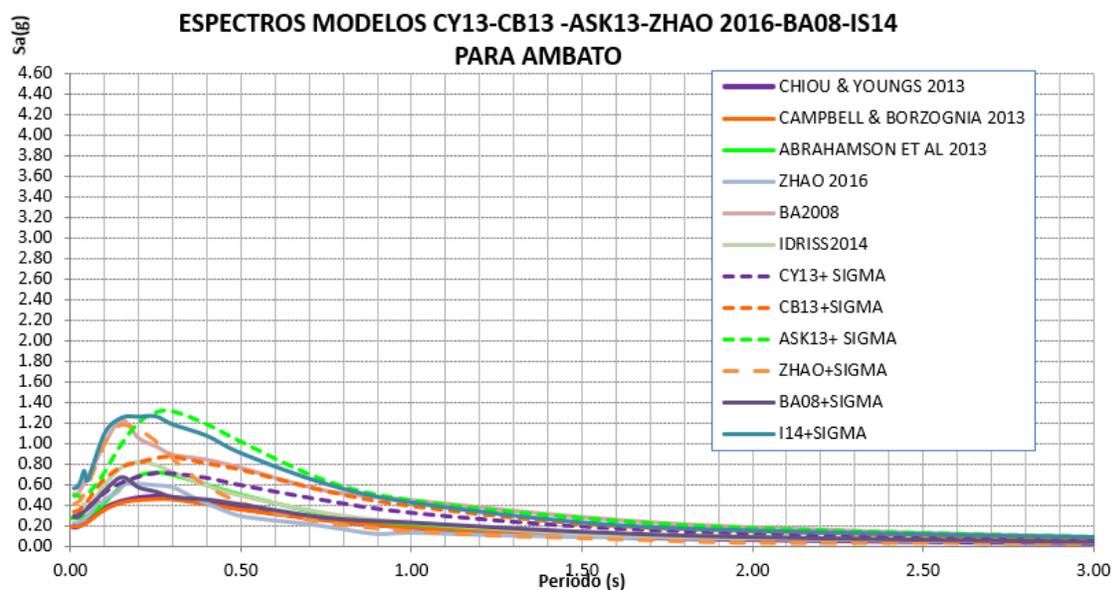
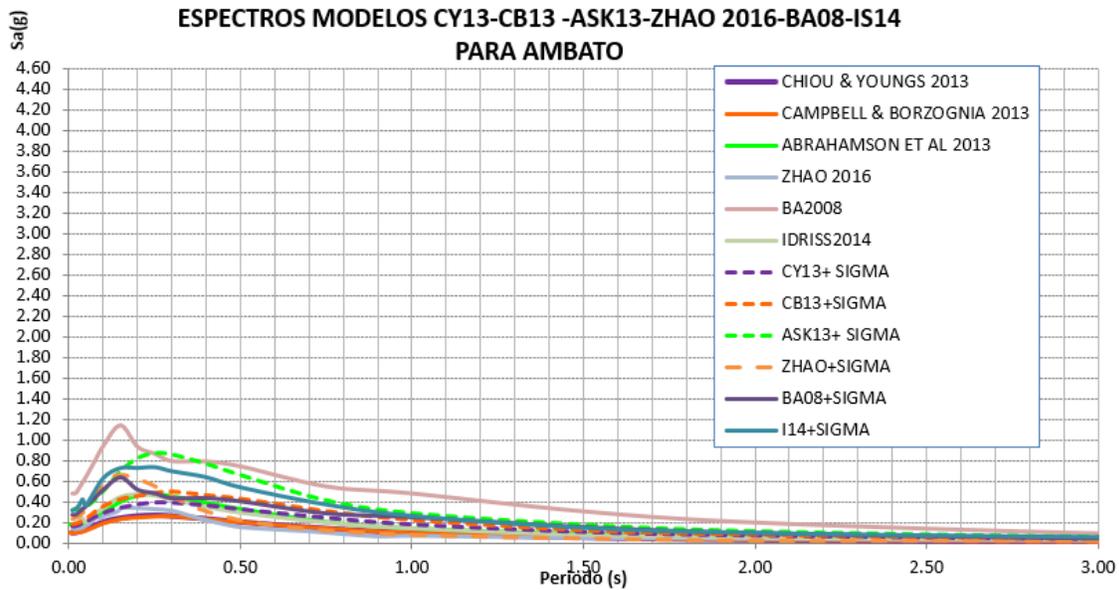


Figura 43

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "C", en la Falla de F-10 rural, $V_{s30}=380$ m/s



Ahora en la figura 42 se presenta los valores medios para un sismo de magnitud 6.1, en la zona urbana, correspondiente a la falla F-10 y en la figura 43, corresponde al caso de que el sismo se genera en la falla F-10 con una magnitud de 6.1 área rural

Figura 44

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "C", en la Falla F-11 área urbana, $V_{s30}=380$ m/s

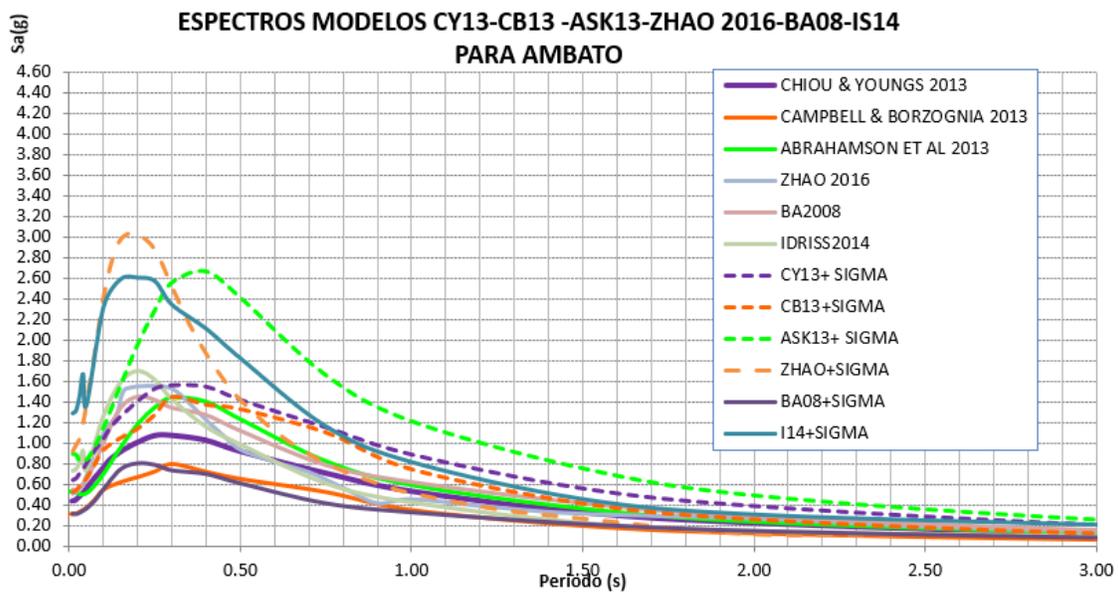
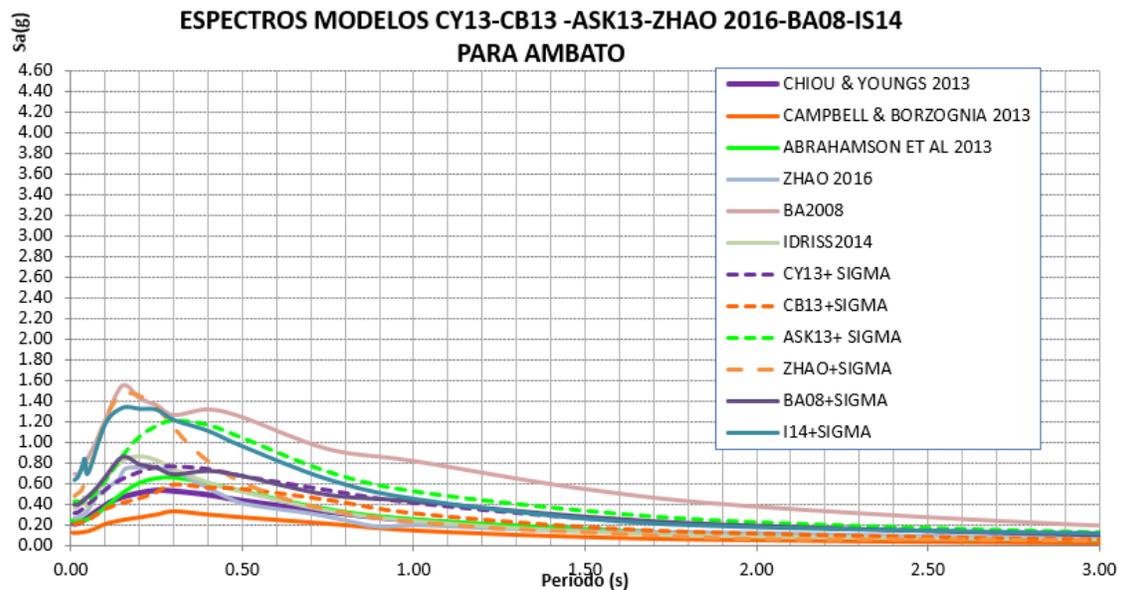


Figura 45

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "C", en la Falla F-11 área rural, $V_{s30}=380$ m/s



La falla F11, si presenta valores altos de los espectros que son comparables con los espectros de las fallas de Ambato, Huachi y Totorá. Esto no se esperaba y vale la pena actualizar el estudio de microzonificación sísmica del área urbana de Ambato, habida cuenta que se dispone de una clasificación de los suelos.

En la figura 46 se presenta los valores medios para un sismo de magnitud 6.2, correspondiente a la falla F-16 y se concluye con los valores medios y medios más una desviación estándar correspondientes a la falla F-28 con una magnitud de 6.0 correspondiente a la figura 15

Figura 46

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "C", en la Falla F-16 área urbana, $V_{s30}=380$ m/s

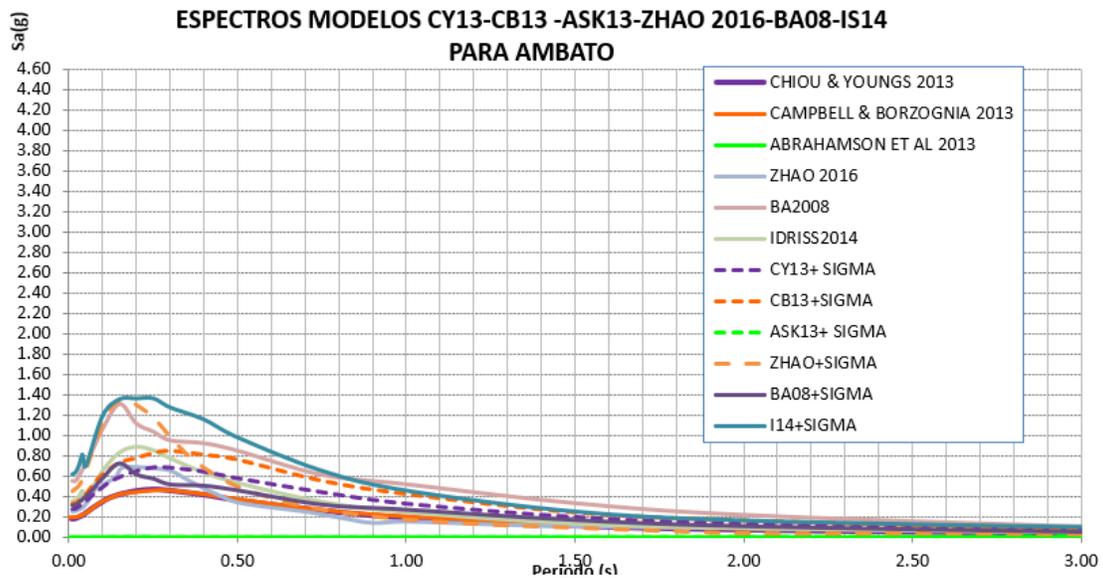
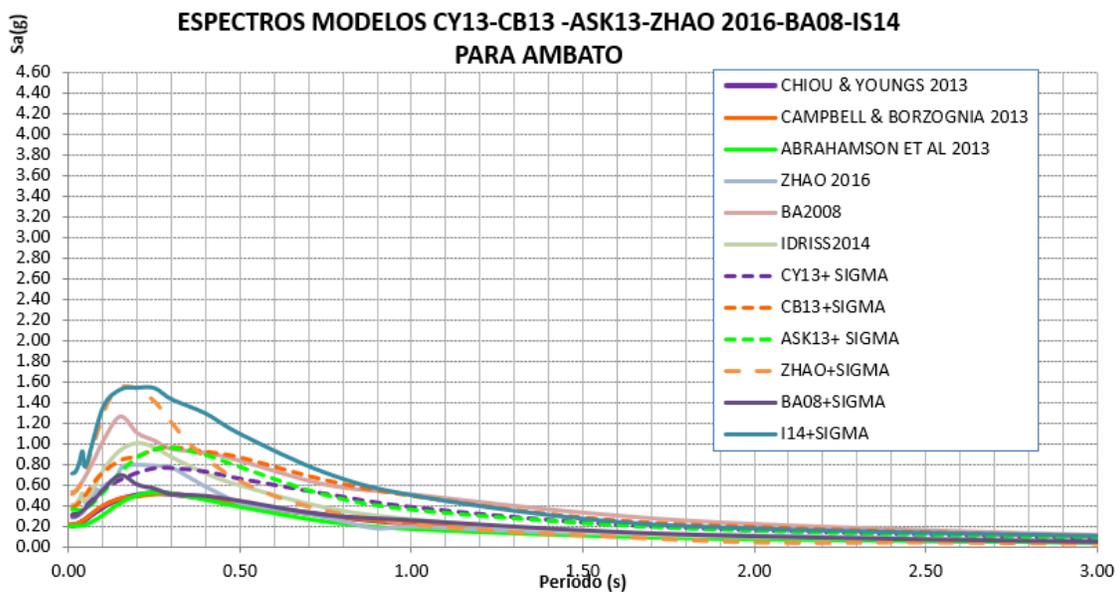


Figura 47

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "C", en la Falla F-16 área rural, $V_{s30}=380$ m/s



Los espectros que se generan con las diferentes ecuaciones de movimientos fuertes ante un sismo en la falla F16, de magnitud 6.2, se observan en la figura 46, para el área urbana y en la figura 47, para el área rural. Al comparar estos grupos de espectros se ve

que los del área rural, son ligeramente mayores a los del área urbana. Los espectros del área urbana hallados con un sismo en la falla F16 son menores a los obtenidos en la microzonificación sísmica de Ambato de 2018 (Aguiar y Serrano , 2020)

Figura 48

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "C", en la Falla F-28 área urbana, $V_{s30}=380$ m/s

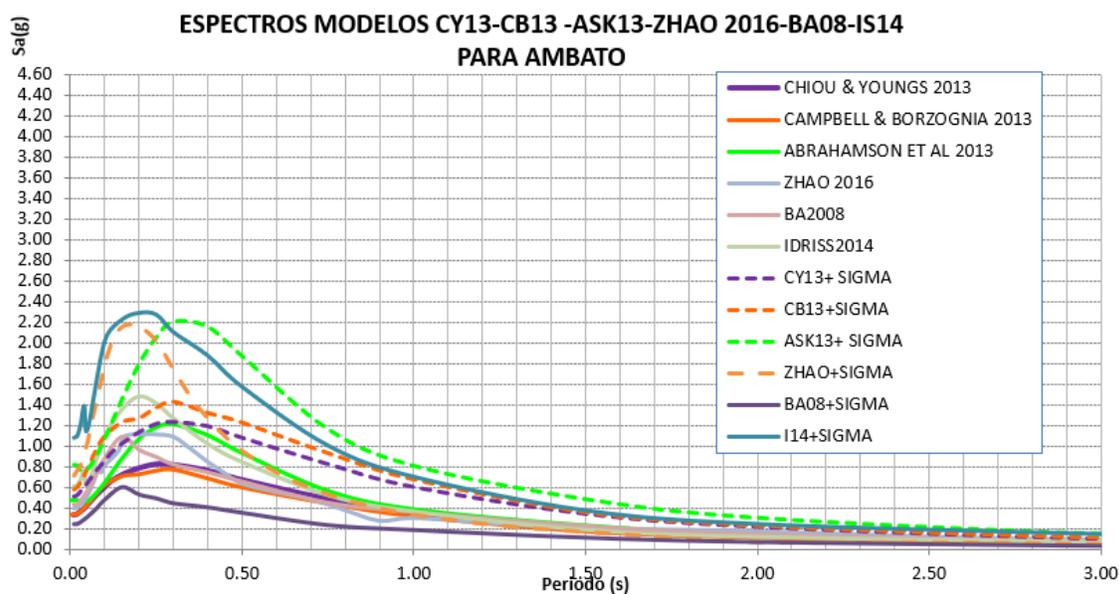
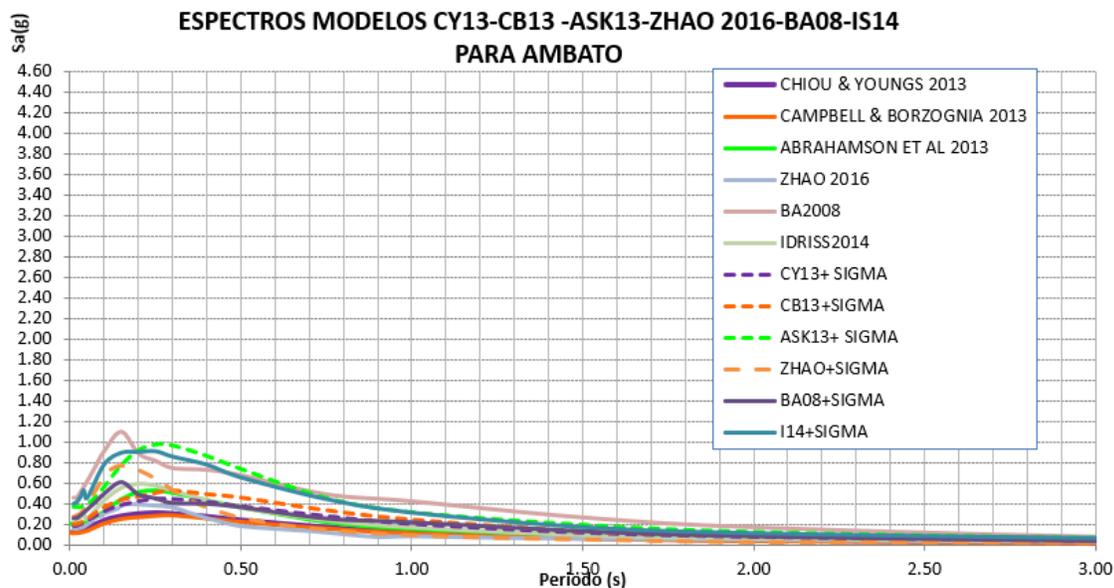


Figura 49

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "C", en la Falla F-28 área rural, $V_{s30}=380$ m/s



Resta por indicar los espectros promedios que se obtienen a partir de un sismo de magnitud 6, en la falla F28. En la figura 48, se ven los espectros para el área urbana, los mismos que son comparables a los encontrados en la microzonificación sísmica de 2018, para el área urbana. Para el área rural, son bajos los espectros generados por un hipotético sismo en la falla F28. (Aguiar y Serrano , 2020)

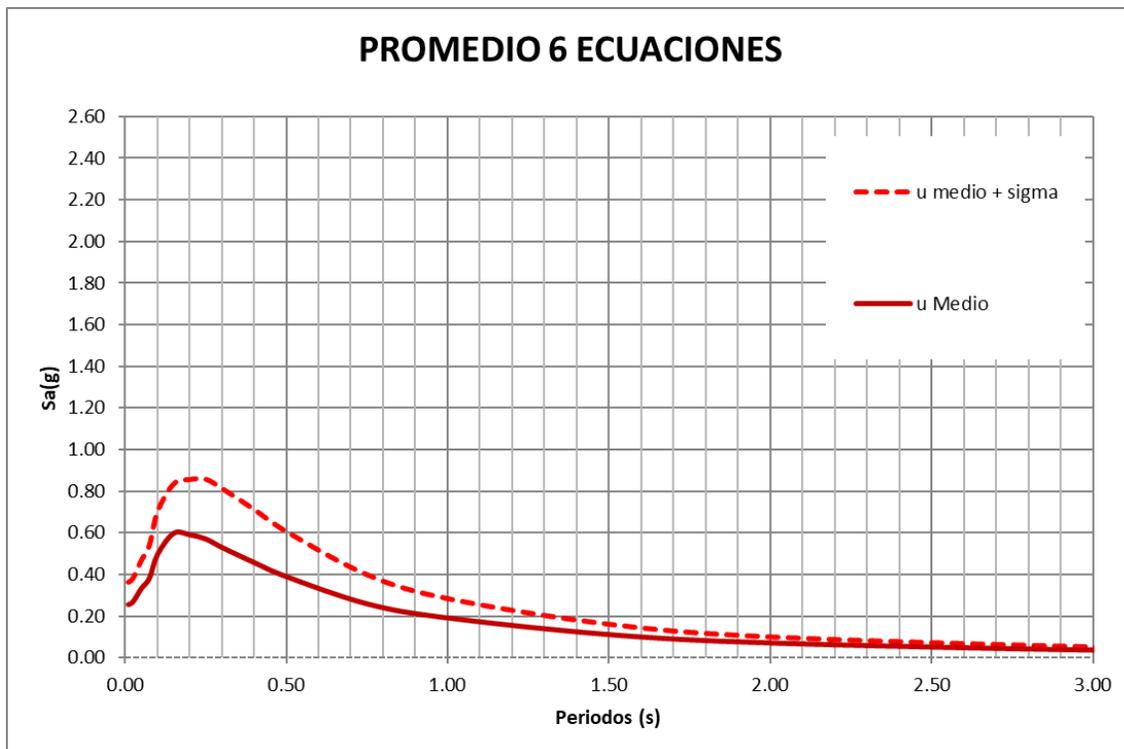
Al comparar los espectros de control de la figura 36-49, se puede identificar que las mayores ordenadas espectrales se presentan cuando se registre un sismo de magnitud 6.5 correspondiente a la falla Ambato.

Con el objetivo de presentar mayores ordenadas espectrales de la figura 36, se obtiene los valores medios encontrados con los seis modelos de movimiento fuertes y se presenta en la figura 50.

El espectro medio de la figura 36, es el Espectro Medio, DBE y el espectro medio más la desviación estándar (sigma) se llama Espectro Máximo Considerado y estos son los Espectros de Control para un perfil sísmico del suelo "C", los valores se hallan indicados en la tabla 16.

Figura 50

Promedio seis ecuaciones suelo tipo "C", en la Falla Ambato, $V_{s30}=380$ m/s

**Tabla 16**

Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico C

PERIODO(S)	Espectros de Control	
	DBE (g)	MCE (g)
0.01	0.393	0.5663
0.02	0.404	0.5850
0.03	0.432	0.6265
0.05	0.509	0.7411
0.075	0.576	0.8416
0.1	0.743	1.0905
0.15	0.906	1.2983
0.2	0.931	1.3503
0.25	0.910	1.3634
0.3	0.853	1.2970
0.4	0.763	1.1773

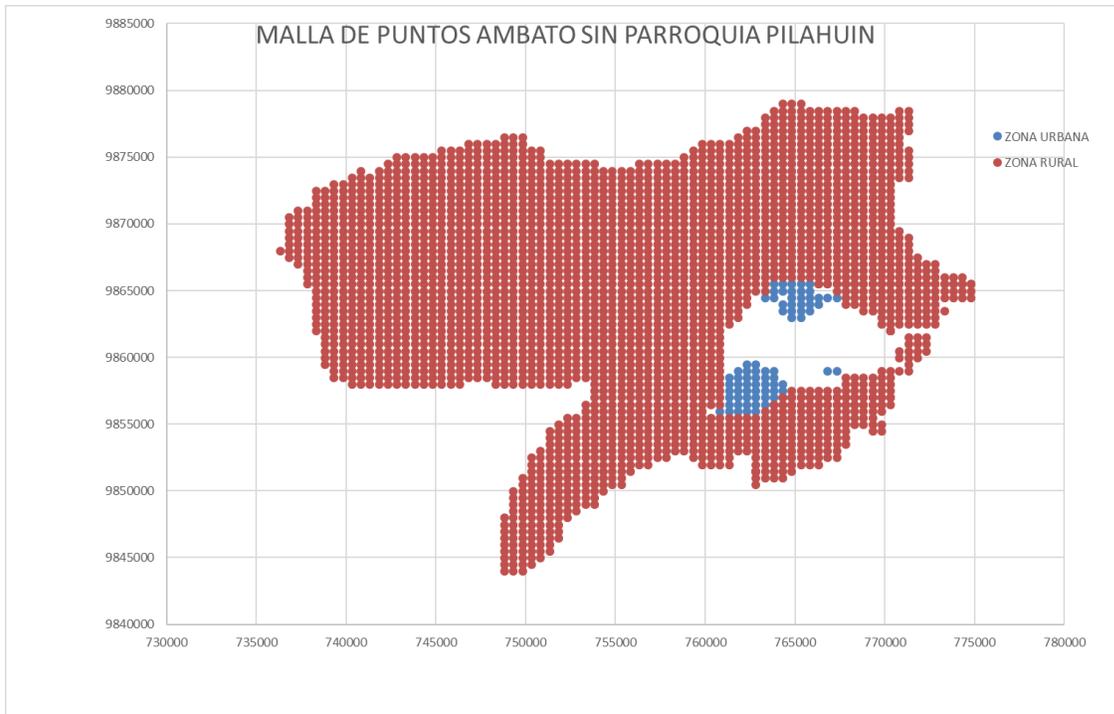
0.5	0.662	1.0294
0.75	0.458	0.7134
1	0.343	0.5244
1.5	0.210	0.3157
2	0.143	0.2094
3	0.080	0.1229
4	0.050	0.0796
5	0.029	0.0342
7.5	0.015	0.0184
10	0.008	0.0106

Resultados en perfil sísmico D

Se procedió igual que el apartado anterior, de tal manera que se obtuvo los espectros promedios en los puntos de la malla del perfil para suelos tipo D de la ciudad de Ambato, parroquia urbana y rural sin considerar a parroquia Pilahuin, indicados en la figura 51.

Figura 51

Malla de puntos Ambato suelo tipo "D"



El grafico presenta la malla de puntos de la zona urbana y rural de la ciudad de Ambato, sin incluir la parroquia Pilahuin, para un perfil tipo "D"

Los espectros encontrados con los 6 modelos de movimientos fuertes, que se han presentado en este capítulo se identifican en las figuras 20 a 27 correspondiente a la falla Ambato, Huachi y Totoras, F-10, F-11, F-16, F-28.

Figura 52

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla Ambato, $V_{s30}=300$ m/s

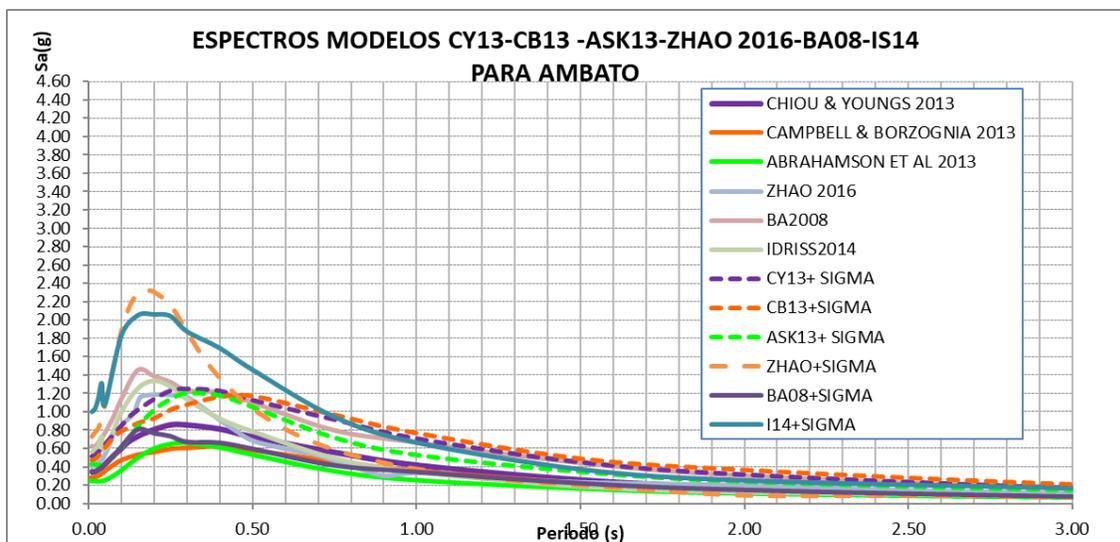


Figura 53

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "D", en la Falla de Huachi,

Vs30=300 m/s

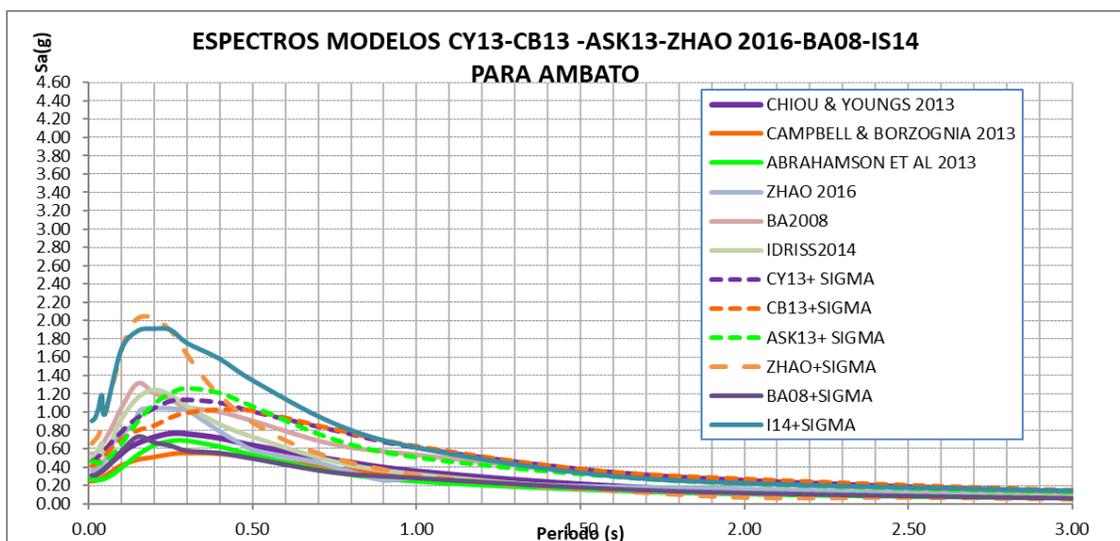


Figura 54

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla de Totoras,

Vs30=300 m/s

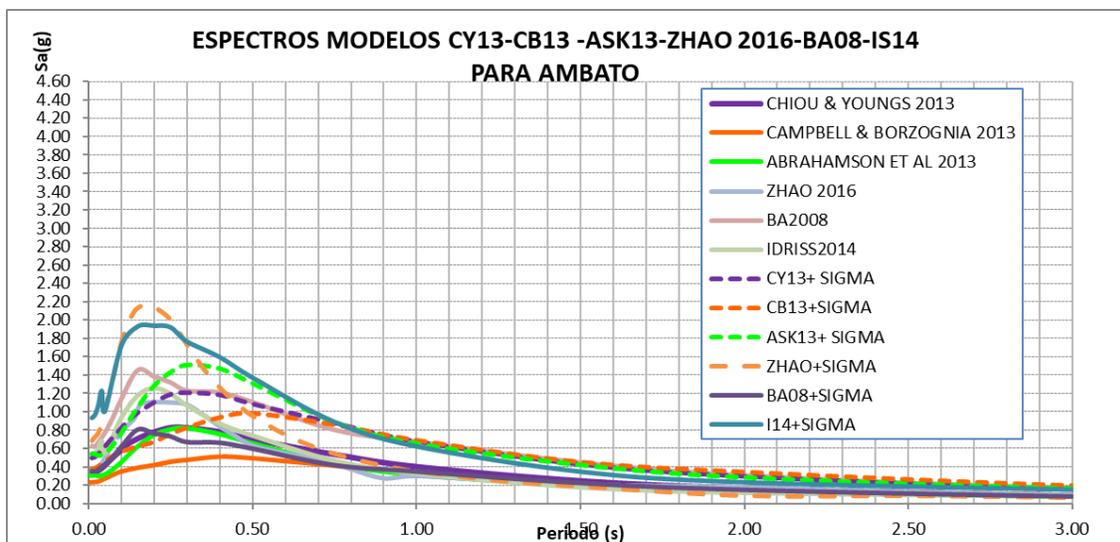


Figura 55

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "D", en la Falla de F-10, $V_{s30}=300$ m/s

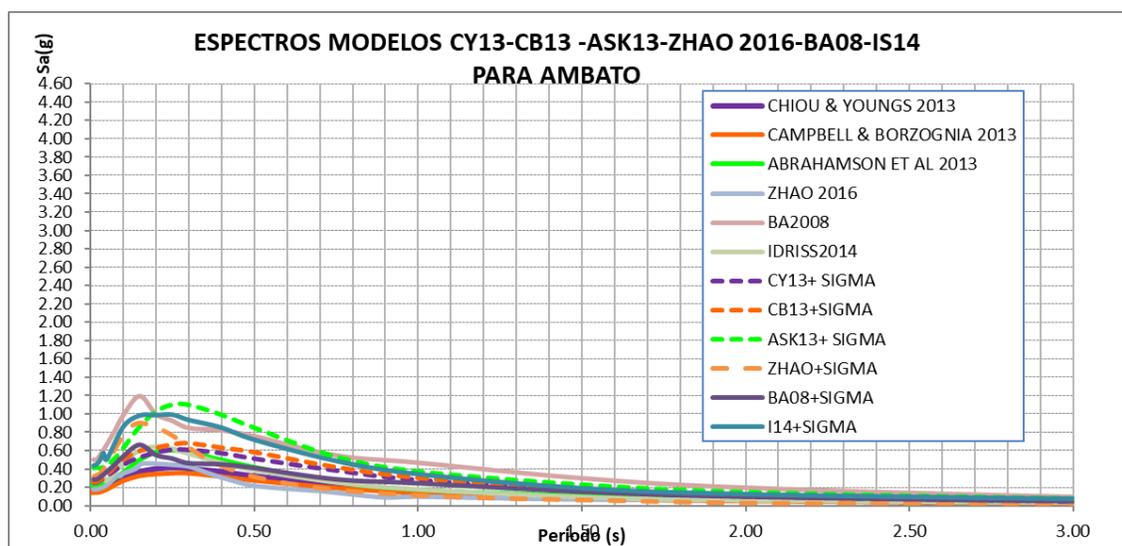


Figura 56

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "D", en la Falla de F-11, $V_{s30}=300$ m/s

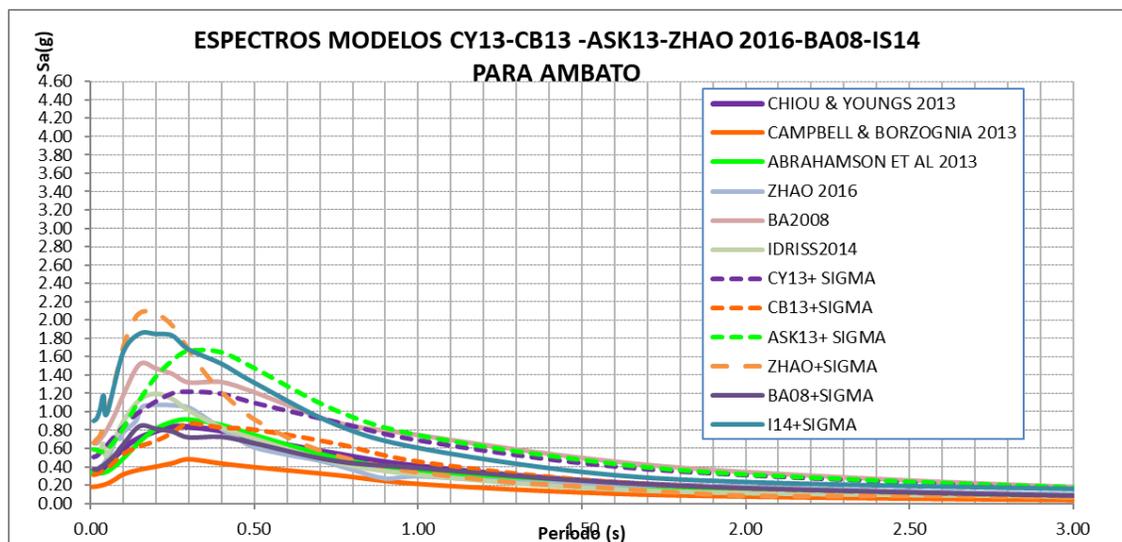


Figura 57

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "D", en la Falla de F-16, $V_{s30}=300$ m/s

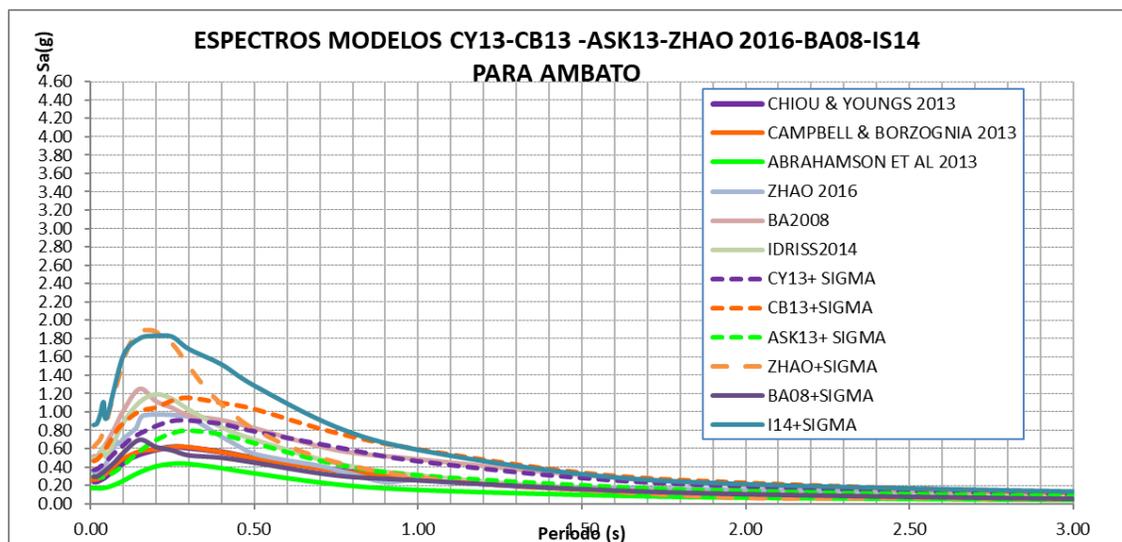


Figura 58

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "D", en la Falla de F-28, $V_{s30}=300$ m/s

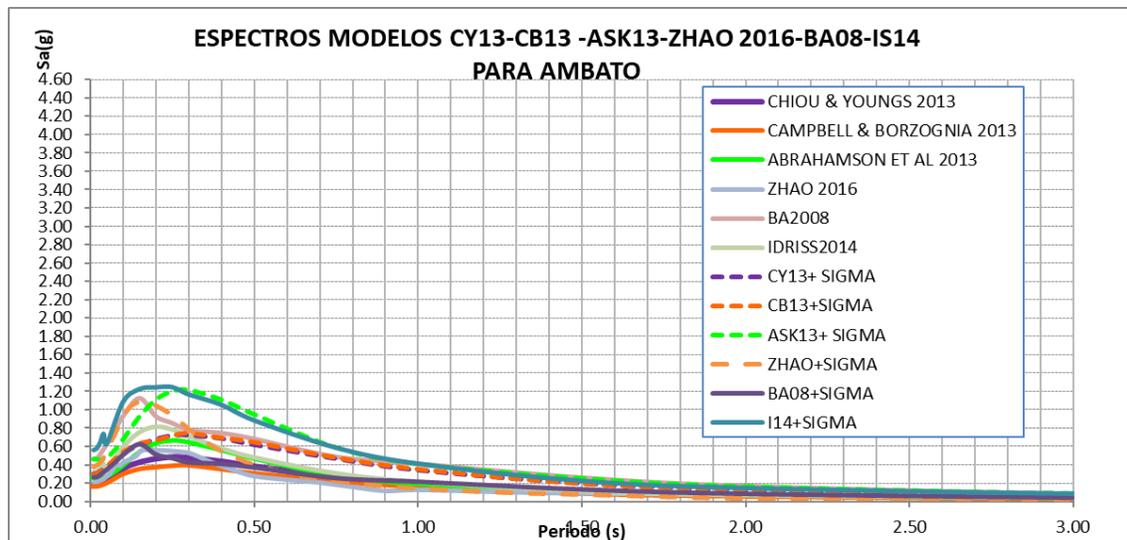
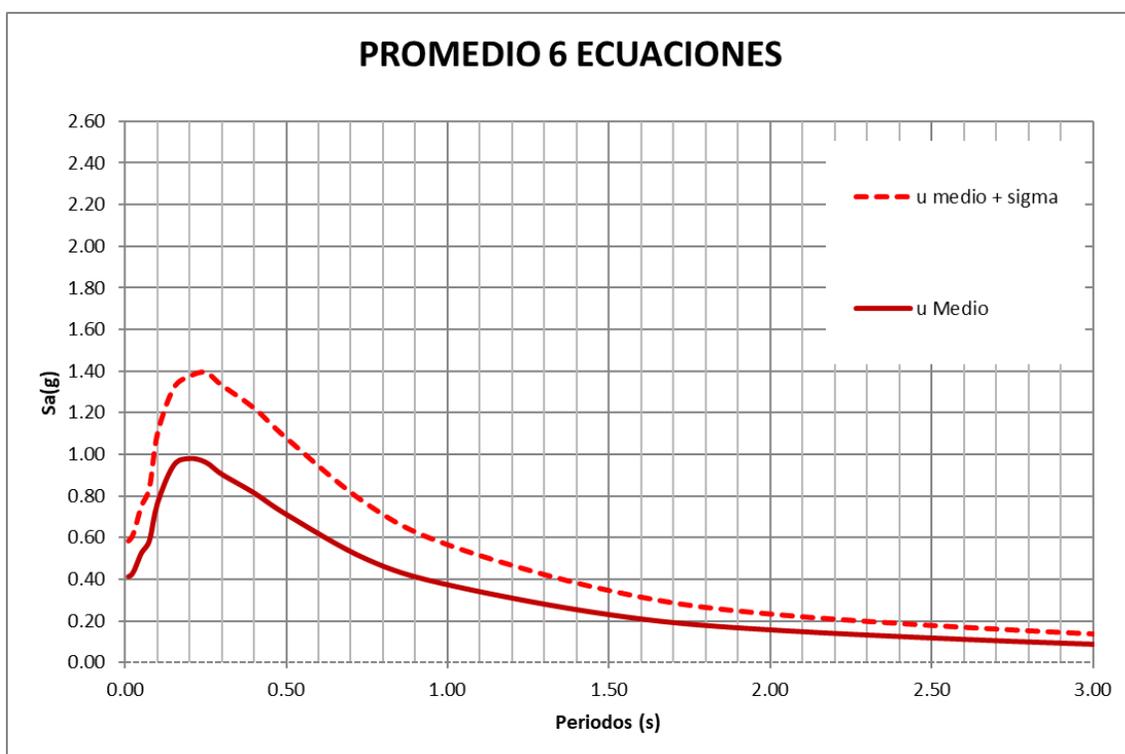


Figura 59

Promedio seis ecuaciones suelo tipo "D", en la Falla Ambato, $V_{s30}=300$ m/s



Al comparar los espectros de control de la figura 52-58, se puede identificar que las mayores ordenadas espectrales se presentan cuando se registre un sismo de magnitud 6.5 correspondiente a la falla Ambato representada por el modelo de Zhao *et.al.* 2016

Con el objetivo de presentar mayores ordenadas espectrales de la figura 52, se obtiene los valores medios encontrados con los seis modelos de movimiento fuertes y se presenta en la figura 58.

El espectro medio de la figura 60, es el Espectro Medio, DBE y el espectro medio más la desviación estándar (sigma) se llama Espectro Máximo Considerado y estos son los Espectros de Control para un perfil sísmico del suelo "D", se presenta sus respectivos valores en la tabla 17.

Tabla 17

Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico D

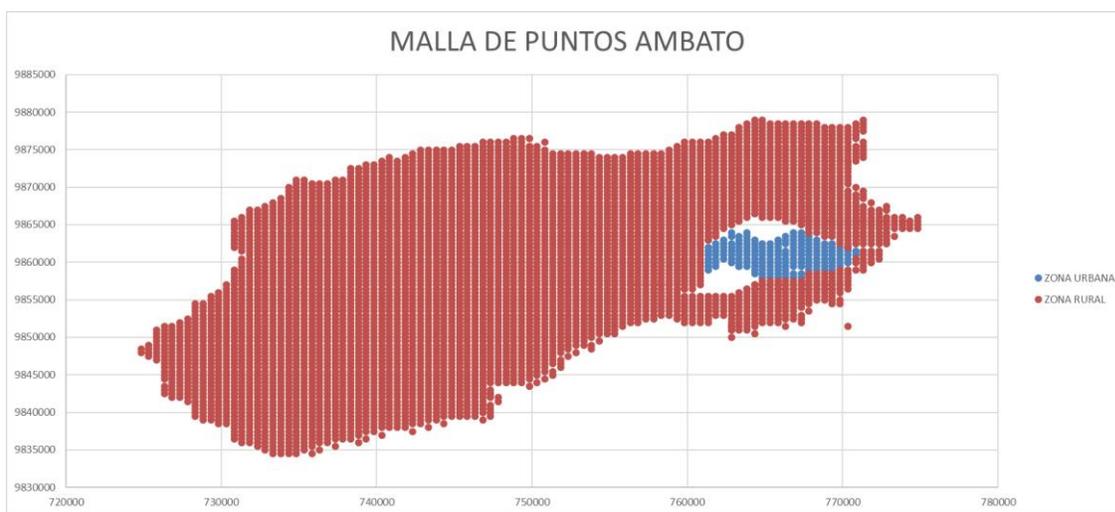
PERIODO(S)	Espectros de Control	
	DBE (g)	MCE (g)
0.01	0.413	0.5836
0.02	0.422	0.6010
0.03	0.450	0.6406
0.05	0.525	0.7512
0.075	0.585	0.8384
0.1	0.765	1.1003
0.15	0.946	1.3189
0.2	0.979	1.3760
0.25	0.960	1.3944
0.3	0.903	1.3319
0.4	0.813	1.2223
0.5	0.710	1.0778
0.75	0.494	0.7600
1	0.373	0.5650
1.5	0.230	0.3448
2	0.157	0.2318
3	0.088	0.1358
4	0.055	0.0873
5	0.031	0.0370
7.5	0.016	0.0200
10	0.009	0.0115

Resultados en perfil sísmico C

Al presentarse un sismo de magnitud 6.5, en la falla Ambato los espectros promedios de las seis ecuaciones de movimientos fuertes de toda la malla de puntos de la ciudad de Ambato parroquia urbana y rural, incluida la parroquia Pilahuin la cual representa el 30 por ciento de la zona rural, indicado en la figura 60, de la misma manera se desarrolló para las fallas de Huachi, Totoras, F-10, F-11, F-16, F-28.

Figura 60

Malla de puntos Ambato suelo tipo "C"



Nota: El gráfico presenta la malla de puntos de la zona urbana y rural de la ciudad de Ambato, incluida la parroquia Pilahuin, para un perfil tipo "C"

Figura 61

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla Ambato, $V_{s30}=380$ m/s

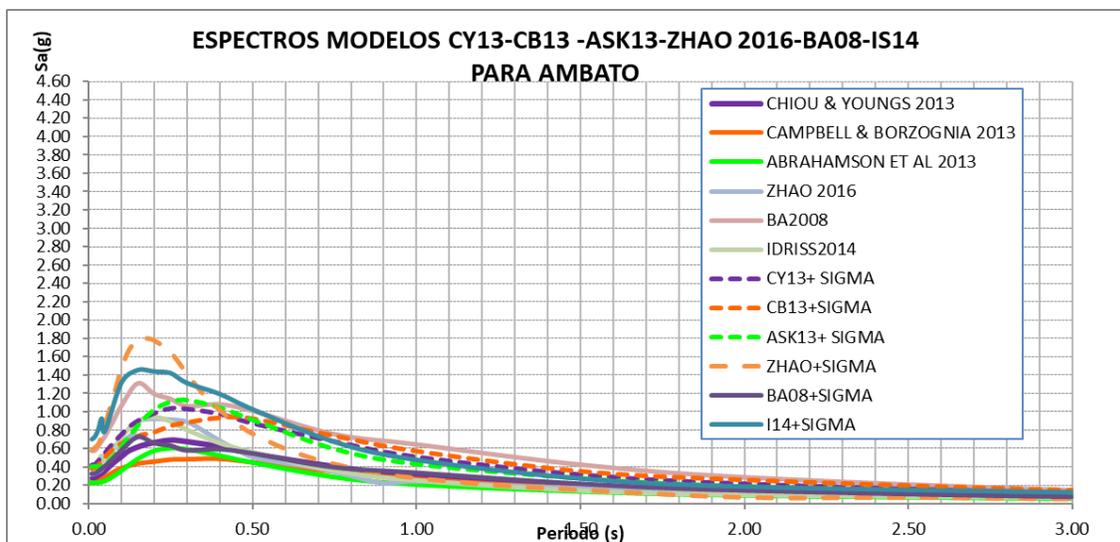


Figura 62

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "C", en la Falla de Huachi, $V_{s30}=380$ m/s

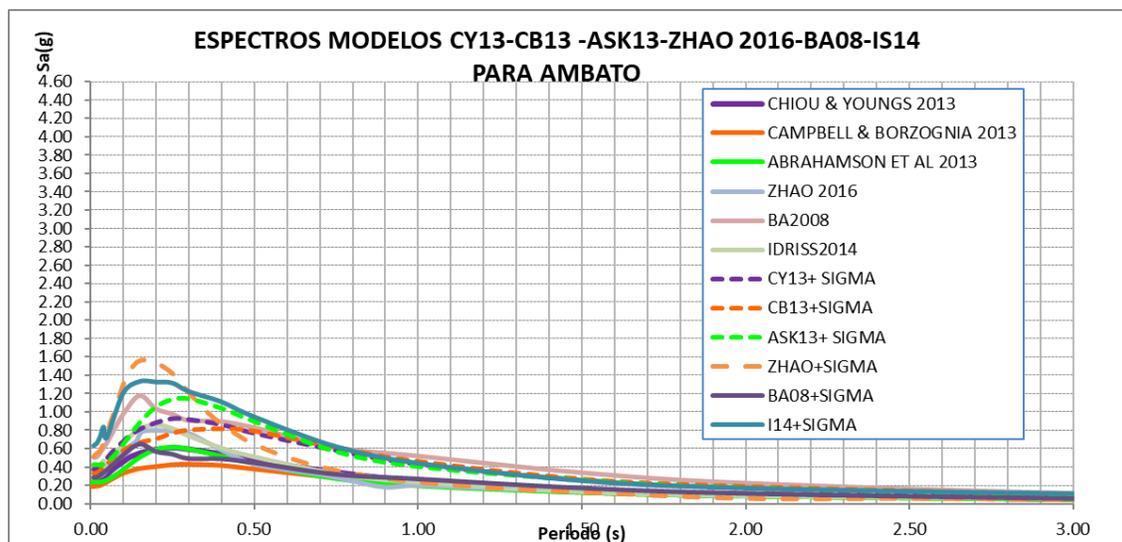


Figura 63

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla de Totoras, $V_{s30}=380$ m/s

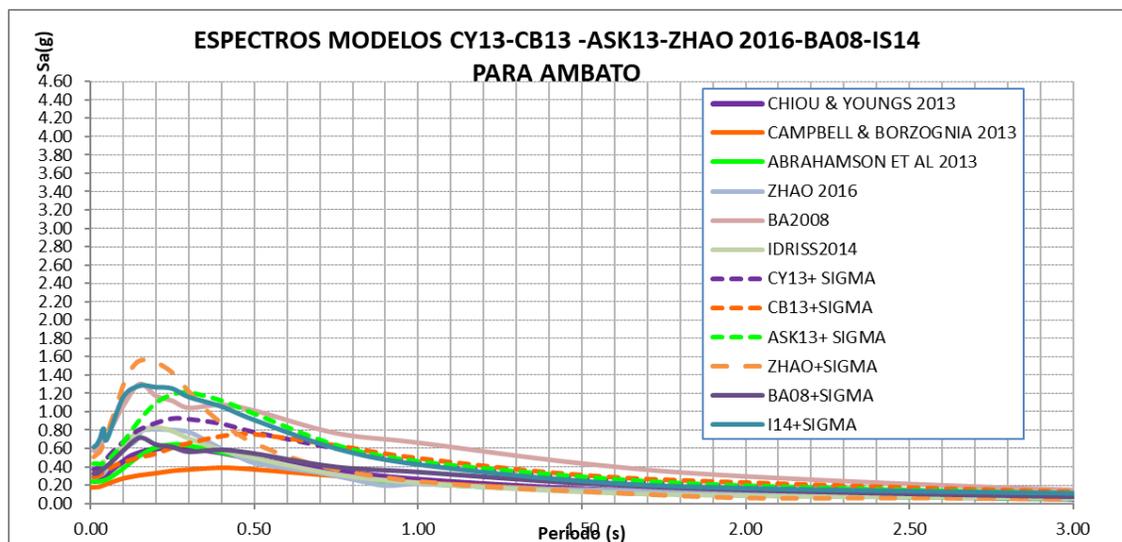


Figura 64

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "C", en la Falla F-10, $V_{s30}=380$ m/s

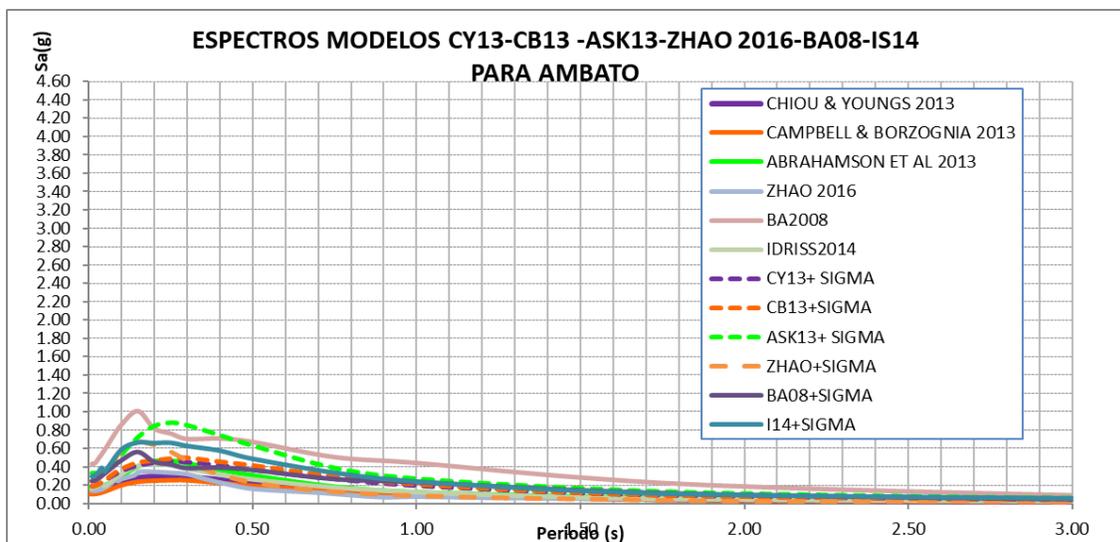


Figura 65

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "C", en la Falla F-11, $V_{s30}=380$ m/s

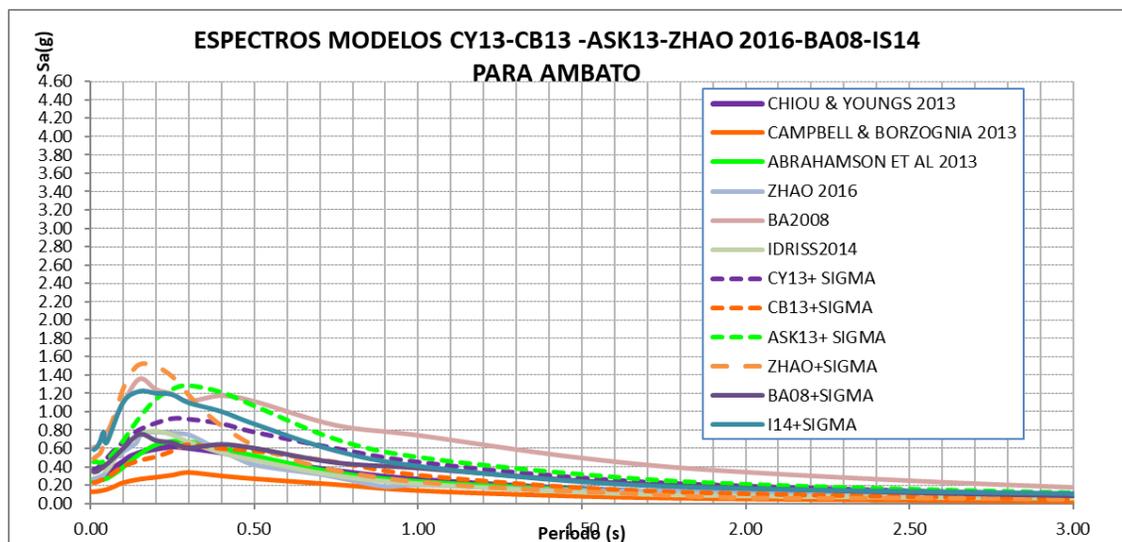


Figura 66

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "C", en la Falla F-16, Vs30=380 m/s

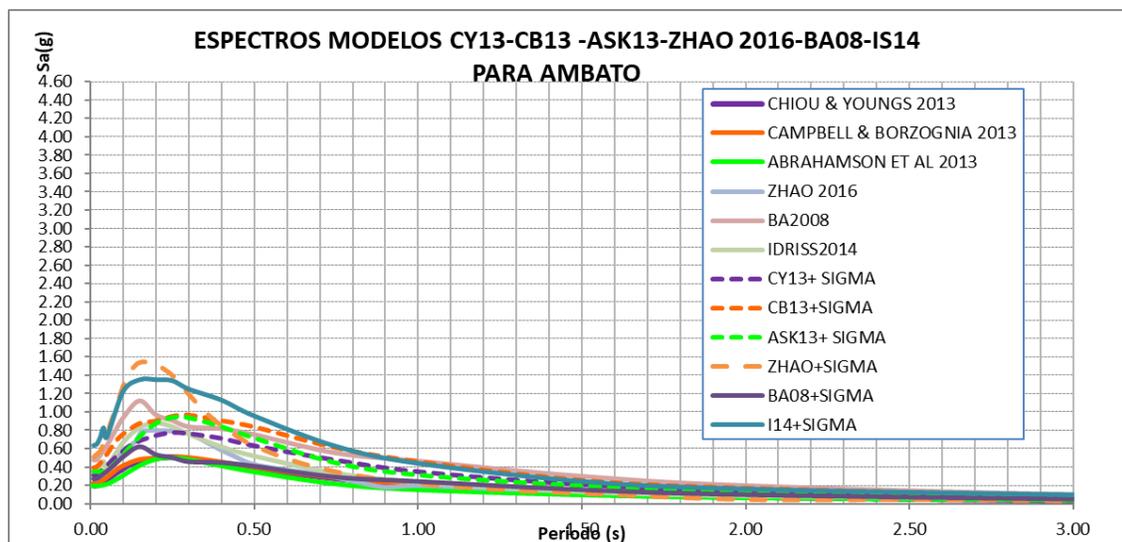
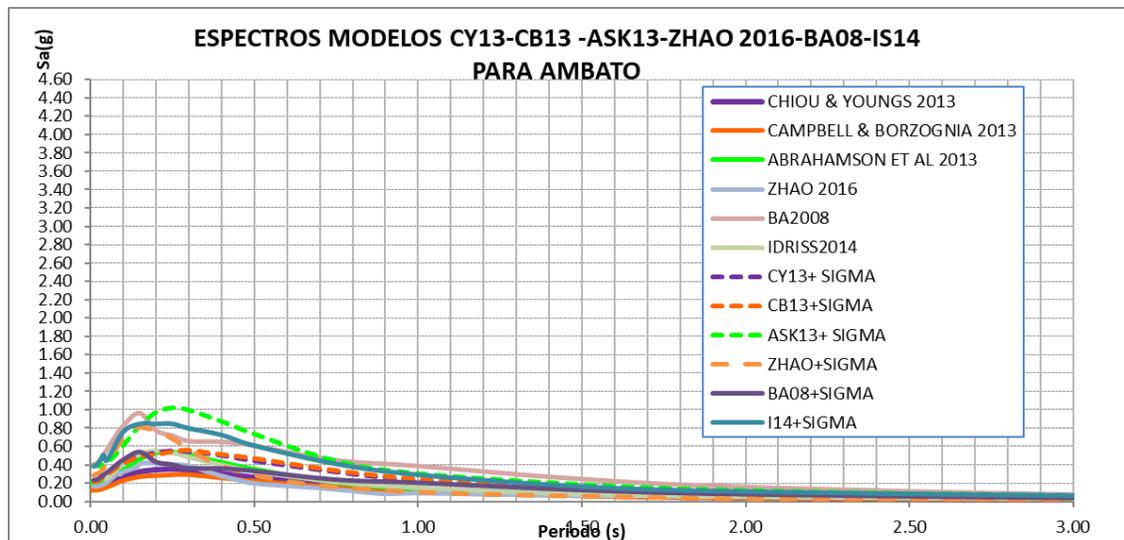


Figura 67

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6. suelo tipo "C", en la Falla F-28, Vs30=380 m/s



Al comparar los espectros de control de la figura 61-65 se puede identificar que las mayores ordenadas espectrales se presentan cuando se registre un sismo de magnitud 6.5 correspondiente a la falla Ambato, en este caso no se analizó por separado la zona urbana y rural, se hizo un promedio en el cual se consideró todos los puntos de la malla independientemente sea Urbana o Rural, debido a que en el apartado anterior se analizó por separado y se identificó que las mayores ordenadas espectrales que afectan a la zona Urbana es con la falla Ambato y la zona rural con la falla F11 con una magnitud de 6.6.

Con el objetivo de presentar mayores ordenadas espectrales de la figura 61, se obtiene los valores medios encontrados con los seis modelos de movimiento fuertes y se presenta en la figura 68

El espectro medio de la figura 68, es el Espectro Medio, DBE y el espectro medio más la desviación estándar (sigma) se llama Espectro Máximo Considerado y estos son los Espectros de Control para un perfil sísmico del suelo "C", los valores se hallan indicados en la tabla 18.

Figura 68

Promedio seis ecuaciones suelo tipo "C", en la Falla Ambato, $V_{s30}=380$ m/s

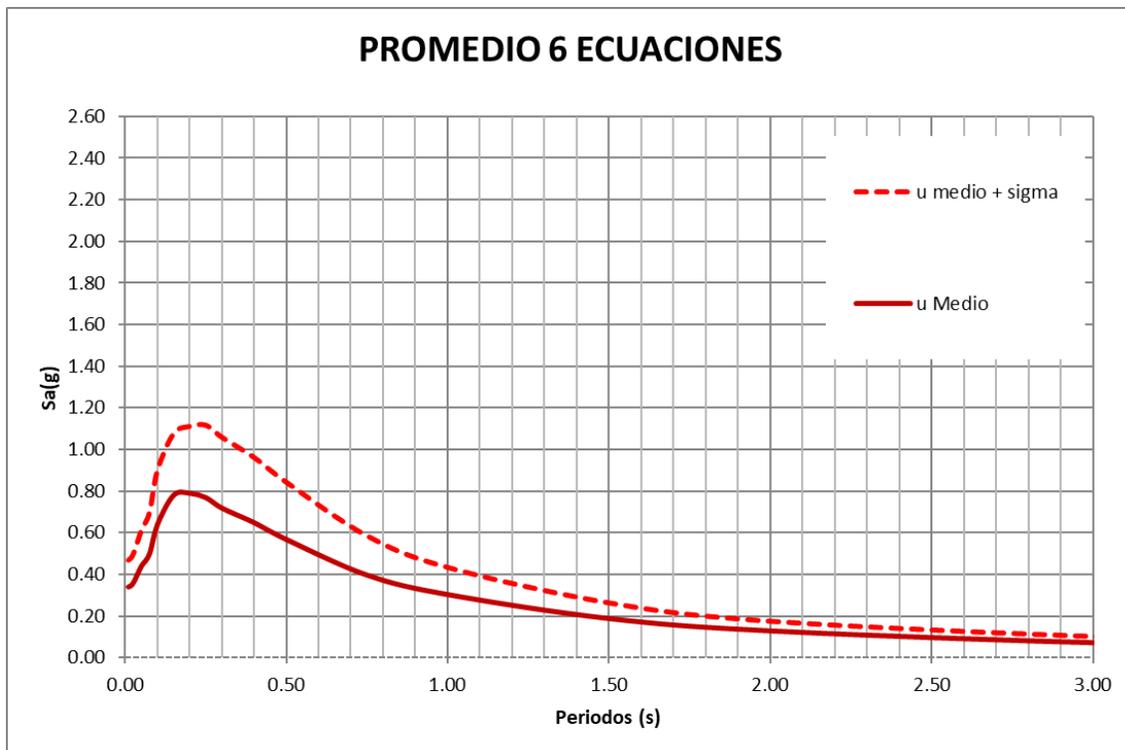


Tabla 18

Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico C

PERIODO(S)	Espectros de Control	
	DBE (g)	MCE (g)
0.01	0.338	0.4688
0.02	0.347	0.4843
0.03	0.372	0.5181
0.05	0.438	0.6116
0.075	0.496	0.6966
0.1	0.638	0.9007
0.15	0.778	1.0767
0.2	0.788	1.1111
0.25	0.767	1.1168
0.3	0.716	1.0587
0.4	0.646	0.9613
0.5	0.565	0.8421
0.75	0.395	0.5851
1	0.301	0.4338
1.5	0.186	0.2635
2	0.127	0.1756

3	0.070	0.1025
4	0.043	0.0659
5	0.025	0.0290
7.5	0.013	0.0158
10	0.007	0.0092

Resultados en perfil sísmico D

Al presentarse un sismo de magnitud 6.5, en la falla Ambato los espectros promedios de toda la malla de puntos de la ciudad de Ambato parroquia urbana y rural incluida la parroquia Pilahuin, indicados en la figura 69, de la misma manera se desarrolló para las fallas de Huachi, Totoras, F-10, F-11, F-16, F-28.

Figura 69

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla Ambato, $V_{s30}=300$ m/s

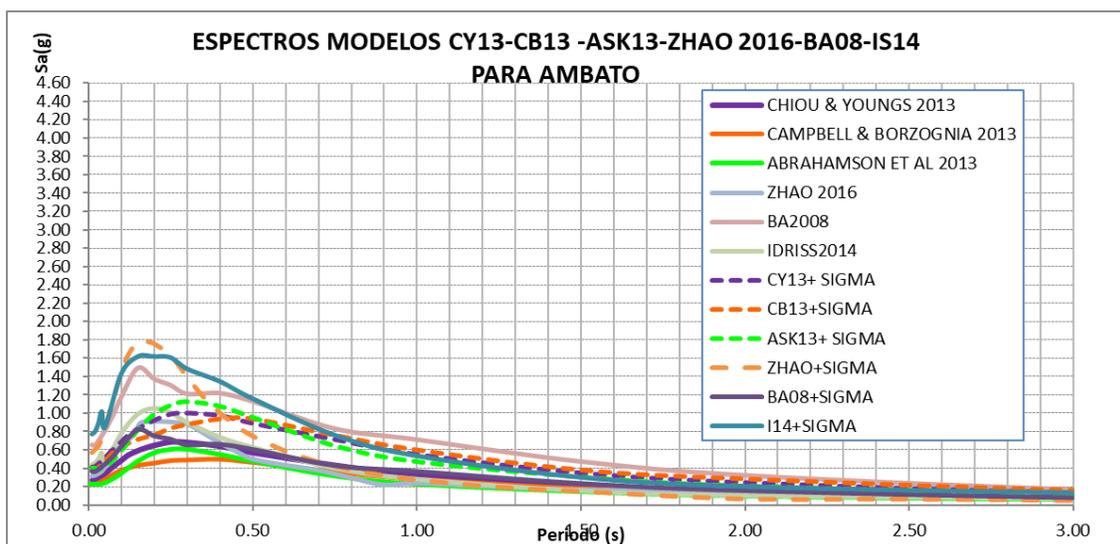


Figura 70

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "D", en la Falla de Huachi,
 $V_{s30}=300$ m/s

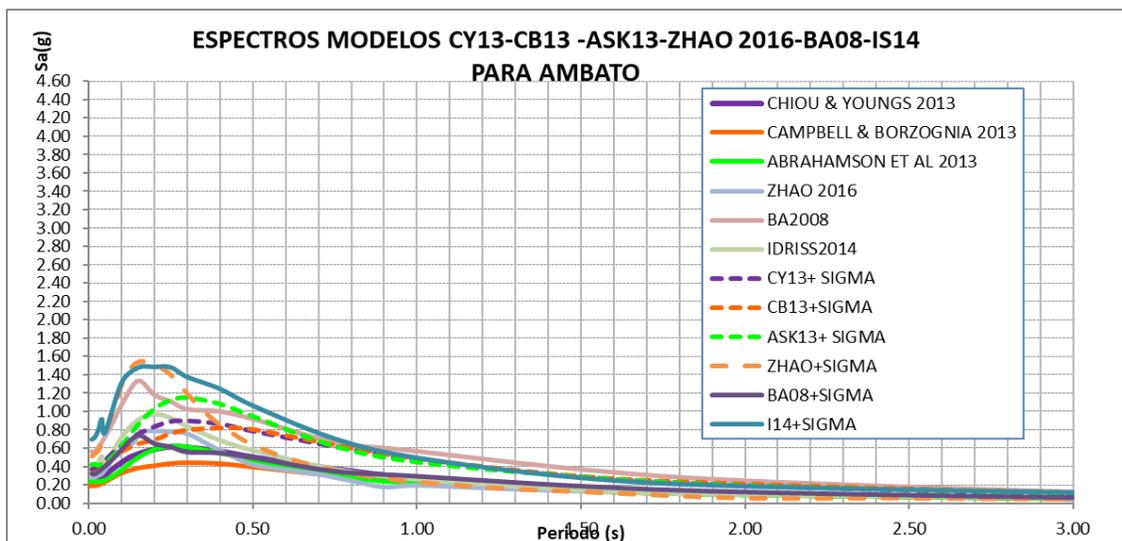


Figura 71

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla de Totoras,
 $V_{s30}=300$ m/s

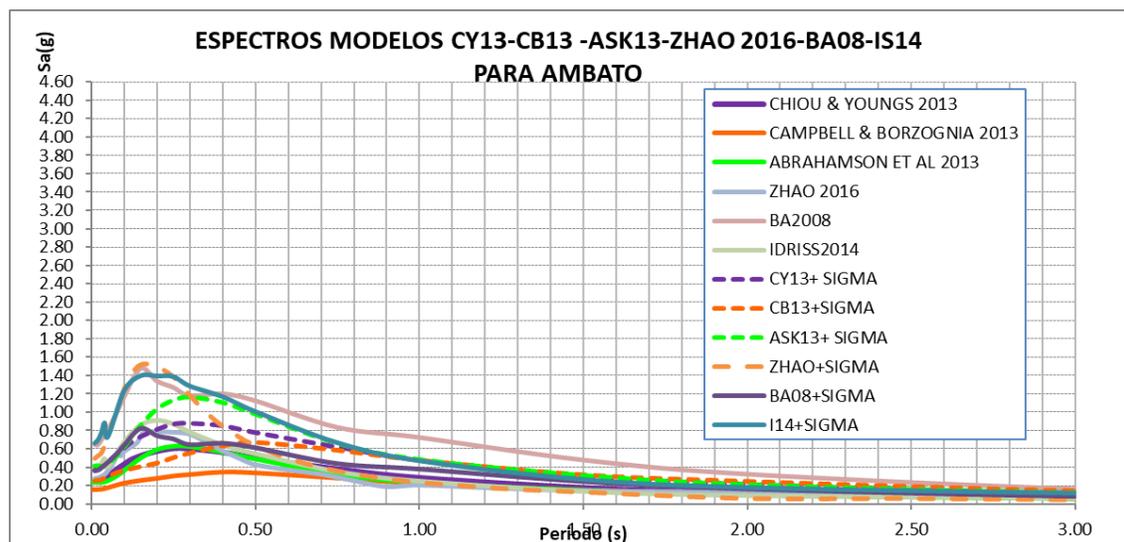


Figura 72

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "D", en la Falla F-10, $V_{s30}=300$ m/s

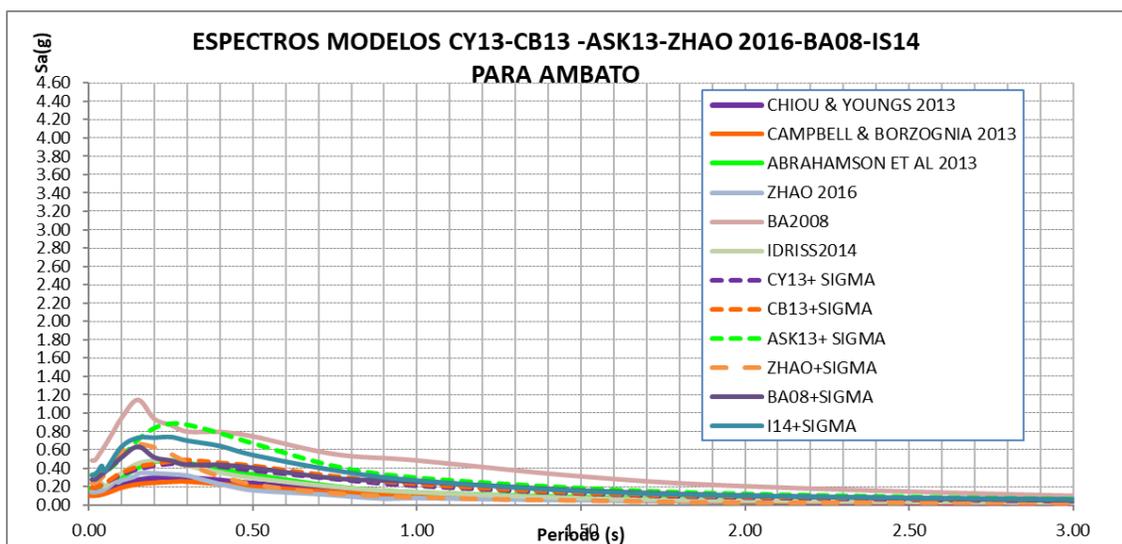


Figura 73

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "D", en la Falla f-11, $V_{s30}=300$ m/s

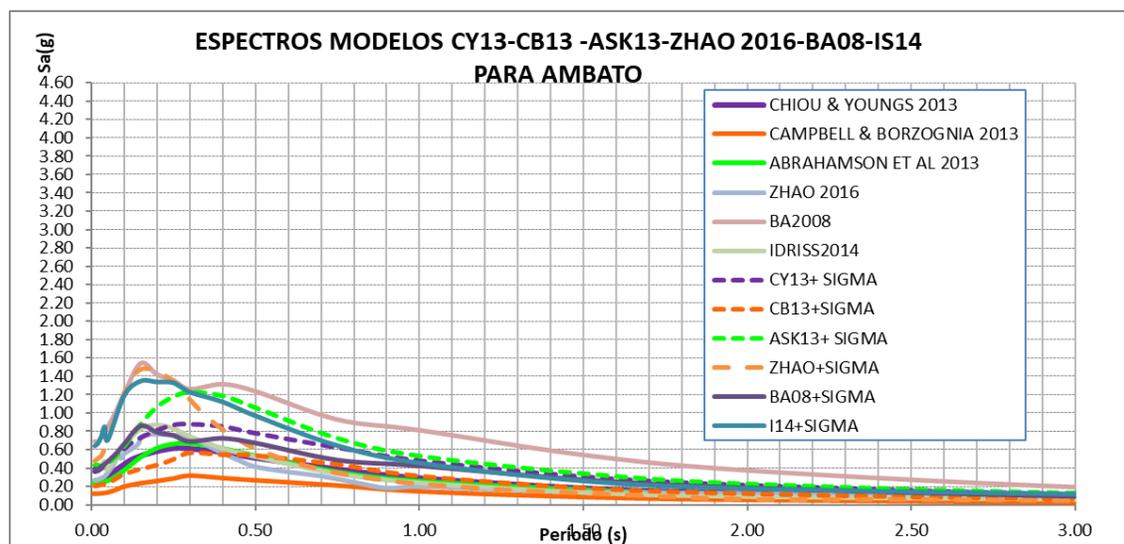


Figura 74

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "D", en la Falla F-16, $V_{s30}=300$

m/s

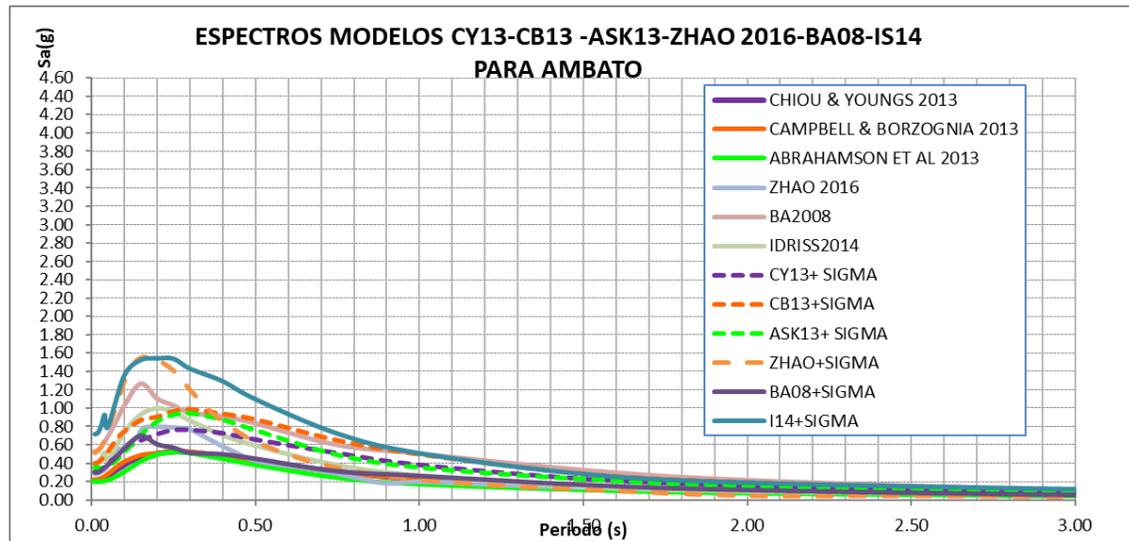


Figura 75

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "D", en la Falla F-28, $V_{s30}=300$

m/s

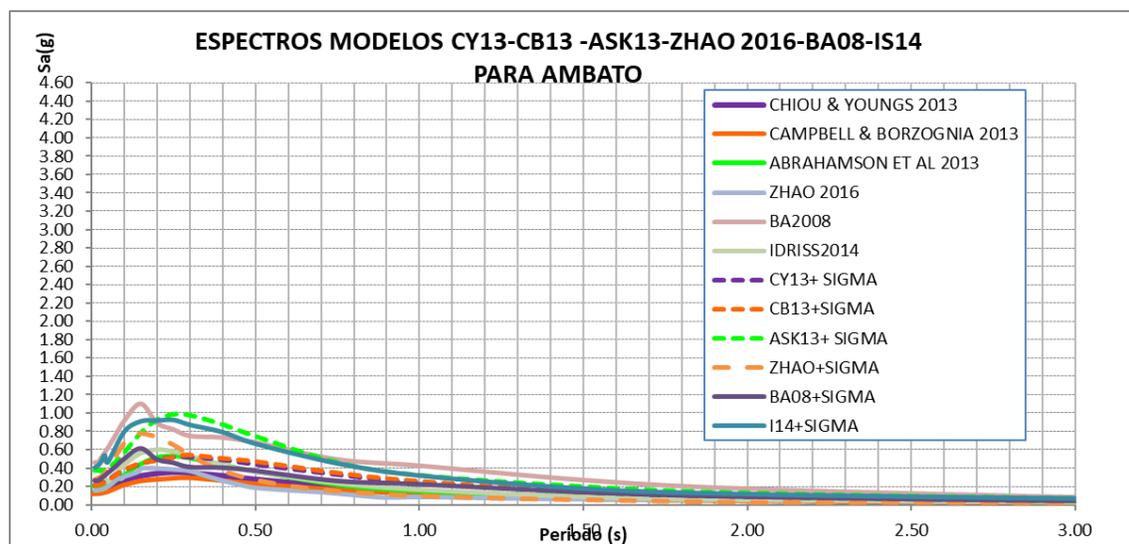
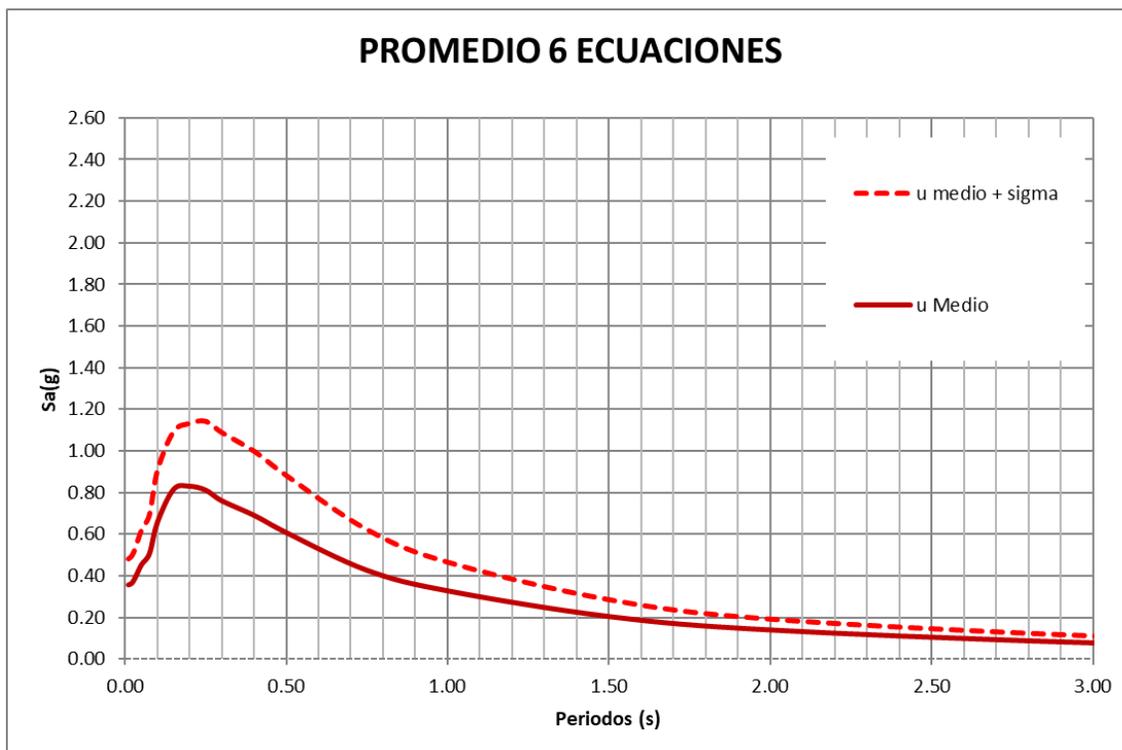


Figura 76

Promedio seis ecuaciones suelo tipo "D", en la Falla Ambato, Vs30=300 m/s

**Tabla 19**

Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico D

PERIODO(S)	Espectros de Control	
	DBE (g)	MCE (g)
0.01	0.356	0.4834
0.02	0.364	0.4977
0.03	0.388	0.5299
0.05	0.453	0.6202
0.075	0.506	0.6946
0.1	0.659	0.9092
0.15	0.817	1.0960
0.2	0.831	1.1345
0.25	0.812	1.1447

0.3	0.761	1.0901
0.4	0.691	1.0004
0.5	0.607	0.8833
0.75	0.426	0.6234
1	0.327	0.4669
1.5	0.204	0.2872
2	0.139	0.1937
3	0.077	0.1128
4	0.047	0.0722
5	0.027	0.0313
7.5	0.014	0.0172
10	0.007	0.0100

Al comparar los espectros de control de la figura 69-75, se puede identificar que las mayores ordenadas espectrales se presentan cuando se registre un sismo de magnitud 6.5 correspondiente a la falla Ambato, que representa el modelo de Zhao *et al* 2016.

Con el objetivo de presentar mayores ordenadas espectrales de la figura 67, se obtiene los valores medios encontrados con los seis modelos de movimiento fuertes y se presenta en la figura 76.

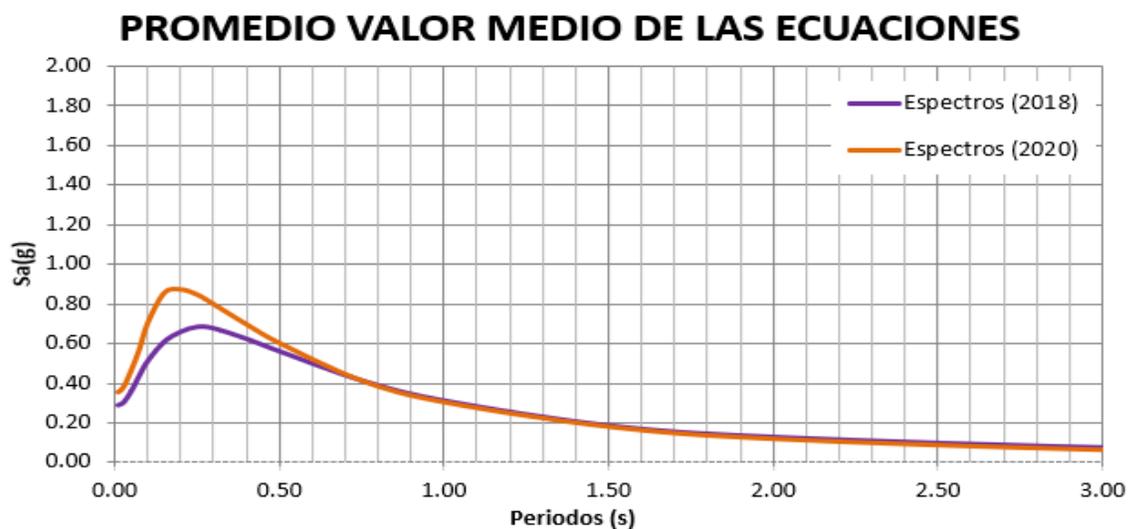
El espectro medio de la figura 68, es el Espectro Medio, DBE y el espectro medio más la desviación estándar (sigma) se llama Espectro Máximo Considerado y estos son los Espectros de Control para un perfil sísmico del suelo "D", los valores se hallan indicados en la tabla 19.

Norma Ecuatoriana de la Construcción

Ahora, con el fin de comparar los resultados, se analizará los espectros obtenidos del estudio realizado en el año 2018, en el cual se utilizó tres ecuaciones de movimientos fuertes, con los resultados obtenidos en este estudio los cuales llamaremos espectros 2020. En el año 2018 se analizó la zona urbana por lo que en este apartado se analizara de igual manera únicamente los resultados obtenidos en la zona urbana con el fin de comparar los resultados con los que reporta la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Figura 77

Espectro para un perfil de suelo C, sismo en la falla Huachi, espectro promedio de los estudios 2018 y 2020

**Figura 78**

Espectro para un perfil de suelo C, sismo en la falla Ambato, espectro promedio de los estudios 2018 y 2020

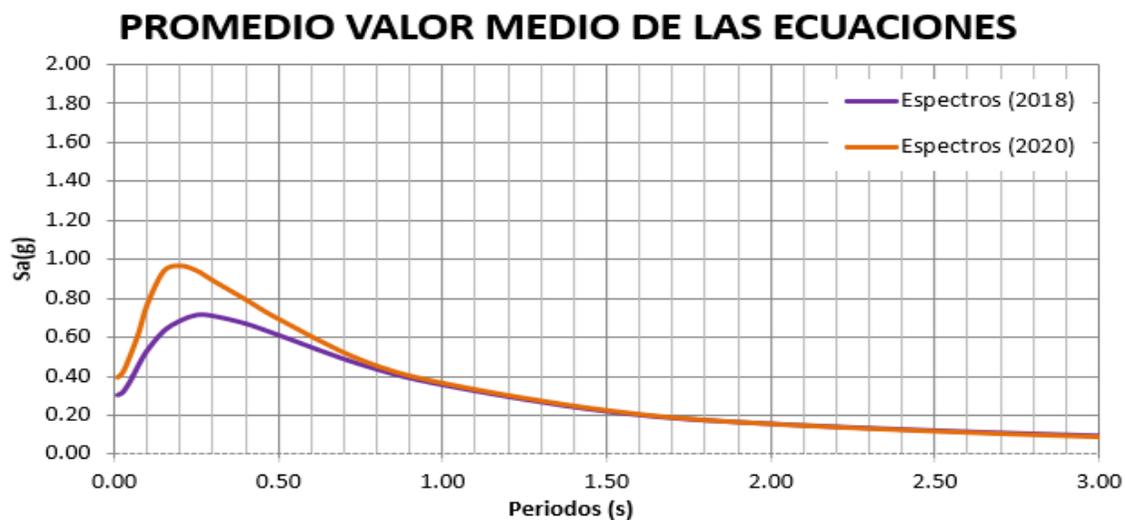
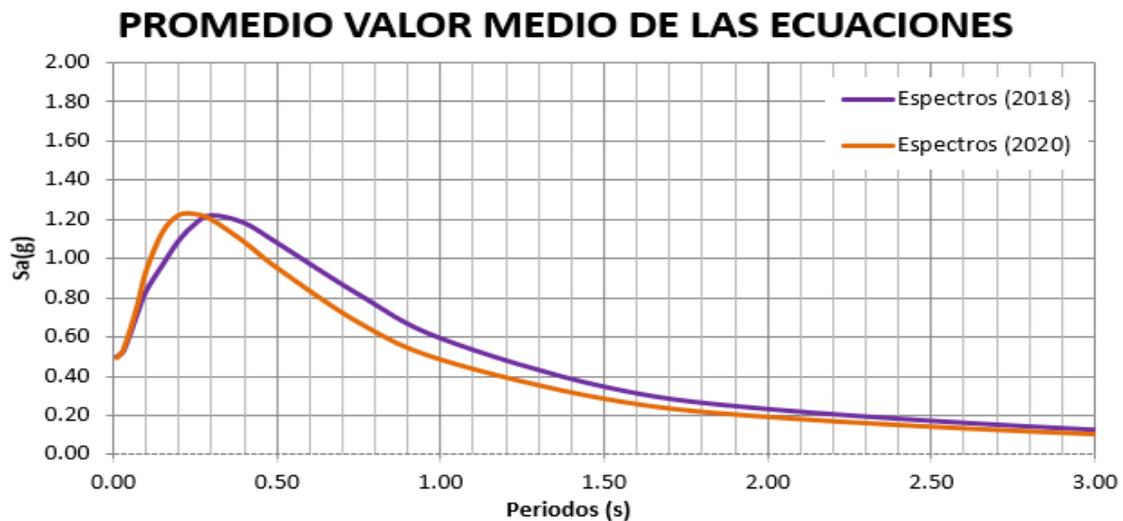


Figura 79

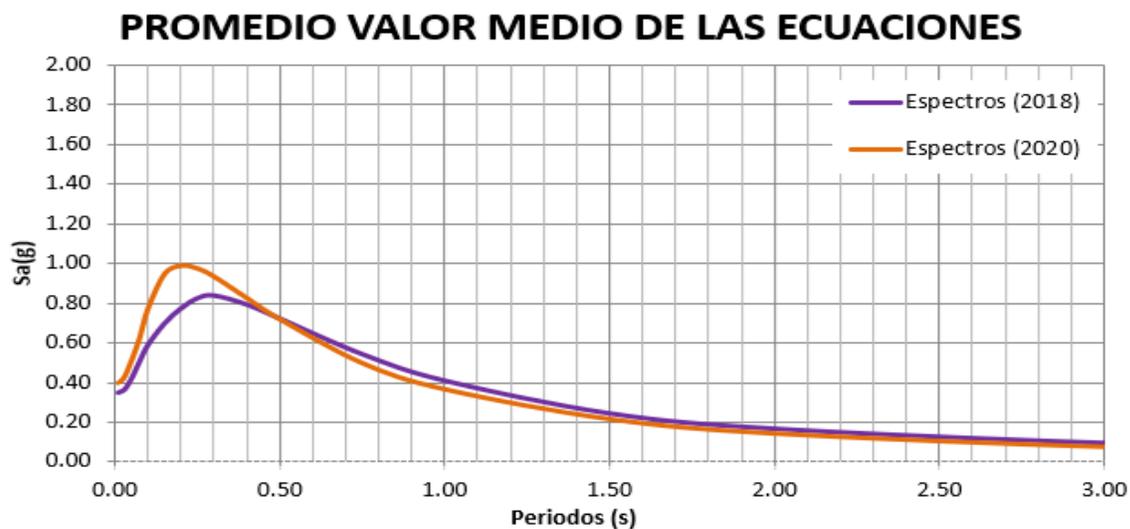
Espectro para un perfil de suelo C, sismo en la falla de Totoras, espectro promedio de los estudios 2018 y 2020



Los espectros obtenidos denominados “Espectros 2020” tiene ordenadas más altas que las obtenidas con los “Espectros 2018”, pero no en todos los periodos. Para el caso de un sismo ocasionado por la falla de Totoras con una Magnitud de 6.5, las ordenadas Espectrales “ Espectros 2018” son ligeramente mayores. Sin embargo, para periodos cortos, las ordenadas espectrales halladas con los “Espectros 2020” son ligeramente mayores a las de los “Espectros 2018”, pero para el resto de los periodos resultan muy parecidas.

Figura 80

Espectro para un perfil de suelo D, sismo en la falla Huachi, espectro promedio de los estudios 2018 y 2020

**Figura 81**

Espectro para un perfil de suelo D, sismo en la falla Ambato, espectro promedio de los estudios 2018 y 2020

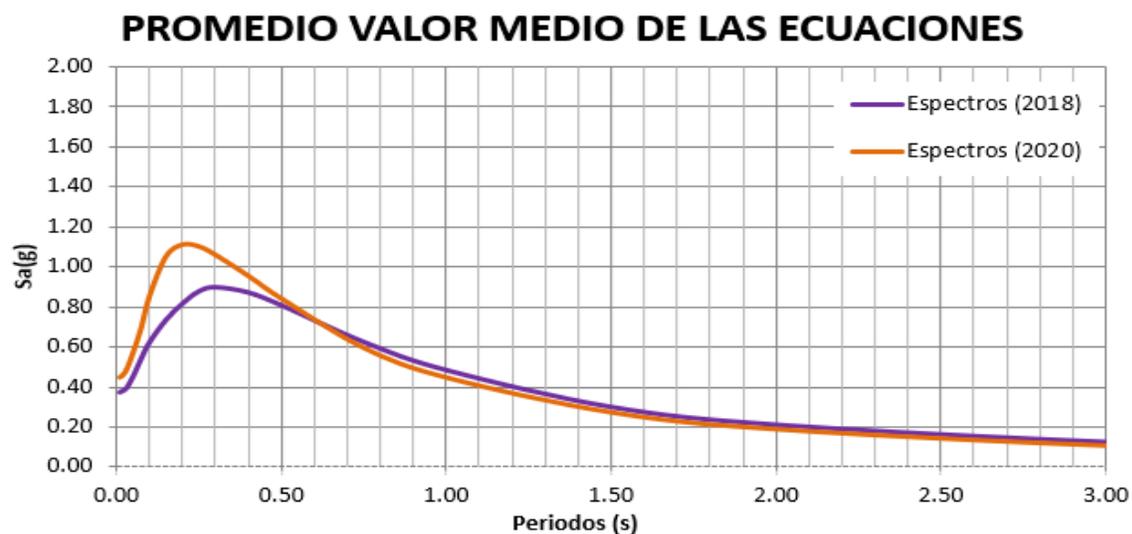
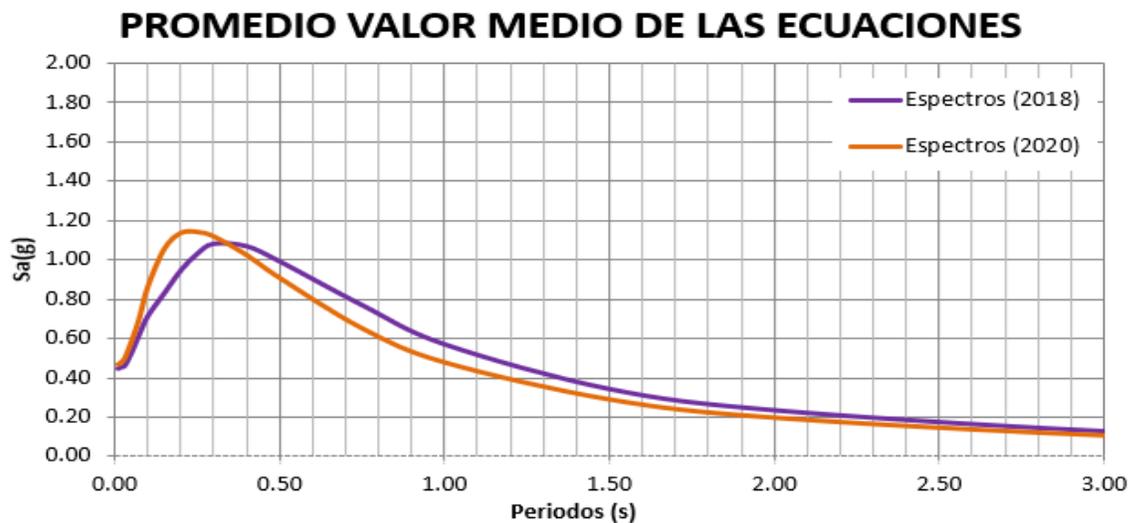


Figura 82

Espectro para un perfil de suelo D, sismo en la falla de Totoras, espectro promedio de los estudios 2018 y 2020



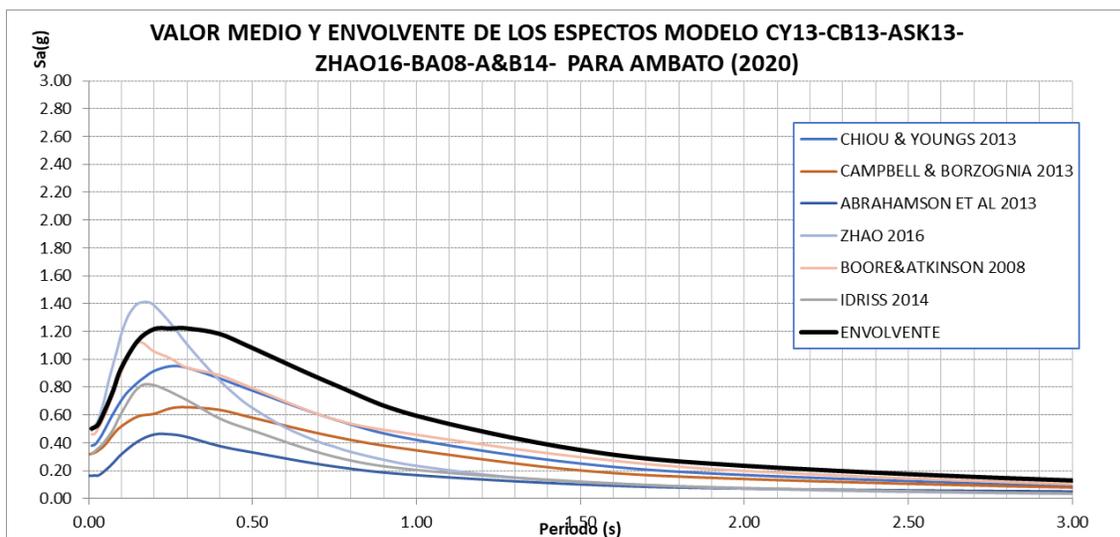
Se obtuvieron resultados similares, en cuales los “Espectros 2020”, resultan ser mayores a los “Espectros 2018”, sin embargo, como es el caso de un sismo asociado a la falla de Totoras resulta ser ligeramente menor para periodos cortos.

Espectro Envolvente

Con los valores hallados de los “Espectros 2018” y “Espectros 2020” se construyó un espectro al que llamaremos envolvente, a partir de los estudios de peligrosidad sísmica realizados en el 2018 y este estudio para un suelo tipo C Y D.

Figura 83

Espectro para un perfil de suelo C, sismo en la falla de Huachi, espectro envolvente promedio de los estudios 2018 y 2020

**Figura 84**

Espectro para un perfil de suelo C, sismo en la falla Ambato, espectro envolvente promedio de los estudios 2018 y 2020

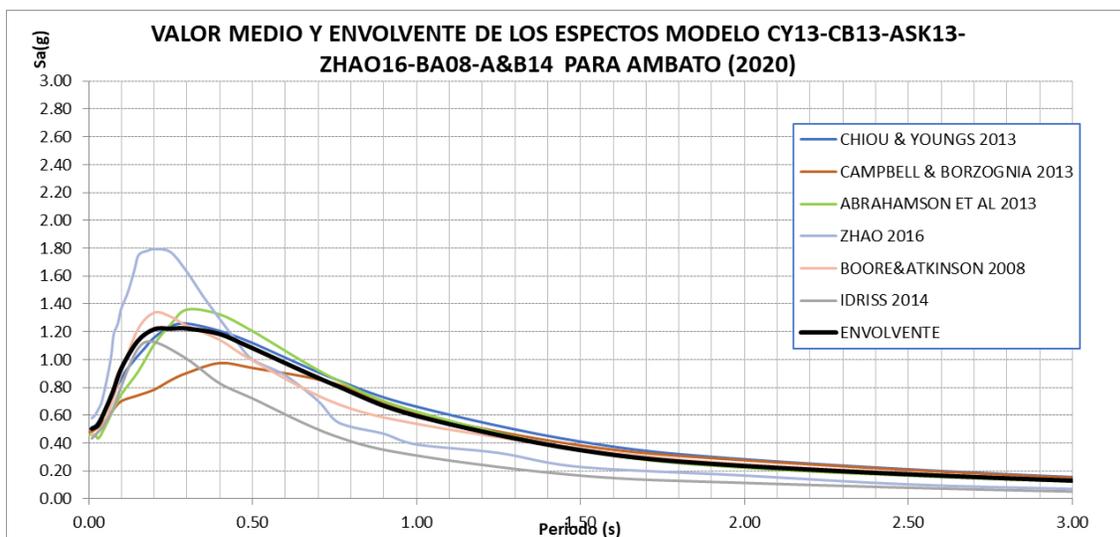
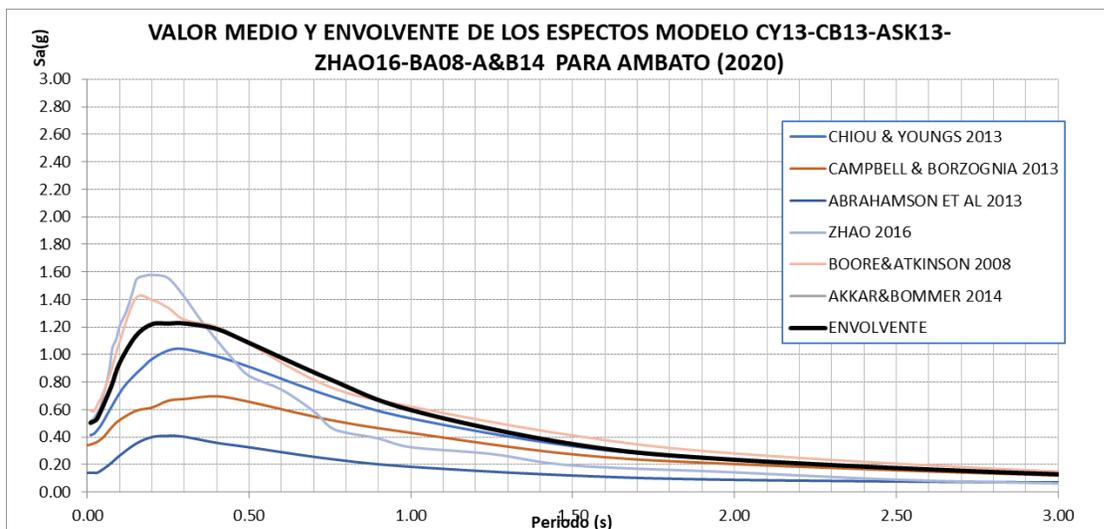


Figura 85

Espectro para un perfil de suelo C, sismo en la falla de Totoras, espectro envolvente promedio de los estudios 2018 y 2020



A continuación, se compara los espectros envolventes presentados en la figura 83-85 con los que reporta la Norma Ecuatoriana de la Construcción, para los dos perfiles de suelo, perfil de suelo sísmico C y Perfil de suelo sísmico D.

Figura 86

Comparación de espectros envolventes con los reportados en NEC 15, perfil de suelo sísmico "C".

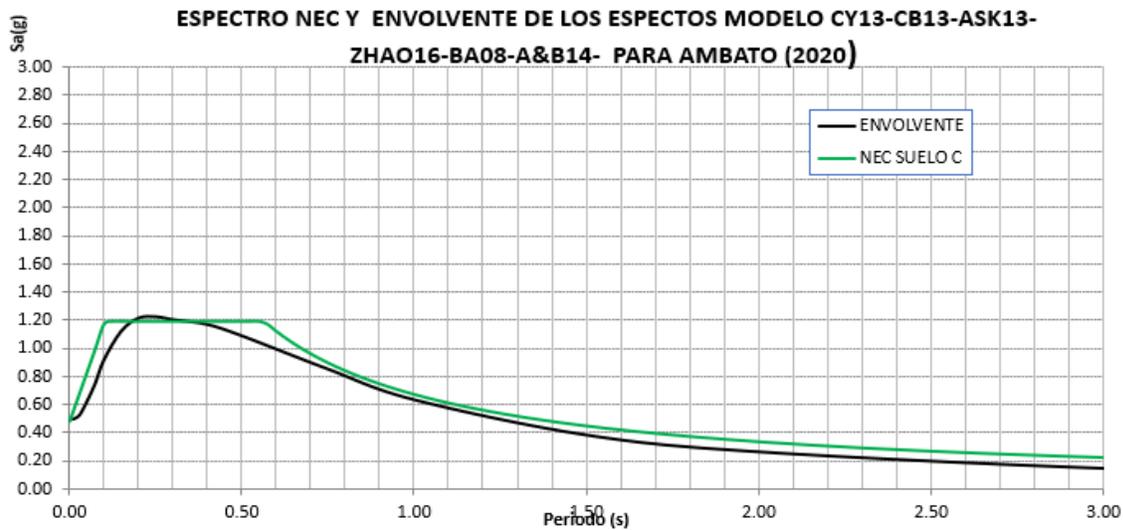
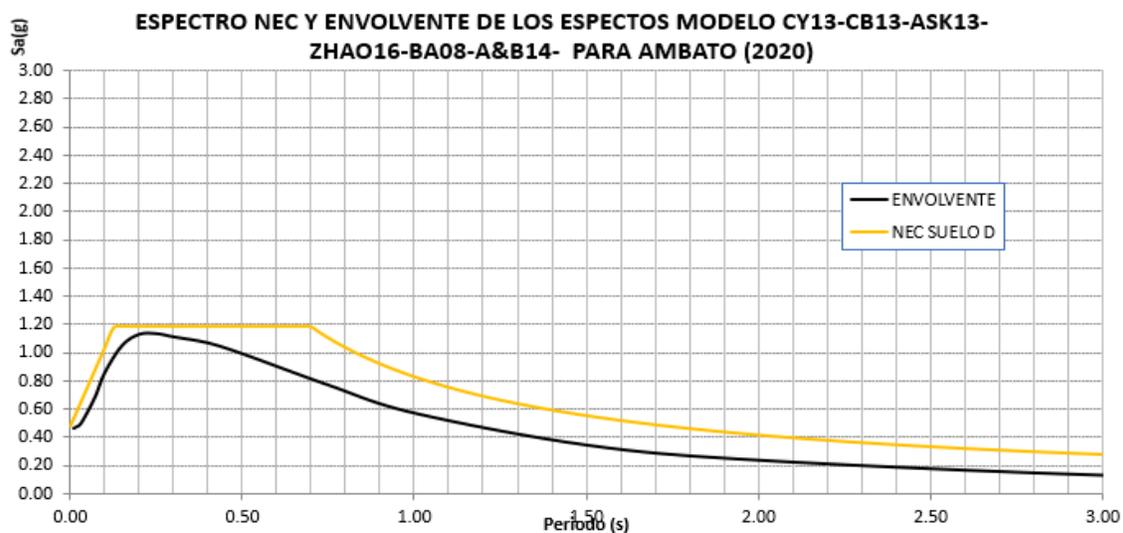


Figura 87

Comparación de espectros envolventes con los reportados en NEC 15, perfil de suelo sísmico “D”.



Se puede observar que existe una buena correlación con el perfil de suelo C, mientras que para el perfil de suelo D se puede pensar en una reducción de las ordenadas espectrales para periodos largos.

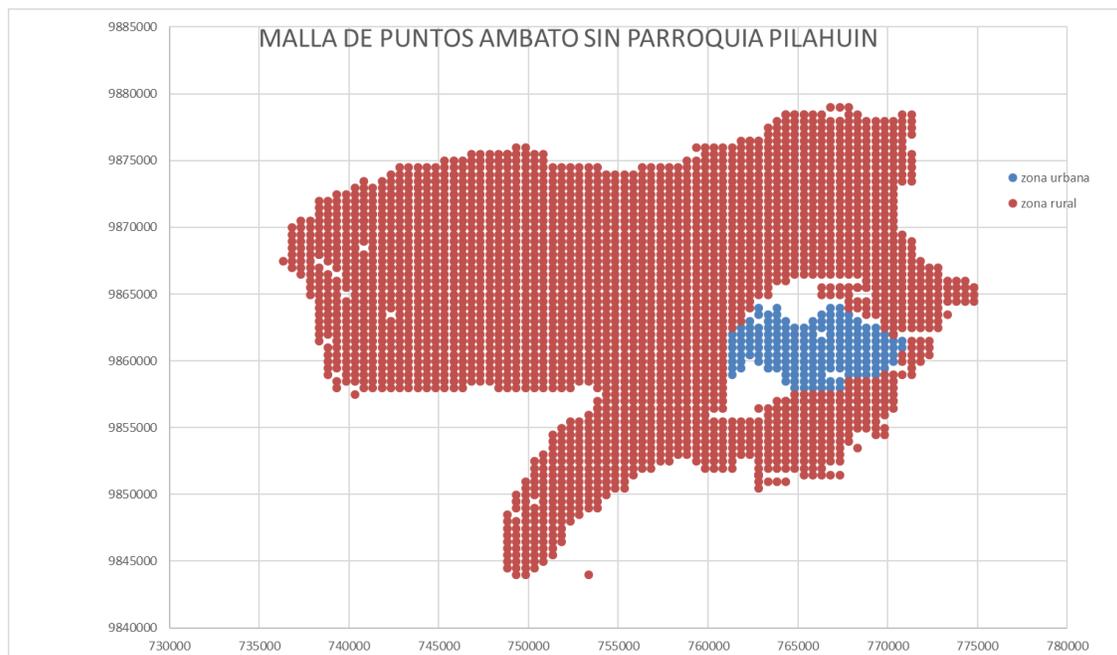
Espectros de aceleración vertical del suelo para la ciudad de Ambato

Resultados en perfil sísmico C

Al presentarse un sismo de magnitud 6.5, en la falla Ambato los espectros promedios de los modelos seleccionados de toda la malla de puntos de la ciudad de Ambato zona urbana y rural sin considerar la parroquia Pilahuin, indicados en la figura 45

Figura 88

Malla de puntos Ambato suelo tipo "C"

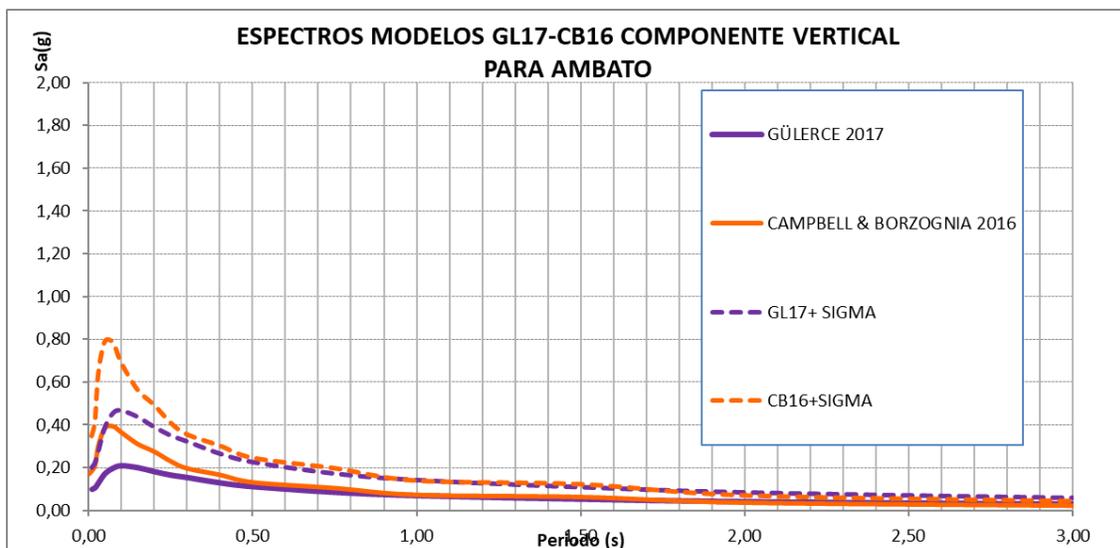


Una vez identificada la malla de puntos cada 500m en los dos sentidos, se encontró los espectros en cada punto para los dos modelos mencionados en el anterior apartado, considerando un sismo de magnitud máxima de 6.5 correspondiente a la Falla Ambato, posterior a este, se obtuvo los espectros promedio para el área urbana y rural a los que les

llamaremos “valores medios”. Se presenta los valores medios (50%), y valores medios más una desviación estándar, presentados en la figura 89

Figura 89

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo “C”, en la Falla Ambato, $V_{s30}=380$ m/s



En la figura 89 se presenta los valores medios para un sismo de magnitud 6.3, correspondiente a la falla de Huachi y en la figura 90 corresponde al caso de que el sismo se genera en la falla de Totoras con una magnitud de 6.5

Figura 90

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo “C”, en la Falla de Huachi, $V_{s30}=380$ m/s

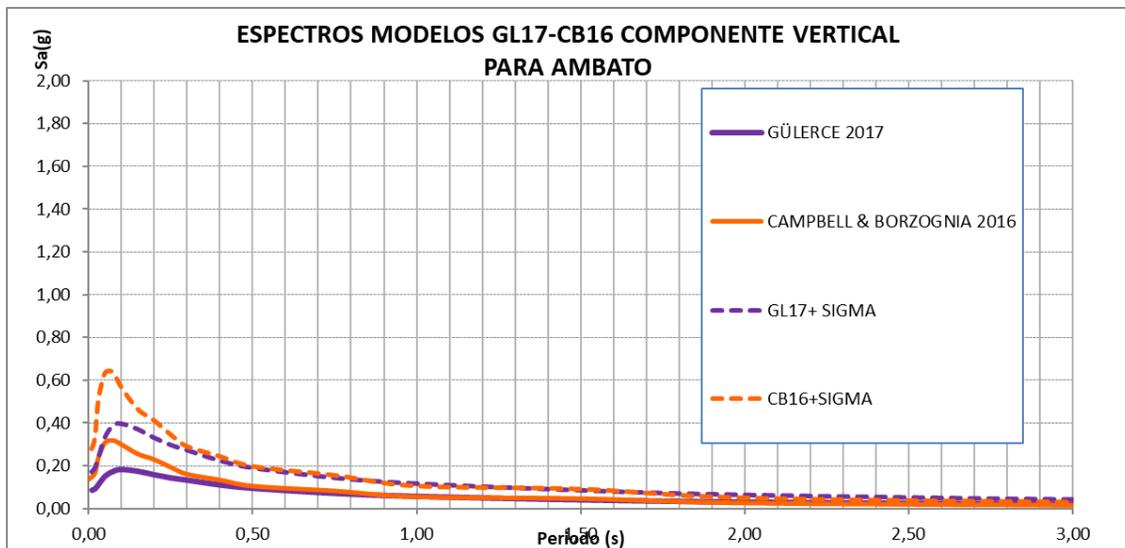
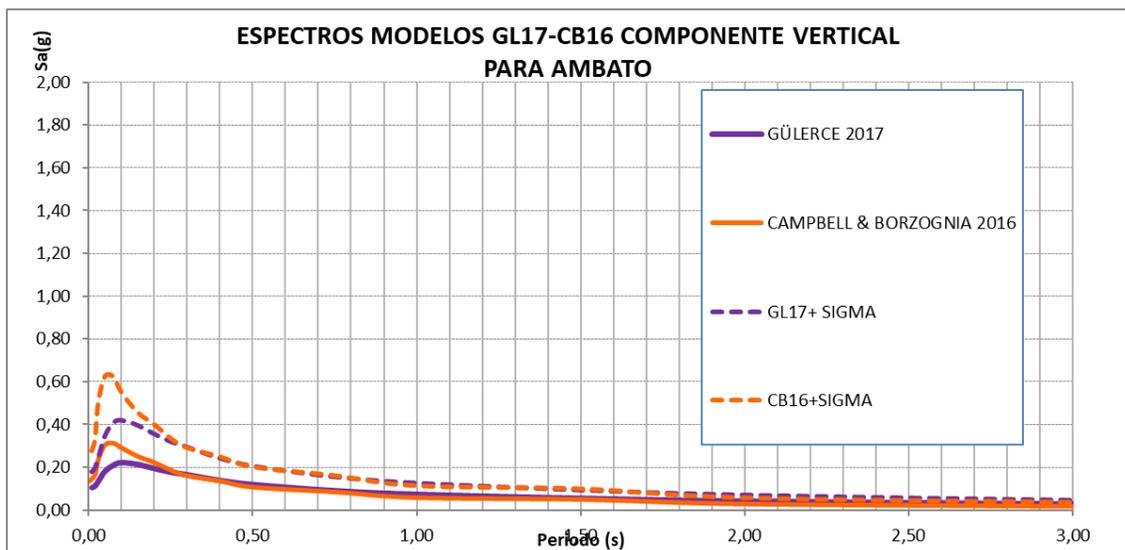


Figura 91

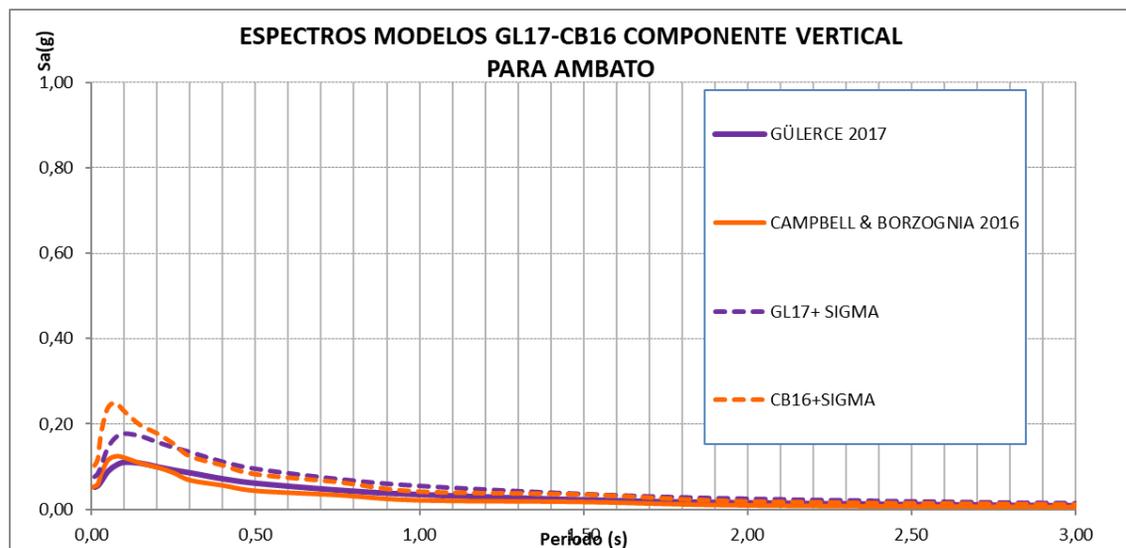
Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla de Totoras, $V_{s30}=380$ m/s



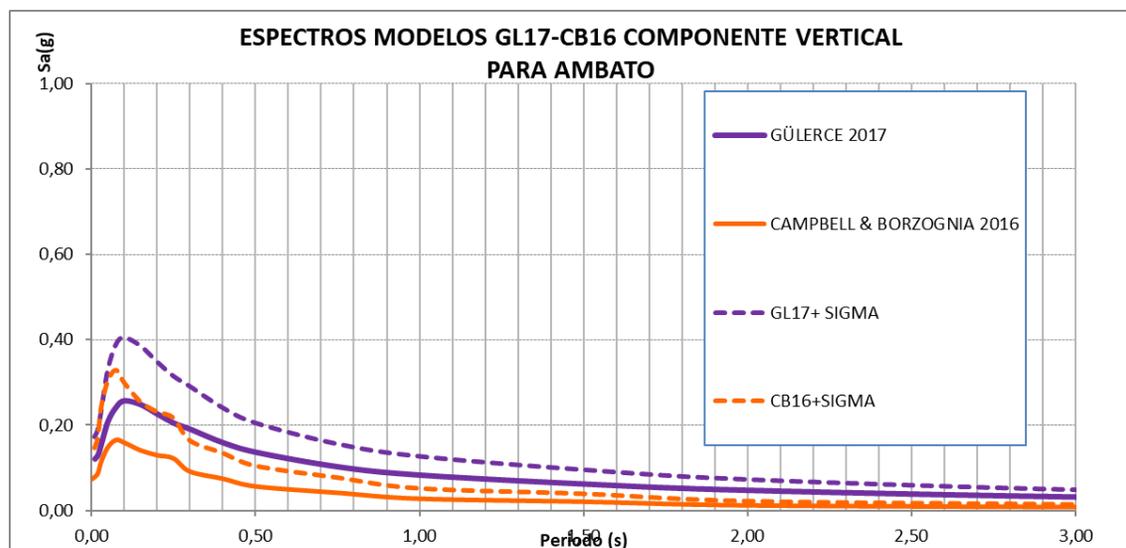
Ahora en la figura 92 se presenta los valores medios para un sismo de magnitud 6.1, correspondiente a la falla F-10 y en la figura 93, corresponde al caso de que el sismo se genera en la falla F-11 con una magnitud de 6.6

Figura 92

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "C", en la Falla de F-10, $V_s30=380$ m/s

**Figura 93**

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "C", en la Falla de F-11, $V_s30=380$ m/s



En la figura 94 se presenta los valores medios para un sismo de magnitud 6.2, correspondiente a la falla F-16 y se concluye con los valores medios y medios más una desviación estándar correspondientes a la falla F-28 con una magnitud de 6.0 correspondiente a la figura 95

Figura 94

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "C", en la Falla de F-16, $V_{s30}=380$ m/s

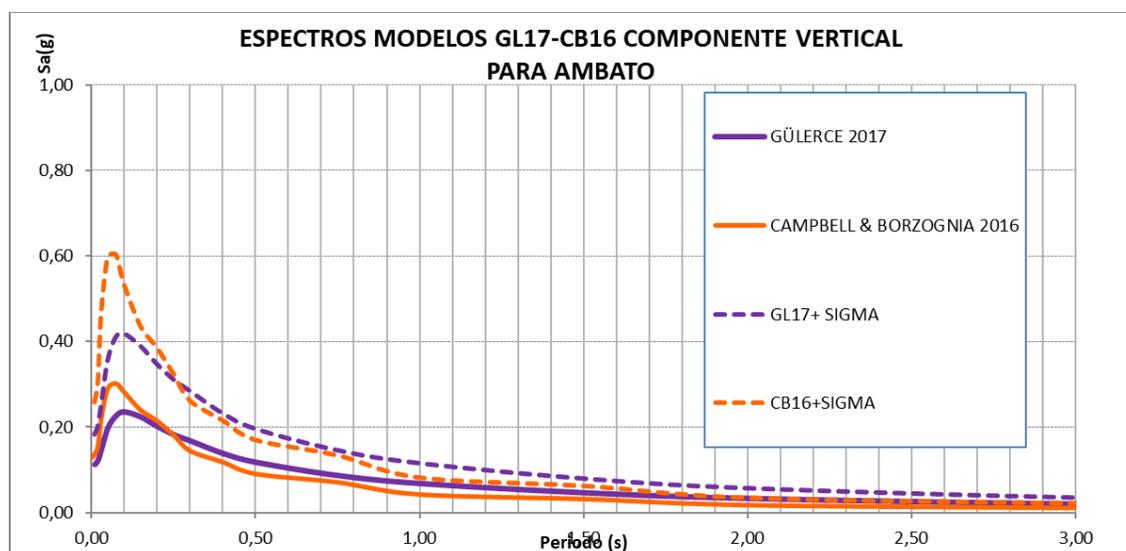
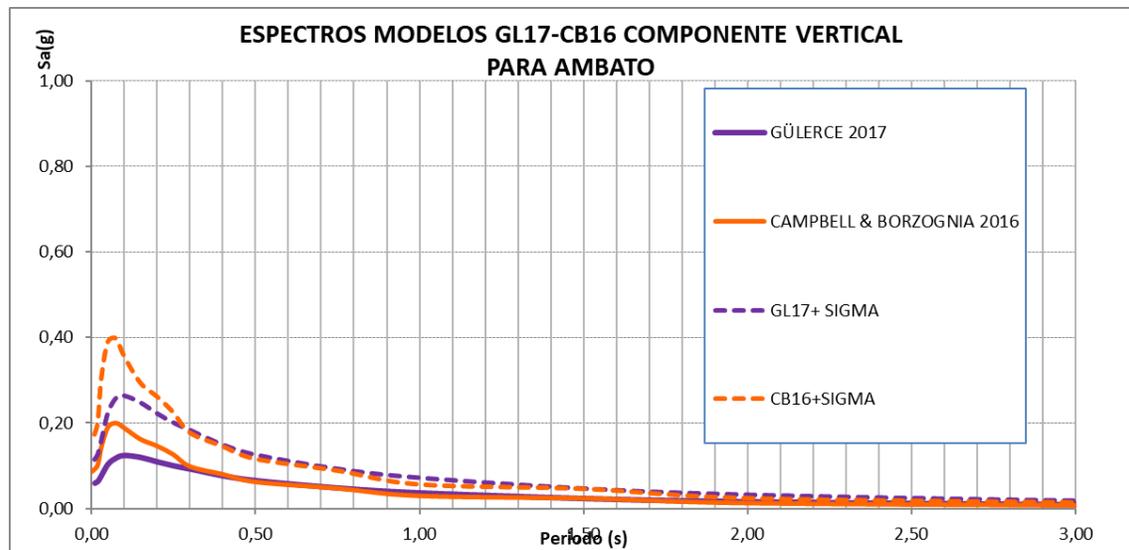


Figura 95

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "C", en la Falla de F-28, $V_{s30}=380$ m/s



Ahora se procede a comparar los espectros de control de la figura 89-95 como se realizó en los espectros para la componente vertical, se puede identificar que las mayores ordenadas espectrales se presentan cuando se registre un sismo de magnitud 6.5 correspondiente a la falla Ambato.

Con el objetivo de presentar mayores ordenadas espectrales de la figura 89, se obtiene los valores medios encontrados con los seis modelos de movimiento fuertes y se presenta en la figura 96

El espectro medio de la figura 53, es el Espectro Medio, DBE y el espectro medio más la desviación estándar (sigma) se llama Espectro Máximo Considerado y estos son los Espectros de Control para un perfil sísmico del suelo "C", los valores se hallan indicados en la tabla 20.

Figura 96

Promedio seis ecuaciones suelo tipo "C", en la Falla Ambato, $V_{s30}=380$ m/s

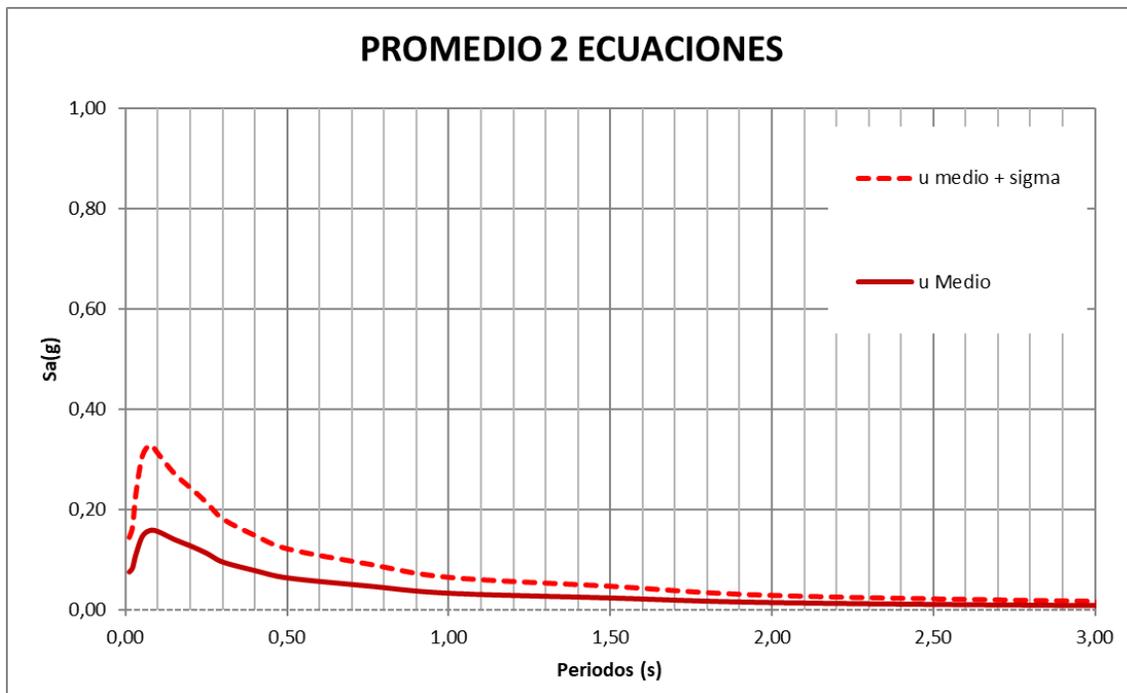


Tabla 20

Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico C

PERIODO(S)	Espectros de Control	
	DBE (g)	MCE (g)
0,010	0,076	0,1439
0,020	0,084	0,1660
0,030	0,110	0,2297
0,050	0,147	0,3054
0,075	0,159	0,3278
0,100	0,156	0,3097
0,150	0,141	0,2704
0,200	0,128	0,2421
0,250	0,113	0,2127
0,300	0,096	0,1805
0,400	0,078	0,1474
0,500	0,064	0,1210
0,750	0,048	0,0909
1,000	0,033	0,0643
1,500	0,024	0,0467
2,000	0,014	0,0285

3,000	0,008	0,0167
4,000	0,005	0,0107
5,000	0,003	0,0055
7,500	0,001	0,0023

Resultados en perfil sísmico D

Al presentarse un sismo de magnitud 6.5, en la falla Ambato los espectros promedios de toda la malla de puntos de la ciudad de Ambato parroquia urbana y rural sin incluir la parroquia Pilahuin, indicados en la figura 45, de la misma manera se desarrolló para las fallas de Huachi, Totoras, F-10, F-11, F-16, F-28.

Figura 97

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla Ambato, $V_{s30}=300$ m/s

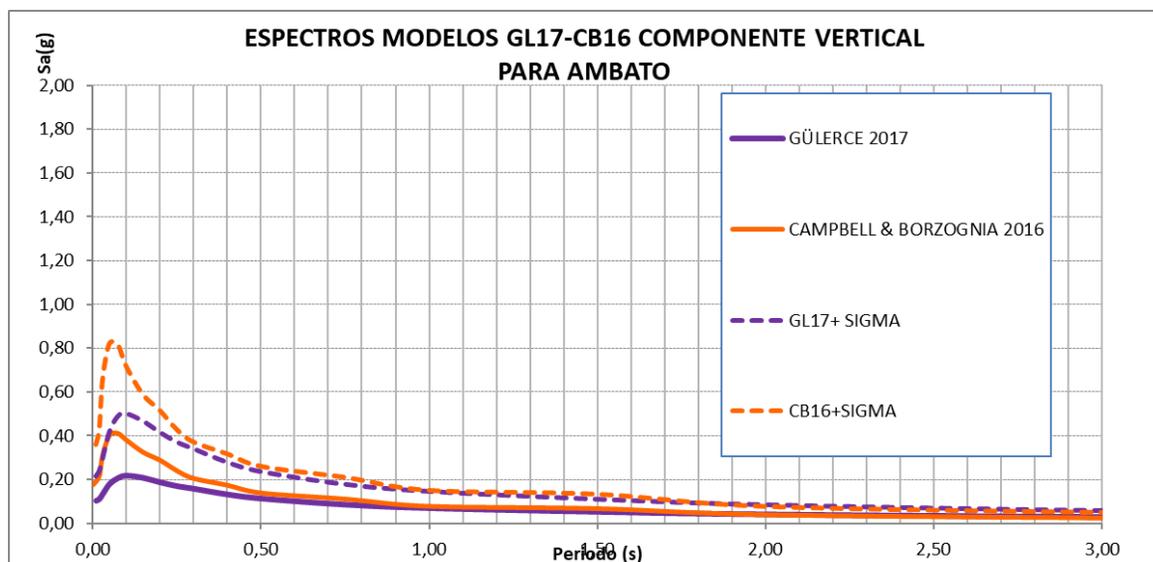


Figura 98

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "D", en la Falla de Huachi, $V_{s30}=300$ m/s

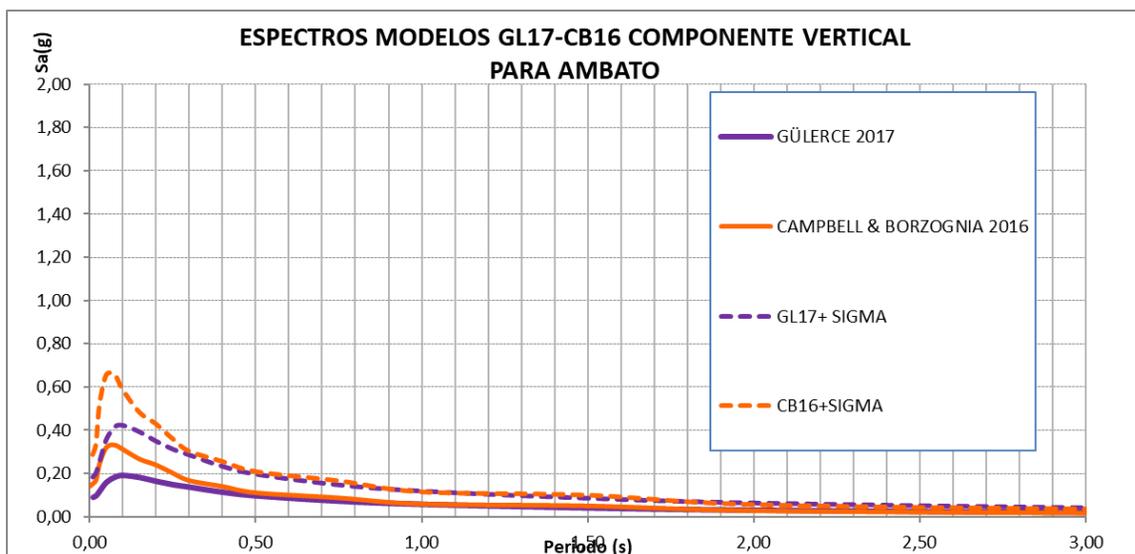


Figura 99

*Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla de Totoras,
 $V_{s30}=300$ m/s*

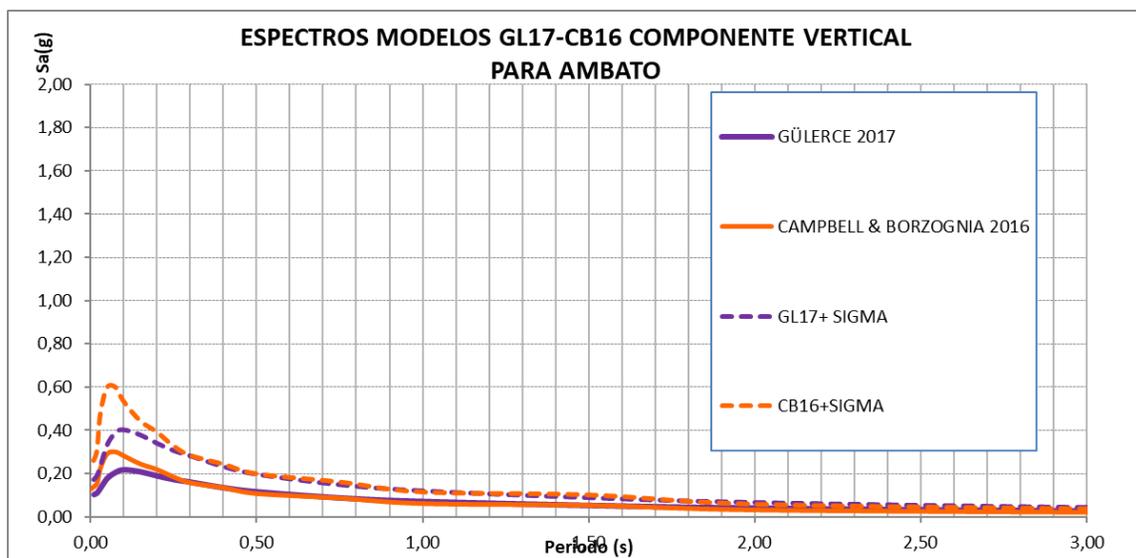


Figura 100

*Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "D", en la Falla F-10, $V_{s30}=300$
m/s*

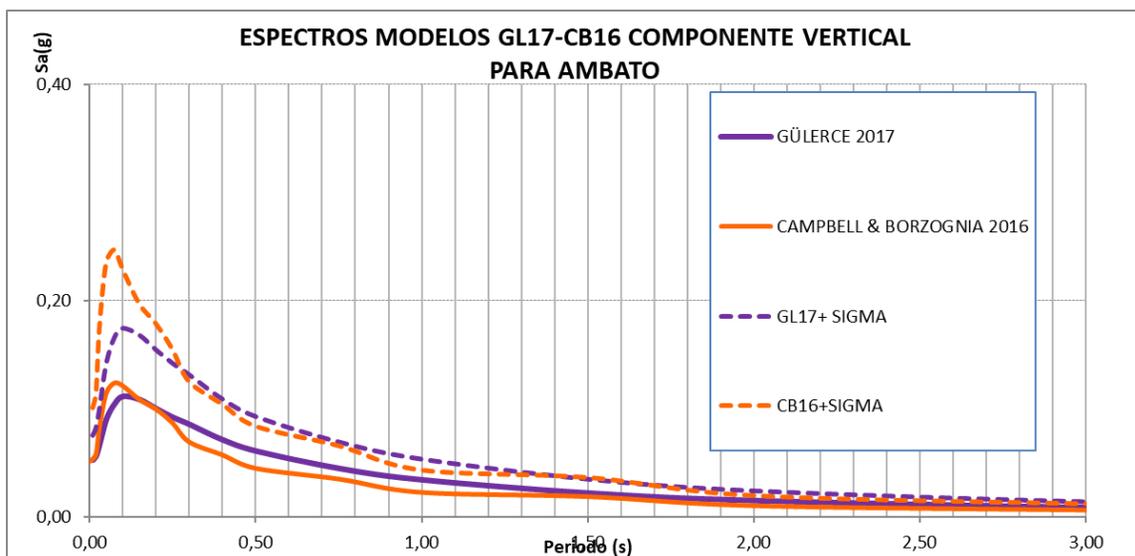


Figura 101

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "D", en la Falla F11, $V_{s30}=300$ m/s

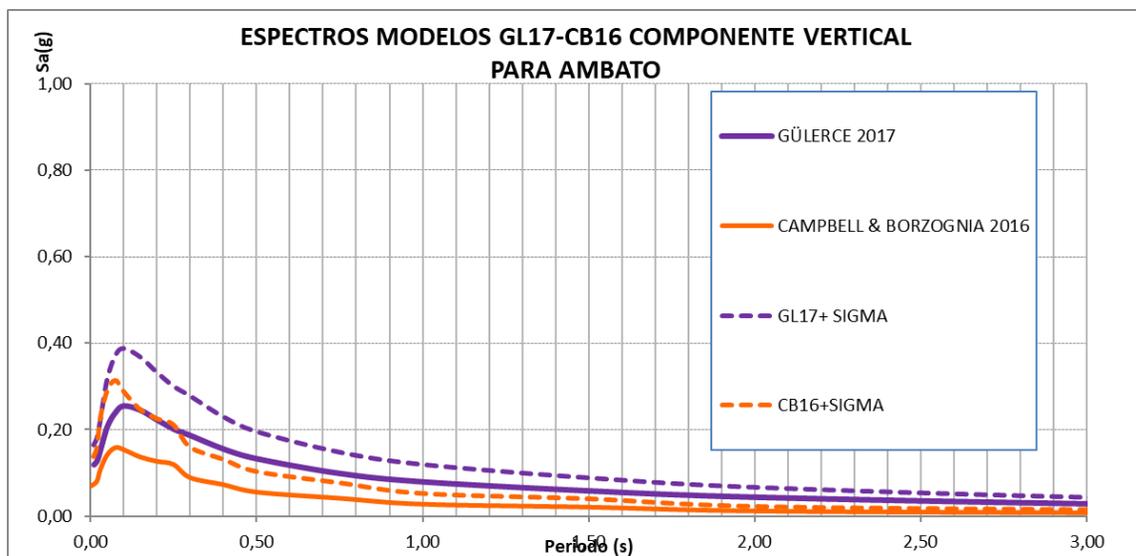


Figura 102

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "D", en la Falla F-16, $V_{s30}=300$ m/s

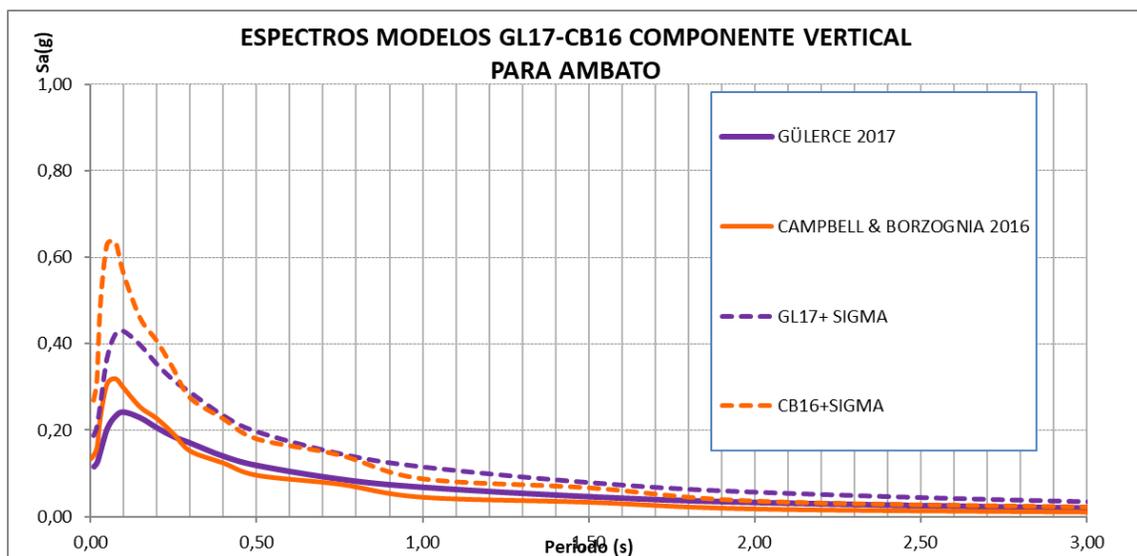


Figura 103

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "D", en la Falla F-28, $V_{s30}=300$ m/s

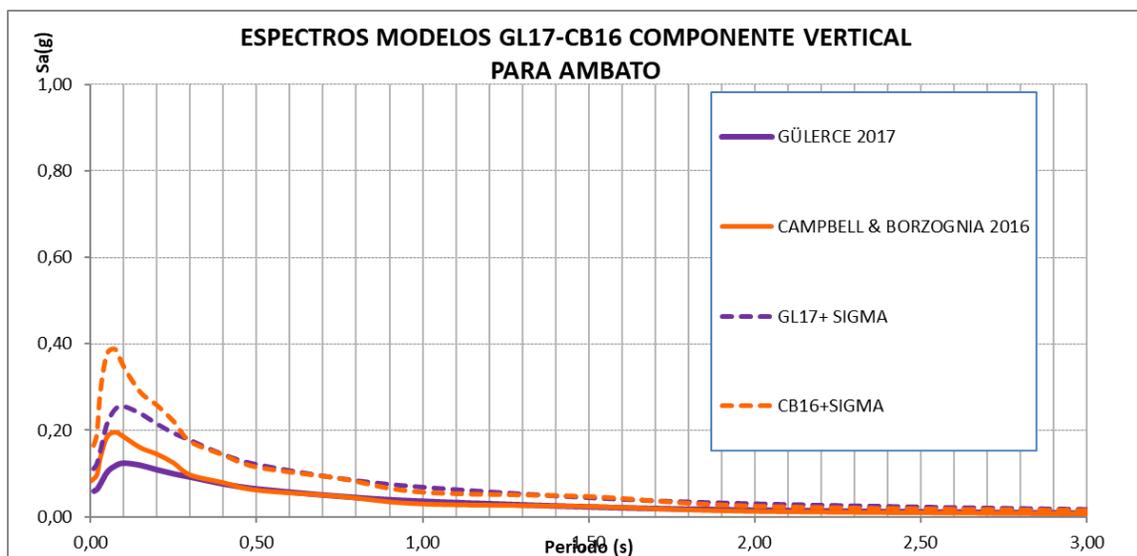
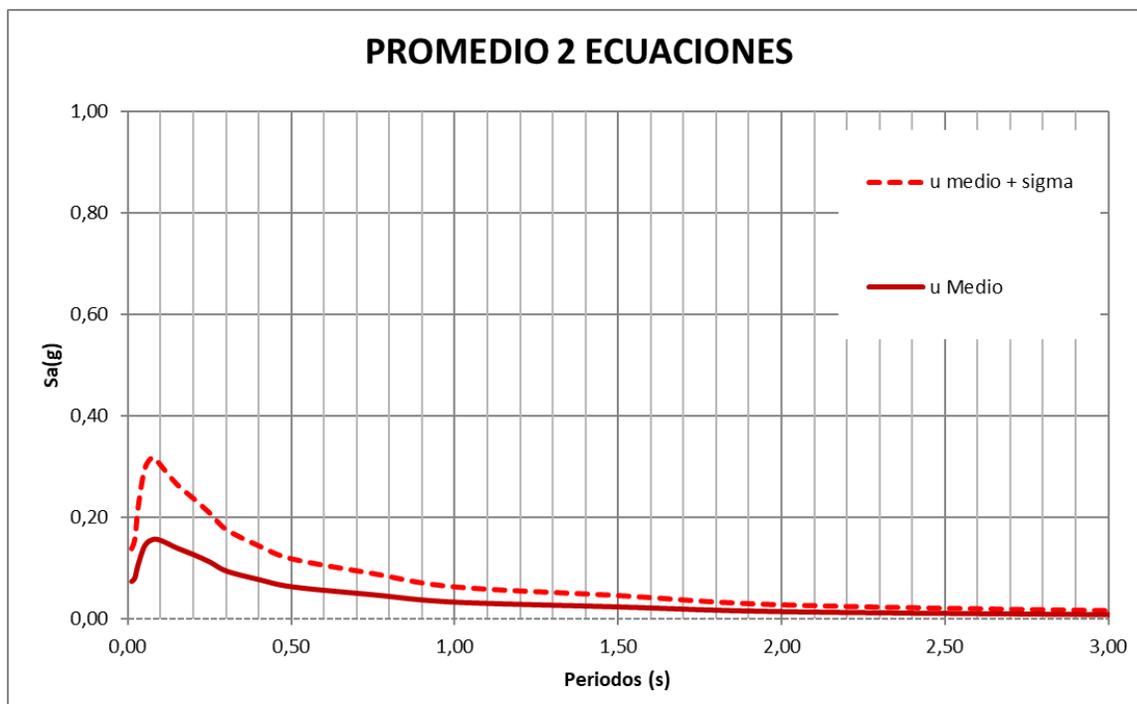


Figura 104

Promedio seis ecuaciones suelo tipo "D", en la Falla Ambato, $V_{s30}=300$ m/s

**Tabla 21**

Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico D

PERIODO(S)	Espectros de Control	
	DBE (g)	MCE (g)
0,010	0,073	0,1379
0,020	0,081	0,1581
0,030	0,107	0,2202
0,050	0,144	0,2956
0,075	0,156	0,3180
0,100	0,154	0,3013
0,150	0,139	0,2637
0,200	0,126	0,2363
0,250	0,112	0,2074
0,300	0,094	0,1756
0,400	0,077	0,1434
0,500	0,063	0,1180
0,750	0,047	0,0888
1,000	0,033	0,0628
1,500	0,023	0,0456
2,000	0,014	0,0275
3,000	0,008	0,0160

4,000	0,005	0,0101
5,000	0,003	0,0051
7,500	0,001	0,0021
10,000	0,041	0,0746

Al comparar los espectros de control de la figura 93-103, se puede identificar que las mayores ordenadas espectrales se presentan cuando se registre un sismo de magnitud 6.5 correspondiente a la falla Ambato, que representa el modelo de Campbell y Borzognia 2016.

Con el objetivo de presentar mayores ordenadas espectrales de la figura 93, se obtiene los valores medios encontrados con los seis modelos de movimiento fuertes y se presenta en la figura 104

El espectro medio de la figura 104, es el Espectro Medio, DBE y el espectro medio más la desviación estándar (sigma) se llama Espectro Máximo Considerado y estos son los Espectros de Control para un perfil sísmico del suelo "D", los valores se hallan indicados en la tabla 21.

Resultados en perfil sísmico C

Al presentarse un sismo de magnitud 6.5, en la falla Ambato los espectros promedios de las dos ecuaciones de movimientos fuertes de toda la malla de puntos de la ciudad de Ambato parroquia urbana y rural, incluida la parroquia Pilahuin la cual representa el 30 por ciento de la zona rural, indicado en la figura , de la misma manera se desarrolló para las fallas de Huachi, Totoras, F-10, F-11, F-16, F-28.

Figura 105

Malla de puntos Ambato zona urbana y rural suelo tipo "C"

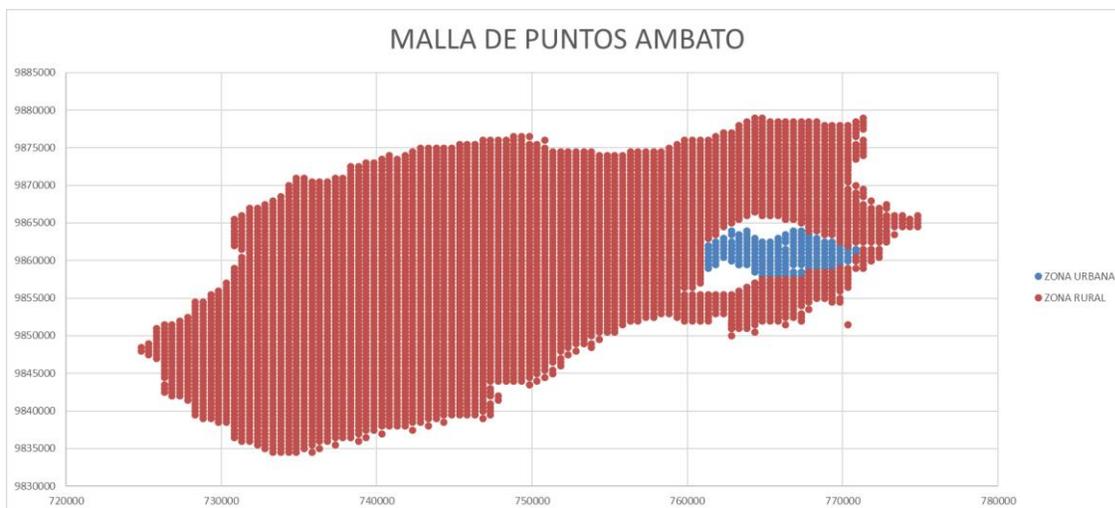


Figura 106

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla Ambato, $V_{s30}=380$ m/s

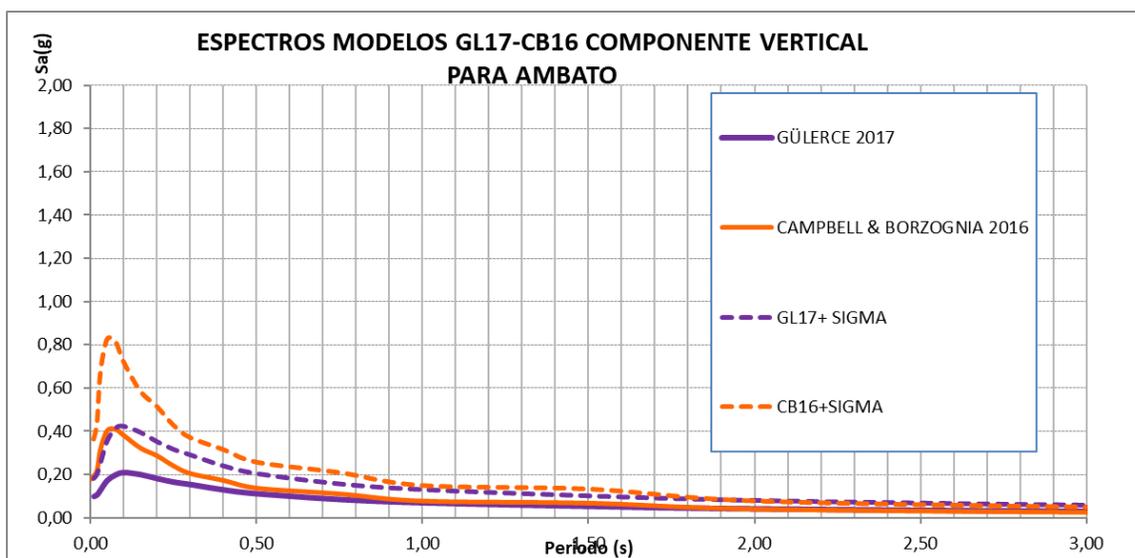


Figura 107

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "C", en la Falla de Huachi, $V_{s30}=380$ m/s

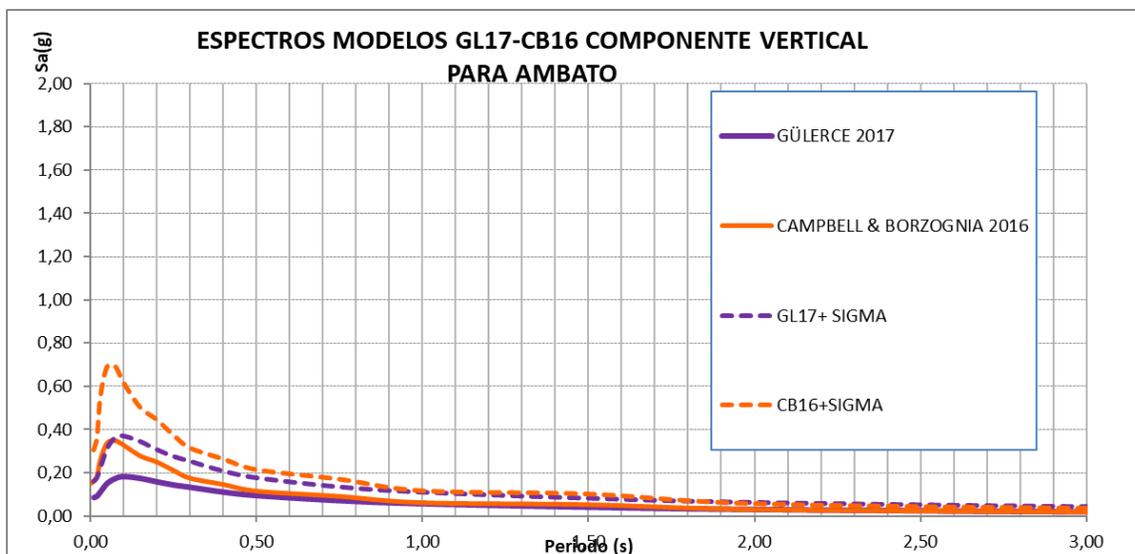


Figura 108

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "C", en la Falla de Totoras, $V_{s30}=380$ m/s

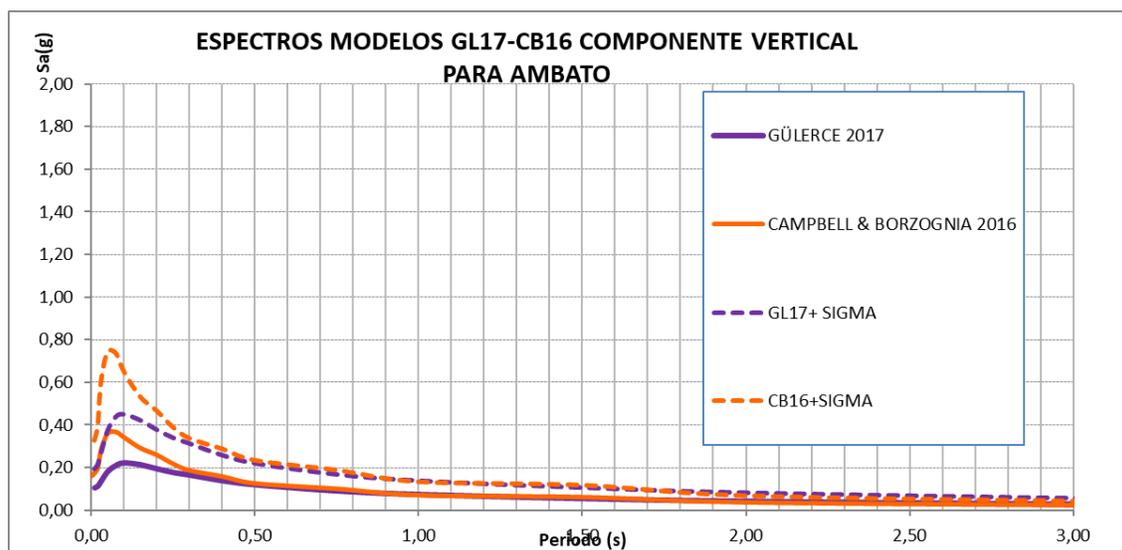


Figura 109

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "C", en la Falla F-10, $V_{s30}=380$ m/s

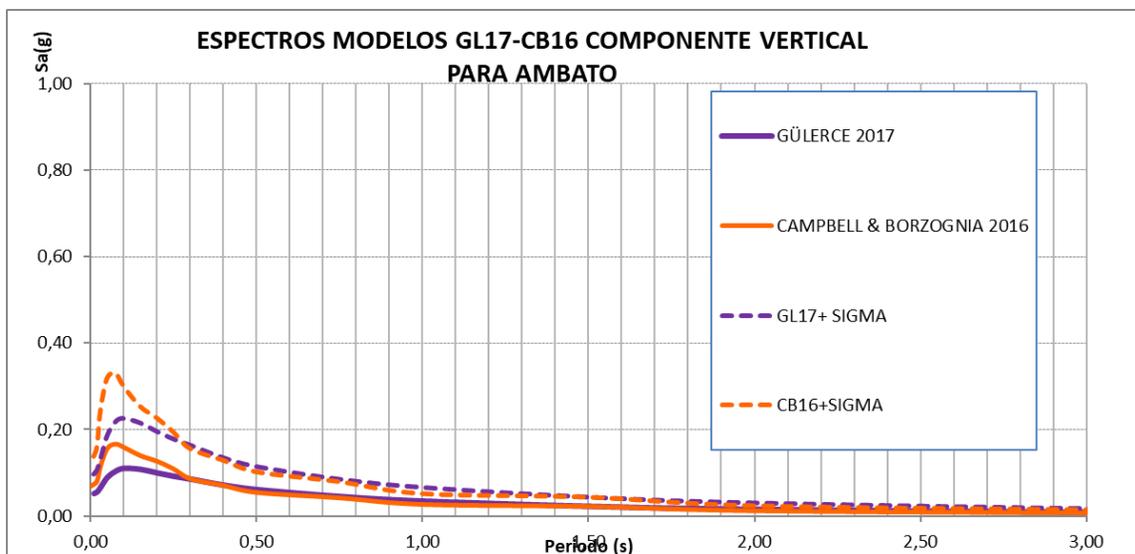


Figura 110

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "C", en la Falla F-11, Vs30=380 m/s

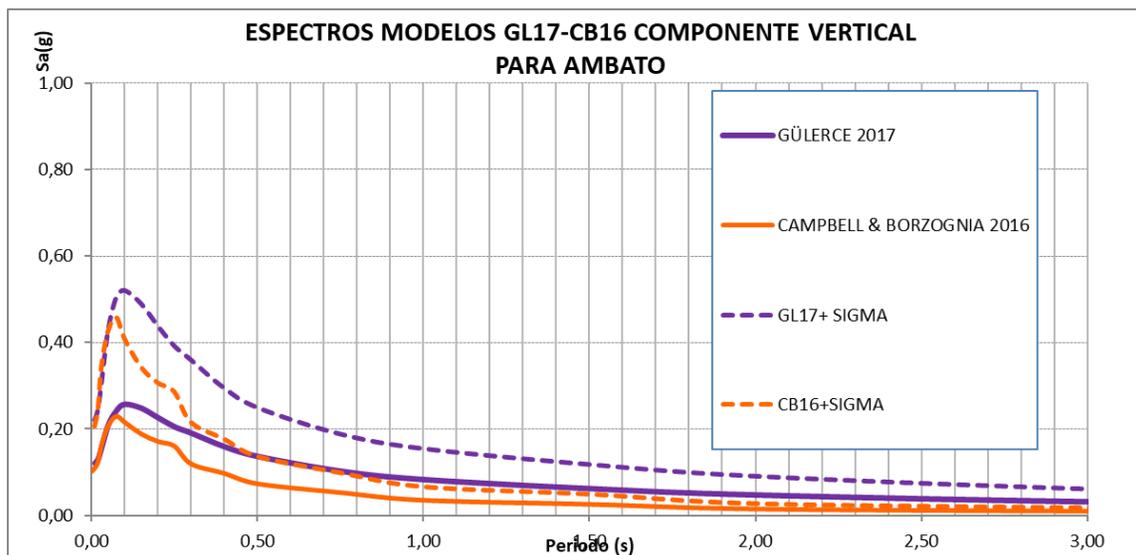


Figura 111

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "C", en la Falla F-16, Vs30=380 m/s

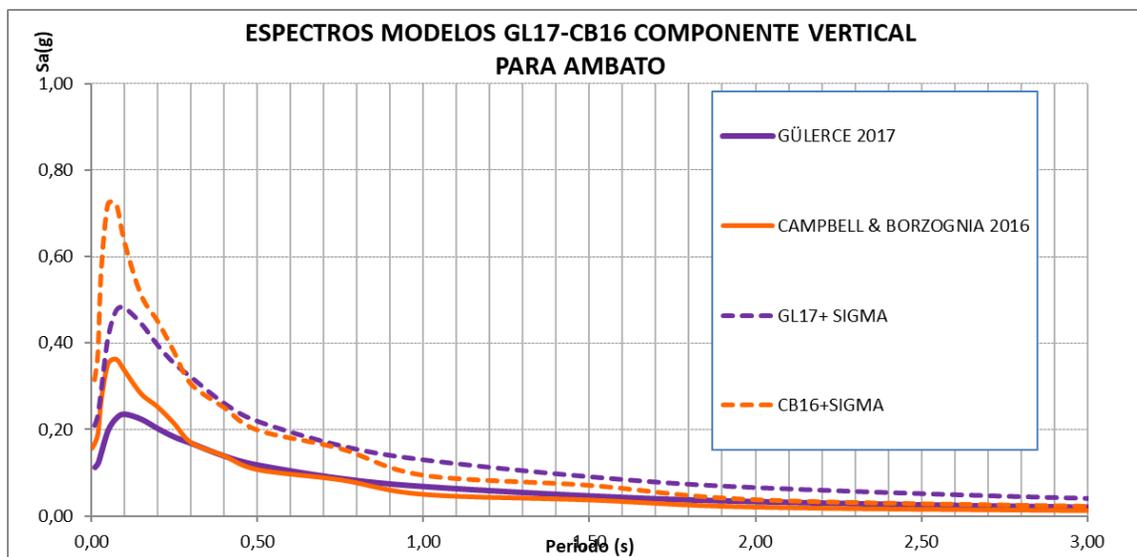
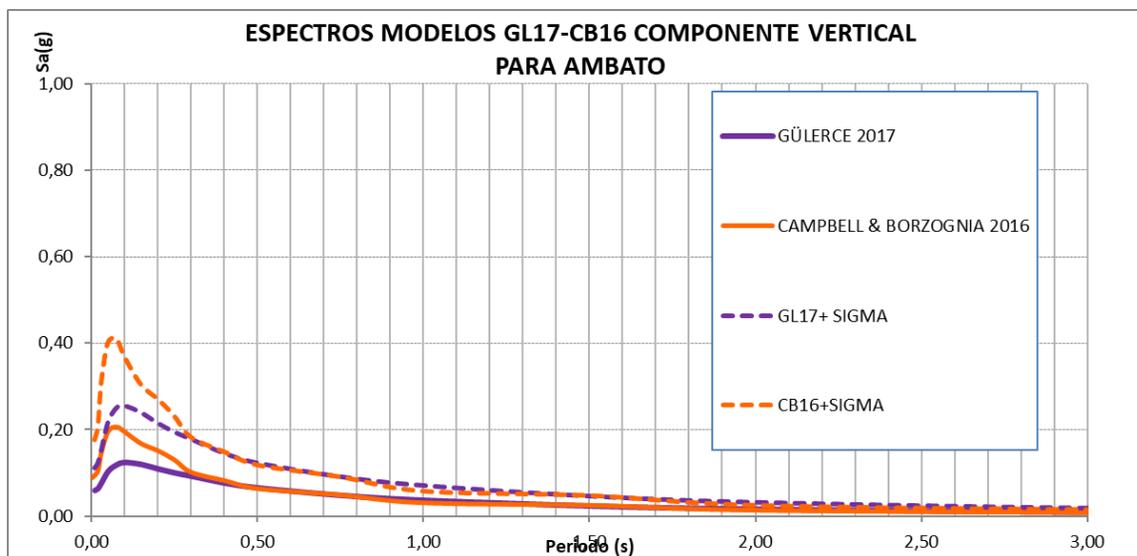


Figura 112

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "C", en la Falla F-28, $V_s30=380$ m/s



Al comparar los espectros de control de la figura 106-109 se puede identificar que las mayores ordenadas espectrales se presentan cuando se registre un sismo de magnitud 6.5 correspondiente a la falla Ambato.

Con el objetivo de presentar mayores ordenadas espectrales de la figura 106, se obtiene los valores medios encontrados con los seis modelos de movimiento fuertes y se presenta en la figura 113

El espectro medio de la figura 113, es el Espectro Medio, DBE y el espectro medio más la desviación estándar (sigma) se llama Espectro Máximo Considerado y estos son los Espectros de Control para un perfil sísmico del suelo "C", los valores se hallan indicados en la tabla 22

Figura 113

Promedio seis ecuaciones suelo tipo "C", en la Falla Ambato, Vs30=380 m/s

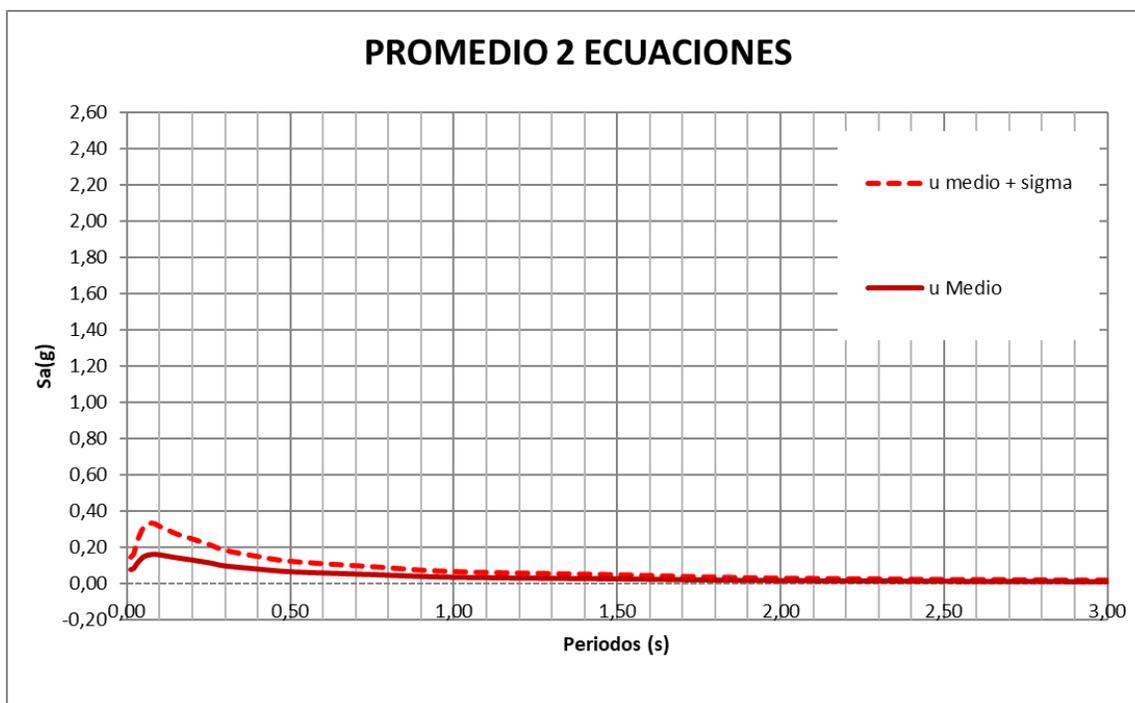


Tabla 22

Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico C

PERIODO(S)	Espectros de Control	
	DBE (g)	MCE (g)

0,010	0,077	0,1441
0,020	0,085	0,1662
0,030	0,112	0,2317
0,050	0,150	0,3088
0,075	0,162	0,3306
0,100	0,160	0,3118
0,150	0,144	0,2717
0,200	0,130	0,2432
0,250	0,115	0,2133
0,300	0,097	0,1807
0,400	0,079	0,1476
0,500	0,065	0,1210
0,750	0,048	0,0914
1,000	0,034	0,0647
1,500	0,024	0,0474
2,000	0,015	0,0289
3,000	0,009	0,0171
4,000	0,006	0,0110
5,000	0,003	0,0055
7,500	0,001	0,0023
10,000	0,043	0,0795

Resultados en perfil sísmico D

Ahora se presenta los espectros de control para la componente vertical de la ciudad de Ambato zona urbana y rural incluida la parroquia Pilahuin para lo cual se realizará la misma metodología del apartado anterior, para un sismo de magnitud 6.5 indicado en la figura 114, de la misma manera se desarrolló para las fallas de Huachi, Totoras, F-10, F-11, F-16, F-28.

Figura 114

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla Ambato, $V_{s30}=300$ m/s

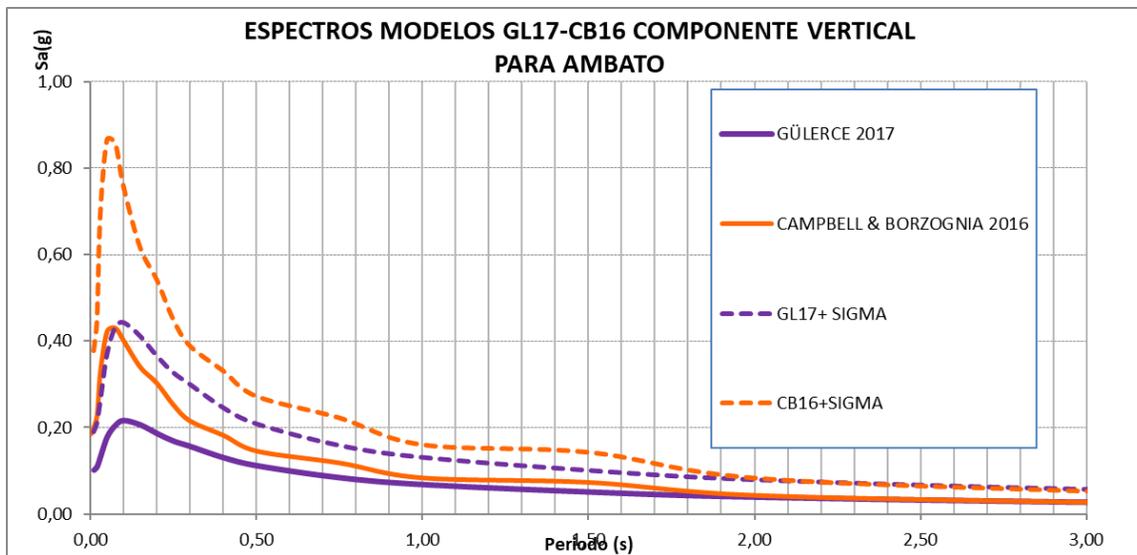


Figura 115

*Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.3 suelo tipo "D", en la Falla de Huachi,
 $V_{s30}=300$ m/s*

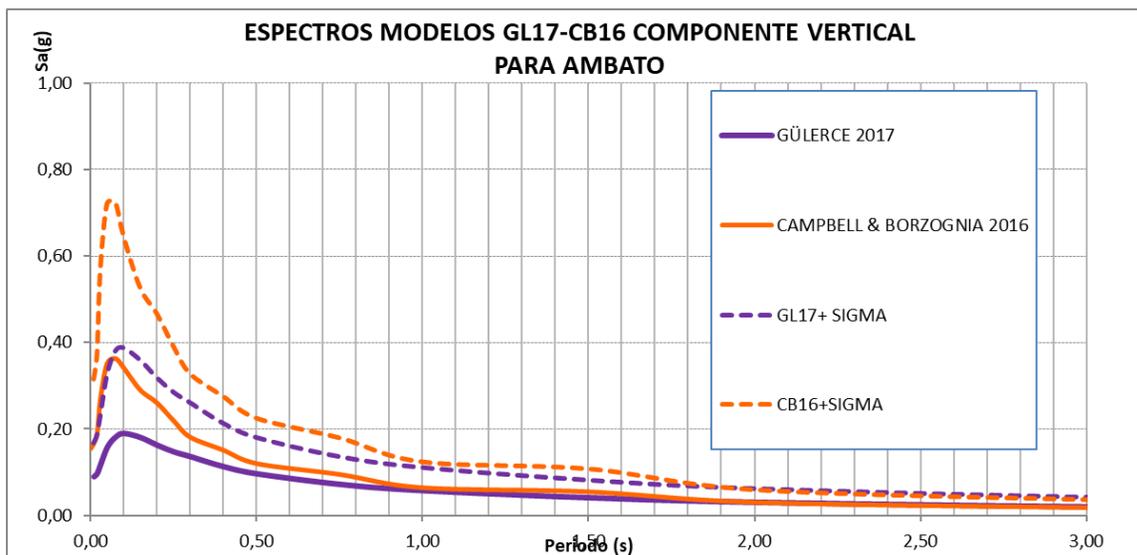


Figura 116

*Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.5 suelo tipo "D", en la Falla de Totoras,
 $V_{s30}=300$ m/s*

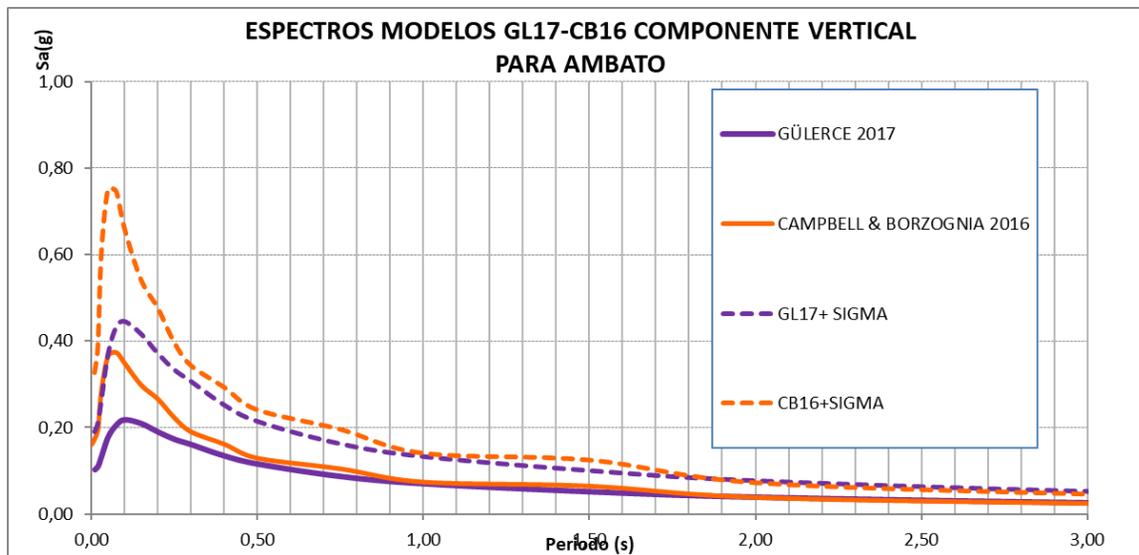


Figura 117

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.1 suelo tipo "D", en la Falla F-10, $V_{s30}=300$ m/s

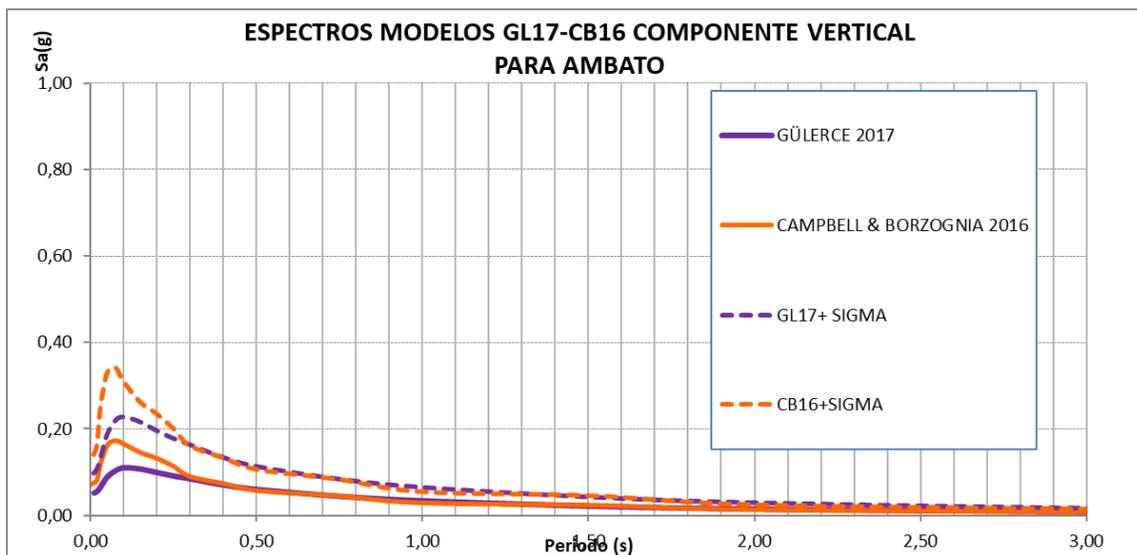


Figura 118

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.6 suelo tipo "D", en la Falla F-11, $V_{s30}=300$ m/s

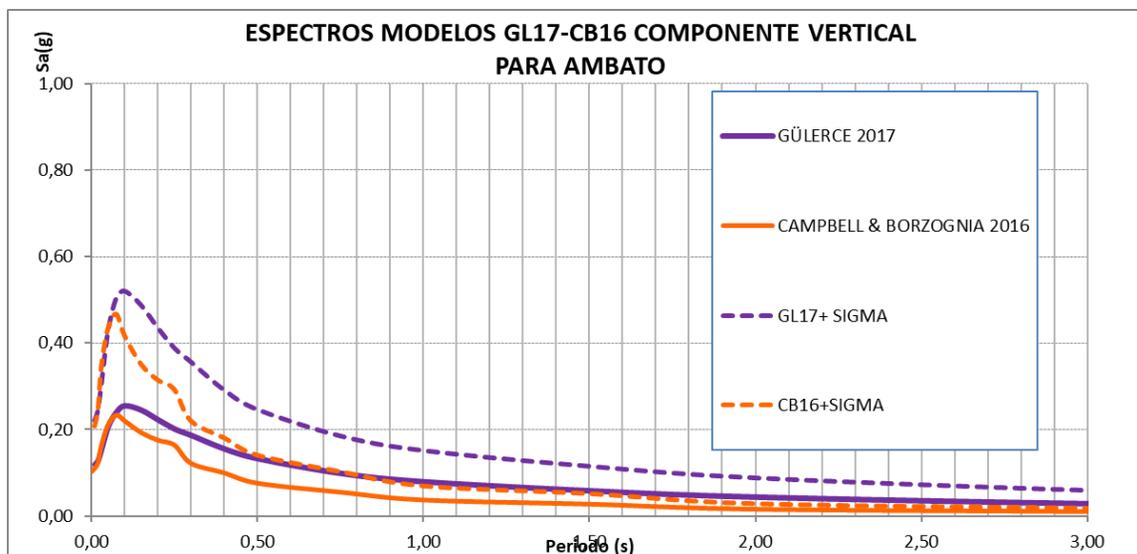


Figura 119

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.2 suelo tipo "D", en la Falla F-16, $V_{s30}=300$ m/s

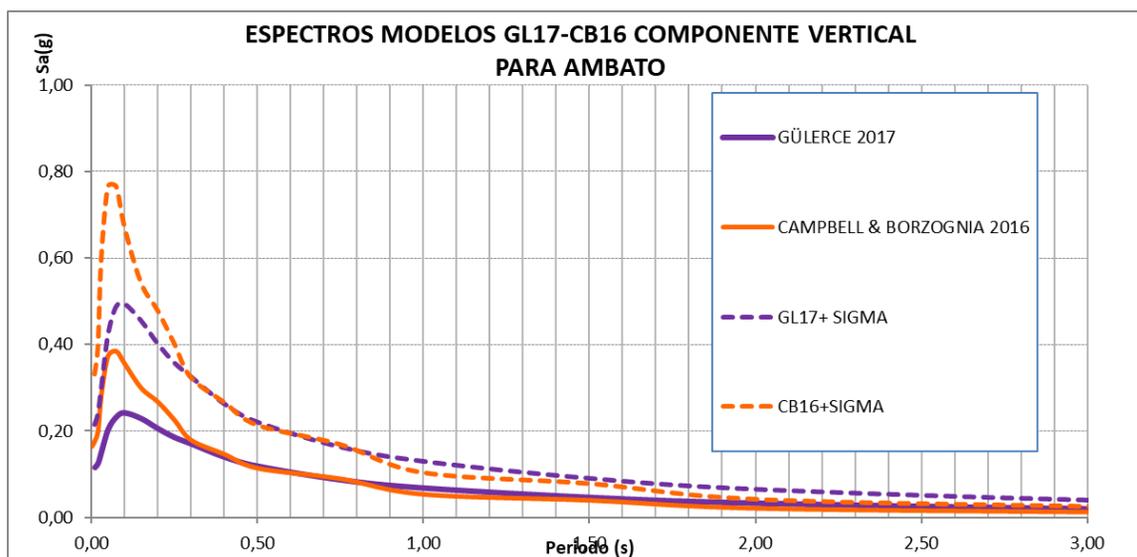


Figura 120

Espectro asociado a un sismo de magnitud 6.0 suelo tipo "D", en la Falla F-28, $V_{s30}=300$ m/s

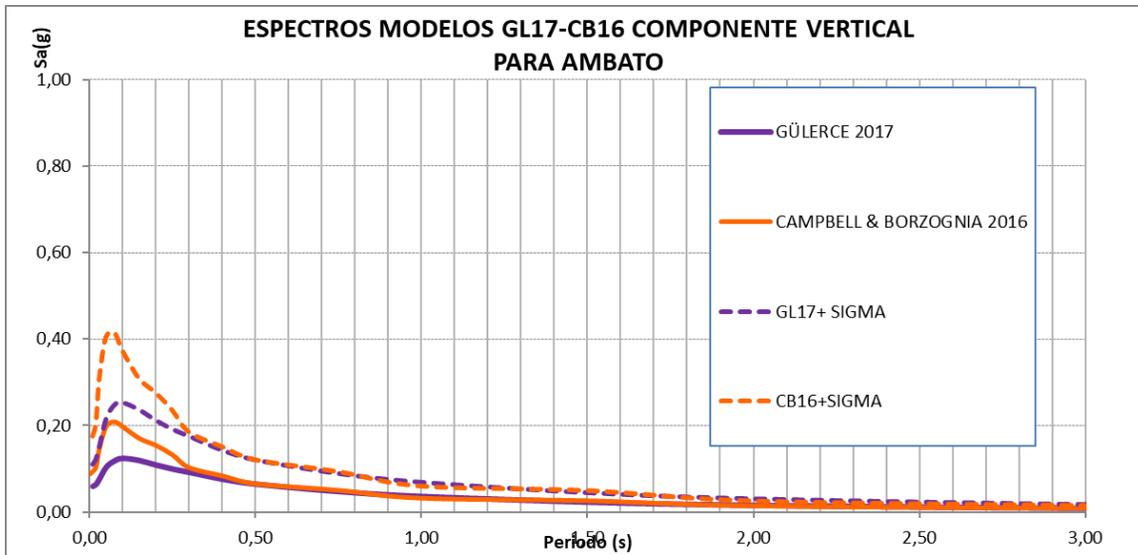


Figura 121

Promedio seis ecuaciones suelo tipo "D", en la Falla Ambato, Vs30=300 m/s

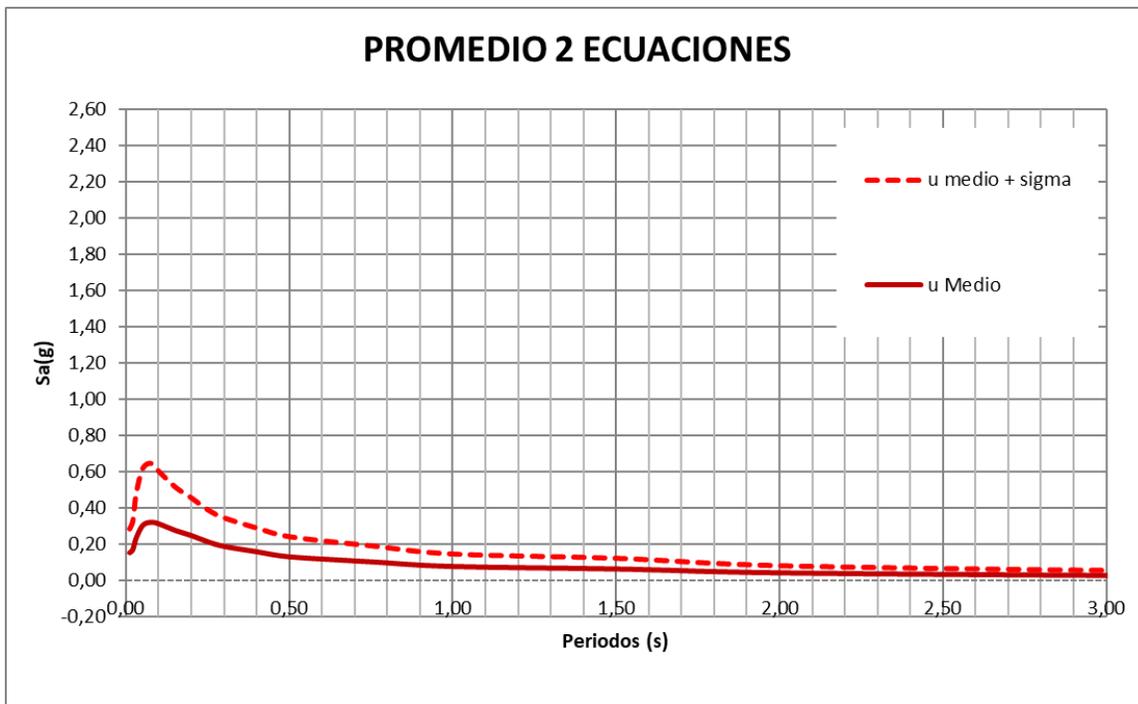


Tabla 23

Espectros de Control DBE y MCE para un perfil sísmico D

PERIODO(S)	Espectros de Control	
	DBE (g)	MCE (g)

0,010	0,152	0,2834
0,020	0,170	0,3308
0,030	0,232	0,4789
0,050	0,301	0,6171
0,075	0,318	0,6448
0,100	0,309	0,5994
0,150	0,273	0,5134
0,200	0,245	0,4534
0,250	0,211	0,3879
0,300	0,186	0,3439
0,400	0,157	0,2881
0,500	0,129	0,2401
0,750	0,101	0,1901
1,000	0,076	0,1451
1,500	0,062	0,1215
2,000	0,042	0,0808
3,000	0,028	0,0544
4,000	0,020	0,0387
5,000	0,011	0,0210
7,500	0,005	0,0095
10,000	0,092	0,1687

El espectro medio de la figura 121, es el Espectro Medio, DBE y el espectro medio más la desviación estándar (sigma) se llama Espectro Máximo Considerado y estos son los Espectros de Control para un perfil sísmico del suelo “D”, los valores se hallan indicados en la tabla 23.

Norma Ecuatoriana de la Construcción

De la misma manera se compara los espectros para la componente vertical que reporta la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15), con los resultados obtenidos del presente estudio para un perfil de suelo sísmico “C” y “D”.

Figura 122

Comparación de espectros envolventes con los reportados en NEC 15, perfil de suelo sísmico “C”, zona urbana

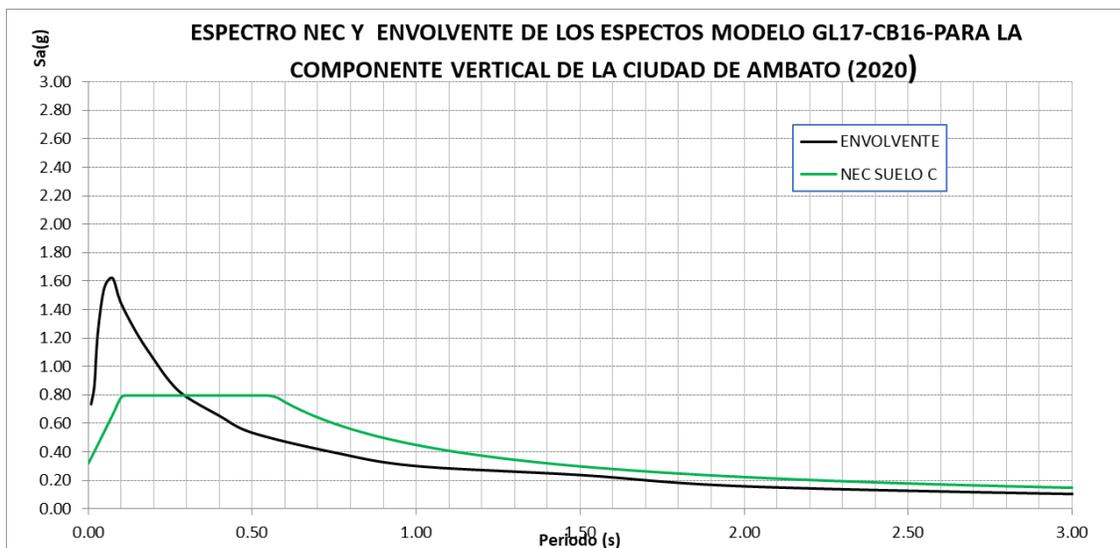
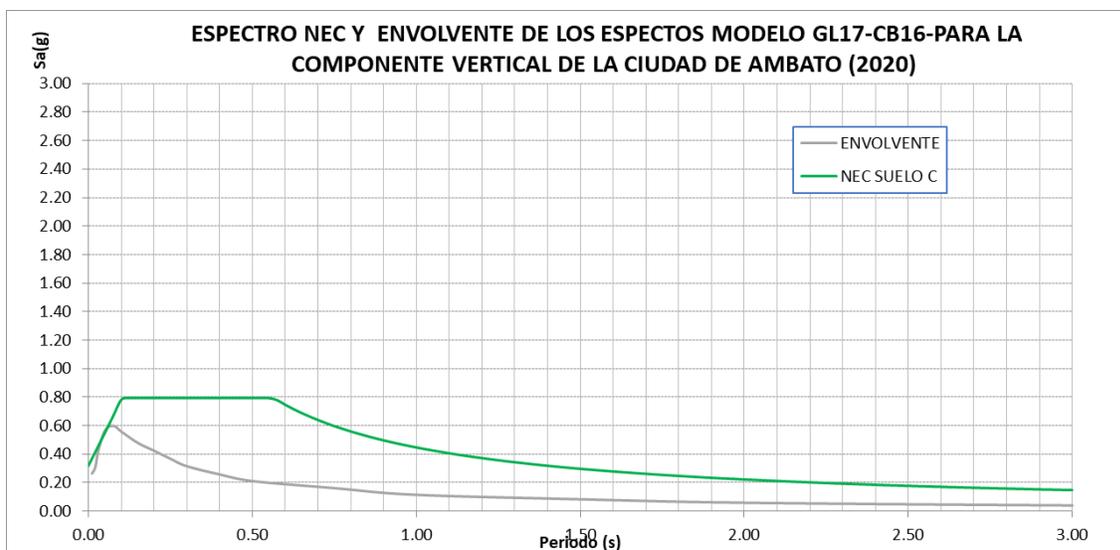


Figura 123

Comparación de espectros envolventes con los reportados en NEC 15, perfil de suelo sísmico “C”, zona rural



En la figura 122 y 123 se presenta el espectro envolvente para la zona urbana, el cual se obtuvo por la falla Ambato, Huachi y Totoras y el espectro NEC es el que reporta la Norma ecuatoriana de la Construcción,

El comportamiento del espectro envolvente es bastante algo en periodos cortos, por lo que se podría pensar en incrementar la meseta para periodos cortos, mientras que para la zona urbana se podría pensar en disminuir la meseta para periodos cortos y las ordenadas espectrales para periodos largos.

Figura 124

Comparación de espectros envolventes con los reportados en NEC 15, perfil de suelo sísmico "D", zona urbana

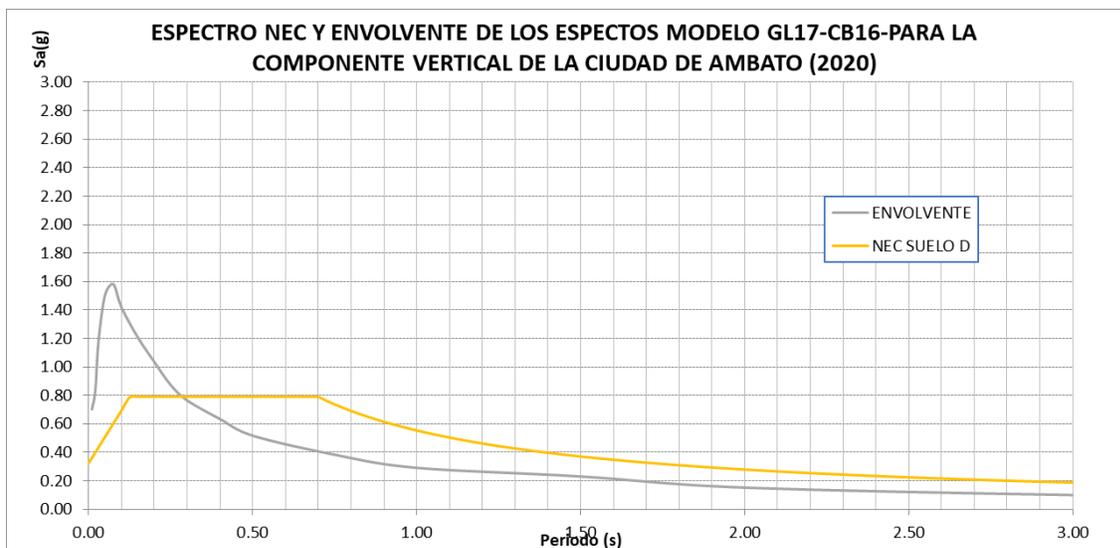
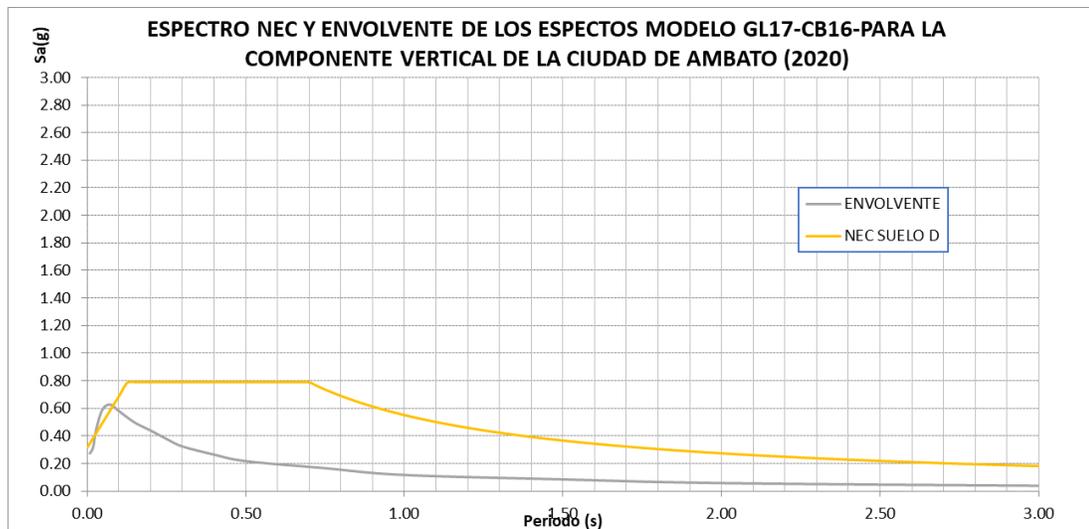


Figura 125

Comparación de espectros envolventes con los reportados en NEC 15, perfil de suelo sísmico "D", zona rural



Los resultados son parecidos a los obtenidos en el apartado anterior, por lo que se podría pensar en considerar los espectros encontrados en este estudio de la mano con los de la Norma Ecuatoriana de la Construcción en el cálculo Estructural.

Metodología Probabilística de la peligrosidad sísmica de Ambato

El cálculo de la peligrosidad sísmica se ha realizado utilizando el programa CRISIS v.20.3.0 en términos de aceleración PGA y aceleraciones espectrales SA(T), expresados en unidades de aceleración de gravedad ($1g=970 \text{ cm/s}^2$); Se ha calculado para probabilidades de excedencia de 10 % en 50 años, lo que corresponde a periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años respectivamente. Los modelos de movimientos fuertes son incorporados al cálculo por medio del árbol lógico que se indica en la tabla 23 con su respectiva ponderación.

En la metodología determinística descrita en el capítulo 2 se analizó para la zona rural de Ambato a través de una malla de puntos equidistante cada 500m, en este caso se ha estimado dos puntos de la malla que cubre la zona rural y urbana, para la selección de los puntos en estudio se ha considerado factores como la ubicación geográfica, tratando de

representar zonas con diferentes características físicas y geológicas, además se consideró la densidad poblacional, se presenta los datos geográficos y poblacionales en la Tabla 24.

Tabla 24

Datos geográficos y poblacionales de la ciudad de estudio

Fuente: (INEC, 2020)

PARROQUIA	LATITUD	LINGITUD	UBICACIÓN	POBLACIÓN (INEC)
Huachi Magdalena	-78.635	-1.308	Carolina del Sur y Alaska	10614 habitantes
Miraflores	-78.6427	-1.2534	Av. Miraflores 15-27	8456 habitantes

Figura 126

Zona uno en estudio- Huachi la Magdalena

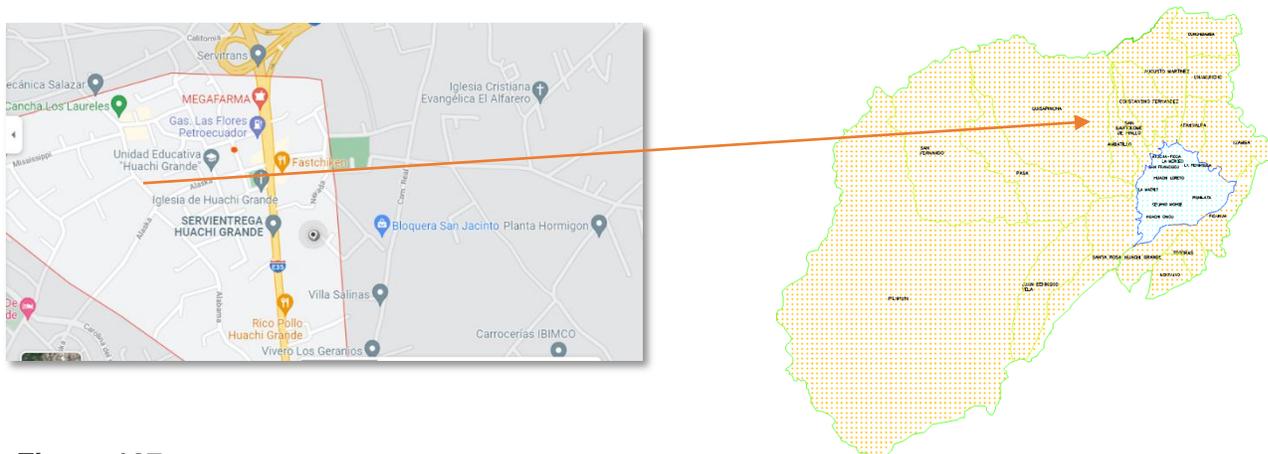
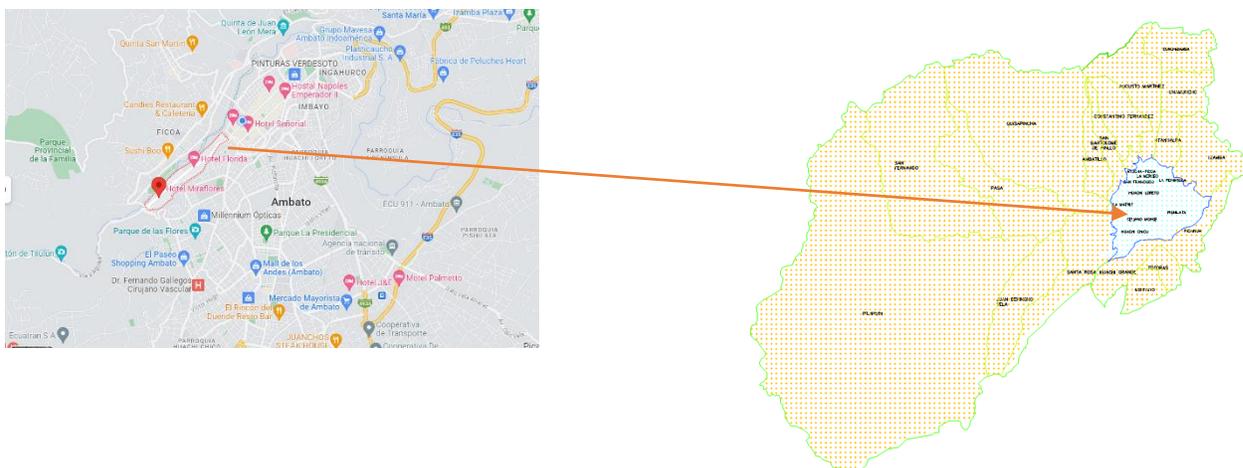


Figura 127

Zona dos en estudio- Miraflores



El cálculo de la peligrosidad sísmica, se lo ha hecho para 12 modelos híbridos denominados así en el nuevo programa CRISIS, por lo que se asigna pesos a cada modelo de ecuación de movimientos fuertes seleccionado, en la tabla 25 se presenta los pesos asignados a cada modelo

Es decir, el cálculo de la peligrosidad sísmica se lo realizó para 12 modelos, es decir que calculo 12 veces, en la tabla 25 se puede observar los diferentes pesos que se asignó a cada modelo en donde los mayores valores de aceleración se obtuvieron con el modelo número cuatro con el modelo de Zhao et al. (2016), Boore y Atkinson (2008), Idriss (2014) NGA-West 2 y Chiou and Youngs (2014), con sus respectivos pesos asignados.

Tabla 25

Combinación de modelos de movimientos fuertes seleccionados para el régimen tectónico en estudio

	MODELO	PESO	PESO CRISIS		PESO	PESO CRISIS
1	ZHAO CORTICAL	0.3	1.20	7	0.4	1.60
	CAMPBELL CORTICAL	0.3	1.20		0.6	2.40

	ABRAHANSON CORTICAL	0.2	0.80		0.2	0.80
	CHIOUYOUNG CORTICAL	0.2	0.80		0.2	0.80
2	ZHAO CORTICAL	0.25	1.00	8	0.5	2.00
	CAMPBELL CORTICAL	0.25	1.00		0.1	0.40
	ABRAHANSON CORTICAL	0.25	1.00		0.2	0.80
	CHIOUYOUNG CORTICAL	0.25	1.00		0.1	0.40
3	ZHAO CORTICAL	0.25	1.00	9	0.1	0.40
	BOORE ATKINSON	0.25	1.00		0.4	1.60
	IDRISS	0.25	1.00		0.4	1.60
	CHIOUYOUNG CORTICAL	0.25	1.00		0.1	0.40
4	ZHAO CORTICAL	0.3	1.20	10	0.3	1.20
	BOORE ATKINSON	0.3	1.20		0.3	1.20
	IDRISS	0.2	0.80		0.2	0.80
	CHIOUYOUNG CORTICAL	0.2	0.80		0.2	0.80
5	ZHAO CORTICAL	0.25	1.00	11	0.2	0.80
	CAMPBELL CORTICAL	0.25	1.00		0.1	0.40
	BOORE ATKINSON	0.25	1.00		0.5	2.00
	CHIOUYOUNG CORTICAL	0.25	1.00		0.2	0.80
6	ZHAO CORTICAL	0.3	1.20	12	0.2	0.80
	CAMPBELL CORTICAL	0.3	1.20		0.2	0.80
	BOORE ATKINSON	0.2	0.80		0.2	0.80
	CHIOUYOUNG CORTICAL	0.2	0.80		0.4	1.60

Espectros de peligro sísmico uniforme

Los resultados que se obtuvieron en cada una de las corridas del programa CRISIS indicados en la tabla 26, en dicha tabla se indican los resultados para cada uno de los grupos creados para un perfil de suelo tipo “C” y en la tabla 27 par aun suelo tipo “D”.

Tabla 26

Espectros hallados para cada grupo para un suelo tipo “C”

Periodo (T seg)	Aceleraciones para Ambato suelo tipo "C"											
	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3	MODELO 4	MODELO 5	MODELO 6	MODELO 7	MODELO 8	MODELO 9	MODELO 10	MODELO 11	MODELO 12
0.01	0.43	0.42	0.45	0.49	0.42	0.44	0.38	0.32	0.43	0.38	0.37	0.42
0.05	0.54	0.53	0.56	0.61	0.53	0.55	0.47	0.42	0.54	0.49	0.48	0.54
0.10	1.03	0.99	1.08	1.14	0.99	1.05	0.83	0.75	1.03	0.89	0.85	1.01
0.15	1.25	1.22	1.29	1.40	1.22	1.27	1.07	0.96	1.25	1.14	1.10	1.23
0.20	1.25	1.23	1.30	1.42	1.23	1.28	1.11	0.98	1.25	1.14	1.10	1.24
0.30	0.99	0.97	1.04	1.16	0.98	1.03	0.91	0.76	0.99	0.88	0.85	0.97
0.40	0.74	0.73	0.77	0.89	0.73	0.76	0.69	0.56	0.74	0.66	0.65	0.73
0.50	0.57	0.58	0.60	0.70	0.58	0.60	0.54	0.43	0.57	0.51	0.51	0.57
0.75	0.38	0.39	0.40	0.49	0.39	0.41	0.37	0.28	0.38	0.33	0.34	0.37
1.00	0.29	0.30	0.30	0.37	0.30	0.31	0.29	0.22	0.29	0.25	0.26	0.28
1.50	0.18	0.19	0.19	0.24	0.19	0.20	0.19	0.13	0.18	0.16	0.16	0.18
2.00	0.12	0.13	0.13	0.17	0.13	0.14	0.13	0.09	0.12	0.11	0.11	0.12
3.00	0.07	0.07	0.07	0.09	0.07	0.07	0.07	0.05	0.07	0.06	0.06	0.06
4.00	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04	0.05	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04

Tabla 27

Espectros hallados para cada grupo para un suelo tipo “D”

Periodo (T seg)	Aceleraciones para Ambato suelo tipo "D"											
	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3	MODELO 4	MODELO 5	MODELO 6	MODELO 7	MODELO 8	MODELO 9	MODELO 10	MODELO 11	MODELO 12
0.01	0.43	0.42	0.50	0.49	0.42	0.44	0.51	0.32	0.49	0.39	0.44	0.39
0.05	0.54	0.53	0.68	0.61	0.53	0.55	0.64	0.42	0.62	0.51	0.55	0.51
0.10	1.03	0.99	1.29	1.14	0.99	1.05	1.21	0.75	1.19	0.92	1.05	0.93
0.15	1.25	1.22	1.58	1.40	1.22	1.27	1.48	0.96	1.43	1.17	1.27	1.17
0.20	1.25	1.23	1.58	1.42	1.23	1.28	1.48	0.98	1.43	1.18	1.28	1.18
0.30	0.99	0.97	1.26	1.16	0.97	1.03	1.19	0.75	1.15	0.92	1.03	0.92
0.40	0.74	0.73	0.97	0.89	0.73	0.76	0.90	0.56	0.85	0.70	0.77	0.70
0.50	0.57	0.58	0.74	0.70	0.57	0.60	0.69	0.43	0.65	0.55	0.60	0.55
0.75	0.38	0.39	0.50	0.49	0.39	0.41	0.48	0.28	0.45	0.37	0.41	0.37
1.00	0.29	0.30	0.38	0.37	0.29	0.31	0.35	0.22	0.33	0.29	0.31	0.29
1.50	0.18	0.19	0.24	0.24	0.19	0.20	0.23	0.13	0.21	0.19	0.20	0.19
2.00	0.12	0.13	0.16	0.17	0.13	0.14	0.15	0.09	0.14	0.13	0.14	0.13
3.00	0.07	0.07	0.09	0.09	0.07	0.07	0.08	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07
4.00	0.04	0.05	0.06	0.06	0.04	0.05	0.05	0.03	0.05	0.04	0.05	0.04

Figura 128

Espectros de Peligro Sisimico Uniforme suelo tipo “C”

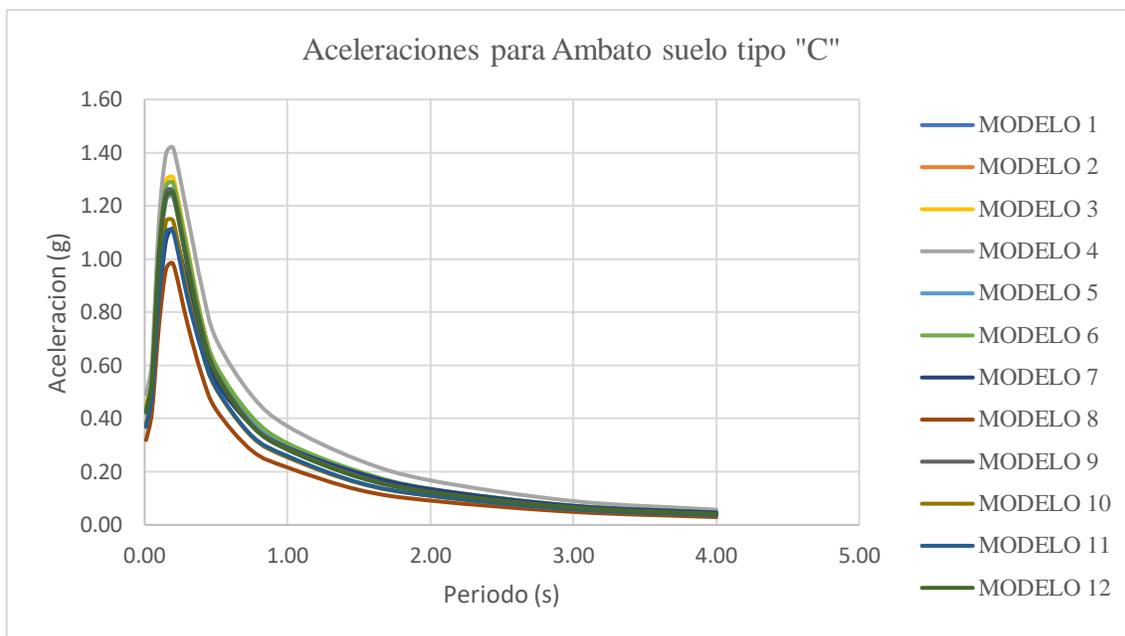
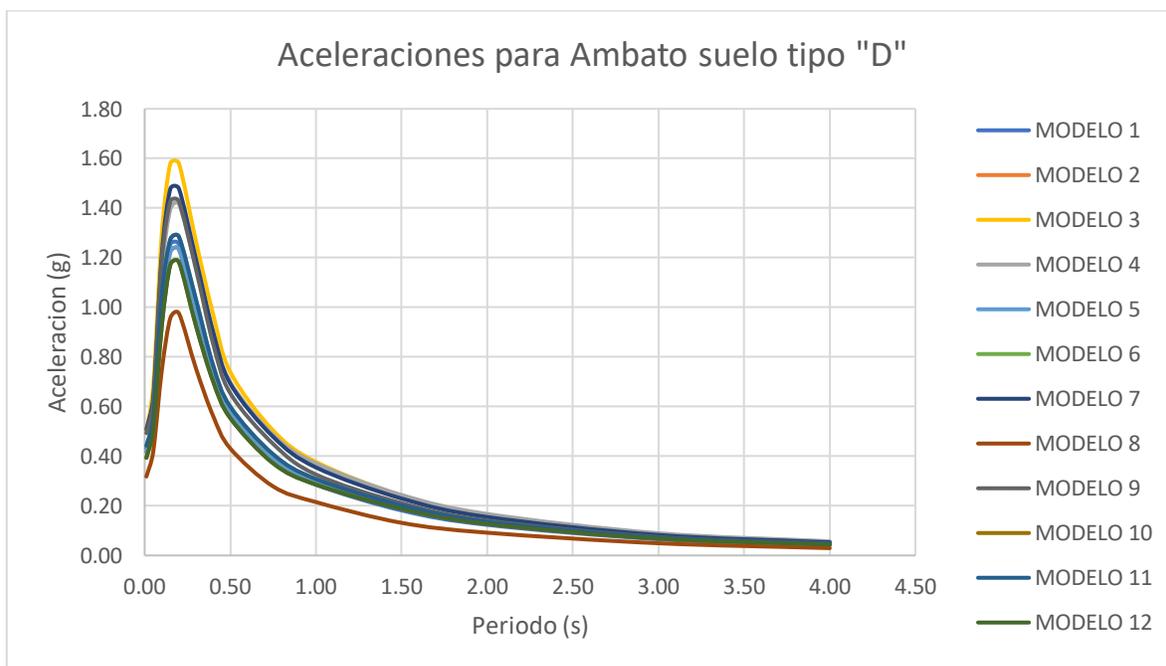


Figura 129

Espectros de Peligro Sísmico Uniforme suelo tipo "D"



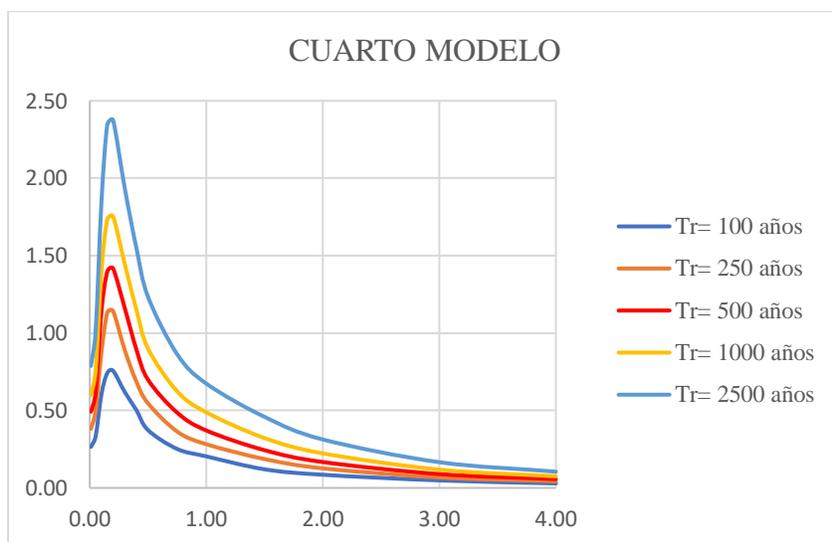
En la figura 128 y 129 se presentan los espectros hallados con los diferentes modelos para un periodo de retorno de 475 años, a cada uno de los modelos se les asignó diferentes pesos, por lo que en la siguiente gráfica se podrá observar los espectros hallados con el

modelo número cuatro, con el cual se consideró las mayores ordenadas espectrales para un perfil de suelo tipo “C”, en la figura 129 se observa que los espectros hallados con el modelo siete, se obtienen de igual manera las mayores ordenadas espectrales para un perfil de suelo tipo “D”.

Las mayores aceleraciones espectrales en roca PGA para un suelo tipo “C” es de 0.45g, se obtuvieron con el Modelo 4, a continuación, se presentan los resultados obtenidos para un periodo de retorno de: 100, 250, 500, 1000, 2500 años respectivamente

Figura 130

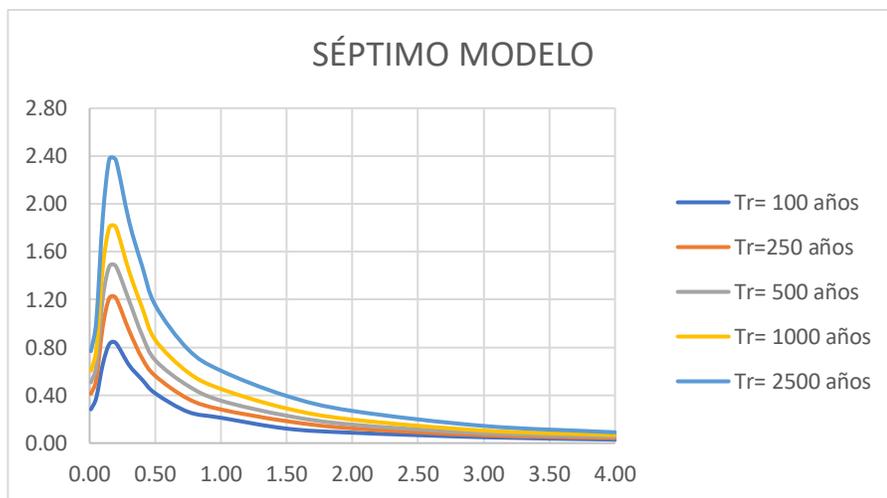
Espectros de Peligro Sísmico Uniforme suelo tipo “C”- Modelo 4



Las mayores aceleraciones espectrales en roca PGA para un suelo tipo “D” es de 0.51g, se obtuvieron con el Modelo 7, a continuación, se presentan los resultados obtenidos para un periodo de retorno de: 100, 250, 500, 1000, 2500 años respectivamente

Figura 131

Espectros de Peligro Sísmico Uniforme suelo tipo “D”- Modelo 7



A continuación, se presentan los valores con los cuales se obtuvieron los espectros de Peligro sísmico Uniforme para diferentes periodos de retorno.

Tabla 28

Espectros de Peligro Sísmico Uniforme suelo tipo "C" - Modelo 4

Periodo (T seg)	PERIODO DE RETORNO				
	100 años	250 años	500 años	100 años	2500 años
0.01	0.27	0.38	0.49	0.60	0.79
0.05	0.33	0.50	0.61	0.75	1.01
0.10	0.60	0.88	1.14	1.40	1.85
0.15	0.74	1.13	1.40	1.73	2.34
0.20	0.76	1.14	1.42	1.75	2.38
0.30	0.62	0.89	1.16	1.45	1.94
0.40	0.50	0.69	0.89	1.15	1.55
0.50	0.37	0.55	0.70	0.90	1.23
0.75	0.25	0.36	0.49	0.62	0.86
1.00	0.20	0.28	0.37	0.49	0.67
1.50	0.12	0.19	0.24	0.32	0.46
2.00	0.09	0.13	0.17	0.22	0.31
3.00	0.05	0.07	0.09	0.12	0.17
4.00	0.03	0.04	0.06	0.08	0.10

Tabla 29

Espectros de Peligro Sísmico Uniforme suelo tipo “D”- Modelo 7

Periodo (T seg)	PERIODO DE RETORNO				
	100 años	250 años	500 años	100 años	2500 años
0.01	0.28	0.41	0.51	0.61	0.77
0.05	0.38	0.52	0.64	0.77	1.01
0.10	0.66	0.97	1.21	1.47	1.89
0.15	0.83	1.21	1.48	1.80	2.38
0.20	0.84	1.21	1.48	1.80	2.36
0.30	0.65	0.94	1.19	1.44	1.86
0.40	0.53	0.71	0.90	1.13	1.48
0.50	0.42	0.56	0.69	0.86	1.15
0.75	0.26	0.37	0.48	0.59	0.78
1.00	0.21	0.28	0.35	0.45	0.61
1.50	0.12	0.18	0.23	0.29	0.39
2.00	0.09	0.12	0.15	0.20	0.27
3.00	0.05	0.07	0.08	0.10	0.14
4.00	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09

Curvas de peligro sísmico

Los resultados del estudio de amenaza o peligrosidad sísmicas son presentados además a través de las curvas de peligros sísmico, estas curvas reportan el programa CRISIS, el cual son el resultado de hallar en un sitio de interés la probabilidad de excedencia , de una aceleración dada, en este caso se evaluó para el sector de Huachi la Magdalena y Miraflores, ubicados en la zona rural y urbana de la ciudad de Ambato

Se mostrará los resultados obtenidos únicamente para el modelo cuatro y siete.

Figura 132

Curvas de Peligrosidad Sísmica, para Huachi la Magdalena, suelo tipo “C” Vs30=380m/s - Modelo 4

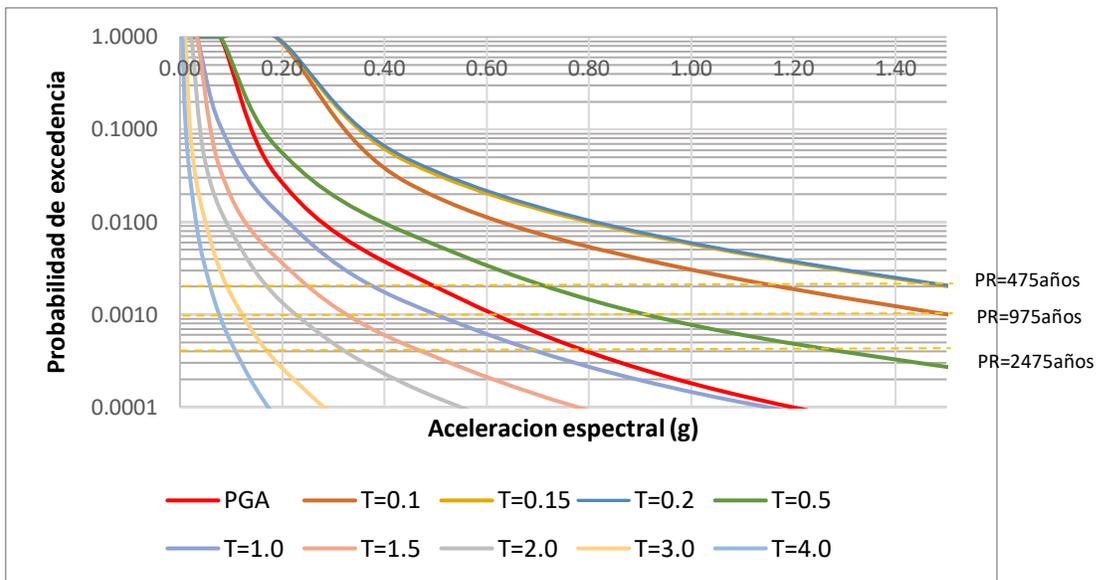
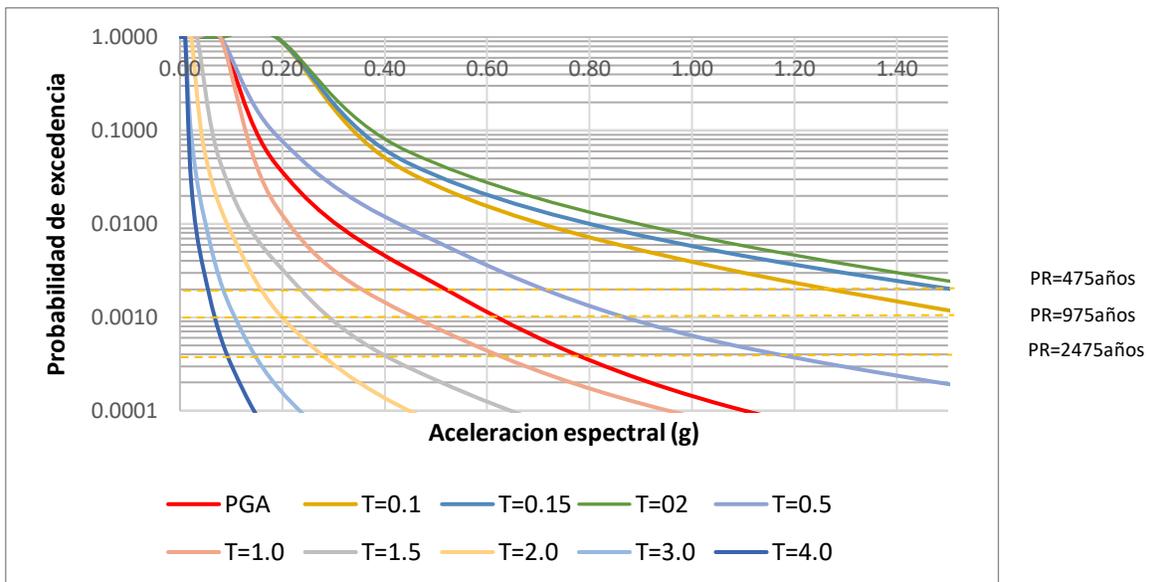


Figura 133

Curvas de Peligrosidad Sísmica, para Huachi la Magdalena, suelo tipo “D” Vs30=316m/s - Modelo 7



En las abscisas, se tiene la aceleración del suelo expresado en fracción de la gravedad, en las ordenadas se tiene la probabilidad de excedencia q_0 , en el cual se puede

obtener la tasa anual de excedencia, por lo que las curvas se las puede expresar en función de la probabilidad de excedencia o en función de la tasa anual de excedencia.

En la gráfica 132-133 se observa que las curvas de peligro sísmico se obtuvieron para 10 periodos estructurales, empezando con PGA hasta un periodo de 4.0 seg, mientras que con las líneas entrecortadas se han indicado los periodos de retorno PR, para 475, 975, y 2475 años para una probabilidad de excedencia del 10, 5 y 2%, Al ingresar a las curvas con la tasa anual de excedencia y en las abscisas obtener la aceleración espectral para un periodo determinado se puede hallar el espectro de peligro sísmico uniforme

Factores de sitio de NEHRP (2015)

A continuación, se presentan los valores finales obtenidos, en la tabla 30 se indican los resultados para un suelo tipo "C" y en la tabla 31 se muestran las Aceleraciones espectrales para un perfil tipo "C" del modelo número 4

Tabla 30

Aceleraciones espectrales para un perfil de suelo tipo "C"

Periodo (T seg)	Factores de sitio para un suelo tipo "C"		
	PR 475	PR 975	PR 2475
0.01	1.20	1.20	1.20
0.05	1.26	1.20	1.20
0.10	1.20	1.20	1.20
0.15	1.20	1.20	1.20
0.20	1.20	1.20	1.20
0.30	1.20	1.20	1.20
0.40	1.20	1.20	1.20
0.50	1.22	1.20	1.20
0.75	1.30	1.25	1.20
1.00	1.30	1.30	1.23
1.50	1.50	1.50	1.50
2.00	1.50	1.50	1.50

3.00	1.50	1.50	1.50
4.00	1.50	1.50	1.50

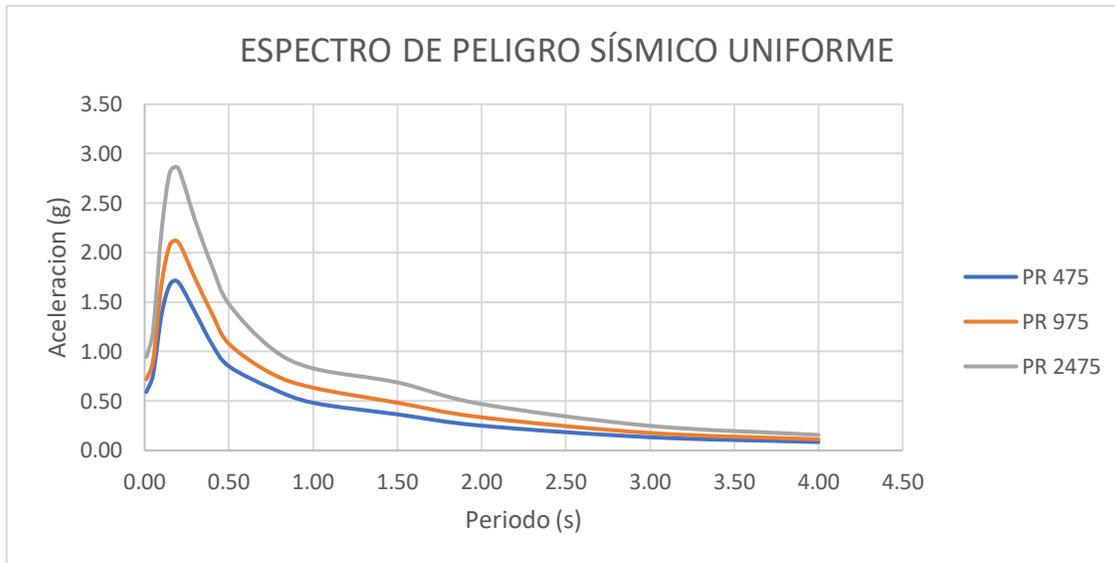
Tabla 31

Valores de sitio para un perfil de suelo tipo "C"

Periodo (T seg)	Aceleraciones espectrales para un suelo tipo "C"		
	PR 475	PR 975	PR 2475
0.01	0.59	0.72	0.95
0.05	0.77	0.90	1.21
0.10	1.37	1.68	2.21
0.15	1.68	2.08	2.81
0.20	1.70	2.10	2.85
0.30	1.39	1.74	2.32
0.40	1.07	1.38	1.86
0.50	0.85	1.08	1.48
0.75	0.63	0.78	1.04
1.00	0.48	0.63	0.83
1.50	0.37	0.48	0.69
2.00	0.25	0.33	0.47
3.00	0.13	0.18	0.25
4.00	0.09	0.11	0.16

Figura 134

Espectro de peligro uniforme Perfil de suelo tipo "C"-Modelo cuatro



De igual forma se procedió para un perfil de suelo tipo "D", en la tabla 32 se indican los resultados para un suelo tipo "D" y en la tabla 33 se muestran las Aceleraciones espectrales para un perfil tipo "C" del modelo número 7

Tabla 32

Aceleraciones espectrales para un perfil de suelo tipo "D"

Periodo (T seg)	Factores de sitio para un suelo tipo "D"		
	PR 475	PR 975	PR 2475
0.01	1.10	1.10	1.10
0.05	1.29	1.19	1.19
0.10	1.02	1.00	1.00
0.15	1.00	1.00	1.00
0.20	1.00	1.00	1.00
0.30	1.02	1.00	1.00
0.40	1.14	1.05	1.05
0.50	1.25	1.16	1.16
0.75	1.42	1.33	1.33
1.00	1.52	1.44	1.44
1.50	2.14	2.02	2.02
2.00	2.30	2.20	2.20
3.00	2.40	2.40	2.40
4.00	2.40	2.40	2.40

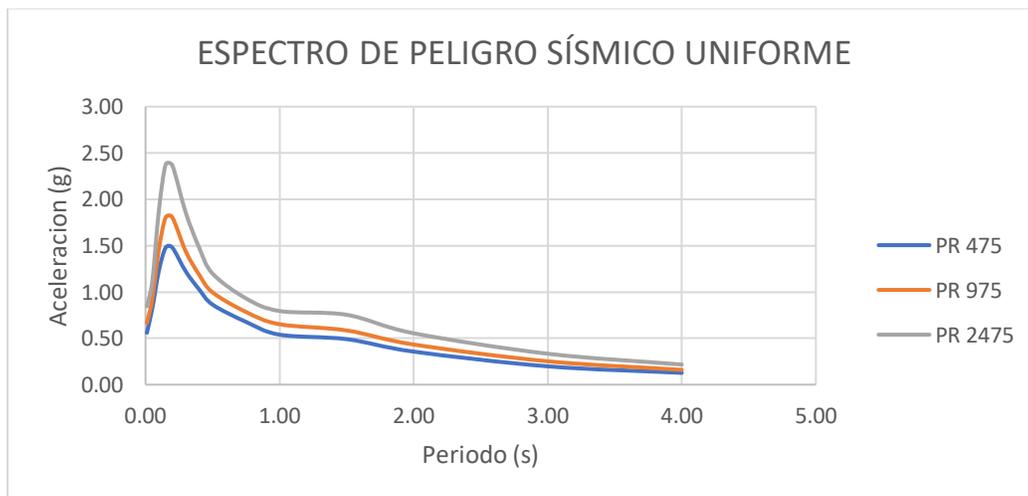
Tabla 33

Valores de sitio para un perfil de suelo tipo "D"

Periodo (T seg)	Aceleraciones espectrales para un suelo tipo "D"		
	PR 475	PR 975	PR 2475
0.01	0.56	0.67	0.85
0.05	0.82	0.92	1.11
0.10	1.23	1.47	1.89
0.15	1.48	1.80	2.38
0.20	1.48	1.80	2.36
0.30	1.22	1.44	1.86
0.40	1.03	1.19	1.48
0.50	0.86	1.00	1.20
0.75	0.68	0.78	0.93
1.00	0.54	0.65	0.79
1.50	0.49	0.58	0.75
2.00	0.36	0.43	0.55
3.00	0.20	0.25	0.33
4.00	0.13	0.16	0.22

Figura 135

Espectro de peligro uniforme Perfil de suelo tipo "D"-Modelo Siete

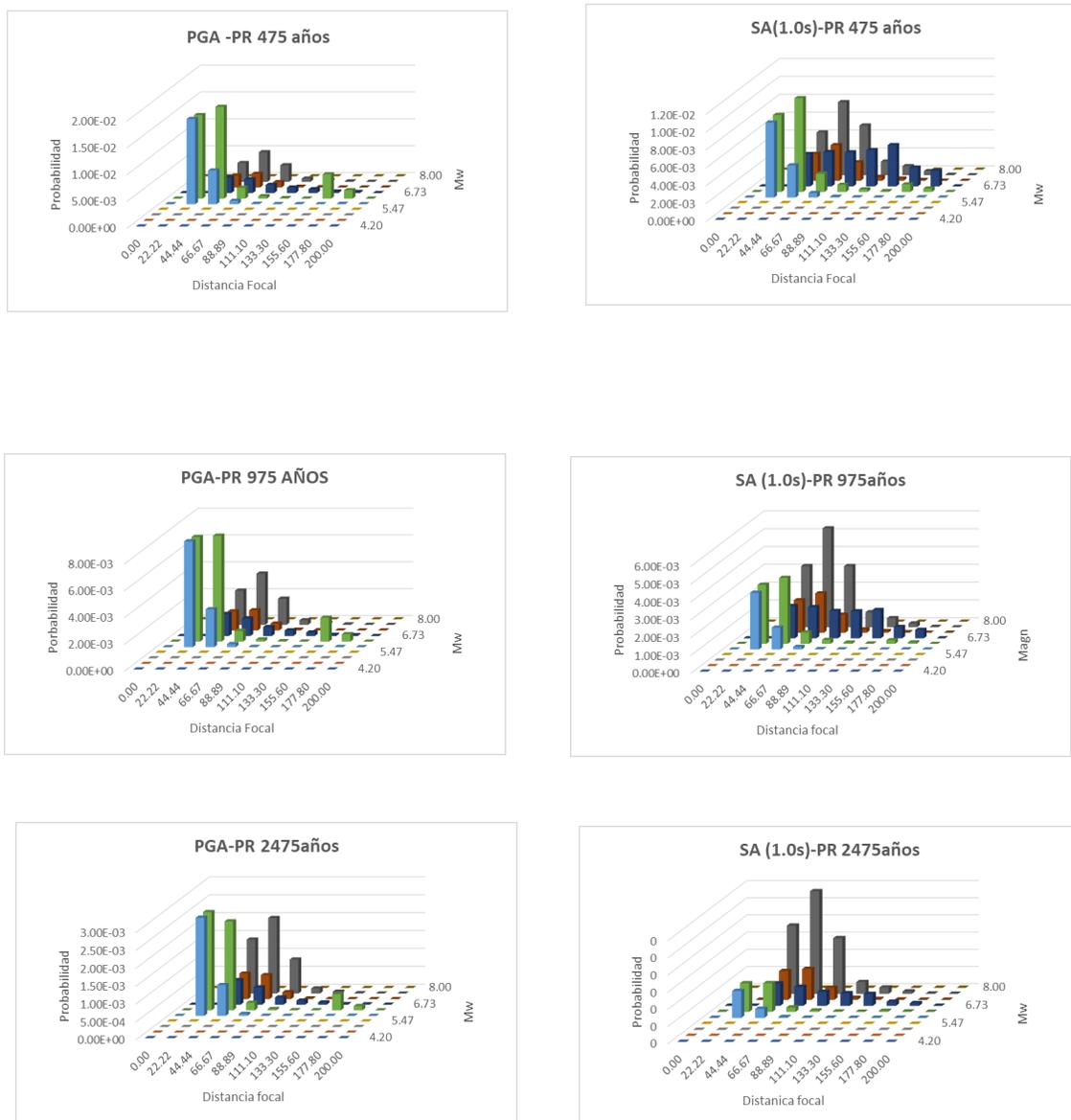


Desagregación sísmica

Los resultados se presentan para dos periodos, el primero es para periodos largos SA (1.0 s) y para PGA, para tres periodos de retorno 475,975 y 2475 años.

Figura 136

Resultados de la desagregación de peligro sísmico-Modelo cuatro



Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- En el año 2018, se realizó estudios de microzonificación sísmica en Ambato para el área urbana, se conformó un equipo multidisciplinario dentro del cual se elaboraron estudios geofísicos, geotécnicos y de geología, a partir de este trabajo se logró determinar el periodo de vibración del suelo, la velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros, el número de golpes de ensayo de penetración estándar y parámetros los cuales sirvieron para obtener una clasificación sísmica de los suelos y desarrollar estudios de peligrosidad sísmica en forma probabilística y determinística, encontrando espectros de diseño y máximo considerado DBE y MCE para la componente vertical y horizontal del movimiento del terreno, estos se espectros se hallaron con la utilización de 3 ecuaciones de movimientos fuertes desarrolladas en el año 2018, sin embargo en este trabajo se incorporó tres modelos de movimientos fuertes, en total su estudio se realizó con seis modelos, el objetivo era analizar el comportamiento de los otros modelos y el modelo de Zhao *et al* (2016), ya que es el modelo más complejo de los 6 utilizados además que este modelo incorpora en sus variables el vulcanismo, en sus resultados se observó que para valores medios, se obtiene una confiabilidad del 50% sin desviación estándar. La ecuación de Zhao reporta ordenadas espectrales que se encuentran por la media a las que se hallan con los otros modelos, por lo que para más confiabilidad es necesario incluir la desviación estándar obteniendo resultados que se encuentran más arriba de la media.
- La cercanía de la Falla Ambato, Huachi y Totoras al área urbana genera espectros mayores que los del área rural, por lo que habrá mayor daño en el área urbana que

en la rural ante un sismo asociado a estas tres fallas, sin embargo en el estudio se consideró 4 fallas adicionales F10, que se encuentra en el límite de estas dos áreas sin embargo se obtuvo ordenas espectrales menores a las obtenidas en el estudio realizado en el año 2018, La falla F-11 presento valores altos los cuales son comparables con los espectros de las fallas de Ambato, Huachi y Totoras, por lo que se podría pensar en la necesidad de actualizar el estudio de microzonificación sísmica del área Urbana de Ambato del año 2018. Los espectros obtenidos ante un sismo de magnitud 6.2 el cual corresponde a la falla F16 son los más altos obtenidos en el área rural , y finalmente los espectros promedios obtenidos con la falla F28 son bajos tanto para el área urbana y rural siendo comparables con los encontrados en el estudio realizado en el año 2018.

- Los sismos corticales que se pueden esperar en la ciudad de Ambato, producto de las 7 fallas geológica: Ambato, Huachi, Totoras, F-10, F-11, F-16 y F-28 presentan un peligro a la zona ya que la mayor parte de calculistas desconocen en sus diseños que la ciudad de Ambato se encuentra sobre estas fallas ciegas, las cuales se encuentran acumulando energía y en algún momento se llegara a liberar.
- El periodo de recurrencia de un sismo de magnitud máxima para cada falla empleando los dos métodos mencionados. Se obtuvo que un sismo de magnitud 6.3 puede darse en los próximos 80 a 100 años, uno de magnitud 6.5 en los próximos 300 años, un sismo de magnitud 6.1 puede darse en 360 años, mientras que un sismo de magnitud 6.6 puede darse sen 310 años, el periodo de recurrencia para un sismo de magnitud 6.2 es similar a la de 6.3 y este puede darse en 425 años y finalmente un sismo de magnitud 6.0 se espera en 337 años.
- A falta de acelerogramas locales para el desarrollo de ecuaciones de predicción de movimientos fuertes, se seleccionó GMPEs de otras zonas del mundo con características sismogénicas similares que se ajustan a nuestro Ambiente tectónico.

- En el caso de esperarse un sismo de magnitud 6.3, en la falla de Huachi las aceleraciones máximas espectrales de 3.00 g se obtienen con el modelo de Campbell y Bozorgnia (2014) para la zona urbana
- En el caso de esperarse un sismo de magnitud 6.2, en la falla F-16, las aceleraciones máximas espectrales de 1.6g se obtienen con el modelo de Zhao *et al* 2016. para la zona rural.
- Al comparar los espectros obtenidos con los que reporta la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15), se obtuvo una buena correlación en el perfil de suelo C, mientras que para el perfil D se puede pensar en una reducción de las ordenadas espectrales para periodos largos
- Se concluyó que es necesario continuar el estudio una vez que hayan realizado los estudios geofísicos y geotécnicos en la zona rural de la ciudad ya que al realizar la comparación de los espectros obtenidos de manera determinística con los que reporta la Norma Ecuatoriana de la Construcción, se pudo observar que existe cambios en las ordenadas espectrales.
- Se calculó la peligrosidad sísmica en términos de aceleraciones espectrales para nueve periodos estructurales T para PGA, 0.1, 0.15, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 y 4.0 segundos, además se presentó los mapas de peligrosidad sísmica expresados en términos de PGA y SA (1s) para cinco periodos de retorno: 100, 250, 500, 1000 y 2500 años.

Recomendaciones

- Realizar estudios de microzonificación sísmica del área rural de la ciudad de Ambato, con esta información se podrá evaluar el peligro sísmico.
- Es necesario la actualización de las fallas que atraviesan la ciudad, ya que es necesario el conocer sus características morfológicas y físicas.
- Realizar estudios geofísicos y geotécnicos del área rural, a partir del cual se pueda clasificar el perfil de suelo ya sea tipo C, D E
- Implementar acelerogramas locales, para el desarrollo de ecuaciones de predicción de movimientos fuertes.

Bibliografía

- Abrahamson, N., Silva, W., & Kamai, R. (2014). Update of the AS0 Ground Motion Prediction Equations based on the NGA-West 2 Data Set. . *Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER*, 1025-1053.
- Aguiar, R. (2010). Peligrosidad Sísmica del Ecuador y descripción de los puentes construidos sobre el estuario del río Esmeraldas con Aisladores de base FPS. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras* , 85-118.
- Aguiar, R. (2017). No se acepta el diseño por ductilidad, Caso del edificio Fragata que incurrió en el rango no lineal. *Revista internacional de Estructuras* , 327-391.
- Aguiar, R. (2017). Peligrosidad sísmica de la costa norte del Ecuador y el terremoto de Pedernales de 2016. *Revista Geofísica* 67.
- Aguiar, R. (s.f.). Espectros de Peligro Sísmico Uniforme Metodología Probabilística. Quito.
- Aguiar, R., & Rivas, A. (2018). *Espectro de peligro sísmico uniforme para la ciudad de Ambato. Microzonificación sísmica de Ambato*. Quito: Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
- Aguiar, R., & Serrano , P. (2020). Metodología para evaluar la peligrosidad Sísmica del área urbana y rural de la ciudad de Ambato en forma determinística. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 1-37.
- Aguiar, R., & Zambrano, v. (2018). Relation H/T in structures of Bahía de Caraquez and the 2016 earthquake. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 227-241.
- Aguiar, R., Zevallos , M., Palacios, J., García , L., & Menéndez, E. (2016). Reforzamiento de estructuras con disipadores de energía. Caso del terremoto del 16 de abril de 2016. *Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH)*.

- Akkar, S., Sandikkaya, M., & Bommer, J. (s.f.). Empirical ground-motion model for point- and extended source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 359-387.
- Alvarado, A. (2012). "Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur". *Institut de Sciences de la Terre de Grenoble*, 259.
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J., Lagreulet, S., Segovia, M., Front, y., . . . Quidelleur, x. (s.f.). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Advancing Earth and Space Science*.
- Beauval, C., Marinier, J., Yepes, H., Audin, L., Nocquet, M., Alvarado, A., . . . Jomard, H. (2018). A New Seismic Hazard Model for Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1-22.
- Boore, D., & Atkinson, G. (February de 2008). Ground Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%- Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Engineering Research Institute*, 24, 99-138.
- Bozorgnia, Y., & Campbell, K. (s.f.). Vertical Ground Motion Model for PGA, PGV, and Linear Response Spectra using NGA West Database.
- Campbell, k., Bozorgnia, Y., & Eeri, M. (2014). NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% Damped Linear Acceleration Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 1087-1115.
- Chicaiza, A. (2016). *Espectros de control para el Valle de los Chillos*. Quito.

- Chiou, J., & Youngs, R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Pacific Earthquake Engineering*, 1117-1153.
- Chunga, K., & Mulas, F. (2018). Zonificación geológica, volcánica y sísmica. *Instituto Panamericano de Geografía e Historia*, 120-172.
- Chunga, K., Ochoa-Cornejo, F., Mulas, M., Theofilos, T., & Menéndez, E. (2010). Characterization of seismogenic crustal faults in the Gulf of Guayaquil, Ecuador. *Andean Geology*.
- Consentino, P., Ficarra, V., & Luzio, D. (s.f.). Truncated Exponential Frequency-Magnitude Relationship in Earthquake Statics. *Bulletin of the Seismological Society of América*, 1615-1623.
- Coppersmith, J., & Donald, L. (1994). New Empirical Relationship among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of América*.
- Diaz, D. (2013). *Incidencia de la utilización de la nueva generación de ecuaciones de atenuación (NGA) en los valores máximos de aceleración sísmica pico (PGA) en Colombia*. Bogotá.
- Eguez, A., Alvarado, A., & Yopez, H. (2003). Database and Map of Quaternary Faults and Folds of Ecuador and its offshore regions. *US Geological Survey*.
- Gülerce, Z., Kamai, R., Abrahamson, N., & Silva, W. (2016). *Ground Motion Prediction Equations for the Vertical Ground Motion Component Based on the NGA-W2 Database*.

- Gutenberg, B., & Richter, F. (1994). Frequency of Earthquakes in California . *Bulletin of Seismological Society of América*, 185-188.
- I.M.Idriss. (2014). NGA-West2 Model for Estimating Average Horizontal Values of Pseudo-Absolute Spectral Accelerations Generated by Crustal Earthquakes. *PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER*, 1-57.
- INEC. (2020). *Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador* .
- Leonard, M. (2010). Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width average displacement and moment release. *Bulletin of the Seismological Society of América*, 1971-1988. <https://doi.org/10.1785/0120090189>.
- NEC-15. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción SE-DS. Cargas Sísmicas. Diseño Sísmo Resistente. NEC-SE-DS*.
- NEHRP. (2015). *Recommended seismic provisions for new buildings and other structures. FEMA P-1050-1*.
- Parra, H., Benito, M., Gaspar, J., Angie, F., & Luna, M. (s.f.). Estimación de la peligrosidad sísmica en Ecuador continental.
- Plablo, Q. (2014). *Estudio de Peligro sísmico del Ecuador y espectros de diseño sísmico para la Ciudad de Cuenca*. Mexico, Df.
- Pozos Estrada, A., Gómez Martínez, R., & Hong, H. (2014). Seismic hazard deaggregation for some selected sites of Mexico. *Ingeniería sísmica*.
- Quinde, P. (2014). *Estudio de Peligro Sísmico del Ecuador y espectros de diseño sísmico para la ciudad de Cuenca*. Mexico, DF.
- Quinde, P., & Reinoso, E. (2016). Estudio de Peligro Sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la ciudad de Cuenca. *Revista de Ingeniería Simica* , 1-26.

- Rivas, A. (2014). *Contribución metodológica para incorporar fallas activas en la modelización de la fuente dirigida a estimaciones de Peligrosidad sísmica, Aplicación al Sur de España*. España.
- Rivas, A. (2014). *Contribución metodológica para incorporar fallas activas en la modelización de la fuente dirigida a estimaciones de Peligrosidad sísmica. Aplicación al sur de España*. Madrid .
- Schmidt, V. (2014). Ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para América Central, con datos de 1972 a 2010. 32.
- Sísmica-INPRES, I. N. (2018). *Fallas Activas*. Argentina.
- Tiziano Perea, O. (2002). *Introducción al estudio de la componente vertical de movimientos sísmicos y su influencia en el comportamiento estructural*. Mexico.
- Toulkeridis, T. (2009). "Geodinamica y Vulcanologia del Ecuador (Continental e Insular) Amenazas, Vulnerabilidad y Riesgos". Quito.
- Vilera, L. (2008). Efectos sísmicos de la componente vertical en edificios aporricados de acero. *Revista Ciencia e Ingeniería* , 79-88.
- Wells, D., & Coppersmith, J. (1994). New Empirical Relationship among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement. *Bulleting of the Seismological Society of America*, 974-1002.
- Zhao, J., Zhang , J., Asano , A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., . . . Fukushima, Y. (s.f.). Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period . *Bulletin of the Seismological Society of America*,, 898-913.

Zhao, J., Zhou, S., Zhou, J., Zhao, Z., Zhang, H., Zhang, Y., . . . Irikuna, K. (2016). Ground Motion Prediction Equations for Shallow Crustal and Upper-Mantle Earthquakes in Japan using site class and simple geometric Attenuation functions . *Bulletin aof the Seismologica Society of America*, 1552-1569.