

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

SELECCIÓN DE ECUACIONES DE ATENUACIÓN (GMPEs)  
COMPATIBLES CON EL SISTEMA DE FALLAS DE QUITO.

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER  
EN ESTRUCTURAS

Ing. FREDDY FERNANDO CAÑIZARES ORTEGA

[fcanizares@gise-ec.com](mailto:fcanizares@gise-ec.com)

DIRECTOR: Ing. JUAN CARLOS SINGAUCHO ARMAS. M.Sc.

[jcsingaucho@igepn.edu.ec](mailto:jcsingaucho@igepn.edu.ec)

Quito, Noviembre 2017

## DECLARACIÓN

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

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

---

Freddy Fernando Cañizares Ortega

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Freddy Fernando Cañizares Ortega, bajo mi supervisión.

---

Ing. M.Sc. Juan Carlos Singaicho Armas  
DIRECTOR DE PROYECTO

## **AGRADECIMIENTO**

Mi gratitud infinita al Ing. M.Sc. Juan Carlos Singaicho, por su acertada asesoría, revisión y dirección del presente trabajo.

A los Ingenieros David Mora y Jorge Valverde, por sus comentarios y sugerencias.

A la Facultad de Ingeniería Civil Ambiental, y a sus honorables profesores por formar personas de bien.

Al Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. Con su gran labor me permitió obtener la información necesaria para el desarrollo de la investigación.

A las empresas Astec Cía. Ltda, y a la Constructora Villacreces Andrade CVA, por las facilidades y la flexibilidad de horario.

A mis compañeros de aula, con los cuales compartimos horas de estudio, esfuerzo y dedicación por la ciencia.

A todas las personas, que de una u otra manera contribuyeron al presente trabajo, no se da nombres, por evitar el “pecado” de omisión, pero de acuerdo a la tercera de ley Newton y al karma, serán recompensados.

***La gratitud es la memoria del corazón***  
*(Lao Tse)*

## DEDICATORIA

A mis padres, familia y amigos.

A todos las personas que eligieron esta maravillosa profesión.

*Al Grupo Ingeniería Sísmica Estructural: “GRUPO-GISE”*

*Aquella noche hizo un tan grande temblor de tierra que pensamos que se hundía el mundo... que duró espacio de tres salmos de miserere... los frailes hincados de rodillas en un corral con linda luna, veían dar vaivenes a las casas y los indios daban gritos. Y Fray Jordán asombrado daba voces diciendo: ¡Jesucristo Señor! Por estos perversos cristianos haces esto.*

*FRAY FRANCISCO XIMÉNEZ, 1690*

*(Análisis Sísmico Moderno, Salvador Gómez Chávez)*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN.....	ii
CERTIFICACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
DEDICATORIA .....	v
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS .....	1
1.1.1. OBJETIVO GENERAL.....	1
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.2. HIPÓTESIS.....	2
1.3. ALCANCE.....	2
1.4. CONCEPTOS GENERALES .....	4
1.4.1. RIESGO.....	4
1.4.2. RIESGO SÍSMICO .....	4
• I) PELIGRO O AMENAZA SÍSMICA .....	4
• EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA .....	5
• II) VULNERABILIDAD SÍSMICA .....	5
• ZONA DE RIESGO .....	5
• III) ELEMENTOS EXPUESTOS .....	5
1.5. ANÁLISIS DETERMINISTA (DSHA) Y PROBABILISTA (PSHA) DE LA AMENAZA SÍSMICA .....	6
• COMPONENTES DE LA AMENAZA SÍSMICA .....	6
1.6. AMENAZA SÍSMICA DETERMINISTA (DSHA).....	7
I) VENTAJAS DEL MÉTODO DSHA.....	8
II) DESVENTAJAS DEL MÉTODO DSHA .....	8
1.7. ANÁLISIS PROBABILISTA DE LA AMENAZA (PSHA) .....	9
I) VENTAJAS DEL ENFOQUE PROBABILISTA .....	11
II) DESVENTAJAS DEL ENFOQUE PROBABILISTA .....	11
<b>CAPÍTULO 2. MECANISMOS DE FALLAMIENTO Y SISMICIDAD EN LA CIUDAD DE QUITO.....</b>	<b>12</b>
2.1. SISMICIDAD HISTÓRICA DE LA CIUDAD.....	12
2.2. SISTEMAS DE FALLAS DE QUITO .....	16
2.3. TIPOLOGÍAS DE LAS FALLAS CORTICALES.....	17
2.4. MECANISMOS FOCALES EN FUNCIÓN DEL TIPO DE FALLA .....	20

2.4.1.	MECANISMOS FOCALES REGISTRADOS EN QUITO.....	21
2.5.	ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE SISMOS RECIENTES OCURRIDOS EN QUITO .....	23
2.5.1.	CÁLCULO DE LA LONGITUD Y ÁREA DEL SISTEMA DE FALLAS.....	26
2.6.	SISMOS LOCALES SELECCIONADOS .....	27
2.6.1.	SISMO DEL 17 FEBRERO 2011 CONOCOTO .....	27
2.6.2.	SISMO DEL 29 OCTUBRE 2011 GUAYLLABAMBA .....	31
2.6.3.	SISMO DEL 12 DE AGOSTO DE 2014 CALDERÓN .....	34
2.6.4.	CÁLCULO DEL ÁREA Y LONGITUD DE FALLA SISMO .....	36
2.6.5.	SISMO DEL 16 AGOSTO 2016 CALDERON CATEQUILLA (4) .....	37
2.6.6.	SISMO DEL 8 AGOSTO 2016 PUEMBO.....	38
2.6.7.	CÁLCULO DEL ÁREA DE RUPTURA SISMO DE 8 AGOSTO 2016.....	40
2.6.8.	SISMO DEL 4 SEPTIEMBRE 2016.....	41
	CÁLCULO DEL ÁREA DE RUPTURA SISMO DEL 4 SEPTIEMBRE DEL 2016 .....	43
2.7.	ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE PARA LA CIUDAD DE QUITO VS30. ..	45
2.8.	SISMOS LOCALES REGISTRADOS POR SUBDUCCIÓN.....	46
2.9.	SELECCIÓN DE REGISTROS INTERNACIONALES .....	47
2.10.	ORIGEN DE LOS SISMOS Y TIPOS DE FALLAS PREVISTAS.....	49
	<b>CAPÍTULO 3. PROCESAMIENTO DE LOS ACELEROGRAMAS .....</b>	<b>50</b>
3.1.	MEDIDAS DEL MOVIMIENTO CON PROPÓSITOS DE INGENIERÍA .....	50
•	PGA (PEAK GROUND ACCELERATION) .....	51
•	PGV (PEAK GROUND VELOCITY) .....	51
•	PGD (PEAK GROUND DISPLACEMENT) .....	51
•	VELOCIDAD MÁXIMA ACUMULADA (CAV) .....	51
•	ACELERACIÓN RMS (ROOT MEAN SQUARE).....	52
•	INTENSIDAD DE ARIAS .....	53
3.1.1.	MEDIDAS DE DURACIÓN INGENIERILES .....	53
•	BRACKETED DURATION .....	53
•	DURACIÓN SIGNIFICATIVA.....	54
•	INTENSIDAD CARACTERISTICA.....	54
3.2.	ESPECTRO DE FOURIER.....	54
3.2.1.	FILTRADO DE SEÑALES .....	55
3.2.2.	CORRECCIÓN SOBRE LOS ACELEROGRAMAS .....	56
I)	CORRECCIÓN INSTRUMENTAL .....	56
II)	CORRECCIÓN DE LA LÍNEA BASE O CORRECCIÓN DE CEROS.....	56

<b>CAPÍTULO 4. ECUACIONES DE ATENUACIÓN GMPES</b> .....	57
4.1. INTRODUCCIÓN .....	57
4.2. PARÁMETROS DE UNA GMPES.....	57
4.3. FORMA TÍPICA DE LA ECUACIÓN GMPE .....	58
4.4. RECOMENDACIONES DE LA NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (NEC 15) PARA LAS ECUACIONES DE ATENUACIÓN (GMPES).....	58
4.5. CLASIFICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE ATENUACIÓN DE ACUERDO AL TIPO DE FALLA GEOLÓGICA .....	59
4.6. PROGRAMA GMPES-EPN. V1. PARA SELECCIÓN DE LAS ECUACIONES DE ATENUACIÓN PROPUESTAS .....	60
4.7. PROGRAMA PARA SISMOS CORTICALES .....	61
4.7.1. MODELO DE ATKINSON Y BOORE 2008.....	61
4.7.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO .....	63
4.7.1.2. ANÁLISIS DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS REGISTROS SELECCIONADOS Y EL MODELO DE ATENUACIÓN ATKINSON Y BOORE 2008.....	71
4.7.2. MODELO DE ATENUACIÓN DE BINDI 2013 .....	72
4.7.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO BINDI 2013 .....	73
4.7.2.2. ANÁLISIS DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS REGISTROS SELECCIONADOS Y EL MODELO DE ATENUACIÓN BINDI 2013.....	80
4.7.3. MODELO DE AKKAR Y BOMMER 2013 .....	81
4.7.3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO .....	82
4.7.3.2. ANÁLISIS DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS REGISTROS SELECCIONADOS Y EL MODELO DE ATENUACIÓN AKKAR Y BOMMER 2013 .....	89
4.8. MODELOS PARA SISMOS POR SUBDUCCIÓN .....	90
4.8.1. MODELO DE YOUNGS 1997.....	90
4.8.2. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO YOUNGS 1997 .....	91
4.8.2.1. ANÁLISIS DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS REGISTROS SELECCIONADOS Y EL MODELO DE ATENUACIÓN YOUNGS 1997 .....	91
4.8.3. MODELO DE ZHAO 2006.....	95
4.8.3.1. ANÁLISIS DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS REGISTROS SELECCIONADOS Y EL MODELO DE ATENUACIÓN ZHAO 2006.....	96
4.8.4. MODELO ABRAHAMSON ET AL. (2016).....	100
4.8.4.1. ANÁLISIS DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS REGISTROS SELECCIONADOS Y EL MODELO DE ATENUACIÓN ABRAHAMSON ( 2016) .....	102
4.9. ANÁLISIS DE RESULTADOS MÉTODO LOG-LIKELIHOOLD (LLH) PARA LA SELECCIÓN DE GMPES.....	107



4.9.1. COMPARACIÓN DEL INDICE LOG-LIKELIHOOD (LLH) PARA SISMOS LOCALES SELECCIONADOS Y GMPES .....	108
4.9.1.1. LLH PARA SISMOS LOCALES CORTICALES SELECCIONADOS .....	108
4.9.1.2. LLH PARA SISMOS LOCALES POR SUBDUCCIÓN SELECCIONADOS .....	112
<b>CAPÍTULO 5. ESCALAMIENTO DE SISMOS PARA ANÁLISIS DINÁMICO DE ESTRUCTURAS.....</b>	<b>114</b>
5.1. ESCALAMIENTO DE SISMOS SEGÚN ASCE/SEI 7.....	114
5.2. ESCALAMIENTO DE SISMOS POR EL MÉTODO PROMEDIO DE LOS PESOS PONDERADOS PARA SISTEMAS CON AISLADORES DE BASE .....	121
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>124</b>
6.1. CONCLUSIONES .....	124
6.2. RECOMENDACIONES .....	127

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.1</b> Pasos para el análisis determinista DSHA .....	7
<b>FIGURA 1.2</b> Pasos para el análisis probabilista PSHA.....	10
<b>FIGURA 2.1</b> Vista antigua relieve montañoso de la ciudad de Quito .....	12
<b>FIGURA 2.2</b> Formación del sistema de fallas de Quito QSF y GFS. ....	16
<b>FIGURA 2.3.</b> Falla cortical tipo normal.....	17
<b>FIGURA 2.4</b> Fallas tipo inversa.....	18
<b>FIGURA 2.5</b> Falla tipo transcurrente.....	19
<b>FIGURA 2.6</b> Representación de los ángulos y planos de falla.....	20
<b>FIGURA 2.7</b> Representación de los mecanismos focales más comunes y sus correspondientes fallas generadoras .....	21
<b>FIGURA 2.8</b> Mecanismos focales registrados en la ciudad de Quito.....	22
<b>FIGURA 2.9</b> Ubicación geográfica de las estaciones RENAC en el DMQ. ....	25
<b>FIGURA 2.10</b> Cálculo de las distancias sismo Conocoto 17 02 2011.....	29
<b>FIGURA 2.11</b> Sismo de Conocoto 17/02/2011, registrado en las estaciones. .	30
<b>FIGURA 2.12</b> Esquema de distancias sismo Guayllabamba 29 10 2011. ....	32
<b>FIGURA 2.13</b> Sismo de Guayllabamba 29 /10/ 2011, registros en las estaciones.....	33
<b>FIGURA 2.14</b> Localización del sismo principal y sus réplicas.....	34

<b>FIGURA 2.15</b> Sismo de Calderón 12 agosto 2014, registros en las estaciones. .....	35
<b>FIGURA 2.16</b> Representación distancias $R_{jb}$ , $R_{Epicentral}$ y $R_{hypocetral}$ , entre el sismo y las estaciones. ....	37
<b>FIGURA 2.17</b> Localización del sismo del 8 agosto 2016 .....	38
<b>FIGURA 2.18</b> Sismo Puenbo 9 agosto 2016 y sismos registrados .....	39
<b>FIGURA 2.19</b> Mecanismo focal sismo Puenbo 2016/09/05. ....	41
<b>FIGURA 2.20</b> Sismo de Puenbo-Tababela 9 septiembre 2016, registrados en las estaciones.....	42
<b>FIGURA 2.21</b> Representación distancias $R_{jb}$ , $R_{Epicentral}$ y $R_{hypocetral}$ , entre el sismo y las estaciones.....	44
<b>FIGURA 3.1.</b> Esquema de cálculo velocidad de onda acumulada CAV.....	52
<b>FIGURA 3.2</b> Esquema representativo tiempo de duración bracketed a 0.05g. ....	53
<b>FIGURA 3.3</b> Comportamiento de los filtros ideales, pasa baja, alta y banda. ..	55
<b>FIGURA 4.1</b> Programa para la selección de ecuaciones de atenuación GMPEs- EPN.v1. ....	60
<b>FIGURA 4.2</b> Modelo de predicción Atkinson & Boore2008, para fallas corticales. ....	64
<b>FIGURA 4.3</b> Cálculo de medidas ingenieriles de los sismos registrados.....	65
<b>FIGURA 4.4</b> Validación del modelo Atkinson & Boore 2008 (AB08) vs programa GMPEs-EPNv1.....	66
<b>FIGURA 4.5</b> Modelo de Atenuación Bindi 2013 en el programa GMPEs EPN v1. .....	74
<b>FIGURA 4.6</b> Verificación del modelo Bindi et al. (2013) vs programa GMPEs- EPN. v1. ....	75
<b>FIGURA 4.7</b> Espectro modelo de Akkar & Bommer (2013), GMPEs EPNv1. ..	83
<b>FIGURA 4.8</b> Comparación del programa GMPEs-EPNv1. vs Akkar & Bommer 2013. ....	84
<b>FIGURA 4.9</b> Espectro modelo de Youngs 1997 programa GMPEs EPNv1. ....	92
<b>FIGURA 4.10</b> Comparación espectro de aceleración con el programa GMPE_EPN vs modelo de Youngs 1997 .....	93
<b>FIGURA 4.11.</b> Modelo de Zhao 2006, Programa GMPE EPNv1.....	97
<b>FIGURA 4.12</b> Comparación espectro de aceleración con el programa GMPE_EPN vs modelo de Zhao 2006 .....	98

<b>FIGURA 4.13.</b> Componentes tectónicos del sistema de fallas .....	101
<b>FIGURA 4.14</b> Distancias características a la fuente para el modelo .....	102
<b>FIGURA 4.15</b> Modelo Abrahamson., Gregor., Addo, BC Hidro (2016). .....	103
<b>FIGURA 4.16</b> Comparación del modelo Abrahamson et al. (2016) vs programa GMPEs-EPNv1 .....	105
<b>FIGURA 4.17.</b> Comparación del modelo vs programa GMPEs-EPNv1, $M=7.5$ y $V_{s30}=760\text{m/s}$ .....	106
<b>FIGURA 4.18</b> Esquema de funciones de densidad de probabilidad .....	107
<b>FIGURA 4.19</b> Índice log-likelihood (LLH) Atkinson & Boore 2008 .....	108
<b>FIGURA 4.20</b> Índice log-likelihood (LLH) Bindi 2013 .....	109
<b>FIGURA 4.21</b> Índice log-likelihood (LLH) Akkar y Bommer 2013 .....	110
<b>FIGURA 4.22</b> Índice log-likelihood de los GMPEs para sismos corticales .....	110
<b>FIGURA 4.23</b> Índice log-likelihood (LLH) para GMPEs, subducción .....	112
<b>FIGURA 5.1</b> Esquema de escalamiento de sismos (Kalkan & Chopra 2010). .....	115
<b>FIGURA 5.2</b> Espectro de los 7 sismos internacionales seleccionados .....	116
<b>FIGURA 5.3</b> Selección de señales, cálculo del espectro objetivo NEC15, para el escalamiento de sismos ASCE/SEI 7 .....	118
<b>FIGURA 5.4</b> Escalamiento de sismos internacionales según recomendaciones del ASCE7 .....	119
<b>FIGURA 5.5</b> Factor de escala final sismos seleccionados .....	120
<b>FIGURA 5.6</b> Escalamiento de sismos método de los pesos ponderados .....	122
<b>FIGURA 5.7</b> Escalamiento de sismo objetivo en el periodo de interés .....	122

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 2.1</b> Resumen histórico de los eventos sísmicos en Ecuador .....	13
<b>TABLA 2.2.</b> Datos de los sismos locales seleccionados. ....	23
<b>TABLA 2.3</b> Coordenadas y ubicación de los sismos .....	23
<b>TABLA 2.4</b> Sismos locales registrados red RENAC en la ciudad de Quito. ....	24
<b>TABLA 2.5</b> Ubicación de las estaciones instaladas en la ciudad de Quito. ....	26
<b>TABLA 2.6</b> Resumen de los cálculos de la longitud y área de la falla .....	28
<b>TABLA 2.7</b> Cálculo de las distancias entre el sismo y las estaciones. ....	29
<b>TABLA 2.8</b> Resumen de los cálculos de la longitud y área de la falla .....	32
<b>TABLA 2.9</b> Cálculo de las distancias entre el sismo y las estaciones .....	32
<b>TABLA 2.10</b> Ángulos y plano de falla sismo Calderón 12 Agosto 2014. ....	34
<b>TABLA 2.11</b> Resumen de los cálculos de la longitud y área de la falla .....	36
<b>TABLA 2.12</b> Distancia epicentral calculada del sismo 12 de agosto 2014. ....	37
<b>TABLA 2.13</b> Resumen de los cálculos de la longitud y área de la falla .....	40
<b>TABLA 2.14</b> Características del sismo 8 de agosto 2016 (Puembo). ....	40
<b>TABLA 2.15</b> Ángulos de los planos de falla del sismo.....	41
<b>TABLA 2.16</b> Resumen de los cálculos de la longitud y área de la falla .....	43
<b>TABLA 2.17</b> Ubicación y distancia epicentral del sismo (Puembo-Tababela) .	44
<b>TABLA 2.18</b> Velocidad de onda de corte Vs30, en suelos Quito.....	45
<b>TABLA 2.19</b> Clasificación del tipo de suelo Vs30.....	45
<b>TABLA 2.20</b> Sismos locales registrados por origen de subducción.....	46
<b>TABLA 2.21</b> Sismos internacionales seleccionados 1/2.....	47
<b>TABLA 2.22</b> Sismos internacionales seleccionados 2/2.....	48
<b>TABLA 3.1</b> Parámetros medibles del movimiento fuerte .....	50
<b>TABLA 4.1</b> Espectros de respuesta entre sismo internacional seleccionado y el modelo de atenuación Atkinson & Boore 2008.....	67
<b>TABLA 4.2</b> Espectros de respuesta entre sismo local seleccionado y el modelo de atenuación Atkinson & Boore 2008 .....	68
<b>TABLA 4.3</b> Espectros de respuesta entre sismo <b>internacional</b> seleccionado y el modelo de atenuación Bindi 2013. ....	76
<b>TABLA 4.4</b> Espectros de respuesta entre sismo <b>local</b> seleccionado y el modelo de atenuación <b>Bindi 2013</b> .....	77

<b>TABLA 4.5</b> Espectros de respuesta entre sismo internacional seleccionado y el modelo de atenuación Akkar & Bommer 2013. ....	85
<b>TABLA 4.6</b> Espectros de respuesta entre sismo <b>local</b> seleccionado y modelo de atenuación Akkar & Bommer 2013. ....	86
<b>TABLA 4.7</b> Comparación modelo de Youngs 1997 y programa GMPEs. V1, sismos subducción registrados. ....	94
<b>TABLA 4.8</b> Clasificación de sitio y tipo de suelo.....	96
<b>TABLA 4.9.</b> Comparación modelo de Zhao 2006 y programa GMPEs. EPN V1 .....	99
<b>TABLA 4.10</b> Modelo Abrahamson, Gregor, Addo BC Hidro (2016). ....	104
<b>TABLA 4.11</b> Valores log-likelihood de las GMPEs para sismos corticales. ...	111
<b>TABLA 4.12</b> Valores log-likelihood de los GMPEs sismos por subducción ...	113
<b>TABLA 5.1</b> Sismos Internacionales seleccionados.....	116
<b>TABLA 5.2</b> Pesos considerados para los cuatro periodos de interés .....	121
<b>TABLA 5.3</b> Factores de escalamiento sismos internacionales seleccionados .....	121

## ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>GMPEs</b>	Ecuaciones de predicción del movimiento fuerte
<b>PSA</b>	Pseudo-absoluto aceleración espectro de respuesta (g)
<b>PGA</b>	Aceleración pico del terreno (g)
<b>PGV</b>	Velocidad pico velocidad (g)
<b>EAF</b>	Espectro de Fourier
<b>CAV</b>	Velocidad máxima acumulada
<b>I<sub>a</sub></b>	Intensidad de Arias
<b>I<sub>c</sub></b>	Intensidad Característica
<b>S<sub>d</sub></b>	Desplazamiento relativo del terreno (cm)
<b>SRL</b>	Ancho de ruptura superficial
<b>RLD</b>	Ancho de ruptura sub-superficial
<b>RW</b>	Ancho medio del plano
<b>RA</b>	Área del plano de ruptura
<b>M<sub>w</sub></b>	Magnitud de momento
<b>R<sub>RUP</sub></b>	Distancia más cercana a la ruptura (km)
<b>R<sub>JB</sub></b>	Distancia más cercana a la proyección de la ruptura (km)
<b>R<sub>hyo</sub></b>	Distancia entre el hipocentro sísmico y un punto superficial
<b>V<sub>s30</sub></b>	La velocidad media-onda de corte medida bajo los 30m (m/s)
<b>V<sub>REF</sub></b>	Velocidad de onda referencial 760m/s
<b>SS</b>	Factor de falla transcurrente (Strike slip)
<b>RS</b>	Factor de falla inversa
<b>NS</b>	Factor de falla normal
<b>U</b>	Mecanismo de falla desconocido
<b>Dip</b>	Inclinación del plano de falla (Grados)
<b>Z<sub>TOP</sub></b>	Profundidad al principio de la ruptura (km)
<b>Z<sub>HYP</sub></b>	Profundidad al hipocentro del sismo (km)
<b>W</b>	Ancho de la ruptura (km)
<b>ξ</b>	Factor de amortiguamiento en %
<b>A(T)</b>	Aceleración espectral en función del periodo T
<b>σ</b>	Desviación estándar

## RESUMEN

El presente trabajo tuvo por objetivo la selección de acelerogramas locales e internacionales compatibles con la ciudad de Quito, posteriormente se analizaron las ecuaciones de atenuación compatibles con el tipo de fallamiento, magnitud probable y tipo de suelo, con las recomendaciones de la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC15), sección 10.1, referente al riesgo sísmico.

Con estas consideraciones se estudiaron los modelos de atenuación GMPEs, Atkinson & Boore (2008), Bindi et al.(2013) y Akkar & Bommer (2013) para fallas corticales. En tanto que para fallas por subducción se estudiaron los modelos de Youngs (1997), Zhao 2006 y Abrahamson et al. (2016).

La sistematización del procedimiento descrito en los modelos de atenuación se realizó con el lenguaje de programación matlab, con la interfaz gráfica Guide para el manejo y visualización de sus resultados, luego las señales se transformaron a parámetros de uso ingenieril como las aceleraciones espectrales, utilizando el algoritmo de Newmark. Para verificar el contenido de frecuencias de señales se utilizó la transformada rápida de Fourier. En tanto que para la validación de los modelos de predicción se tomó los criterios de Scherbaum (2010), mediante el índice log- likelihood.

Para el escalamiento de las señales sísmicas asume las recomendaciones de la norma ASCE7/SEI, con propósitos de análisis dinámico de estructuras.

**Palabras Clave:** Riesgo sísmico, Acelerogramas, Espectros de respuesta, Espectros de diseño, Ecuaciones de atenuación, Escalamiento de sismos.

## ABSTRACT

The aim of this work is the selection of compatible local and international accelerograms for the city of Quito. Later Attenuation equations are selected, considering their compatibility with the type of faulting, probable magnitude and site classification. This is based on the recommendations of the local building code (NEC15), section 10.1 concerning seismic risk.

With these considerations we study the following GMPEs: Atkinson & Boore (2008), Bindi (2013) and Akkar & Bommer (2013) for cristal fault. For subduction interface regime Youngs (1997), Zhao 2006 and Abrahamson, Gregor & Addo (2015).

The systematization of the procedure described in the attenuation models is done in Matlab programming language with the GUI Guide tool. For the handling and visualization of the results, the signals are transformed into parameters for use engineering, like spectral accelerations, using the Newmark's method. The Fourier transform is used to verify the signal frequency content, Scherbaum (2010) criteria are used for selection and validation described GMPEs.

For the scaling of seismic signals the recommendations of the ASCE7 / SEI standard are taken for purposes of dynamic analysis of structures.

### **Keywords:**

Seismic risk, Accelerograms, Response Spectra, Design Spectra, Attenuation equations, Earthquake scaling.



# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. OBJETIVO GENERAL**

Seleccionar acelerogramas de movimientos sísmicos locales o internacionales con características similares en cuanto a: distancia a la fuente, forma de la falla, tipo de suelo y rango de magnitudes. Con estas señales se calcula las ecuaciones de atenuación compatibles con el sistema de fallas de Quito, luego se comprueba el ajuste de los modelos mediante el índice log-likelihood.

### **1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Seleccionar registros de bases de datos internacionales, que sean compatibles con las condiciones locales, en cuanto al tipo de falla, magnitud y distancia a la fuente.
- Estudiar las formas espectrales de acuerdo con el modelo de atenuación seleccionado, luego compararlas con los espectros locales registrados por la RED-RENAC del IGEPN.
- Utilizar ecuaciones de atenuación aceptadas internacionalmente y que sean compatibles a las condiciones locales de fallamiento.
- Proponer la actualización de la Norma Ecuatoriana de construcción NEC15, en cuanto a los modelos de atenuación, principalmente para sismos corticales.
- Generar el programa denominado GMPEs-EPNv1, mediante la interfaz gráfica Matlab-Guide, para la compilación de los modelos de atenuación.
- Proponer un método de escalamiento para propósitos de análisis dinámico.

## **1.2. HIPÓTESIS**

Los modelos de predicción denominados “Ground Motion Prediction Equation” (GMPE’s en inglés), utilizados en la definición de la amenaza sísmica local, están basados en información de bases de datos internacionales, estas ecuaciones no incluyen registros de aceleración para nuestro ambiente geológico, por lo tanto, se requiere una selección y comparación con los registros locales.

El presente trabajo pretende verificar qué modelos son acordes para la ciudad de Quito, mediante la comparación de señales sísmicas registradas por la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC-IGEPN).

## **1.3. ALCANCE**

Para generar el mapa de zonificación sísmica (Factor z), la norma utiliza el cálculo de la amenaza por el método probabilista, este procedimiento necesita la selección adecuada de ecuaciones de atenuación (GMPE’s), consistentes con el ambiente geológico en estudio.

En el caso de Quito, la desagregación de la amenaza muestra que los sismos de mayor intensidad resultan por fallas de origen cortical, por esta razón, para aportar al mejoramiento de los cálculos probabilistas de la amenaza, tanto en los estudios de la Norma Ecuatoriana (NEC15), como en proyectos ingenieriles, es necesario acudir a la información de sismos de baja intensidad registrados por la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC).

Las señales internacionales seleccionadas deberán ser semejantes al ambiente tectónico local, esta información nos permitirá crear una base de datos confiable para escoger la mejor ecuación de atenuación.

Dentro de esta área se ha desarrollado pocas investigaciones enfocadas al desarrollo de espectros de diseño (e.g. Quizanga, 2015; López E., 2016 y Taipe., M., 2013), proponen modelos de predicción como: Chiou&Youngs (2013); Campbell y Borzognia (2013) y Abrahamson et al. (2013).

El presente trabajo complementa modelos específicos para fallas corticales tipo inversa como son: Atkinson&Boore (2008), Bindi et al. (2013) y Akkar&Bommer (2013). En tanto, para la subducción, se utiliza las ecuaciones propuestas por: Youngs (1997), Zhao (2006) y Abrahamson et al. (2016), y se comparan con las señales reales registradas por el IGEPN.

La Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC-15), en su primera emisión año 2011, Apéndice 10, sección 10.1. “*Fundamentos del Estudio de Peligro Sísmico*”, afirma que las ecuaciones de predicción (GMPEs), se fundamentaron en modelos de predicción para fuentes intraplaca como: Boore&Atkinson (2008) y Akkar&Bommer (2010).

Por lo mencionado anteriormente, se ve la necesidad de proponer la actualización de los modelos de predicción como: Bindi (2013) y Akkar&Bommer (2013), los cuales incorporan nuevos parámetros en las ecuaciones, como es la amplificación lineal y no lineal del suelo, en función de la velocidad de onda de corte  $V_{s30}$ .

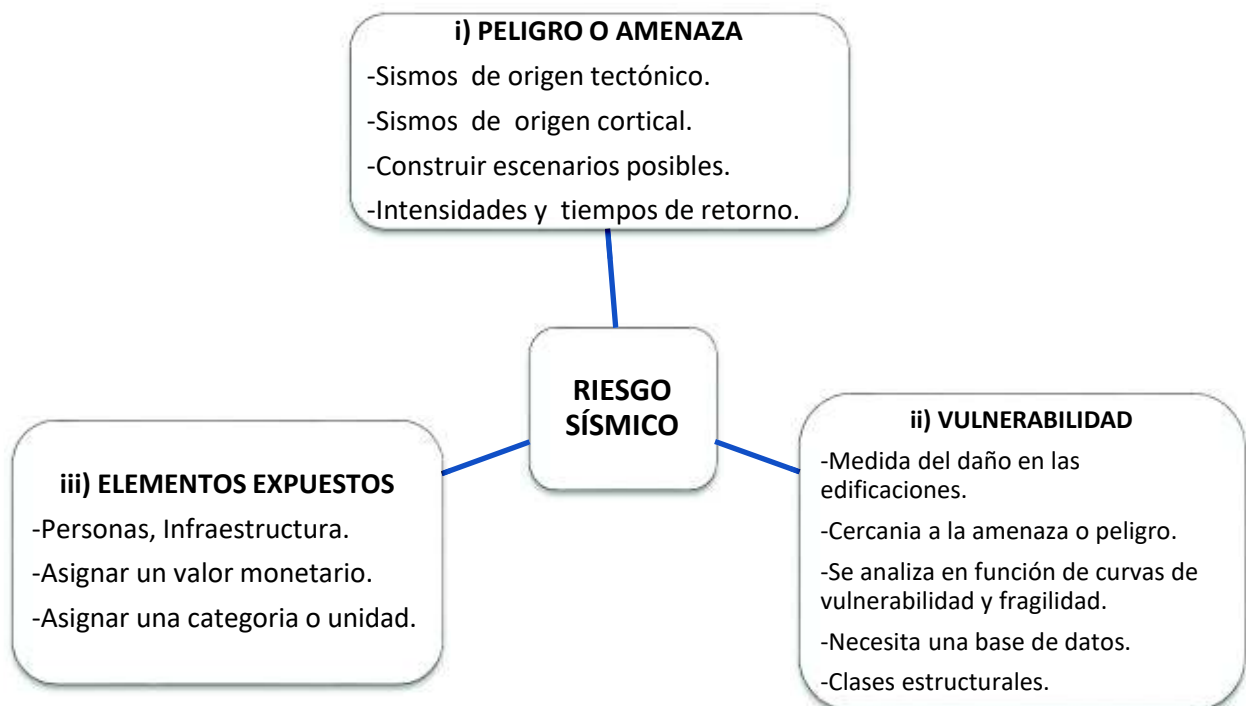
## 1.4. CONCEPTOS GENERALES

### 1.4.1. RIESGO

El riesgo es la posibilidad de perjuicio, daño, pérdidas humanas, materiales, sociales o económicas, causadas por eventos naturales o artificiales que impactan negativamente a las personas o infraestructura (CENAPRED 2015).

### 1.4.2. RIESGO SÍSMICO

El riesgo sísmico está conformado por tres factores: i) Amenaza o peligro, ii) Vulnerabilidad y iii) Elementos expuestos.



FUENTE: Singaicho (2015), CENAPRED (2016).

ELABORACIÓN: Fernando Cañizares

#### • I) PELIGRO O AMENAZA SÍSMICA

Según el Centro Nacional de Desastres de México (CENAPRED 2015), la amenaza sísmica la define como la probabilidad de ocurrencia de un agente perturbador dañino potencialmente perjudicial de cierta intensidad, que puede ocurrir durante un cierto periodo y en un sitio determinado.

Otra definición de amenaza propuesta por Barbat et al. (1995), precisa que es la probabilidad de ocurrencia de un movimiento sísmico de intensidad determinada dentro de un periodo y área específica.

- **EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA**

La evaluación de la amenaza sísmica permite predecir el estado o funcionalidad de la infraestructura, frente a una amenaza latente, como es el caso del movimiento sísmico del terreno, así como sus acciones y afectaciones.

- **II) VULNERABILIDAD SÍSMICA**

La vulnerabilidad es el grado o nivel de daños en la infraestructura, debido a la ocurrencia de un evento sísmico de cierta intensidad. Se identifica mediante la susceptibilidad o propensión a sufrir pérdidas ante la acción de un agente perturbador cuantificable. Estos pueden ser físicos, sociales, económicos y ambientales.

- **ZONA DE RIESGO**

Una zona de riesgo se define como el espacio territorial determinado probable donde se produzca un daño originado por un fenómeno perturbador.

Existen factores de riesgo provocados por la mano del hombre, debido a la construcción informal, edificaciones en taludes, asentamientos e invasiones en zonas protegidas.

- **III) ELEMENTOS EXPUESTOS**

Está representado por: personas, recursos, infraestructura, bienes y servicios, directa o indirectamente afectados por un fenómeno natural, en este caso un sismo de magnitud potencialmente danino (CENAPRED 2015).

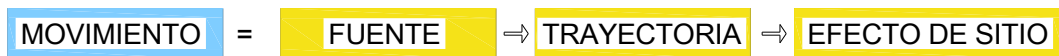
## 1.5. ANÁLISIS DETERMINISTA (DSHA) Y PROBABILISTA (PSHA) DE LA AMENAZA SÍSMICA

La evaluación de la amenaza sísmica se realiza en términos probabilistas, bajo la simplificación de un modelo Poissoniano, a partir de la formulación de Cornell (1968) y McGuire (1978). Este proceso intrínsecamente permite combinar el aporte realizado por las diferentes clases de sismos y tipos de fuentes sean cercanas, lejanas o profundas.

La evaluación de la amenaza o peligro sísmico inicia con la recopilación de información sobre la sismicidad del sitio, principalmente con el estudio de registros históricos, fallas cercanas, fuentes sísmicas, posición y movimiento de placas en la zona de interés.

### • COMPONENTES DE LA AMENAZA SÍSMICA

Para la estimación o determinación de la peligrosidad sísmica se cuenta con tres factores o elementos como son: la fuente, trayectoria y el efecto de sitio.



- i) **Componente Fuente:** Es la identificación de las fuentes potencialmente activas que afectan al sitio de estudio o interés.
- ii) **Componente Trayectoria:** Es la caracterización de la atenuación del movimiento, donde se identifica el comportamiento de las ondas sísmicas desde la fuente al sitio de interés, por medio de modelos empíricos o teóricos.
- iii) **Componente Sitio:** Es la caracterización del efecto de sitio donde se identifican la amplificación de la respuesta, debido a las características litológicas, topográficas y subsuelo del sitio de interés (Rivas 2014).

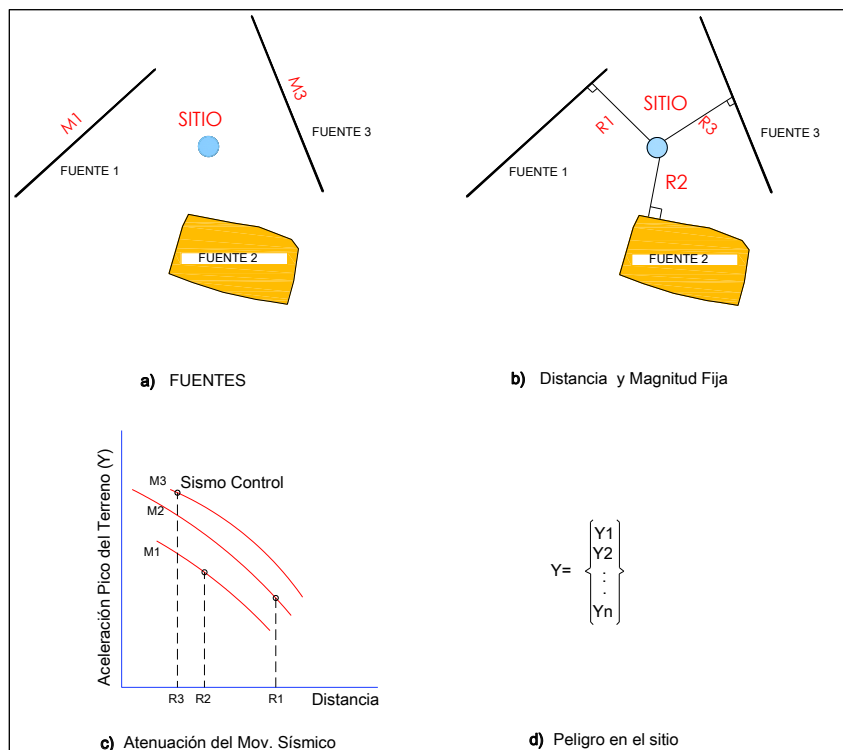
## 1.6. AMENAZA SÍSMICA DETERMINISTA (DSHA)

Los métodos deterministas se basan en que la sismicidad futura de una zona será igual a la del pasado, es decir la ocurrencia de un evento será constante. Se cuenta con un sismo de magnitud específica, a una distancia fija del punto de estudio, por tanto el método determinista no establece ningún nivel de probabilidad o relación a la excedencia del movimiento fuerte en el emplazamiento en un periodo de exposición dado (Rivas 2014).

El análisis determinista se resume en 4 pasos, como se muestra figura 1.1.

- Identificación y caracterización de todas las fuentes sísmicas (fallas) capaces de producir un movimiento del terreno en un sitio de estudio.
- Selección de la distancia a la fuente o sitio de estudio de cada zona.
- Selección del sismo “controlador” (el que produzca el mayor nivel de movimiento).
- Cálculo del peligro en términos de un parámetro de movimiento, por medio de una GMPEs.

**FIGURA 1.1** Pasos para el análisis determinista DSHA



FUENTE: (Kramer 1996)

ELABORADO: Adaptación Fernando Cañizares

## **I) VENTAJAS DEL MÉTODO DSHA**

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

## **II) DESVENTAJAS DEL MÉTODO DSHA**

- Una debilidad de este tipo de análisis es que requiere decisiones multidisciplinarias, criterios económicos, sociales y funcionales, lo cual deriva conclusiones no técnicamente adecuadas.
- No considera las incertidumbres inherentes en la estimación del peligro sísmico, esto es: la magnitud sísmica y la atenuación del movimiento del terreno.
- Relativa probabilidad de eventos no considerados, por lo tanto, niveles inconsistentes de riesgo.
- Es más subjetivo del analista o personal que realiza dicho estudio.



## 1.7. ANÁLISIS PROBABILISTA DE LA AMENAZA (PSHA)

El objetivo de la ingeniería sísmica es asegurar que la estructura soporte un nivel determinado de sollicitación o fuerza. La misma que tendrá un nivel de desempeño requerido con criterios de diseño técnico y económico.

La sollicitación sísmica tiene varias incertidumbres como: origen o tipo de falla, la distancia a la fuente y magnitud. Por lo tanto, el análisis probabilista de peligro sísmico (PSHA) pretende cuantificar estas incertidumbres y combinarlos para estimar el movimiento del suelo en un sitio determinado. (Baker J, 2013).

Debido a la aleatoriedad en la generación de los eventos sísmicos, y sumado al desconocimiento del fenómeno, se hace necesario la evaluación de la amenaza sísmica usando el enfoque probabilista que tenga en cuenta las incertidumbres de cada una de las variables involucradas (Restrepo 2013).

El teorema de las probabilidades totales, mediante la aplicación de la ecuación es:

$$v(a) = \sum_{i=1}^n \lambda_{0i} \int_{m_0}^{m_u} \int_{r_0}^{r_u} P(A \geq a | m, r) f_{R/M}(r; m) f_M(m) dr dm$$

Donde:

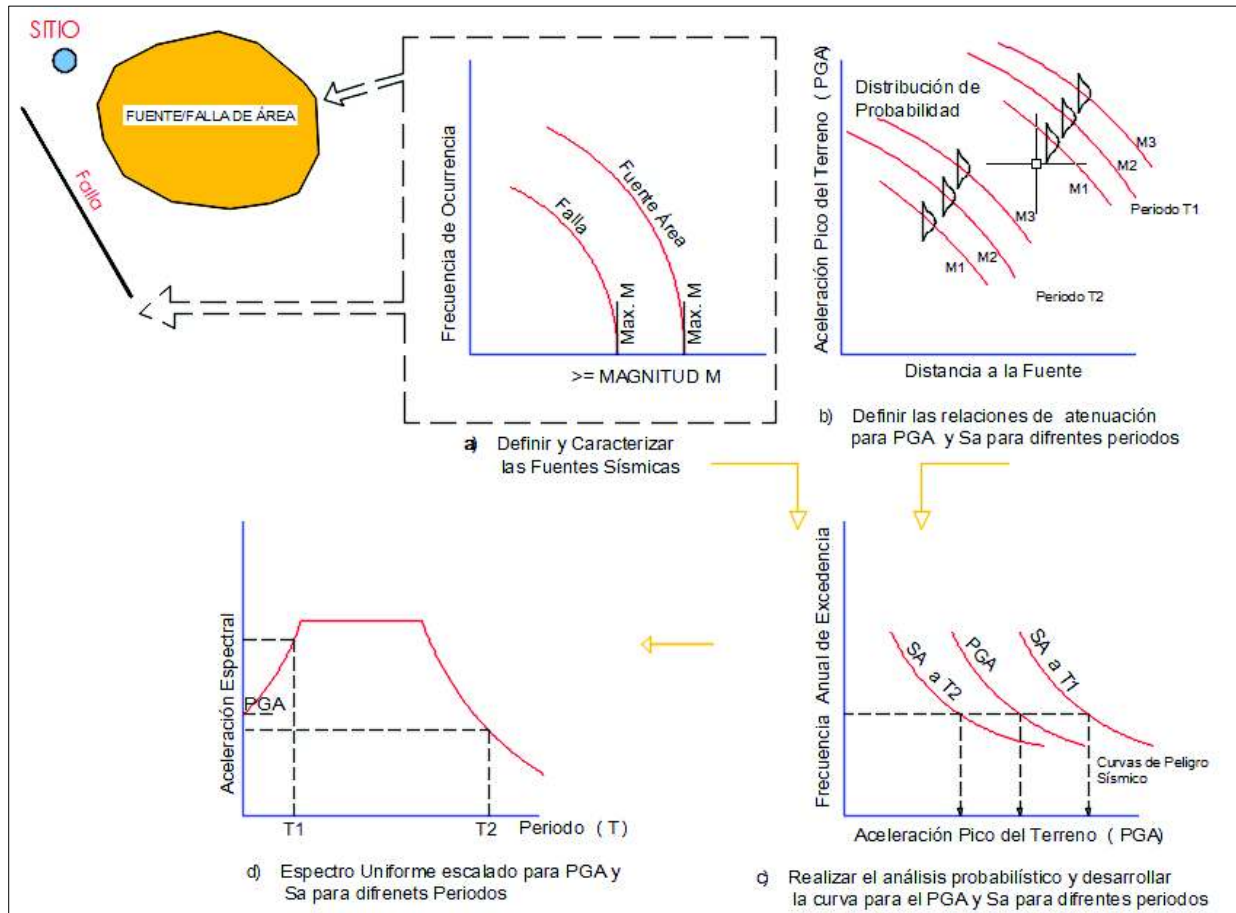
$\lambda_{0i}$	Tasa de ocurrencia de sismos en la fuente $i$ .
$m_0$ , $m_u$	Magnitud mínima y magnitud máxima.
$r_0$ , $r_u$	Distancia mínima y máxima de análisis.
$P(A \geq a   m, r)$	Probabilidad de excedencia de una aceleración seleccionada $A$ , dado un valor de magnitud del sismo: $m$ y una distancia $r$ .
$f_M(m)$	Función de densidad de probabilidad de la magnitud.

En la integral doble, el término  $P(A > a | m, r)$ , es simulado mediante la ecuación de atenuación.

Con el fin de evaluar el riesgo sísmico de una estructura, primero hay que determinar la probabilidad anual o tasa de exceder cierto nivel de un sismo en un sitio de interés para cierto nivel de intensidad.

Después se calcula el periodo de retorno en años ( $T_r$ ), y se define como el inverso de la probabilidad anual de excedencia, para un determinado valor del parámetro de movimiento del suelo.

**FIGURA 1.2** Pasos para el análisis probabilista PSHA.



FUENTE: USACE 1110 (1998)

ELABORADO: Adaptación Fernando Cañizares

El esquema de análisis probabilista mostrado en la figura 1.2, se resume en 4 pasos.

- Identificación y caracterización de todas las fuentes sísmicas capaces de producir un movimiento del terreno, en este caso son varias fallas locales o áreas de interés, y de acuerdo a un rango de magnitud probable.

- Selección de la distancia a la fuente o sitio de estudio de cada zona en función de un rango probable de aceleración.
- Realizar el análisis probabilista y desarrollar curvas de respuestas de aceleración para diferentes periodos de interés.
- Graficar el espectro de uniforme de aceleraciones en función del periodo de interés.

#### **I) VENTAJAS DEL ENFOQUE PROBABILISTA**

- Considera las incertidumbres referentes a la estimación del peligro sísmico.
- Considera la probabilidad de los eventos en base para los niveles de riesgo consistentes establecidos.

#### **II) DESVENTAJAS DEL ENFOQUE PROBABILISTA**

- Debido a que el analista asume varios parámetros o hipótesis de cálculo, así como, formulaciones estadísticas y matemáticas, el proceso no puede ser fácilmente reconocido o entendido.
- Requiere de conocimientos específicos de geología, sismología e ingeniería, y que puedan ser aplicados adecuadamente por el analista o el grupo de trabajo.

## **CAPÍTULO 2. MECANISMOS DE FALLAMIENTO Y SISMICIDAD EN LA CIUDAD DE QUITO**

### **2.1. SISMICIDAD HISTÓRICA DE LA CIUDAD**

La ciudad se encuentra asentada sobre una meseta alargada, rodeada por las colinas montañosas del Pichincha en el lado occidental, en la parte oriental, se aprecia elevaciones debido al sistema de fallas locales (Alvarado 2012).

Debido a los procesos de erupciones volcánicas, principalmente del complejo montañoso Pichincha, el suelo de Quito es denominado “unidad cangahua”, además, se tiene depósitos arcillo-arenosos con altos niveles freáticos, principalmente en el sector de la Carolina en el centro norte y Turubamba al sur de la ciudad.

Por tal razón la zona del Quito colonial (Figura 2.1) fue construido con materiales como: el adobe, tapial, bahareque y roca volcánica, que son propensos a sufrir daños, en especial los atrios y campanarios de las iglesias (Tabla 2.1. )

**FIGURA 2.1** Vista antigua relieve montañoso de la ciudad de Quito



FUENTE: Charton 1867.

**TABLA 2.1** Resumen histórico de los eventos sísmicos en Ecuador

<b>FECHA</b>	<b>MAGNITUD O INTENSIDAD</b>	<b>DAÑOS</b>	<b>LUGAR</b>
Sismo agosto 1587	Intensidad VIII (MSK) Magnitud de 6.4	Daños en pretilos y campanarios de las Iglesias centro histórico.	Guayllabamba, Puellaró, Pomasqui, Malchingui. (Falla Catequilla)
Sismo 1627	Intensidad VII, (MSK)	Daños en el Palacio de la Audiencia, casas del centro Histórico.	Centro de Quito
Sismo 1662	Intensidad VI-VII, (MSK)	Deslaves en taludes, arrastre de sedimentos hacia los valles de las quebradas, daños en iglesias.	Faldas de los volcán Pichincha.
Sismo 1755	Intensidad IX, (MSK)	Daños en iglesias, Evacuación de la ciudad.	Quito movimiento fuerte súbito seguido de réplicas menores por varios días.
Sismo 1797	Intensidad VIII, (MSK)	Daños en las iglesias del centro histórico de Quito, 40 000 víctimas	Riobamba
Sismo 1859	Intensidad IX, (MSK)	Daños en iglesias de Quito y en el Palacio Presidencial, se reportan 10-20 Víctimas	Quito
Sismo 1868	Intensidad X, (MSK)	Muchos daños en la ciudad de Ibarra, daños menores en Quito.	Cotacachi-Ibarra
Sismo del 31 Enero 1906	Magnitud 8.8	Quinto más grande de la historia sísmica mundial	Esmeraldas
Sismo 31 Mayo 1914	Intensidad VIII	No se reportan daños en Quito.	Oriente Pichincha Falla Chingual
Sismo 16 Mayo 1923	Intensidad VII	Patrón de daños en las iglesias de Quito	Falla Atacazo Falla Lumbisí.
Sismo 25 julio 1929	Intensidad VIII	No hay registro de daño	Tambillo –Machachi Prolongación de la falla Inversa de Quito
Sismo 10 Agosto 1938	Intensidad V	No hay registro de daño En Quito.	Alangasi, Sangolqui. San Rafael el Tingo
Sismo 1942	Magnitud 7.9	Intensidad registrada en Quito fue de VI	Bahía Caráquez Subducción

Sismo 1955	NR	Quito Daños menores	Ibarra, Cayambe Falla Chingual-Pallatanga
Sismo 5 Marzo 1987	Magnitud Ms= 6.9 Intensidad IX	Ciertos daños en las edificaciones en Quito Deslizamientos en el sector del Reventador y Cayambe. Deslizamiento de taludes Guayllabamba	Sucumbíos Fallas transcurrentes Inversas frente andino Oriental
Sismo 10 Agosto 1990	Magnitud Mb=5.3 Intensidad VII	Daños en edificaciones Destrucción de casas de adobe.	Pomasqui.Pusuquí Falla de Catequilla.
Sismo 4 Agosto 1998	Bahía de Caráquez Magnitud Ms=7.1 En Quito intensidad V	Daños estructurales en edificios modernos.	Bahía de Caráquez
Sismo 12 Agosto 2014	Magnitud Mw=5.1 Intensidad VI	Daños en viviendas, deslave de taludes 4 fallecidos, nubes de polvo en toda la ciudad.	Calderón, Pomasqui, a 2Km del epicentro sismo del 10/Agosto/1990 (M=5.1) Sistemas Fallas Quito
Replica 16 Agosto 2014	Magnitud Mw=4,7	Deslizamiento de taludes, se reportan 12 heridos.	Oyacoto Guayllabamba
Sismo 4 Septiembre 2016	Magnitud Mw=4.6	Colapso de campanario de iglesia, heridos leves	

FUENTE: Instituto Geofísico IGEPN, Alvarado (2012), Yepes 2014. Egred, J. (2000).

ELABORADO: Fernando Cañizares

Quito ha experimentado varios eventos de intensidad moderada durante los últimos 450 años, descritos en la Tabla 2.1, tomados principalmente de testimonios y crónicas religiosas de la época.

El primer evento sísmico referenciado en la ciudad de Quito, data del año 1587, le atribuyen una magnitud de 6.4 (Yepes et al. 2014), este es uno de los más fuertes de la historia sísmica de la ciudad, el cual causó daños en pretilos y campanarios de las iglesias del centro histórico mostrados en la Tabla 2.1.

En 1662, se produce un sismo de intensidad VII, según investigaciones históricas el evento es atribuible a la falla de Quito, sin embargo, relatos de la fecha asumen que este fenómeno natural fue a la cercanía con la erupción del volcán Pichincha, pero se descarta esa hipótesis, así mismo se registraron daños en las iglesias y viviendas (Yepes et al. 2014., Egred, J. 2000).

Para el año 1755, se reporta un sismo con movimiento fuerte y súbito con una intensidad de IX, seguido de réplicas menores. En días posteriores se reportan daños en las iglesias, pretilos y viviendas de Quito.

En el siglo XIX, en el año de 1859, se reporta un sismo de intensidad IX, el cual alarma a toda la ciudad por el grado de daño producido en las iglesias en especial el Palacio de Gobierno Presidencial, de acuerdo a relatos de la época se reportaron entre 10 y 20 fallecidos, pero no se consiguen las circunstancias de estos decesos, según estudios de sismicidad histórica el evento es atribuible al sistema de fallas de Quito (ver Tabla 2.1).

Un evento importante es el sismo ocurrido el 16 de mayo de 1923. Con un patrón de daños más pronunciados en las iglesias de la ciudad, hace presumir que el epicentro en esa ocasión se encontró más hacia el centro de la ciudad y es atribuible en el segmento de falla Ilumbisí.

Ya en el siglo XX, Quito sufrió daños por un terremoto la noche del 10 de agosto en 1990, con una magnitud Mw 5.3, se reportan daños en edificaciones, destrucción de casas de adobe principalmente en el centro de la ciudad, según reportes el epicentro fue ubicado en el sector de Pomasqui, y es atribuible al segmento de falla Catequilla.

Para el siglo XXI, se reportan tres sismos importantes; el primero el 11 agosto del 2011, el segundo producido en agosto del 2014, el más reciente el 4 de septiembre del 2016 (Tabla 2.2). Los cuales están registrados gracias a la red de acelerógrafos RED RENAC, instalados por IGEPN.

## 2.2. SISTEMAS DE FALLAS DE QUITO

Los sismos en la ciudad ocurren principalmente por el sistema de fallas de Quito (QFS) conocidas como: Puengasí, Ilumbisí–La Bota y Carcelén–El Inca, hacia el norte el sector de Guayllabamba se tiene los segmentos de falla Bellavista–Catequilla, Tangahuilla, R.Uravia F. y R.Coyango F (GFS).

La formación de la falla inversa en Quito, se debe al movimiento del bloque formado por los valles de: Tumbaco y los Chillos, los cuales forman un ángulo agudo, con el bloque de Quito, los cuales al desplazarse generan esfuerzos cortantes como se muestra en la figura 2.2.

**FIGURA 2.2** Formación del sistema de fallas de Quito QSF y GFS.



FUENTE: Alvarado et al. (2014).

En la figura 2.2 los segmentos en “negrilla” identifican la longitud, buzamiento y la forma del sistema de fallas de Quito (QFS) y el de Guayllabamba (GFS).



## 2.3. TIPOLOGÍAS DE LAS FALLAS CORTICALES

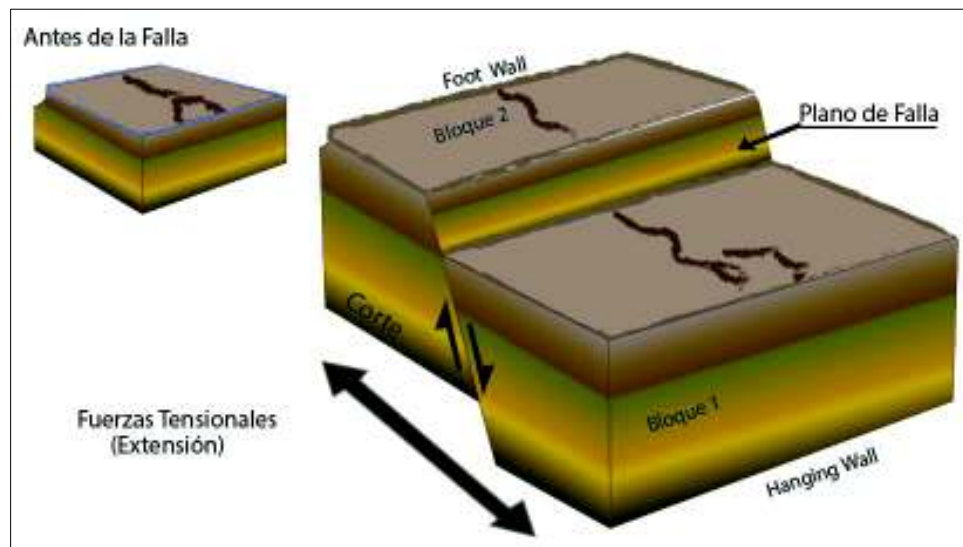
Las fallas geológicas superficiales producen sismos de tipo cortical de magnitud moderada, debido al desplazamiento cinemático entre los bloques de la corteza terrestre, generando esfuerzos tensionales y compresionales, dependiendo del movimiento cinemático de las fallas en el espacio, y se clasifican en: i) Normal, ii) Inversa, iii) Transcurrente y iv) Desconocida.

### i) FALLA NORMAL O DE EXTENSIÓN

La falla tipo normal, también conocida como falla directa o de gravedad. Se caracteriza por el movimiento relativo entre el bloque1 (Denominado "*Hanging Wall*"), el cual se desplaza hacia abajo respecto al bloque2 ("*Foot Wall*"), generando fuerzas tensionales o de extensión, como se muestra en la figura 2.3.

El movimiento predominante es vertical respecto al plano de falla, la interacción de estos planos de falla generan los esfuerzos cortantes.

**FIGURA 2.3.** Falla cortical tipo normal



ELABORADO: Fernando Cañizares.

Donde:

Bloque 1: Es el bloque que se desplaza (*Hanging wall*), ver Figura 2.3

Bloque 2: Es el bloque fijo (*Foot wall*), ver Figura 2.3

## ii) FALLA INVERSA

La falla tipo inversa o también conocida como de cabalgamiento es generada por la compresión horizontal entre bloques, que se desplazan el uno del otro formando un plano inclinado de falla.

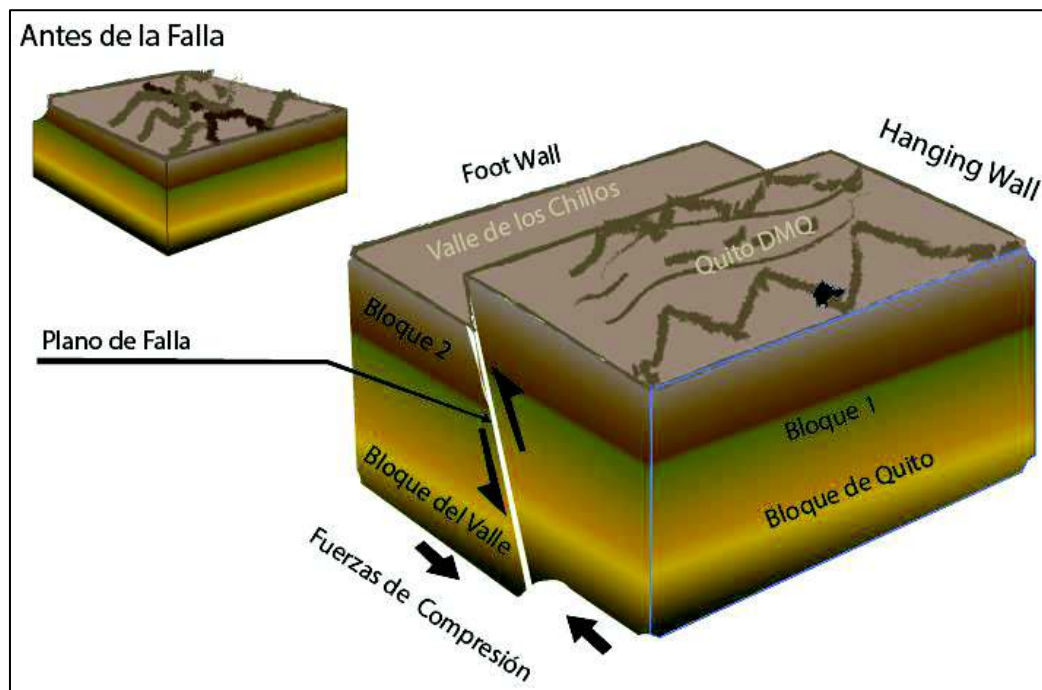
La formación este plano de falla se debe al movimiento relativo entre un bloque 1 (*Hanging wall*), respecto al bloque 2 (*Foot wall*), como se muestra en la figura 2.4.

El movimiento inclinado de estos bloques genera esfuerzos cortantes entre los planos de falla, dando origen a los sismos de tipo inverso.

Estas fallas típicamente forman ángulos entre 0 y 45 grados, con respecto a la horizontal o corteza superficial.

En el caso de la ciudad de Quito, se tiene principalmente fallas tipo inverso, en el cual el bloque de los valles forma un ángulo con el bloque de Quito.

**FIGURA 2.4** Fallas tipo inversa.



ELABORADO: Fernando Cañizares.

Donde:

Bloque 1: Es el bloque que se desplaza (Los Valles-*Foot wall*).

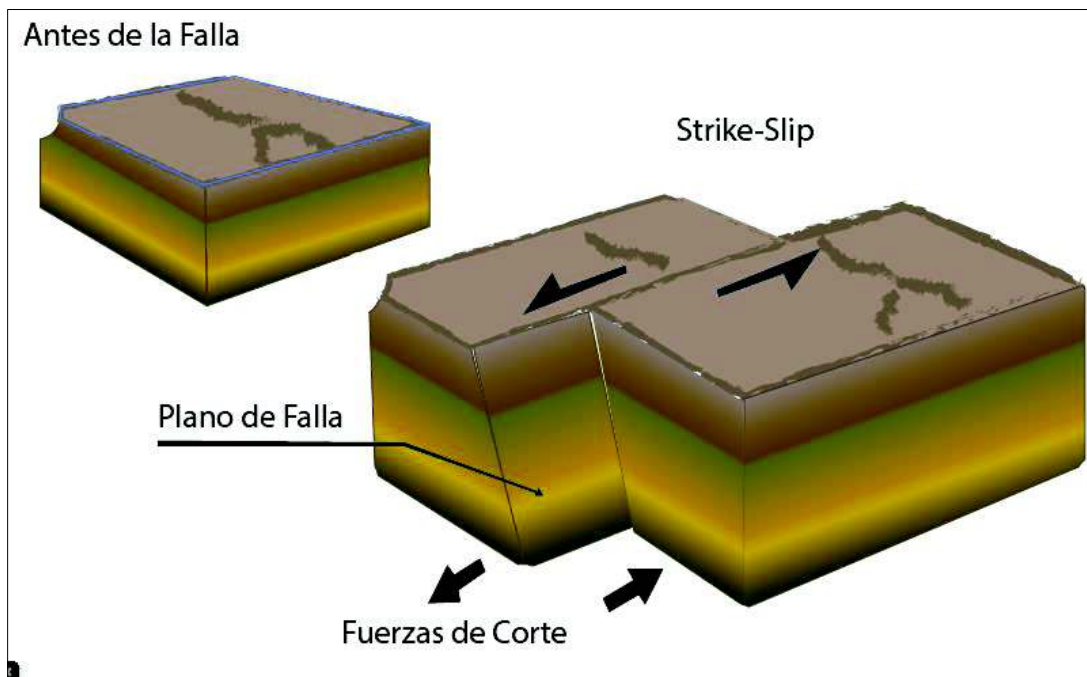
Bloque 2: Es el bloque fijo (Quito-*Hanging wall*), ver figura 2.4.

### iii) FALLA TIPO TRANSCURRENTE

La falla tipo transcurrente también conocida como de desgarre o desplazamiento de rumbo, se produce debido al movimiento horizontal entre los bloques.

Dependiendo de qué bloque se considera como fijo, puede generarse falla lateral derecha o falla lateral izquierda, como se muestra en la figura 2.5.

**FIGURA 2.5** Falla tipo transcurrente.



ELABORADO: Fernando Cañizares

En las fallas tipo oblicua, se combina las fallas tipo inversa o normal y una transcurrente, para generar desplazamientos en dos direcciones, horizontal y vertical simultáneamente.

## 2.4. MECANISMOS FOCALES EN FUNCIÓN DEL TIPO DE FALLA

El mecanismo focal es una representación gráfica de dos posibles soluciones o formas de la ruptura, que originan un sismo, como se muestra en la figura 2.7.

Para la representación gráfica del mecanismo focal (Figura 2.6), es necesario la caracterización de tres tipos de ángulos denominados: Strike ( $0-360^\circ$ ) medido respecto al rumbo norte; ángulo Dip ( $0-90^\circ$ ), que mide el grado de buzamiento del plano de falla respecto al plano horizontal y ángulo "Rake", que es relativo al plano de falla.

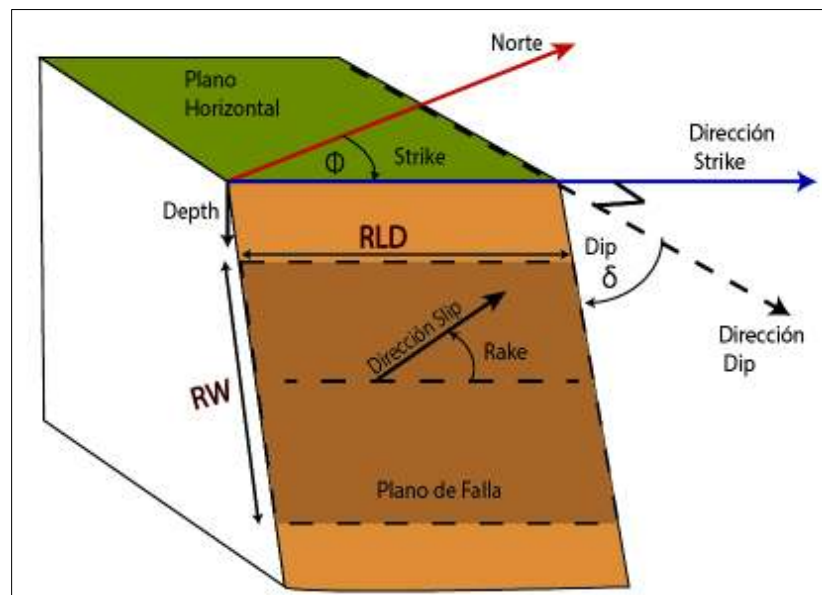
Características de los ángulos:

**Strike:** Ángulo que permite definir el rumbo de la falla, respecto a una orientación norte-sur, el rango es entre  $0-360^\circ$ . (Figura 2.6)

**Dip:** Ángulo que forma el plano horizontal y el plano de falla o buzamiento de la falla su rango es entre  $0-90^\circ$  (Figura 2.6)

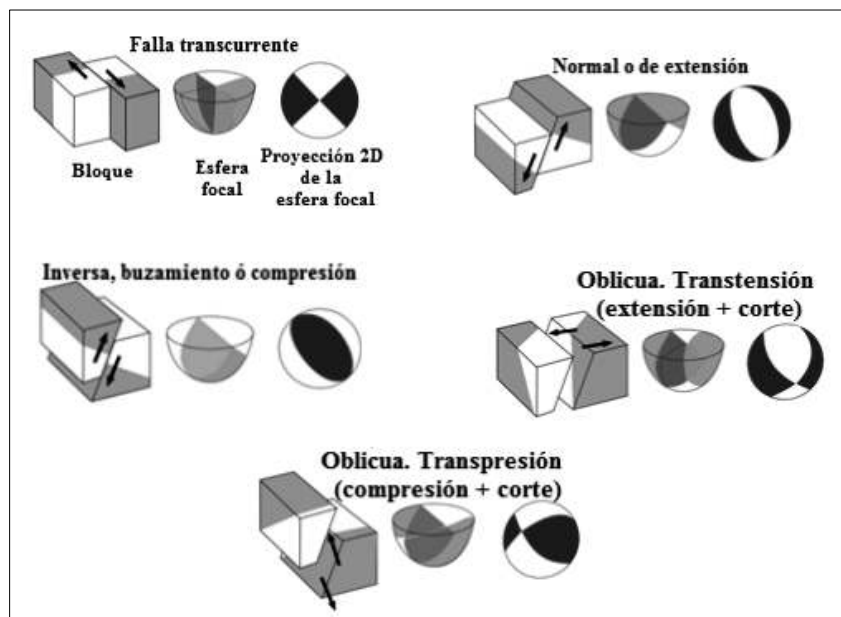
**Rake:** Ángulo relativo formado en el plano de falla y la horizontal.

**FIGURA 2.6** Representación de los ángulos y planos de falla



Dependiendo del tipo de falla (Normal, inversa o transcurrente), se representa en un plano horizontal (2D), la proyección estereográfica de la esfera focal (Figura 2.7).

**FIGURA 2.7** Representación de los mecanismos focales más comunes y sus correspondientes fallas generadoras



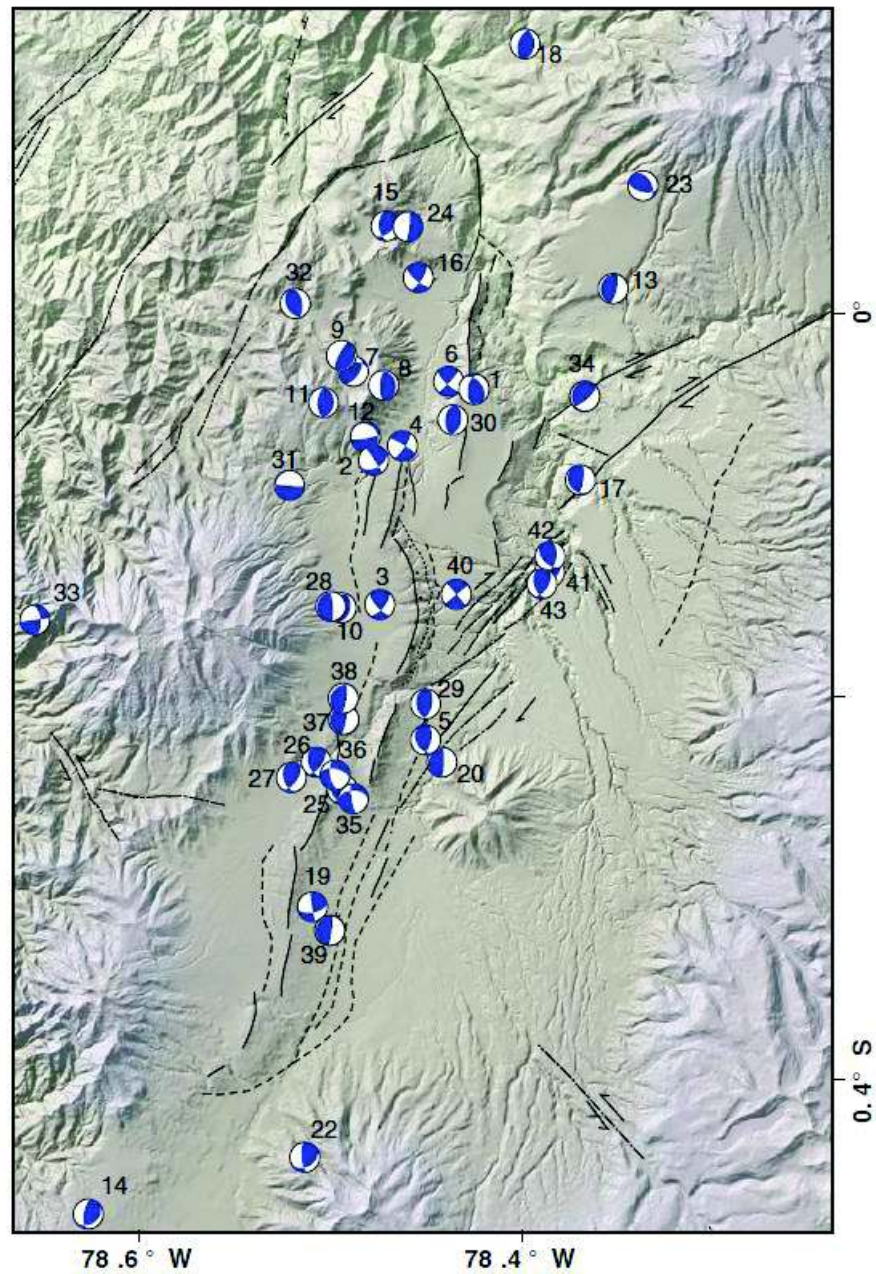
FUENTE: FUENTE: Kramer (2012).

#### 2.4.1. MECANISMOS FOCALES REGISTRADOS EN QUITO

En las figura 2.8, se muestra la distribución de los mecanismos focales registrados en la ciudad de Quito, un total de 43 sismos con una magnitud entre 2.7 y 5.1, desde el 11 de agosto de 1999 hasta el 26 de noviembre del 2011.

En su mayoría son sismos de tipo inverso, se identifican los mecanismos focales 39, 19, 35,20 y 43 (Figura 2.8), los cuales representan las fallas para la ciudad de Quito (QFS): Puengasí, Ilumbisí–La Bota y Carcelén–El Inca.

En tanto que en el sistema de fallas del Guayllabamba (GFS), se aprecia fallas tipo transcurrente. Se identifican los mecanismos focales 23, 13 y 40. Estos debido a la forma y orientación de la falla R.Uravia F, así mismo el mecanismo focal número 34, que es de tipo transcurrente con un cierto componente oblicuo, el cual se debe a la falla R.Coyango F, mostrado en la figura 2.2 (Alvarado et al. 2014).

**FIGURA 2.8** Mecanismos focales registrados en la ciudad de Quito

FUENTE: IGEPN. Alvarado et al. (2014)

## 2.5. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE SISMOS RECIENTES OCURRIDOS EN QUITO

Esta investigación recopila registros o señales sísmicas, de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC), pertenecientes al Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN).

En la tabla 2.2, se muestra los sismos seleccionados, los mismos que serán tratados y filtrados en el programa GMPEs-EPN v1.

**TABLA 2.2.** Datos de los sismos locales seleccionados.

SISMO	FECHA	Mw	DEPTH (Km)	dt	Falla
Calderón	12-08-2014	5.1	5.3	0.01	Inversa
Puembo	8-08-2016	4.6	7.3	0.01	Inversa
Puembo-Tab.	4-09-2016	4.7	4.7	0.01	Inversa
Conocoto	17-02-2011	4.2	12	0.01	Inversa
Guayllabamba	29-10-2011	4.1	3	0.01	Inversa
Calderón 2	16-08-2014	4.7	7.7	0.01	Inversa

ELABORADO: Fernando Cañizares.

En la tabla 2.3, se muestra los sismos locales seleccionados en coordenadas UTM, necesarios para la representación en el plano de la figura 2.9.

**TABLA 2.3** Coordenadas y ubicación de los sismos

SISMO	Ubicación geo espacial de los	
	LATITUD	LONGITUD
Calderón	S0°3' 0"	O78°25'12"
Puembo	S0°9'12.73"	O78°22'48"
PuemboTab.	S0°10'38.2"	O78°19'11.28"
Conocoto	S0°15' 12.96"	O78° 29' 20.04"
Guayllabamba	S0° 7' 37.56"	O78° 23' 13.2"
Calderón 2	S0°3' 0"	O78°25'12"

ELABORADO: Fernando Cañizares.

En la Tabla 2.4, se muestra los sismos locales seleccionados registrados en las estaciones instaladas, así como la magnitud, distancia epicentral, tipo de suelo, forma de la falla y profundidad focal.

**TABLA 2.4** Sismos locales registrados red RENAC en la ciudad de Quito.

#	SISMO	AÑO	Estación	Mw	Dist Epi (km)	Suelo	Tipo de Falla	Depth (Km)
1	Calderón		R-AEPN	5.1	19.8	C	Inversa	5
2	Calderón	08-2014	R-LILI	5.1	27.5	C	Inversa	5
3	Calderón		R-PRAM	5.1	13.4	C	Inversa	5
4	Puembo		R-AEPN	4.7	15.1	C	Inversa	7
5	Puembo	08-2016	R-LILI	4.7	22.5	C	Inversa	7
6	Puembo		R-CRPG	4.7	10.7	C	Inversa	7
7	PuemboTab		R-AEPN	4.6	15.7	C	Inversa	4.73
8	PuemboTab	09-2016	R-LILI	4.6	22.7	C	Inversa	4.73
9	PuemboTab		R-FENY	4.6	13.6	C	Inversa	4.73
10	Conocoto		R-AEPN	4.2	5	C	Inversa	12
11	Conocoto	17-02-2011	R-LILI	4.2	4.63	C	Inversa	12
12	Conocoto		R-PRAM	4.2	12	C	Inversa	12
13	Guayllabamba		R-AEPN	4.1	14.9	C	Inversa	3
14	Guayllabamba	29-10-2011	R-LILI	4.1	22.7	C	Inversa	3
15	Guayllabamba		R-PRAM	4.1	12.1	C	Inversa	3
16	CalderónR		R-AEPN	4.7	19.8	C	Inversa	7.7
17	CalderónR	16-08-2014	R-LILI	4.7	27.5	C	Inversa	7.7
18	CalderónR		R-PRAM	4.7	13.4	C	Inversa	7.7

ELABORADO: Fernando Cañizares

La profundidad de la falla se toma de los reportes del Instituto Geofísico IG-EPN





En la tabla 2.5, se muestra la ubicación geoespacial de las estaciones sísmicas tomadas para selección de acelerogramas registrados en la ciudad de Quito.

**TABLA 2.5** Ubicación de las estaciones instaladas en la ciudad de Quito.

RED	Estación	Latitud	Longitud	Altitud
RENAC	LILI	-0.27190	-78.53140	2866
RENAC	AEPN	-0.21199	-78.49165	2813
RENAC	FENY	-0.14700	-78.48150	2799
RENAC	PRAM	-0.14490	-78.49470	2840
RENAC	CRPG	-0.10408	-78.45438	2656

ELABORADO: Fernando Cañizares

### 2.5.1. CÁLCULO DE LA LONGITUD Y ÁREA DEL SISTEMA DE FALLAS

Wells and Coppersmith (1994) mediante la recopilación de sismos históricos y regresiones estadísticas, establecieron relaciones empíricas entre la magnitud de momento y la longitud de la falla producida. Estas ecuaciones dependen de la forma de fallamiento sea estos: normal, inverso, oblicuo y desconocido.

Las relaciones empíricas de cálculo son:

- Longitud de ruptura superficial:

$$M = a + b * \log(SRL)$$

- Longitud de ruptura sub-superficial:

$$M = a + b * \log(RLD)$$

- Ancho de la ruptura:

$$M = a + b * \log(RW)$$

- Área de la ruptura:

$$M = a + b * \log(RA)$$

Los coeficientes a, b son determinados de acuerdo a la Tabla 2A, Anexo A9.

En este estudio se utilizan solamente las ecuaciones para determinar la geometría de la falla sub superficial (RLD) y ancho de la ruptura (RW).

## 2.6. SISMOS LOCALES SELECCIONADOS

La magnitud de los sismos registrados en la ciudad de Quito se encuentran en el rango de: 4.1 - 5.2, los cuales se calculan sus propiedades geométricas de la falla producidas mediante las ecuaciones de Wells y Coppersmith.

### 2.6.1. SISMO DEL 17 FEBRERO 2011 CONOCOTO

El 17 de febrero del 2011, en el sector del valle de los Chillos en el barrio de Conocoto, se produce un sismo de magnitud 4.2 a las 19:04(TL), con una profundidad de 12km, el cual fue sentido en toda la ciudad Quito.

De acuerdo con los informes de la página del IGEPN en función del nivel de daños, se estableció que la intensidad EMS-98 (European Macroseismic Scale), para este evento fue de III, que corresponde a un movimiento tipo leve.

Aplicando las ecuaciones de Wells y Coppersmith, se obtienen los siguientes parámetros:

Datos de los ángulos de falla:

Plano1: Strike=170, Dip=80 y Rake=-48;

Plano2: Strike=270, Dip=43 y Rake=-165

Cálculo de características de la falla:

#### *i) Cálculo del ancho de ruptura sub-superficial (RLD)*

$M = a + b * \log(RLD)$  Ecuación válida para fallas inversas

$\log(RLD) = a + b * M$

Donde:

RLD=Sub-Surface rupture length (km)

a=-2.42 (Tabla 2A- Anexo A9)

b=0.58

M=4.2

$\log(RLD) = -2.42 + 0.58 * (4.2)$

$\log(RLD) = 0.016$

**RLD=1.03km.**

**ii) Ancho medio del plano de falla medido respecto al ángulo Dip (*RW*)**

$M = a + b * \log(RW)$  Ecuación válida para fallas inversas

$$\log(RW) = a + b * M$$

Donde:

$RW$ = Downdip ruptura width (km)

$a=-1.61$  (Tabla 2A- Anexo A9)

$b=0.41$

$M=4.7$  (Sismo Puenbo)

$$\log(RW) = -1.61 + 0.41 * (4.2)$$

$$\log(RW) = 0.112$$

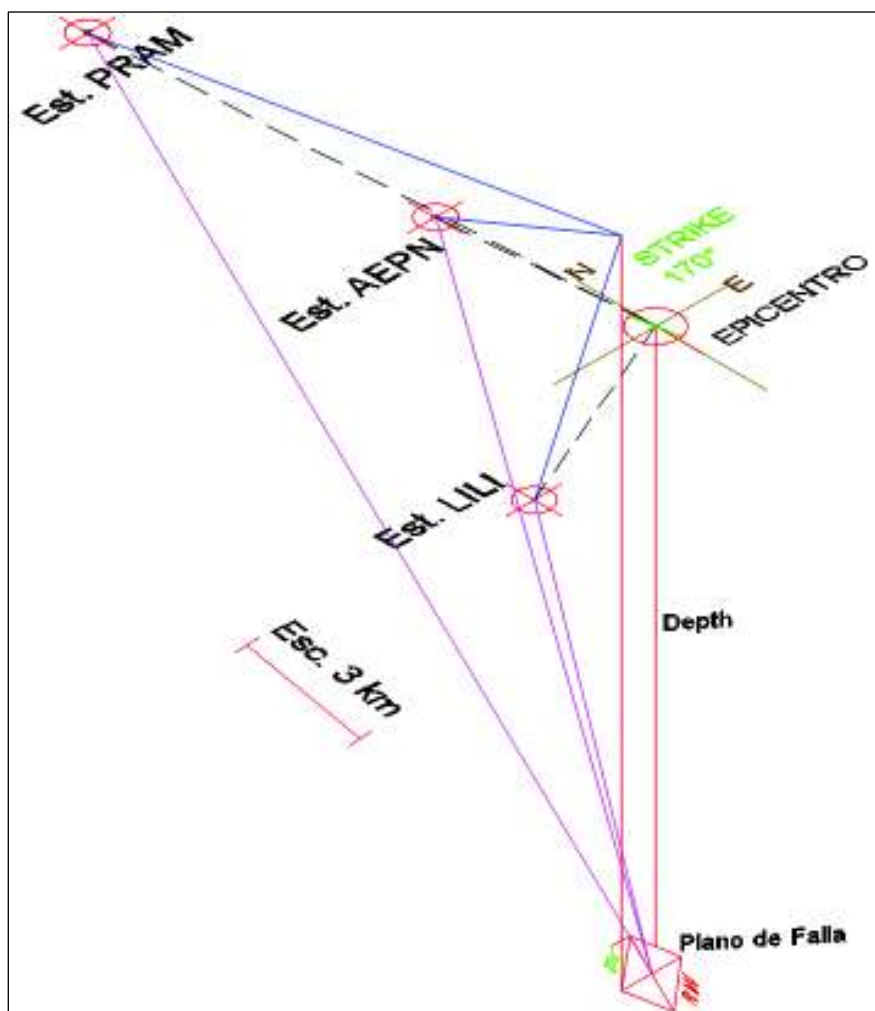
**$RW=1.3$  km.**

**TABLA 2.6** Resumen de los cálculos de la longitud y área de la falla

RLD	1.03 (km)
RW	1.3 (km)

ELABORADO: Fernando Cañizares

En la tabla 2.6, se muestra los datos calculados con las fórmulas de Wells y Coppersmith (1994), para la representación de los planos de falla y distancias epicentrales (ver figura 2.10).

**FIGURA 2.10** Cálculo de las distancias sismo Conocoto 17 02 2011.

ELABORACIÓN: Fernando Cañizares

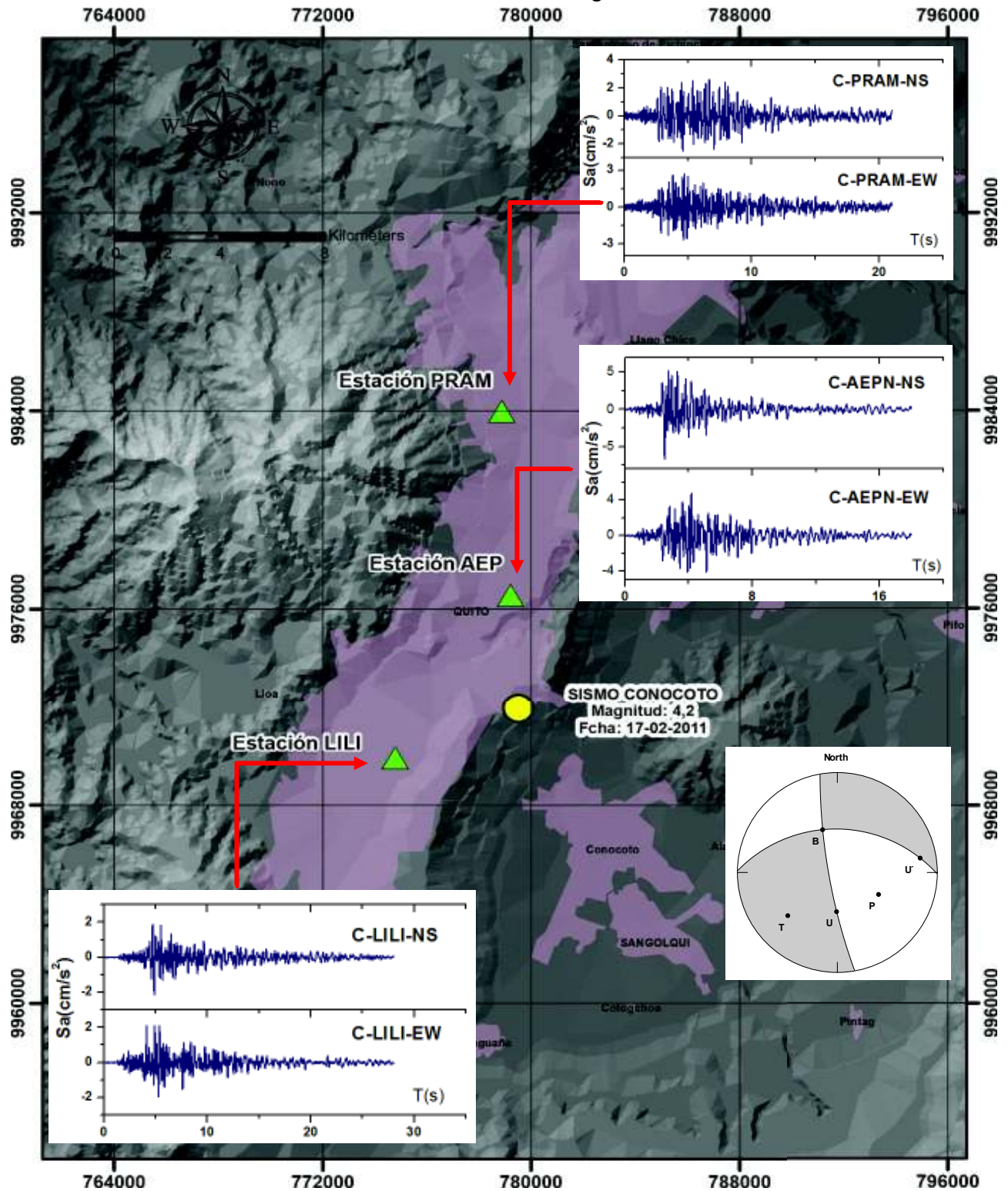
En la tabla 2.7, se muestra el cálculo de las distancias, desde las estaciones instaladas, hacia el epicentro del sismo.

**TABLA 2.7** Cálculo de las distancias entre el sismo y las estaciones.

Estación	Lat.	Long.	Altitud	R <sub>Epi.</sub> (Km)	R <sub>jb.</sub> (Km)	R <sub>hyp.</sub> (Km)	PGA NS (g)	PGA EW(g)
LILI	S 0° 16'	O 78° 31'	2866	5.14	5.38	13.49	0.014	0.017
AEPN	S 0° 12'	O 78° 29'	2813	4.6	4.43	13.2	0.016	0.02
PRAM	S 0° 8'	O 78° 29'	2840	12.0	11.65	17.3	0.043	0.036

ELABORADO: Fernando Cañizares

**FIGURA 2.11** Sismo de Conocoto 17/02/2011, registrado en las estaciones.



ELABORACIÓN: Fernando Cañizares

En la figura 2.11, se muestra las estaciones LILI, PRAM y AEPN, con sus respectivos registros sísmicos, así como el epicentro del evento y el mecanismo focal.

## 2.6.2. SISMO DEL 29 OCTUBRE 2011 GUAYLLABAMBA

El 29 de octubre de 2011, se registró un evento sísmico de magnitud 4.1, según reportes del IGEPN, se localizó a una profundidad de 3Km. El epicentro se localizó a 7Km al sur oriente del sector de Calderón, y a 5.5Km al norte de la población de Puembo, este evento es atribuible al sistema de fallas de Quito.

Los datos necesarios para la representación (Figura 2.12), son los ángulos de falla: PL1: Strike=8°, Dip=56° y Rake=125°; PL2:Strike=136°, Dip=47° y Rake=50°.

Cálculo de características de la falla:

### *i) Cálculo del ancho de ruptura sub-superficial (RLD)*

$M = a + b * \log(RLD)$  Ecuación válida para fallas inversas,

$\log(RLD) = a + b * M$  Rango 4.8 – 7.6

Donde:

RLD=Sub-Surface rupture length (km)

a=-2.42

b=0.58

M=4.1

$\log(RLD) = -2.42 + 0.58 * (4.1)$

$\log(RLD) = -0.042$

**RLD=0.98km.**

### *ii) Ancho medio del plano de falla medido respecto al ángulo Dip (RW)*

$M = a + b * \log(RW)$  Ecuación válida para fallas inversas,

$\log(RW) = a + b * M$  Rango 4.8-7.6

Donde:

RW= Downdip rupture width (km)

a=-1.61

b=0.41

M=4.1

$\log(RW) = -1.61 + 0.41 * (4.1)$

$\log(RW) = 0.071$

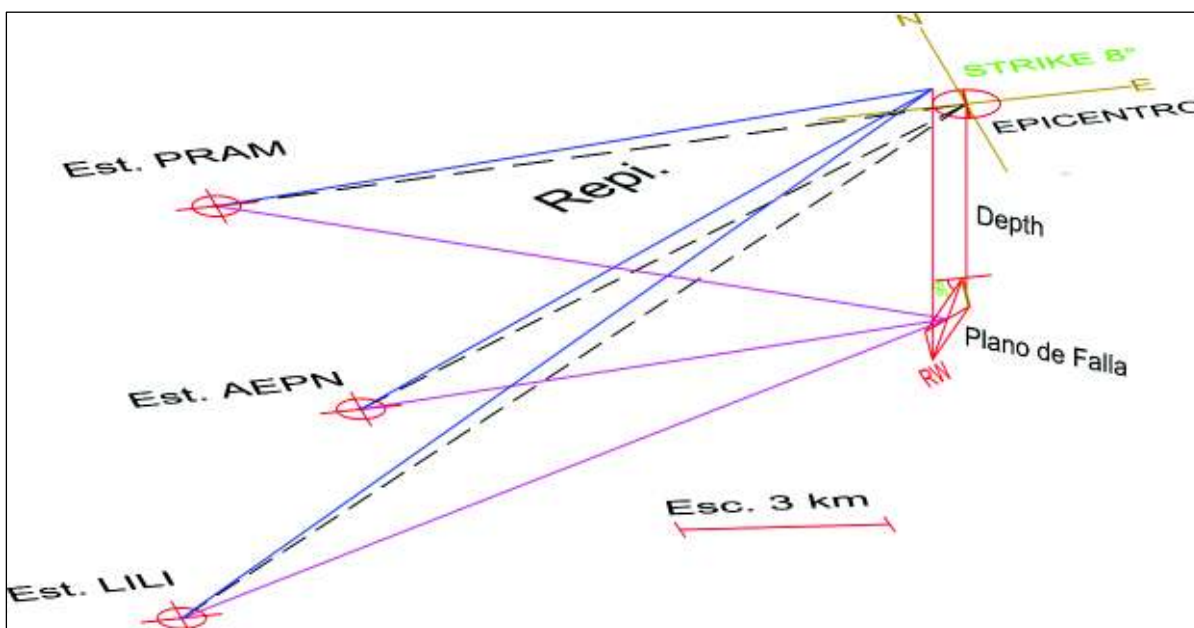
**RW=1.2 km.**

**TABLA 2.8** Resumen de los cálculos de la longitud y área de la falla

RLD	0.908 km
RW	1.2 km

ELABORADO: Fernando Cañizares

En la tabla 2.8 muestra el resumen de los datos para representación de la falla inversa, es necesario también conocer la profundidad de la falla (5.5km). Para el cálculo de las distancias a la fuente como se muestra en la figura 2.12.

**FIGURA 2.12** Esquema de distancias sismo Guayllabamba 29 10 2011.

ELABORACIÓN: Fernando Cañizares

En la tabla 2.9, se muestra las distancias calculadas desde las estaciones hasta el epicentro del sismo.

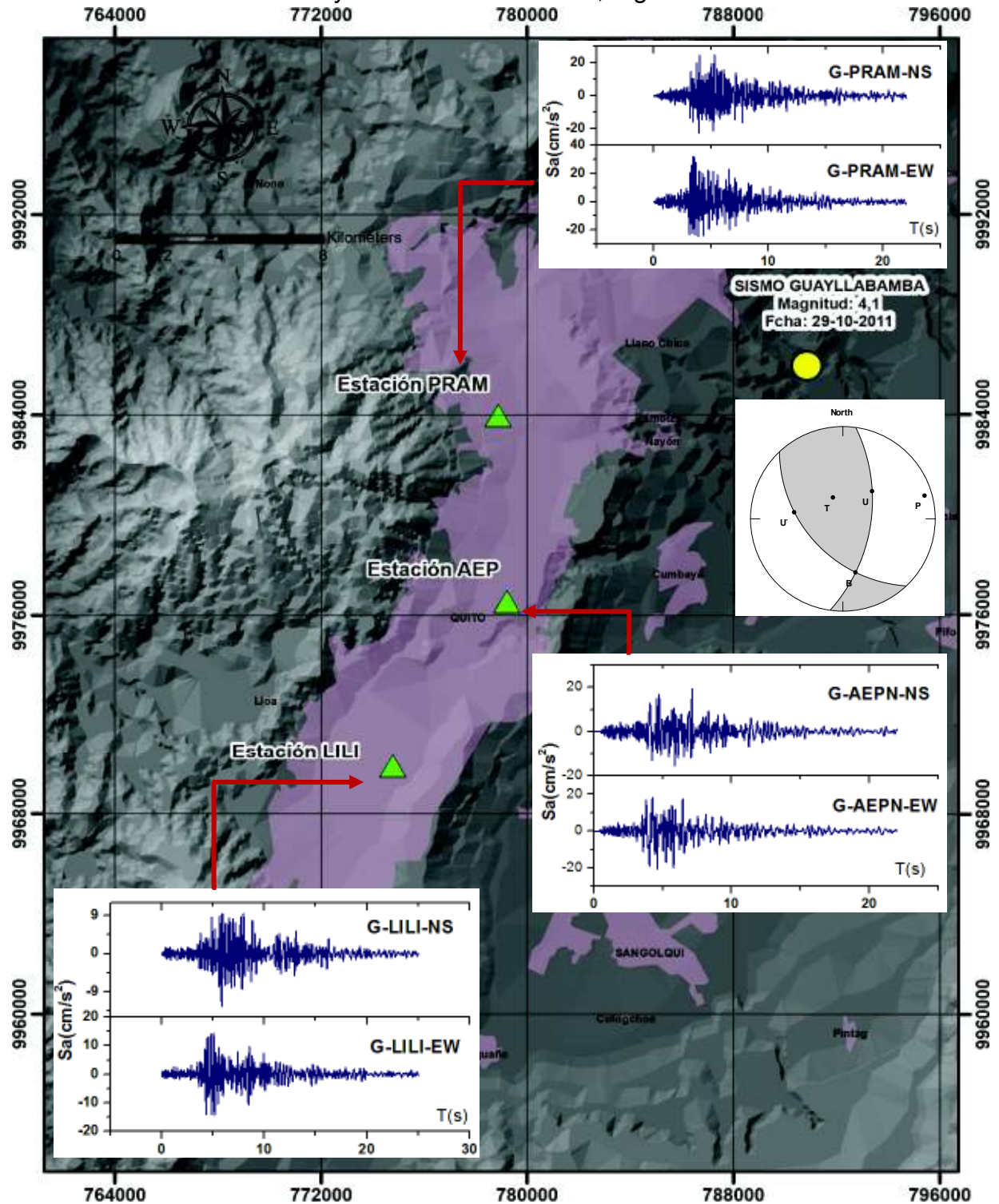
**TABLA 2.9** Cálculo de las distancias entre el sismo y las estaciones

Estación	Lat.	Long.	Altitud	$R_{Epi.}$ (Km)	$R_{jb.}$ (Km)	$R_{hyp.}$ (Km)	PGA NS (g)	PGA EW (g)
LILI	S 0° 16' 18.84"	O 78° 31' 53.04"	2866	22.7	21.96	22.8	0.014	0.017
AEPN	S 0° 12' 43.164"	O 78° 29' 29.94"	2813	14.97	14.2	15.29	0.016	0.02
PRAM	S 0° 8' 41.64"	O 78° 29' 40.919"	2840	12.16	11.47	12.5	0.043	0.036

ELABORACIÓN: Fernando Cañizares



**FIGURA 2.13** Sismo de Guayllabamba 29 /10/ 2011, registros en las estaciones.



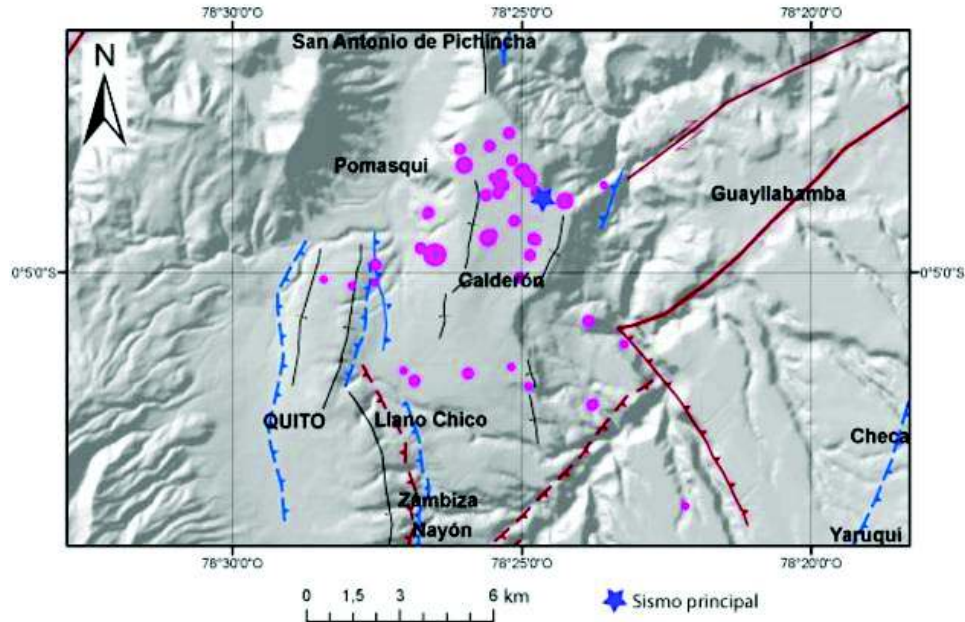
ELABORACIÓN: Fernando Cañizares

En la figura 2.13 muestra las estaciones LILI, PRAM y AEPN, con sus respectivos registros sísmicos, así como el epicentro del evento y el mecanismo focal

### 2.6.3. SISMO DEL 12 DE AGOSTO DE 2014 CALDERÓN

Al norte de la ciudad de Quito en la parroquia de Calderón, se produce un sismo de magnitud 5.1, a una profundidad de 5km, de acuerdo con reportes, debido sistema de fallas de Quito (QFS).

**FIGURA 2.14** Localización del sismo principal y sus réplicas.



FUENTE: IGEPN

El mecanismo de ruptura del sismo principal corresponde a una falla inversa mostrado en la Figura 2.14.

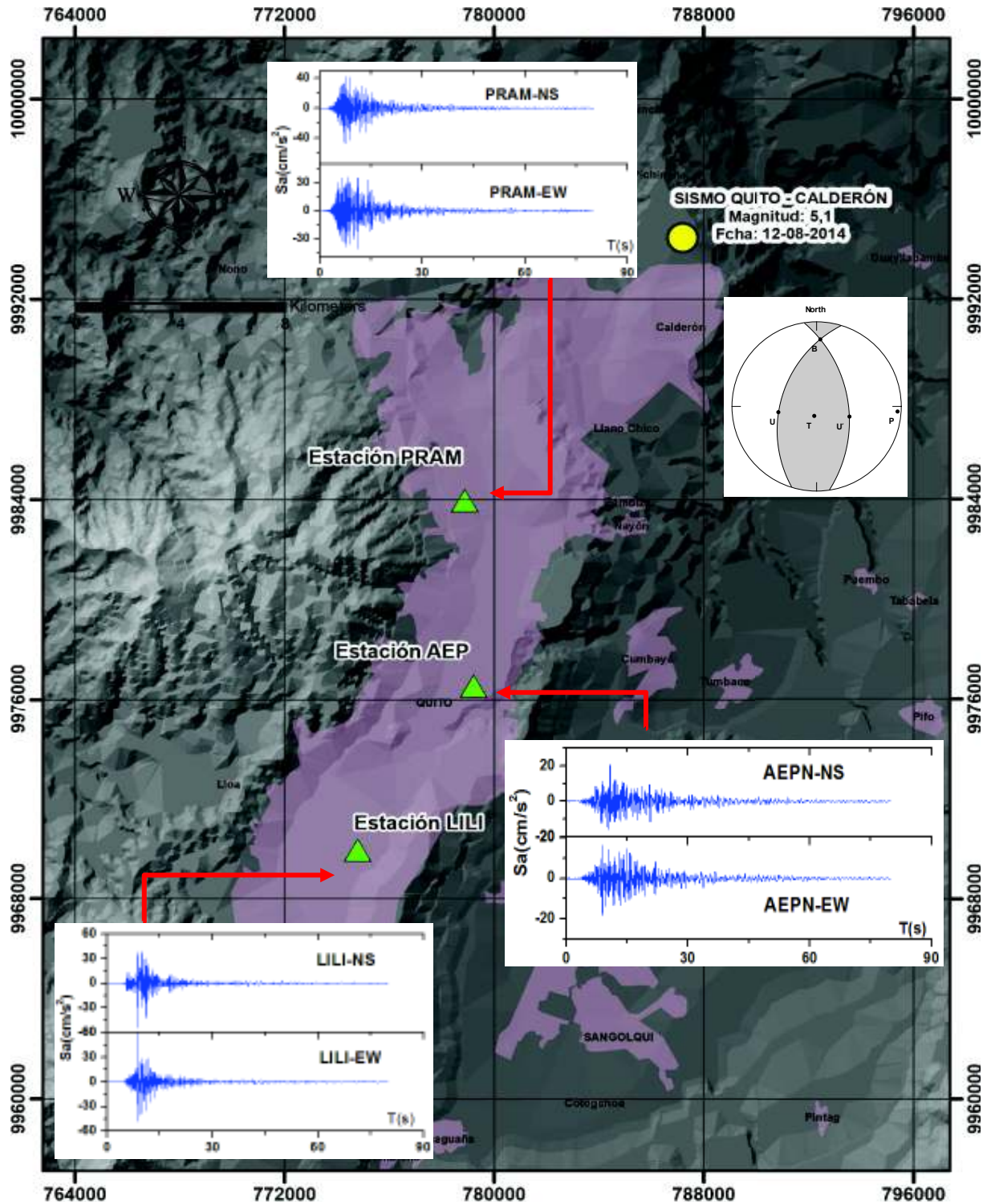
Del sitio Global Centroid Moment Tensor (GCMT), se toma los ángulos de los planos de falla y la forma del mecanismo focal del sismo de Calderón 12 Agosto 2014.

**TABLA 2.10** Ángulos y plano de falla sismo Calderón 12 Agosto 2014.

Fault Plane 1	Strike=197	Disp=44	Slip=109
Fault Plane 2	Strike=351	Disp=49	Slip=72

FUENTE: Global Centroid Moment Tensor (GCMT)

**FIGURA 2.15** Sismo de Calderón 12 agosto 2014, registros en las estaciones.



ELABORACIÓN: Fernando Cañizares

En la figura 2.15, se muestra las estaciones LILI, PRAM y AEPN, con sus respectivos registros sísmicos, así como el epicentro del evento y el mecanismo focal.

## 2.6.4. CÁLCULO DEL ÁREA Y LONGITUD DE FALLA SISMO

Cálculo del área de ruptura de falla mediante la recomendación de Wells and Coppersmith (1994).

### i) Cálculo del ancho de ruptura sub-superficial (**RLD**)

$M = a + b * \log(RLD)$  Ecuación válida para fallas inversas,

$\log(RLD) = a + b * M$  Rango 4.8 – 7.6

Donde:

RLD=Sub-Surface rupture length (km)

a=-2.42

b=0.58

M=5.1 (Sismo Calderón).

$\log(RLD) = -2.42 + 0.58 * (5.1)$

$\log(RLD) = 0.538$

**RLD=3.45 km.**

### ii) Ancho medio del plano de falla medido respecto al ángulo Dip (**RW**).

$M = a + b * \log(RW)$  Ecuación válida para fallas inversas,

$\log(RW) = a + b * M$  Rango 4.8-7.6

Donde:

RW= Dwindip rupture width (Km)

a=-1.61

b=0.41

M=5.1 (Sismo Calderón).

$\log(RW) = -1.61 + 0.41 * (5.1)$

$\log(RW) = 0.481$

**RW=3.0 km.**

**TABLA 2.11** Resumen de los cálculos de la longitud y área de la falla

RLD	3.45 (km)
RW	3 (km)

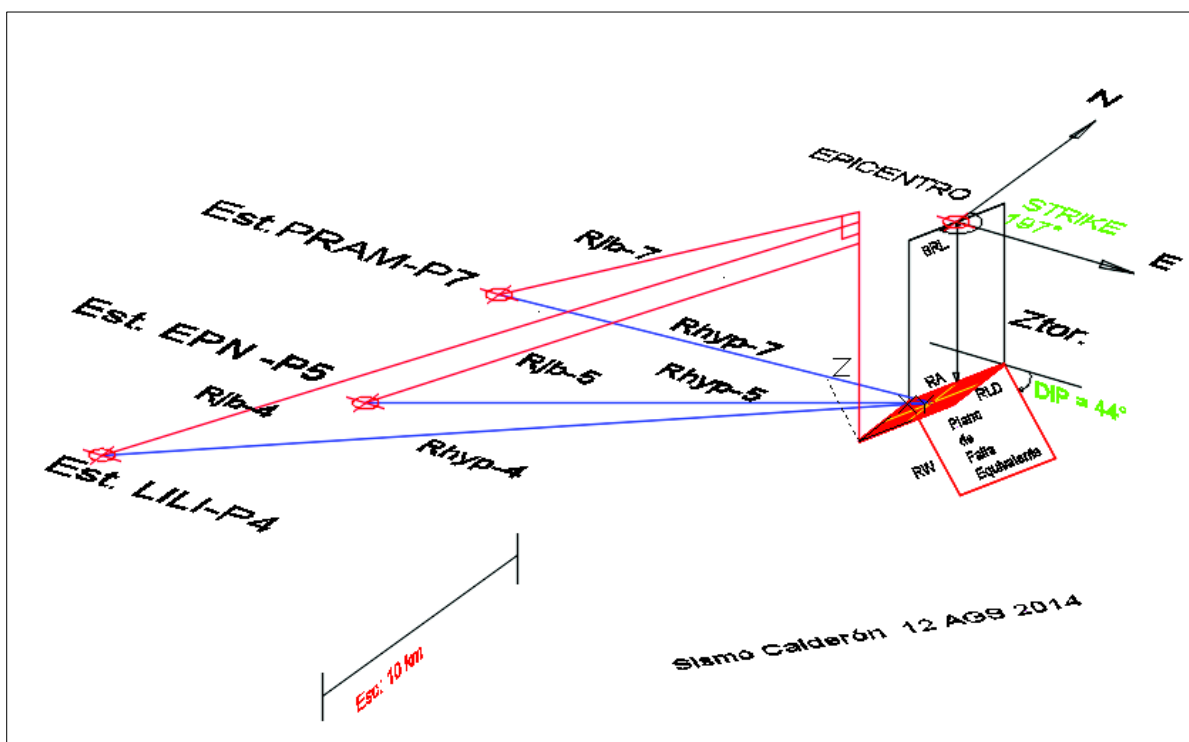
ELABORADO: Fernando Cañizares

En la tabla 2.11 se muestra el resumen de datos para representación de la falla inversa, es necesario también conocer la profundidad de la falla (5.5km). Para el cálculo de las distancias a la fuente, como se muestra en la figura 2.16.

**TABLA 2.12** Distancia epicentral calculada del sismo 12 de agosto 2014.

Est.	Lat.	Lon	z	Repi (Km)	Rjb. (Km)	Rhyp (Km).	PGA NS (g)	PGA EW (g)
LILI	S 0° 16'	O 78°	2866	27.5	25.50	28.01	0.014	0.017
AEPN	S 0° 12'	O 78°	2813	19.8	17.75	20.43	0.016	0.02
PRAM	S 0° 8'	O 78°	2840	13.4	11.08	14.38	0.043	0.036

ELABORACIÓN: Fernando Cañizares

**FIGURA 2.16** Representación distancias  $R_{jb}$ ,  $R_{Epicentral}$  y  $R_{hypocetral}$ , entre el sismo y las estaciones.

FUENTE: Instituto Geofísico EPN.

ELABORADO: Fernando Cañizares

### 2.6.5. SISMO DEL 16 AGOSTO 2016 CALDERON CATEQUILLA (4)

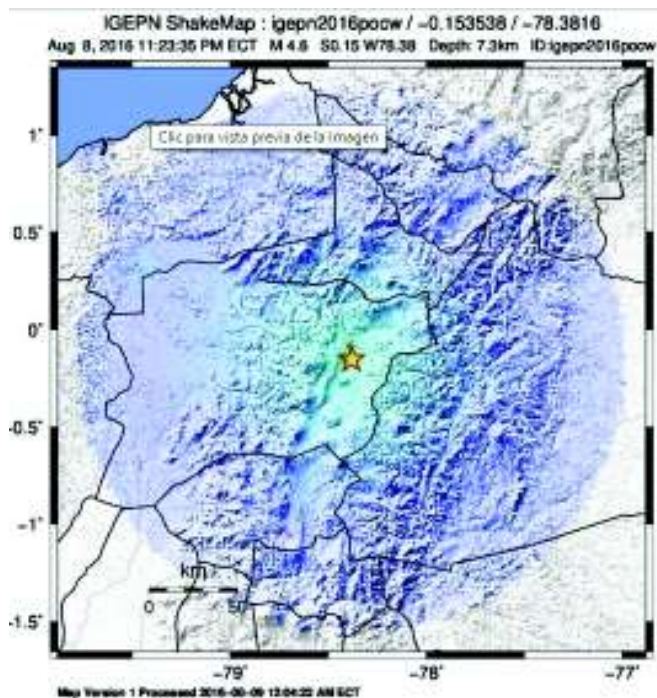
Según los reporte del IGEPN, se produce una réplica del sismo principal del 12 de agosto 2014, el sector de Calderón Catequilla, con una magnitud de  $M_w=4.7$ , y una profundidad 7.7km, para el análisis las ecuaciones de atenuación se toma las mismas distancias epicentrales del evento principal a las estaciones.

## 2.6.6. SISMO DEL 8 AGOSTO 2016 PUEMBO

Con fecha 8 de agosto 2016, ocurre un evento sísmico al nororiente de Quito, con fuerte componente vertical y corta duración, de acuerdo a los reportes de la población este evento fue sentido en toda la ciudad.

El epicentro estuvo ubicado en la parroquia de Puembo, aproximadamente a 7km de profundidad Figura 2.17.

**FIGURA 2.17** Localización del sismo del 8 agosto 2016

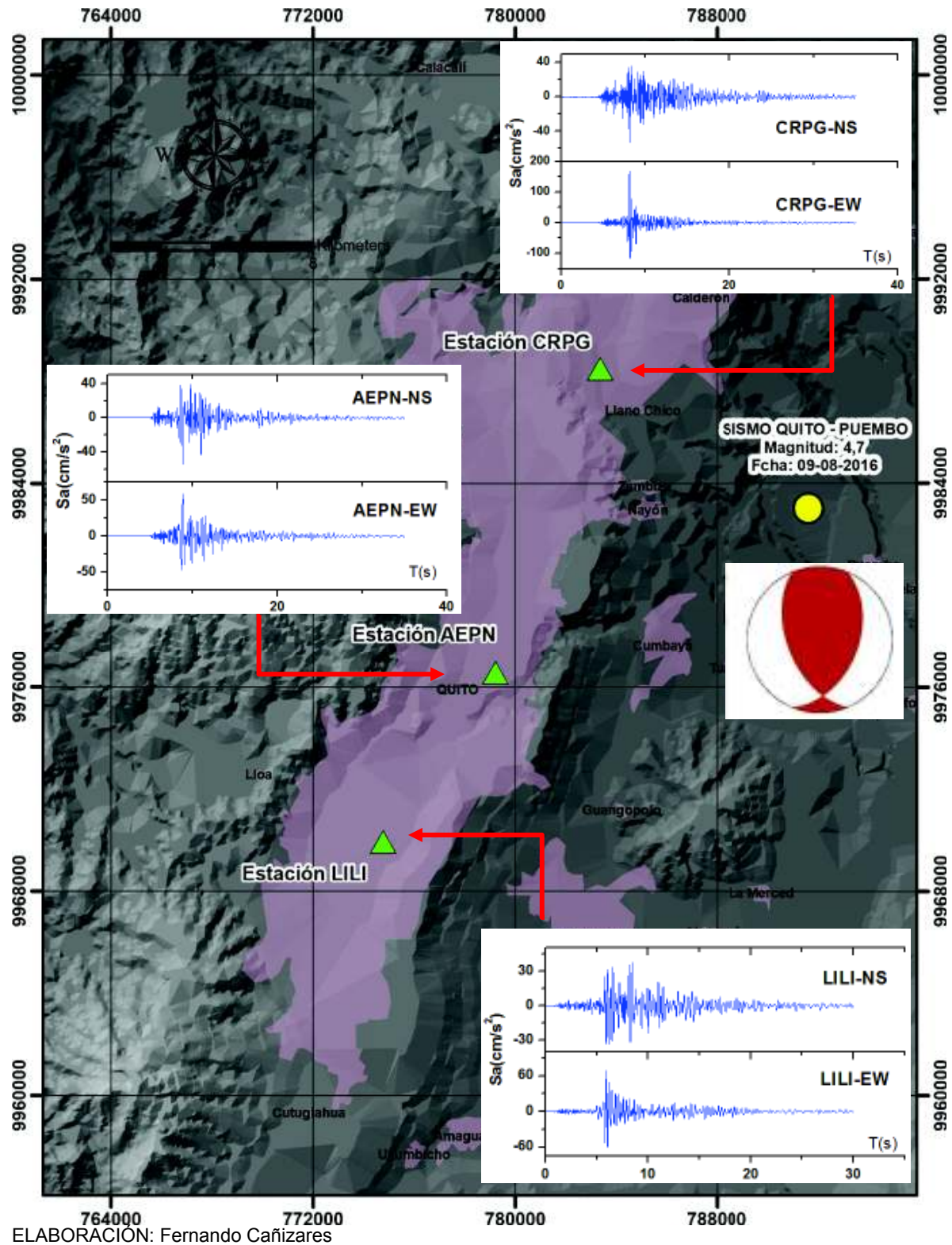


FUENTE: IGEPN. (2014)

Se reportaron deslizamiento de taludes, así como se registró daños menores en el puente “Chiche”, lo que obligo a un cierre temporal de la estructura, se reporta el colapso del techo de dos viviendas en el sur de Quito. No se reportaron víctimas en los sistemas de emergencia de las ciudades.

Existe afectación en las poblaciones de Guayllabamba, además se tiene reportes de afectaciones en la ciudad de Ibarra (Hotel Ajaví), deslizamientos pequeños en el sector de Cumbayá y otro más grande en vía principal que conecta Calderón con Guayllabamba (IGEPN2014)

FIGURA 2.18 Sismo Puenbo 9 agosto 2016 y sismos registrados



En la figura 2.18, muestra las estaciones LILI, CRPG y AEPN. con sus respectivos registros sísmicos, así como el epicentro del evento y el mecanismo focal.

## 2.6.7. CÁLCULO DEL ÁREA DE RUPTURA SISMO DE 8 AGOSTO 2016

### i) Cálculo del ancho de ruptura sub-superficial (RLD)

$M = a + b * \log(RLD)$  Ecuación válida para fallas inversas,

$$\log(RLD) = a + b * M$$

Dónde: RLD=Sub-Surface rupture length (km)

Constantes:  $a=-2.42$   $b=0.58$

$M=4.7$  (Sismo Puenbo). Esta dentro del límite.

$$\log(RLD) = -2.42 + 0.58 * (4.7)$$

$$\log(RLD) = 0.306$$

**RLD=2.02 km.**

### ii) Ancho medio del plano de falla medido respecto al ángulo Dip (RW)

$M = a + b * \log(RW)$  Ecuación válida para fallas inversas,

$$\log(RW) = a + b * M$$

Dónde: RW= Downdip rupture width (km)

Constantes  $a=-1.6$ ;  $b=0.41$

$M=4.7$  (Sismo Puenbo).

$$\log(RW) = -1.61 + 0.41 * (4.7)$$

$$\log(RW) = 0.307$$

**RW=2.1 km.**

**TABLA 2.13** Resumen de los cálculos de la longitud y área de la falla

RLD	2.02 (km)
RW	2.1 (km)

ELABORADO: Fernando Cañizares

**TABLA 2.14** Características del sismo 8 de agosto 2016 (Puenbo).

RED	Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Dist Epi. (Km)	PGA NS (g)	PGA EW (g)
RENAC	LILI	S 0° 16'	O 78° 31'	2866	22.5	0.038	0.07
RENAC	AEPN	S 0° 12'	O 78° 29'	2813	15.1	0.039	0.06
RENAC	CRPG	S 0° 8'	O 78° 29'	2656	10.7	0.037	0.183

ELABORACIÓN Fernando Cañizares



### 2.6.8. SISMO DEL 4 SEPTIEMBRE 2016

Como parte de las réplicas de sismo principal del 8 de agosto 2016 ( $M_w=4.7$ ), se produce un nuevo evento, el 4 de septiembre 2016 con una magnitud de  $M_w=4.6$ , ubicado en sector el sector de Puenbo una parroquia rural de Quito.

Se hace un análisis de los mecanismos de falla y forma, así como las distancias más cercanas a la fuente (Distancia Joyner Boore), datos necesarios para el cálculo de las ecuaciones de atenuación.

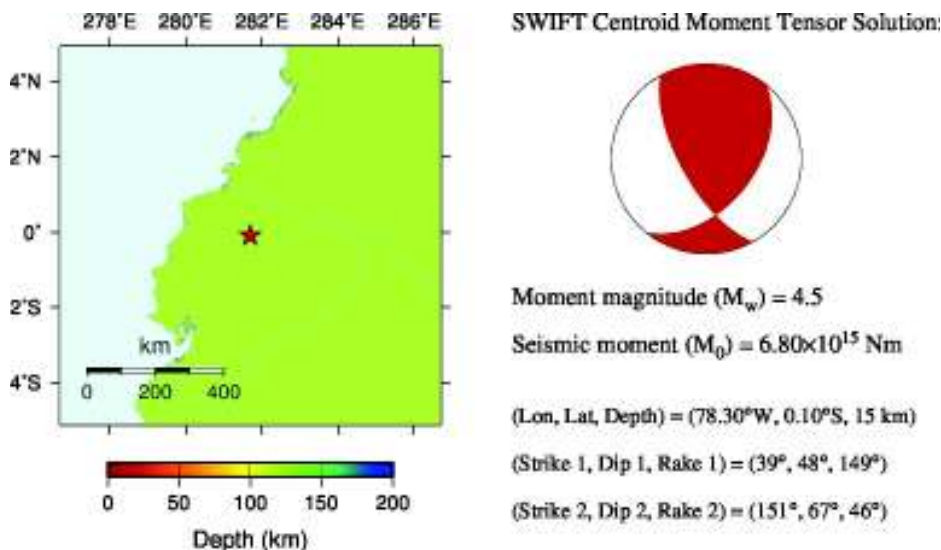
En el cuadro siguiente se muestran los ángulos de los planos de falla del sismo de 4 de septiembre 2016.

**TABLA 2.15** Ángulos de los planos de falla del sismo

Fecha (UTC)	Longitud	Latitud	Depth (km)	$M_w$
2016/09/05 00:22	78.3 W	0.1 S	15	4.6

FUENTE: Instituto Geofísico EPN

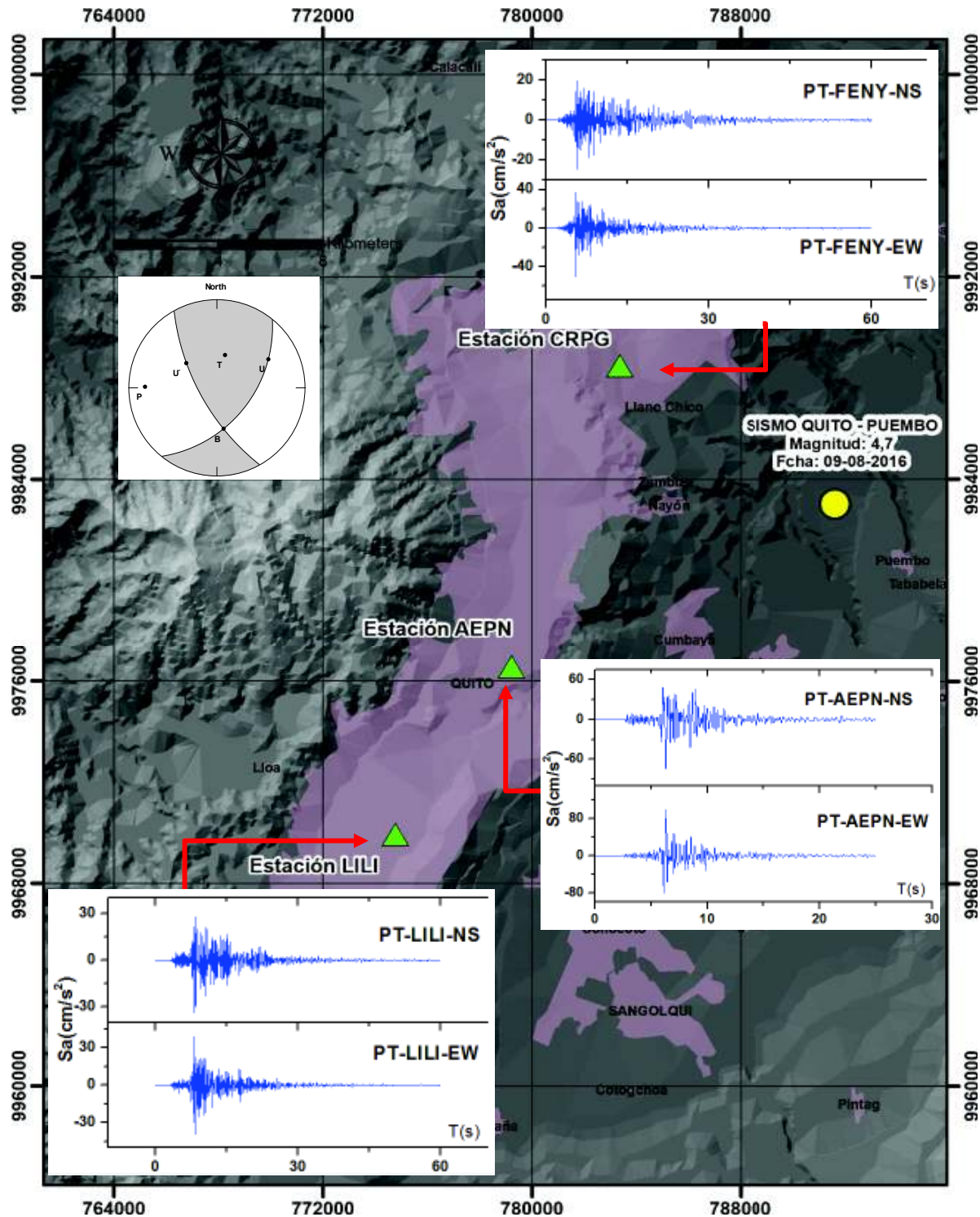
**FIGURA 2.19** Mecanismo focal sismo Puenbo 2016/09/05.



FUENTE: SWIFT Centroid Moment Tensor Solution.

En la figura 2.19 representa la ubicación y el mecanismo focal inverso.

**FIGURA 2.20** Sismo de Puembo-Tababela 9 septiembre 2016, registrados en las estaciones.



ELABORADO: Fernando Cañizares

En la figura 2.20 muestra las estaciones LILI, CRPG y AEPN. con sus respectivos registros sísmicos, así como el epicentro del evento y el mecanismo focal.

## CÁLCULO DEL ÁREA DE RUPTURA SISMO DEL 4 SEPTIEMBRE DEL 2016

i) *Ancho de ruptura sub-superficial (RLD)*

$M = a + b * \log(RLD)$  Ecuación válida para fallas inversas,

$$\log(RLD) = a + b * M$$

Donde:

RLD=Sub-Surface rupture length (km)

$$a=-2.42$$

$$b=0.58$$

M=4.7 (Sismo Puenbo-Tababela).

$$\log(RLD) = -2.42 + 0.58 * (4.6)$$

$$\log(RLD) = 0.306$$

$$\mathbf{RLD=1.77km.}$$

ii) *Ancho medio del plano de falla medido respecto al ángulo Dip (RW)*

$M = a + b * \log(RW)$  Ecuación válida para fallas inversas,

$$\log(RW) = a + b * M \quad \text{Rango 4.8-7.6}$$

Donde:

RW= Downdip rupture width (km)

$$a=-1.61$$

$$b=0.41$$

M=4.7 (Sismo Puenbo).

$$\log(RW) = -1.61 + 0.41 * (4.6)$$

$$\log(RW) = 0.307$$

$$\mathbf{RW=1.9 km.}$$

**TABLA 2.16** Resumen de los cálculos de la longitud y área de la falla

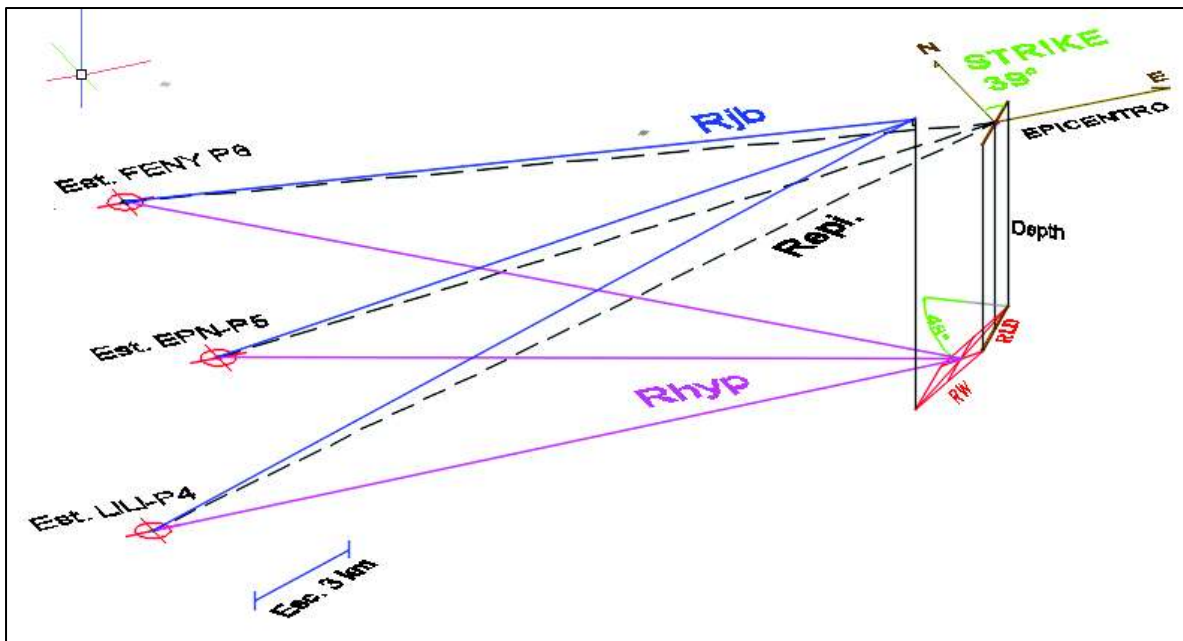
RLD	1.77 km
RW	1.9 km

ELABORADO: Fernando Cañizares

Datos para representación de la falla inversa, se toman de acuerdo a las tablas 2.15 y figura 2.16.

$M_w=4.6$                       Magnitud  
 $D=4.73$                         Profundidad  
 $\Phi=39^\circ$                          Strike  
 $\delta =48^\circ$                          Dip

**FIGURA 2.21** Representación distancias  $R_{jb}$ ,  $R_{Epicentral}$  y  $R_{hypocetral}$ , entre el sismo y las estaciones.



ELABORADO: Fernando Cañizares

La tabla 2.17 resume el cálculo de las distancias requeridas para el cálculo de las ecuaciones de atenuación. Desde las estaciones instaladas al epicentro.

**TABLA 2.17** Ubicación y distancia epicentral del sismo (Puembo-Tababela)

Est.	Lat.	Long.	z	$R_{epi.}$ (Km)	$R_{jb.}$ (Km)	$R_{hyp}$ (Km).	PGA NS(g)	PGA EW (g)
LILI	S 0° 16'	O 78° 31'	2866	25.7	24.26	26.16	0.039	0.028
AEPN	S 0° 12'	O 78° 29'	2813	19.52	17.85	19.97	0.05	0.1
FENY	S 0° 8'	O 78° 29'	2799	18.32	16.60	18.7	0.019	0.037

FUENTE: IGEPN

ELABORADO: Fernando Cañizares

## 2.7. ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE PARA LA CIUDAD DE QUITO VS30.

Un parámetro importante en la ecuación de atenuación, es la velocidad de onda de corte  $V_{s30}$ , por tanto se toma estudios del Metro de Quito y de la consultora ERN, los cuales fueron recopilados por Quizanga (2015).

**TABLA 2.18** Velocidad de onda de corte  $V_{s30}$ , en suelos Quito

VALORES DE $V_{s30}$ PARA DIFERENTES PUNTOS							
ITEM	NOMBRE	AUTOR	UBICACIÓN	ESTE	NORTE	$V_{s30}$	NEC
2	MSQ11	ERN12	SOLANDA	774129,42	9969786,59	211,39	D
3	MSQ10	ERN12	CHIMBACALLE	776641,90	9972714,06	240,99	D
5	MSQ6	ERN12	LA GASCA	777579,44	9978134,20	344,59	D
6	MSQ4	ERN12	QUITO TENIS	779166,84	9981621,05	299,41	D
7	MSQ3	ERN12	ANDALUCIA	778269,84	9984390,85	269,81	D
9	MSQ1	ERN12	CONDADO	778905,06	9989137,70	241,89	D
8	PM1	PLANMAN	LICEO F. MADRID	777156,65	9974842,50	437,42	C
9	PM2	PLANMAN	ESCUELA SUCRE	777166,85	9975231,72	227,62	D
10	q2	METRO	QUITUMBE	772330,50	9968305,50	280,00	D
11	q4	METRO	MORAN VALVERDE	773182,00	9968919,50	315,00	D
12	q8	METRO	SOLANDA	773073,50	9970170,50	225,00	D
14	q16	METRO	EL CALZADO	774490,00	9972250,50	220,00	D
16	q20	METRO	EL RECREO	776045,50	9973075,50	260,00	D
17	q24	METRO	LA MAGDALENA	775898,00	9974343,50	300,00	D
19	q30	METRO	SAN FRANCISCO	777100,50	9975659,50	315,00	D
23	q41	METRO	LA ALAMEDA	778193,00	9977027,00	315,00	D
24	q45	METRO	U CENTRAL	778331,50	9978873,50	320,00	D
25	q52	METRO	LA PRADERA	780137,00	9979837,50	310,00	D
26	q55	METRO	LA CAROLINA	780651,00	9980530,00	340,00	D
27	q57	METRO	INAQUITO	780245,50	9981217,50	300,00	D
28	q59	METRO	JIPJAPA	780250,00	9981607,00	285,00	D
29	q62	METRO	EL LABRADOR	779751,00	9983577,50	275,00	D
30	PM3	PLANMAN	C. BENALCAZAR	780514,65	9979795,19	577,75	C
29	PM4	PLANMAN	ESCUELA ESPEJO	778053,17	9976817,46	398,12	C
29	E1	ESPE	P. METROPOLITANO	783616,62	9979865,47	466,27	C

FUENTE: Quizanga (2015).

Clasificación de los perfiles de suelo, de acuerdo con los diferentes códigos y relación con la norma NEC15.  $V_{s30}$  (Velocidad de onda de corte a los treinta metros en m/s).

**TABLA 2.19** Clasificación del tipo de suelo  $V_{s30}$ .

PERFIL DE SUELO	TIPO	NEC15	ASCE 7	EURO CODIGO	NEHRP
Roca Dura	A	$V_s \geq 1500$ m/s	$>1500$ m/s		$>1500$ m/s
Roca	B	$1500$ m/s $> V_s > 760$ m/s	$1500$ m/s $> V_s > 760$ m/s	A $> 800$ m/s	$1500 \geq V_s > 760$ m/s
Suelo muy denso y roca	C	$760 > V_s > 360$	$760 > V_s > 360$	B $800 \geq V_s > 360$	$760 \geq V_s > 360$ m/s
Suelo rígido	D	$360 > V_s > 180$ m/s	$360 > V_s > 180$ m/s	C $360 \geq V_s > 180$	$360 \geq V_s > 180$ m/s
Suelo suave	E	$V_s < 180$ m/s	$V_s < 180$ m/s	D $V_s < 180$ m/s	$V_s < 180$ m/s
Suelos flexibles.	F1, F2 y	Arenas, Arcillas Turbas	Arenas, Arcillas Turbas		

FUENTE: NEC15, ASCE/SEI 7

## 2.8. SISMOS LOCALES REGISTRADOS POR SUBDUCCIÓN

Para la verificación de sismos por subducción de toma el sismo de Pedernales del 16 de abril del 2016, así como las réplicas ocurridas en los sectores de Muisne y Cojimíes el 18 de mayo 2016, registradas por la RED RENAC, mostrados en la Tabla 2.20.

**TABLA 2.20** Sismos locales registrados por origen de subducción

#	SISMO	AÑO	ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	Mw	Dist Epicent. (km)	Suelo-Est.	Tipo de Falla	Depth
1	PEDERNALES	16-abr-16	RENAC-EPNL	-0.21199	-7,849,165	2813	7.8	174	C	SUB DUC	28
2			RENAC-PRAM	-0.14490	-7,849,470	2840	7.8	171	C		
1	MUISNE (2:57)	18-may-16	RENAC-EPNL	-0.21199	-7,849,165	2813	6.6	190.3	C	SUB DUC	17
2			RENAC-PRAM	-0.14490	-7,849,470	2840	6.6	186.5	C		
1	COJIMIES (11:47)	18-may-16	RENAC-EPNL	-0.21199	-7,849,165	2813	6.8	191.1	C	SUB DUC	15
2			RENAC-PRAM	-0.14490	-7,849,470	2840	6.8	188.33	C		

ELABORADO: Fernando Cañizares.

El tipo de suelo (C o D) corresponde, al sitio donde están ubicadas las estaciones en la ciudad de Quito.

## 2.9. SELECCIÓN DE REGISTROS INTERNACIONALES

Para la selección de las señales internacionales se tomó las bases de datos siguientes: Pacific Earthquake Engineering Center PEER Ground Motion Database USA, Center for Engineering Strong Motion Data USA, Italian Accelerometric Archive de país de Italia and Institute of Engineering Seismology Earthquake Engineering (Grecia), de estos repositorios se seleccionarán registros compatibles geológicamente con las condiciones locales como son: las fallas corticales de tipo inverso, distancia entre la falla con el sitio de estudio y el rango de magnitudes esperadas en la ciudad de Quito. Con esta información se realiza un procesamiento de las señales.

Los sismos seleccionados deben cumplir la condición de compatibilidad, como es el tipo de falla cortical inverso, rango de magnitud entre: 4 y 6, rango de la distancia epicentral entre 10-30Km y tipo de suelo C o D.

**TABLA 2.21** Sismos internacionales seleccionados 1/2

#	SISMO	Estación	Año	Mw	Rjb (Km)	Rrup (Km)	Tipo Suelo	Dt
1	San Fernando	Santa Felicita D.	1971	6.6	24.7	24.87	C	0.02
2	San Fernando	Lake Hunghes #9	1971	6.6	17.2	22.57	C	0.02
3	San Fernando	Lake Hunghes #12	1971	6.6	13.9	19.3	C	0.02
4	Friuli	Codoprio 1st	1976	6.4	30.8	30.9	C	0.005
5	Friuli	Tolmezzo Centrale	1976	6.4	10.2	12.1	C	0.005
6	Coalinga	Sulphur Barths_Tem	1983	5.7	9.7	12.1	C	0.005
7	Loma Prieta	San Jose-Sant. Ter	1989	6.9	14.1	14.7	C	0.02
8	Loma Prieta	Santa Cruz_UCSlab.	1989	6.9	12.4	18.4	C	0.02
9	Northridge	Glendale_Cypres Ave	1994	6.7	28.9	30.9	C	0.02
10	Northridge	Glendale – Las Palmas	1994	6.7	21.6	22.21	C	0.02

ELABORADO: Fernando Cañizares

**TABLA 2.22** Sismos internacionales seleccionados 2/2

#	Distancia Epicent. (km)	Distancia Hipocent. (Km)	Depth (Km)	Vs30 (cm/s)	PGA1 (cm/s <sup>2</sup> )	PGA2 (cm/s <sup>2</sup> )	Estaci.	Falla
1	26.2	33.7	13	389	213	198.3	CSMIP	Inversa
2	23	28.1	13	670.8	119.3	109.5	CSMP	Inversa
3	19.8	24.6	13	602.1	346.2	277.9	CSMP	Inversa
4	41.6	-	5.7	445	88.78	61.5	ITAC	Inversa
5	27.2	-	5.7	458	339.0	309.0	ITACA	Inversa
6	-	14.7	8.4	617.43	173.7	159.7	PEER	Inversa
7	11.9	27.3	17.5	671.7	223.4	269.3	PEER	Inversa
8	18.8	24.2	17.5	713.5	433.1	401.5	CSMIP	Inversa
9	29.9	32.19	14.6	366.71	150.8	204.4	CSMIP	Inversa
10	22.6	34.3	14.6	371.07	388.8	212.1	CSMIP	Inversa

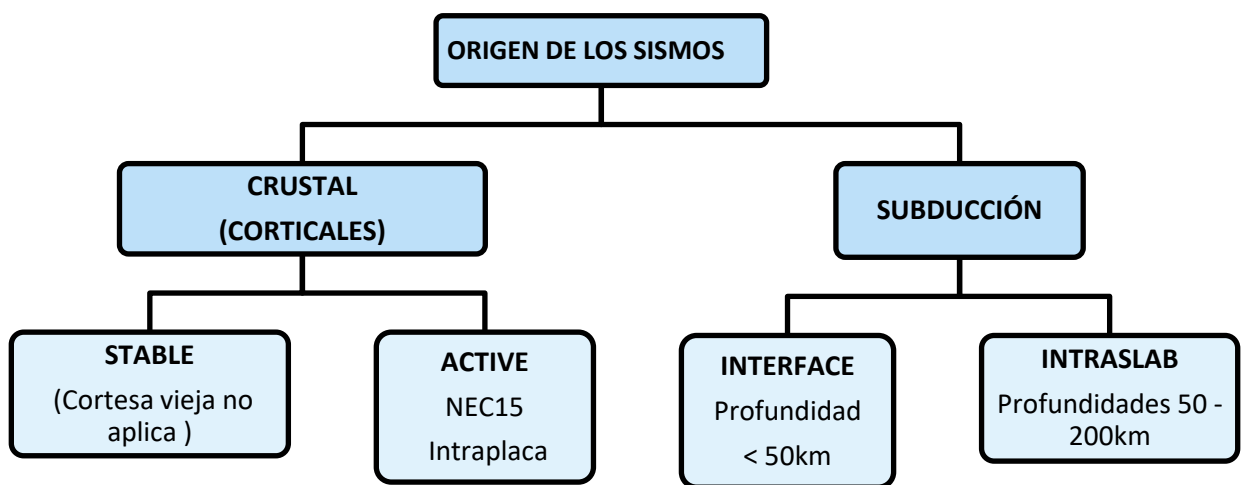
ELABORADO: Fernando Cañizares

En la Tabla 2.22, se muestra los sismos seleccionados de las bases de datos internacionales, los cuales cuentan con todos los parámetros necesarios para el cálculo de las ecuaciones de atenuación GMPEs, principalmente la distancia a la fuente y velocidad de onda de corte Vs30.



## 2.10. ORIGEN DE LOS SISMOS Y TIPOS DE FALLAS PREVISTAS

Para organizar el presente trabajo, se clasifica los sismos por su origen sismogénico, entre sismos por subducción y corticales. Para el caso de la ciudad de Quito y referente a su tectónica, los sismos son de origen cortical y tipo active intraplaca, también está afectada por sismos provenientes de la subducción, pero su intensidad histórica registrada es moderada (Tabla 2.1).



FUENTE: Singaicho 2015  
ELABORADO: Fernando Cañizares

## CAPÍTULO 3. PROCESAMIENTO DE LOS ACELEROGRAMAS

### 3.1. MEDIDAS DEL MOVIMIENTO CON PROPÓSITOS DE INGENIERÍA

Una manera práctica de definir un movimiento fuerte, es a partir de un acelerograma, esta gráfica contiene la información necesaria asociada al movimiento del suelo, como es: la amplitud máxima, el contenido de frecuencia y la duración.

Este registro puede ser convertido a espectro de velocidad o desplazamiento, mediante el método numérico de Newmark.

Los espectros se utilizan en el diseño estructural, como es el análisis modal espectral o métodos de respuesta de historia en el tiempo.

**TABLA 3.1** Parámetros medibles del movimiento fuerte

PARÁMETRO DE MOVIMIENTO		CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO		
		Amplitud	Frecuencia	Duración
Aceleración, Velocidad o Desplazamiento	PGA, PGV, PGD	x		
Espectro de Fourier	EAF	x	x	x
Espectro de Respuesta	ER	x	x	
Duración	$T_d$ o $\Delta t$			x

ELABORADO: Fernando Cañizares

FUENTE: Bernal et al. (2015)

Los parámetros básicos necesarios para describir y analizar matemáticamente el movimiento del terreno con propósitos ingenieriles son la aceleración, velocidad y el desplazamiento pico del terreno (PGA, PGV y PGD). Estas medidas pueden representarse gráficamente mediante espectros de respuesta en función del periodo o del contenido de frecuencias (Tabla 3.1).

- **PGA (PEAK GROUND ACCELERATION)**

Es el valor pico del movimiento del terreno en términos de aceleraciones, para propósitos ingenieriles es relacionado con la aceleración que ejerce el suelo sobre la estructura, principalmente para estructuras de baja altura.

$$PGA = \max|a(t)|$$

- **PGV (PEAK GROUND VELOCITY)**

Es el valor pico del movimiento del terreno en términos de velocidad, con propósitos de ingeniería, es correlacionado con estudios de obras subterráneas, puentes, edificios de altura y obras conducción de gran diámetro, requiere del tratamiento de la señal de la aceleración previamente.

$$PGV = \max|v(t)|$$

- **PGD (PEAK GROUND DISPLACEMENT)**

Es el valor pico del movimiento del terreno en términos de desplazamientos, gobernado por las bajas frecuencias del registro, para propósitos de ingeniería es un buen indicador de daños en las edificaciones, así como para el diseño de estructuras por el método de basados en desplazamientos (DBD). Apropiado para estructuras con altos periodos, como puentes de gran longitud y edificios de gran altura.

$$PGD = \max|d(t)|$$

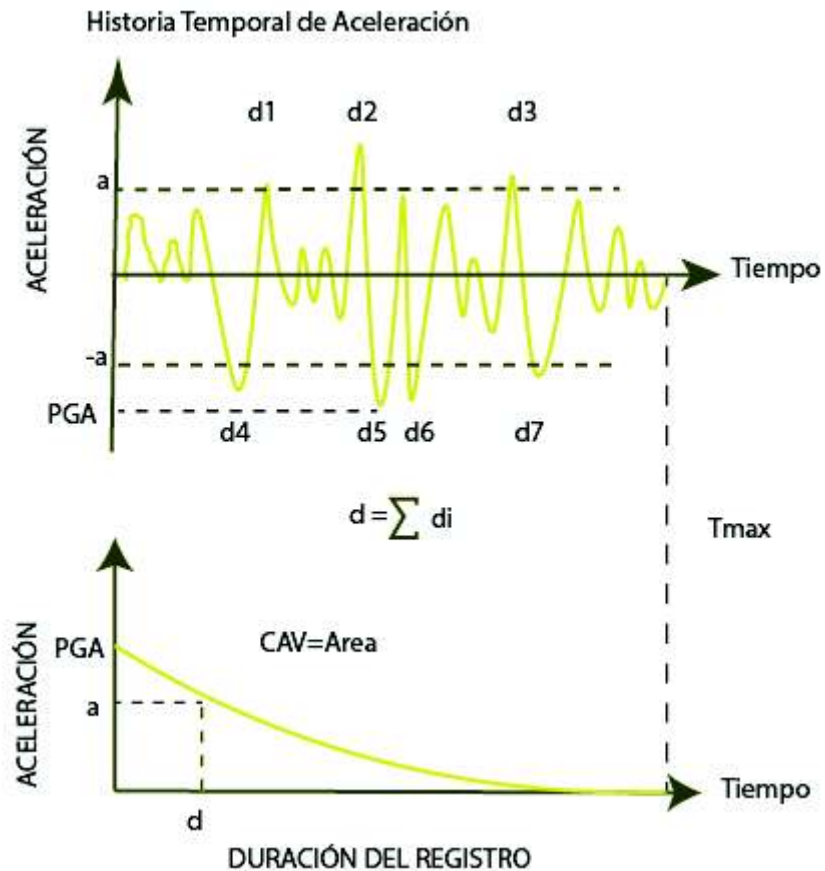
- **VELOCIDAD MÁXIMA ACUMULADA (CAV)**

El área bajo el acelerograma, está definida:

$$CAV = \int_0^{T_d} |a(t)| dt$$

Esta medida está correlacionada con el potencial de daño estructural, donde un  $CAV=0,3g$  correspondería a una intensidad de 6 en la escala Mm (Benito 1993).

**FIGURA 3.1.** Esquema de cálculo velocidad de onda acumulada CAV



FUENTE: Benjamín 1998

ELABORADO: Fernando cañizares

- **ACELERACIÓN RMS (ROOT MEAN SQUARE)**

Se define como:

$$a_{rms} = \left( \frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} [a(t)]^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

Td=Duración del registro en segundos (s)

Depende de la duración del registro, útil para evaluar la respuesta de sistemas de pocos grados de libertad y es una medida comparable con el PGA.

- **INTENSIDAD DE ARIAS**

Se define como la integral de la aceleración elevada al cuadrado.

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^t [a(t)]^2 dt$$

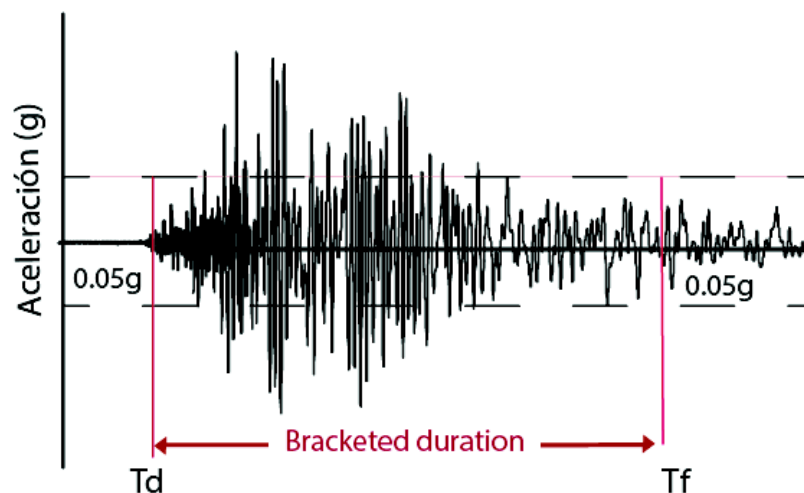
Propuesta por el ingeniero Chileno Arturo Arias en 1970. Llamada también intensidad sísmica instrumental y representada en unidades de velocidad. Se calcula con la sumatoria de energías totales por unidades de masa.

### 3.1.1. MEDIDAS DE DURACIÓN INGENIERILES

- **BRACKETED DURATION**

Se define como el tiempo transcurrido entre la primera y la última incursión, en un nivel específico de aceleración, usualmente de 5% del PGA.

**FIGURA 3.2** Esquema representativo tiempo de duración bracketed a 0.05g



ELABORADO: Fernando Cañizares

Donde:

**Td**= Es el tiempo inicial, donde por primera vez excede un valor referencial de aceleración (5% de PGA)

**T<sub>f</sub>**= Es el tiempo final, donde por última vez el valor referencial de la aceleración (5% del PGA) es excedido.

- **DURACIÓN SIGNIFICATIVA**

Se define como el intervalo de tiempo transcurrido entre el 5% y 95% de la Intensidad de Arias acumulado.

- **INTENSIDAD CARACTERISTICA**

Se define como:

$$I_c = a_{rms}^{1.5} \cdot T_d^{0.5}$$

Dónde:

$a_{rms}$  = Aceleración rms [g]

$T_d$ =Duración del registro [s]

Esta linealmente relacionada al índice del daño estructural, debido a las máximas deformaciones y a la energía histerética absorbida por un sistema.

### 3.2. ESPECTRO DE FOURIER

Si una función de tiempo  $f(t)$  es periódica con respecto a un periodo dado  $T(s)$  o se repite con una frecuencia  $f=2\pi/T$ , entonces se puede expresar dicha función como una serie infinita de funciones seno y coseno(Villaverde 2012).

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{m=1}^{\alpha} (a_m \cos \omega_m t + b_m \sen \omega_m t)$$

$$\omega_m = m \omega_0$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt$$

$$a_m = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos \omega_m t dt$$

$$b_m = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sen \omega_m t dt$$

El espectro de Fourier es un parámetro que proporciona información acerca del contenido de frecuencias del acelerograma, de modo que para cada periodo de oscilación representa la amplitud máxima que le corresponde.

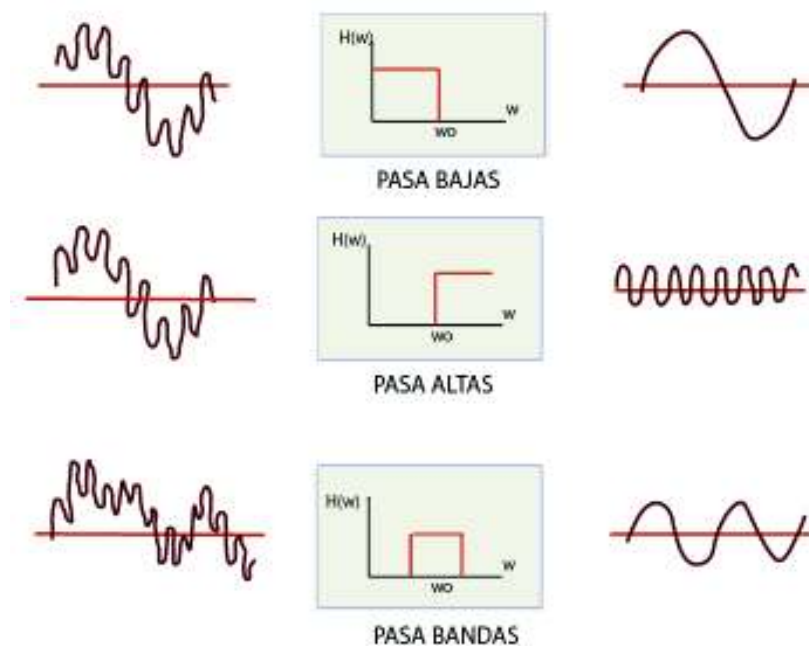
En el gráfico del espectro de Fourier, podemos deducir cuales son los periodos más importantes del terreno, identificando los picos de la traza de amplitud, así como su valor máximo predominante del registro

### 3.2.1. FILTRADO DE SEÑALES

El Filtrado de las señales se realiza en el dominio de las frecuencias, el cual consiste en dejar pasar ciertas frecuencias útiles, en el caso de la ingeniería sísmica, el intervalo apropiado de retención es:  $[0.1 - 25]$  Hz. Es decir, en periodos entre  $[0.04 - 10]$  segundos y el resto de frecuencias es desechado por el filtro.

En la figura 3.3, muestra los diferentes tipos de filtros en función del intervalo de frecuencias requeridas, en el caso de las señales para uso ingenieril se utiliza el filtro pasa bandas.

**FIGURA 3.3** Comportamiento de los filtros ideales, pasa baja, alta y banda.



Se puede clasificar de acuerdo al intervalo de interés de la frecuencia

- Pasa-bajas (Low-pass)
- Pasa-altas (High-pass)
- Pasa-bandas (Band-pass)
- Corta-bandas (Band-stop).

Para el caso de la ingeniería sísmica estructural, utilizamos el fitro pasa bandas con un tipo Butterworth.

### **3.2.2.CORRECCIÓN SOBRE LOS ACELEROGRAMAS**

#### **I) CORRECCIÓN INSTRUMENTAL**

Se requiere información del fabricante para la correcta calibración del equipo y un adecuado mantenimiento, esta graduación es realizada por técnicos especializados y sismólogos.

#### **II) CORRECCIÓN DE LA LÍNEA BASE O CORRECCIÓN DE CEROS**

Por lo general los registros se encuentran desplazados respecto a la línea base, esto puede ser debido a factores como fallas en la nivelación o calibración del instrumento, el cual origina una deriva de los datos respecto a la línea base teórica. Inicialmente esto puede ser inapreciable, pero genera errores de almacenamiento de acumulación de áreas, al momento de la integración numérica de la velocidad inicial.



## CAPÍTULO 4. ECUACIONES DE ATENUACIÓN GMPES

### 4.1. INTRODUCCIÓN

En la práctica, para encontrar el valor de la aceleración en el basamento rocoso, es común el uso de ecuaciones de atenuación generales desarrolladas por expertos a partir del registro de eventos sísmicos reales. Dichas ecuaciones permiten conocer la intensidad sísmica (aceleración, velocidad, desplazamiento, etc.) en un sitio, a partir de la distancia a la cual se genera el sismo y del valor de la magnitud del mismo (Restrepo 2013).

De forma general, el valor del logaritmo natural de la aceleración en roca.

$\ln(a)$  puede expresarse mediante (1):

$$\ln a = \overline{\ln(a)} + \varepsilon N(0, \sigma_{\ln(a)}) \quad (1)$$

En donde,  $\overline{\ln(a)}$  representa la media del logaritmo natural de la aceleración en roca;  $N(0, \sigma_{\ln(a)})$ , es una variable aleatoria para considerar la incertidumbre en la estimación de la intensidad. La distribución de probabilidad de la componente aleatoria se ajusta a un modelo probabilista de tipo normal de media igual a cero y truncado a un valor de  $\varepsilon$  de desviación estándar,  $\sigma_{\ln a}$

### 4.2. PARÁMETROS DE UNA GMPES

Estos modelos de predicción, usualmente están indicados en función de la magnitud, distancia a la falla, forma de la falla y desviación estándar.

$$Y = f(M, R, P, \sigma) \quad (2)$$

Dónde:

- **Y** Parámetro del movimiento fuerte (PGA, PGD o PGV).
- **M** Magnitud del sismo.
- **R** Distancia a la falla o fuente sismogénica ( $R_{jb}, R_{hyp}, R_{rup}$ )
- **P** Forma de la falla (Normal, Inversa etc.)
- **$\sigma$**  Factor de desviación estándar.

### 4.3. FORMA TÍPICA DE LA ECUACIÓN GMPE

Combinando los parámetros descritos en la sección anterior, la forma típica de la ecuación de predicción del movimiento fuerte (Ambazhagan 2012).

$$\ln Y = C_1 + C_2M + C_3M^{C_4} + C_5 \ln[R + C_6 \exp(C_7M)] + C_8R + f(\text{fuente}) + f(\text{sitio}) + \sigma$$

Donde cada término de la ecuación representa:

- $\ln(Y)$  Valores pico del movimiento fuerte.
- $C_2M + C_3M^{C_4}$  Factor referente a la magnitud del sismo.
- $C_5 \ln[R + C_6 \exp(C_7M)] + C_8R$  Factor referente a la distancia.
- $f(\text{fuente}) + f(\text{sitio})$  Influencia del tipo de fuente y sitio.
- $C_1, C_2, \dots, C_n$  Constantes de regresión.
- $\sigma$  Desviación estándar.

### 4.4. RECOMENDACIONES DE LA NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (NEC 15) PARA LAS ECUACIONES DE ATENUACIÓN (GMPES).

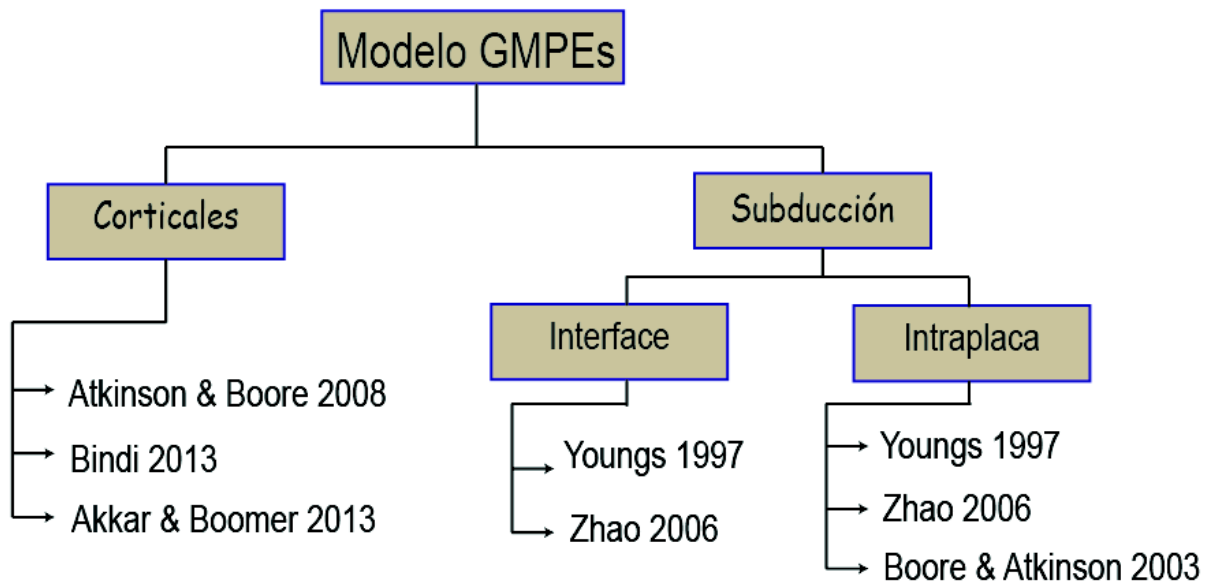
La norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 15) en su capítulo 10, en la sección: 10.1.1. Fundamentos de mapa y zonificación recomienda que para el estudio de peligro sísmico se debe considerar:

*“En el Ecuador el origen de los sismos provienen de dos fuentes: a) Por subducción de la placa de Nazca, que induce a la placa Sudamericana, b) Por la presencia de fallas locales corticales. Ejemplo sistema de Fallas de Quito.*

*La utilización de las ecuaciones de predicción, validas por el Global Earthquake Model, para fuentes intraplaca: Boore y Atkinson (2008), Akkar y Boomer (2010), Kano et al. (2006), Bindi (2009), para fuentes de subducción: Youngs (1997), Atkinson y Boore (2003), Kanno (2006); McVerry et al. (2006); Lin Lee 2008 y Zhao et al. (2006).”*

#### 4.5. CLASIFICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE ATENUACIÓN DE ACUERDO AL TIPO DE FALLA GEOLÓGICA

Clasificación de los modelos de atenuación en función de tipo de fallas.



FUENTE: USGS, GEM, Proyecto Sara e IGEPN

ELABORADO: Fernando Cañizares

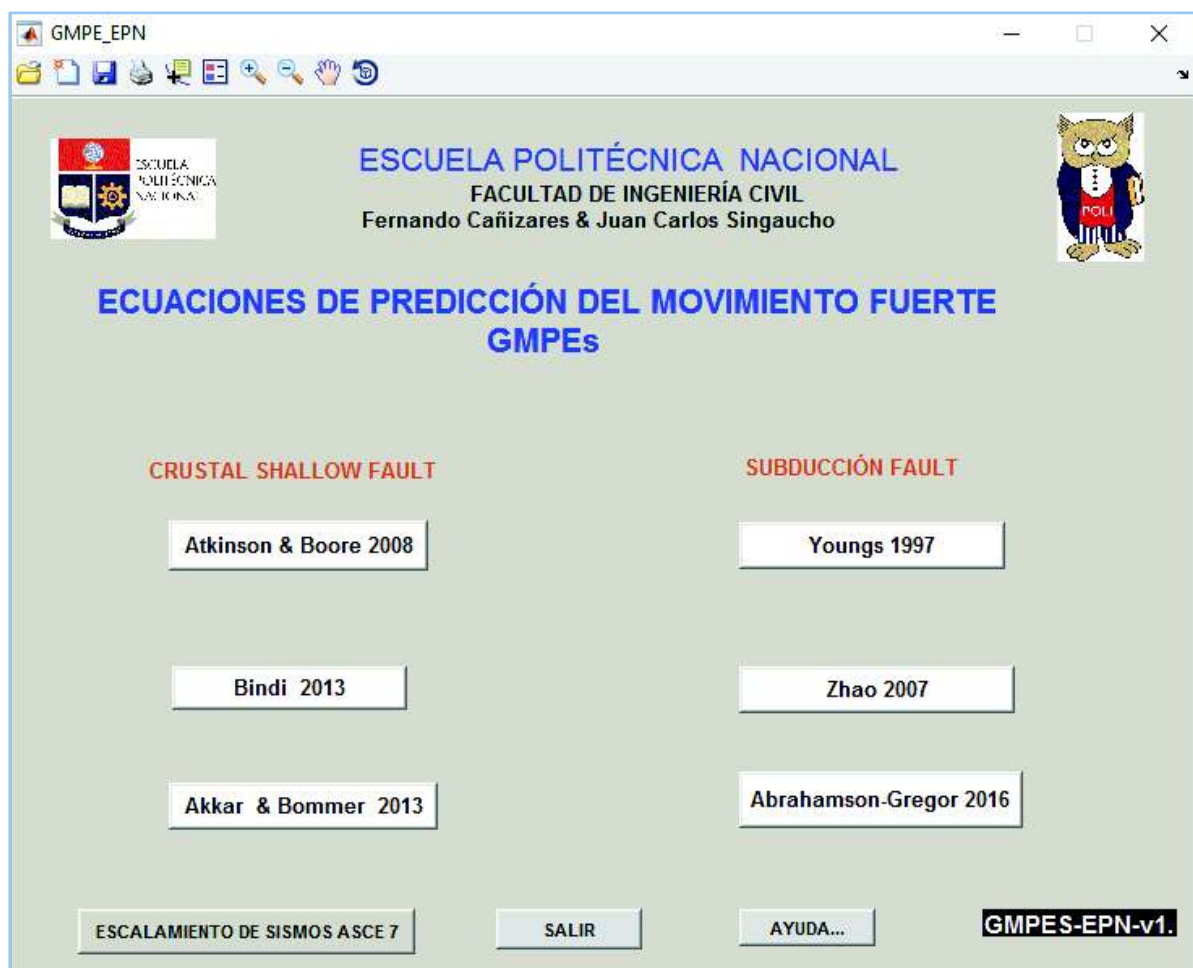
En la ciudad de Quito se han registrado eventos provenientes de fallas locales corticales, por tanto se enfatiza en los modelos de atenuación cortical como son: Atkinson & Boore 2008, Bindi 2013 y Akkar & Boomer 2013.

#### 4.6. PROGRAMA GMPEs-EPN. V1. PARA SELECCIÓN DE LAS ECUACIONES DE ATENUACIÓN PROPUESTAS

El programa denominado “GMPEs\_EPN.v1”, compila los modelos de predicción del movimiento fuerte, según las ecuaciones preseleccionadas y aplicables a los tipos de falla y condiciones de sitio.

Las ecuaciones propuestas se basan en una preselección, que depende del tipo de falla producida, el rango de magnitud utilizable y a las condiciones de sitio. En el Anexo A5, se presenta un resumen con las características típicas de cada ecuación propuesta y desarrolladas en el programa Matlab Guide, como se muestra en la Figura 4.1.

**FIGURA 4.1** Programa para la selección de ecuaciones de atenuación GMPEs-EPN.v1.



ELABORADO: Fernando Cañizares.

## 4.7. PROGRAMA PARA SISMOS CORTICALES

### 4.7.1. MODELO DE ATKINSON Y BOORE 2008

La ecuación fue desarrollada mediante regresiones estadísticas de los registros tomados de la base de datos “Pacific Earthquake Engineering Research Center’s Next Generation Attenuation”. (PEER-NGA–2008)

Este modelo predice el movimiento fuerte del terreno (GMPEs), está en función de la magnitud de momento ( $M_w$  entre 5 -8), la distancia horizontal a la proyección del plano de falla denominado distancia Joyne-Boore ( $R_{JB}$  menores a 200km), rango de la velocidad de onda de corte a los 30m de profundidad ( $V_{s30}=180-1300\text{m/s}$ ), y el tipo de fallamiento. La ecuación determina la aceleración (PGA) y velocidad (PGV) pico del terreno, así como el espectro de respuesta (PSA, al 5% amortiguamiento pseudo-aceleración), para periodos comprendidos entre 0,01s y 10s.

$$\ln(Y) = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \epsilon\sigma_T$$

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}$$

Término en función distancia y magnitud.

$$F_D(R_{JB}, M) = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \ln\left(\frac{R}{R_{ref}}\right) + c_3(R - R_{ref}),$$

Donde:

$$R = \sqrt{R_{JB}^2 + h^2}$$

$c_1, c_2, c_3, M_{ref}, R_{ref},$  y  $h =$  coeficientes a ser determinados en el análisis.

La escala de magnitud es dada por:

a)  $M \leq M_h$  ( $M_h = 6.75$  Magnitud de referencia constante)

$$F_M(M) = e_1U + e_2SS + e_3NS + e_5(M - M_h) + e_6(M - M_h)^2$$

b)  $M > M_h$

$$F_M(M) = e_1U + e_2SS + e_3NS + e_4RS + e_7(M - M_h)$$

Donde:  $U, SS, NS$  y  $RS$  Son variables en función del tipo de falla

$U =$  Desconocido.

$SS =$  Strike Slip

*NS = Normal – Slip*

*RS = Reverse – Slip*

La función de amplificación de sitio es:

$$F_S = F_{LIN} + F_{NL}$$

Donde:

$F_{LIN}$  = Factor de amplificación lineal

$$F_{LIN} = b_{lin} \ln \left( \frac{V_{s30}}{V_{ref}} \right)$$

Donde:  $b_{lin}$  = Coeficiente que depende del periodo

$V_{ref}$  = Velocidad referencial = 760cm/s

$F_{NL}$  = Factor de amplificación no lineal

El término no lineal está dado por:

a)  $pga_{4nl} \leq a_1$ :

$$F_{NL} = b_{nl} \ln(pga_{low}/0.1)$$

b)  $a_1 < pga_{4nl} \leq a_2$ :

$$F_{NL} = b_{nl} \ln \left( \frac{pga_{low}}{0.1} \right) + c \left[ \ln \left( \frac{pga_{4nl}}{a_1} \right) \right]^2 + d \left[ \ln \left( \frac{pga_{4nl}}{a_1} \right) \right]^3$$

c)  $a_2 < pga_{4nl}$ :

$$F_{NL} = b_{nl} \ln(pga_{4nl}/0.1)$$

Donde  $a_1 = 0.03g$ ;  $a_2 = 0.09g$  y  $pga_{low} = 0.06g$

$pga_{4nl}$  = es la predicción del PGA en g, para  $V_{ref} = 760m/s$

Los coeficientes  $c$  y  $d$  están dados por:

$$c = (3\Delta y - b_{nl}\Delta x)/\Delta x^2$$

$$d = -(2\Delta y - b_{nl}\Delta x)/\Delta x^3$$

Dónde:

$$\Delta_x = \ln \left( \frac{a_2}{a_1} \right) ; \Delta y = b_{nl} \ln \left( \frac{a_2}{pga_{low}} \right)$$

El término  $b_{nl}$  es una función del periodo y  $V_{s30}$

a)  $V_{s30} \leq V_1$ :

$$b_{nl} = b_1$$

$$b) V_1 < V_{s30} < V_2$$

$$b_{nl} = (b_1 - b_2) \ln\left(\frac{V_{s30}}{V_2}\right) / \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) + b_2$$

$$c) V_2 < V_{s30} < V_{ref}$$

$$b_{nl} = b_2 \ln\left(\frac{V_{s30}}{V_{ref}}\right) / \ln\left(\frac{V_2}{V_{ref}}\right)$$

$$d) V_{ref} < V_{s30}$$

$$b_{nl} = 0.0$$

Donde  $V_1 = 180\text{m/s}$ ,  $V_2 = 300\text{m/s}$ ,  $b_1, b_2$  factores que dependen del periodo  
Este modelo no es recomendable para suelos duros con velocidad de onda de corte  $V_{s30} > 1500\text{m/s}$ .

#### 4.7.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

Rango de Magnitud: 5-8 grados.

Distancia aplicable: 0-400km; Distancia  $R_{jb} < 200\text{km}$ .

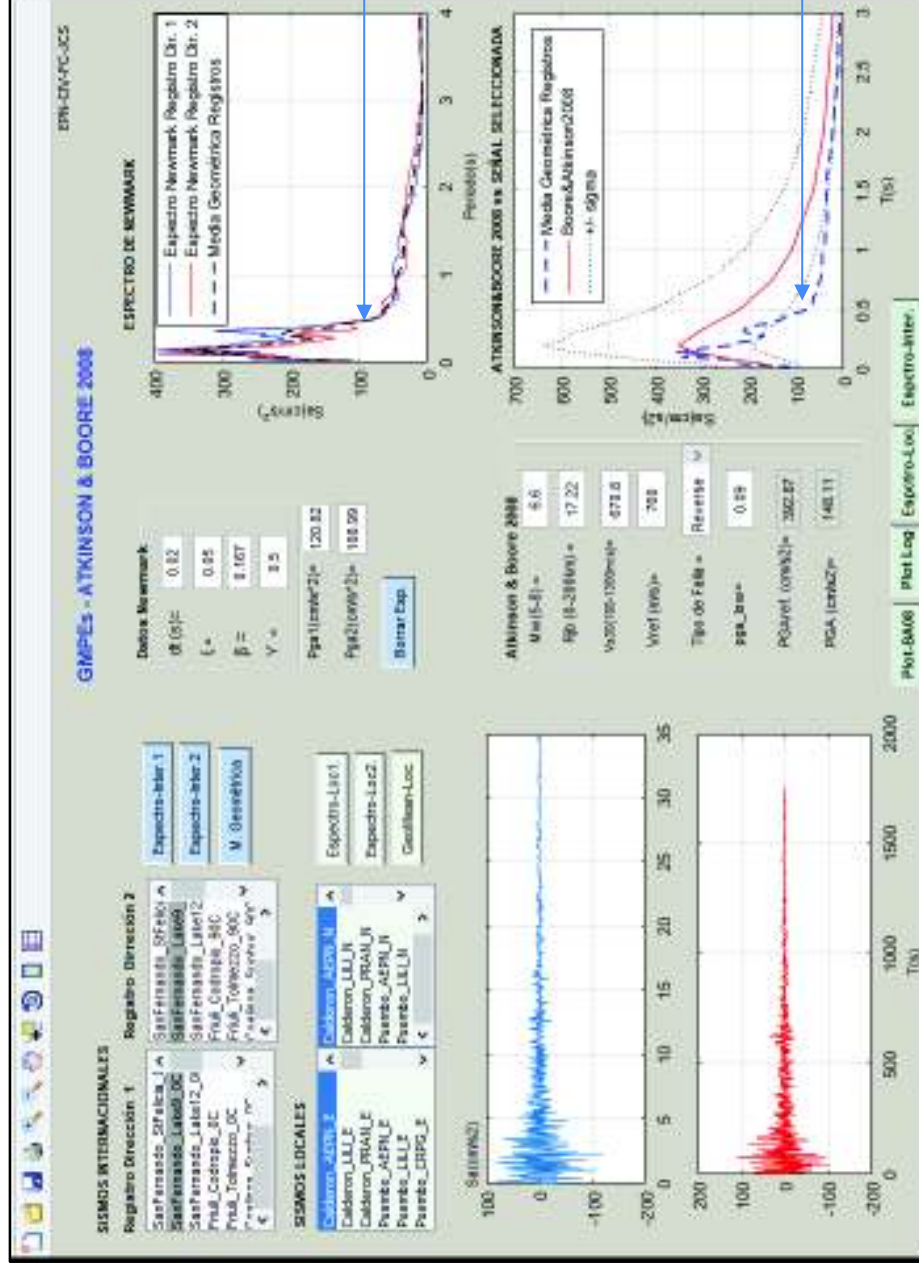
Velocidad de onda de corte a los 30 metros  $V_{s30}$ : entre 180-1300 m/s.

Periodo: 0.001s-10s.

Fallas: Normal, inversa, strike slip y falla desconocida.

Componentes de sismo: Se calcula la media geométrica de las dos componentes de los registros seleccionados.

FIGURA 4.2 Modelo de predicción Atkinson & Boore2008, para fallas corticales.

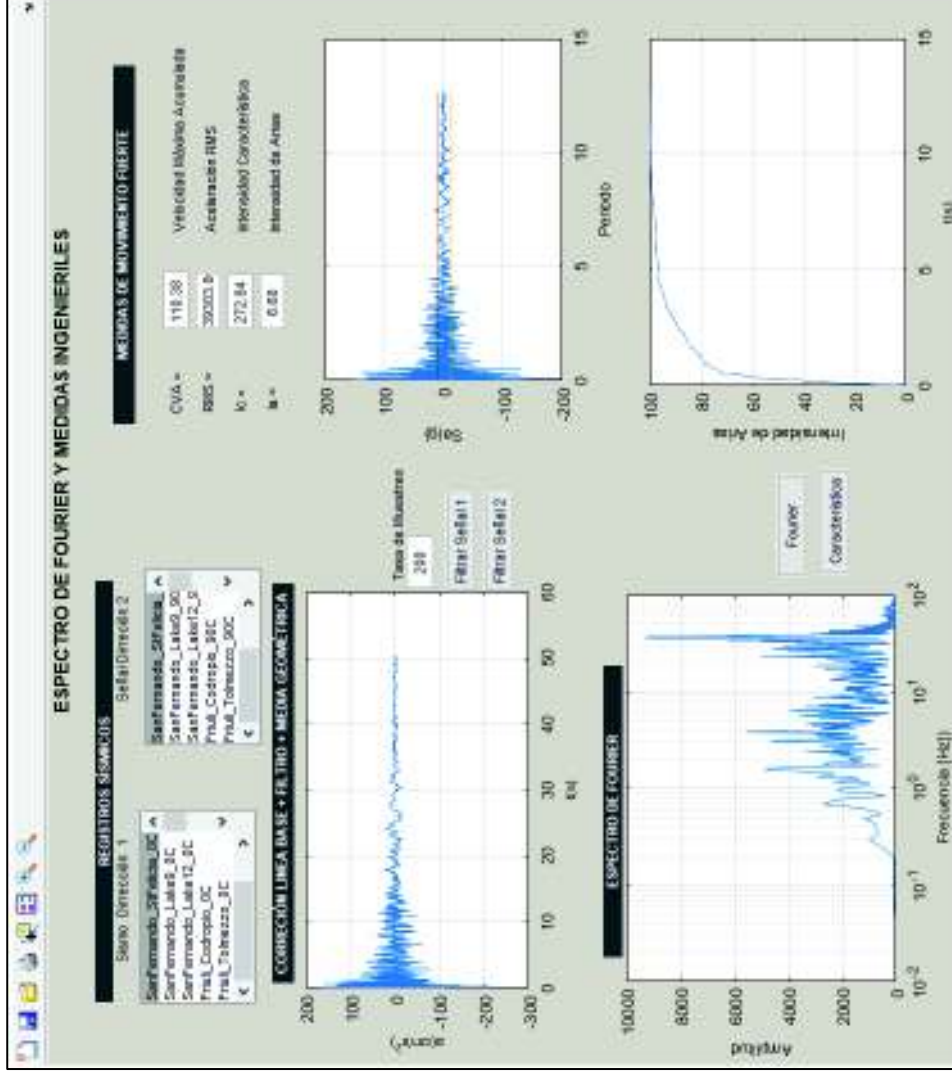


En la figura 4.2, se muestra el desarrollado del programa **GMPE-EPN.V1**, para el modelo de Atkinson & Boore (2008). En la parte superior izquierda compila los sismos locales e internacionales seleccionados (Tablas 2.4 y 2.21). En la parte superior derecha se grafican las respuestas de las dos señales horizontales (*NS* y *EW*) con el método de Newmark, luego se traza la **media geométrica** (Línea Punteada color negro) de las dos componentes. En la parte inferior derecha muestra la gráfica de los espectros de respuesta entre la media geométrica de las señales seleccionadas (Línea punteada azul) y la ecuación de atenuación GMPEs. (Línea continua de color rojo).

ELABORADO: Fernando Cañizares

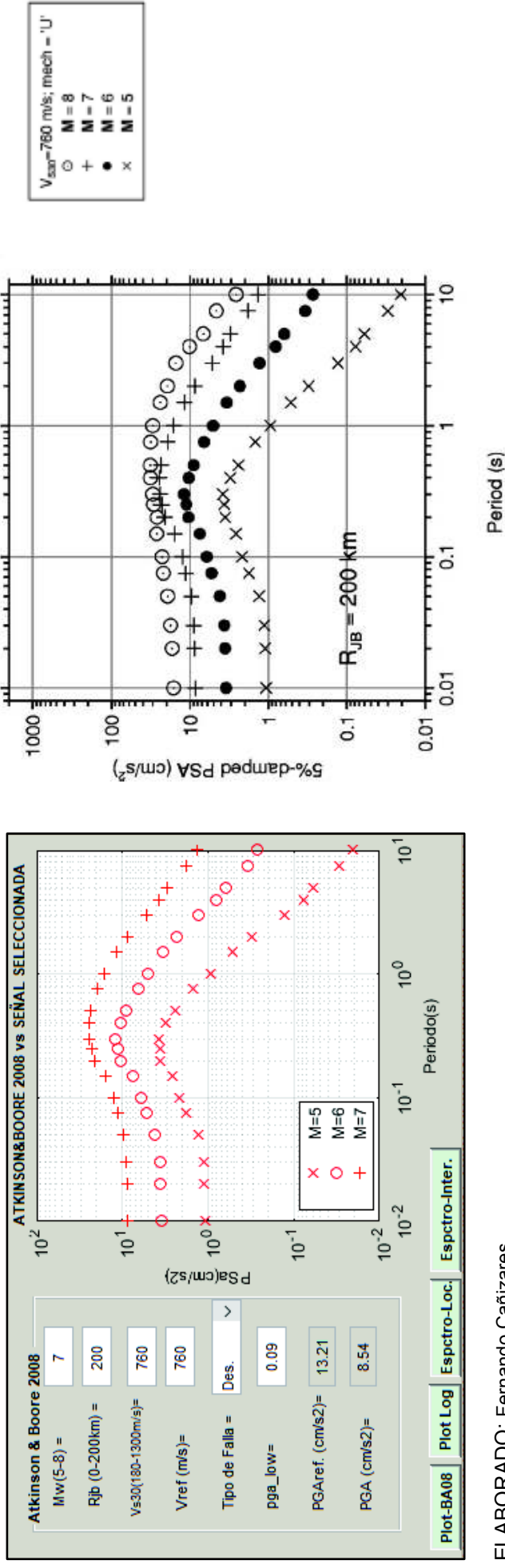


FIGURA 4.3 Cálculo de medidas ingenieriles de los sismos registrados.



ELABORADO: Fernando Cañizares

**FIGURA 4.4** Validación del modelo Atkinson & Boore 2008 (AB08) vs programa GMPEs-EPNV1.



ELABORADO: Fernando Cañizares.

**(a)**

**(b)**

En la figura 4.4, se muestra la validación del programa GMPE-EPN.v1. **(a)**, y la ecuación de atenuación propuesta por Atkinson & Boore (2008) **(b)**. De acuerdo a los siguientes datos: Magnitud  $M_w=5,6$  y  $7$ , distancia  $R_{jb}=200\text{km}$ , velocidad de onda de corte  $V_{s30}=760\text{m/s}$  y tipo de falla desconocida. Se verifica que las tres gráficas de los espectros de aceleración son semejantes.

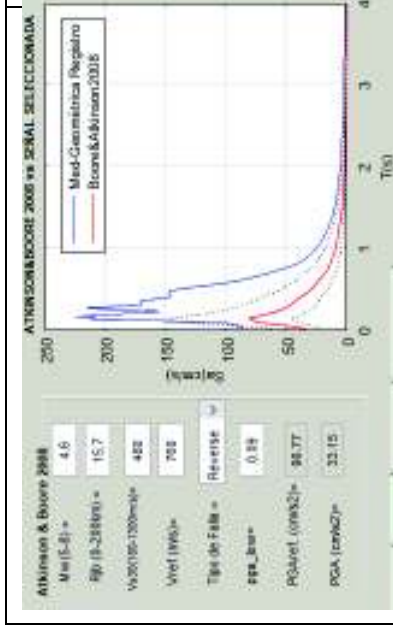
**TABLA 4.1** Espectros de respuesta de sismo internacional seleccionado y el modelo de atenuación **Atkinson & Boore 2008**

<p>Atkinson &amp; Boore 2008  <math>M_w(S-M) = 5.9</math>  <math>R(0-200km) = 17.22</math>  <math>V_{ref}(100-300km/s) = 708</math>  <math>V_{ref}(100) = 708</math>          Tipo de Falla = Reverse  <math>PGA_{base} = 382.87</math>  <math>PGSA (cm/s^2) = 143.11</math></p>	<p>Atkinson &amp; Boore 2008  <math>M_w(S-M) = 6.4</math>  <math>R(0-200km) = 30.83</math>  <math>V_{ref}(100-300km/s) = 760</math>  <math>V_{ref}(100) = 760</math>          Tipo de Falla = Reverse  <math>PGA_{base} = 238.67</math>  <math>PGSA (cm/s^2) = 66.63</math></p>	<p>Atkinson &amp; Boore 2008  <math>M_w(S-M) = 6.4</math>  <math>R(0-200km) = 19.22</math>  <math>V_{ref}(100-300km/s) = 708</math>  <math>V_{ref}(100) = 708</math>          Tipo de Falla = Reverse  <math>PGA_{base} = 315.22</math>  <math>PGSA (cm/s^2) = 101.73</math></p>	<p>a) Sismo de San Fernando Lake 9</p>	<p>b) Sismo de Friuli Codoprio</p>	<p>c) Sismo de Friuli Tolmezzo</p>
<p>Atkinson &amp; Boore 2008  <math>M_w(S-M) = 5.7</math>  <math>R(0-200km) = 9.79</math>  <math>V_{ref}(100-300km/s) = 817.4</math>  <math>V_{ref}(100) = 708</math>          Tipo de Falla = Reverse  <math>PGA_{base} = 301.82</math>  <math>PGSA (cm/s^2) = 111.23</math></p>	<p>Atkinson &amp; Boore 2008  <math>M_w(S-M) = 6.9</math>  <math>R(0-200km) = 14.18</math>  <math>V_{ref}(100-300km/s) = 671.7</math>  <math>V_{ref}(100) = 708</math>          Tipo de Falla = Reverse  <math>PGA_{base} = 473.49</math>  <math>PGSA (cm/s^2) = 193.26</math></p>	<p>Atkinson &amp; Boore 2008  <math>M_w(S-M) = 6.7</math>  <math>R(0-200km) = 27.54</math>  <math>V_{ref}(100-300km/s) = 271.07</math>  <math>V_{ref}(100) = 700</math>          Tipo de Falla = Reverse  <math>PGA_{base} = 341.86</math>  <math>PGSA (cm/s^2) = 132.26</math></p>	<p>d) Sismo de Coalinga Suphur</p>	<p>e) Sismo de Loma Prieta San Jose</p>	<p>f) Sismo de Northridge Glendale Cypress</p>

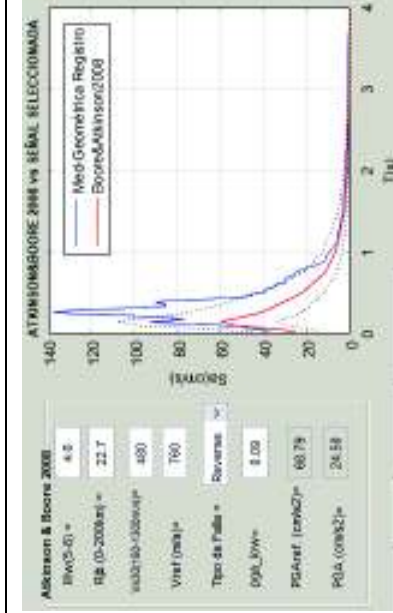
ELABORADO: Fernando Cañizares.

**TABLA 4.2** Espectros de respuesta de sismo local seleccionado y el modelo de atenuación Atkinson & Boore 2008

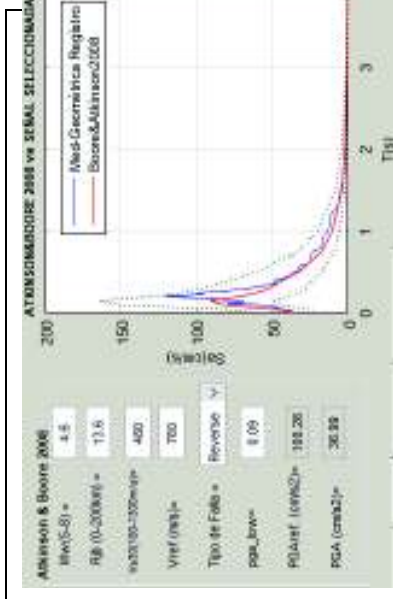
			<p>a) Sismo Calderón estación AEPN</p>	<p>b) Sismo Calderón estación LILI</p>	<p>c) Sismo Calderón estación PRAM</p>
			<p>d) Sismo de Puenbo estación AEPN</p>	<p>e) Sismo de Puenbo estación LILI</p>	<p>f) Sismo de Puenbo estación CRPG</p>



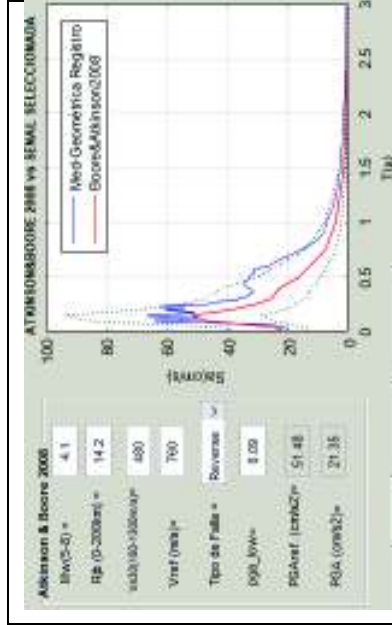
g) Sismo de Puenbo-Tab. estación AEPN



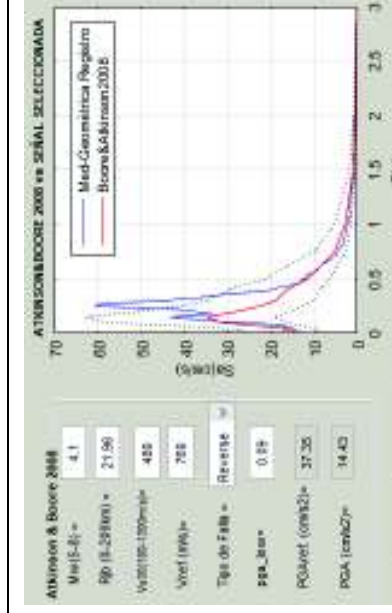
h) Sismo de Puenbo-Tababela estación LILI



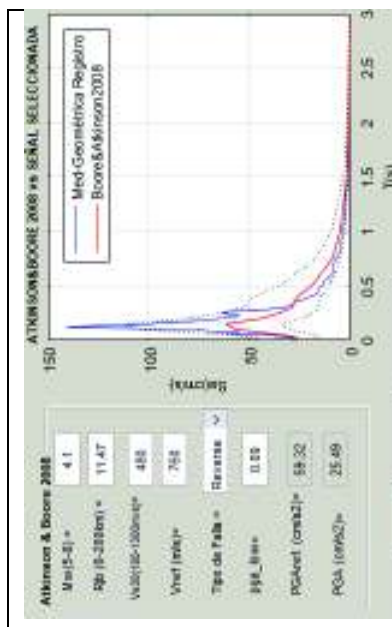
i) Sismo de Puenbo-Tab. Est. FENY



j) Sismo Guayllabamba estación AEPN



k) Sismo Guayllabamba estación LILI



l) Sismo Guayllabamba estación PRAM

	<p>m) Sismo Calderón Replica estación AEPN</p>
	<p>n) Sismo Calderón Replica estación LILI</p>
	<p>o) Sismo Calderón Replica estación PRAM</p>

ELABORADO: Fernando Cañizares.

-Línea azul: Representa el espectro de respuesta de las señales reales registradas en la ciudad de Quito.

-Línea roja: Representa el espectro de respuesta de la ecuación de atenuación (Boore&Atkinson 2008)

-Línea punteada: Representan los límites de desviación estándar (sigma), propuestas por el modelo de atenuación.

#### 4.7.1.2. ANÁLISIS DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS REGISTROS SELECCIONADOS Y EL MODELO DE ATENUACIÓN ATKINSON Y BOORE 2008

**La tabla 4.1** muestran la comparación de los espectros de respuesta, entre **sismo internacional** seleccionado y el modelo de atenuación de Atkinson & Boore 2008, se aprecia que los sismos que mejor se ajustan a la ecuación son: Coalinga Suphur(d), Loma Prieta San José (e) y Northridge Glendale Cypress(f). Los cuales están dentro de la desviación estándar recomendada por el modelo, cabe notar que estos tres sismos son debido a fallas tipo inversa y se dispone con toda la información necesaria, como es la velocidad de onda de corte  $V_{s30}$  y distancia más cercana al epicentro como es  $R_{jb}$ , requeridos para el cálculo de la GMPEs.

La señal internacional que menos se ajusta al modelo de atenuación, es el sismo de Friuli Tolmezzo(c), ubicado en Italia, en tanto que para los periodos mayores a 2 segundos, la señal es semejante al modelo.

**En la tabla 4.2** se resume las gráficas de los espectros de respuesta entre **sismo local** seleccionado y el modelo de atenuación Atkinson & Boore 2008 propuesto, se aprecia que los sismos que mejor se ajustan a la ecuación son: Calderón estación LILI (b), Calderón estación PRAM (c), Puembo-Tababela estación FENY (i), Guayllabamba estación AEPN (l), Calderón-Replica estación LILI (n) y el sismo de Calderón-Replica en la estación PRAM (o).

La forma espectral de la señal local seleccionada (Tabla 4.2), que menos se ajusta entre el modelo, es el sismo de Puembo del 8 de agosto 2016, registrado en la estación Lili (e). La cual se encuentra ubicada en el sur de Quito, en una zona con un nivel freático alto y tipo de suelo arenoso, por tanto la señal se puede ver afectada por efectos de sitio, razón por la cual la forma espectral difiere al modelo.

#### 4.7.2. MODELO DE ATENUACIÓN DE BINDI 2013

Este modelo de predicción del movimiento fuerte (GMPE's), fue desarrollado para Europa del Este, derivado de un fuerte banco de datos, especialmente de Italia (ITACA) y Turquía. (RESORSE DATA BANK), Incluyen 5882 señales, de 1814 sismos ocurridos en esta zona, registrados entre 1967 hasta el 2011 con rangos de magnitud entre **2.8 y 7.8**.

Los parámetros que calcula este modelo es la aceleración pico del terreno PGA, PGV y espectro con la pseudo-aceleración al 5% de amortiguamiento vs el periodo entre 0.002 y 3s, considerando el **promedio** de las componentes de los registros.

Válido para distancias menores a 300km.

La forma funcional del modelo es:

$$\log_{10} Y = e_1 + FD(R, M) + FM(M) + FS + F_{sof}$$

Y en cm/s<sup>2</sup>.

Donde la función de la distancia FD, está dada por la siguiente formula:

$$FD(R, M) = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] * \log_{10}(\sqrt{R^2 + h^2}/R_{ref}) - c_3(\sqrt{R^2 + h^2} - R_{ref})$$

La función de la magnitud FM está dada por:

$$FM(M) = \begin{cases} b_1(M - M_h) + b_2(M - M_h)^2 & \text{para } M \leq M_h \\ b_3(M - M_h) & \text{para } M > M_h \end{cases}$$

Para FS:

$$FS = \gamma \log_{10}(V_{S30}/V_{ref})$$

Donde  $V_{ref}=800\text{m/s}$ , es determinado por regresión, dado en tablas de acuerdo al modelo de Bindi. 2013.

$M_h=6.75$  Magnitud de referencia constante.



#### 4.7.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO BINDI 2013

Las características del modelo se muestran a continuación:

Magnitud: Rango de 4 - 6.9

Distancia entre 0-200km

Estilos de falla: Normal, Reverse, Strike-slip y falla desconocida.

Tipo de suelo, se clasifica de acuerdo al Eurocódigo EC8: A, B, C, D.

Rango del periodo: 0.02-3.0 segundos.

De acuerdo al Eurocódigo EC8, el suelo se clasifica en cinco tipos, dependiendo de la velocidad de onda de corte  $V_{s30}$ :

**Suelo Tipo A:**  $V_{s30} > 800\text{m/s}$ .

**Suelo Tipo B:**  $360 < V_{s30} < 800\text{m/s}$ .

**Suelo Tipo C:**  $180 < V_{s30} < 360\text{m/s}$

**Suelo Tipo D:**  $V_{s30} < 180\text{m/s}$ .

El modelo cuenta con cuatro tipos de mecanismos de falla:

Falla Normal: 593 registros.

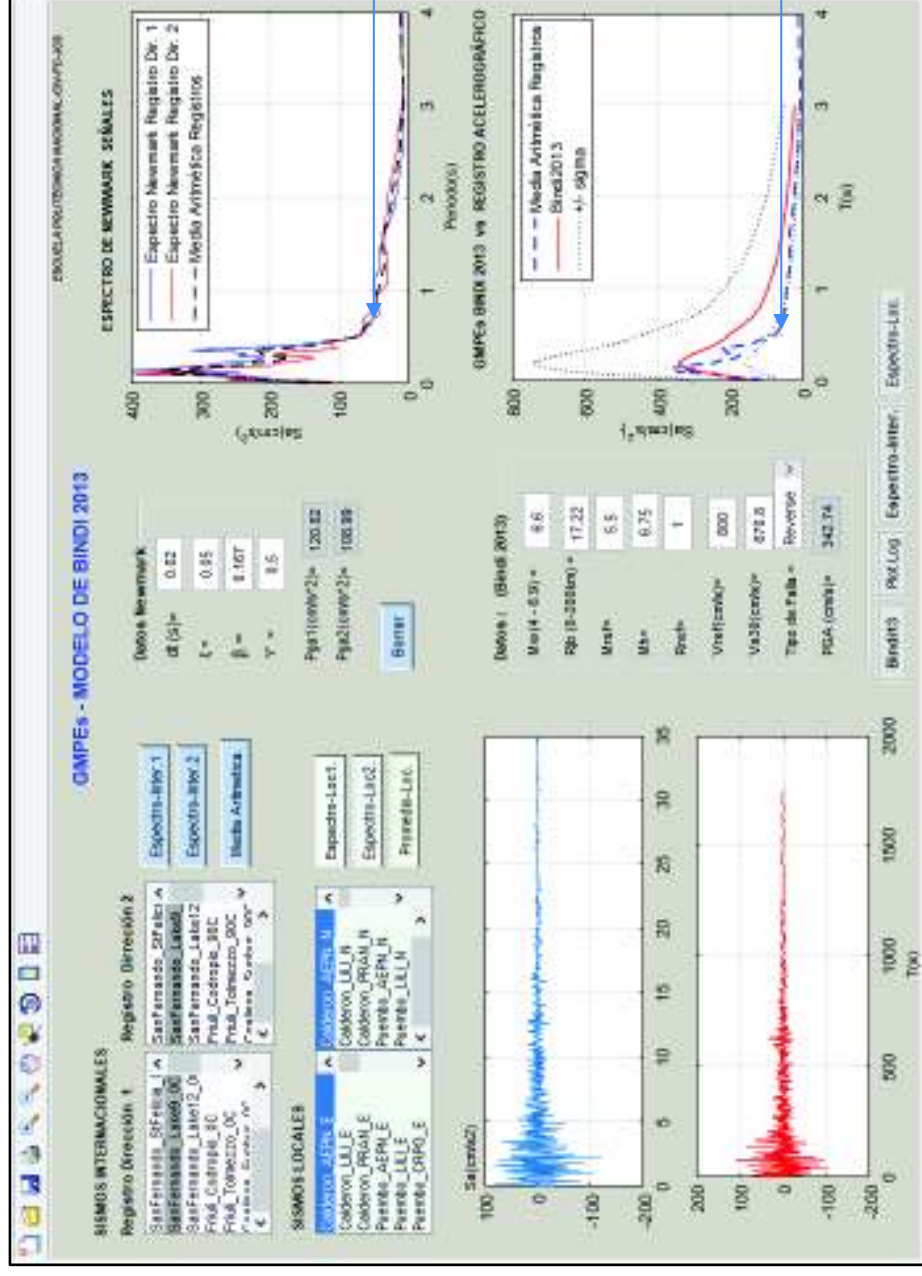
Falla Inversa: 87 registros.

Falla strike-slip: 61 registros.

Falla desconocida: 28 registros.

COMPONENTES: Se calcula el **promedio aritmético** de los dos registros seleccionados (mean).

FIGURA 4.5 Modelo de Atenuación Bindi 2013 en el programa GMPEs EPN v1.

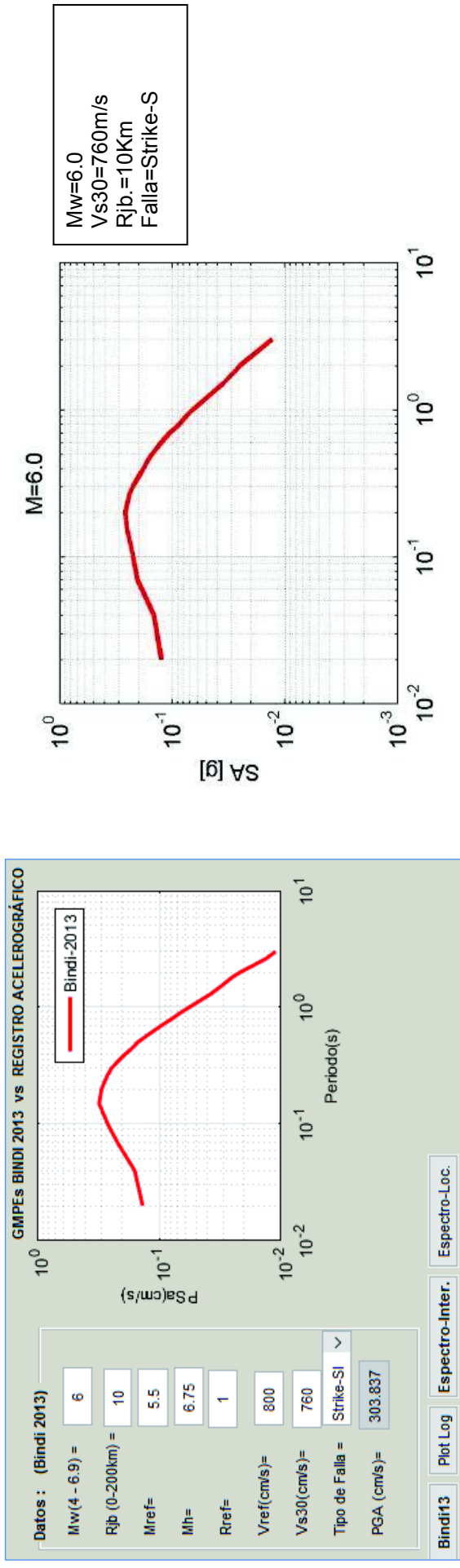


En la figura 4.5 se muestra el desarrollo del programa **GMPE-EPNV1**, para el modelo de **Bindi et al. (2013)**. En la parte superior izquierda compila los sismos locales e internacionales seleccionados (Tablas 2.4 y 2.21). En la parte superior derecha se grafican los espectros de respuesta de las dos señales horizontales (NS y EW), con el método de Newmark, luego se traza la promedio aritmético (Línea Punteada color negro) de las dos componentes.

En la parte inferior derecha muestra la gráfica de la comparación, entre el **promedio aritmético** de las señales seleccionadas (Línea azul discontinua) y la ecuación de atenuación GMPEs (Línea roja continua).

ELABORADO: Fernando Cañizares.

**FIGURA 4.6** Verificación del modelo Bindi et al. (2013) vs programa GMPEs-EPN. v1.



ELABORADO: Fernando Cañizares.

FUENTE: Bindi.; M. Massa L. Luz G. Ameri. (2013)

**(a)**

En la figura 4.6, muestra la validación del programa GMPE-EPN.v1 **(a)**, y la ecuación de atenuación propuesta por Bindi (2013) **(b)**. De acuerdo a lo siguientes datos: Mw=6, distancia Rjb=10km, velocidad de onda de corte  $V_{s30}=760\text{m/s}$  y falla tipo strike slip. Se verifica que las gráficas son semejantes.

**(b)**

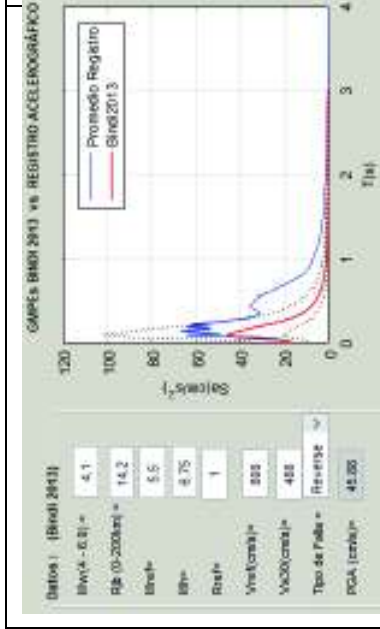
**TABLA 4.3** Espectros de respuesta entre sismo **internacional** seleccionado y el modelo de atenuación Bindi 2013.

			<p>a) Sismo de San Fernando estación Lake 9</p>	<p>b) Sismo de Friuli Codoprio</p>	<p>c) Sismo de Friuli Tolmezzo</p>
			<p>d) Sismo Coalinga Suphur</p>	<p>e) Sismo de Loma Prieta San Jose</p>	<p>f) Sismo de Northridge Glendale Cypress</p>

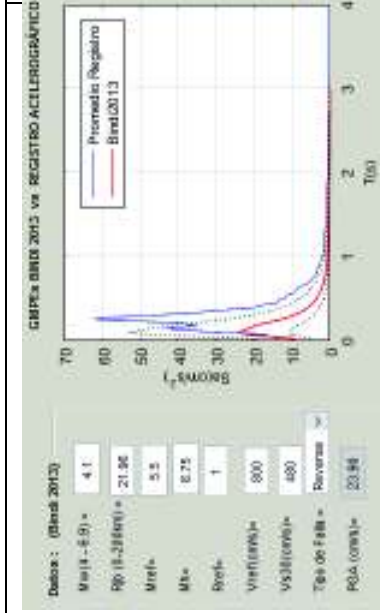
ELABORADO: Fernando Cañizares.

**TABLA 4.4** Espectros de respuesta de sismo local seleccionado y el modelo de atenuación Bindi 2013

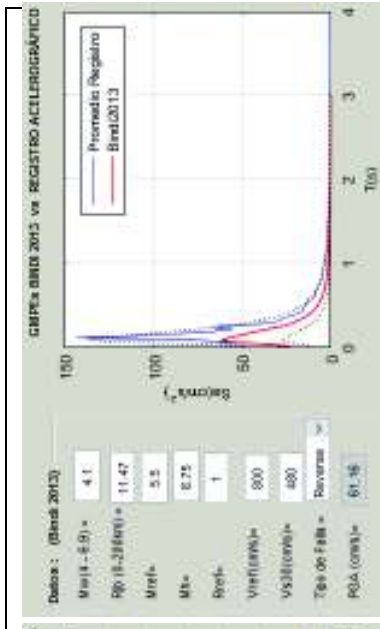
			<p>a) Sismo Calderón Estación -AEPN</p>	<p>b) Sismo Calderón Estación - LILI</p>	<p>c) Sismo Calderón Estación - PRAM</p>
			<p>d) Sismo de Puenbo Estación -AEPN</p>	<p>e) Sismo de Puenbo Estación -LILI</p>	<p>f) Sismo de Puenbo Estación -CRPG</p>



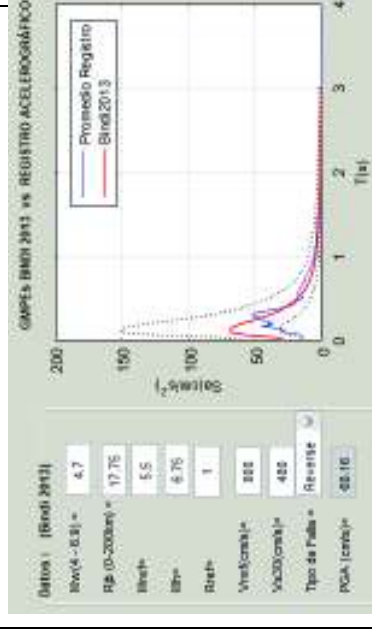
g) Sismo Guayllabamba Estación AEPN



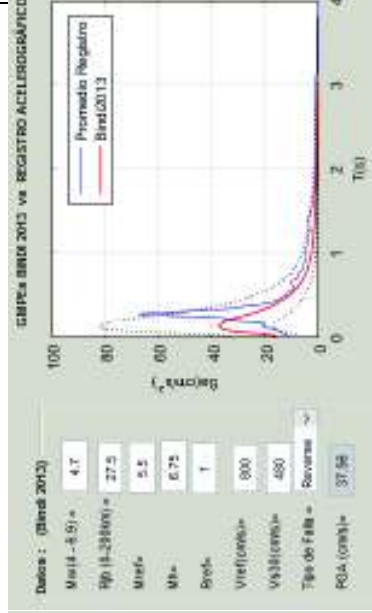
h) Sismo Guayllabamba Estación LILI



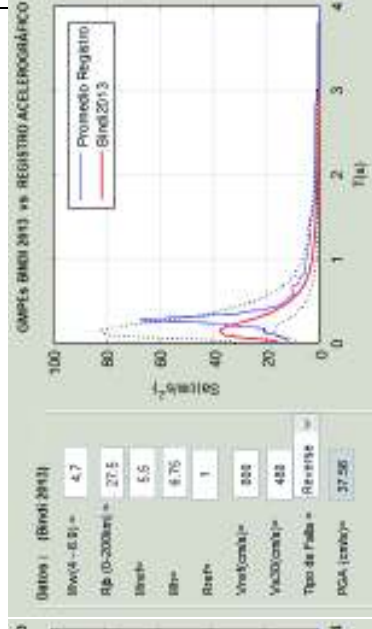
i) Sismo Guayllabamba Estación PRAM



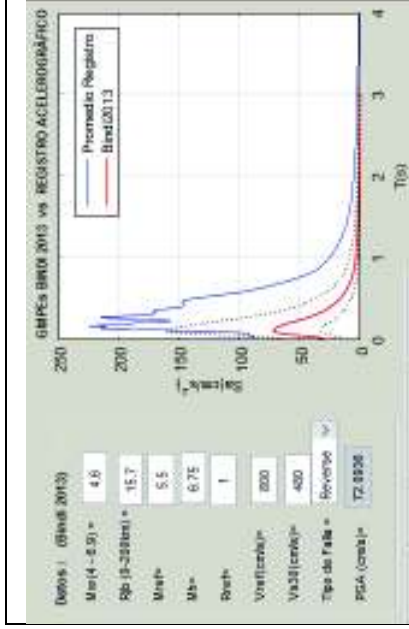
j) Sismo Calderón Replica Estación AEPN



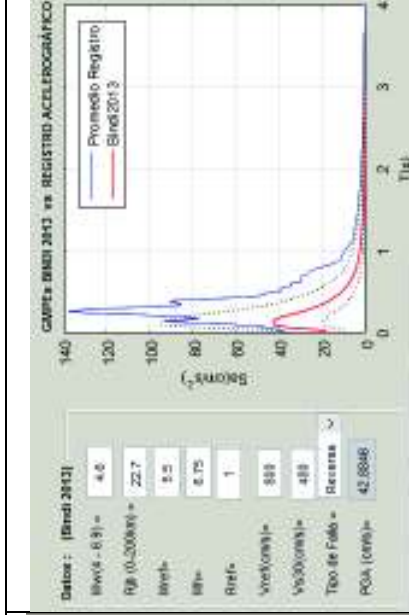
k) Sismo Calderón Replica Estación LILI



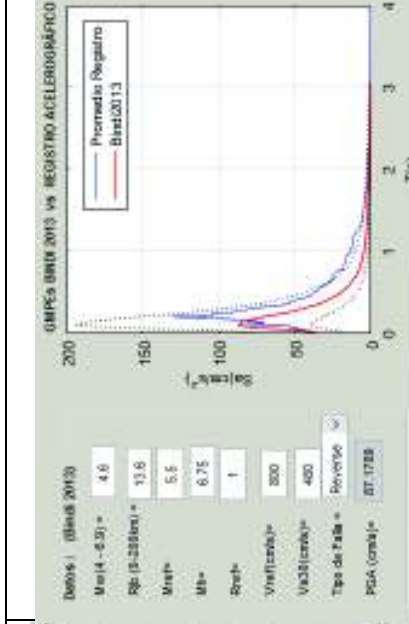
l) Sismo Calderón Replica Estación PRAM



m) Sismo Puenbo-Tababela RENAC-AEPN



n) Sismo de Puenbo-Tababela RENAC-LILI



o) Sismo Puenbo-Tababela RENAC-FENY

-Línea azul: Representa el espectro de respuesta de las señales reales registradas.

-Línea roja: Representa el espectro de respuesta de la ecuación de atenuación (Bindi 2013)

-Línea punteada: Representan los límites de desviación estándar (sigma), propuestas por el modelo de atenuación.

ELABORADO: Fernando Cañizares.

#### 4.7.2.2. ANÁLISIS DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS REGISTROS SELECCIONADOS Y EL MODELO DE ATENUACIÓN BINDI 2013

**La tabla 4.3** resume las gráficas de las formas de los espectros de respuesta entre **sismo internacional** seleccionado y el modelo de atenuación Bindi (2013). Se aprecia que los sismos que mejor se ajustan a la ecuación son: San Fernando Lake #9 (a), Coalinga Suphur (d), Loma Prieta San Jose (e) y Northridge Glendale Cypress (f). Los cuales están dentro de la desviación estándar recomendada por el modelo, cabe notar que se contaba con toda la información necesaria como es la velocidad de onda de corte  $V_{s30}$  y distancia más cercana al epicentro  $R_{jb}$ , requeridos para el cálculo de la GMPE.

La señal internacional que menos se ajusta al modelo de atenuación es el sismo de Friuli Tolmezzo(c), ubicado en Italia, para los periodos mayores a 2 segundos la señal es semejante al modelo.

**La tabla 4.4**, se resume las gráficas de la forma de los espectros de respuesta entre los **sismos locales** seleccionados y el modelo de atenuación Bindi (2013). Se aprecia que los sismos que mejor se ajustan a la ecuación son: Calderón estación AEPN (a), Calderón estación LILI (b), Calderón estación PRAM (c), Puembo-Tababela estación FENY (i), Guayllabamba estación AEPN (g) y RCalderón estación AEPN (j).

En tanto que el sismo de Puembo ocurrido el 8 de agosto 2016, y registrados en las estaciones LILI (e) y CRPG (f) difieren entre la señal y el modelo de atenuación, la variación de estos registros se debe posiblemente a los efectos de sitio.



### 4.7.3. MODELO DE AKKAR Y BOMMER 2013

Es un modelo actual de movimiento fuerte para la predicción del espectro elástico de respuesta en términos de pseudo aceleraciones espectrales, PGA y velocidad, usando la base de datos de Italia y Europa de Este.

Este modelo incluye, la amplificación no lineal del suelo en función de la velocidad de onda de corte  $V_{s30}$ , con aceleración referencial pico en la roca ( $V_{ref}$ ).

El rango de magnitud de momento entre 4 hasta 7, así como, la distancia de aplicación cubre los 200km de extensión, el rango de periodos de 0.01 a 4s, considera diferentes modelos de distancia a la fuente:

Pocos datos representados en el modelo son para fallas de tipo inversa (Quito), la mayoría de datos son de tipo falla normal (Italia-Itaca) y strike slip (Turquía).

La forma funcional de predicción del movimiento fuerte es:

$$\ln(Y) = \ln[Y_{REF}(M_W, R, SoF)] + \ln[S(V_{S30}, PGA_{REF})] + \varepsilon\sigma$$

MEDIDA MOVIMIENTO REFERENTE A ROCA    EFECTO DE SITIO    VARIABLE ALEATORIA

$$\ln(Y) = \ln[Y_{REF}(M_W, R, SoF)] + \ln[S(V_{S30}, PGA_{REF})] + \varepsilon\sigma$$

Donde:

Para  $M_w < 6.5$

$$\ln(Y_{REF}) = a_1 + a_2(M_w - c_1) + a_3(8.5 - M_w)^2 + [a_4 + a_5(M_w - c_1)] \ln(\sqrt{R^2 + a_6^2}) + a_8 F_N + a_9 F_R + S \quad (2)$$

Para  $M_w > 6.5$

$$\ln(Y_{REF}) = a_1 + a_7(M_w - c_1) + a_3(8.5 - M_w)^2 + [a_4 + a_5(M_w - c_1)] \ln(\sqrt{R^2 + a_6^2}) + a_8 F_N + a_9 F_R + S \quad (3)$$

Además el factor  $\ln(S)=$

$$\ln(S) = b_1 \ln\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right) + b_2 \ln\left[\frac{PGA_{REF} + c\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right)^n}{(PGA_{REF} + c)\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right)^n}\right] \quad \text{Para } V_{S30} < V_{REF} \text{ (760m/s)}$$

$$\ln(S) = b_1 \ln\left[\frac{\min(V_{S30}, V_{COM})}{V_{REF}}\right]$$

Donde las ecuaciones (2) y (3):

$\ln(Y) = \text{Aceleración espectral } (g)$

$\ln(S) = \text{Función de amplificación no lineal de sitio}$

$M_W = \text{Magnitud de momento}$

$R = \text{Diferentes modelos de distancia a la fuente } R_{JB}, R_{epi} \text{ y } R_{hyp}$

$F_N, F_R = \text{Variables que dependen del tipo de falla: normal o inversa}$

$\sigma = \text{Desviación estandar compuesta por } \phi \text{ (within – even) + } \tau \text{ (Entre eventos)}$

$V_{S30} = \text{Velocidad de onda de corte}$

$V_{REF} = \text{Velocidad de onda referencial } 760 \text{ m/s}$

$V_{CON} = \text{Velocidad de onda de corte referencial para roca } 1000 \text{ m/s}$

$PGA_{REF} = \text{Aceleración pico referencial}$

$a_1, a_2, \dots, a_9 = \text{Coeficientes de regresión dados en tablas.}$

#### 4.7.3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

Rango de Magnitud Mw: 4–7.6 grados.

Fallas: Normal, Inversa, Strike Slip

Distancia epicentral ( $R_{epi}$ ), hipocentral  $R_{hyp}$  y proyección de la falla  $R_{jb}$ .

Profundidad: Profundidades menores a 30 km. (Depth) para sismos corticales.

Distancia  $R_{jb}$ ,  $R_{epi}$  y  $R_{hyp}$ .: 0- 200km.

Tipo de Suelo: Eurocódigo: Vs30

Clase A:  $Vs30 \geq 800 \text{ m/s}$ .

Clase B:  $360 \text{ m/s} \leq Vs30 \leq 800 \text{ m/s}$ .

Clase C:  $180 \leq Vs30 \leq 300 \text{ m/s}$ .

Clase D:  $Vs30 < 180 \text{ m/s}$ .

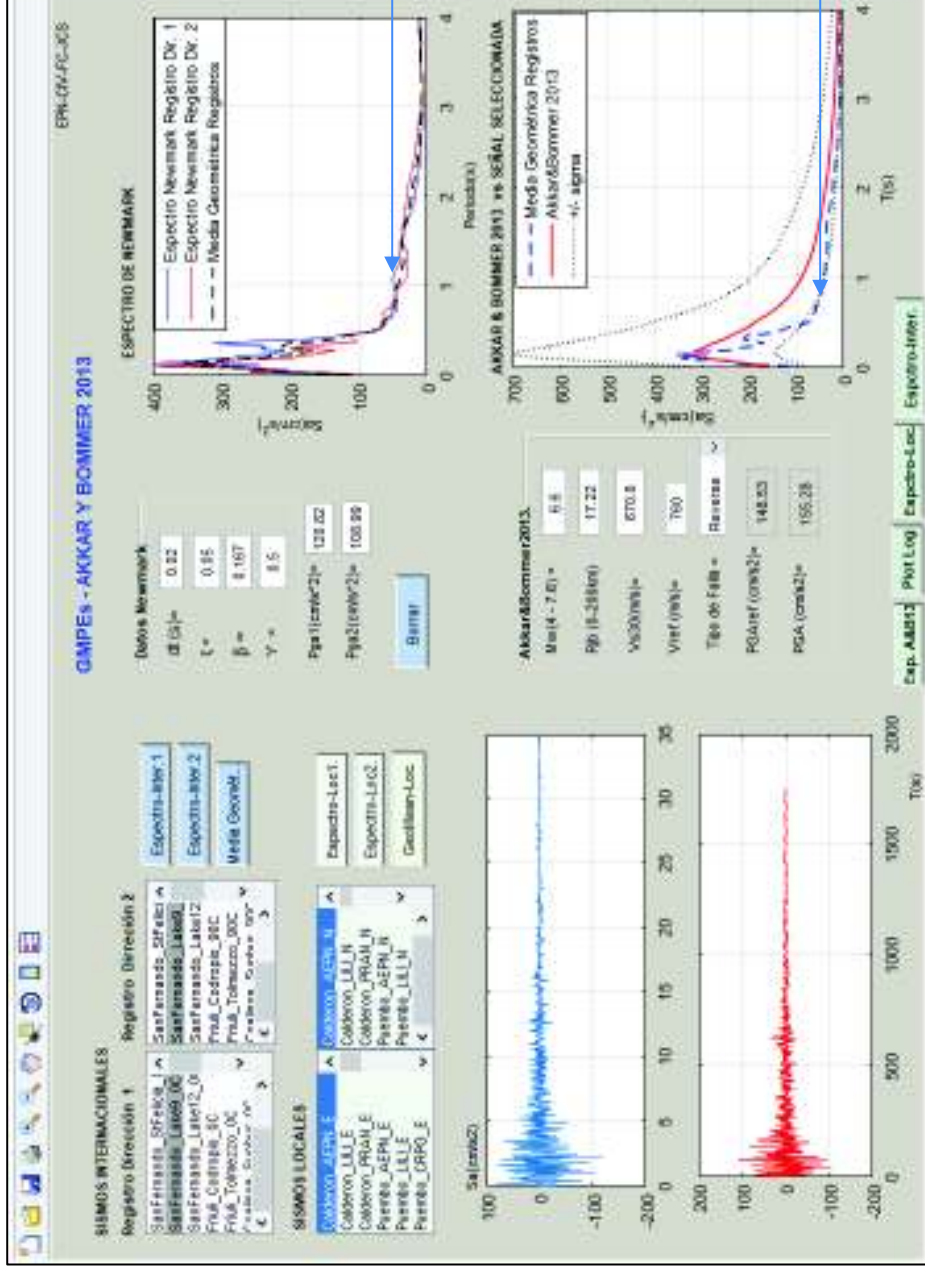
El rango de validez del modelo es entre Vs30: 150m/s - 1200m/s.

Inclusión del efecto de amplificación no lineal de sitio en función Vs30.

Máximos y mínimos periodos de respuesta: PGA, PGV y  $T=0,01\text{s}–4\text{s}$ .

Definición de la componente horizontal: Media Geométrica de los registros.

FIGURA 4.7 Espectro modelo de Akkar & Bommer (2013), GMPEs EPNv1.



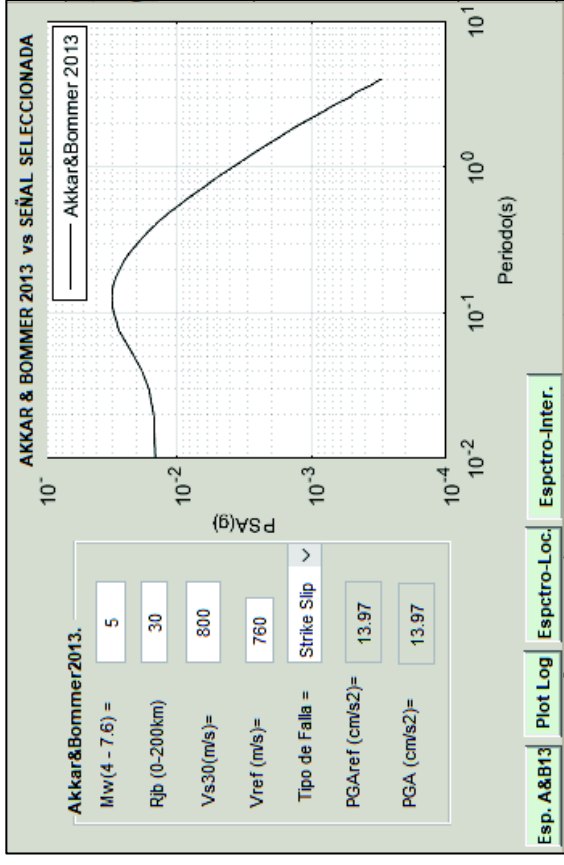
En la figura 4.7 se muestra el desarrollado del programa **GMPE-EPNv1**, para el modelo de **Akkar & Bommer (2013)**. En la parte superior izquierda compila los sismos locales e internacionales seleccionados (Tablas 2.4 y 2.21).

En la parte superior derecha se grafican las respuestas de las dos señales horizontales (NS y EW) con el método de Newmark, luego se traza la **media geométrica** (Línea discontinua color negro) de las dos componentes.

En la parte inferior derecha muestra la gráfica de la comparación, entre la **media geométrica** de las señales seleccionadas (Línea azul discontinua) y la ecuación de atenuación GMPEs (Línea roja continua). Así como los límites de desviación estándar sigma (Línea punteada)

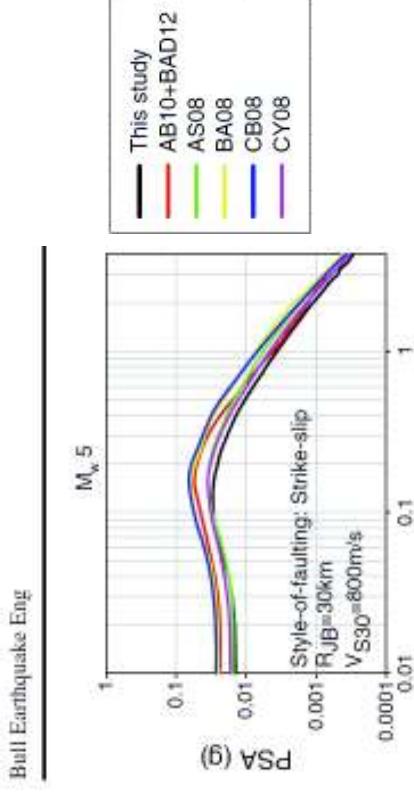
ELABORACION: Fernando Cañizares

**FIGURA 4.8** Comparación del programa GMPEs-EPNV1. vs Akkar & Bommer 2013.



FUENTE: Akkar y Bommer 2013.  
ELABORADO: Fernando Cañizares

(a)



(b)

En la figura 4.8 muestra la validación del programa GMPE-EPNV1. **(a)** Espectro de respuesta de la ecuación de atenuación propuesta por Akkar&Bommer (2013) **(b)** Representa los espectros de respuesta con los siguientes datos: Mw=5, distancia Rjb=30km, velocidad de onda de corte Vs30=800m/s y falla tipo strike slip, para varios modelos de atenuación, para la comparación del modelo es con la gráfica línea continua color negro, el cual muestra que su espectro es semejante al modelo programado.

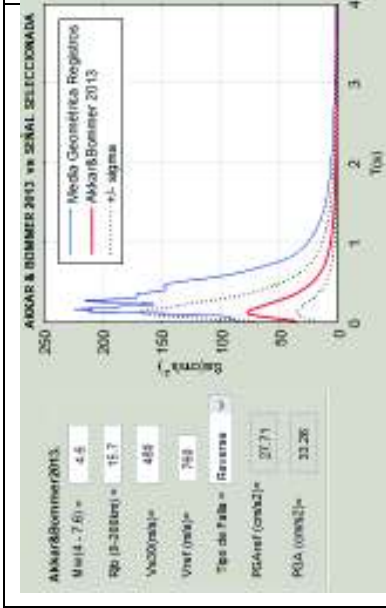
**TABLA 4.5** Espectros de respuesta de sismo internacional seleccionado y el modelo de atenuación Akkar & Bommer 2013.

<p>a) Sismo de San Fernando Lake #9</p>	<p>b) Sismo de Friuli Codoprio</p>	<p>c) Sismo de Friuli Tolmezzo</p>
<p>d) Sismo de Coalinga Suphur</p>	<p>e) Sismo de Loma Prieta San Jose</p>	<p>f) Sismo de Northridge Glendale Cypress</p>

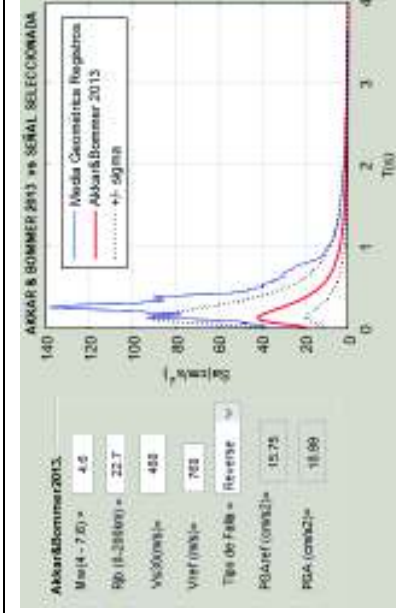
ELABORADO: Fernando Cañizares.

**TABLA 4.6** Espectros de respuesta de sismo local seleccionado y modelo de atenuación Akkar & Bommer 2013.

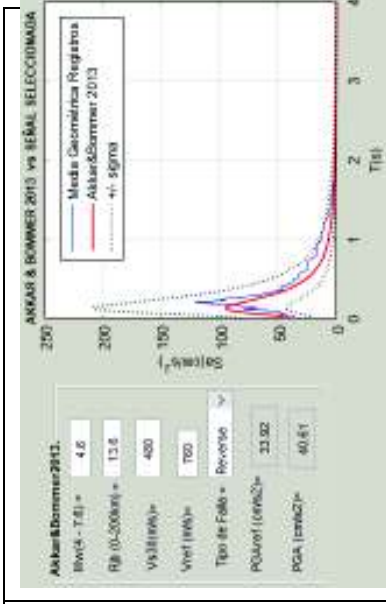
			<p>c) Sismo Calderón estación PRAM</p>
			<p>f) Sismo de Puembo estación CRPG</p>
	<p>e) Sismo de Puembo estación LILI</p>		<p>d) Sismo de Puembo estación AEPN</p>



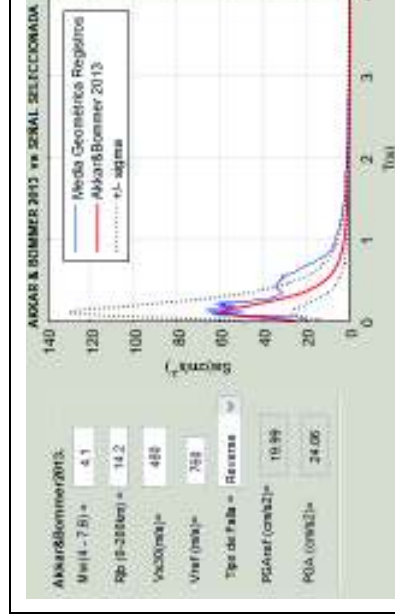
g) Puembo-Tab estación AEPN



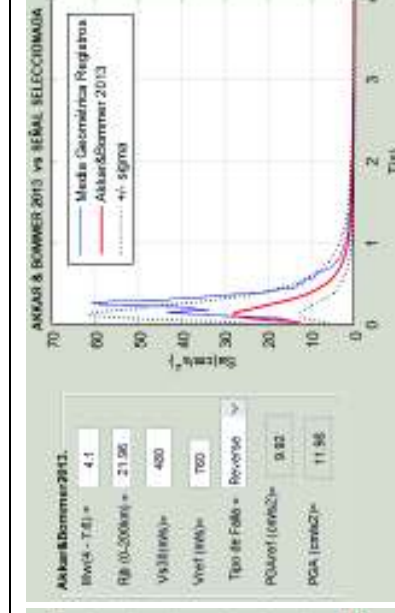
h) Puembo-Tab estación LILI



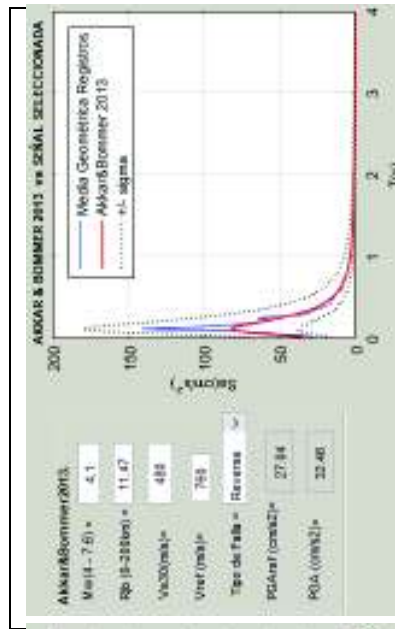
i) Puembo-Tab estación FENY



j) Sismo Guayllabamba estación AEPN



k) Sismo Guayllabamba estación LILI



l) Sismo Guayllabamba estación PRAM

	<p>m) Sismo Calderón Replica estación AEPN</p>
	<p>n) Sismo Calderón Replica estación LILI</p>
	<p>o) Sismo Calderón Replica estación PRAM</p>

-Línea azul: Representa el espectro de respuesta de las señales reales registradas.

-Línea roja: Representa el espectro de respuesta de la ecuación de atenuación (Akkar&Bommer 2013)

-Línea punteada: Representan los límites de desviación estándar (sigma), propuestas por el modelo de atenuación.

ELABORADO: Fernando Cañizares.



#### 4.7.3.2. ANÁLISIS DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS REGISTROS SELECCIONADOS Y EL MODELO DE ATENUACIÓN AKKAR Y BOMMER 2013

**En la tabla 4.5.** Se aprecia que los sismos que mejor se ajustan a la ecuación son: San Fernando Lake #9 (a), Coalinga Suphur (d) y Loma Prieta San Jose (e). Los cuales están dentro de la desviación estándar recomendada por el modelo.

La señal internacional (Tabla 4.5) que menos se ajusta entre el modelo de atenuación es el sismo de Friuli Tolmezzo(c), ubicado en Italia. Para los periodos mayores a 2 segundos la señal es semejante al modelo.

**En la tabla 4.6.** Se observa que los sismos que mejor se ajustan a la ecuación son: Calderón estación AEPN (a), Calderón estación PRAM (c), Calderón Replica estación AEPN (m), Calderón Replica estación PRAM (o) y Puenbo-Tab Estación FENY (i).

En tanto que el sismo de Puenbo ocurrido el 8 de agosto 2016, registrados en las estaciones LILI (e) y CRPG (f), difieren entre la señal y el modelo de atenuación, la variación de los registros se debe posiblemente a los efectos de sitio, esta particularidad también se presentó en los modelos de *Atkinson & Boore (2008)* y *Bindi (2013)*.

## 4.8. MODELOS PARA SISMOS POR SUBDUCCIÓN

### 4.8.1. MODELO DE YOUNGS 1997

Según la norma NEC15, en la sección 10.1, para el análisis del riesgo sísmico y el cálculo de las ecuaciones de predicción del movimiento fuerte recomienda la utilización del modelo de predicción Youngs (1997). Por tanto se hace la verificación del modelo con los registros seleccionados.

Modelo de predicción para suelo:

$$\ln(PGA) = C_1^* + C_2 M_i + C_3^* \ln \left[ Rrup_{ij} + e^{C_4 - \frac{C_2}{C_3} M} \right] + C_5 Z_t + C_9 H_i + C_{10} Z_{SS} + n_i + \epsilon_{ij}$$

$$C_1^* = C_1 + C_6 Z_r$$

$$C_3^* = C_3 + C_7 Z_r$$

$$C_4^* = C_4 + C_8 Z_r$$

Dónde:

PGA (g),  $C_1 = -0.6687$ ,  $C_2 = 1.438$ ,  $C_3 = -2.329$ ,  $C_4 = \ln(1.097)$ ,  $C_5 = 0.3643$ ,  $C_9 = 0.0068$ ,  $\sigma = 1.5 - 0.1M$ .

Modelo de predicción para roca:

$$\ln(PGA) = C_1^* + C_2 M_i + C_3^* \ln \left[ (rup)_{ij} + e^{C_4 - \frac{C_2}{C_3} M_i} \right] + C_5 Z_{SS} + C_8 Z_t + C_9 H_i + n_i + \epsilon_{ij}$$

$$C_1^* = C_1 + C_3 C_4 - C_3^* C_4^*$$

$$C_3^* = C_3 + C_6 Z_S$$

$$C_4^* = C_4 + C_7 Z_S$$

Donde:

PGA (g),  $C_1 = 0.2428$ ,  $C_2 = 1.414$ ,  $C_3 = -2.552$ ,  $C_4 = \ln(1.7818)$ ,  $C_8 = 0.3836$ ,  $C_9 = 0.00607$ ,  $\sigma = 1.5 - 0.1M$ .

$Z_r = 1$ ,  $Z_{ds} = 0$ ,  $Z_{ss} = 0$  Para roca.

$Z_{ds} = 1$ ,  $Z_r = 0$ ,  $Z_{ss} = 0$  Para suelo.

$Z_{ss} = 1$ ,  $Z_{ds} = 0$ ,  $Z_r = 0$  Para suelo blando.

#### **4.8.2. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO YOUNGS 1997**

Modelo desarrollado en Japón.

El rango de magnitud de momento ( $M_w$ ) entre 5-8.

La distancia cerrada a la falla o ruptura ( $R_{rup.}$ ) es de acuerdo al tipo de falla.

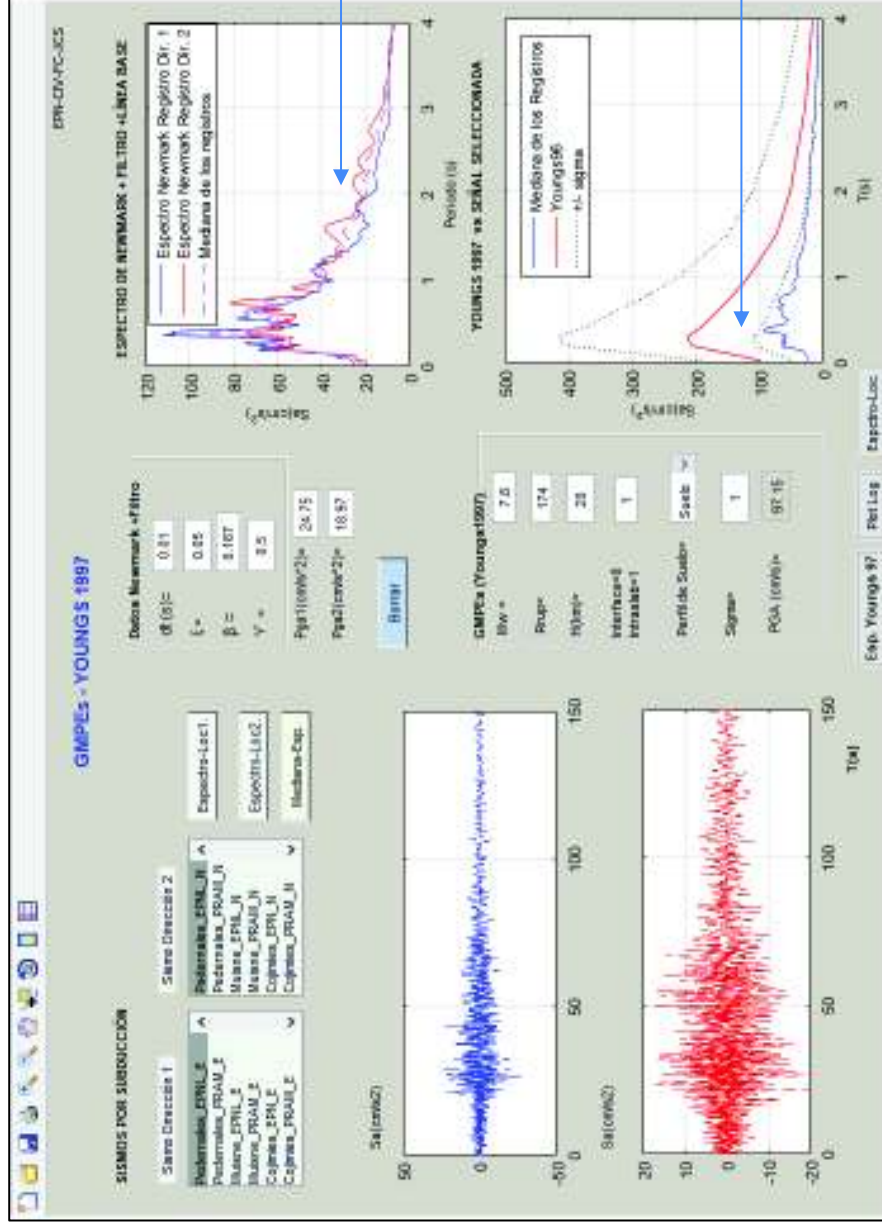
Profundidad Depth ( $Z_t$ ): Depende del tipo de fuente sismogénica, por tanto el modelo es válido para sismos de interface mayor a 50km, o intraslab menor a 50km. La condición de sitio es compatible para roca y suelo, pero no hace una clasificación explícita del tipo de estrato.

El modelo recomienda calcular la **mediana** de los registros seleccionados.

##### **4.8.2.1. ANÁLISIS DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS REGISTROS SELECCIONADOS Y EL MODELO DE ATENUACIÓN YOUNGS 1997**

En la tabla 4.7 se resume las gráficas de la forma de los espectros de respuesta entre los sismos locales por subducción seleccionados y el modelo de atenuación Youngs (1997). El sismo de Muisne estación PRAM (d). Es el que mejor se ajusta al modelo de predicción analizado.

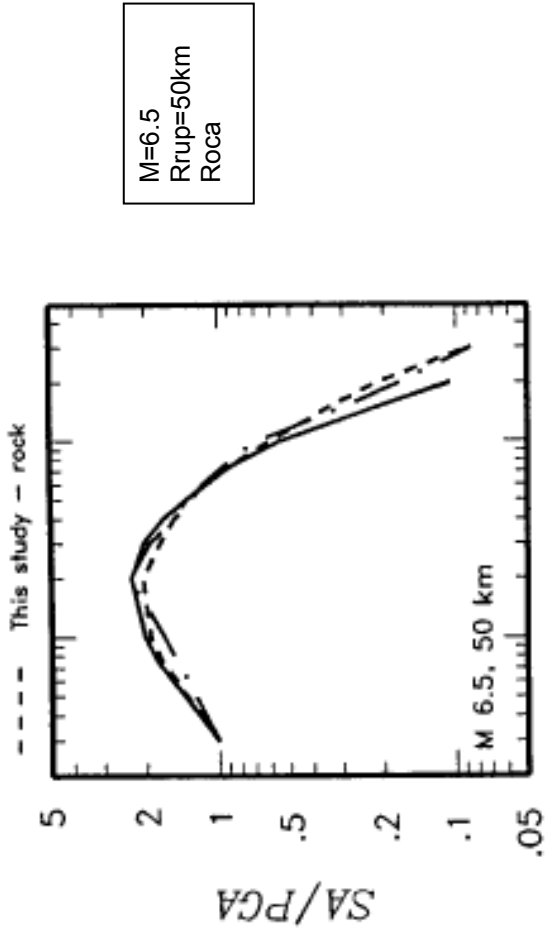
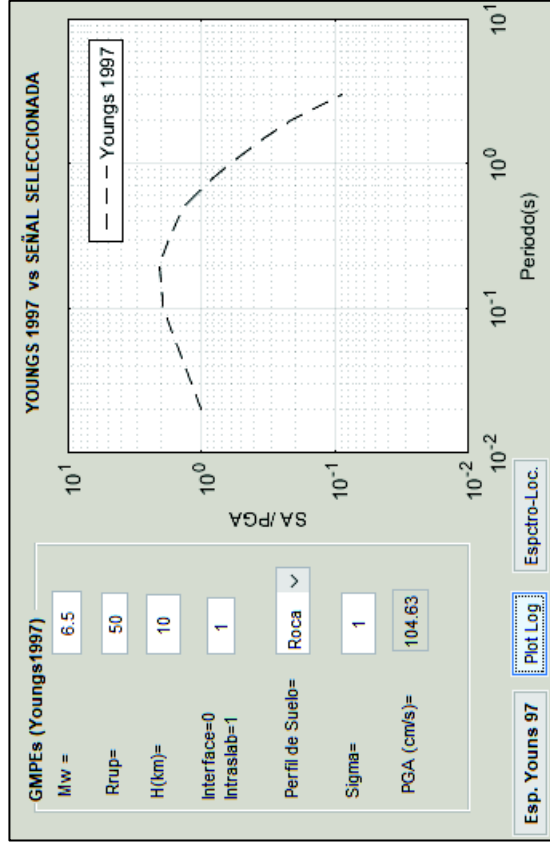
**FIGURA 4.9** Espectro modelo de Youngs 1997 programa GMPEs EPNv1.



En la figura 4.9 se muestra el desarrollado del programa **GMPE-EPNV1**, para el modelo de **Youngs (1997)**. En la parte superior izquierda compila los sismos locales por subducción (Tabla 2.20). En la parte superior derecha se grafican las respuestas de las dos señales horizontales (NS y EW) con el método de **Newmark**, luego se traza la **mediana** de las componentes, de acuerdo al requerimiento del modelo de atenuación. En la parte inferior derecha muestra la gráfica de la comparación, entre la mediana de las señales seleccionadas y la ecuación de atenuación Youngs 1997.

ELABORADO: Fernando Cañizares

**FIGURA 4.10** Comparación espectro de aceleración con el programa GMPE\_EPN vs modelo de Youngs 1997



FUENTE: Strong Motion Attenuation Relationships for subduction zone Youngs (1997).

(a)

(b)

En la figura 4.10 muestra la validación del programa GMPE-EPNV1 (a) y la ecuación de atenuación propuesta por Youngs (1997) (b). De acuerdo a los siguientes datos: Mw=6.5, distancia Rrup=50Km, H=10Km y Estrato tipo roca. Se aprecia que las gráficas de los espectros de respuesta son semejantes (Líneas discontinuas).

**TABLA 4.7** Comparación modelo de Youngs 1997 y programa GMPEs. V1, sismos subducción registrados.

<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 7.8          Rrup= 174          Rrup0= 28          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 37.15</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 7.8          Rrup= 171          Rrup0= 28          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 30.38</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 6.6          Rrup= 100.3          Rrup0= 17          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 26.61</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>c) Sismo de Muisne Estación EPNL</p>
<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 7.8          Rrup= 174          Rrup0= 28          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 37.15</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 7.8          Rrup= 171          Rrup0= 28          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 30.38</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 6.6          Rrup= 100.3          Rrup0= 17          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 26.61</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>b) Sismo de Pedernales Estación PRAM</p>
<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 6.6          Rrup= 100.3          Rrup0= 17          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 26.61</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 6.6          Rrup= 100.3          Rrup0= 17          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 26.61</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 6.8          Rrup= 188.3          Rrup0= 15          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 23.04</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>f) Sismo de Cojimes Estación PRAM</p>
<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 6.6          Rrup= 100.3          Rrup0= 17          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 26.61</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 6.6          Rrup= 100.3          Rrup0= 17          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 26.61</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 6.8          Rrup= 188.3          Rrup0= 15          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 23.04</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>e) Sismo de Cojimes Estación EPNL</p>
<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 6.6          Rrup= 100.3          Rrup0= 17          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 26.61</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 6.6          Rrup= 100.3          Rrup0= 17          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 26.61</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>GMPEs (Youngs1997)          Mw = 6.6          Rrup= 100.3          Rrup0= 17          Intero=1          Intero0=1          Perio de Subo= 3          Signo= 1          PGA (cm/s²)= 26.61</p> <p>Exp. Youngs 97    Período    Espectro-Loc</p>	<p>d) Sismo de Muisne Estación PRAM</p>

ELABORADO: Fernando Cañizares

### 4.8.3. MODELO DE ZHAO 2006

Es un modelo de predicción del movimiento sísmico desarrollado para el Japón, incluyen los efectos de sitio, mecanismos de falla principalmente por subducción; interface e intraplaca, y registros de origen cortical en menor medida.

Para los eventos de subducción tipo intraplaca, se emplea un factor de modificación de distancia simple para lograr una predicción plausible e imparcial. El modelo incluye efectos de la profundidad, el tipo de fuente tectónica y el mecanismo de falla.

La forma de la función de atenuación es la siguiente:

$$\log_e(y) = aM_W + b_x + \log_e(r) + c(h - h_c)\delta_h + F_R + S_I + S_S + S_{SL}\log_e(x) + C_k$$

$$r = x + c \exp(dM_W)$$

Donde:

Y= Aceleración pico (PGA) en  $\text{cm/s}^2$  con un amortiguamiento de 5% en el espectro de respuesta, y la **media geométrica** de los dos componentes.

Mw=Magnitud de momento.

x=Distancia más cercana a la fuente (km).

h=Profundidad focal (km).

$h_c$ =Profundidad focal constante igual a 15km.

$\delta_h$  = Variable toma valor de 1 o 0.

Dónde: ( $\delta_h = 0; h < h_c$ ;  $\delta_h = 1; h > h_c$ )

FR = Parámetro de falla inversa (Eventos corticales con mecanismos de falla inversa FR=1; Caso contrario FR=0.)

SI= Tipo de fuente tectónica (SI=1 Eventos de Interface, SI=0 caso contrario).

SS = Tipo de fuente tectónica (SS=1 Subducción, Eventos de intraplaca SS=0, caso contrario).

SSL= Término de modificación de trayectoria independiente de magnitud para evento intraplaca (SSL = 1: para evento intraplaca, 0: Caso contrario).

$C_k$ = Factor de sitio dependiente del tipo de suelo.

$C_1$ =Roca,  $C_2$ =Suelo duro,  $C_3$ =Suelo medio y  $C_4$ =Suelo suave.

El modelo es aplicable para profundidades focales menores a 125km.

**TABLA 4.8** Clasificación de sitio y tipo de suelo

SITIO	TIPO	PERIODO	Vs30 (m/s)	NEHRP
Roca Dura			Vs30>1100	A
SC I	Roca	$T < 0,2s$	Vs30>600	A+B
SC II	Suelo Duro	$0,2 = T < 0,4s$	$300 < Vs30 < 600$	C
SC III	Suelo Medio	$0,4 < T < 0,6s$	$200 < Vs30 < 300$	D
SC IV	Suelo Suave	$T \geq 0,6s$	Vs30<200	E+F

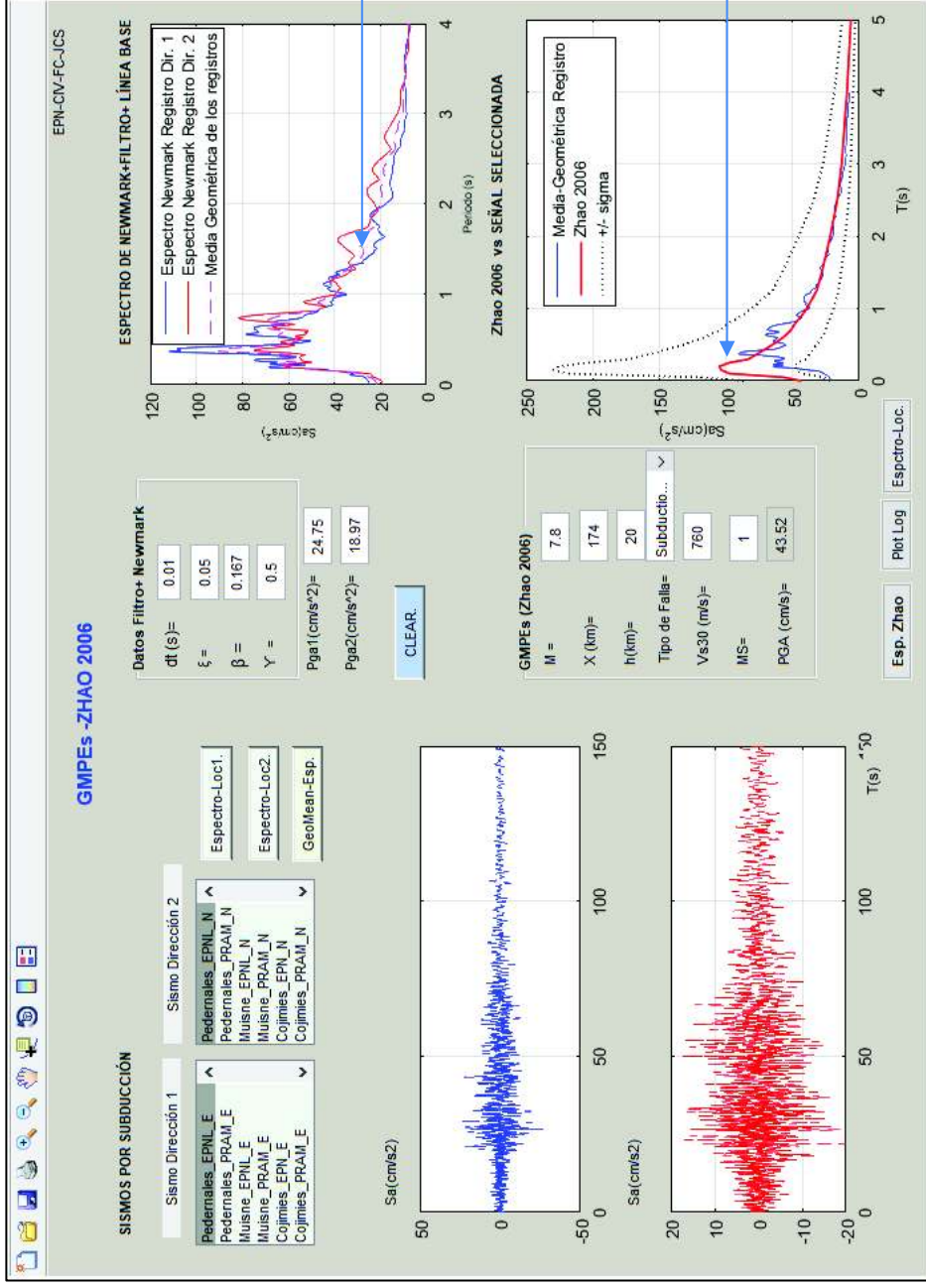
FUENTE: Zhao. 2006.

#### 4.8.3.1. ANÁLISIS DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS REGISTROS SELECCIONADOS Y EL MODELO DE ATENUACIÓN ZHAO 2006

La tabla 4.9 resume las gráficas de la forma de los espectros de respuesta entre las señales locales por subducción registrados por las RED RENAC y el modelo de atenuación. Los sismos que mejor se ajustan son: Pedernales Estación AEPN (a), Pedernales Estación PRAM (b), Cojimíes Estación AEPN (e) y Cojimíes Estación PRAM (f). El modelo de Zhao (2006) tiene una mayor semejanza en sus formas espectrales en comparación con el modelo de Youngs (1997) descrito anteriormente.



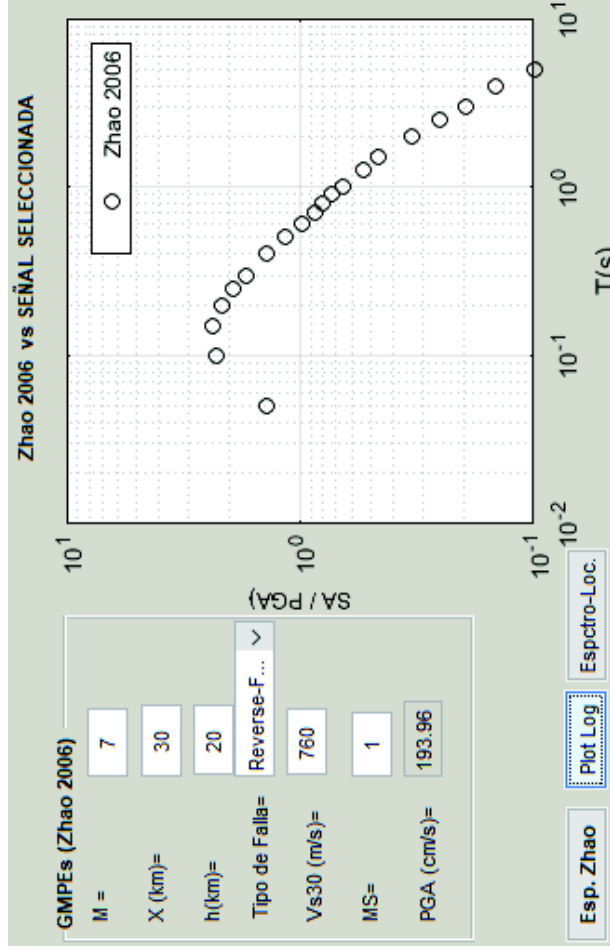
FIGURA 4.11. Modelo de Zhao 2006, Programa GMPE EPNv1.



En la figura 4.11 se muestra el desarrollado del programa **GMPE-EPNv1**, para el modelo de **Zhao (2006)**. En la parte superior izquierda compila los sismos locales por subducción (Tabla 2.20). En la parte superior derecha se grafican las respuestas de las dos señales horizontales (NS y EW) con el método de Newmark, luego se traza la **media geométrica** de las componentes, de acuerdo al requerimiento de la ecuación de atenuación. En la parte inferior derecha muestra la comparación entre el espectro de las señales seleccionadas (Línea azul continua) y la ecuación de atenuación de Zhao 2006 (Línea roja continua).

ELABORADO: Fernando Cañizares

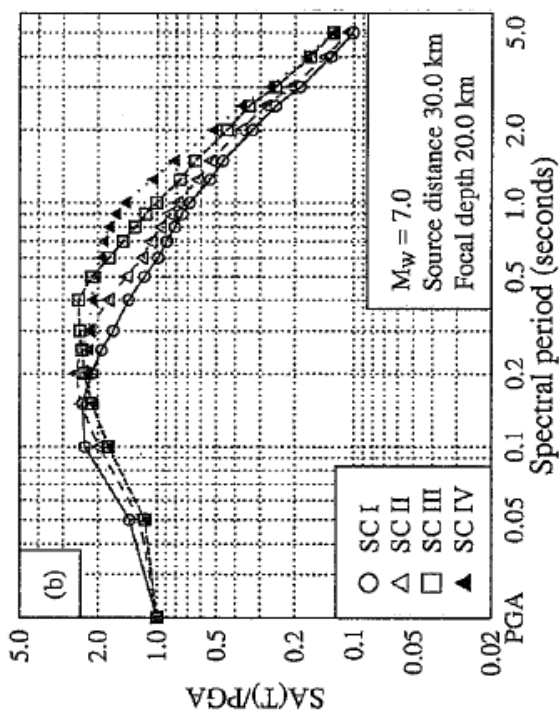
**FIGURA 4.12** Comparación espectro de aceleración con el programa GMPE\_EPN vs modelo de Zhao 2006



Fuente: (Zhao 2006).

ELABORADO: Fernando Cañizares

.. (a)



(b)

En la figura 4.12, muestra la validación del programa GMPE-EPN.v1 (a) y la ecuación de atenuación propuesta por Zhao(1997) (b). De acuerdo a los siguientes datos: M=7, distancia X=30Km, H=20Km y Vs30=760 m/s<sup>2</sup>, SC I, SC II, SC III y SC IV Representa el tipo de suelo. Se aprecia que las gráficas de los espectros de respuesta son semejantes.

**TABLA 4.9.** Comparación modelo de Zhao 2006 y programa GMPEs. EPN V1

<p>Zhao 2006 vs SEÑAL SELECCIONADA</p> <p>GMPEs (Zhao 2006)</p> <p>M = 7.9  X (km) = 174  N (n) = 20  Tipo de Falla = Reversa-F...  Vacio (m/s) = 700  MS = 1  PGA (cm/s²) = 42.33</p> <p>Exp. Zhao Pnl Log Espetra-Loc</p>	<p>Zhao 2006 vs SEÑAL SELECCIONADA</p> <p>GMPEs (Zhao 2006)</p> <p>M = 7.9  X (km) = 171  N (n) = 20  Tipo de Falla = Reversa-F...  Vacio (m/s) = 700  MS = 1  PGA (cm/s²) = 43.71</p> <p>Exp. Zhao Pnl Log Espetra-Loc</p>	<p>Zhao 2006 vs SEÑAL SELECCIONADA</p> <p>GMPEs (Zhao 2006)</p> <p>M = 8.6  X (km) = 100.3  N (n) = 17  Tipo de Falla = Reversa-F...  Vacio (m/s) = 700  MS = 1  PGA (cm/s²) = 9.97</p> <p>Exp. Zhao Pnl Log Espetra-Loc</p>
<p>Zhao 2006 vs SEÑAL SELECCIONADA</p> <p>GMPEs (Zhao 2006)</p> <p>M = 8.6  X (km) = 101.1  N (n) = 15  Tipo de Falla = Reversa-F...  Vacio (m/s) = 700  MS = 1  PGA (cm/s²) = 11.00</p> <p>Exp. Zhao Pnl Log Espetra-Loc</p>	<p>Zhao 2006 vs SEÑAL SELECCIONADA</p> <p>GMPEs (Zhao 2006)</p> <p>M = 8.8  X (km) = 108.3  N (n) = 15  Tipo de Falla = Reversa-F...  Vacio (m/s) = 700  MS = 1  PGA (cm/s²) = 12.24</p> <p>Exp. Zhao Pnl Log Espetra-Loc</p>	<p>Zhao 2006 vs SEÑAL SELECCIONADA</p> <p>GMPEs (Zhao 2006)</p> <p>M = 8.8  X (km) = 108.3  N (n) = 15  Tipo de Falla = Reversa-F...  Vacio (m/s) = 700  MS = 1  PGA (cm/s²) = 12.24</p> <p>Exp. Zhao Pnl Log Espetra-Loc</p>

c) Sismo de Muisne Estación AEPN

b) Sismo de Pedernales Estación PRAM

a) Sismo de Pedernales Estación AEPN

f) Sismo de Cojimies Estación PRAM

e) Sismo de Cojimies Estación AEPN

d) Sismo de Muisne Estación PRAM

ELABORADO: Fernando Cañizares

#### 4.8.4. MODELO ABRAHAMSON ET AL. (2016)

El modelo de atenuación de movimiento fuerte propuesta por Abrahamson et al. (2016), es una ecuación en la cual incluyen nuevos eventos ocurridos a nivel mundial, comprende 2590 registros, de 63 sismos tipo intraplaca, con rangos de magnitudes entre ( $5 < M < 7$ ), y 953 registros de 43 sismos de interface entre 6 y 8.4, para distancias validas hasta 300 km.

$\ln(Sa_{Interface})$

$$= \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + (\theta_2 + \theta_3(M - 7,8)) \ln(R_{rup} + C_4 \exp(\theta_9(M - 6))) \\ + \theta_6 R_{rup} + f_{mag}(M) + f_{FABA}(R_{rup}) + f_{site}(PGA_{1100}, V_{S30})$$

$$\ln(Sa_{Slab}) = \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + (\theta_2 + \theta_{14} F_{event} + \theta_3(M - 7,8)) \ln(R_{hypo} + C_4 \exp(\theta_9(M - 6))) \\ + \theta_6 R_{rup} + f_{mag}(M) + f_{FABA}(R_{rup}) + f_{site}(PGA_{1100}, V_{S30})$$

Donde:

$S_a$ = Aceleración espectral (g).

$M_w$ =Magnitud de momento.

$Z_h$ =Profundidad del hipocentro (km)

$$F_{event} = \begin{cases} 0 & \text{Interface events} \\ 1 & \text{Intraslab events} \end{cases}$$

$$F_{FABA} = \begin{cases} 0 & \text{Forearc} \\ 1 & \text{Backarc} \end{cases}$$

Escalamiento de magnitud:

$$f_{mag}(M) = \theta_4(M - (C_1 - \Delta C_1)) + \theta_{13}(10 - M)^2 \quad \text{Para } M \leq C_1 + \Delta C_1$$

$$f_{mag}(M) = \theta_5(M - (C_1 - \Delta C_1)) + \theta_{13}(10 - M)^2 \quad \text{Para } M > C_1 + \Delta C_1$$

Donde  $C_1=7.8$

Escalamiento de la profundidad:

$$f_{depth}(Z_h) = \theta_{11}(\min(Z_h, 120) - 60) F_{event}$$

El modelo para forearc/backarc:

$$f_{FABA}(R) = \begin{cases} \theta_7 + \theta_8 \ln\left(\frac{\max(R_{hypo}, 85)}{40}\right) F_{FABA} & \text{Para } F_{event} = 1 \\ \theta_{15} + \theta_{16} \ln\left(\frac{\max(R_{hypo}, 100)}{40}\right) F_{FABA} & \text{Para } F_{event} = 0 \end{cases}$$

Efectos de sitio.

$$f_{site}(PGA_{1000}, V_{S30}) = \begin{cases} \theta_{12} \ln\left(\frac{V_S}{V_{lin}}\right) - b \ln(PGA_{1000} + c) + b \ln(PGA_{1000} + c) \left(\frac{V_S^*}{V_{lin}}\right) & \text{Para } V_{S30} < V_{lin} \\ \theta_{12} \ln\left(\frac{V_S^*}{V_{lin}}\right) + b \ln\left(\frac{V_S^*}{V_{lin}}\right) & \text{Para } V_{S30} \geq V_{lin} \end{cases}$$

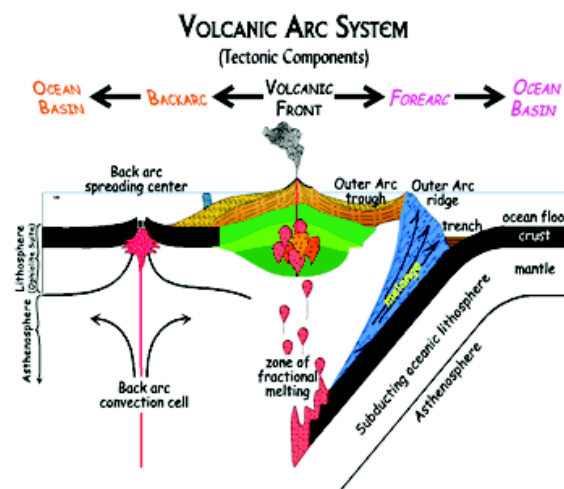
Donde  $PGA_{1000}$  = Media PGA valor para  $V_{S30} = 1000$  m/s.

$$V_S^* = \begin{cases} 1000 & \text{Para } V_{S30} > 1000 \\ V_{S30} & \text{Para } V_{S30} \leq 1000 \end{cases}$$

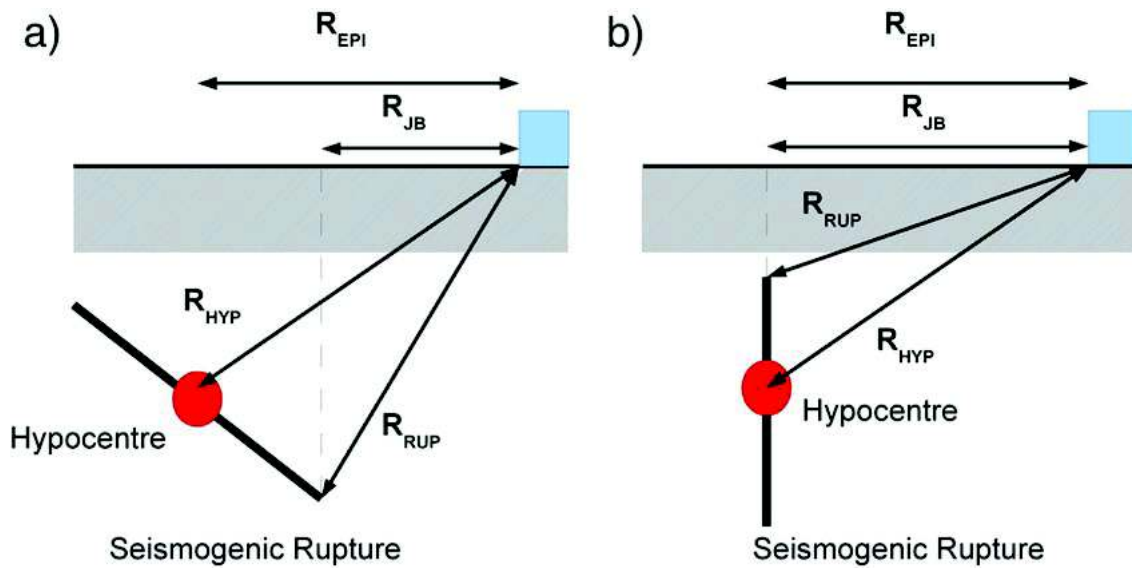
REGIÓN BACKARC: Es la región de la cadena volcánica en el otro lado de la subducción.

REGIÓN FOREARC: Es la región que está entre la zona de subducción y la región montañosa.

**FIGURA 4.13.** Componentes tectónicos del sistema de fallas



FUENTE: Fichter (2015).

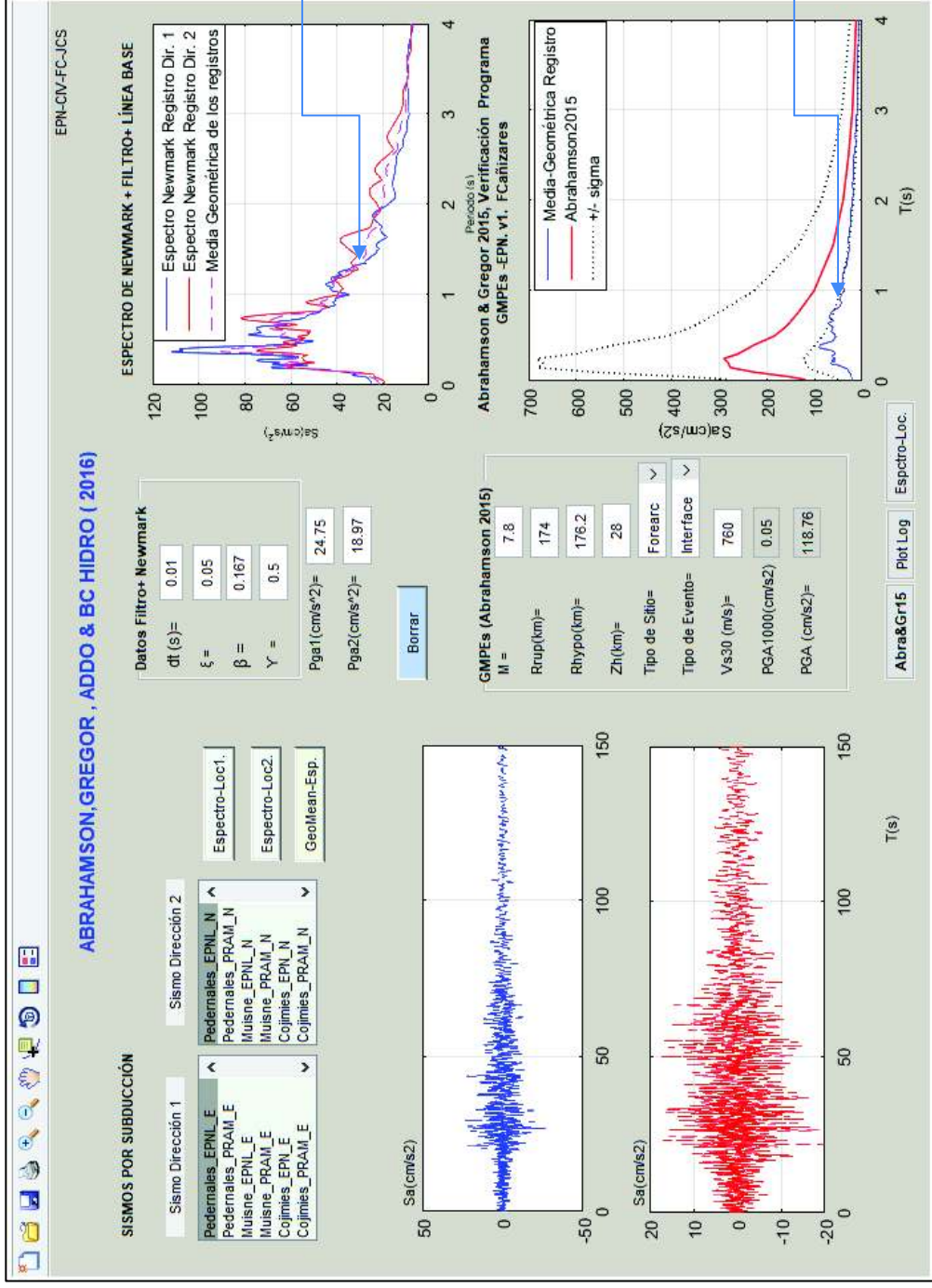
**FIGURA 4.14** Distancias características a la fuente para el modelo

FUENTE: Weatherill., G.&Burton., P. (2010).

#### 4.8.4.1. ANÁLISIS DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS REGISTROS SELECCIONADOS Y EL MODELO DE ATENUACIÓN ABRAHAMSON (2016)

En la tabla 4.10 se observa que las formas espectrales que más se asemejan al modelo de predicción el sismo de Muisne registradas en las estaciones: AEPN (c) y de la estación PRAM (d). Así mismo este modelo incluye nuevos parámetros como, es la ubicación de la fuente sísmica (ver figura 4.13). Además fue necesario calcular la aceleración referencial ( $PGA_{1000}$ ), término que incluye los efectos de la amplificación no lineal del suelo en la ecuación de atenuación GMPE's.

FIGURA 4.15 Modelo Abrahamson., Gregor., Addo, BC Hidro (2016).



En la figura 4.15 se muestra el desarrollado del programa **GMPE-EPNV1**, para el modelo de **Abrahamson et al. (2016)**. En la parte superior izquierda compila los sismos locales por subducción (Tabla 2.20). En la parte superior derecha se grafican los espectros de respuestas de las dos señales horizontales (NS y EW) con el método de Newmark, luego se traza la **media geométrica** de las componentes (Línea discontinua color magenta), de acuerdo al requerimiento de la ecuación de atenuación de Abrahamson 2016.

En la parte inferior derecha muestra la gráfica de la comparación de los espectros de respuesta, entre la media geométrica de las señales seleccionadas y la ecuación de atenuación, así como su respectiva desviación estándar.

ELABORADO: Fernando Cañizares

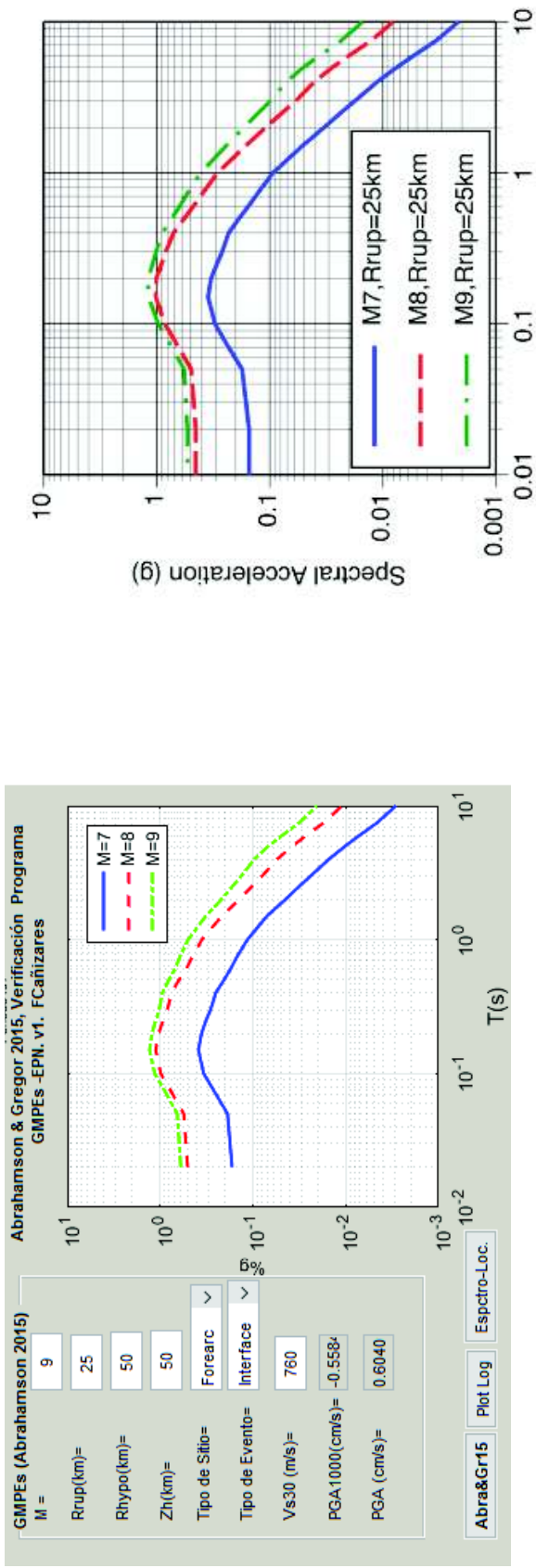
**TABLA 4.10** Modelo Abrahamson, Gregor, Addo BC Hidro (2016).

<p>Abrahamson &amp; Gregor 2015, Verificación Programa GMPES -EPN, v1. Fcañizares</p> <p>H = 7.5          Rsp(10) = 174          Rsp(100) = 170.2          Z(10) = 28          Tipo de Sismo = Forc          Tipo de Evento = Interface          V(30) (ms) = 754          PGA(1000(0.002)) = 0.85          PGA (cm/s<sup>2</sup>) = 118.75</p> <p>AbraGrt5   Pet Log   Espoht-Lic</p>	<p>Abrahamson &amp; Gregor 2015, Verificación Programa GMPES -EPN, v1. Fcañizares</p> <p>H = 7.5          Rsp(10) = 169          Rsp(100) = 171          Z(10) = 28          Tipo de Sismo = Forc          Tipo de Evento = Interface          V(30) (ms) = 700          PGA(1000(0.002)) = 8.05          PGA (cm/s<sup>2</sup>) = 124.27</p> <p>AbraGrt5   Pet Log   Espoht-Lic</p>	<p>Abrahamson &amp; Gregor 2015, Verificación Programa GMPES -EPN, v1. Fcañizares</p> <p>H = 8.6          Rsp(10) = 188.3          Rsp(100) = 191.3          Z(10) = 17          Tipo de Sismo = Forc          Tipo de Evento = Interface          V(30) (ms) = 748          PGA(1000(0.002)) = 0.81          PGA (cm/s<sup>2</sup>) = 26.73</p> <p>AbraGrt5   Pet Log   Espoht-Lic</p>
<p>a) Sismo Pedernales Estación AEPN</p>	<p>b) Sismo Pedernales Estación: PRAM</p>	<p>c) Sismo Muisne Estación EPNL</p>
<p>Abrahamson &amp; Gregor 2015, Verificación Programa GMPES -EPN, v1. Fcañizares</p> <p>H = 6.8          Rsp(10) = 191.1          Rsp(100) = 191.88          Z(10) = 17          Tipo de Sismo = Forc          Tipo de Evento = Interface          V(30) (ms) = 700          PGA(1000(0.002)) = 8.02          PGA (cm/s<sup>2</sup>) = 38.12</p> <p>AbraGrt5   Pet Log   Espoht-Lic</p>	<p>Abrahamson &amp; Gregor 2015, Verificación Programa GMPES -EPN, v1. Fcañizares</p> <p>H = 6.8          Rsp(10) = 188.3          Rsp(100) = 189.29          Z(10) = 15          Tipo de Sismo = Forc          Tipo de Evento = Interface          V(30) (ms) = 748          PGA(1000(0.002)) = 0.82          PGA (cm/s<sup>2</sup>) = 38.12</p> <p>AbraGrt5   Pet Log   Espoht-Lic</p>	<p>Abrahamson &amp; Gregor 2015, Verificación Programa GMPES -EPN, v1. Fcañizares</p> <p>H = 6.8          Rsp(10) = 188.3          Rsp(100) = 189.29          Z(10) = 15          Tipo de Sismo = Forc          Tipo de Evento = Interface          V(30) (ms) = 748          PGA(1000(0.002)) = 0.82          PGA (cm/s<sup>2</sup>) = 38.12</p> <p>AbraGrt5   Pet Log   Espoht-Lic</p>
<p>d) Sismo Muisne Estación PRAM</p>	<p>e) Sismo Cojimies Estación EPNL</p>	<p>f) Sismo Cojimies Estación PRAM</p>

ELABORADO: Fernando Cañizares



**FIGURA 4.16** Comparación del modelo Abrahamson et al. (2016) vs programa GMPEs-EPNV1



ELABORADO. Fernando Cañizares

(a)

En la figura 4.16, muestra la validación del programa GMPE-EPNV1 (a). Con respecto a la ecuación de atenuación propuesta por Abrahamson (2016) (b). De acuerdo a los siguientes datos: Magnitudes Mw=7,8 y 9, distancia Rrup=25Km, velocidad de onda de corte  $V_{s30}=760\text{m/s}$ , sitio forearc y tipo de evento interface. Se grafican los tres espectros de aceleración, se muestra que las gráficas son semejantes

(b)

**FIGURA 4.17.** Comparación del modelo vs programa GMPEs-EPNV1,  $M=7.5$  y  $Vs30=760\text{m/s}$

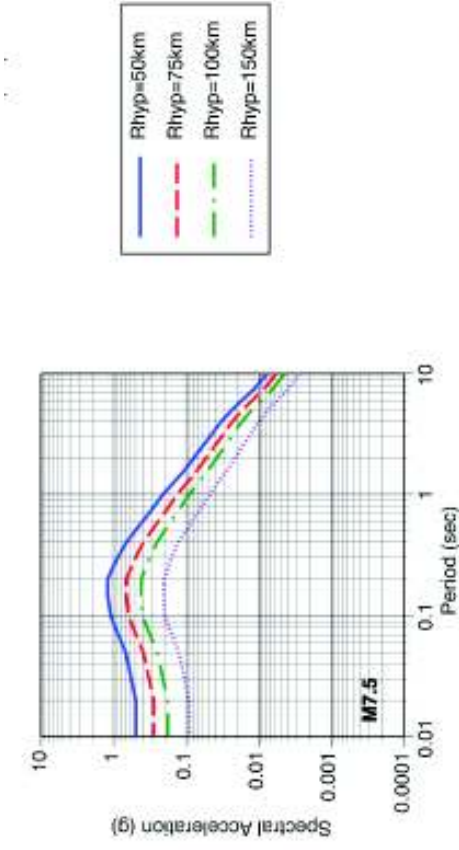
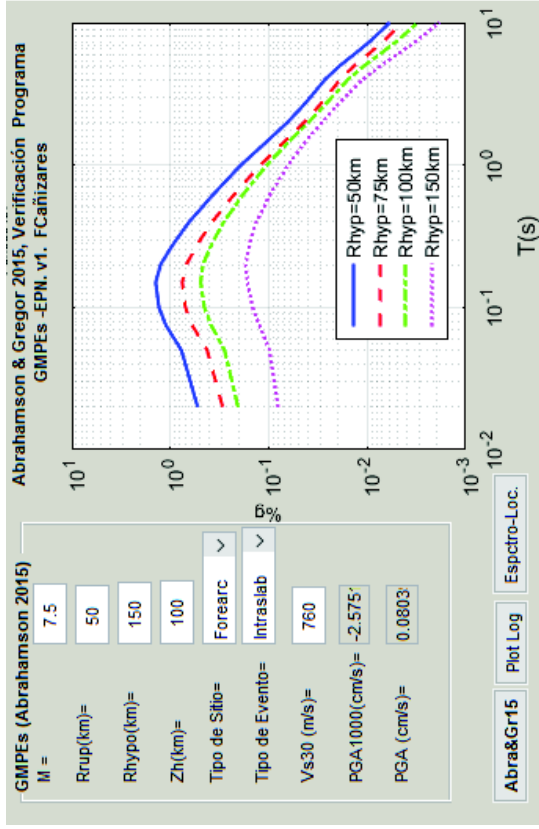


Figure 11. Examples of median spectra for slab earthquakes at a hypocentral depth of 50 km at sites with  $V_{s30}=760$  m/s located in the forearc region.

FUENTE:

ELABORADO: Fernando Cañizares

(a)

(b)

En la figura 4.17, muestra la validación del programa GMPE-EPNV1 (a). Con respecto a la ecuación de atenuación propuesta por Abrahamson (2016) (b). De acuerdo a los siguientes datos: Magnitud  $M_w=7.5$ , distancias  $R_{hyp}=50, 75, 100$  y  $150\text{Km}$ , velocidad de onda de corte  $V_{s30}=760\text{m/s}$ , sitio forearc y tipo de evento intraslab. Se grafican los tres espectros de aceleración, se muestra que las gráficas son semejantes

#### 4.9. ANÁLISIS DE RESULTADOS MÉTODO LOG-LIKELIHOOLD (LLH) PARA LA SELECCIÓN DE GMPES

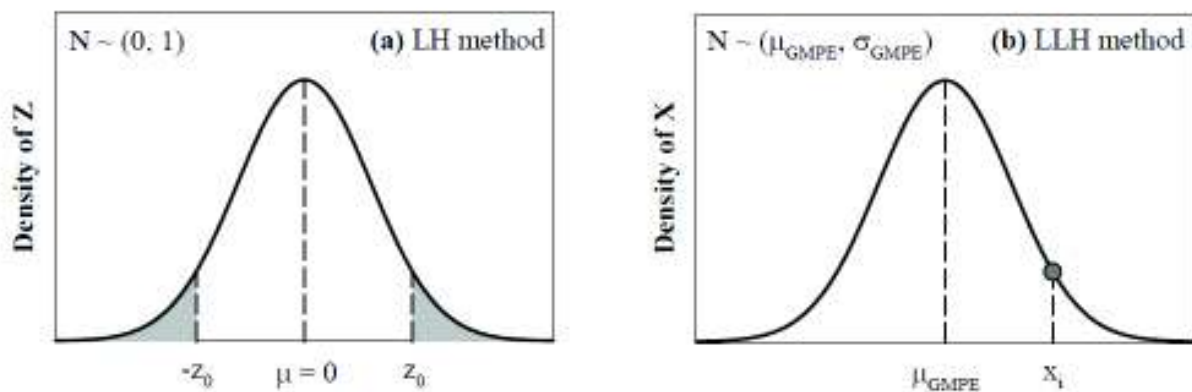
El modelo está basado en el análisis estadístico log-likelihood (LLH), desarrollado por Scherbaum et al (2006), es una medida entre dos funciones continuas de densidad de probabilidad  $f(x)$  y  $g(x)$ . La función  $f(x)$  representa la distribución de los datos observados de un registro. En tanto,  $g(x)$  representa la distribución estimada con la ecuación de atenuación, asumida como una distribución log-normal, con desviación estándar considerada en la GMPE (sigma y tao).

La ecuación para calcular LLH.

$$LLH_{(g,x)} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2(g(x_i))$$

En la ecuación  $x_i$  representa los datos observados para  $i=1, \dots, N$ . El parámetro  $N$  es el total de datos, mientras menor valor de LLH, es la relación entre los datos reales y los datos calculados (Kale., O & Akkar 2012)

**FIGURA 4.18** Esquema de funciones de densidad de probabilidad



FUENTE: A method to determinate the appropriate GMPEs for selected seismic prone region (Kale O. & Akkar 2013)

En la figura 4.18 muestra la función de densidad que permite calcular la probabilidad de que una variable continua tome un cierto valor en el intervalo de

interés  $[-Z_0; Z_0]$ , también se puede representar esta curva conocidos la media y su desviación estándar ( $\mu_{GMPE}$ ,  $\sigma_{GMPE}$ )

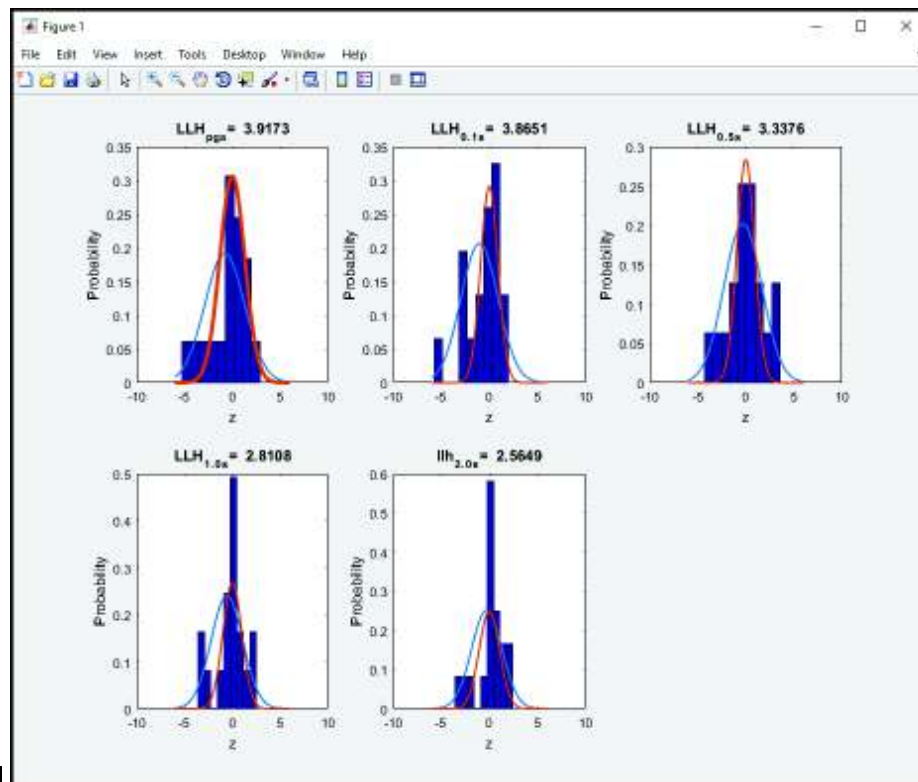
En las figuras 4.19, 4.20 y 4.21, representa el cálculo esquemático del índice log likelihood.

#### 4.9.1. COMPARACIÓN DEL INDICE LOG-LIKELIHOOD (LLH) PARA SISMOS LOCALES SELECCIONADOS Y GMPES

##### 4.9.1.1. LLH PARA SISMOS LOCALES CORTICALES SELECCIONADOS

El índice numérico estadístico log-likelihood, realiza la comparación entre dos funciones, el grado de cercanía y similitud entre dos funciones  $f(x)$  y  $g(x)$ , en este caso la relación entre el espectro de los sismos registrados ( $f(x)$ ) y el espectro de la ecuación de atenuación propuesta  $g(x)$ , el cual nos servirá para visualizar el comportamiento de la aceleración en los periodos (PGA, 0.1, 0.5, 1 y 2 segundos) que finalmente nos servirá para recomendar la mejor ecuación de atenuación.

**FIGURA 4.19** Índice log-likelihood (LLH) Atkinson & Boore 2008

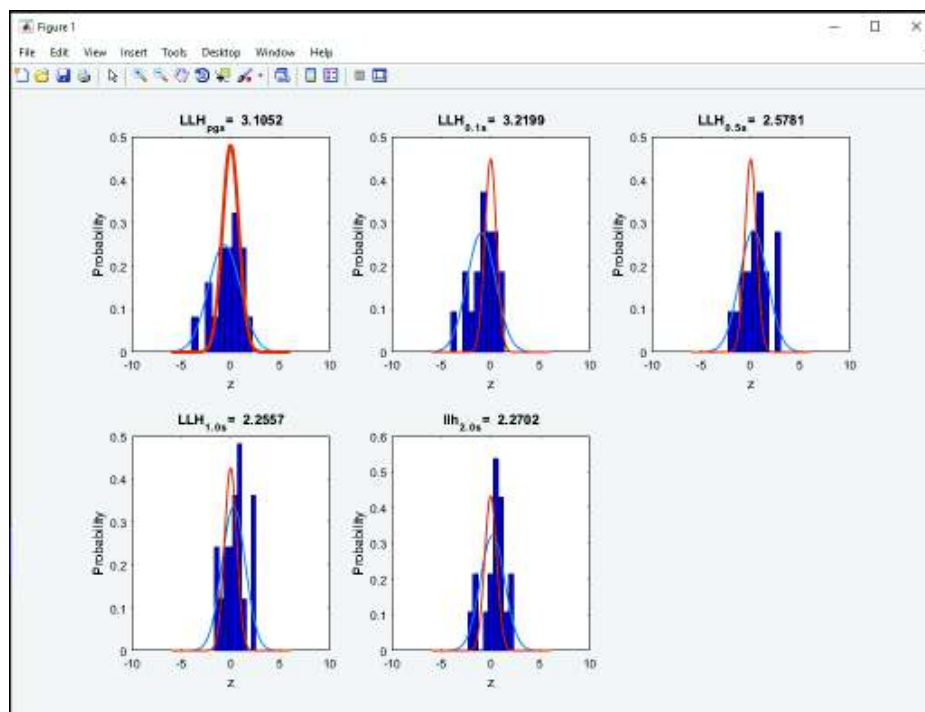


ELABORADO: Juan Carlos Singaicho & Fernando Cañizares

La figura 4.20 representa el cálculo del índice numérico log-likelihood (LLH) en el programa Matlab. La función de densidad de probabilidad de color “marrón”, significan los espectros de respuesta obtenidos con la ecuación de atención propuesta (GMPEs), en tanto que la otra función de densidad de color “azul” representan los espectros de respuesta de las señales registradas o seleccionadas, este índice resultado:  $LLH_{PGA} = 3.9173$ , es decir es la diferencia logarítmica entre las dos funciones de densidad de probabilidad. Este mismo proceso se sigue para los periodos: 0.1, 0.5, 1 y 2 segundos. Los histogramas de color “azul oscuro”, es una ayuda del algoritmo de programación para poder representar las variables de las funciones de densidad de probabilidad respectiva en el intervalo de interés.

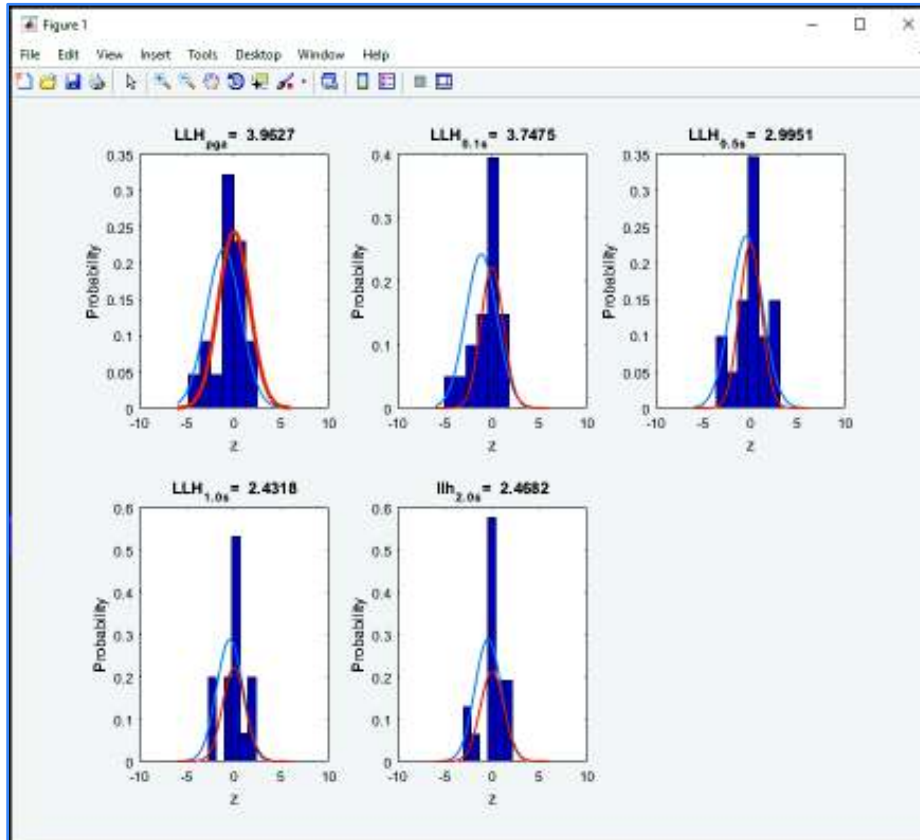
Una manera de verificar que el modelo estadístico es adecuado, es que en los periodos bajos (PGA y 0.1 s) este índice debe ser mayor;  $LLH = 3.1050$  (*los modelos GMPE no predicen adecuadamente en periodos bajos, en relación al valor real registrado*), en tanto que el índice LLH debe ir disminuyendo ( $LLH = 2.2702$ ) para periodos altos (2 segundos).

**FIGURA 4.20** Índice log-likelihood (LLH) Bindi 2013



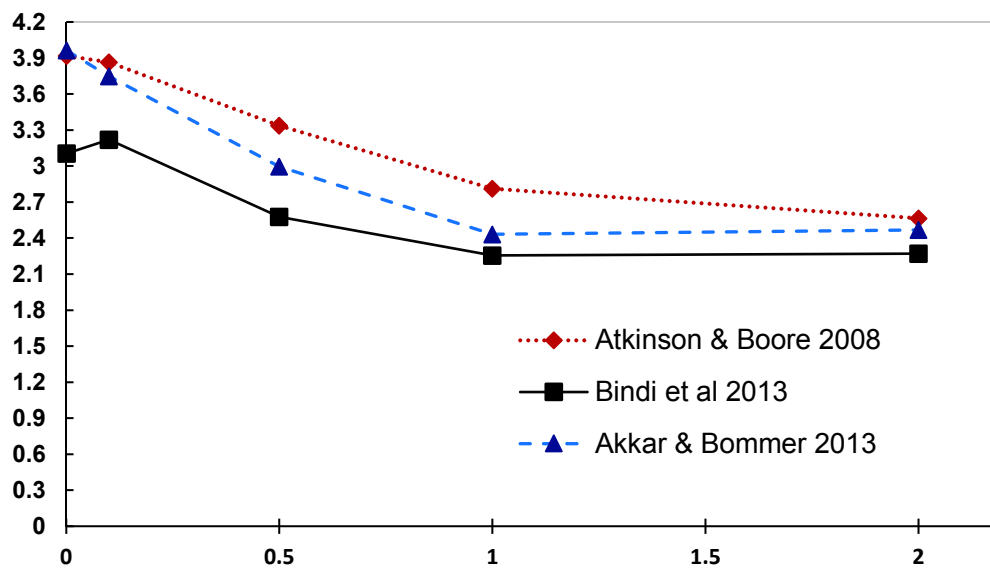
ELABORADO: Juan Carlos Singaicho & Fernando Cañizares

**FIGURA 4.21** Índice log-likelihood (LLH) Akkar y Bommer 2013



ELABORADO: Juan Carlos Singaicho & Fernando Cañizares

**FIGURA 4.22** Índice log-likelihood de los GMPEs para sismos corticales



ELABORADO: Fernando Cañizares

Las graficas mostradas en la figura 4.22 y 4.23, se obtienen graficando los pedidos de interés (PGA, 0.1, 0.2, 0.5, 1 y 2 segundos mostrados en la columna 1 de la Tabla 4.11) con los respectivos valores calculados de LLH (Columnas 2,3 y 4 de la Tabla 4.11) para los diferentes modelos de atenuación y se generan una líneas de tendencia para poderlos comparar gráficamente.

**TABLA 4.11** Valores log-likelihood de las GMPEs para sismos corticales.

PERIODO	ÍNDICE LIKELIHOOD (LLH) PARA GMPE s Y REGISTROS CORTICALES		
	Atkinson&Boore 2008	Bindi 2013	Akkar&Bommer 2013
pga 0.001	3.9173	3.1052	3.9627
0.1	3.8651	3.2199	3.7475
0.5	3.3376	2.5781	2.9951
1	2.8108	2.2557	2.4318
2	2.5649	2.2702	2.4682

Elaborado: Fernando Cañizares

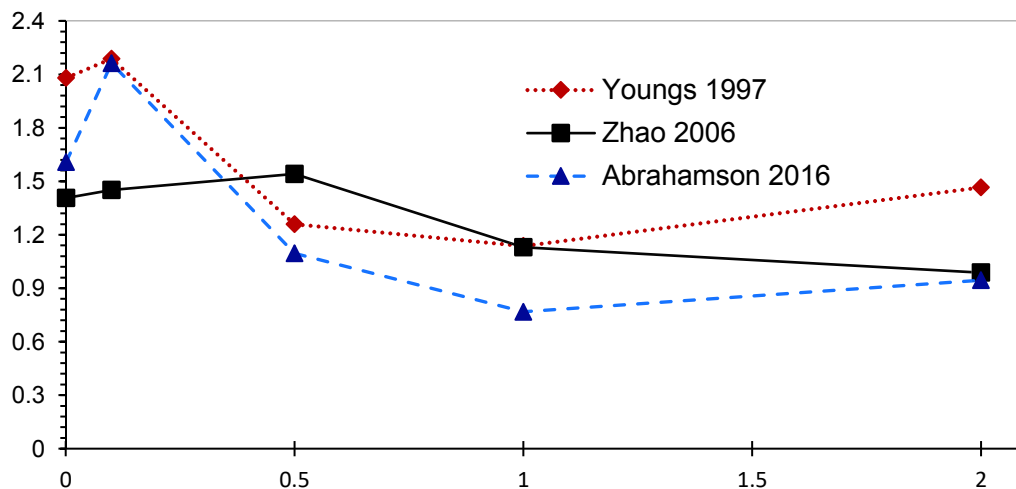
El menor índice log-likelihood (LLH), mostrado en la figura 4.22 y en la Tabla 4.11, es el modelo Bindi (2013). Por tanto este modelo es el que mejor se ajusta entre los datos reales y los calculados, sin embargo, los modelos de Atkinson &Boore (2008) y Akkar& Bommer (2013), también muestra una buena tendencia.

#### 4.9.1.2. LLH PARA SISMOS LOCALES POR SUBDUCCIÓN SELECCIONADOS

Los sismos registrados por la RED RENAC, del IGEPN, se seleccionaron el sismo de Pedernales del 16 de abril 2016, con una magnitud  $M_w=7.8$ . Posteriormente se producen dos réplicas importantes el 18 de mayo 2016, la primera, localizada en el sector de Muisne. La segunda replica ocurrida el mismo día ubicada en la parroquia de Cojimíes, con una magnitud de 6.8. Se comparan estos tres eventos sísmicos reales con los modelos de atenuación Youngs (1997), Zhao (2006) y Abrahamson (2016). Mediante método estadístico log-likelihood.

No se presentan las funciones estadísticas de densidad de probabilidad, debido a que solo se cuenta con tres registros sísmicos por subducción, es decir los datos son insuficientes para representar los histogramas con sus probabilidades de ocurrencia, sin embargo, se muestran los índices (LLH), para comparación de los modelos de atenuación (Figura 4.23).

**FIGURA 4.23** Índice log-likelihood (LLH) para GMPEs, subducción



ELABORADO: Fernando Cañizares



**TABLA 4.12** Valores log-likelihood de los GMPEs sismos por subducción

	PERIODO	ÍNDICE LIKELIHOOD (LLH) PARA GMPE s Y REGISTROS SUBDUCCIÓN		
		youngs 1997	Zhao 2006	Abrahamson 2016
pga	0.001	2.0796	1.4064	1.6082
	0.1	2.1876	1.4507	2.1618
	0.5	1.2598	1.5414	1.095
	1	1.1364	1.1301	0.7681
	2	1.4652	0.9874	0.9454

ELABORADO: Fernando Cañizares

Normalmente los espectros de respuesta reales y calculados con las ecuaciones de atenuación, sus funciones de probabilidad deben ser desfasadas en los periodos bajos (PGA). En tanto que en los periodos altos (2 segundos) las curvas deben ser semejantes. Como muestra los índices de la Tabla 4.12

El menor índice log-likelihood (LLH), mostrado en la figura 4.23, y en la Tabla 4.12, es el modelo Abrahamson et al. (2016). Por tanto este modelo es el que mejor se ajustan entre los datos reales y los calculados, para sismos de origen por subducción.

## **CAPÍTULO 5.**

# **ESCALAMIENTO DE SISMOS PARA ANÁLISIS DINÁMICO DE ESTRUCTURAS**

Las señales internacionales seleccionadas (Tabla 2.20), cumplen la condición de ser compatibles con las condiciones locales de la ciudad de Quito, por tanto estos registros son útiles para procesos de escalamiento, sea para la evaluación o diseño de estructuras según los requerimientos de ACSE/SEI 7, el cual menciona que se necesitan al menos siete registros compatibles para análisis dinámico estructural.

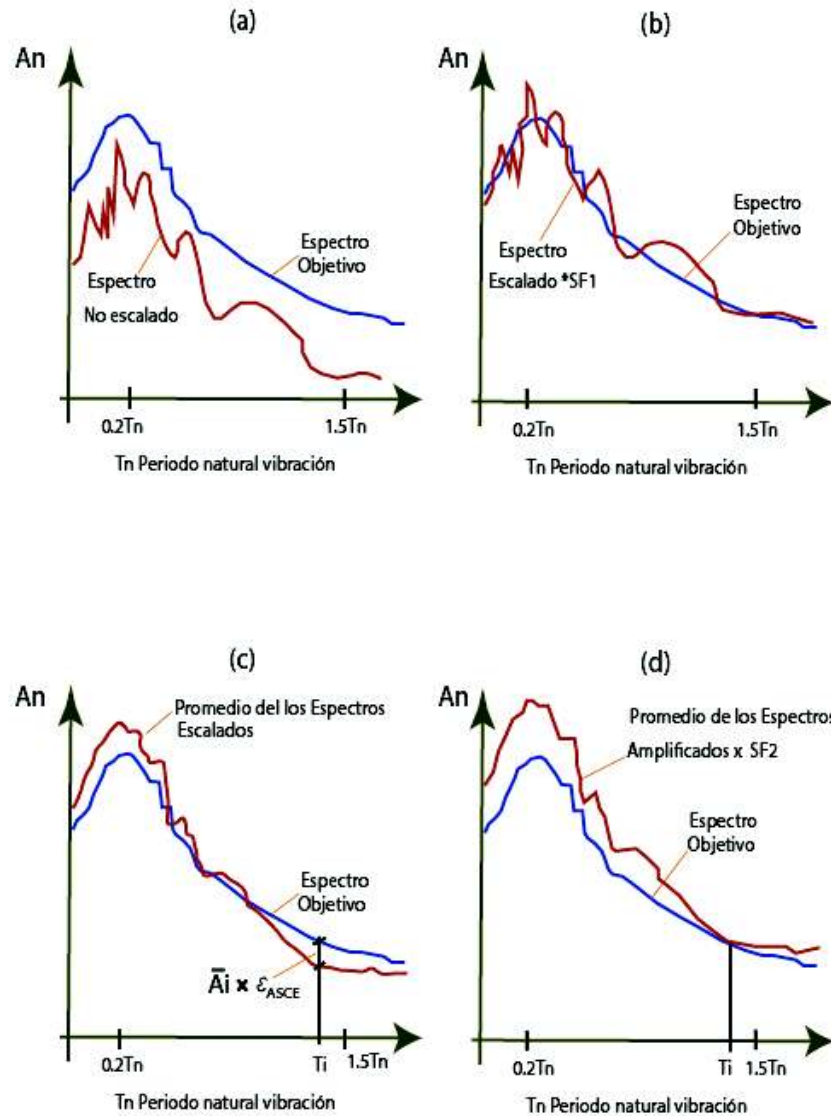
Así mismo, en la ciudad no se dispone de registros de intensidad adecuada para el análisis tiempo historia. Por lo tanto, es necesario el escalamiento de señales.

Se cuenta con dos métodos habituales para obtener historias en el tiempo, para ajuste al espectro de diseño: “Time History Scaling” y “Spectral Matching”; sin embargo, actualmente se proponen nuevos métodos de escalamiento, como es modal pushover scaling (MPS), propuesto por Kalkan y Chopra (2011) y el promedio de los pesos ponderados, propuesto por Constantinou et al. (2013) enfocados para sistemas de aislación de base.

### **5.1. ESCALAMIENTO DE SISMOS SEGÚN ASCE/SEI 7.**

Según ASCE/SEI, se requiere de siete registros compatibles con el entorno de estudio, además el espectro de respuesta debe calcularse con 5% de amortiguamiento, en el rango o periodo de interés será  $0.2T_f$  hasta  $1.5T_f$ , donde  $T_f$  es el periodo fundamental, estas recomendaciones fueron tomadas por estudios de (Kalkan & Chopra 2010.) para proponer una metodología de escalamiento que se describe a continuación:

**FIGURA 5.1** Esquema de escalamiento de sismos (Kalkan & Chopra 2010).



FUENTE: ASCE/SEI 7 Kalkan & Chopra (2010.)

ELABORADO: Fernando Cañizares

## PROCEDIMIENTO.

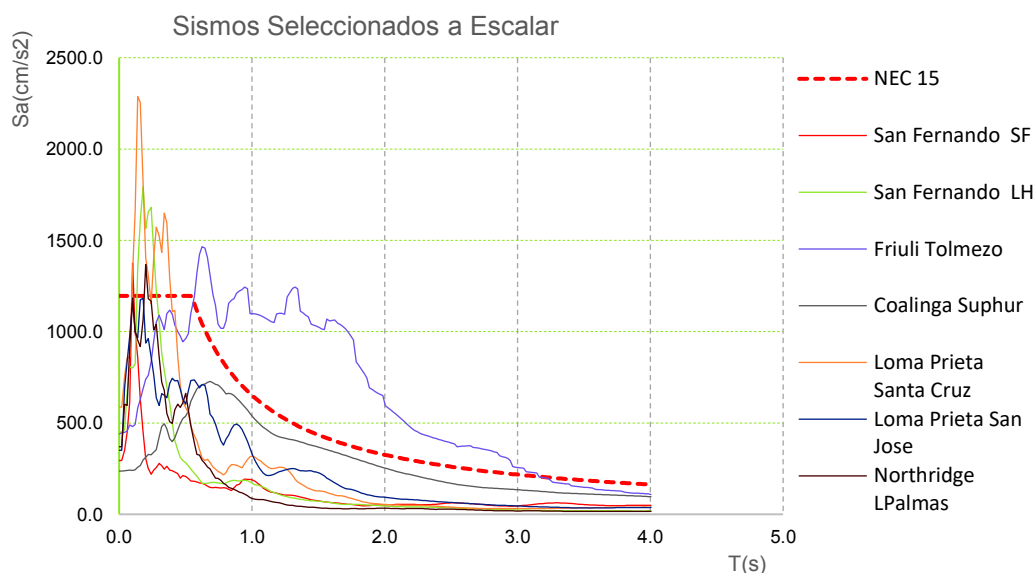
1. Seleccionar el espectro objetivo de pseudo-aceleración. Para este caso se toma el espectro calculado con la norma NEC15, de la ciudad de Quito.
2. Se seleccionan siete registros compatibles, en función de un rango de magnitud, tipo de falla (inversa), distancia a fuente ( $R_{jb}$ ), en el presente trabajo se toman registros sísmicos internacionales.

**TABLA 5.1** Sismos Internacionales seleccionados.

#	Sismo	Estación	Año	Mw.	Rjb	Tipo	dt	Falla
1	San Fernando.	San Felicia.	1971	6.6	24.7	C	0.02	Inv.
2	San Fernando.	Lake Hunges12.	1971	6.6	13.9	C	0.02	Inv.
3	Friuli	Centrale.	1976	6.4	10.2	C	<b>0.005</b>	Inv.
4	Coalinga.	Suphur Barths.	1983	5.7	9.7	C	0.02	Inv.
5	Loma Prieta.	Santa Cruz_UC.	1989	6.9	12.0	C	0.02	Inv.
6	Loma Prieta.	San Jose-Sant.	1989	6.9	14.1	C	0.02	Inv.
7	Northridge.	Gl. Las Palmas.	1994	6.7	21.6	C	0.02	Inv.

ELABORADO: Fernando Cañizares

En la tabla 5.1, se resume los siete sismos seleccionados para el propósitos de escalamiento, con rango de magnitud entre  $M_w=5.7$  a  $6.9$ , distancias  $R_{jb}$ , entre  $9.7-24.7\text{Km}$ , suelo tipo C y fallas tipo inversas, que tratan de simular las condiciones locales de la ciudad de Quito. De acuerdo con las recomendaciones de Kalkan & Chopra (2010.) el sismo objetivo es la media geométrica de los sismos seleccionados. Sin embargo, en este trabajo se toma el espectro NEC 15. Para calcular el espectro target o espectro objetivo. No se tomó los sismos registrados en la ciudad de Quito por ser de baja intensidad.

**FIGURA 5.2** Espectro de los 7 sismos internacionales seleccionados

ELABORADO: Fernando Cañizares

3. Para cada componente en las direcciones  $x$  y  $y$ , de los registros seleccionados, calcular el pseudo-espectro de respuesta con el 5% de amortiguamiento crítico, para este caso se calcula con el método de Newmak, con el programa de la figura 5.3, el mismo que cuenta con la corrección de la línea base y filtro de la señal.
4. Se calcula la raíz de la suma de los cuadrados de cada registro (SRSS).

$$ASRSS_i = \sqrt{A_{x,i}^2 + A_{y,i}^2}$$

5. Para cada registro se calcula el factor de corrección  $Sf1$ , el cual minimiza la diferencia del espectro objetivo (NEC15-Paso 1), el espectro SRSS (Paso 4), resolviendo la ecuación en valor absoluto que minimiza la ecuación de optimización, y tiene por objetivo que los espectros seleccionados escalados por este factor, estén lo más cercano posible al espectro objetivo.

$$sf1 = \|\hat{A}_{OBJETIVO} - sf1 * A_{SRSS}\|$$

Donde:  $\| \cdot \|$  Es la norma euclídea

6. Determinar  $\hat{A}_{SRSS}$ , como el promedio o media geométrica de  $sf1 * A_{SRSS}$  sobre el conjunto de registros.
7. Calcular la máxima diferencia normalizada  $\epsilon_{SRSS}$

$$\epsilon_{ASCE} = \max_{0.2T_1 \leq T_i \leq 1.5T_1} \left( \frac{\hat{A}_{OBJETIVO} - \hat{A}_{SRSS,i}}{\hat{A}_{OBJETIVO}} \right)$$

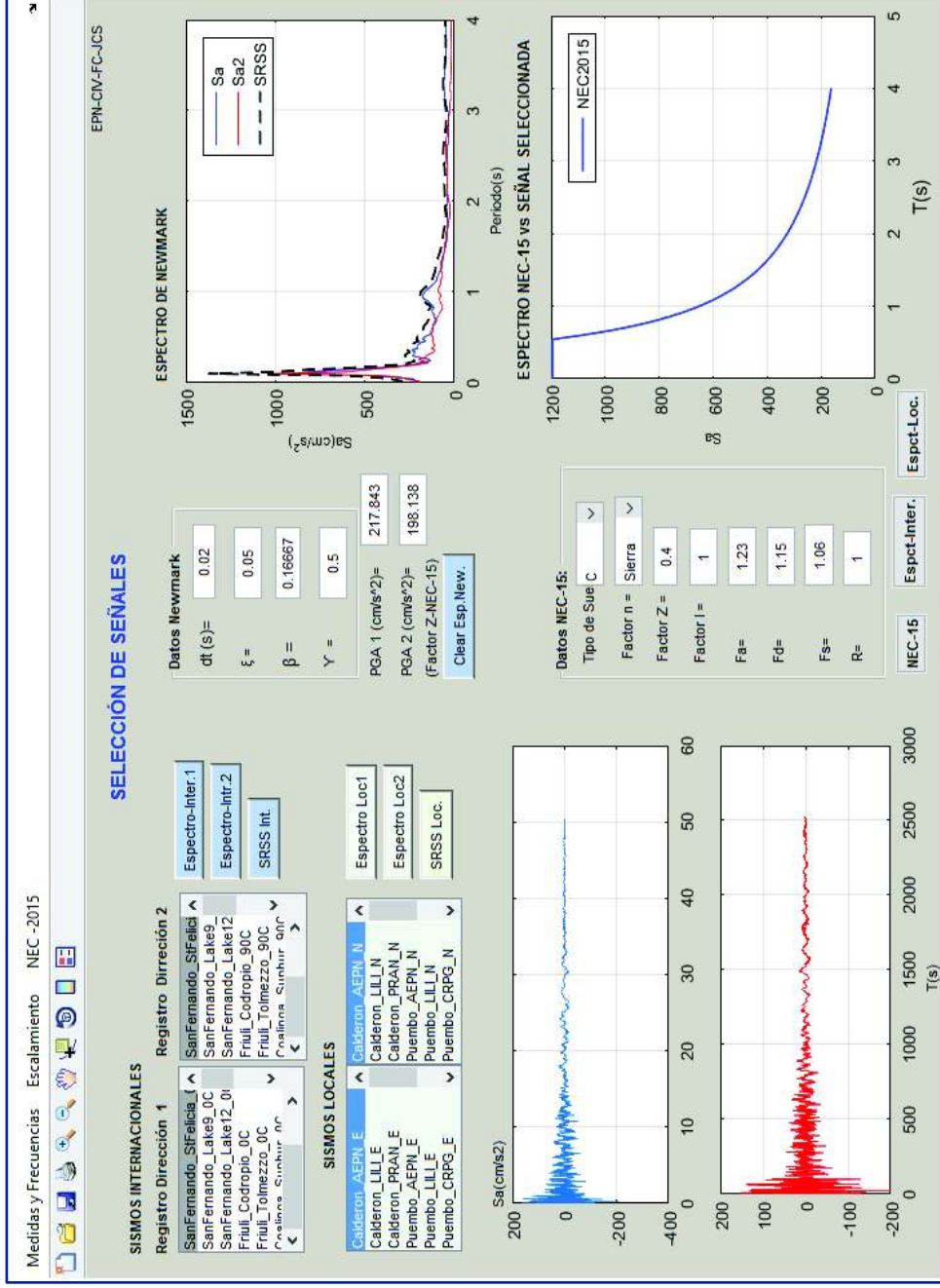
$$SF2 = \frac{1}{1 - \epsilon_{ASCE}}$$

8. Determine el factor de escala final para cada registro sísmico

$$SF = sf1 * SF2$$

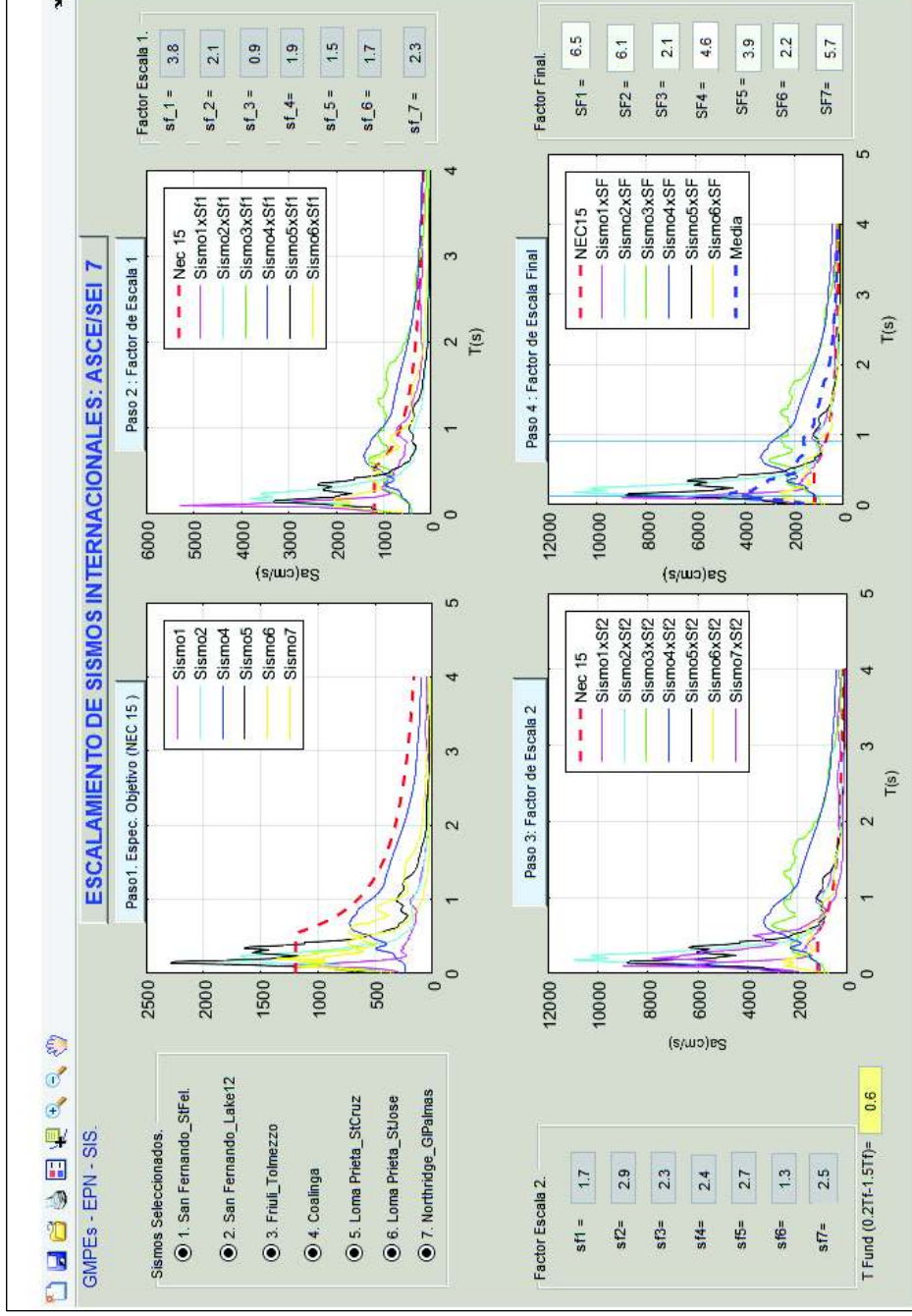
De acuerdo con Parra & Sarango (2016), se propone una fórmula empírica para el cálculo del periodo fundamental de la estructura aproximado  $TL = H/45$ . En el caso del edificio de Ingeniería Civil EPN se tiene  $T = 0,65s$ , dato necesario para proceso de escalamiento de sismos, mediante ASCE/SEI 7

FIGURA 5.3 Selección de señales, cálculo del espectro objetivo NEC15, para el escalamiento de sismos ASCE/SEI 7.

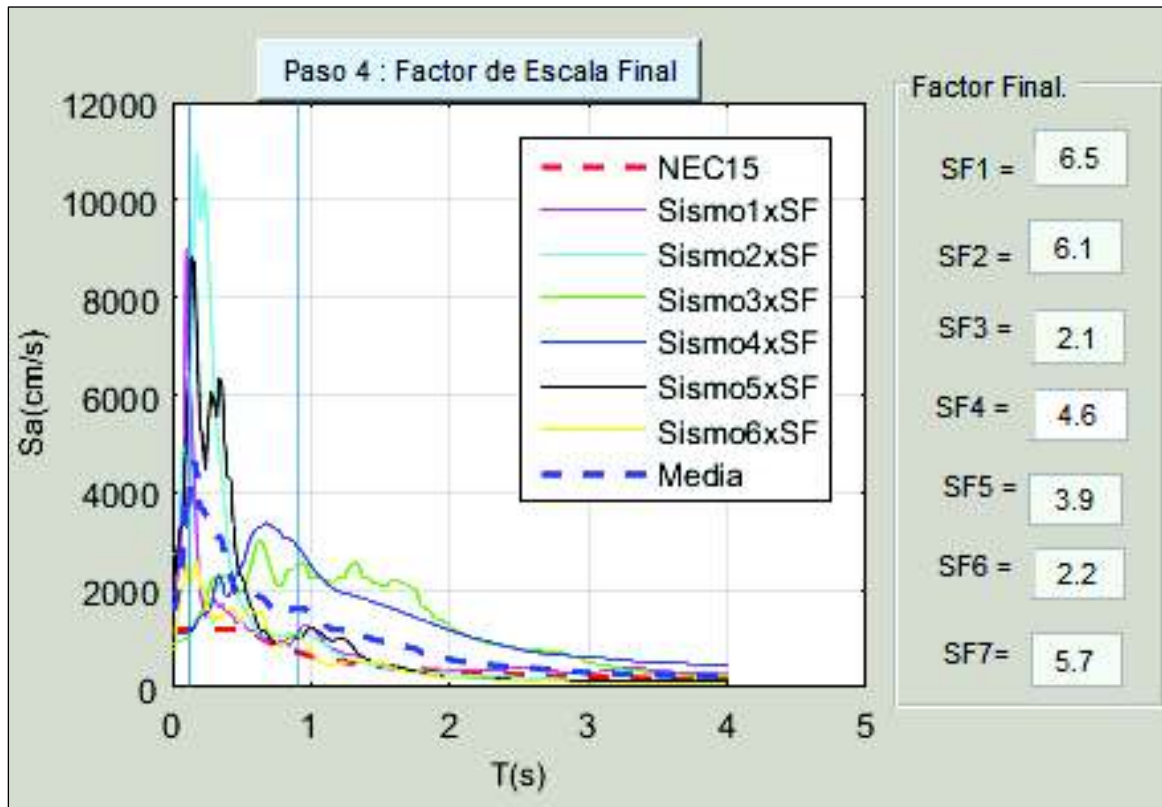


ELABORADO: Fernando Cañizares

**FIGURA 5.4** Escalamiento de sismos internacionales según recomendaciones del ASCE7.



ELABORADO: Fernando Cañizares.

**FIGURA 5.5** Factor de escala final sismos seleccionados

ELABORADO: Fernando Cañizares.

- **VENTAJAS PROCEDIMIENTO ASCE/SEI7**

Usamos registros reales

Conserva la varianza natural de las historias en el tiempo.

Permite enfocarse en periodos de interés

Relativamente fácil si se cuenta con lenguajes de programación principalmente para la ecuación de minimización (Paso 5).

- **DESVENTAJAS PROCEDIMIENTO ASCE/SEI7**

Requiere un lote de registros (3-7 según ASCE7), y compatibles con el espectro de objetivo o de diseño.

Alta dispersión de los cálculos y factores de escalamiento sobre dimensionados.



## 5.2. ESCALAMIENTO DE SISMOS POR EL MÉTODO PROMEDIO DE LOS PESOS PONDERADOS PARA SISTEMAS CON AISLADORES DE BASE

Es un método propuesto para el diseño de estructuras con aisladores de base, con altos periodos de vibración. Este método se basa en la consideración de cuatro periodos de interés (1, 2, 3 y 4) con sus pesos ponderados el procedimiento de acuerdo a los siguientes pasos Constatinou (2016):

- a) El primer valor de escalamiento es  $F_j$  con  $j=1$  hasta  $j=7$ , con la finalidad de disminuir el error entre la componente normal escalada y el espectro objetivo de diseño (NEC15). De acuerdo a la siguiente formula.

$$E_j = \sum_{i=1}^4 w_i [S_{NEC15}(T_i) - F_j \sqrt{S_{FN}(T_i) S_{FP}(T_i)}]^2$$

Reescribiendo la fórmula para el cálculo de  $F_j$

$$F_j = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i S_{NEC}(T_i) \sqrt{S_{FN}(T_i) S_{FP}(T_i)}}{\sum_{i=1}^4 w_i S_{FN}(T_i) * S_{FP}(T_i)}$$

**TABLA 5.2** Pesos considerados para los cuatro periodos de interés

Periodo $T_i$ (s)	1	2	3	4
Peso factor	0.1	0.3	0.3	0.3

FUENTE: Morales et al (2016).

**TABLA 5.3** Factores de escalamiento sismos internacionales seleccionados

	FACTORES PARA ESCALAMIENTO PESOS PONDERADOS						
	$F_{c1}$	$F_{c2}$	$F_{c3}$	$F_{c4}$	$F_{c5}$	$F_{c6}$	$F_{c7}$
$S_{aNEC15}$ (t=1)	648.5	648.5	648.5	648.5	648.5	648.5	648.5
$S_{a}sismo$ SN (t=1)	87.49	62.00	649.96	509.81	125.51	185.31	59.94
$S_{a}sismo$ SP (t=1)	166.36	156.76	967.09	160.97	294.13	264.36	60.47
$S_{aNEC15}$ (t=2)	325.1	325.1	325.1	325.1	325.1	325.1	325.1
$S_{a}sismo$ SN (t=2)	30.39	35.75	247.78	175.57	31.27	56.48	16.37
$S_{a}sismo$ SP (t=2)	41.53	28.23	273.06	181.24	43.60	73.31	28.19
$S_{aNEC15}$ (t=3)	216.9	216.9	216.9	216.9	216.9	216.9	216.9
$S_{a}sismo$ SN (t=3)	27.19	19.92	82.91	76.63	22.54	27.99	9.20
$S_{a}sismo$ SP (t=3)	37.01	12.60	54.04	110.36	21.97	35.94	15.86
$S_{aNEC15}$ (t=4)	162.7	162.7	162.7	162.7	162.7	162.7	162.7
$S_{a}sismo$ SN (t=4)	20.05	17.52	35.30	60.83	34.81	32.88	6.85
$S_{a}sismo$ SP (t=4)	45.20	6.13	37.37	75.02	18.55	17.69	14.69
$F_j$	6.2	8.0	1.0	2.1	4.2	3.6	12.7
$F1=$	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
$F1 * Fj=$	6.8	8.8	1.1	2.3	4.6	4.0	13.9

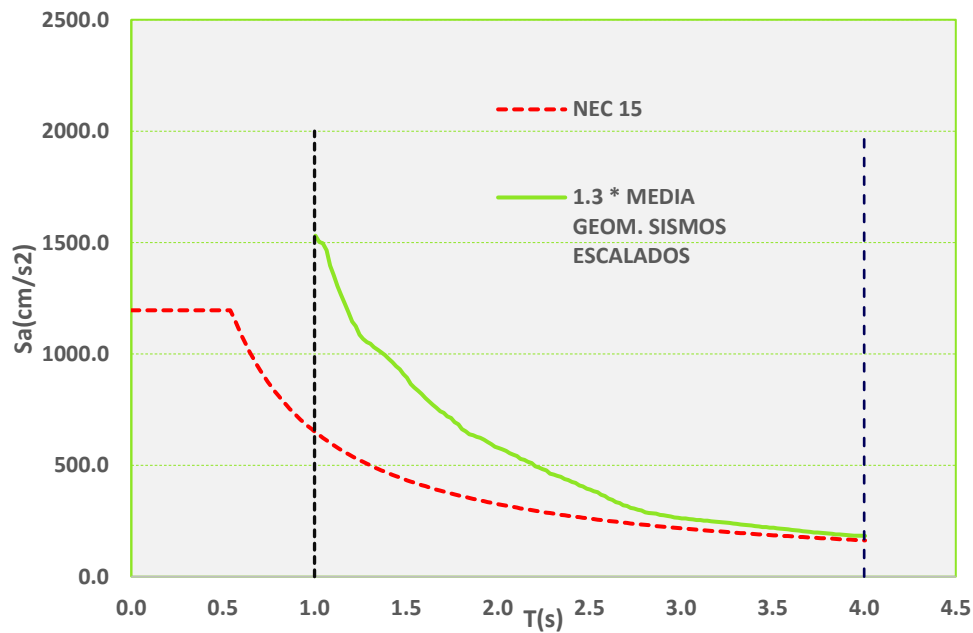
ELABORADO: Fernando Cañizares.

**FIGURA 5.6** Escalamiento de sismos método de los pesos ponderados



ELABORADO: Fernando Cañizares.

**FIGURA 5.7** Escalamiento de sismo objetivo en el periodo de interés



ELABORADO: Fernando Cañizares.

En la figura 5.4, se muestra el factor de escala final para los siete sismos seleccionados (Tabla 5.1) que va desde 2.2 hasta 6.5, y de acuerdo a recomendaciones de Lamprey., W. et al. (2004), el intervalo de aceptable de escalamiento esta entre:2 a 4. Por tanto, cuatro sismos no cumplen esta condición (Figura 5.4), y tres sismos si cumplirían esta condición tomando en cuenta que el espectro objetivo o de diseño fue calculado con las recomendaciones de la NEC15, para la ciudad de Quito.

La Norma de Chile de aislación sísmica NCh2745 (2013), recomienda que para el análisis dinámico tiempo historia, se puede utilizar al menos tres sismos internacionales compatibles, por lo tanto, para nuestro caso podemos tomar esta referencia, y se recomienda utilizar estos tres sismos, que si cumplen la condición con el factor de escala menor a 4

Sismos que cumplen las recomendaciones AISC/SEI 7 son:

- i) Sismo de Friuli Tolmezzo (3)
- ii) Sismo de Loma Prieta St Cruz (5)
- iii) Sismo de Loma Prieta St Jose (6)

En la Figura 5.7, muestra las gráficas de los espectros escalados con método de los pesos ponderados, no se cuenta con una referencia de límites establecidos, sin embargo, los autores recomiendan utilizar este procedimiento para propósitos de análisis de estructuras con aislamiento de base, donde es importante los periodos altos, generalmente entre 1 y 4 segundos.

En el presente trabajo se analizó las recomendaciones AISC/SEI7 y el método de los “Pesos Ponderados”, no se realiza el método del *Modal Pushover Scaling* (MPS), puesto que necesita un modelo real para el cálculo de la curva de capacidad, el cual es un método más real y que esta fuera del alcance del presente trabajo pero se recomienda este tema para futuras investigaciones.

## **CAPÍTULO 6.**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **6.1. CONCLUSIONES**

Es importante el cálculo de la longitud y forma de la falla, mediante las ecuaciones de Wells y Coppersmith (1994), puesto que permite obtener la distancia Joyner Boore ( $R_{jb}$ ). Este dato (5-25Km) influyó principalmente para sismos por fallas corticales. En tanto que, para los sismos por subducción, el cálculo de la distancia al epicentro ( $R_{hyp}$  y  $R_{rup}$ ), no influyó de manera significativa en los resultados, debido a que la longitud, entre la fuente y las estaciones en Quito están alejadas (~190 Km).

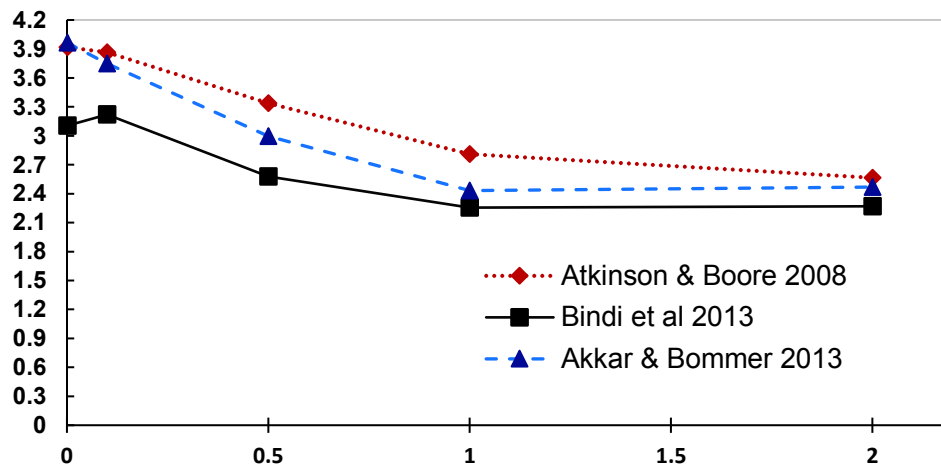
Los sismos internacionales seleccionados (Tabla 2.20) de tipo cortical: San Fernando Lake #9, Coalinga Suphur y Loma Prieta San Jose. Son los que mejor se ajustan a los tres modelos de predicción estudiados. Atkinson & Boore (2008), Bindi (2013) y Akkar & Bommer (2013). De acuerdo con la comparación de sus formas espectrales.

La señal internacional de tipo cortical (Tabla 2.20), que menos se ajusta entre los modelos de atenuación, es el sismo de Friuli Tolmezzo, ubicado en Italia. Sin embargo para los periodos mayores a 2 segundos, las formas espectrales son semejantes.

Los sismos locales (Tabla 2.4) de tipo cortical: Calderón estación AEPN, Calderón estación PRAM, Guayllabamba estación AEPN, Calderón Replica estación AEPN y Calderón replica estación PRAM, son los que mejor se ajustan a los tres modelos de predicción estudiados. Atkinson & Boore (2008), Bindi (2013) y Akkar & Bommer (2013). De acuerdo con la comparación de sus formas espectrales.

El sismo de Puenbo ocurrido el 8 de agosto 2016, registrado en las estaciones LILI y CRPG, difiere entre la señal y el modelo de atenuación, la variación de los registros se debe posiblemente a los efectos de sitio, esta particularidad se presentó igualmente en los modelos de Atkinson & Boore (2008) y Bindi (2013).

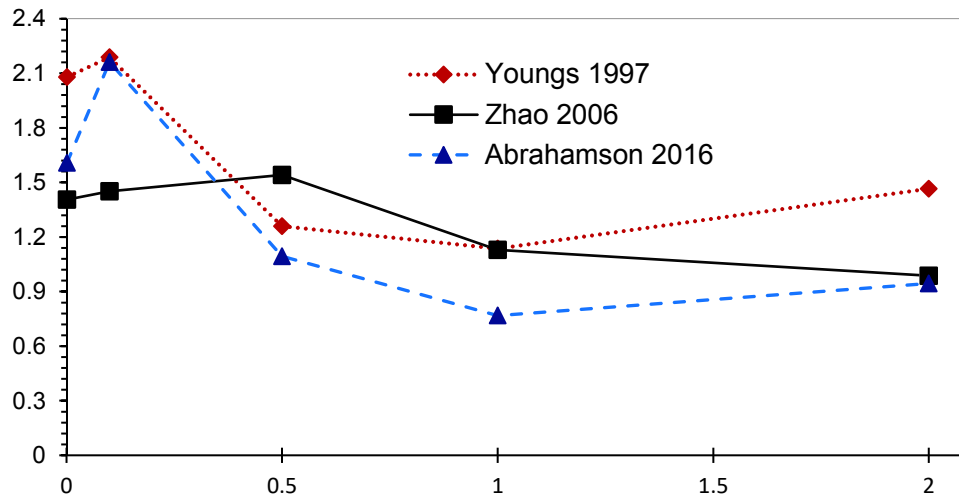
De acuerdo al modelo basado en el análisis estadístico log-likelihood (LLH), mostrado en la siguiente figura, el menor índice de ajuste entre los valores reales y calculados, es la ecuación de atenuación de Bindi et al. (2013), para sismos de origen cortical. Por lo tanto, se podrá utilizar este modelo para el análisis del riesgo sísmico para la ciudad de Quito.



PERIODO	ÍNDICE LIKELIHOOD (LLH) PARA GMPE s Y REGISTROS CORTICALES		
	Atkinson&Boore 2008	Bindi 2013	Akkar&Bommer 2013
pga 0.001	3.9173	3.1052	3.9627
0.1	3.8651	3.2199	3.7475
0.5	3.3376	2.5781	2.9951
1	2.8108	2.2557	2.4318
2	2.5649	2.2702	2.4682

La ventaja de los modelos propuestos (Atkinson&Boore 2008, Akkar&Bommer 2008, y Bindi (2013), son los rangos bajos de magnitud utilizable mínimo 4, es decir los sismos estudiados para la ciudad de Quito, están entre 4 y 5.1, que se ajustan a los modelos estudiados.

De acuerdo al modelo basado en el análisis estadístico log-likelihood (LLH), mostrado en la siguiente la siguiente figura, el menor índice de ajuste entre los valores reales y calculados, es la ecuación de atenuación de Abrahamson et al. (2016) y Zhao (2006), para sismos de origen por subducción la información de señales de aceleración fue muy limitada. Se requiere un análisis más amplio.



PERIODO	ÍNDICE LIKELIHOOD (LLH) PARA GMPE s Y REGISTROS SUBDUCCIÓN		
	youngs 1997	Zhao 2006	Abrahamson 2016
0.001	2.0796	1.4064	1.6082
0.1	2.1876	1.4507	2.1618
0.5	1.2598	1.5414	1.095
1	1.1364	1.1301	0.7681
2	1.4652	0.9874	0.9454

El escalamiento de sismos funciona adecuadamente para sismos, en el cual los espectros seleccionados, sean de similares características al espectro objetivo o de diseño. Caso contrario resultan factores de escala demasiado grandes en principalmente en los periodos bajos (Figura 5.5), Sin embargo la metodología de escalamiento por pesos ponderados, funciona adecuadamente en los periodos altos (Mayores a un segundo). Puesto que está enfocada al análisis de sistemas de aislación de base, donde normalmente se trabaja con periodos en el rango de 1 y 4 segundos (Figura 5.7).

## 6.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda que para una futura actualización de la norma Ecuatoriana de Construcción (NEC 15), o para estudios de riesgo sísmico de Quito, se pueda utilizar los modelos de atenuación de Akkar y Bommer 2013 y Bindi et al. 2013. Los mismos que incorporan nuevos parámetros en las ecuaciones como: la amplificación lineal y no lineal del suelo. En tanto que para fallas por subducción se recomienda un modelo de Abrahamson et. al., (2016). Puesto que estos modelos cuenta con la validación de los eventos reales registrados en la red RENAC, del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (2015), principalmente con el sismo de Pedernales (2016) y sus réplicas.

Al momento de seleccionar ciertos registros internacionales, la información referente a las estaciones sísmicas, como son los datos de la velocidad de onda de corte ( $V_{s30}$ ) y distancia a la fuente ( $R_{jb}$ ,  $R_{epi}$  o  $R_{hyp}$ ) son insuficientes. Por tanto se recomienda descartar estos registros, a pesar de ser compatibles con las características de Quito, principalmente a la forma de falla inversas y tipo de suelo C o D. Debido a que estos factores son importantes al momento de calcular las ecuaciones de atenuación.

Los modelos de predicción de las ecuaciones de atenuación son aplicables para régimen cortical y los de subducción, se recomienda utilizar las mismas ecuaciones para zonas diferentes a la ciudad de Quito. Propuestas en este estudio y dependiendo al tipo de falla al que estén expuestos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Abrahamson, N., Silva, W., Kamai R., (2013).** Update of the AS08. Ground Motion Prediction Equations Based on the NGA-West2 Data Set. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 143P.
- **Abrahamson, N., N. Gregor, and K. Addo (2016).** BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes, Earthq. Spectra 32, no. 1, 23–44.
- **Akkar, S., Sandıkkaya, M. A. and Bommer, J. J. (2013).** Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East, Bull Earthquake Eng, Springer Science+Business Media Dordrecht 2013. 10518-013-9461-4.
- **Alvarado (2012).** Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur, Thèse Pour obtenir le grade de Docteur Institut de Sciences de la Terre de Grenoble (ISTerre).
- **Yepes H., Alvarado A., Segovia M., Egred., J., Ruiz M., Ouiller B., Chatellain J., Villagómez D., 2001.** El sismo de Pujilí (5.9 Mw) del 28 de marzo de 1996. Revista Politécnica, vol. XXII. No. 2. pp. 107-114.
- **Alvarado, A., L. Audin, J. M. Nocquet, S.Lagreulet, M. Segovia, Y. Font, G.Lamarque, H. Yepes, P. Mothes, F. Rolandone, P. Jarrin, and X. Quidelleur (2014).** Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity ©2014. American Geophysical Union. All Rights Reserved.
- **ASCE7/SEI (2007).** Desing Provisions for Seismically Isolated Buildings, Minimum Desing Loads for Buildings, Reston VA.
- **Ambazhagan (2012).** Ground motion prediction equation considering combined dataset of recorded and simulated ground motions Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science. Copyright & 2013 Published by Elsevier
- **Atkinson, G. and Boore, D. (2014).** Atenuation of Fourier Amplitudes for Rock Sites in Eastern North America, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 104, No. 1, pp. 513–528, February 2014.



- **Baker, J. (2013)** Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis, White Paper V. 2.0, 79 pp. Topic Hazard/Risk.
- **Barbat, A., Yépez, F., y Canas, J. (1995)** Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería. Politécnica de Cataluña España, Monografía CIMNE IS-12-1995.
- **Bernal, G.A., Ordaz, M.G., Salgado, M.A., Cardona, O.D., y Barbat, A.H. (2015)**. Procedimiento numérico para la calibración de un modelo de espectro de fuente para la obtención de funciones de atenuación y su aplicación en Colombia. Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, Universidad de los Andes, Bogotá.
- **Benito, B., (1993)**. Estimación de parámetros sísmicos y espectros de respuesta característicos del movimiento del suelo en emplazamientos de la Península Ibérica. Monografía N.0 8, I.G.N.
- **Boore, D. and Atkinson, G. (2008)**. Ground Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV AND 5%-Damped PSA at spectral periods between 0,01s and 10s. Earthquake Spectra, Volume 24, No. 1, pages 99–138, February 2008; Earthquake Engineering Research Institute.
- **Boore, D. M. and Atkinson, G. M., (2007)**. Boore-Atkinson NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters, PEER Report 2007/01, Pacific Earthquake Engineering Center, Berkeley, California.
- **Boore,D. and Atkinson, G. (2008)**. Notes on the Equation to Use for Pga4nl.  
C:\peer\_nga\report\notes\_on\_pga4nl\_in\_boore\_atkinson\_eq\_spectra\_2008\_(v1.0).doc Viewed/modified on 3/21/2008.
- **Bommer JJ, Acevedo AB (2004)**. The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis. J Earthquakes Eng 2004, 2004;8(4):1-50
- **Burton, P.W., Hainzl, S. & Lasocki, S., (2006)**. Spatiotemporal Models of Seismicity and Earthquake Occurrence, Special Issue Tectonophysics, 423, 148 pages.

- **Carreño, E., Bravo, B., Suarez, A. y Tordemillas J.M. (1999).** Registro y tratamiento de los acelerogramas, Física de la Tierra 1999, 11: 81-111.
- **Campbell K., Bozorgnia Y. (2013).** NGA- West2, Campbell-Bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV and 5%-Damped elastic, Pseudo-Aceleration response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 sec. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, CA.
- **CENAPRED 2015.** Centro Nacional de Prevención de Desastres de la Ciudad de México Publicaciones Riesgo Geológico, Cuaderno de Investigación "Bases de Datos para la Estimación de Riesgo Sísmico en la Ciudad de México", Versión electrónica 2015.
- **Constantinou, M.C, Kalpakidisk, I., Filiatrault A., Ecker R.A., (2011),** LRFDBased Analysis and Designs Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators, MCEER Report 11-0004, September 26, 2011.
- **Cornell, C.A. (1968).** "Engineering Seismic Risk Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, No. 5, pp. 1583–1606.
- **Charton (1867)** Quito antiguo punto de vista, Ecuador. Creado por Therond después Charton, publicado en "Le Tour du Monde", París, 1867.
- **Choiu, B., Youngs R. (2013).** Update of the Choiu and Youngs NGA, ground motion model for average horizontal component of peak ground motion and response, PEER Report 2013/07, 105p., Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, CA.
- **Fichter L (1996).** James Madison University Image courtesy of Lynn Fichter Department of Geology and Environmental Studies (Geology home page [Http://Csm.Jmu.Edu](http://Csm.Jmu.Edu). Tectonic Rock Cycles: Journal of Geoscience Education, Vol. 44, pp 134-148.
- **Kale, O Akkar (2013).** A New Procedure for Selecting and Ranking Ground-Motion Prediction Equations (GMPEs): The Euclidean Distance-Based Ranking (EDR) Method
- **Kalkan, E. and Chopra, A.K. (2010).** Practical Guideline to Select and Scale Earthquake Records for Nonlinear Response History Analysis of Structures: US. Geological Survey Open-File Report 2010,113p.
- **Kramer, S. L. (1996).** Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J. State: All. Topic: Hazard/Risk. Links: Geotechnical.

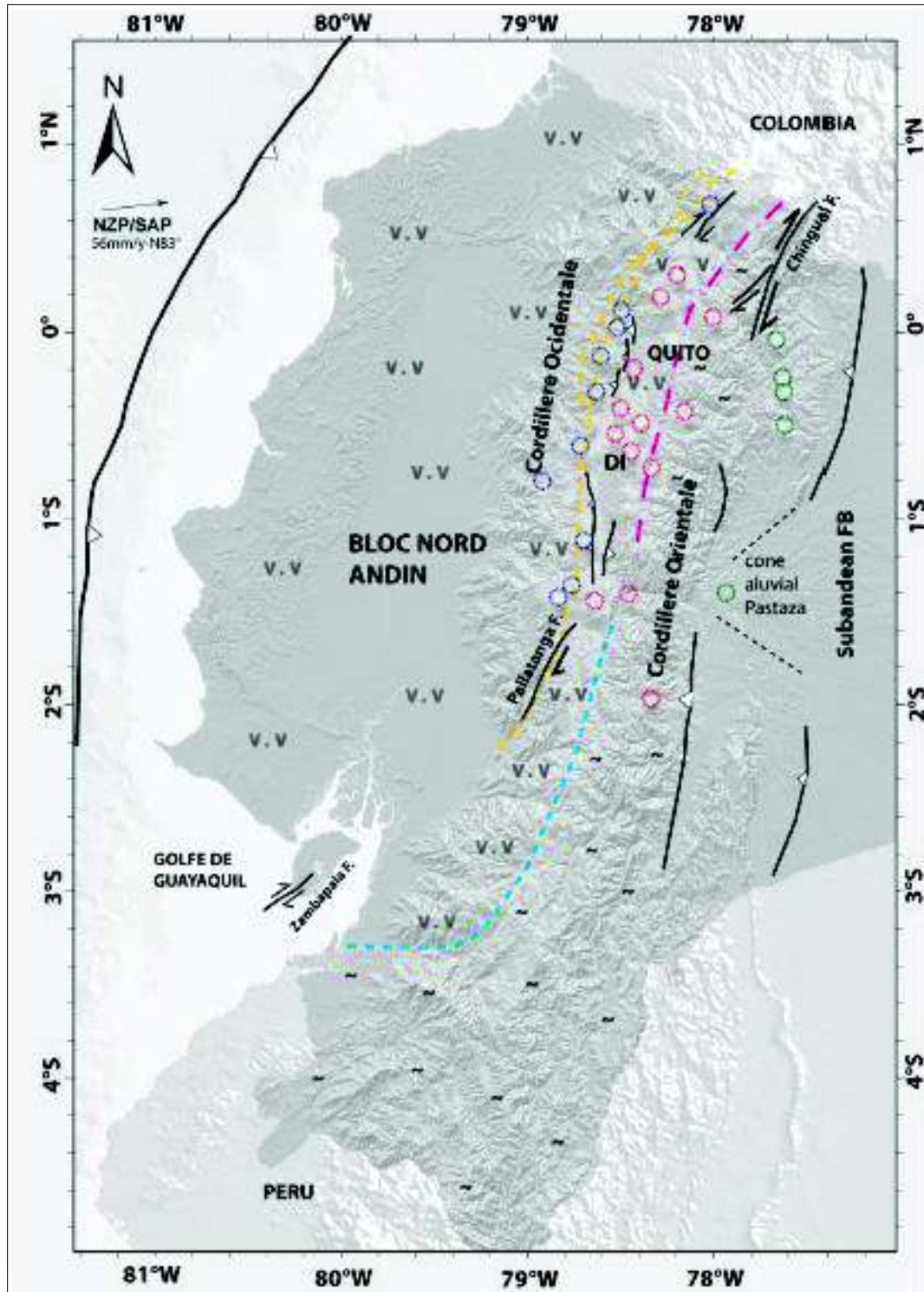
- **Lamprey., W. J. & Abrahamson, N. (2004).** Selection of ground motion time series and limits on scaling, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26 (2006) 477-482. University California at Berkeley.
- **López, E. (2016).** Estudio de Relaciones Espectrales V/H Asociado al Sistema de Fallas de Quito, Tesis Previa a la Obtención de Magister en Estructuras. Facultad de Ingeniería Civil EPN 2016.
- **McGuire, R.K. (1978).** “A Simple Model for Estimating Fourier Amplitude of Horizontal Ground Acceleration”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 68, No. 3, pp. 803–822.
- **Morales E., Constantinou, M.C., Aguiar, R., Caiza, P. (2016).** Desempeño de Aislador fpt8833/12-12/8-5 en el Análisis Sísmico del Centro de Investigaciones y de Post Grado de la Ufa-Espe. 2016.
- **NEC15 (2015).** Norma Ecuatoriana de la Construcción, Peligro Sísmico Diseño Sismoresistente Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda 2014, código. NEC-SE-DS.
- **Parra & Sarango (2016)** Análisis Estadístico del Periodo Experimental de Vibración en Edificios Aporticados de Hormigón Armado en el Distrito Metropolitano de Quito. Tesis Previa a la Obtención de Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería Civil EPN 2016.
- **Quizanga, M. (2016).** Espectros Específicos para La Ciudad de Quito en Función de las Fallas Ciegas Inversas. Tesis Previa a la Obtención de Magister en Estructuras. Facultad de Ingeniería Civil EPN 2016.
- **Restrepo (2013).** Estudio de peligro sísmico Central Hidroeléctrica Minas San Francisco Astec-Geodata 2013.
- **Rivas, A., Medina 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. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- **Scherbaum, F., Bommer, J. J., Douglas, J., Cotton, F., Bungum, H., Fäh, D. (2010):** On the Selection of Ground-Motion Prediction Equations for Seismic Hazard Analysis. - *Seismological Research Letters*, 81, 5, pp. 783—793.

- **Scherbaum, F., Kuehn, N., and Zimmerman, B. (2009).** "Earthquake Focal Mechanism" from The Wolfram Demonstrations Project <http://demonstrations.wolfram.com/EarthquakeFocalMechanism/>  
Published December 10, 2009
- **Singaucho (2015)** Notas de clases de la materia de Riesgo Sísmico. Maestría en Estructuras. Escuela Politécnica Nacional Presentaciones 2015 B.
- **Taibe, M (2013).** Análisis de las Ecuaciones de Predicción de Movimientos de suelo para el Ecuador Utilizando Datos Registrados Durante el Periodo 2000 - 2011 en las Estaciones Sísmicas de Banda Ancha y Acelerógrafos, Tesis Previa a la Obtención de Título de Ingeniería en Geología. EPN 2013
- **Toledo V. 2016.** Cálculo y diseño de edificios, avances del Diplomado Ingeniería Sísmica 2016, CINCIVIL. 2015 Pág. 94.
- **USACE1110 (1998)** US Army Corps of Engineers. ENGINEER MANUAL Response Spectra and Seismic Analysis for Concrete EM 1110-2-6050. 30 June 1999.
- **Villaverde (2012).** Fundamental Concepts of Earthquake Engineering Published by CRC. Press SBN 10: 14 ISBN
- **Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. (1994).** "Analysis of Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Area, and Surface Displacement," Bulletin of the Seismological Society of America, v. 84, p. 974-1002.
- **Yepes H, (2014).** "Breve Reseña de los Sismos Provenientes de la Falla Geológica de Quito que han Afectado a la Capital". Grenoble, 13 Agosto 2014. Instituto Geofísico EPN.
- **Youngs, R.R., Chiou, S.J., Silva, W.J., and Humpphery, J, R. (1997).** Strong Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. Seismological Research Letters. Volume 68, No. 1.
- **Zhao, J. X., Irikuta, J., and Akihiro A. (2006).** Attenuation relations of strong ground motion in Japan using classification base on predominant period. Article in Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 3, pp. 898-913, June 2006.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

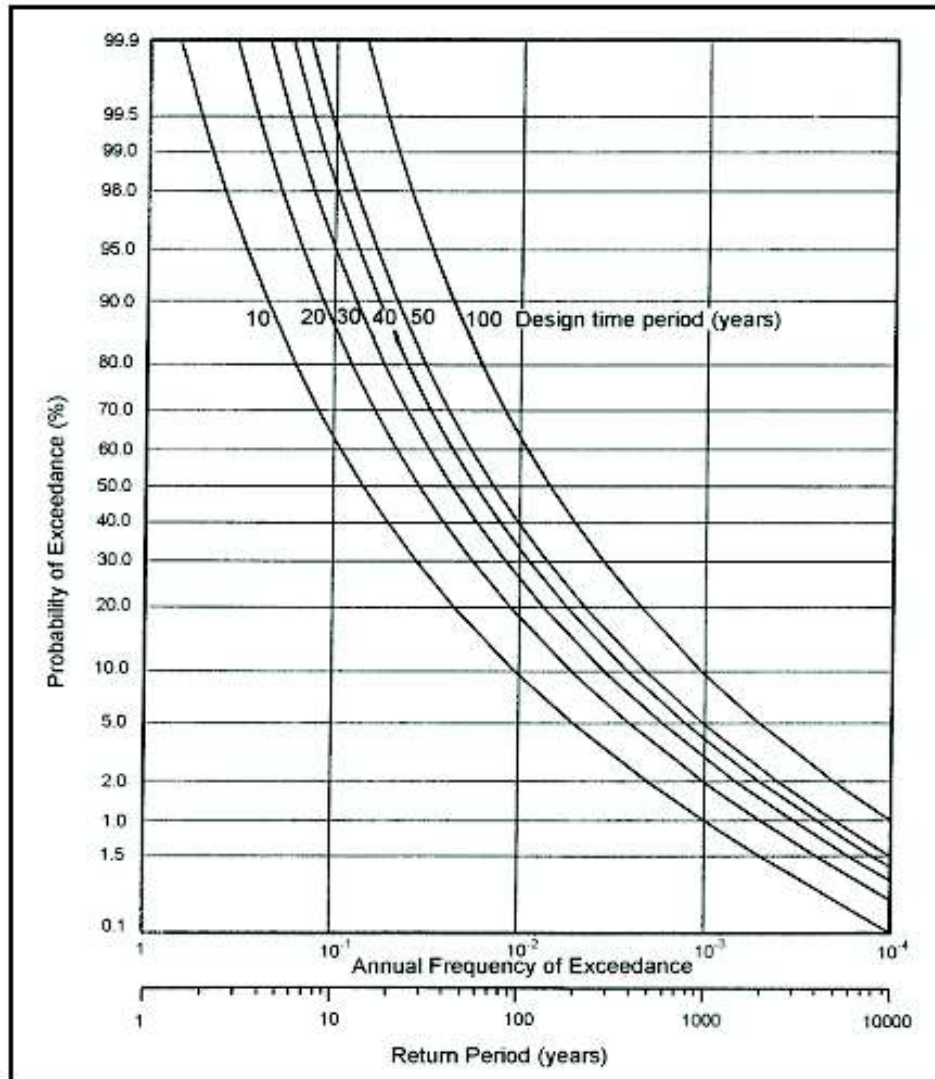
FIGURA A.1 Mapa de fallas de Ecuador



FUENTE: Alvarado (2012)

## ANEXO 2

FIGURA A.2 Relación periodo de retorno vs probabilidad de excedencia

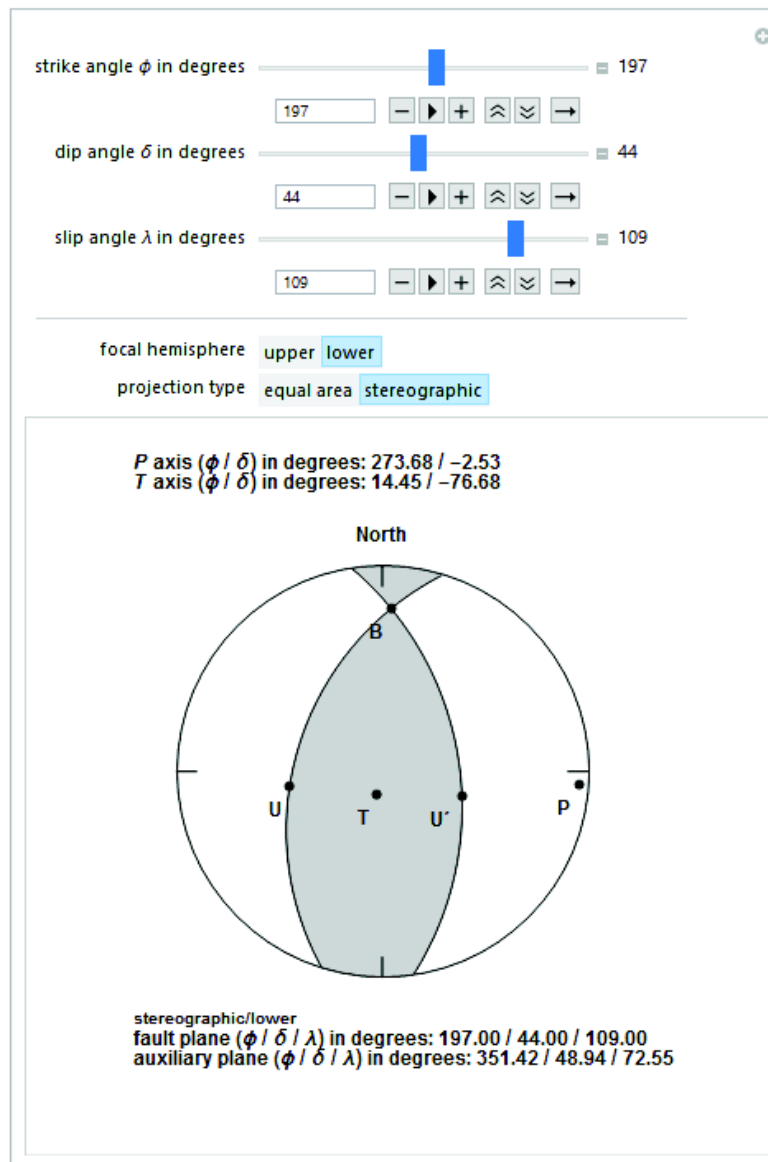


FUENTE: USACE 1110 (1998)

## ANEXO 3

FIGURA A.3 Mecanismos focales y ángulos de los planos de inclinación sismo

Calderón 12/08/2014



ELABORADO: Fernando Cañizares

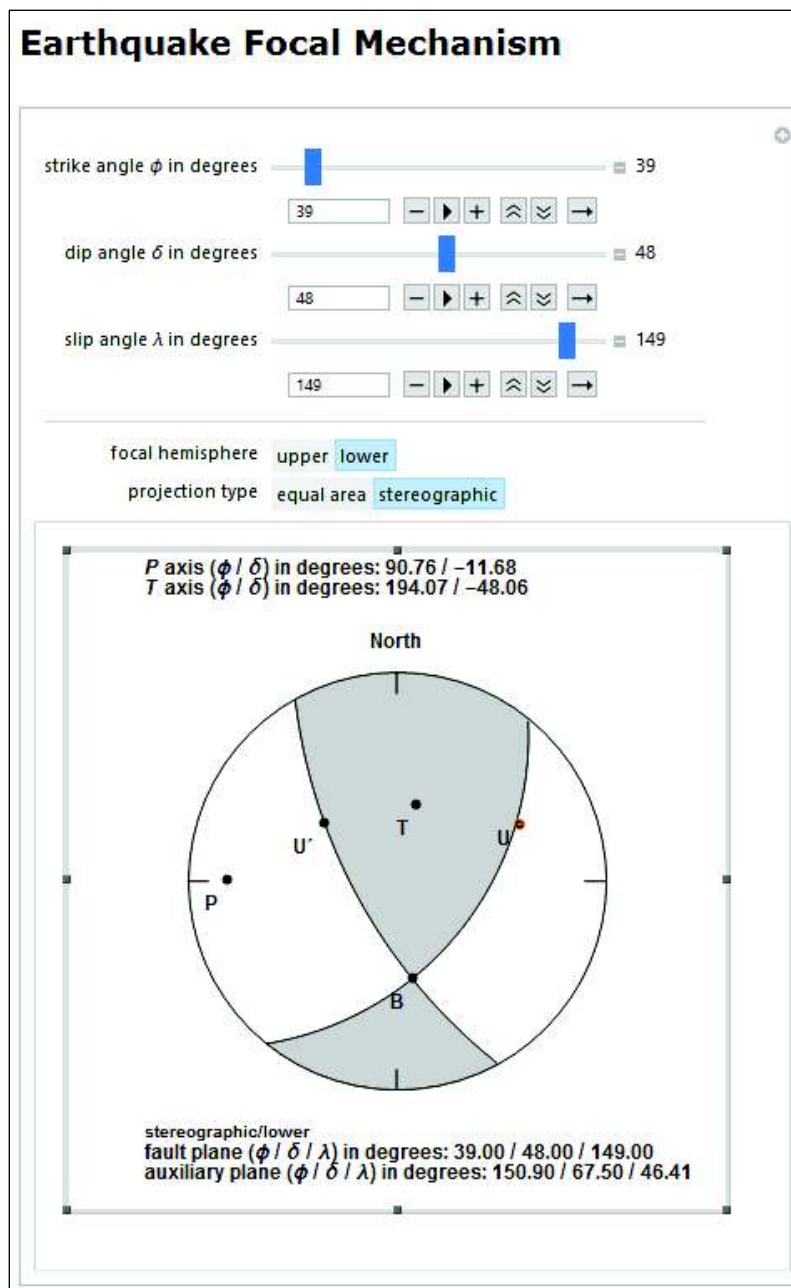
FUENTE: Scherbaum et al. (2009).

Se utiliza el programa "Earthquake Focal Mechanism" desarrollado por Scherbaum



## ANEXO 4

**FIGURA A.4** Mecanismos focales y planos de falla con el programa Wolfram.Sismo de Puenbo 09/08/2016



ELABORADO: Fernando Cañizares

FUENTE: Scherbaum et al. (2009).

## ANEXO 5

FIGURA A.5 Resumen de las ecuaciones de atenuación seleccionadas.

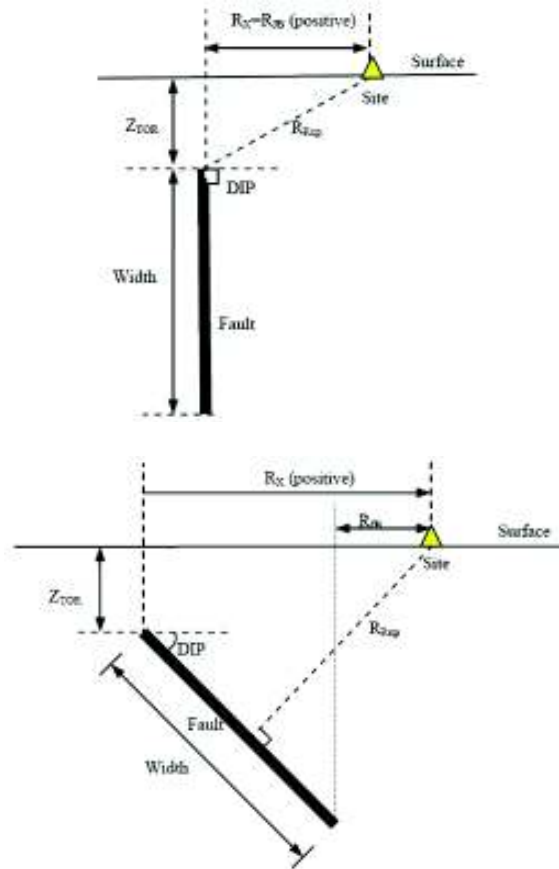
GMPE CRUSTAL SHALLOW (Fallas Corticales)													
GMPE	MODELO	Región	RESULT.	Magnitud			Distancia		Efectos de sitio			PSA Periodos	
				M <sub>min.</sub>	M <sub>máx.</sub>	Escala	R <sub>min.</sub> (km)	R <sub>max.</sub> (Km)	Variable	Rango	Mecanismo	T <sub>min.</sub> (s)	T <sub>máx.</sub> (s)
ATKINSON-BOORE 2008	AB08	World Wide Shallow	In Y	4.3	7.6	Mw	0.06	280 (Rjb)	Vs30	180-760 m/s	N, SS, RV	0.01	10
BINDI 2013	BI13	Italia	log Y	5	5.9	ML	5	200 (Rhypo)	Vs30	180-760 m/s	N, SS, RV	PGA	2
AKKAR-BOOMER 2013	AB13	Turkia	In Y	3.5	7.6	Mw	0	200	Vs30	180-760 m/s	N, SS, RV	PGA	2

SUBDUCCIÓN (Interfase-Intraslab)													
GMPE	MODELO	Región	RESULT.	Magnitud			Distancia		Efectos de sitio			PSA Periodos	
				M <sub>min.</sub>	M <sub>máx.</sub>	Escala	R <sub>min.</sub> (km)	R <sub>max.</sub> (Km)	Variable	Rango	Mecanismo	T <sub>min.</sub> (s)	T <sub>máx.</sub> (s)
YOUNG 1997	YS97	Alaska Cascadia Chile, Japon	In Y	Interface 5.0 Intraslab 5.0	Interface 8.2 Intraslab 7.8 Mw	Mw	Interface 8.5 Intraslab 45	Interface 551 Intraslab 744 Rrup, Rhypo	Vs30	-	Interplaca Intraslab	PGA	3
ZHAO et al. 2006	ZA06	Japon	In Y	5	8.3	Mw	0	300 (Rrup)	Vs30	Suelo,Roca	Interplaca Intraslab	PGA	5
ABRAHAMSON&GREGOR 2016	AB04	World Wide	In Y	Interface 5.0 Intraslab 6	Interface 7.9 Intraslab 8.4 Mw	Mw	12	300	Vs31	-	Interplaca Intraslab	PGA	4

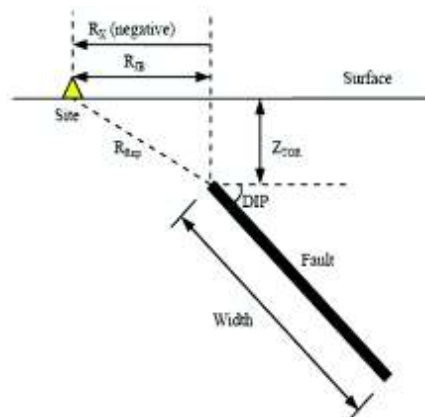
ELABORADO. Fernando Cañizares

## ANEXO 6

FIGURA A.6 Esquemas de distancias epicentrales



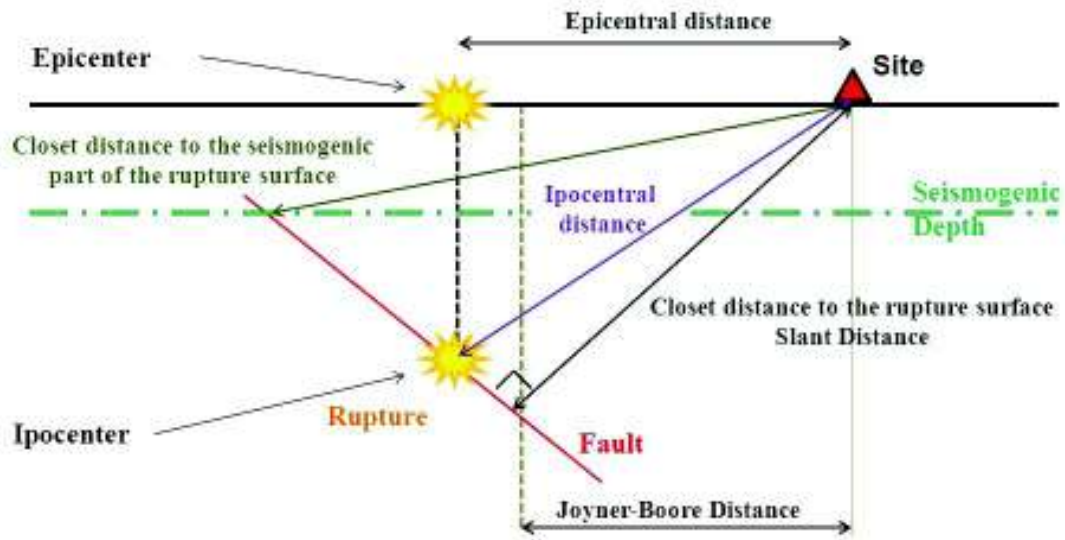
Falla inversa o normal, Hanging-wall site



FUENTE: PEER(2010)

## ANEXO 7

FIGURA A.7 Esquemas de distancias epicentrales



FUENTE: Weatherill, G. &amp; Burton, P. (2010).

## ANEXO 6

FIGURA A.8 Distancias epicentrales de los sismos locales



FUENTE: IGEPN (2015)

ELABORACION: Fernando Cañizares

## ANEXO 7

FIGURA A.9 Tabla de coeficientes para el cálculo de longitudes de falla

Table 2A  
Regressions of Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Moment Magnitude (M)

Equation*	Slip Type†	Number of Events	Coefficients and Standard Errors		Standard Deviation $\sigma$	Correlation Coefficient $r$	Magnitude Range	Length/Width Range (km)
			a(s)	b(b)				
$M = a + b * \log(\text{SRL})$	SS	43	5.16(0.13)	1.12(0.08)	0.28	0.91	5.6 to 8.1	1.3 to 432
	R	19	5.00(0.22)	1.22(0.16)	0.28	0.88	5.4 to 7.4	3.3 to 85
	N	15	4.86(0.34)	1.32(0.26)	0.34	0.81	5.2 to 7.3	2.5 to 41
	All	77	5.08(0.10)	1.16(0.07)	0.28	0.89	5.2 to 8.1	1.3 to 432
$\log(\text{SRL}) = a + b * M$	SS	43	-3.55(0.37)	0.74(0.05)	0.23	0.91	5.6 to 8.1	1.3 to 432
	R	19	-2.86(0.55)	0.63(0.08)	0.20	0.88	5.4 to 7.4	3.3 to 85
	N	15	-2.01(0.65)	0.50(0.10)	0.21	0.81	5.2 to 7.3	2.5 to 41
	All	77	-3.22(0.27)	0.69(0.04)	0.22	0.89	5.2 to 8.1	1.3 to 432
$M = a + b * \log(\text{RLD})$	SS	93	4.33(0.06)	1.49(0.05)	0.24	0.96	4.8 to 8.1	1.5 to 350
	R	50	4.49(0.11)	1.49(0.09)	0.26	0.93	4.8 to 7.6	1.1 to 80
	N	24	4.34(0.23)	1.54(0.18)	0.31	0.88	5.2 to 7.3	3.8 to 63
	All	167	4.38(0.06)	1.49(0.04)	0.26	0.94	4.8 to 8.1	1.1 to 350
$\log(\text{RLD}) = a + b * M$	SS	93	-2.57(0.12)	0.62(0.02)	0.15	0.96	4.8 to 8.1	1.5 to 350
	R	50	-2.42(0.21)	0.58(0.03)	0.16	0.93	4.8 to 7.6	1.1 to 80
	N	24	-1.88(0.37)	0.50(0.06)	0.17	0.88	5.2 to 7.3	3.8 to 63
	All	167	-2.44(0.11)	0.59(0.02)	0.16	0.94	4.8 to 8.1	1.1 to 350
$M = a + b * \log(\text{RW})$	SS	87	3.80(0.17)	2.59(0.18)	0.45	0.84	4.8 to 8.1	1.5 to 350
	R	43	4.37(0.16)	1.95(0.15)	0.32	0.90	4.8 to 7.6	1.1 to 80
	N	23	4.04(0.29)	2.11(0.28)	0.31	0.86	5.2 to 7.3	3.8 to 63
	All	153	4.06(0.11)	2.25(0.12)	0.41	0.84	4.8 to 8.1	1.1 to 350
$\log(\text{RW}) = a + b * M$	SS	87	-0.76(0.12)	0.27(0.02)	0.14	0.84	4.8 to 8.1	1.5 to 350
	R	43	-1.61(0.20)	0.41(0.03)	0.15	0.90	4.8 to 7.6	1.1 to 80
	N	23	-1.14(0.28)	0.35(0.05)	0.12	0.86	5.2 to 7.3	3.8 to 63
	All	153	-1.01(0.10)	0.32(0.02)	0.15	0.84	4.8 to 8.1	1.1 to 350
$M = a + b * \log(\text{RA})$	SS	83	3.98(0.07)	1.02(0.03)	0.23	0.96	4.8 to 7.9	3 to 5,184
	R	43	4.33(0.12)	0.90(0.05)	0.25	0.94	4.8 to 7.6	2.2 to 2,400
	N	22	3.93(0.23)	1.02(0.10)	0.25	0.92	5.2 to 7.3	19 to 900
	All	148	4.07(0.06)	0.98(0.03)	0.24	0.95	4.8 to 7.9	2.2 to 5,184
$\log(\text{RA}) = a + b * M$	SS	83	-3.42(0.18)	0.90(0.03)	0.22	0.96	4.8 to 7.9	3 to 5,184
	R	43	-3.99(0.36)	0.98(0.06)	0.26	0.94	4.8 to 7.6	2.2 to 2,400
	N	22	-2.87(0.50)	0.82(0.08)	0.22	0.92	5.2 to 7.3	19 to 900
	All	148	-3.49(0.16)	0.91(0.03)	0.24	0.95	4.8 to 7.9	2.2 to 5,184

\*SRL—surface rupture length (km); RLD—subsurface rupture length (km); RW—down-dip rupture width (km), RA—rupture area (km<sup>2</sup>).  
†SS—strike slip; R—reverse; N—normal.

FUENTE: Wells & Coppersmith (1994).

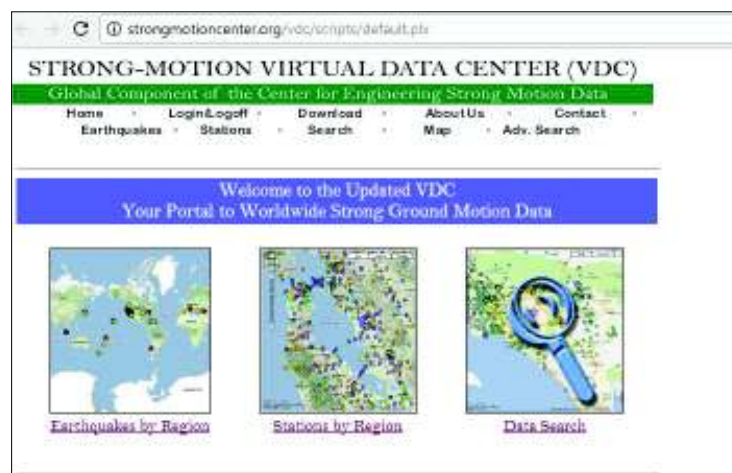
## ANEXO 8

### GUÍA PARA LA APLICACIÓN DEL PRESENTE TRABAJO

#### Paso1: Seleccionar de Bases de datos internacionales

- Pacific Earthquake Engineering Center (USA);
- Center for Engineering Strong Motion Data (USA);
- Italian Accelerometric Archive (Italia) and Institute of Engineering Seismology Earthquake Engineering (Grecia)

Fuente 1: Base de datos internacionales *STRONG MOTION DATA*.



FUENTE: [http://www.strongmotioncenter.org/cgi-bin/CESMD/search\\_options.pl](http://www.strongmotioncenter.org/cgi-bin/CESMD/search_options.pl)

Fuente 2: Base de datos internacionales PEER Ground Motion Data Base.



FUENTE: <http://ngawest2.berkeley.edu/>

Fuente 3: Italian Accelerometric Archive ITACA



FUENTE: <http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/>

### **Paso 3 Seleccionar y compilar los sismos compatibles a las condiciones locales**

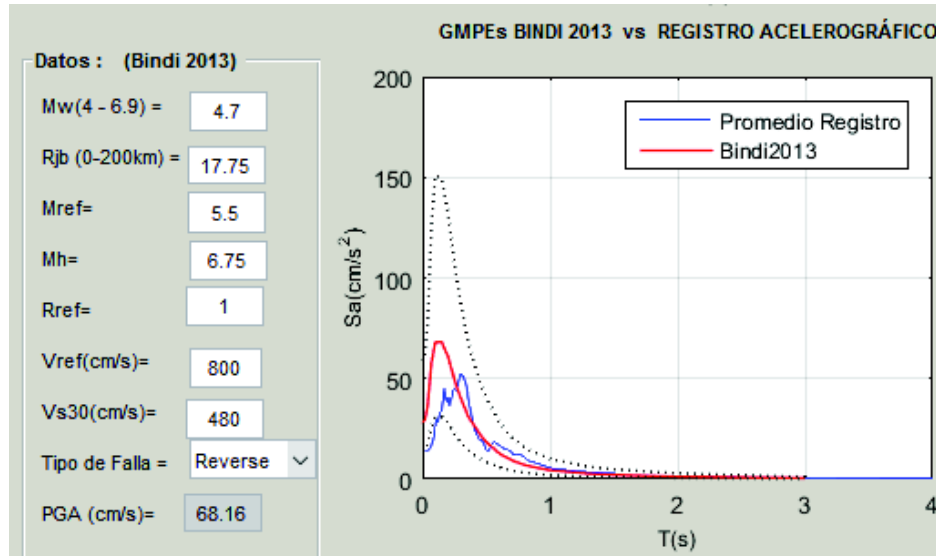
Se seleccionaron los siete sismos compatibles con la ciudad de Quito, principalmente en cuanto a magnitud, distancia a la fuente y tipo de suelo.

#	Sismo	Estación	Año	Mw.	Rjb	Tipo Suelo	dt	Falla
1	San Fernando.	San Felicia.	1971	6.6	24.7	C	0.02	Inv.
2	San Fernando.	Lake Hunges12.	1971	6.6	13.9	C	0.02	Inv.
3	Friulí.	Centrale.	1976	6.4	10.2	C	<b>0.005</b>	Inv.
4	Coalinga.	Suphur Barths.	1983	5.7	9.7	C	0.02	Inv.
5	Loma Prieta.	Santa Cruz_UC.	1989	6.9	12.0	C	0.02	Inv.
6	Loma Prieta.	San Jose-Sant.	1989	6.9	14.1	C	0.02	Inv.
7	Northridge.	Gl. Las Palmas.	1994	6.7	21.6	C	0.02	Inv.



## Paso 4: Graficar y comparar los espectros de respuesta de las señales y la ecuación de atenuación recomendada: Bindi 2013 o Akkar & Bommer 2013

Selección de la ecuación de atenuación

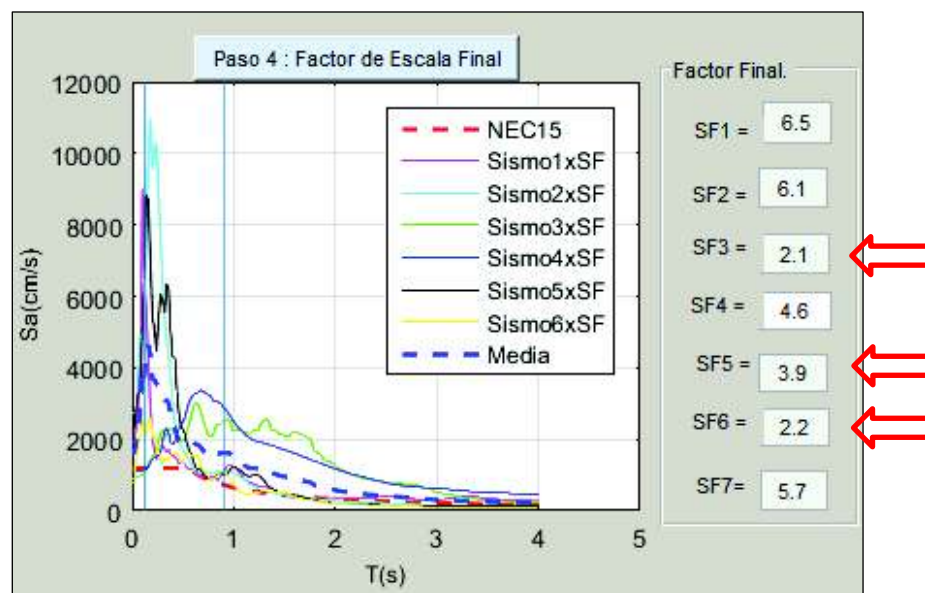


Comparación de los espectros de respuesta, entre señal registrada y ecuación de atenuación seleccionada (Bindi 2013)

Esta ecuación de atenuación también es válido para estudios de riesgo sísmico

## Paso 5: Escalamiento de las señales seleccionadas para propósitos de ingeniería.

Se realiza el escalamiento mediante las recomendaciones de ASCE /SEI 7



Los sismos seleccionados, deben cumplir la condición de que el factor de escalamiento sea menor a cuatro, para utilizarlos con propósitos de análisis dinámico tiempo historia.

De acuerdo a recomendaciones de la norma Chilena, se puede tomar al menos tres señales que cumplan este requerimiento, para nuestro caso cumplen:

- i) Sismo de Friuli Tolmezzo (3)
- ii) Sismo de Loma Prieta St Cruz (5)
- iii) Sismo de Loma Prieta St Jose (6)

### **Paso 6. Análisis de Estructuras**

-Con las señales preseleccionadas escaladas y con las recomendaciones del AISC/SE 7, se realiza el análisis tiempo historia de la estructura.

-Con el método de escalamiento de los pesos ponderados, se realiza análisis de estructuras con sistemas de aislación de base.