



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - ESTRUCTURAS

ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO DEL ECUADOR Y ESPECTROS
DE DISEÑO SÍSMICO PARA LA CIUDAD DE CUENCA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
PABLO DAVID QUINDE MARTÍNEZ

TUTOR:
Dr. EDUARDO REINOSO ANGULO
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F., AGOSTO 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. ESTEVA MARABOTO LUIS

Secretario: Dr. ORDAZ SCHROEDER MARIO GUSTAVO

1er. Vocal: Dr. REINOSO ANGULO EDUARDO

2do. Vocal: Dra. RUIZ GÓMEZ SONIA ELDA

3er. Vocal: Dr. NIÑO LÁZARO MAURO POMPEYO

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. EDUARDO REINOSO ANGULO

FIRMA

© UNAM – Posgrado de Ingeniería
Ciudad Universitaria, Ciudad de México (México)

Derechos.

All rights reserved. No part of the publication may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without written permission from the publisher.

D/XXXX/XXXX/XX
ISBN XXX-XX-XXX-XXX-XX

Agradecimiento

A mi esposa, padres y hermanos, por el apoyo incondicional que me han brindado, por todo el esfuerzo que han realizado para ayudarme con mi educación, y por ser mi apoyo en esta experiencia de vida en otro país.

A mi tutor de tesis el Dr. Eduardo Reinoso Angulo, por su tiempo, asesoramiento y consejos durante el desarrollo de esta tesis.

A los doctores que conformaron mi comité de revisión, por todos los comentarios que ayudaron a mejorar este trabajo.

A la empresa ERN, por el asesoramiento y soporte técnico brindado por parte de su personal, el cual fue de gran ayuda para la culminación de este trabajo.

Al Instituto de Ingeniería (II) de la UNAM, a todo el personal y compañeros, en especial a los maestros Miguel Leonardo y Andrés Hernández, por su gran apoyo en la realización de esta tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado, el cual fue indispensable para realizar mis estudios de posgrado en la UNAM.

A todos mis compañeros del posgrado, con los cuales compartí bastantes horas de estudio y diversión, y cuya amistad hizo más amena mi estancia en la UNAM.

... ¡MUCHAS GRACIAS!

Dedicatoria

A la memoria de mi abuelo Tarquino Martínez, que siempre confió en mi y que no paró de repetirme que debía salir a estudiar. Se que desde el cielo me ayudó y cuidó todos estos años.

Pablo David Quinde Martínez,
México D.F., agosto 2014

Resumen

En zonas sísmicamente activas, el estudio de peligro sísmico se vuelve fundamental. La falta de catálogos sísmicos completos, o en muchos casos la poca información relacionada al tema, hace que sea necesario un análisis probabilista de amenaza sísmica, de manera que sea posible considerar las diferentes incertidumbres que se presentan en el proceso de cálculo.

Esta metodología ha sido empleada en el presente trabajo para el estudio de peligro sísmico del Ecuador. Se debe partir de un catálogo que sea lo suficientemente depurado, homogéneo y completo, de manera que los parámetros sísmicos de las diferentes fuentes no presenten grandes desviaciones en sus resultados. Mediante un modelo probabilístico, conocido como análisis Bayesiano, se encontraron los parámetros que caracterizan las fuentes sísmicas.

Después de analizar diferentes leyes de atenuación, y compararlas con resultados existentes para la zona Sur del continente, se eligieron los modelos de Youngs y de Abrahamson y Silva para las fuentes de subducción y corticales, respectivamente. Los resultados de peligro sísmico para el Ecuador fueron obtenidos utilizando el programa CRISIS 2014. Los mapas expuestos corresponden a valores de aceleración en roca y a diferentes periodos de retorno, relacionados a niveles de desempeño.

Otro resultado importante, es la implementación de un nuevo espectro de diseño sísmico para la ciudad de Cuenca, Ecuador. Para esto se realizó un análisis de efectos de sitio, de manera que sea posible obtener las posibles amplificaciones espectrales. Los estudios de efectos locales se basaron en un proyecto de vibración ambiental realizado en la ciudad en el año 2000.

Por otra parte, es posible construir espectros inelásticos a partir de los espectros elásticos, para esto se utilizan los factores de reducción. Tres factores son estudiados, factor de ductilidad, de sobrerresistencia y de redundancia, proponiendo variaciones de los mismos en función del periodo dominante del terreno.

Por último, se hace un estudio de la normativa ecuatoriana de la construcción, pretendiendo ilustrar los errores existentes en el capítulo 2 de la Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC11) correspondiente a peligro sísmico y criterios de diseño sismoresistente. Se busca realizar comparaciones con los resultados propuestos en el presente estudio.

Abstract

In seismic active areas, the study of seismic hazard becomes fundamental. The incompleteness of seismic catalogs, or in many cases the limited information related to the subject, makes a probabilistic analysis of seismic hazard necessary, so that it is possible to consider various uncertainties that arise in the process of calculation required.

This methodology has been used in this work for the study of seismic hazard of Ecuador. It was created from a catalog that was sufficiently refined, homogeneous and complete, so that the seismic parameters of the different sources do not show large deviations in their results. Using a probabilistic model, known as Bayesian analysis, the parameters characterizing the seismic sources were obtained.

After analyzing different attenuation laws and comparing them with existing results for the Southern part of the continent, the Youngs and Abrahamson and Silva models for subduction and crustal sources, respectively, were chosen. The results of the seismic hazard for Ecuador were obtained using the program CRISIS. The exposed maps correspond to rock acceleration values for different return periods relative to performance levels.

Another important result is the implementation of a new seismic design spectrum for the city of Cuenca, Ecuador. For this, site effects analysis was performed to obtain the possible spectral amplifications. The local effects studies were based on data gathered in the city during the year 2000.

Furthermore, inelastic spectra can be constructed from elastic spectra, for this, reduction factors are used. Three factors are studied (ductility, over strength and redundancy), proposing variations depending on the soil dominant period.

Finally, a study of the Ecuadorian building regulations is presented in order to illustrate existing errors in Chapter 2 of NEC11, corresponding to seismic hazard and seismic-resistant design criteria. It seeks to make comparisons with the results proposed in this study.

Índice

Agradecimiento	i
Dedicatoria	iii
Resumen	v
Abstract	vii
Contenido	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tablas	xvii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 PROBLEMÁTICA	1
1.3 OBJETIVO GENERAL Y ALCANCE	2
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.5 METODOLOGÍA	2
1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS	3
2 TECTÓNICA Y SISMICIDAD DEL ECUADOR	5
2.1 BREVE DESCRIPCIÓN DE LA TECTÓNICA DEL ECUADOR	5
2.2 DESCRIPCIÓN DE LA SISMICIDAD DEL ECUADOR	6
2.2.1 Zonas sísmicas del Ecuador	7
3 CATÁLOGO SÍSMICO	13
3.1 CATÁLOGO SÍSMICO DE LA REGIÓN	13

3.2	HOMOGENIZACIÓN DE LAS MAGNITUDES	14
3.3	DEPURACIÓN DEL CATÁLOGO SÍSMICO	14
3.3.1	Consistencia de la información sísmica	15
3.3.2	Discriminación de réplicas y premonitores	15
3.4	COMPLETEZ DEL CATÁLOGO	17
3.4.1	Método Gráfico	18
3.4.2	Método de STEPP	20
4	PELIGRO SÍSMICO	23
4.1	GENERALIDADES	23
4.2	ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE PELIGRO SÍSMICO (PSHA)	24
4.3	CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES	24
4.3.1	Distancia fuente-sitio	24
4.3.2	Sismicidad de las fuentes	26
4.3.3	Ejemplo de caracterización de fuentes sísmicas	30
4.4	MODELOS DE ATENUACIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS	33
4.4.1	Modelos de atenuación: Fuentes de subducción	34
4.4.2	Modelos de atenuación: Fuentes corticales	37
4.5	CÁLCULO DEL PELIGRO SÍSMICO	43
4.5.1	Programa CRISIS	44
4.5.2	Parámetros del modelo CRISIS para el cálculo de peligro sísmico del Ecuador	46
4.6	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO DEL ECUADOR	46
5	EFFECTOS DE SITIO PARA CUENCA	53
5.1	GENERALIDADES	53
5.2	ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN PARA LA CIUDAD DE CUENCA	54
5.2.1	Modelo de características locales del suelo	55
5.2.2	Amplificación dinámica del suelo	60
5.3	MONITOREO SÍSMICO	62
5.3.1	Microtemores	62
5.3.2	Medición de periodos del suelo: Técnica de Nakamura	63
5.3.3	Construcción de curvas de isoperiodos	63
5.4	EFFECTOS DE SITIO PARA LA CIUDAD DE CUENCA	64

6	ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO	69
6.1	GENERALIDADES	69
6.2	CURVAS DE PELIGRO SÍSMICO	70
6.2.1	Curvas de peligro sísmico para el Ecuador	71
6.3	ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME (EPU)	75
6.3.1	Espectros de peligro uniforme para el Ecuador	76
6.4	ESPECTROS DE DISEÑO	78
6.4.1	Periodo de retorno para el espectro de diseño	80
6.4.2	Espectro elástico para la ciudad de Cuenca	82
6.4.3	Espectro de diseño inelástico	86
6.4.4	Factores de reducción R	86
6.5	FACTORES DE CONVERSIÓN ESPECTRAL	91
7	ESTUDIO DE LA NORMATIVA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (NEC11)	93
7.1	ESTUDIO DEL CAPÍTULO 2 DEL NEC11: “PELIGRO SÍSMICO Y REQUISITOS DE DISEÑO SISMO RESISTENTE”	93
7.1.1	Subcapítulo 2.5.2.2 “FUNDAMENTACIÓN DEL MAPA DE ZONIFICACIÓN”	93
7.1.2	Subcapítulo 2.5.3 “CURVAS DE PELIGRO SÍSMICO”	94
7.1.3	Subcapítulo 2.5.5 “ESPECTROS ELÁSTICOS DE DISEÑO”	95
7.1.4	Subcapítulo 2.5.5.1	96
7.1.5	7.1.5. Subcapítulo 2.5.5.2 “ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN DESPLAZAMIENTOS”	97
7.1.6	Subcapítulo 2.6.2 “CONTROL DE LA DERIVA DE PISO”	97
7.1.7	Subcapítulo 2.7.2.3 “FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA SÍSMICA R ”	99
7.1.8	Subcapítulo 2.7.2.5.2 “DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DEL CORTANTE”	99
7.1.9	Subcapítulo 2.8 “MÉTODO DE DISEÑO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS”	100
8	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	101
8.1	ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO DEL ECUADOR	101
8.2	ESTUDIO DE EFECTOS DE SITIO PARA LA CIUDAD DE CUENCA	102
8.3	ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO	102
	Referencias	105

Lista de Figuras

2.1.1 Representación de las placas tectónicas del Ecuador. Tomado de Taipei (2013, ref.[51])	6
2.1.2 Sistema de fallamiento del Ecuador	7
2.2.1 Eventos sísmicos del Ecuador, desde 1900 a 2009 [?]	8
2.2.2 Tipos principales de sismos considerados	8
2.2.3 Geometría fuentes de subducción	9
2.2.4 Geometría fuentes corticales	11
2.2.5 Esquema de profundidades de las fuentes sísmicas. Esquema tipo corte transversal	11
3.3.1 Análisis de recurrencia del catálogo sísmico inicial	15
3.3.2 Histograma de profundidades del catálogo sísmico inicial	16
3.4.1 Completez del catálogo sísmico. Método Gráfico	19
3.4.2 Completez del catálogo sísmico. Método de Stepp	21
4.3.1 Variación de la distancia fuente-sitio para diferentes tipos de fuente. (a) Fuente puntual, (b) fuente lineal, (c) fuente de área (Tomado de kramer 1996)	25
4.3.2 Parámetros del modelo GR. (a) variación parámetro a , (b) variación parámetro b	27
4.3.3 Modelo de Gutenberg-Richter y Gutenberg-Richter truncado	29
4.3.4 Eventos registrados en el catálogo para la fuente 7, (Moyobamba)	31
4.3.5 Corte trasnversal de la fuente 7s	32
4.3.6 Tasa de excedencia para la fuente 7s	33
4.4.1 Comparación entre modelos de atenuación para fuentes de subducción	37
4.4.2 Comparación entre modelos de atenuación corticales para fallas tipo inversas	42
4.4.3 Comparación entre modelos de atenuación corticales para fallas tipo normal	42
4.5.1 Visualización inicial del programa CRISIS	45
4.6.1 Mapa de peligro sísmico del Ecuador para un TR=50 años.	48

4.6.2 Mapa de peligro sísmico del Ecuador para un TR=100 años.	49
4.6.3 Mapa de peligro sísmico del Ecuador para un TR=500 años.	50
4.6.4 Mapa de peligro sísmico del Ecuador para un TR=2500 años.	51
5.1.1 Registros de acelerogramas en la Ciudad de México del sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985, en distintas zonas	54
5.2.1 Perfil geológico, Universidad de Cuenca	56
5.2.2 Perfil geológico, Sector Cementerio	57
5.2.3 Perfil geológico, Parque Miraflores	58
5.2.4 Perfil geológico, Universidad del Azuay	59
5.2.5 Esquema del concepto de amplificación dinámica del suelo	60
5.2.6 Cocientes espectrales de Fourier (FT) y cocientes espectrales de respuesta(CER). (a) y (b) Universidad de Cuenca, (c) y (d) Sector Cementerio, (e) y (f) Parque Miraflores, (g) y (h) Universidad del Azuay.	61
5.3.1 Puntos de vibración ambiental	63
5.3.2 Curvas de isoperiodos. Puntos utilizados de estudio de Encalada (2000)	64
5.3.3 Curvas de isoperiodos. Puntos eliminados de estudio de Encalada (2000)	65
5.4.1 Cocientes espectrales de respuesta utilizados (CER)	65
5.4.2 Mapa temático de isoperiodos para la ciudad de Cuenca	67
6.2.1 Curva de peligro sísmico	70
6.2.2 Construcción de un EPU a partir de las curvas de peligro sísmico	71
6.2.3 Curvas de peligro sísmico. Región Costa del Ecuador	72
6.2.4 Curvas de peligro sísmico. Región Sierra del Ecuador	74
6.2.5 Curvas de peligro sísmico. Región Oriente del Ecuador	75
6.3.1 Espectros de peligro uniforme y espectros de diseño del NEC11. Región Costa del Ecuador	76
6.3.2 Espectros de peligro uniforme y espectros de diseño del NEC11. Región Sierra del Ecuador	77
6.3.3 Espectros de peligro uniforme y espectros de diseño del NEC-11. Región Oriente del Ecuador.	78
6.4.1 Espectro de diseño propuesto	79
6.4.2 Valores promedios de los espectros estudiados. (a) Valores de T_0 . (b) Valores de T_C . (c) Valores de A_0 . (d) Valores de Z . (e) Valores de C_2	83
6.4.3 Comparación entre espectros de diseño propuestos, del NEC11 y EPU obtenidos en este trabajo. Columna izquierda $T_s = 0.1s$ y columna derecha $T_s = 0.4s$. (a) y (b) aceleración, (c) y (d) velocidad, (e), (f), (g) y (h) desplazamiento	85

6.4.4 Valor de desplazamiento máximo del suelo en función de T_s	88
6.4.5 Valores de R_Ω para una distorsión del 1%	90
6.4.6 Valores de R_Ω para una distorsión del 2%	90
6.4.7 Valores de R_R	90
6.5.1 Factor de conversión espectral (a) $T_R=50$ años (b) $T_R=200$ años (c) $T_R=300$ años (d) $T_R=400$ años (e) $T_R=500$ años (f) $T_R=750$ años (g) $T_R=1000$ años (h) $T_R=1500$ años (i) $T_R=2500$ años	92
7.1.1 (a) Mapa de peligro sísmico del Ecuador, zoom en Ibarra, (b) Curva de peligro sísmico para Ibarra. (Figuras originales tomadas del NEC11)	94
7.1.2 Espectro elástico de diseño del NEC11 (figura tomada del NEC11)	95

Lista de Tablas

2.2.1 Características Fuentes de Subducción	8
2.2.2 Características Fuentes Corticales	10
3.2.1 Tipos de magnitudes catálogo instrumental	14
3.3.1 Valores de los parámetros de espacio y tiempo de las relaciones de Maeda para cada magnitud	17
3.3.2 Valores empleados del algoritmo de Reasenberg	17
4.3.1 Periodos de completez del catálogo sísmico para la fuente 7s	31
4.3.2 Parámetros sísmicos de la fuente 7s	32
4.4.1 Valores de las constantes C_i para roca. Tomadas de la tabla 2 de Youngs et. al(1997, ref.[53])	35
4.4.2 Descripción de tipo de suelos considerados en este modelo de atenuación. Tomado de la tabla 2 de Zhao et. al (2006, ref.[54])	36
4.4.3 Valores de las constantes a_i y c_k . Tomadas de la tabla 3 de Abrahamson y Silva (1997, ref.[1])	40
4.4.4 Valores de las constantes b_j y c_k . Tomadas de la tabla 3 y 4 de Abrahamson y Silva (1997, ref.[1])	41
4.4.5 Modelos de atenuación asignados a cada fuente	43
4.5.1 Valores de los parámetros del modelo de CRISIS para Ecuador	46
4.5.2 Valores de los parámetros del modelo de CRISIS para Ecuador	46
4.6.1 Valores de periodos de retorno para mapas de peligro sísmico	47
4.6.2 Parámetros sísmicos para cada una de las fuentes	47
5.4.1 Resumen de amplificación para cada subregión de la ciudad de Cuenca	66
5.4.2 Resumen de amplificación para cada subregión de la ciudad de Cuenca	66
6.4.1 Probabilidades de excedencia relacionados a diferentes periodos de retorno	81

6.4.2 Ecuaciones de sobrerresistencia Aguiar y Guaiña (2008)	89
6.5.1 Valores de conversión para diferentes T_R , tomando como base 100años	91
7.1.1 Valores de ΔM máximos, expresados como fracción de la altura de piso (correspondiente a la tabla 2.8 del NEC-11)	97

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

El estudio de movimientos fuertes del suelo se ha vuelto necesario en países sísmicamente activos, y Ecuador no es la excepción. Dichos eventos sísmicos, podrían provocar graves pérdidas humanas y económicas, por lo que es necesario que se estudien con mayor detenimiento las normativas de construcción, ya que, en la mayoría de los casos, las estructuras quedan regidas por las supuestas sollicitaciones sísmicas estipuladas en los códigos.

Los criterios de diseño sismoresistente se basan en métodos probabilísticos que suponen las intensidades y frecuencias de ocurrencia de cierto evento sísmico, ya que no es posible contar con una base de datos tal, que permita estimar con exactitud la ocurrencia de eventos, por lo que se recurre a la teoría de probabilidades para considerar las incertidumbres en la estimación de su ocurrencia. Una manera de ilustrar los resultados del análisis probabilista de amenaza sísmica es a través de mapas de peligro, que muestran valores tales como aceleraciones máximas probables, para diferentes periodos de retorno. A partir de estos se pueden obtener espectros de peligro uniforme, para posteriormente poder plasmar en una normativa un espectro de diseño.

Eventos sísmicos, tales como el del 19 de septiembre de 1985 en Michoacán, México, dejaron en evidencia el impacto que tiene los efectos locales del terreno sobre las sollicitaciones sísmicas. Por esto, es fundamental incluir estudios de efectos de sitio en los espectros de diseño, para tratar de acercarse más al comportamiento real que se pueda producir durante cierto evento telúrico.

1.2 PROBLEMÁTICA

Ecuador se encuentra dentro del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, por lo que su actividad sísmica es alta, incluyendo eventos tales como el de 1906, que alcanzó una magnitud de 8.8, colocándolo dentro de los sismos más grandes de la historia.

Salvo el sismo de Bahía de Caráquez en agosto de 1997 con una magnitud de 7.1, y que dejó en evidencia ciertos problemas relacionados al diseño sismorresistente en el Ecuador, en la nación no han existido eventos catastróficos en casi un siglo, lo que ha provocado que no se le preste la atención debida a esta problemática. Si bien es cierto, existe una normativa ecuatoriana de la construcción, también lo es el hecho que los estudios acerca del tema en el país son escasos.

La Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC11), refiriéndose a la parte sísmica, presenta varias inconsistencias, y en ciertos casos, graves problemas a criterio del autor de esta tesis. Entre los que más destacan es el empleo de un espectro de diseño sísmico, que no es claro en sus conceptos y que deja en evidencia la falta de información existente en la localidad, inclusive cometándose errores que violan los criterios de la dinámica estructural, entre otros inconvenientes.

Por este motivo, se han planteado los objetivos de esta tesis, los cuales están enfocados a dar una mayor explicación del fenómeno y presentar resultados relacionados al estudio de peligro sísmico del Ecuador y la propuesta de espectros de diseño para la ciudad de Cuenca.

1.3 OBJETIVO GENERAL Y ALCANCE

Se proponen espectros inelásticos de diseño sísmico para diferentes niveles de desempeño, para la ciudad de Cuenca, Ecuador, en los que se contemplarán las amplificaciones espectrales debido a los efectos de sitio. Para esto se realizan estudios probabilísticos de peligro sísmico a nivel nacional, y análisis locales de efectos de sitio para la ciudad de Cuenca. Se compara la propuesta de este estudio con lo estipulado en la NEC11.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar del catálogo sísmico del Ecuador, así como sus fuentes sísmicas.
- Estudiar el catálogo sísmico existente, de manera que se trabaje con una base de datos homogénea, depurada y completa.
- Análisis probabilista de peligro sísmico del Ecuador.
- Generar mapas de amenaza sísmica a nivel nacional y para diferentes periodos de retorno.
- Obtener las amplificaciones espectrales para la ciudad de Cuenca, basándose en funciones de transferencia y periodos del terreno.
- Comparar los espectros de peligro uniforme obtenidos en este estudio, con la normativa ecuatoriana de la construcción vigente (NEC11).
- Proponer nuevos espectros inelásticos de diseño sísmico para la ciudad de Cuenca, basándose en los periodos del suelo y amplificaciones espectrales.
- Estudiar el capítulo 2 del NEC11, correspondiente al peligro sísmico del Ecuador y requisitos de diseño sismoresistente y compararlo con los resultados obtenidos.

1.5 METODOLOGÍA

La metodología a emplearse es principalmente probabilista. Se estudiará el comportamiento sísmico del territorio ecuatoriano y alrededores, de manera que se puedan realizar mapas de peligro sísmico, en los que se consideren, de manera probabilista, las diferentes incertidumbres que se presentan en este tipo de estudio. Posteriormente, se realizarán los estudios de efectos de sitio, únicamente para la

ciudad de Cuenca. Para esto se considerarán pruebas de vibración ambiental realizadas en la ciudad. En vista que los cálculos necesarios para obtener los resultados pueden ser muy largos, se empleará el programa CRISIS(Ordaz, 1999).

Se obtendrán y analizarán espectros de peligro uniforme (EPU), y mediante comparaciones y estadística se encontrarán espectros suavizados que representen dichos EPU. Estos resultados serán afectados por los factores de reducción de resistencia, de manera que se obtengan espectros inelásticos de diseño sísmico.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis presentada se compone de 8 capítulos, de los cuales el primero corresponde a la introducción, y el último a las conclusiones y comentarios.

En el capítulo 2, se presenta una breve descripción de la tectónica del Ecuador, exponiendo las características de las placas marinas y continentales y su interacción. Por otra parte, se analizan las características sísmicas del país, definiendo la ubicación y geometría de las fuentes sísmicas del Ecuador, las mismas que se han utilizado para obtener los resultados del estudio de amenaza sísmica expuesto en esta tesis.

El estudio del catálogo sísmico disponible será abordado en el capítulo 3, en el que se presentan los análisis que son indispensables para el estudio de amenaza sísmica del Ecuador. Se estudia el catálogo sísmico existente, de manera que se trabaje con una base de datos homogénea, depurada y completa.

En lo que se refiere al capítulo 4, se evalúa el peligro sísmico del Ecuador. Se explican ciertos procesos probabilísticos para el cálculo de amenaza sísmica tales como el modelo de ocurrencia de Poisson y el análisis bayesiano. Se definen los parámetros sísmicos y se estudian las leyes de atenuación, eligiendo la mejor opción para la región y para cada fuente. Posteriormente, se calcula la amenaza sísmica del Ecuador, utilizando el programa CRISIS 2014.

Los efectos de sitio son analizados únicamente para la ciudad de Cuenca. En el capítulo 5 se exponen los conceptos básicos sobre este tema, y posteriormente se centra el estudio en la metodología utilizada en la ciudad.

En el capítulo 6, se exponen las curvas de peligro sísmico obtenidas para las principales ciudades del país. A partir de éstas, se obtienen los espectros de peligro uniforme, para las mismas locaciones. Seguido a esto, se plantean los principales criterios utilizados para construir espectros de diseño elásticos para la ciudad de Cuenca, partiendo de los resultados de peligro sísmico del capítulo 4, así como de los efectos de sitio del capítulo 5. Mediante el uso de factores de reducción, es posible obtener espectros inelásticos, los cuales se indican en la parte final del capítulo.

Por último, se estudia la Normativa Ecuatoriana de la Construcción del 2011 (NEC11), siendo ésta la versión más moderna del reglamento ecuatoriano. El capítulo 7 se estudia el tema denominado "Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sismo Resistente", correspondiente al capítulo 2 de la NEC11. Se exponen las falencias que se ha considerado que existen en el capítulo mencionado, y se le compara con los resultados obtenidos en los capítulos anteriores de este trabajo, y en códigos existentes y vigentes, tal como las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo (NTCS-2004).

TECTÓNICA Y SISMICIDAD DEL ECUADOR

El estudio de la geodinámica del territorio ecuatoriano es de gran importancia para conocer la sismicidad de un determinado sector. En este capítulo, inicialmente se da una breve descripción de la tectónica del Ecuador, exponiendo ciertas características de las placas marinas y continentales, y su interacción. Por otra parte, se analizan las características sísmicas del país, definiendo la ubicación y geometría de las fuentes sísmicas del Ecuador, las mismas que se utilizan para obtener los resultados del estudio de amenaza sísmica expuesto en esta tesis. Estas fuentes han sido obtenidas a partir de las publicaciones del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN, ref.[23], y de la tesis doctoral de Alvarado (2012, ref.[5]). No se han realizado estudios tectónicos del Ecuador, ni se han definido nuevas geometrías de las fuentes sísmicas, ya que esto se encuentra fuera del alcance de esta tesis.

2.1 BREVE DESCRIPCIÓN DE LA TECTÓNICA DEL ECUADOR

El territorio ecuatoriano se encuentra conformado por una región continental, la cuál va desde 81°W hasta 75°W en longitud, y 1.25°N hasta 5°S en latitud, aproximadamente, y una parte conformado por las islas Galápagos. El territorio se divide en 4 regiones, Costa, Sierra, Oriente y Región insular, siendo la segunda en donde existen la mayor cantidad de fallas, debido a los pliegues que se producen por la geodinámica de la región.

Ecuador se encuentra dentro de un particular movimiento tectónico. Un sector del territorio forma parte de la microplaca denominada "Bloque andino", la cual pertenece a la placa sudamericana. Esta microplaca, se encuentra en una interacción entre las placas de Nazca, Cocos y Caribe. El movimiento en esta zona se ha medido en un rango aproximado de 50-60mm/año, mientras que para la placa continental, el movimiento se encuentra entre los 2-5mm/año.

Por otra parte, la región sur del Ecuador, se encuentra en interacción entre la placa Sudamericana y la placa de Nazca. La misma ha producido que en el Ecuador se presenten tres diferentes inclinaciones de la subducción de la placa de Nazca en la placa Continental 51.

- a) Por una parte, de la latitud 1°N hacia el norte del territorio, se presenta una subducción normal con un ángulo aproximado de inclinación de 35°.
- b) Entre la brecha conformada por las latitudes 1°N y 3°S, existe una inclinación de la subducción de 25° aproximadamente.

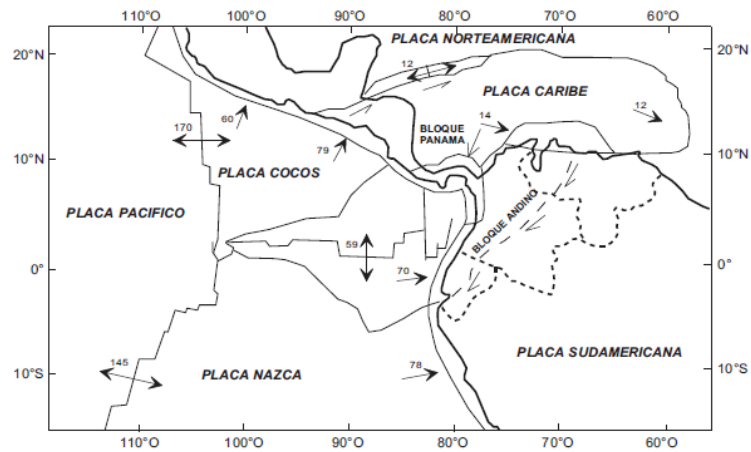


Figura 2.1.1: Representación de las placas tectónicas del Ecuador. Tomado de Taipe (2013, ref.[51])

- c) La tercera zona de inclinación de la subducción que se forma, al sur de la latitud 3°S, presenta un ángulo menor a los 25°.

Este comportamiento dinámico de la región ha generado un sistema de fallas denominado Sistema Mayor Dextral [5], el mismo que presenta una mayor concentración de fallas y pliegues en la región de la sierra ecuatoriana. Este sistema de fallas, en conjunto con la subducción presentada en la costa del país, representan las principales fuentes generadores de sismos. En la figura 2.1.2 se muestra este sistema de fallamiento.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LA SISMICIDAD DEL ECUADOR

Ecuador es un país sísmicamente activo, con movimientos originados en la zona de la corteza terrestre, que pueden ser conocidos como sismos corticales, y otros que se originan en la zona de subducción, debido a la interacción entre placas, explicada anteriormente.

Existe una variación entre la sismicidad que pueden generar las diferentes fallas, lo cual hace que ciertas regiones sean sísmicamente más activas que otras.

En las últimas décadas han existido eventos sísmicos de considerable magnitud, los cuáles han producido daños en ciertas zonas del país, por lo que se han empezado estudios para definir zonas sísmicas, y poder cuantificar la amenaza probable de eventos telúricos.

En la figura 2.2.1 se muestran los eventos sísmicos principales con magnitud superior a 4.0, que han sido reportados en el Ecuador en los últimos 110 años.

Todos estos eventos han sido divididos en tres tipos principales: sismos interplaca que son referidos a la zona de subducción y de profundidad superficial, sismos del tipo intraplaca referidos a un fallamiento de tipo normal, y por último sismos corticales, producidos en la corteza terrestre y de profundidad superficial. En la figura 2.2.2 se muestra un esquema explicativo del tipo de sismos considerado.

Tomando los conceptos principalmente de la geodinámica, sistema de fallamiento y eventos sísmicos registrados, se han podido definir las fuentes sísmicas para el Ecuador.

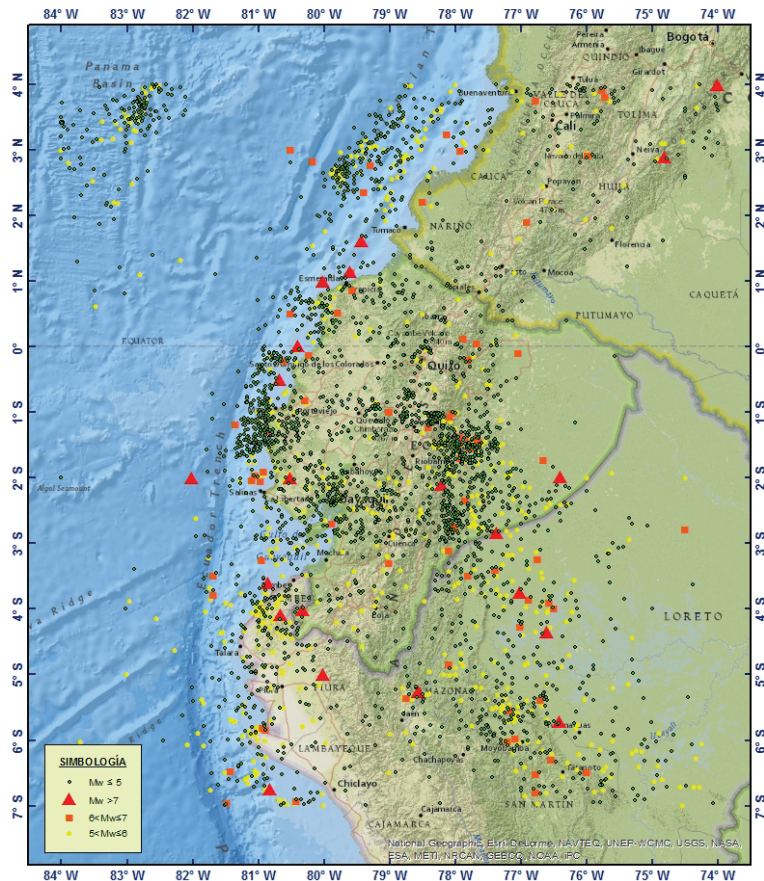


Figura 2.2.1: Eventos sísmicos del Ecuador, desde 1900 a 2009 [?]

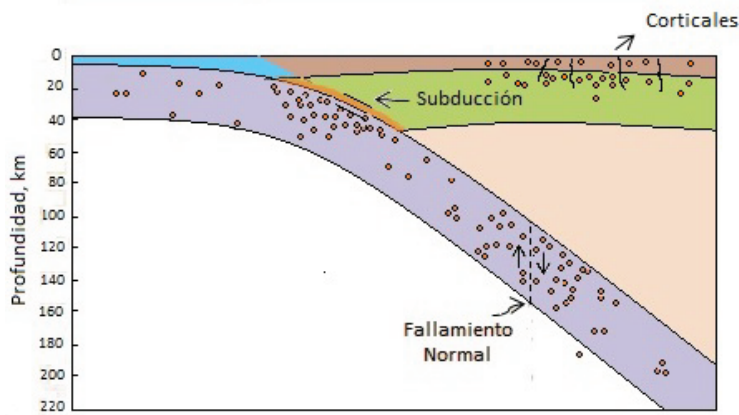


Figura 2.2.2: Tipos principales de sismos considerados

FUENTE		TIPO DE FALLA	OBSERVACIONES
ID	Nombre		
1s	Carnegie	-	Sismos fuera de la fosa
2s	Tumaco-Esmaldas	Interplaca	Registro de mayores eventos sísmicos.
3s	Grijalva	-	Sismos fuera de la fosa
4s	Ibarra	Intraplaca	Inclinación de placa entre 30° y 35°
5s	Malpelo	-	Sismos fuera de la fosa
6s	Manta	Interplaca	Potencial sísmico de consideración
7s	Moyobamba	Intraplaca	Inclinación de placa entre 25° y 30°
8s	Puyo	Intraplaca	Inclinación de placa entre 25° y 30°
9s	Salinas	Interplaca	Sismicidad moderada
10s	Sechura	Interplaca	Zona sísmica del norte de Perú

Tabla 2.2.1: Características Fuentes de Subducción

La profundidad máxima de cada fuente varía de acuerdo al tipo de fallamiento presentado. Para tipo interplaca se consideró placas inclinadas con profundidades que van de 5km a 40km; mientras para el tipo intraplaca se ha considerado menores a 300 km, dependiendo de la inclinación de la placa subductada.

En la figura 2.2.3 se muestra la ubicación y geometría de las fuentes de subducción consideradas en esta tesis.

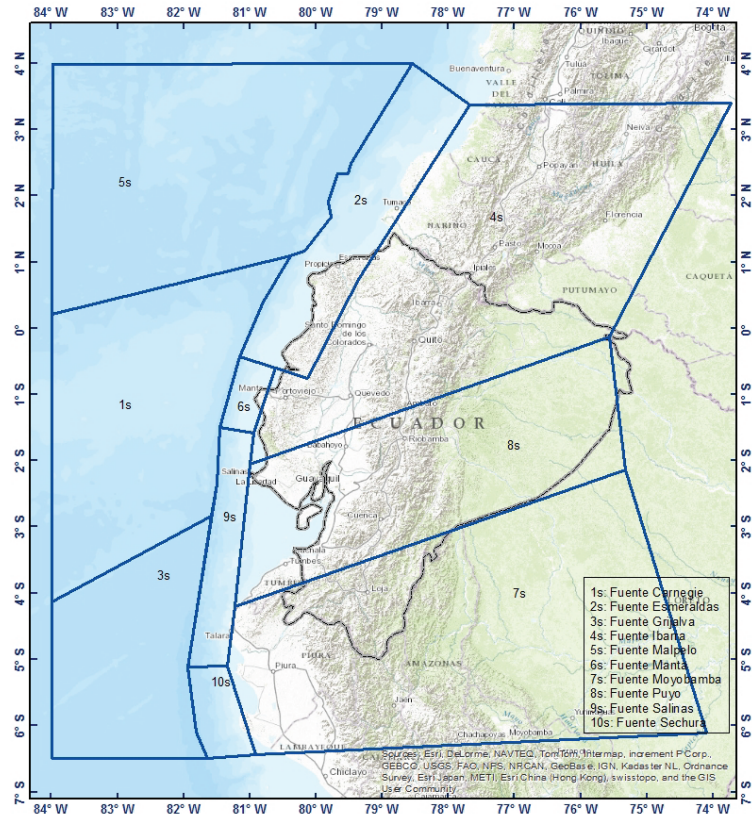


Figura 2.2.3: Geometría fuentes de subducción

Fuentes sísmicas de tipo corticales

Estas fuentes se definen como zonas con eventos sísmicos localizados en la corteza continental, con profundidades menores a los 40km. Este tipo se ha subdividido en 20 fuentes sismogénicas. Las características principales de estas fuentes se las puede identificar en la tabla 2.2.2.

ID	FUENTE		TIPO DE FALLA	OBSERVACIONES
	Nombre			
1	Amazonas		Indeterminado	Abarca parte oriente del país
2	El Ángel-San Gabriel		Reverse y Strike slip	Prolongación sistema de fallas Cauca-Patía
3	Apuela-Huayrapungo		Strike-slip	-
4	Bagua		Reverse	Abarca el norte del territorio peruano
5	Canadé-San Lorenzo		Indeterminado	Abarca fallas de Esmeraldas, Río Canadé, Quimindé, Bahía, El Aromo, Colonche
6	Chingual		Strike-slip	Dirección NNE-SSW
7	Cofanés-Cosanga		Reverse	-
8	Cordillera-Occidental		Indeterminado	-
9	Cuenca Amotape		Indeterminado	Abarca zona austral del Ecuador y norte de Perú
10	Cutucú		Reverse	Comprende el cinturón de fallas inversas de Piedemonte y Borde Oriental
11	Sistema Frontal Este		Strike-slip	Incluye la zona sur de Colombia
12	Guamote		Reverse y Strike slip	-
13	Latacunga		Reverse	Componente lateral dextral
14	Macas		Reverse	Comprende el cinturón de fallas inversas de Piedemonte y Borde Oriental
15	Machachi		Strike-slip	-
16	Napo		Reverse	Comprende el cinturón de fallas inversas de Piedemonte y Borde Oriental
17	Pallatanga-Pisayambo		Strike-slip	Presenta el mayor número de sismos por año (25%) Troncoso., (2008)
18	Papallacta		Indeterminado	Ubicada en la región nor-oriental de la Cordillera Real
19	Pumáj		Strike-slip	-
20	Quito		Reverse	Localizada al oriente de la cordillera Occidental. Abarca la falla de Quito

Tabla 2.2.2: Características Fuentes Corticales

Las profundidades de cada fuente se las considera inferiores a los 40 km, sin embargo, las mismas se afinaron de acuerdo a los registros sísmicos. En figura 2.2.4 se muestra la ubicación y geometría de las fuentes corticales.

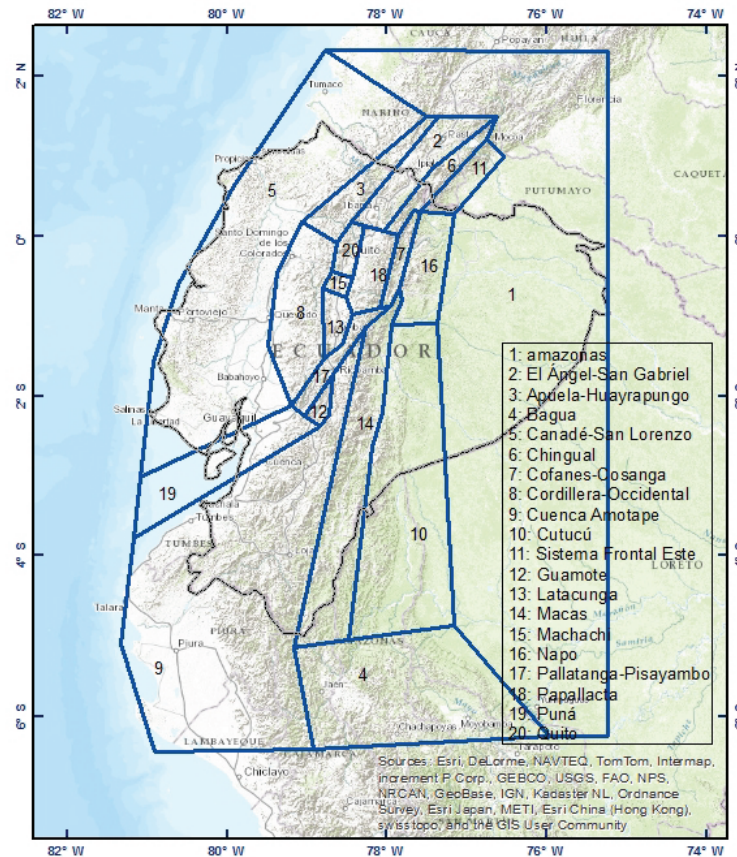


Figura 2.2.4: Geometría fuentes corticales

En la figura 2.2.5 se muestra un esquema del concepto de las profundidades adoptadas para los diferentes tipos de fuentes, en donde también se observa la profundidad media del corte.

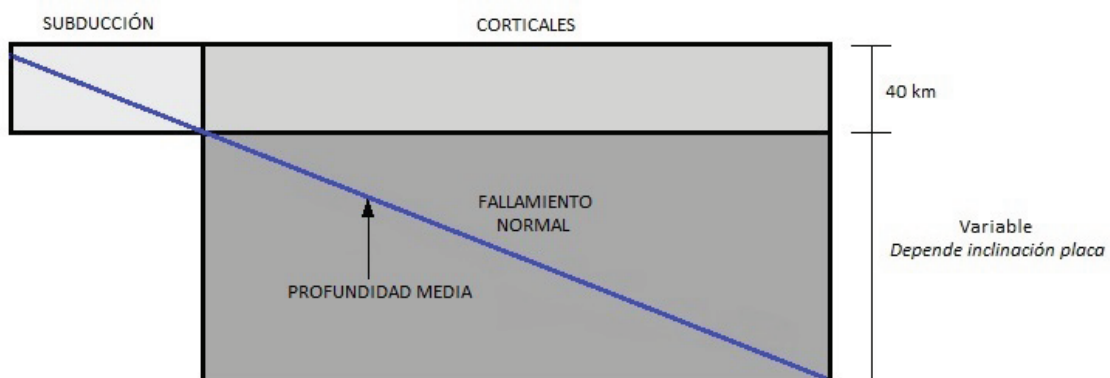


Figura 2.2.5: Esquema de profundidades de las fuentes sísmicas. Esquema tipo corte transversal

La geometría de las fuentes sísmicas expuestas es las que se utilizó en los estudios del presente trabajo. En cuanto a la profundidad, se utilizaron los conceptos mostrados en este capítulo, sin embargo, para las fuentes corticales se afinó este parámetro utilizando los registros del catálogo sísmico.

CATÁLOGO SÍSMICO

En este capítulo se presentan los análisis que son indispensables para el estudio de amenaza sísmica del Ecuador, se realiza un estudio del catálogo sísmico existente de manera que se trabaje con una base de datos homogénea, depurada y completa. La sismicidad de la región se encuentra estrechamente ligada al estudio del catálogo, por lo que su estudio se vuelve un punto primordial dentro de la estimación del peligro sísmico.

3.1 CATÁLOGO SÍSMICO DE LA REGIÓN

El estudio y creación de un correcto catálogo sísmico es un paso primordial para el estudio de peligrosidad sísmica de una región, en este caso, el Ecuador. De éste depende el correcto análisis estadístico de sismicidad de cada una de las fuentes. Se debe emplear una base de datos tan homogénea y completa como sea posible.

El catálogo compilado en este trabajo, corresponde aproximadamente a cinco siglos de recolección de datos, en el que se incluyen sismos de carácter histórico. La recopilación de este catálogo se llevó a cabo por C. Beauval, H. Yepes, P. Palacios, M. Segovia, A. Alvarado, Y. Font, J. Aguilar, L. Troncoso, S. Vaca en el estudio realizado denominado "An earthquake catalog for seismic hazard assessment in Ecuador" (2012).

Los catálogos estudiados, para llegar a una compilación final, fueron los del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), de la Red Nacional de Sismógrafos del Ecuador (RENSIG), del National Earthquake Information Center (NEIC-PDE de la U.S. Geological Survey), de la International Seismological Centre (ISC), de la Global Centroid Moment Tensor (GCMT), el catálogo Centennial compilado por Engdhal y Villaseñor (2002) y del EHB-ISC (versión más detallada del ISC), dando una mayor prioridad a los catálogos del IGEPN y de la RENSIG, ya que son regionales.

Esta base de datos incluye eventos históricos e instrumentales, sin embargo, para los estudios posteriores se han separado estas dos etapas de datos, ya que los resultados pueden verse afectados debido a su diferencia de homogeneidad. El número total de eventos existentes en el catálogo instrumental es de 10823 eventos, que abarcan un periodo desde 1901 hasta 2009, y 29 eventos históricos, que datan desde el año 1587.

3.2 HOMOGENIZACIÓN DE LAS MAGNITUDES

El catálogo compilado de la sismicidad del Ecuador considera diferentes tipos de magnitudes, esto debido a que los datos fueron obtenidos de distintas fuentes, razón por la cual, fue necesario realizar una homogenización de las magnitudes con el fin de trabajar con un mismo parámetro para todos los eventos, en este caso se consideró la magnitud de momento sísmico (M_w) como la de referencia.

Los tipos de magnitudes que se encontraron en los catálogos corresponden a magnitudes de ondas de cuerpo (M_b), ondas superficiales (M_s) y ondas de Coda (M_D) que corresponde a la RENSIG (ver [44]). Así mismo, se encontraron magnitudes desconocidas (UK) y asumidas a un evento (M). En la tabla 3.2.1 se muestra el número total de eventos para cada tipo de magnitud.

Clase de magnitudes	Nº de eventos
M_D	7541
M_b	2984
M_w	253
M_s	58
UK	22
M	1
TOTAL	10823

Tabla 3.2.1: Tipos de magnitudes catálogo instrumental

Las expresiones utilizadas para homogenizar estos diferentes tipos de magnitudes a una magnitud de tipo M_w , son las siguientes:

- Magnitudes de ondas de cuerpo (M_b)(ref.[6]).

$$M_w = 0.93M_b + 0.6 \text{ para } M_b < 6 \quad (3.1)$$

Esta misma expresión fue utilizada para ondas del tipo M_D .

Las magnitudes M_b y M_D mayores a 6, se las tomó similares a M_w

- Magnitudes de ondas superficiales (M_s) (ref.[7]).

$$M_w = 0.7044M_s + 1.702 \text{ para } 4.5 \leq M_s < 6.8 \quad (3.2)$$

Las magnitudes M_s mayores a 6.8, se las tomó similares a M_w

- Los tipos de magnitudes de ondas del tipo desconocido UK y M, han sido asumidas como M_w .

3.3 DEPURACIÓN DEL CATÁLOGO SÍSMICO

Para fines del estudio, se consideraron como representativos los eventos con $M_w > 4$, por lo que se eliminaron los eventos inferiores a esta magnitud para seguir realizando los siguientes procesos. Esto debido a que los eventos con magnitudes inferiores presentan diferencias en la recurrencia de los eventos, ya que los equipos que pueden medir estas magnitudes solo han funcionado en los últimos

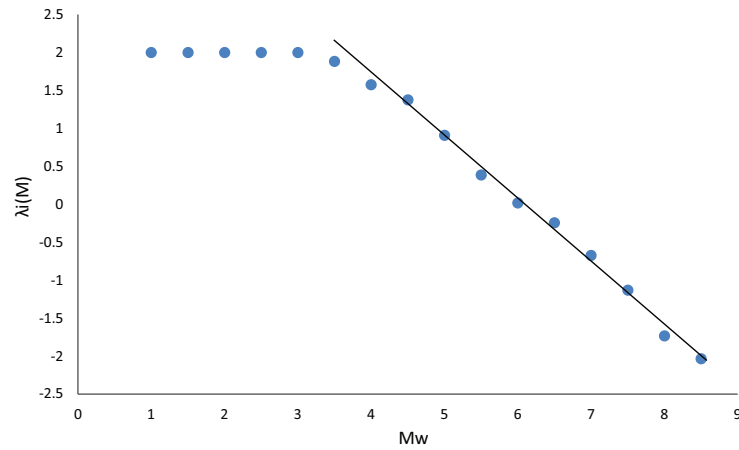


Figura 3.3.1: Análisis de recurrencia del catálogo sísmico inicial

años, además que magnitudes inferiores no causan un daño sobre las estructuras, entre otras razones. Esto se puede observar analizando la curva de recurrencia presentada en la figura 3.3.1.

La sismicidad debería seguir una tendencia lineal, por lo que se podría concluir que los eventos de magnitudes pequeñas ($M_w < 4$), no se encontrarían siguiendo razonablemente el comportamiento de esta ley. Se supuso que estos eventos afectarían la sismicidad de la región y se considera como magnitud mínima de homogeneidad a $M_w = 4$. Este análisis se podría confirmar analizando la pendiente del modelo de Gutenberg-Richter, para distintos rangos de magnitudes.

Debido a esta variación en la recurrencia de los diferentes rangos de magnitudes, se eliminaron 6744 eventos que presentaban $M_w < 4$.

3.3.1 Consistencia de la información sísmica

Se estudiaron los eventos del catálogo nombrado anteriormente, de manera que se pueda depurar para poder conseguir tasas de excedencia de mayor consistencia.

Se empezó por realizar una serie de histogramas, con relación a las magnitudes, profundidades y fecha de ocurrencia, para los sismos con $M_w > 5$, esto para tener una idea más clara de la certeza de los datos expuestos en el catálogo (ver figura 3.3.2).

Lo que se encontró, en cuanto a las profundidades, fue que existía una aglomeración de datos a los 33km de profundidad. Se debe tener especial cuidado en esta profundidad, ya que es usual que se indiquen las profundidades en zonas de subducción con este valor.

Debido a esto, se procedió a evaluar los eventos correspondientes a esta profundidad y depurar el catálogo para no utilizar eventos que no correspondan a esta profundidad.

3.3.2 Discriminación de réplicas y premonitores

Es necesario definir y separar los eventos que se consideran como premonitores, eventos principales y réplicas, ya que para el estudio sismogénico de cada una las fuentes solo se revisan las características de los eventos principales.

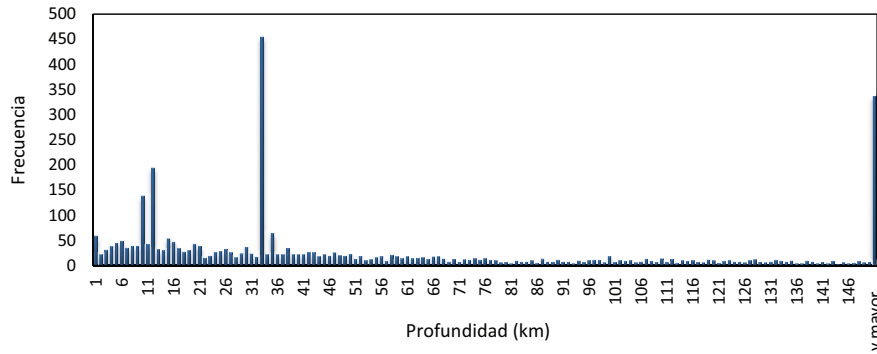


Figura 3.3.2: Histograma de profundidades del catálogo sísmico inicial

No existe un concepto general y específico para definir una réplica, en lo que si se concuerda, es que se encuentran definidas en eventos asignados a un espacio y un tiempo posteriores a un evento principal.

El concepto básico para localizar una réplica, es situar un evento principal (eventos con $M_w > 5$), y se calcula las distancias y tiempos máximos en los que se puede producir una réplica, es decir, la distribución espacial y temporal de las réplicas. Para obtener dichos parámetros, ya que no se cuenta con un concepto bien definido, se utilizaron las expresiones de Maeda [29] y el algoritmo de Reasenber [45].

- *Relaciones de Maeda:*

Se considera el decaimiento exponencial en número y magnitud de réplicas. Dichas relaciones, que se basan en los trabajos de Utsu (1970) (ref.[52]) se muestran a continuación:

$$L \leq 10^{((0.5 * M_m - 1.8))} \quad (3.3)$$

$$t \leq 10^{((0.17 + 0.85 * (M_m - 4)) / 1.3)} - 0.3 \quad (3.4)$$

En donde,

L : distancia epicentral, respecto al evento principal

t : tiempo en días, respecto al evento principal

M_m : magnitud evento principal

A continuación se muestra la tabla 3.3.1 con los posibles rangos para estudiar las réplicas:

Para los eventos premonitores, se consideró un tiempo constante de 10 días antes del evento principal.

Al analizar el catálogo utilizando esta metodología, se obtuvo un 14% de réplicas.

- *Algoritmo de Reasenber:*

Existen otras teorías para poder ubicar las posibles réplicas, una de ellas es el algoritmo desarrollado por Reasenber (1985, ref.[45]), y consiste en plantearse un tiempo máximo y mínimo (τ_{max}, τ_{min}), así como una distancia, con un radio determinado para delimitar las réplicas (r_{fact}), los valores empelados se observan en la .

El porcentaje de réplicas obtenido fue de un 17%.

Mm	Ma	L(Km)	t(días)
5	4	5.01	5.79
5.25	4.25	6.68	8.57
5.5	4.5	8.91	12.63
5.75	4.75	11.89	18.54
6	5	15.85	27.14
6.1	5.1	17.78	31.6
6.5	5.5	28.18	57.96
6.75	5.75	37.58	84.59
7	6	50.12	123.38
7.25	6.25	66.83	179.91
7.5	6.5	89.13	262.26
7.75	6.75	118.85	382.25
8	7	158.49	557.08
8.25	7.25	211.35	811.81
8.5	7.5	281.84	1182.95

Tabla 3.3.1: Valores de los parámetros de espacio y tiempo de las relaciones de Maeda para cada magnitud

τ_{min} (días)	τ_{max} (días)	r_{fact} (km)
10	20	15

Tabla 3.3.2: Valores empleados del algoritmo de Reasenber

Ya que los resultados obtenidos por ambos métodos son similares, se consideraron como válidas sus respuestas. Se utilizaron las relaciones de Maeda para discriminar las réplicas y premonitores del catálogo.

El total de eventos principales con $M_w > 4$ es de 3531.

3.4 COMPLETEZ DEL CATÁLOGO

Uno de los principales problemas que se presentan al analizar un catálogo sísmico, es que la información presentada en estos, no es completa. Esto se debe a que conforme pasan los años, existe una mejor instrumentación, más estaciones o mejor tecnología, inclusive diferente personal técnico, pudiéndose obtener datos más precisos y con rangos de magnitudes más amplios.

Existen ventanas de tiempo en las que diferentes rangos de magnitudes no son completos. Esto afecta a los parámetros sísmicos que se obtienen para cada una de las fuentes, ya que las tasas de recurrencia pueden variar debido a datos inconsistentes o incompletos del catálogo.

Existen ciertos métodos específicos para estudiar los periodos en los que se puede considerar al catálogo completo, en este trabajo, se estudiaron el método gráfico y el método de Stepp (1972, ref.[50]).

3.4.1 Método Gráfico

El método gráfico permite observar la magnitud mínima de completez, la misma que define el límite inferior, a partir del cual, el catálogo se considera completo. El procedimiento que se siguió es el siguiente:

- Agrupar la información por cada rango de tiempo (T_i) y de magnitud (M_i).
- Contar los eventos para cada rango asignado anteriormente (E_i).
- El siguiente paso es obtener el número de eventos acumulados, empezando por el año más reciente.
- Normalizar los eventos en cada rango de tiempo, haciendo unitario el número total de eventos para cada intervalo de magnitud.
- Se procede a graficar el número de eventos acumulados y normalizados con respecto al tiempo transcurrido. Se observa el año, a partir del cual, los eventos mantienen una pendiente constante en su ocurrencia.

Como se puede observar en la figura 3.4.1 para eventos con magnitudes inferiores a siete, se identifica claramente la pendiente constante que indica el inicio del catálogo completo; sin embargo, para magnitudes mayores, no se define con claridad una sola pendiente, debido a que el tiempo de retorno de eventos con estas magnitudes, inclusive podría llegar a ser mayor que el del catálogo observado.

Analizando los resultados expuestos en la figura 3.4.1, se puede concluir que el catálogo reporta eventos completos de 1900 a 2009 para $M_w > 7$, de 1920 a 2009 para $M_w > 6.5$, y un periodo desde 1964 a 2009 para $M_w > 4$.

Es importante mencionar que esta metodología se debe realizar para cada una de las fuentes sísmicas estudiadas, con la finalidad de encontrar las ventanas de tiempo en las que el catálogo sea completo.

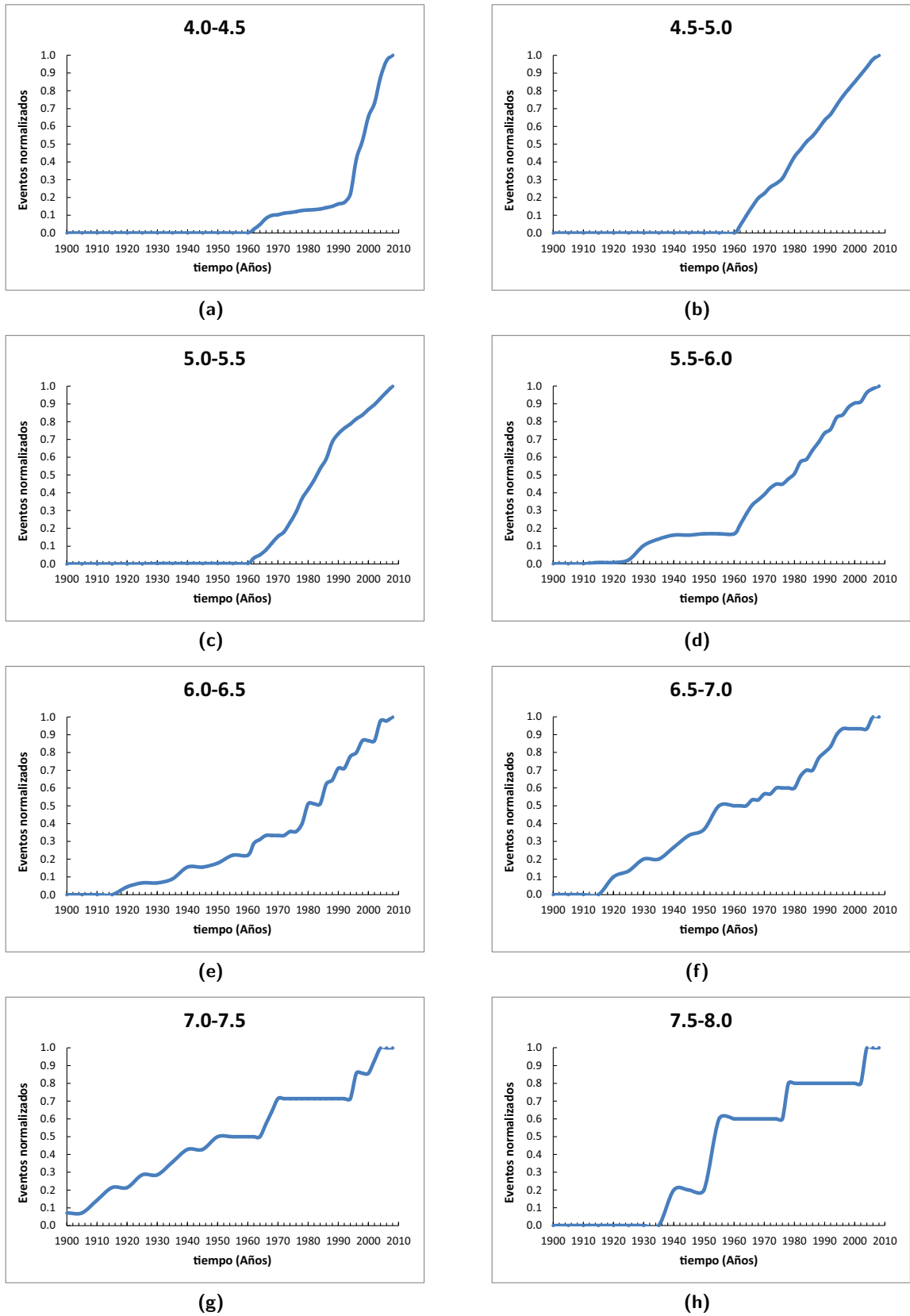


Figura 3.4.1: Completez del catálogo sísmico. Método Gráfico

3.4.2 Método de STEPP

Con este método, lo que se busca es obtener los períodos para los cuales se considera que un catálogo reporta, de manera adecuada, la ocurrencia de eventos considerando los distintos rangos de magnitud. Se estudian los periodos de tiempo, para los cuales, la tasa de recurrencia media de eventos sísmicos es estable, esto para diferentes rangos de magnitudes. En estos periodos se considera que el catálogo está completo.

El método de Stepp (1972, ref.[50]) sigue el procedimiento mostrado a continuación:

- Ordenar el catálogo, empezando por el evento más reciente
- Agrupar la información por cada rango de tiempo (T_i) y de magnitud (M_i).
- Se procede a contar los eventos para cada rango asignado anteriormente (E_i).
- Encontrar los eventos acumulados para cada rango de magnitud.

$$K_i = \sum_{i=1}^n E_i \quad (3.5)$$

- Se halla la tasa media de ocurrencia para cada periodo de tiempo y magnitud

$$R_i = \frac{K_i}{T_i} \quad (3.6)$$

- Obtenemos la varianza para cada rango.

$$S_R^2 = \frac{R_i}{T_i} \quad (3.7)$$

- Calculamos la desviación estándar.

$$S_R = \frac{\sqrt{R_i}}{\sqrt{T_i}} \quad (3.8)$$

- Trazar la desviación estándar con respecto al tiempo, en escala log-log.
- Dibujar la recta $1/\sqrt{T_i}$ en escala logarítmica.
- Se considera que el catálogo es completo cuando la desviación estándar sigue la pendiente de la recta $1/\sqrt{T_i}$. Esto se determina de manera gráfica

Como se observa en la figura 3.4.2, los valores obtenidos son casi iguales a los del método gráfico, con la diferencia que para valores inferiores a una magnitud de 4.5, el catálogo es completo desde 1972.

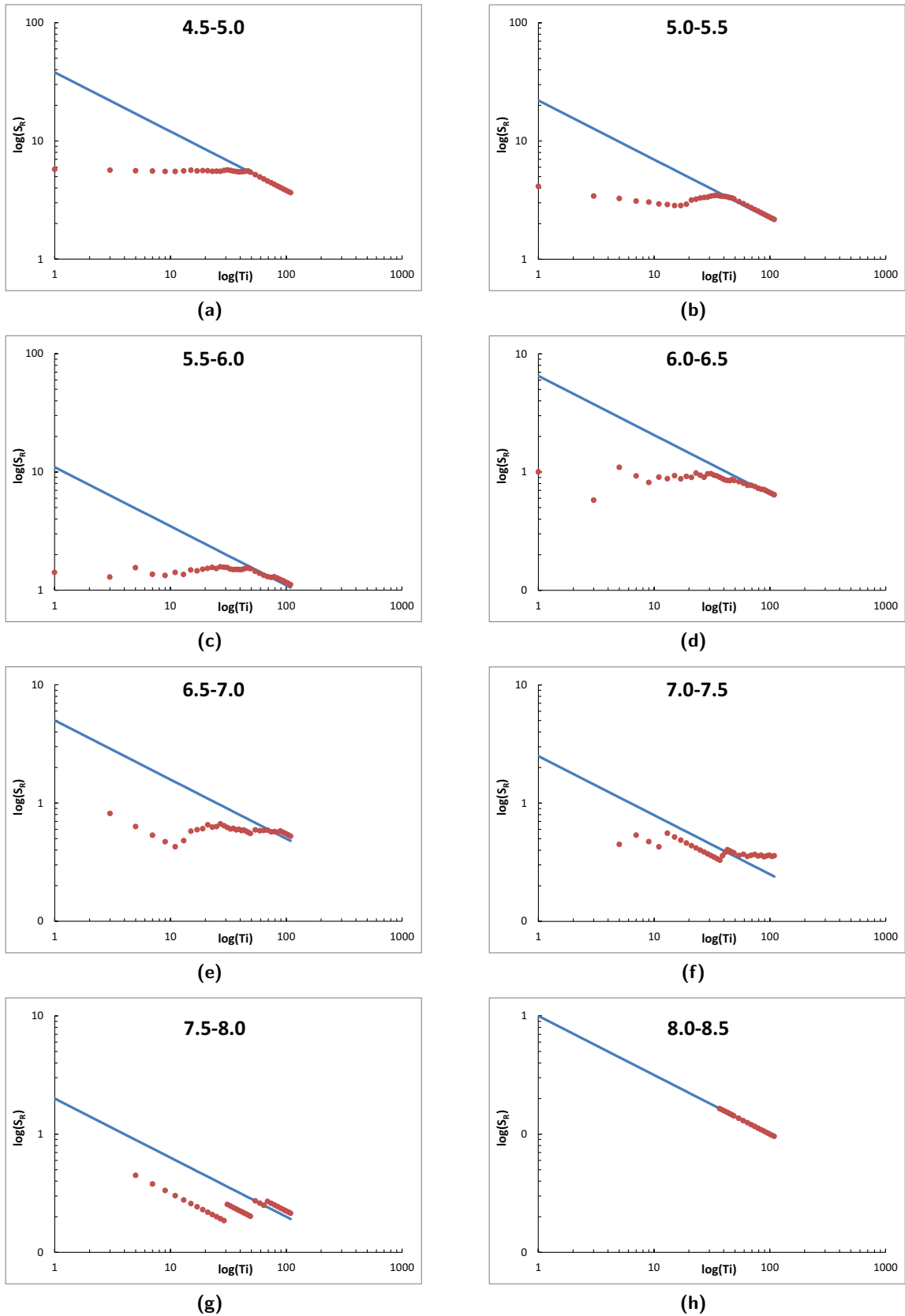


Figura 3.4.2: Completez del catálogo sísmico. Método de Stepp

PELIGRO SÍSMICO

El capítulo 6.1 consiste en la evaluación del peligro sísmico del Ecuador. En un inicio, se explican los procesos probabilísticos para el cálculo de amenaza sísmica, y se continúa por indicar los criterios para la caracterización de las fuentes sísmicas. Posteriormente, se utilizan los parámetros sísmicos definidos para calcular la amenaza sísmica del Ecuador empleando el programa CRISIS, el cual ha sido elaborado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM por Ordaz (2007, ref,[39]).

4.1 GENERALIDADES

En un estudio sísmico, generalmente no se dispone de datos suficientes como para determinar la frecuencia con que se presentan las intensidades sísmicas, las cuales son necesarias en la toma de decisiones ingenieriles. Debido a la importancia de estos datos, se vuelve necesario realizar el cálculo probabilista de amenaza sísmica, de manera que se pueda determinar niveles de intensidad sísmica en sitios de interés.

Se podría definir al peligro o amenaza sísmica como la probabilidad de que en un sitio de interés, se excedan valores de intensidad en un lapso dado, es decir conocer la frecuencia y severidad de los posibles eventos.

Este tipo de estudios se ha venido desarrollando desde años atrás, empezando por análisis de tipo determinista, hasta modelos probabilísticos de peligro.

Un análisis determinista de peligro sísmico (DSHA, por sus siglas en inglés), analiza el caso sísmico más desfavorable en el lugar de estudio, es decir, la mayor intensidad a la que puede estar sometida una estructura. Sin embargo, se excluye de los resultados, la probabilidad de ocurrencia del evento, y no se consideran las incertidumbres asociadas a las diferentes variables (distancia, profundidad, tasa de excedencia, entre otras) que intervienen en el problema.

Para tomar en cuenta la probabilidad de ocurrencia de los eventos, y las incertidumbres que se presentan en este tipo de fenómenos, se realizan estudios probabilísticos de peligro sísmico.

4.2 ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE PELIGRO SÍSMICO (PSHA)

El fenómeno sísmico ha sido ampliamente estudiado, sin embargo, gran parte de los resultados se basan en hipótesis físicas, involucrando de esta manera, un cierto número de incertidumbres.

Una forma de considerar los errores que se pueden producir, es tomar a estas variables (distancia, profundidad, tasa de excedencia, entre otras) como valores aleatorios. Para lograr esto, se emplean distribuciones de probabilidad, las cuales describen la ocurrencia de temblores en una región dada, involucrando de manera analítica las incertidumbres asociadas a las distintas variables.

La metodología para realizar un PSHA involucra ciertos aspectos, tales como:

- Caracterización de las fuentes sísmicas. Se obtienen los parámetros sísmicos a partir de un correcto estudio de los catálogos sísmicos de la región, similar a los estudios indicados en el capítulo 2, y empleando ciertos modelos de sismicidad para cada una de las fuentes. Se debe considerar a las fuentes con una probabilidad uniforme de ocurrencia de sismos en toda su área.
- Estudio de las leyes de atenuación, para conocer las intensidades o las aceleraciones máximas probables en roca que se producirían en la zona de estudio. Esto nos permitirá conocer los efectos sísmicos en el sitio de interés.
- Obtención de la curva de amenaza sísmica, la cual indica la probabilidad de que una intensidad sea excedida o igualada en un cierto periodo de tiempo.

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES

Una vez definida la geometría de las fuentes de manera tectónica, tal como se indicó en el capítulo 2, se deben definir los parámetros que permitan calcular la sismicidad dentro de cada fuente. Las variables a definir son, principalmente, la distancia fuente-sitio, la distribución de los sismos dentro de las fuentes y la distribución del tamaño y ocurrencia de sismos con el tiempo.

Se debe recalcar que la geometría de las fuentes quedan ligadas al criterio del autor, ya que no existe una forma estándar para obtener una geometría precisa de las fuentes sísmicas.

4.3.1 Distancia fuente-sitio

Para establecer la distancia entre la fuente sísmica y un sitio específico, se deben considerar las posibles formas que pueden adoptar dichas fuentes. Cornell (1968, ref[8]) definió tres principales geometrías para las fuentes, las cuales se indican a continuación:

- a) *Fuentes puntuales*: Se utiliza para definir concentraciones de sismos en áreas pequeñas.
- b) *Fuentes lineales*: Representan fallas planas bien definidas, con dispersión muy pequeñas en las distancias hipocentrales de los eventos sísmicos.
- c) *Fuentes de área*: cuando los datos disponibles no permiten definir un mecanismo del sismo, y no permiten determinar una geometría real de la fuente. Los epicentros presentan gran dispersión, por lo que se adoptan geometrías conocidas que engloban a dichos eventos.

En la figura 4.3.1 se pueden observar los diferentes tipos de fuentes juntos con un ejemplo de la distancia fuente-sitio.

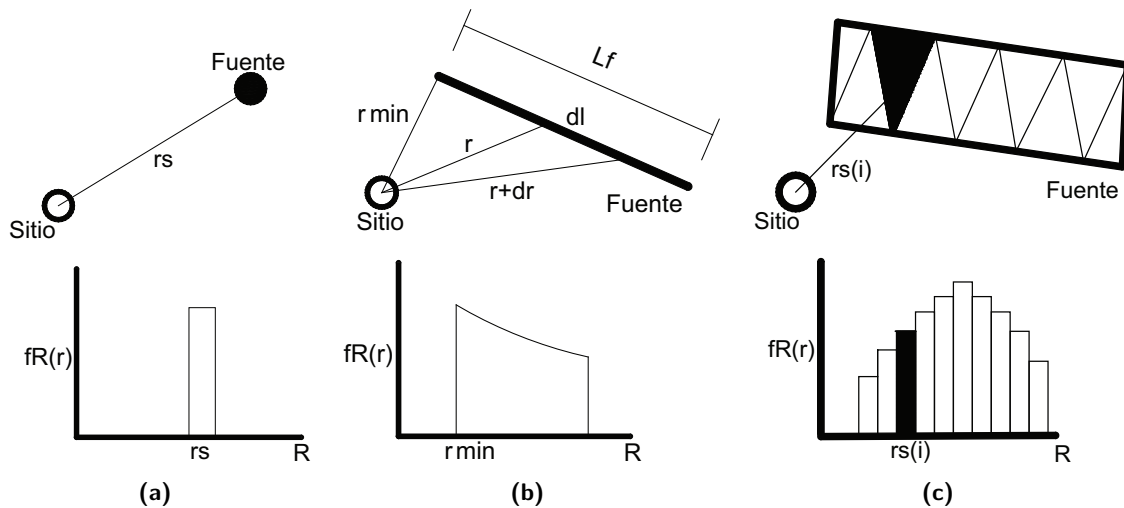


Figura 4.3.1: Variación de la distancia fuente-sitio para diferentes tipos de fuente. (a) Fuente puntual, (b) fuente lineal, (c) fuente de área (Tomado de kramer 1996)

Si bien es cierto, se considera que los eventos sísmicos presentan una distribución uniforme de probabilidad de ocurrencia dentro de la fuente, no acontece lo mismo cuando se trata de la distancia de la fuente al evento estudiado. Para considerar esta incertidumbre, se puede tomar a la distancia como una función de densidad de probabilidad, $f_R(R)$, la cual depende de la geometría de la fuente, la ubicación del sitio y la magnitud del sismo considerado (Kramer, 1996, ref.[25]), esto se puede observar en la figura 4.3.1.

A continuación se describen los modelos de las funciones de densidad de probabilidad considerados para cada tipo de fuente:

Fuente puntual: El valor de la distancia R , tendrá un solo valor igual a r_s (figura 4.3.1(a)). La probabilidad de que $R=r_s$ es uno, mientras que la probabilidad de tener un valor de $R \neq r_s$ es cero.

Fuente lineal: Para la fuente lineal similar a la de la figura 4.3.1(b), se supone una misma probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico en cualquier punto de la falla. Si se supone que la variable se distribuye uniformemente en el intervalo a lo largo de L_f , La distribución de probabilidad acumulada ($F_R(r)$), y su correspondiente función de densidad de probabilidad ($f_R(r)$) de la variable r es la siguiente es la siguiente:

$$F_R(r) = \frac{\sqrt{r^2 - r_{min}^2}}{L_f} \tag{4.1}$$

$$f_R(r) = \frac{dF_R(r)}{dr} = \frac{r}{L_f \sqrt{r^2 - r_{min}^2}} \tag{4.2}$$

Fuente de área: Para fuentes más complejas similares a las de la figura 4.3.1(c), es aconsejable evaluar la función de densidad de probabilidad (PDF) utilizando métodos numéricos. La manera de diseñar esta función es la siguiente: para cada distancia, $r_s(i)$, se determina la fracción del área de la fuente $\Delta r(i)$ que se encuentra a esa distancia del sitio, con respecto al área total de la fuente sísmica. De esta manera se obtiene un conjunto de pares $(r_s(i), \Delta r(i))$, que al

tabularlos conforman un histograma que se aproxima a la PDF de distancias $f_R(R)$ (Leonardo, 2012, ref[26]).

4.3.2 Sismicidad de las fuentes

Un paso fundamental en el estudio del PSHA, es conocer la frecuencia y severidad con la que se podrían presentar los eventos sísmicos dentro de una misma fuente. Para esto, se puede considerar que los sismos tienen la misma probabilidad de ocurrencia dentro de la geometría fuente, y que su recurrencia (magnitud vs. frecuencia), observada en los catálogos sísmicos, es suficiente para predecir los eventos en cualquier lapso de tiempo.

Modelo de ocurrencia de Poisson

Es un modelo empleado para predecir la ocurrencia de un sismo con respecto al tiempo. En este modelo de ocurrencia, el tiempo entre dos sismos se asume como una variable con distribución exponencial, siendo estos eventos independientes tanto temporal como espacialmente.

La función de probabilidad de Poisson se puede expresar de la siguiente manera:

$$P(N = n) = \frac{e^{-\lambda(M)t} [e^{-\lambda(M)t}]^n}{n!} \quad (4.3)$$

Donde, $P(N)$ es la probabilidad de ocurrencia de n eventos con magnitud $m \geq M$ en t años (tiempo de interés del estudio) y $\lambda(M)$ es la tasa de excedencia de sismos con magnitud $m \geq M$, la misma que puede expresarse de diferentes formas, como por ejemplo Gutenberg-Richter [18] o estimación por máxima verosimilitud, entre otras.

Por otra parte, la probabilidad de que ocurran eventos con probabilidad $m \geq M$, esta dada por:

$$P(N) = 1 - e^{-\lambda(M)t} \quad (4.4)$$

Donde $e^{-\lambda(M)t}$ representa la probabilidad de que no curran eventos con magnitud $m \geq M$.

En el modelo de ocurrencia de Poisson, la densidad de probabilidad entre eventos con magnitud $m \geq M$ puede asumirse como exponencial, pudiendo expresarse como en la ec.(4.5), donde τ representa el tiempo entre eventos con magnitud $m \geq M$.

$$P_\tau(\tau) = \lambda(M)e^{-\lambda(M)\tau} \quad (4.5)$$

Modelo de recurrencia de Gutenberg-Richter (GR)

En este modelo la sismicidad de una determinada fuente está relacionada con la tasa media anual de excedencia de magnitudes sísmicas ($\lambda(M)$), o en otras palabras, el número de veces por unidad de tiempo que ocurre un sismo con magnitud superior a m . Este modelo presenta una relación de recurrencia lineal.

Gutenberg y Richter (1944, ref.[18]) estudiaron datos sísmicos del Sur de California por varios años. Los autores obtuvieron una tasa media anual de excedencia $\lambda(M)$, siguiendo principalmente dos pasos:

- Organizarn los datos de acuerdo al número de sismos que excedían una magnitud (M), tomada como base, en un lapso de tiempo, t .
- Dividieron el número de veces que se excedía cada magnitud, con respecto al tiempo, t .

Al dibujar el logaritmo de la tasa anual de excedencia que obtuvieron, se observó que seguía una tendencia lineal, la misma que se muestra a continuación:

$$\log\lambda(M) = a + bM \tag{4.6}$$

Donde $\lambda(M)$ es la tasa media anual de excedencia de un sismo con magnitud m . Los parámetros a y b son generalmente obtenidos mediante una regresión matemática y representan el logaritmo del número total de sismos con magnitud $m \geq M$, y la probabilidad relativa de ocurrencia entre eventos con magnitudes altas y bajas, respectivamente.

El parámetro b afecta directamente a la pendiente de $\lambda(M)$, mientras que el parámetro a incrementa o disminuye el valor de la tasa de excedencia para cada magnitud, en una razón constante. En la figura 4.3.2 se presenta de manera gráfica la influencia de a y b dentro de $\lambda(M)$.

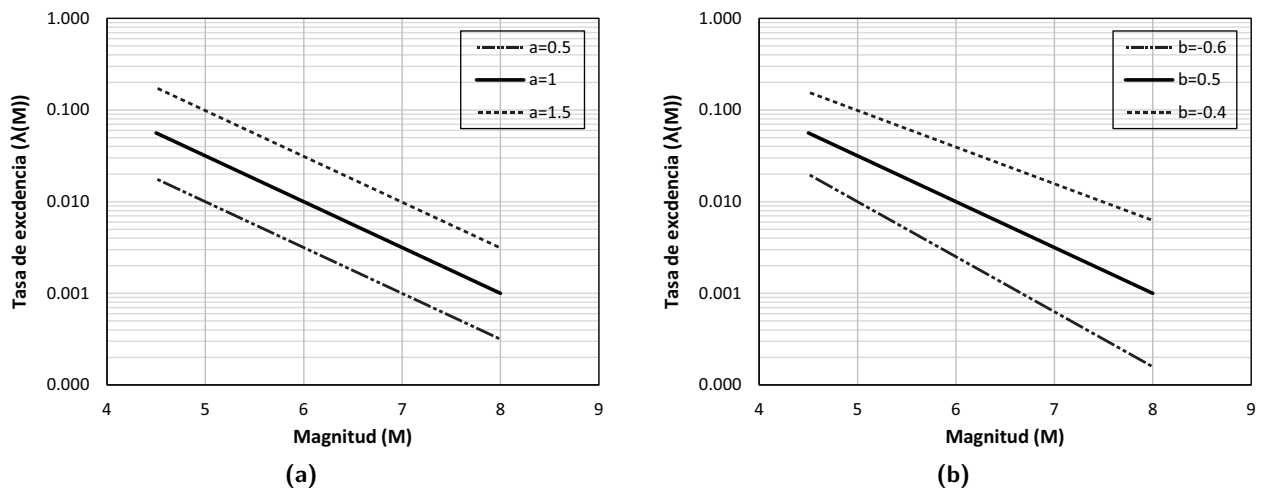


Figura 4.3.2: Parámetros del modelo GR. (a) variación parámetro a , (b) variación parámetro b

El modelo GR puede ser expresado en forma exponencial, similar a la ec. (4.7).

$$\lambda(M) = e^{\alpha - \beta M} \tag{4.7}$$

Donde,

$$\alpha = a \ln(10) \tag{4.8}$$

$$\beta = b \ln(10) \tag{4.9}$$

La ec.(4.7) cubre un rango de $(-\infty, +\infty)$, sin embargo, el interés recae en un rango que represente los eventos con magnitudes que pudieran afectar a las estructuras, este rango se podría representar como $[M_o, M_u]$, cuyos limites quedarían definidos por los catálogos sísmicos para cada fuente. Si se eliminan

los eventos con magnitud $M < M_0$, la tasa de excedencia puede representarse de la siguiente manera:

$$\lambda(M) = e^{\alpha - \beta M} \quad (4.10)$$

$$\lambda(M) = e^{\alpha} \cdot e^{\beta M} \quad (4.11)$$

$$\lambda(M) = e^{\alpha - \beta M_0} \cdot e^{-\beta M + \beta M_0} \quad (4.12)$$

$$\lambda(M) = \nu \cdot e^{-\beta(M - M_0)} \longrightarrow \text{para } M > M_0 \quad (4.13)$$

Donde $\nu = e^{\alpha - \beta M_0}$ es la tasa media anual de excedencia, y M_0 es la magnitud umbral elegida. La distribución de probabilidad de magnitud del modelo de recurrencia de Gutenberg-Richter con límite inferior, se puede expresar en términos de la función de distribución acumulativa (*CDF*), tal como en la ec.(4.14) Esto con la finalidad de determinar el número de eventos mayores a una magnitud mínima (M_0) que pueden ocurrir hasta la ocurrencia de un evento M .

$$F_M(M) = P[M < m | M > M_0] = \frac{\lambda_{M_0} - \lambda_M}{\lambda_{M_0}} = \nu [1 - e^{-\beta(M - M_0)}] \quad (4.14)$$

Al diferenciar la ec.(4.14), obtenemos la función de densidad de probabilidad (*PDF*) para magnitudes $M > M_0$.

$$f_M(M) = \frac{d}{dM} F_M(M) = \nu \beta e^{-\beta(M - M_0)} \quad (4.15)$$

Cada fuente sísmica está asociada a una magnitud máxima que no puede ser excedida (McGuire (1976, ref.[30])), por lo que en el otro extremo de la escala de magnitudes ($M \rightarrow +\infty$) se debería truncar la *PDF*(ec.(4.15)) en una magnitud máxima M_u . La forma truncada de la función *PDF*, se puede expresar como:

$$f_M(M) = \nu \left[\frac{\beta e^{-\beta(M - M_0)}}{1 - e^{-\beta(M_u - M_0)}} \right]; \text{ para } M \leq M_u \quad (4.16)$$

Al integrar la ec.(4.16) se puede obtener el modelo truncado de Gutenberg - Richter, cuya tasa anual de excedencia puede ser calculada mediante la siguiente expresión:

$$\lambda(M) = \nu \left[\frac{e^{-\beta(M - M_0)} - e^{-\beta(M_u - M_0)}}{1 - e^{-\beta(M_u - M_0)}} \right]; \text{ para } M_0 \leq M \leq M_u \quad (4.17)$$

En donde $\lambda(M)$ es la tasa anual de excedencia, M_o y M_u representan la magnitud mínima y máxima consideradas dentro del catálogo completo de cada fuente, ν y β son parámetros que definen la tasa de excedencia de cada una de las fuentes sísmicas, los cuales se estiman mediante procesos estadísticos de la información sobre la sismicidad de la fuente.

En la figura 4.3.3 se muestra la diferencia del modelo truncado y lineal del modelo de Gutenberg-Richter.

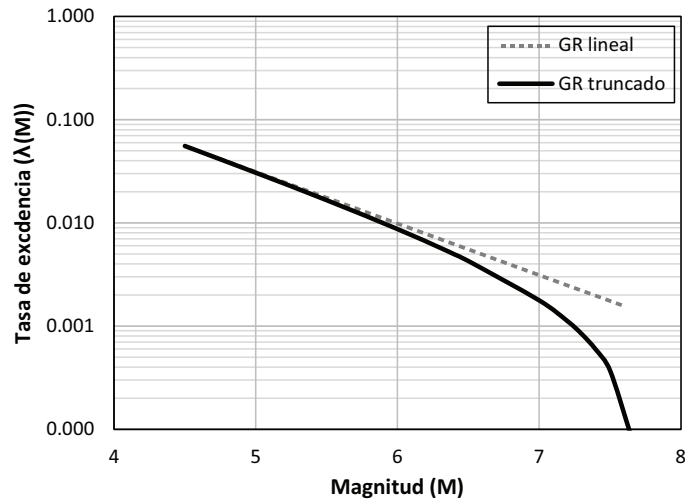


Figura 4.3.3: Modelo de Gutenberg-Richter y Gutenberg-Richter truncado

Estimación por máxima verosimilitud

Es un método de estimación de parámetros sísmicos, los mismos que deben maximizar la función de verosimilitud. En su cálculo, a diferencia de Gutenberg-Richter, no influyen los eventos de magnitudes altas. Es un buen instrumento cuando se tiene brevedad en los registros del catálogo completo, y cuando la información estadística es limitada.

Para este modelo, se ha considerado una función de densidades de probabilidad descrita en Newmark y Rosenblueth (1973, ref[36]), la cual expresa lo siguiente:

$$f_m = \frac{\beta e^{-\beta M}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \tag{4.18}$$

Considerando el modelo exponencial de ocurrencia de Poisson (ver ec.(4.5)) y la función de densidades de probabilidad de magnitudes de la ec.4.18, se puede llegar a calcular la verosimilitud de la historia sísmica de la siguiente manera (Esteva (1970, ref.[13])):

$$L_{E|\lambda_0, \beta, M_u} = \alpha \lambda_0^n e^{-\lambda_0 T} \left(\frac{\beta}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \right)^n e^{-\beta \sum s} \tag{4.19}$$

En donde,

T : Corresponde al tiempo total cubierto por el catálogo, y definido como

$$T = \sum_{i=1}^n t_i \tag{4.20}$$

n : Es el número de eventos ocurridos

M_0, M_u : Magnitud mínima y máxima registrada en el catálogo. En este estudio la magnitud mínima considerada es 4.0.

λ_0 : Número de veces por unidad de tiempo, que ocurre un sismo con magnitud superior a M_0 .

\hat{s} : Se lo define de la siguiente manera.

$$\hat{s} = \sum_{i=1}^n (M_i - M_0) \quad (4.21)$$

Utilizando el concepto del teorema de Bayes, el cual no dice que *la densidad a posteriori de los parámetros es igual al producto de la verosimilitud del evento por la densidad a priori en tales parámetros* y definiendo a priori a λ_0 y β como densidades tipo gamma.

$$f'_{\lambda_0}(\lambda_0) = \alpha \lambda_0^{m'-1} e^{-\lambda_0 t'} \quad (4.22)$$

$$f'_{\beta}(\beta) = \alpha \beta^{m'-1} e^{-\beta s'} \quad (4.23)$$

Donde n' , m' , t' y s' son parámetros que condensan la información previa, y se fijan a estudio tectónicos de regiones similares. Si aplicamos el teorema de Bayes y utilizamos las funciones expuestas en las ecuaciones 4.22 y 4.23, podemos llegar a la siguiente expresión:

$$L_{\lambda_0, \beta, M_u} = \alpha \lambda_0^{n''-1} e^{-\lambda_0 t''} \beta^{m''-1} e^{-\beta s''} \underbrace{\left(1 - e^{-\beta M_u}\right)^{-n}}_{\approx 1} ((M_u)) \quad (4.24)$$

Donde,

$$m'' = m' + n$$

$$n'' = n' + n$$

$$t'' = t' + T$$

$$s'' = s' + \hat{s}$$

λ_0 y β tienen una función de distribución a posteriori tipo gamma, con los siguientes valores esperados:

$$\lambda_0 = \frac{n''}{t''} \quad (4.25)$$

$$c(\lambda_0) = \frac{1}{\sqrt{n''}} \quad (4.26)$$

$$E(\beta) = \frac{m''}{s''} \quad (4.27)$$

$$c(\beta)^2 = \frac{1}{m''} \quad (4.28)$$

4.3.3 Ejemplo de caracterización de fuentes sísmicas

A continuación se presenta un ejemplo de la caracterización de la fuente siete de subducción (Fuente Moyobamba, ver capítulo 2).

a) *Análisis de los eventos registrados en la fuente*

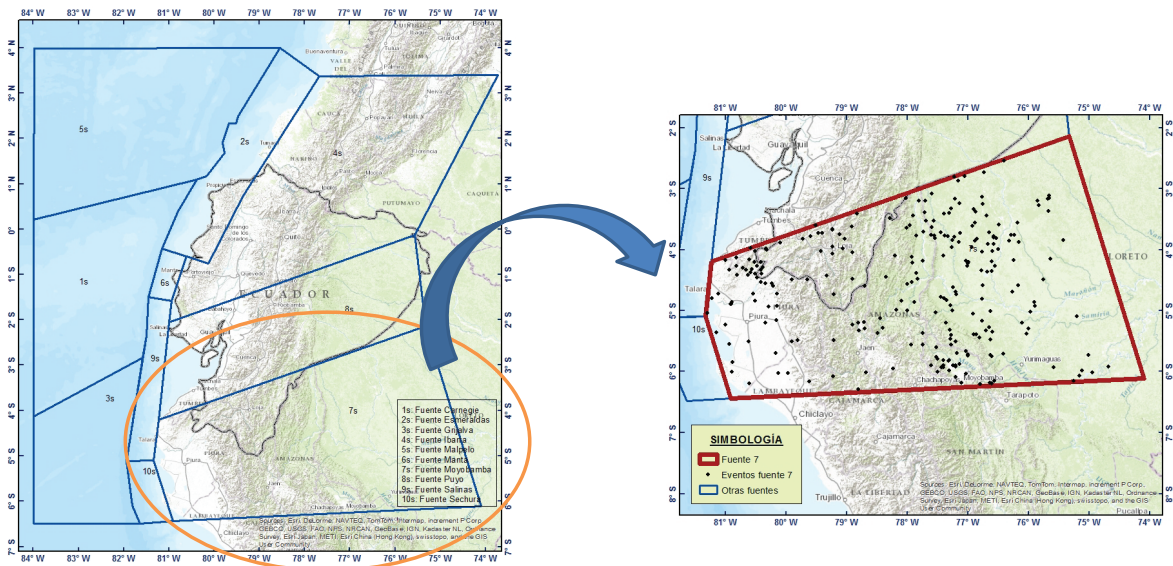


Figura 4.3.4: Eventos registrados en el catálogo para la fuente 7, (Moyobamba)

La fuente 7s (fuente Moyobaba) presentada en la figura 4.3.4 corresponde a una fuente de subducción con tipo de falla normal. El número de eventos principales registrados en el catálogo sísmico es de 475 sismos.

b) *Compleitud del catálogo sísmico*

El paso a seguir es el de encontrar los periodos de tiempo en el que el catálogo se considera completo. Para esto se siguió el procedimiento descrito en el capítulo 3, analizando la completez por el método gráfico y el de Stepp. En la tabla 4.3.1 se indican los periodos completos del catálogo para cada intervalo de magnitud.

Rango Magnitudes	Año de completez
4.0-4.5	1970
4.5-5.0	1976
5.0-5.5	1960
5.5-6.0	1972
6.0-6.5	1962
6.5-7.0	1930
7.0-7.5	1940
7.5-8.0	1950
8.0-8.5	-

Tabla 4.3.1: Periodos de completez del catálogo sísmico para la fuente 7s

El número de eventos del catálogo completo es de 429.

c) *Sismicidad de la fuente*

La fuente 7s se la considera como fuente tipo área, en donde la variación de la profundidad se puede observar en la figura 4.3.6

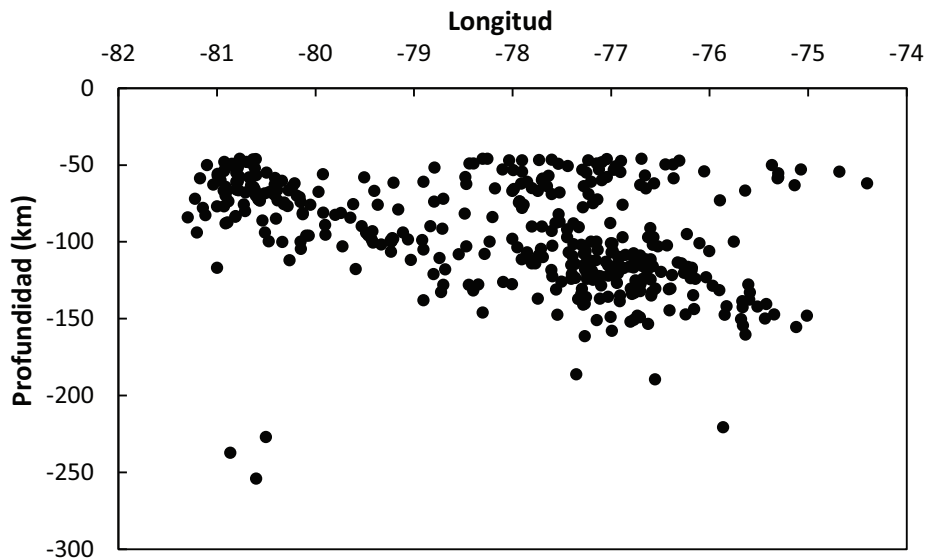


Figura 4.3.5: Corte trasversal de la fuente 7s

Al analizar la figura 4.3.6, se optó por considerar una profundidad variable para la fuente 7s, que va de 40km a 240km en dirección Oeste-Este.

Por otra parte, para la incertidumbre temporal se utilizó el modelo de ocurrencias de Poisson (ver expresión (4.5)). Los parámetros sísmicos se calcularon utilizando una estimación por máxima verosimilitud (ver ecuaciones (4.25) a (4.28)). En la tabla 4.3.2 se muestra un resumen de las características de los eventos registrados para esta fuente, y que fueron considerados para el cálculo de su sismicidad.

$M_0 =$	4.227	magnitud mínima registrada en catálogo
$n =$	429	número total de sismos en el catálogo
$\max M_w =$	7.5	magnitud máxima registrada en el catálogo
$T =$	55	número total de años del catálogo
$\beta =$	2.45	
$\lambda(M) =$	6.95	

Tabla 4.3.2: Parámetros sísmicos de la fuente 7s

La tasa de excedencia ($\lambda(M)$) fue calculada a partir del modelo truncado de Gutenberg-Richter, utilizando la expresión (4.17).

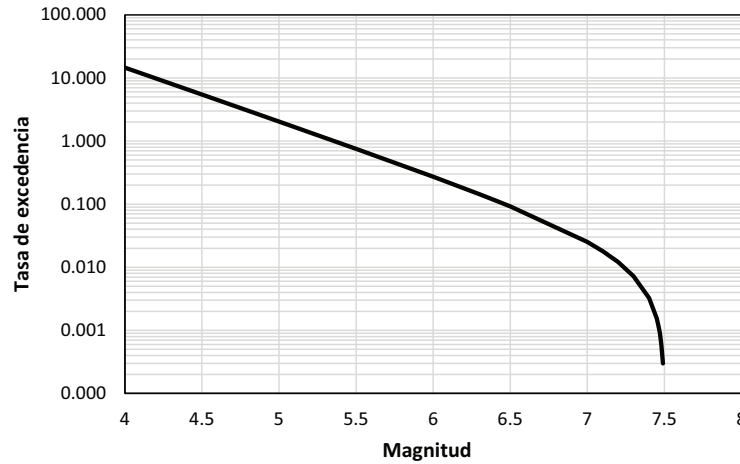


Figura 4.3.6: Tasa de excedencia para la fuente 7s

Se siguió un procedimiento similar para el cálculo de la sismicidad de las 30 fuentes del Ecuador.

4.4 MODELOS DE ATENUACIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS

Para evaluar los efectos sísmicos en el sitio de interés, es necesario conocer las intensidades o las aceleraciones máximas que se producirían en roca. Para conocer el decaimiento de las ondas sísmicas, desde la fuente, al sitio específico, se requiere el uso de leyes de atenuación, las mismas que relacionan magnitud, posición relativa fuente-sitio e intensidad sísmica. En definitiva la atenuación depende de las características geométricas de la fuente (R, d) y de la energía liberada (M), pudiendo expresarse de la siguiente manera general:

$$Y = f(M, R, d, \dots)$$

Donde, R representa la distancia entre el evento y la fuente, y d la profundidad a la que ocurre el sismo.

Las ondas sísmicas decaen a medida que irradian a partir de sus fuentes, en parte por razones geométricas, ya que su energía se distribuye en un frente de onda en expansión, y en parte debido a que su energía es absorbida por el material a través del cual viajan. Las leyes tienen gran dependencia del medio, influenciando ampliamente la distribución espacial de la energía liberada, debido a la geología, estratificación, topografía, absorción, entre otras.

Los modelos de atenuación, condicionan, estrictamente, la forma de los espectros de peligro uniforme, utilizados en la elaboración de códigos civiles de construcción, por lo que su correcto uso es fundamental en un estudio de amenaza sísmica de un determinado sector. Se debe tener presente que la atenuación es diferente para cada tipo de fuente.

Debido a que no se ha tenido acceso a registros acelerográficos que permitan realizar un estudio a detalle de los modelos de atenuación, o proponer nuevas ecuaciones, se ha optado por comparar varios modelos de diferentes autores, los cuales han definido algoritmos que han sido utilizados en la zona.

4.4.1 Modelos de atenuación: Fuentes de subducción

Para este tipo de eventos sísmicos se estudiaron dos modelos, el primero fue el de Youngs et al. (1997, ref.[53]), tanto para fenómenos de tipo interplaca como para los de tipo intraplaca. Además, se analizó el modelo de Zhao et al. (2006, ref.[54]) para sismos de tipo interplaca e intraplaca.

A continuación se presentan las expresiones utilizadas para estas dos familias de modelos de atenuación.

Youngs et al. (1997)

Esta relación de atenuación se encuentra orientada a predecir el movimiento para zonas de subducción, tanto para tipo interplaca como intraplaca. Para la elaboración de esta ley se emplearon datos recolectados a nivel mundial.

Entre las principales especificaciones del modelo se encuentran las siguientes:

- Rango de periodo espectral de 0 a 3
- Rango válido de distancia de 10 a 500 km
- Rango válido de magnitud de 5 a 8.5
- Región tectónica de subducción

La expresión definida para la atenuación de Youngs et al. (1997), para roca, es (ver ec.(4.29)):

$$\begin{aligned} \log(A_{max}) = & 0.2418 + 1.414M_w + C_1 + C_2(10 - M_w)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M_w}) + 0.00607H \\ & + 0.3846Z_T \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$\text{Desviación estándar} = C_4 + C_5M \quad (4.30)$$

Donde,

A_{max} : aceleración espectral (g)

M_w : magnitud momento

r_{rup} : distancia más cercana a la ruptura (km)

H : profundidad (km)

Z_T : Tipo de fuente, 0 para interplaca y 1 para intraplaca

C_i : donde $i=1,2,3,4$ y 5 , son constantes obtenidas en el estudio de este modelo de atenuación y se muestran en la tabla 4.4.1 (Youngs, et al. (1997)).

Periodo (s)	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
0	0.000	0.000	-2.552	1.450	-0.100
0.075	1.275	0.000	-2.707	1.450	-0.100
0.1	1.188	-0.001	-2.655	1.450	-0.100
0.2	0.722	-0.003	-2.528	1.450	-0.100
0.3	0.246	-0.004	-2.454	1.450	-0.100
0.4	-0.115	-0.004	-2.401	1.450	-0.100
0.5	-0.400	-0.005	-2.360	1.450	-0.100
0.75	-1.149	-0.006	-2.286	1.450	-0.100
1	-1.736	-0.006	-2.234	1.450	-0.100
1.5	-2.634	-0.007	-2.160	1.500	-0.100
2	-3.328	-0.008	-2.107	1.550	-0.100
3	-4.511	-0.009	-2.033	1.650	-0.100

Tabla 4.4.1: Valores de las constantes C_i para roca. Tomadas de la tabla 2 de Youngs et. al(1997, ref.[53])

Zhao et al. (2006)

Este modelo fue desarrollado con datos obtenidos de zonas de subducción como la de Japón. Esta ecuación varía de acuerdo a los diferentes tipos de suelo, clasificándolos por la velocidad de propagación V_s , de acuerdo a la normativa japonesa.

Entre las principales especificaciones del modelo se encuentran las siguientes:

- Rango de periodo espectral de 0 a 5
- Rango válido de distancia de 0.4 a 300 km
- Rango válido de magnitud de 5 a 8.4
- Región tectónica de subducción

La expresión definida para la atenuación de Zhao (2006, ref.[54]) es la siguiente (ver ec.(4.31)):

$$\log(A_{max}) = aM_w + bx + \ln(r) + e^{H-H_c} \delta_h + S_R + S_l + S_S + S_{SL} \ln(x) + S_\kappa + \sigma_T \tag{4.31}$$

$$r = x + ce(dM_w) \tag{4.32}$$

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \tag{4.33}$$

Donde,

A_{max} : aceleración espectral (g)

M_w : magnitud momento

H : distancia focal (km)

S_R : Factor de fallamiento inverso

- S_R = valor obtenido de la tabla 2 de Zhao et al. (2006, ref.[54]) para fallas corticales inversas

- $S_R=0$ para otro tipo de falla

S_l : Indicador del tipo de fuente tectónica

- S_l = valor obtenido de la tabla 2 de Zhao et al. (2006, ref.[54]) para fuentes tipo interplaca
- $S_l=0$ para otro tipo de fuentes

S_S : Indicador del tipo de evento

- S_S = valor obtenido de la tabla 2 de Zhao et al. (2006, ref.[54]) para eventos ocurridos en zona de subducción
- $S_s=0$ para otro tipo de eventos

H_C : constante relacionada con la profundidad del evento

- Si $H \geq H_C =$ entonces $\delta_h = 1$.
- Otro caso, $\delta_h = 0$

x : distancia mínima del evento a la zona de ruptura (km)

S_κ : constante relacionada al tipo de suelo y se obtiene de la tabla 2 de Zhao et al. (2006, ref.[54])

S_{SL} : factor de modificación para eventos de subducción debido al comportamiento de las ondas sísmicas y se obtiene de la tabla 2 de Zhao et al. (2006, ref.[54])

a, b, c, d y e : términos dependientes del tipo de suelo y se obtienen de v la tabla 2 de Zhao et al. (2006, ref.[54])

σ_T : desviación estándar

σ y τ : errores parciales

Clase de suelo	Descripción	Periodo natural	V_{30} calculado a partir del periodo del suelo (m/s)	Clasificación NEHRP
SC I	Roca	$T \leq 0.2s$	$V_{30} > 600$	A+B
SC II	Suelo firme	$0.2 = T < 0.4s$	$300 < V_{30} = 600$	C
SC III	Suelo Medio	$0.4 = T < 0.6s$	$200 < V_{30} = 300$	D
SC IV	suelo suave	$T = 0.6s$	$V_{30} = 200$	E+F

Tabla 4.4.2: Descripción de tipo de suelos considerados en este modelo de atenuación. Tomado de la tabla 2 de Zhao et. al (2006, ref.[54])

En la figura 4.4.1 se muestra una comparación visual de los dos métodos, tanto para tectónica interplaca como para intraplaca.

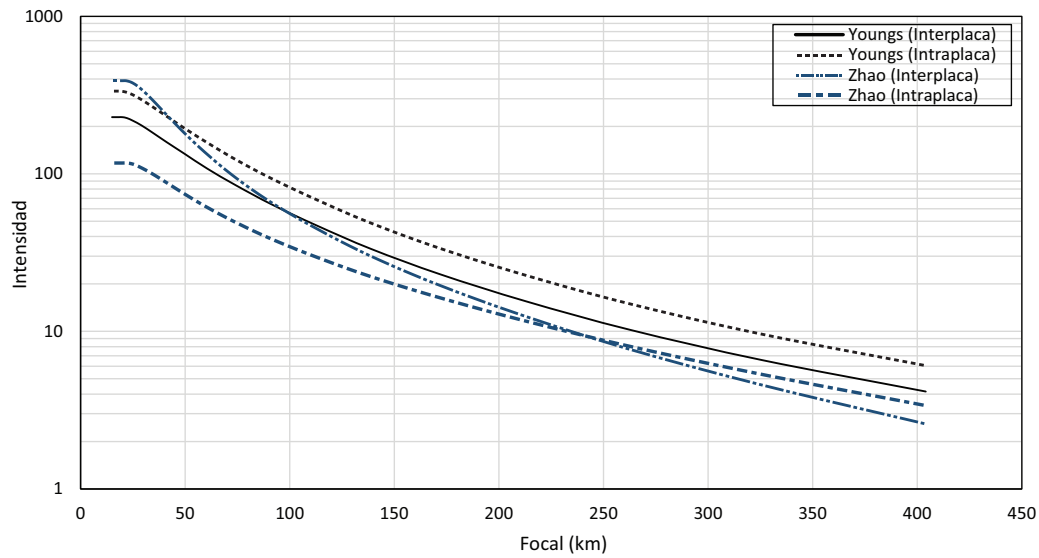


Figura 4.4.1: Comparación entre modelos de atenuación para fuentes de subducción

4.4.2 Modelos de atenuación: Fuentes corticales

En este tipo de eventos superficiales, se consideraron los modelos de atenuación descritas por Sadigh (1993), Abrahamson y Silva (1997) y por Chiou y Youngs (2008), que se describen a continuación.

Sadigh et al. (1993)

El modelo desarrollado por Sadigh et al. (1993, ref.[48]) fue considerado para terremotos poco profundos. Los registros utilizados fueron fundamentalmente los de terremotos de California.

Entre las principales especificaciones del modelo se encuentran las siguientes:

- Rango válido de distancia de 0.1 a 200 km
- Rango válido de magnitud de 4 a 8
- Fallamiento cortical activo

La expresión definida para la atenuación de Sadigh (1993, ref.[48]) es la siguiente (ver ec.(4.34)):

$$\log(A_{max}) = C_1 + C_2 M_w + C_3 (8.5 - M_w)^{2.5} + C_4 \ln \left[r_{rup} + e^{(C_5 + C_6 M_w)} \right] + C_7 \ln(r_{rup} + 2) \quad (4.34)$$

Donde:

A_{max} : aceleración espectral (g)

M_w : magnitud momento

r_{rup} : distancia más cercana a la ruptura (km)

C_i : donde $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ y 7 son constantes que se obtienen de tabla 2 de Sadigh (1993, ref.[48])

Abrahamson y Silva (1997)

Este modelo de atenuación se basa principalmente en aceleraciones horizontales espectrales para sismos corticales superficiales en regiones tectónicamente activas. Los datos empleados para este modelo han sido recopilados a nivel mundial.

Entre las principales especificaciones del modelo se encuentran las siguientes:

- Rango de periodo espectral de 0.01 a 5
- Rango válido de distancia de 0.1 a 200 km
- Rango válido de magnitud de 4 a 7.5
- Fallamiento cortical activo

La expresión definida para la atenuación de Abrahamson y Silva (1997, ref.[1]) es la siguiente (ver ec.(4.35)):

$$\log(A_{max}) = f_1(M_w, r_{rup}) + F f_2(M_w) + HW f_4(M_w, r_{rup}) + S f_5(P\hat{G}A_{roca}) \quad (4.35)$$

$$\sigma_{TOT} = \begin{cases} b_5 & \text{para } M_w \leq 5.0 \\ b_5 - b_6(M - 5) & \text{para } 5.0 < M_w < 7.0 \\ b_5 - 2b_6 & \text{para } M_w \geq 7.0 \end{cases} \quad (4.36)$$

Donde,

A_{max} : aceleración espectral (g)

M_w : magnitud momento

r_{rup} : distancia más cercana a la ruptura (km)

σ_{TOT} : desviación estándar

F : define el tipo de falla:

- 1 para fallas inversas
- 0.5 para fallas inversas/oblicuas
- 0 para otro tipo de falla

HW : Depende del bloque de roca que se encuentra sobre la falla "Hanging Wall"

- 1 para bloques sobre la falla
- 0 para otros tipos

S : variable utilizada para el tipo de suelo

- 1 para suelo blando
- 0 para roca

a) $f_1(M_w, r_{rup})$

- Para $M_w \leq C_1$

$$f_1(M_w, r_{rup}) = a_1 + a_2(M - C_1) + a_{12}(8.5 - M_w)^n + [a_3 + a_{13}(M - C_1)] \ln(R) \quad (4.37)$$

- Para $M_w > C_1$

$$f_1(M_w, r_{rup}) = a_1 + a_4(M - C_1) + a_{12}(8.5 - M_w)^n + [a_3 + a_{13}(M - C_1)] \ln(R) \quad (4.38)$$

Donde,

$$R = \sqrt{r_{rup}^2 + C_4^2} \quad (4.39)$$

b) $f_3(M_w)$

$$a_5 \quad \text{para } M_w \leq 5.8$$

$$a_5 + \frac{(a_6 - a_5)}{C_1 - 5.8} \quad \text{para } 5.8 < M_w < C_1$$

$$a_6 \quad \text{para } M_w \geq C_1$$

c) $f_4(M_w, r_{rup}) = f_{HW}(M_w)f_{HW}(r_{rup})$

- $f_{HW}(M_w)$

$$0 \quad \text{para } M_w \leq 5.5$$

$$M_w - 5.5 \quad \text{para } 5.5 < M_w < 6.5$$

$$1 \quad \text{para } M_w \geq 6.5$$

- $f_{HW}(r_{rup})$

$$0 \quad \text{para } r_{rup} < 4$$

$$a_9 \frac{r_{rup} - 4}{4} \quad \text{para } 4 < r_{rup} < 8$$

$$a_9 \quad \text{para } 8 < r_{rup} < 18$$

$$a_9 \left(1 - \frac{r_{rup} - 18}{7}\right) \quad \text{para } 18 < r_{rup} < 24$$

$$0 \quad \text{para } r_{rup} > 25$$

d) $f_5(P\hat{G}A_{roca}) = a_{10} + a_{11}\ln(P\hat{G}A_{roca} + C_5)$

Los valores de las constantes a_i , b_j y c_k son obtenidos de tablas 4.4.3 y 4.4.4, las cuales fueron presentadas por Abrahamson y Silva (1997, ref.[1]).

T	c₄	a₁	a₂	a₃	a₄	a₅	a₆	a₉	a₁₀	a₁₁	a₁₂	a₁₃
0.01	5.6	1.64	0.512	-1.145	-0.14	0.61	0.26	0.37	-0.417	-0.23	0	0.17
0.02	5.6	1.64	0.512	-1.145	-0.14	0.61	0.26	0.37	-0.417	-0.23	0	0.17
0.03	5.6	1.69	0.512	-1.145	-0.14	0.61	0.26	0.37	-0.47	-0.23	0.014	0.17
0.04	5.6	1.78	0.512	-1.145	-0.14	0.61	0.26	0.37	-0.555	-0.251	0.024	0.17
0.05	5.6	1.87	0.512	-1.145	-0.14	0.61	0.26	0.37	-0.62	-0.267	0.028	0.17
0.06	5.6	1.94	0.512	-1.145	-0.14	0.61	0.26	0.37	-0.665	-0.28	0.03	0.17
0.075	5.58	2.037	0.512	-1.145	-0.14	0.61	0.26	0.37	-0.628	-0.28	0.03	0.17
0.09	5.54	2.1	0.512	-1.145	-0.14	0.61	0.26	0.37	-0.609	-0.28	0.03	0.17
0.1	5.5	2.16	0.512	-1.145	-0.14	0.61	0.26	0.37	-0.598	-0.28	0.028	0.17
0.12	5.39	2.272	0.512	-1.145	-0.14	0.61	0.26	0.37	-0.591	-0.28	0.018	0.17
0.15	5.27	2.407	0.512	-1.145	-0.14	0.61	0.26	0.37	-0.577	-0.28	0.005	0.17
0.17	5.19	2.43	0.512	-1.135	-0.14	0.61	0.26	0.37	-0.522	-0.265	-0.004	0.17
0.2	5.1	2.406	0.512	-1.115	-0.14	0.61	0.26	0.37	-0.445	-0.245	-0.013	0.17
0.24	4.97	2.293	0.512	-1.079	-0.14	0.61	0.232	0.37	-0.35	-0.223	-0.023	0.17
0.3	4.8	2.114	0.512	-1.035	-0.14	0.61	0.198	0.37	-0.219	-0.195	-0.036	0.17
0.36	4.62	1.955	0.512	-1.005	-0.144	0.61	0.17	0.37	-0.123	-0.173	-0.046	0.17
0.4	4.52	1.86	0.512	-0.988	-0.14	0.61	0.154	0.37	-0.065	-0.16	-0.051	0.17
0.46	4.38	1.717	0.512	-0.965	-0.14	0.592	0.132	0.37	0.02	-0.136	-0.059	0.17
0.5	4.3	1.615	0.512	-0.951	-0.14	0.581	0.119	0.37	0.085	-0.121	-0.063	0.17
0.6	4.12	1.428	0.512	-0.921	-0.14	0.557	0.091	0.37	0.194	-0.089	-0.074	0.17
0.75	3.9	1.16	0.512	-0.885	-0.14	0.528	0.057	0.331	0.32	-0.05	-0.086	0.17
0.85	3.81	1.02	0.512	-0.864	-0.14	0.512	0.038	0.309	0.37	-0.028	-0.092	0.17
1	3.7	0.828	0.512	-0.838	-0.144	0.49	0.013	0.281	0.423	0	-0.102	0.17
1.5	3.55	0.26	0.512	-0.772	-0.14	0.438	-0.049	0.21	0.6	0.04	-0.12	0.17
2	3.5	-0.15	0.512	-0.725	-0.14	0.4	-0.094	0.16	0.61	0.04	-0.14	0.17
3	3.5	-0.69	0.512	-0.725	-0.14	0.4	-0.156	0.089	0.63	0.04	-0.172	0.17
4	3.5	-1.13	0.512	-0.725	-0.14	0.4	-0.2	0.039	0.64	0.04	-0.195	0.17
5	3.5	-1.46	0.512	-0.725	-0.14	0.4	-0.2	0	0.664	0.04	-0.215	0.17

Tabla 4.4.3: Valores de las constantes a_i y c_k . Tomadas de la tabla 3 de Abrahamson y Silva (1997, ref.[1])

T	c ₁	c ₅	n	b ₅	b ₆	T	c ₁	c ₅	n	b ₅	b ₆
0.01	6.4	0.03	2	0.7	0.135	0.3	6.4	0.03	2	0.78	0.135
0.02	6.4	0.03	2	0.7	0.135	0.36	6.4	0.03	2	0.79	0.135
0.03	6.4	0.03	2	0.7	0.135	0.4	6.4	0.03	2	0.79	0.135
0.04	6.4	0.03	2	0.71	0.135	0.46	6.4	0.03	2	0.8	0.132
0.05	6.4	0.03	2	0.71	0.135	0.5	6.4	0.03	2	0.8	0.13
0.06	6.4	0.03	2	0.72	0.135	0.6	6.4	0.03	2	0.81	0.127
0.075	6.4	0.03	2	0.73	0.135	0.75	6.4	0.03	2	0.81	0.123
0.09	6.4	0.03	2	0.74	0.135	0.85	6.4	0.03	2	0.82	0.121
0.1	6.4	0.03	2	0.74	0.135	1	6.4	0.03	2	0.83	0.118
0.12	6.4	0.03	2	0.75	0.135	1.5	6.4	0.03	2	0.84	0.11
0.15	6.4	0.03	2	0.75	0.135	2	6.4	0.03	2	0.85	0.105
0.17	6.4	0.03	2	0.76	0.135	3	6.4	0.03	2	0.87	0.097
0.2	6.4	0.03	2	0.77	0.135	4	6.4	0.03	2	0.88	0.092
0.24	6.4	0.03	2	0.77	0.135	5	6.4	0.03	2	0.89	0.087

Tabla 4.4.4: Valores de las contantes b_j y c_k . Tomadas de la tabla 3 y 4 de Abrahamson y Silva (1997, ref.[1])

Chiou y Youngs (2008)

Este modelo se encuentra desarrollado para fuentes superficiales de tipo cortical con diferentes sistemas de fallamiento. Es una actualización de las expresiones definidas por Chiou y Youngs (2008, ref.[9]), y utiliza las componentes horizontales de las respuestas espectrales de los picos del movimiento del suelo.

Entre las principales especificaciones del modelo se encuentran las siguientes:

- Rango de periodo espectral de 0 a 10
- Rango válido de distancia de 0 a 200 km
- Rango válido de magnitud de 4 a 8.5
- Fallamiento cortical activo

La expresión definida para la atenuación de Chiou y Youngs (2008, ref.[9]) es la siguiente (ver ec.(4.40)):

$$\begin{aligned}
 \log(A_{max}) = & C_1 + C_7(Z_{TOR} - 4) + C_2(M_w - 6) + \frac{C_2 + C_3}{C_n} \ln \left[1 + e^{C_n(C_m - M_w)} \right] + \\
 & + C_4 \ln [r_{rup} + (M_w - 3)] + (C_{4a} - C_4) \ln \left[\sqrt{r_{rup}^2 + 50^2} \right] + \\
 & + \left[C_{\gamma 1} + \frac{C_{\gamma 2}}{C_{osh}(M_w - 4)} \right] r_{rup}
 \end{aligned} \tag{4.40}$$

Donde:

A_{max} : aceleración espectral (g)

M_w : magnitud momento

r_{rup} : distancia más cercana a la ruptura (km)

Z_{TOR} : profundidad de la ruptura (km)

C_i : donde $i=1, 2, 3, 4, 4a, 5, 6, 7, n, \gamma_1$ y γ_2 , son constantes obtenidas de las tablas 5.2 y 5.3 de Chiou y Youngs (2008, ref.[9])

En las figuras 4.4.2 y 4.4.3 se muestra una comparación visual de los tres métodos, para los tipos de falla existentes en la zona.

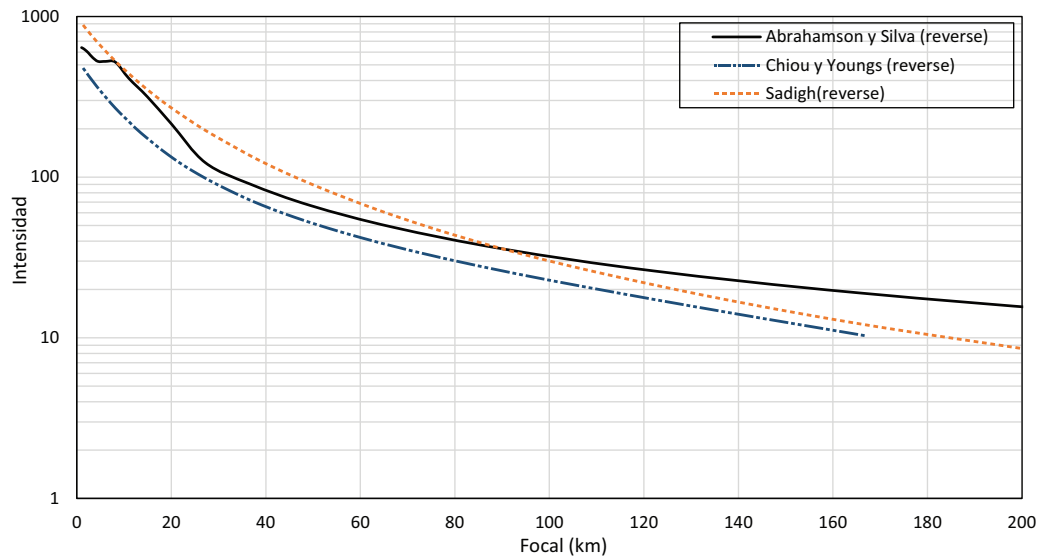


Figura 4.4.2: Comparación entre modelos de atenuación cortical para fallas tipo inversas

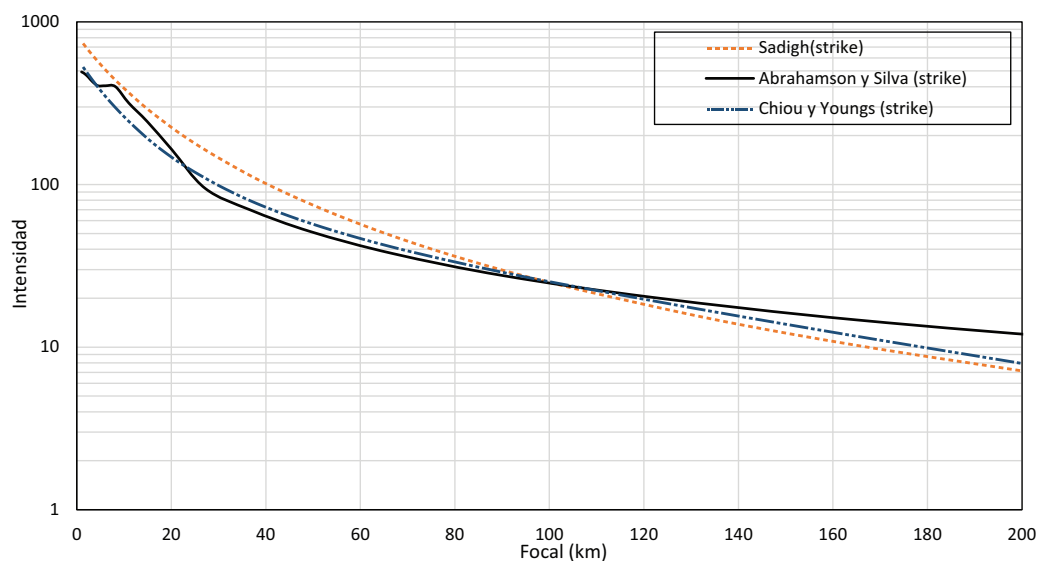


Figura 4.4.3: Comparación entre modelos de atenuación cortical para fallas tipo normal

Después de analizar los modelos expuestos, en el estudio de peligro sísmico del Ecuador, se utilizaron los modelos de Youngs et al. (1997, ref.[53]) para las fuentes de subducción, y los modelos de Abrahamson y Silva (1997, ref.[1]) para las fuentes de tipo corticales. Los modelos de atenuación para cada fuente se detallan en la tabla 4.4.5.

Fuente	Modelo de atenuación asignado	Fuente	Modelo de atenuación asignado
Fuente 1	Youngs interplaca	Fuente 16	*AyS normal
Fuente 2	Youngs interplaca	Fuente 17	*AyS inversa
Fuente 3	Youngs interplaca	Fuente 18	*AyS inversa
Fuente 4	Youngs intraplaca	Fuente 19	*AyS inversa
Fuente 5	Youngs interplaca	Fuente 20	*AyS inversa
Fuente 6	Youngs interplaca	Fuente 21	*AyS normal
Fuente 7	Youngs intraplaca	Fuente 22	*AyS inversa
Fuente 8	Youngs intraplaca	Fuente 23	*AyS inversa
Fuente 9	Youngs interplaca	Fuente 24	*AyS inversa
Fuente 10	Youngs interplaca	Fuente 25	*AyS normal
Fuente 11	*AyS inversa	Fuente 26	*AyS inversa
Fuente 12	*AyS inversa	Fuente 27	*AyS normal
Fuente 13	*AyS normal	Fuente 28	*AyS inversa
Fuente 14	*AyS inversa	Fuente 29	*AyS normal
Fuente 15	*AyS normal	Fuente 30	*AyS inversa

*AyS: modelo de atenuación de Abrahamson y Silva (1997, ref.[1])

Tabla 4.4.5: Modelos de atenuación asignados a cada fuente

Para la ubicación y geometría de cada fuente referirse al capítulo 2.

4.5 CÁLCULO DEL PELIGRO SÍSMICO

Para realizar el cálculo del peligro sísmico de una determinada región es necesario haber definido las fuentes junto con sus respectivos parámetros de sismicidad, además de los modelos de atenuación de onda para cada una de ellas. La amenaza sísmica puede calcularse considerando la suma de los efectos de cada una de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio de interés. El peligro sísmico, expresado en función de la tasa de excedencia de intensidades, $\nu(a)$, se calcula mediante la ec.(4.41) (Esteva, 1967):

$$\nu(a) = \sum_{i=1}^{Nf} \int_{M_0}^{M_u} -\frac{d\lambda_i(M)}{dM} Pr(A > a | M, R_i) dM \quad (4.41)$$

Donde,

Nf : aceleración espectral (g)

$\lambda_i(M)$: son las tasas de excedencia de magnitud M , para la i -ésima fuente

$Pr(A > a | M, R)$: es la probabilidad de que la intensidad exceda un cierto valor, dada la magnitud, M , y la distancia entre la i -ésima fuente y el sitio, R_i . Esto se puede calcular siguiendo una distribución lognormal para las intensidades, similar a la siguiente expresión:

$$Pr(A > a | M, R) = \Phi \left[\frac{E(\ln(a) | M, R) - \ln(a)}{\sigma_{\ln(a)}} \right] \quad (4.42)$$

Donde,

$\Phi(\dots)$: es la distribución normal estándar acumulada

$E(\ln(a) | M, R)$: corresponde el valor esperado del logaritmo de la intensidad, en relación a la ley de atenuación correspondiente

$\sigma_{\ln(a)}$: es la correspondiente desviación estándar del logaritmo de a

La integral se realiza desde M_0 hasta M_u , lo que indica que se toma en cuenta, para cada fuente sísmica, la contribución de todas las magnitudes dentro del rango $[M_0, M_u]$.

La expresión (4.41) es exacta para fuentes puntuales, sin embargo, dado que las fuentes sísmicas son en realidad volúmenes, se debe realizar los cálculos considerando que la probabilidad de un evento sísmico es uniforme en cualquier punto de la fuente, es decir, los hipocentros tienen la misma probabilidad de ocurrencia dentro de la fuente. Debido a esto, se puede subdividir a la fuente sísmica en subfuentes en cuyo centro de gravedad se considera concentrada la sismicidad de la fuente, un ejemplo de este criterio lo contempla el programa CRISIS. El tamaño de las subdivisiones debe variar hasta garantizar una correcta integración de la ecuación.

Para poder obtener el valor de $\nu(a)$ no condicionada por la distancia y magnitud, en donde sea posible considerar una probabilidad uniforme de ocurrencia de un evento dentro de la fuente, se deben tomar en la expresión (4.41) a la distancia R_i como variable. La siguiente expresión se puede utilizar para calcular $\nu(a)$ no condicionada para una fuente no puntual.

$$\nu(a) = \sum_{i=1}^{Nf} \lambda_{0i} \int_{M_0}^{M_u} \int_{R_{0i}}^{R_{ui}} Pr(A > a | M, R_i) f_{mi}(M) f_{Ri}(R) dM dR \quad (4.43)$$

Donde λ_{0i} es la tasa anual de excedencia de los eventos sísmicos con $M \geq M_0$ en la i -ésima fuente. $f_{mi}(M)$ y $f_{Ri}(R)$ son funciones de densidad de probabilidad de la magnitud (M) y distancia (R) de la i -ésima fuente. R_{0i} y R_{ui} representan el rango de distancias del evento a la i -ésima fuente.

Como se puede observar en la ec. (4.41), para el cálculo de peligro sísmico, es necesario realizar una serie de integrales múltiples. Debido a que los cálculos pueden llegar a ser demasiado extensos, se utilizó el programa CRISIS (Ordaz 2007, ref.[39]).

4.5.1 Programa CRISIS

CRISIS es el módulo de cálculo de amenaza de la plataforma CAPRA. Permite la definición completa de un modelo de amenaza probabilista, la evaluación de amenaza uniforme, y el cálculo de escenarios compatibles con CAPRA. Fue desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, por Ordaz et al. (2007, ref.[39]).

La metodología que utiliza, para el cálculo de mapas de peligro sísmico, está basada en los conceptos del Análisis Probabilístico de Amenaza Sísmica (PHSA).

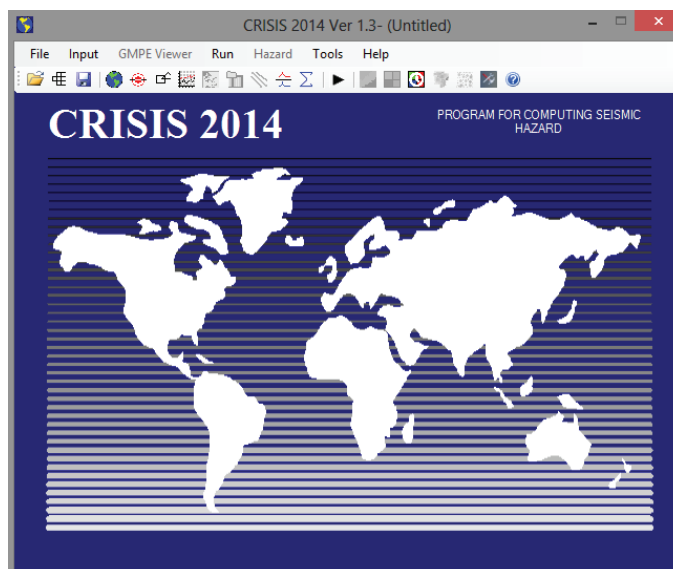


Figura 4.5.1: Visualización inicial del programa CRISIS

Características del programa

El software CRISIS tiene las siguientes características:

- Permite la modelación probabilista de la amenaza sísmica mediante la determinación de escenarios estocásticos en cualquier coordenada del área de estudio.
- La modelación de amenaza se basa en la integración de frecuencias de ocurrencia de cualquier parámetro de intensidad sísmica para el cual se cuente con una ley de atenuación en función de la distancia y la magnitud sísmica.
- Para el análisis se requiere una caracterización regional en la zona de estudio de las fuentes sísmicas principales en términos de magnitud mínima de análisis, magnitud última, frecuencia de ocurrencia de eventos con la magnitud mínima y pendiente de la curva de recurrencia.
- El modelo soporta tasas de ocurrencia de magnitudes como función del tiempo entre eventos.
- Permite realizar cálculos de peligro sísmico utilizando los conceptos de árbol lógico, lo que quiere decir que permite utilizar varios modelos de atenuación de onda para un mismo tipo de fuente.
- Permite involucrar los efectos de sitio en el cálculo de amenaza sísmica.

La modelación espacial de la amenaza se hace mediante la definición de una malla de cálculo que puede ser tan fina como el usuario desee. La excesiva refinación de la malla no implica necesariamente una mejora en los resultados. Esto permitiría definir el tamaño de malla óptima. La resolución de la malla debe ser acorde con el tamaño de las fuentes sísmicas que se deseen modelar. La resolución máxima que debe emplearse es aquella que permite aún modelar de manera adecuada la variación espacial del parámetro de amenaza que se está modelando, o si se utiliza el módulo de efectos de sitio, la malla deberá estar acorde a los valores ingresados para los efectos locales. El modelo permite en el caso límite hacer el análisis en un solo punto. Normalmente, el área de influencia de los fenómenos sísmicos tiene un radio de acción del orden de 200 km, área que debe ser cubierta por la malla definida. Todos los resultados de amenaza quedan expresados como valores puntuales en cada uno de los nodos de la malla. La resolución final de la amenaza corresponde al tamaño de la malla empleada. Esta

información se almacena en los formatos tipo AME para ser utilizados posteriormente en los análisis de riesgo.

4.5.2 Parámetros del modelo CRISIS para el cálculo de peligro sísmico del Ecuador

A continuación se presentan las principales características del modelo de Ecuador en el programa CRISIS.

VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE ECUADOR	
Número de regiones sísmicas:	30
Número de modelos de atenuación:	4
Número de periodos estructurales:	21*
Número de niveles de intensidad:	25
Número de magnitudes para integración:	9
Tipo de sitios para el cálculo:	Malla
Máxima distancia de integración:	300.000
Mínima distancia/Radio de tamaño de triángulo:	3.000
Mínimo tamaño de triángulo (km):	11.000
*Periodos estructurales: PGA, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5	

Tabla 4.5.1: Valores de los parámetros del modelo de CRISIS para Ecuador

Las características de la malla utilizada para los cálculos se presentan en la tabla 4.5.2.

CARACTERÍSTICAS MALLA UTILIZADA	
Longitud inicial (grados):	-81.0000
Latitud inicial (grados):	-5.1000
Incremento de longitud (grados):	0.1000
Incremento de latitud (grados):	0.1000
No. de puntos en longitud:	60
No. de puntos en latitud:	68

Tabla 4.5.2: Valores de los parámetros del modelo de CRISIS para Ecuador

4.6 RESULTADOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO DEL ECUADOR

Aplicando la metodología explicada en los capítulos anteriores, se realizó el estudio de peligro sísmico del Ecuador. Los resultados obtenidos fueron calculados para los periodos de retorno mostrados en la Tabla 4.1 Las leyes de atenuación utilizadas para las fuentes de subducción son las de Youngs et al. (1997, ref.[?]) y para las fuentes corticales las de Abrahamson y Silva (1997, ref.[1]).

Las fuentes y el catálogo sísmico utilizado fueron las del IG-EPN y Alvarado (2012, ref.[5]), los parámetros de sismicidad empleados son los encontrados mediante análisis bayesianos. Con los

parámetros que se muestran en la tabla 4.6.2 es posible obtener mapas de peligro sísmico para diferentes periodos de retorno (T_R). Los valores elegidos se muestran en la tabla 4.6.1, y los resultados se muestran de la figura 4.6.1 a 4.6.4.

Años	Probabilidad de excedencia	T_R asumido
50	65%	50
50	40%	100
50	10%	500
50	2%	2500

Tabla 4.6.1: Valores de periodos de retorno para mapas de peligro sísmico

Los parámetros obtenidos de cada una de las fuentes sísmicas del estudio de peligro sísmico del Ecuador, se muestran en la siguiente tabla.

Fuente	M_0	λ_0	$E(\beta)$	$c(\beta)$	$E(M_u)$	Fuente	M_0	λ_0	$E(\beta)$	$c(\beta)$	$E(M_u)$
Fuente 1	4.00	0.913	3.925	0.200	6.40	Fuente 16	4.00	0.111	1.021	0.700	6.20
Fuente 2	4.00	2.010	1.337	0.070	8.80	Fuente 17	4.50	0.135	1.123	0.300	6.80
Fuente 3	4.20	0.478	1.410	0.230	6.50	Fuente 18	4.30	0.450	2.530	0.250	6.40
Fuente 4	4.10	2.950	1.750	0.090	7.30	Fuente 19	4.50	2.570	2.010	0.070	7.50
Fuente 5	4.20	2.970	2.690	0.060	6.50	Fuente 20	4.20	3.110	2.490	0.070	7.10
Fuente 6	4.80	0.619	1.790	0.300	7.60	Fuente 21	4.30	0.100	4.608	0.570	5.80
Fuente 7	4.50	6.950	2.450	0.040	7.50	Fuente 22	4.00	0.100	1.650	0.500	6.30
Fuente 8	4.50	5.700	2.320	0.040	7.30	Fuente 23	4.50	0.200	2.140	0.300	6.70
Fuente 9	4.20	0.880	1.510	0.140	8.00	Fuente 24	4.50	0.870	2.400	0.190	6.80
Fuente 10	4.30	0.939	1.317	0.140	8.10	Fuente 25	4.00	0.100	1.800	0.570	6.10
Fuente 11	4.50	0.702	2.567	0.110	7.40	Fuente 26	4.50	0.421	1.955	0.300	6.60
Fuente 12	4.00	0.529	3.580	0.330	6.80	Fuente 27	4.50	0.237	2.050	0.260	7.30
Fuente 13	4.50	0.229	1.952	0.350	6.10	Fuente 28	4.20	0.250	2.300	0.440	6.40
Fuente 14	4.50	2.160	1.968	0.090	7.40	Fuente 29	4.50	0.718	2.100	0.120	6.80
Fuente 15	4.50	1.260	2.310	0.130	7.20	Fuente 30	4.10	0.440	2.650	0.300	6.40

Tabla 4.6.2: Parámetros sísmicos para cada una de las fuentes

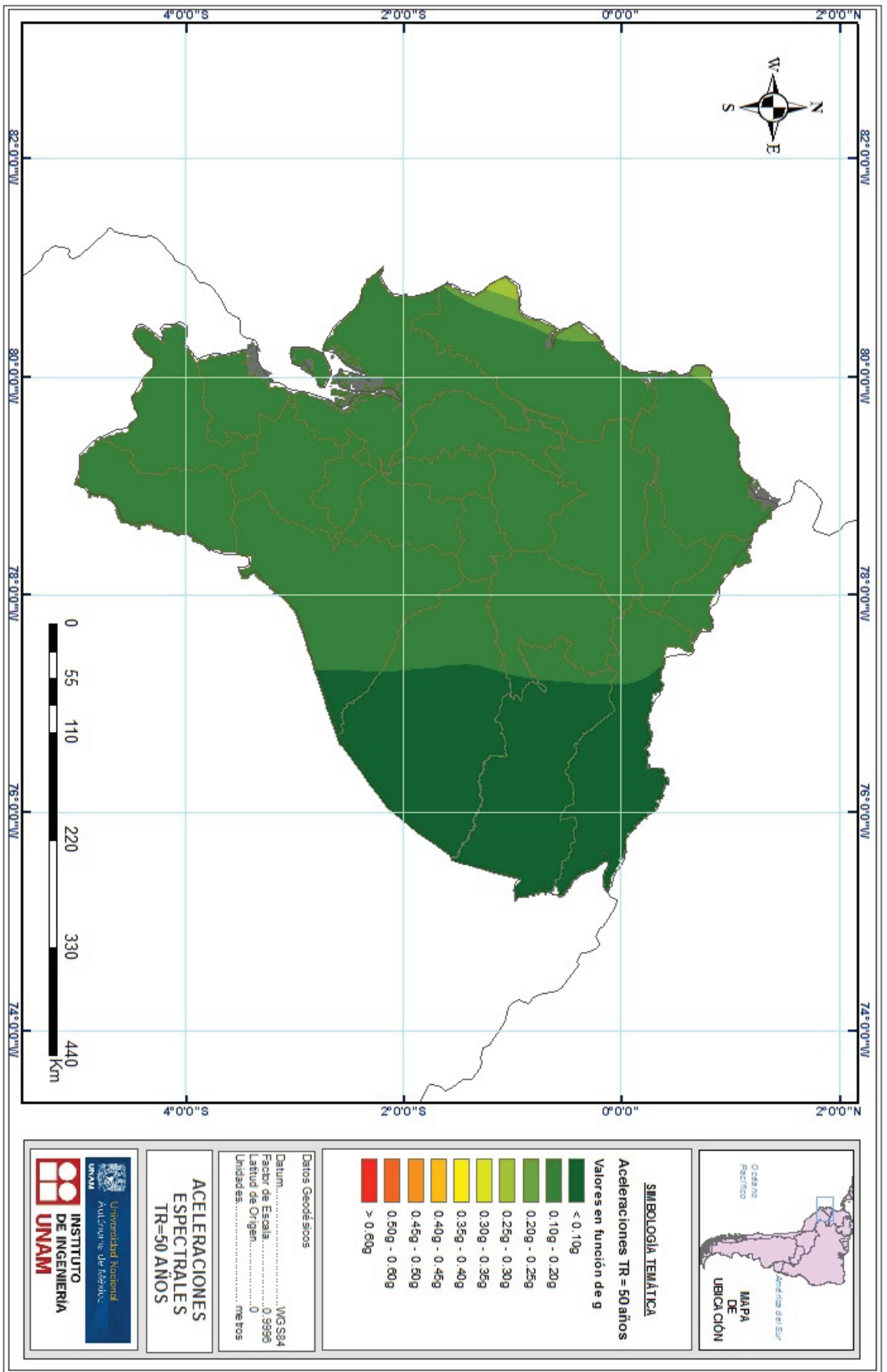


Figura 4.6.1: Mapa de peligro sísmico del Ecuador para un TR=50 años.

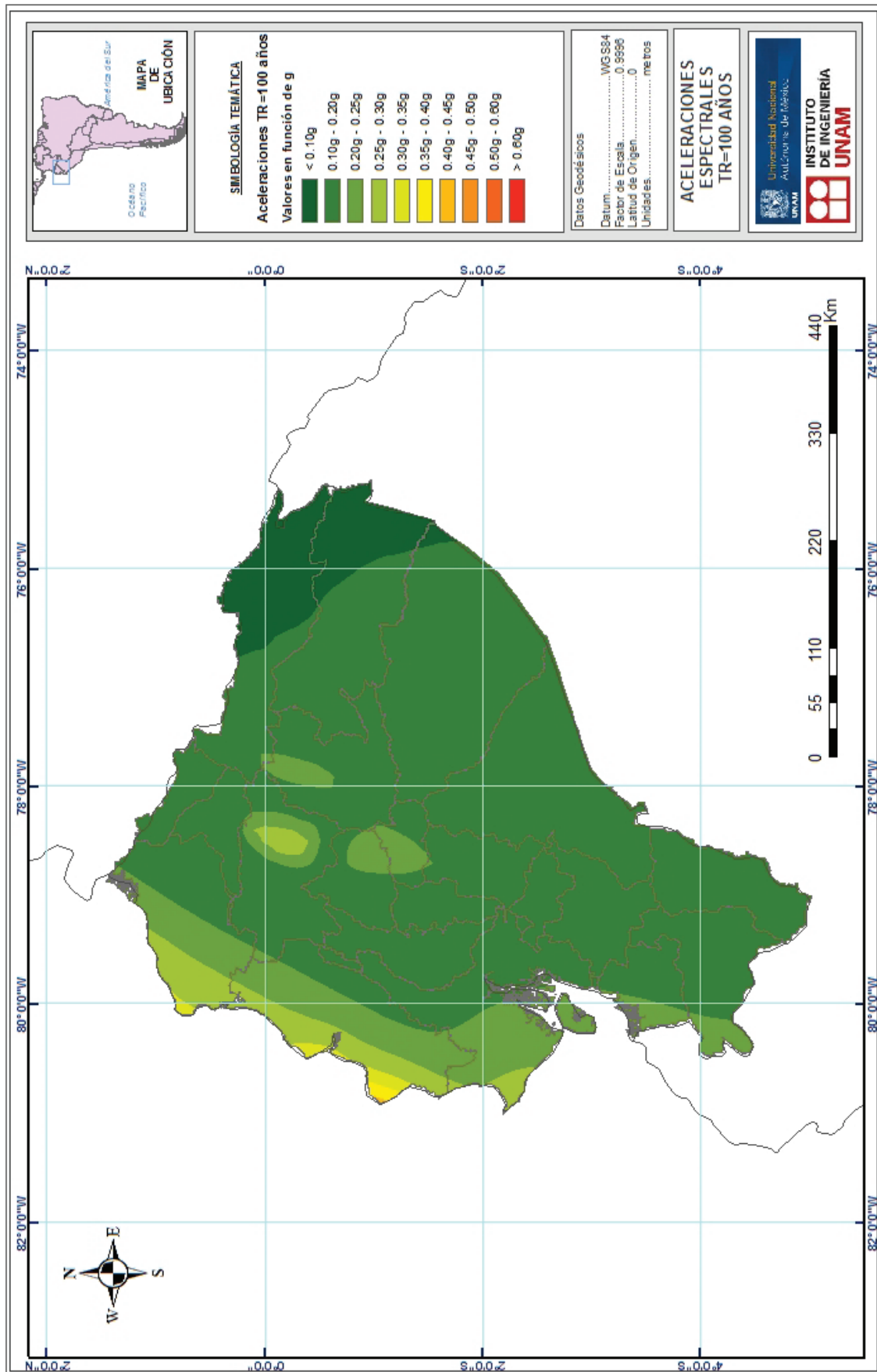


Figura 4.6.2: Mapa de peligro sísmico del Ecuador para un TR=100 años.

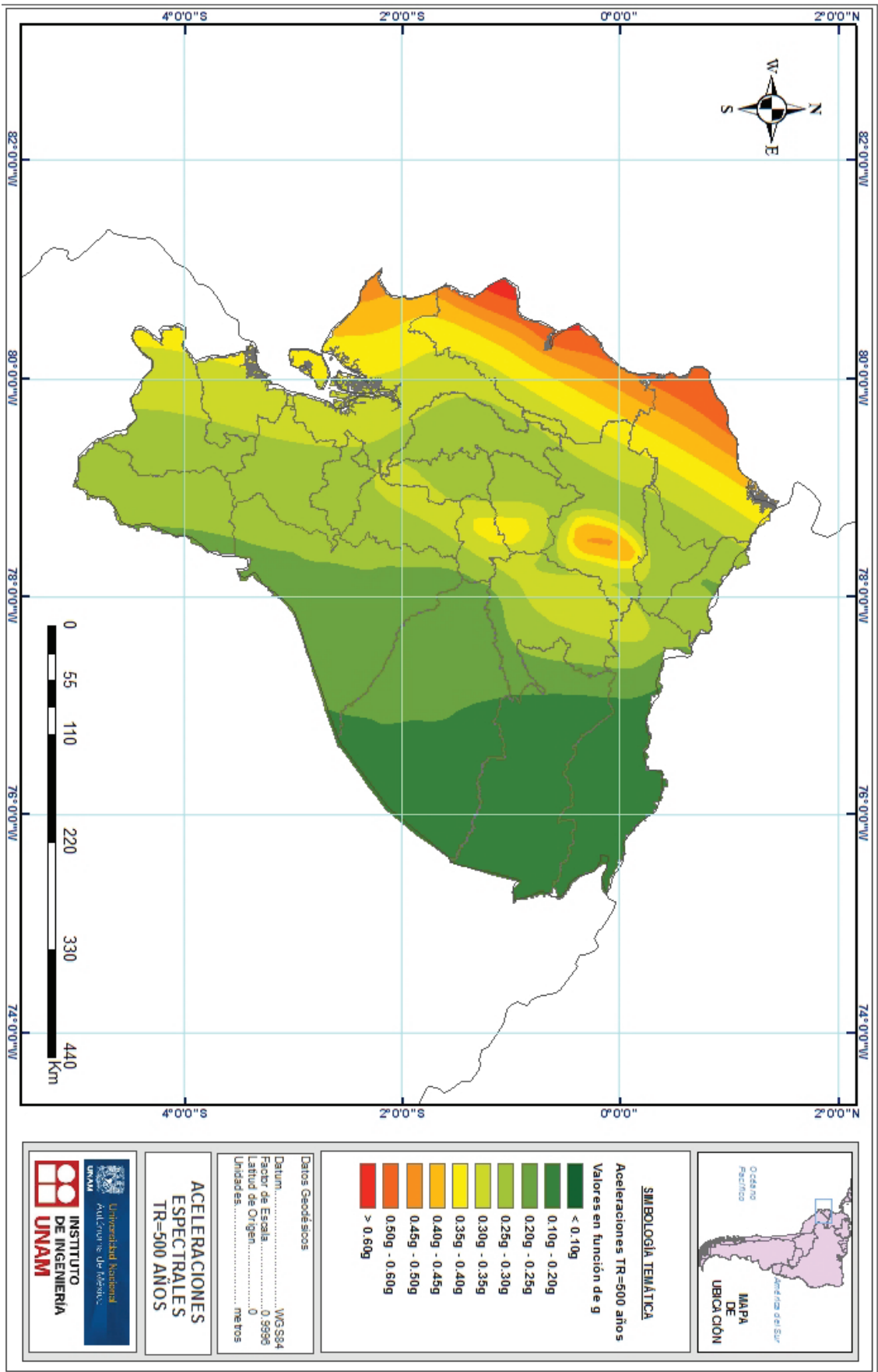
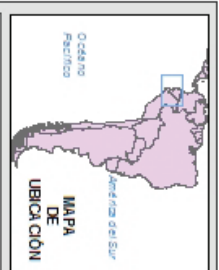


Figura 4.6.3: Mapa de peligro sísmico del Ecuador para un TR=500 años.



SIMBOLOGÍA TEMÁTICA

Aceleraciones TR=500 años
Valores en función de g

< 0.10g
0.10g - 0.20g
0.20g - 0.25g
0.25g - 0.30g
0.30g - 0.35g
0.35g - 0.40g
0.40g - 0.45g
0.45g - 0.50g
0.50g - 0.60g
> 0.60g

Datos Geodésicos

Datum: WGS84
 Factor de Escala: 0.9996
 Latitud de Origen: 0
 Unidades: metros

ACELERACIONES ESPECTRALES TR=500 AÑOS



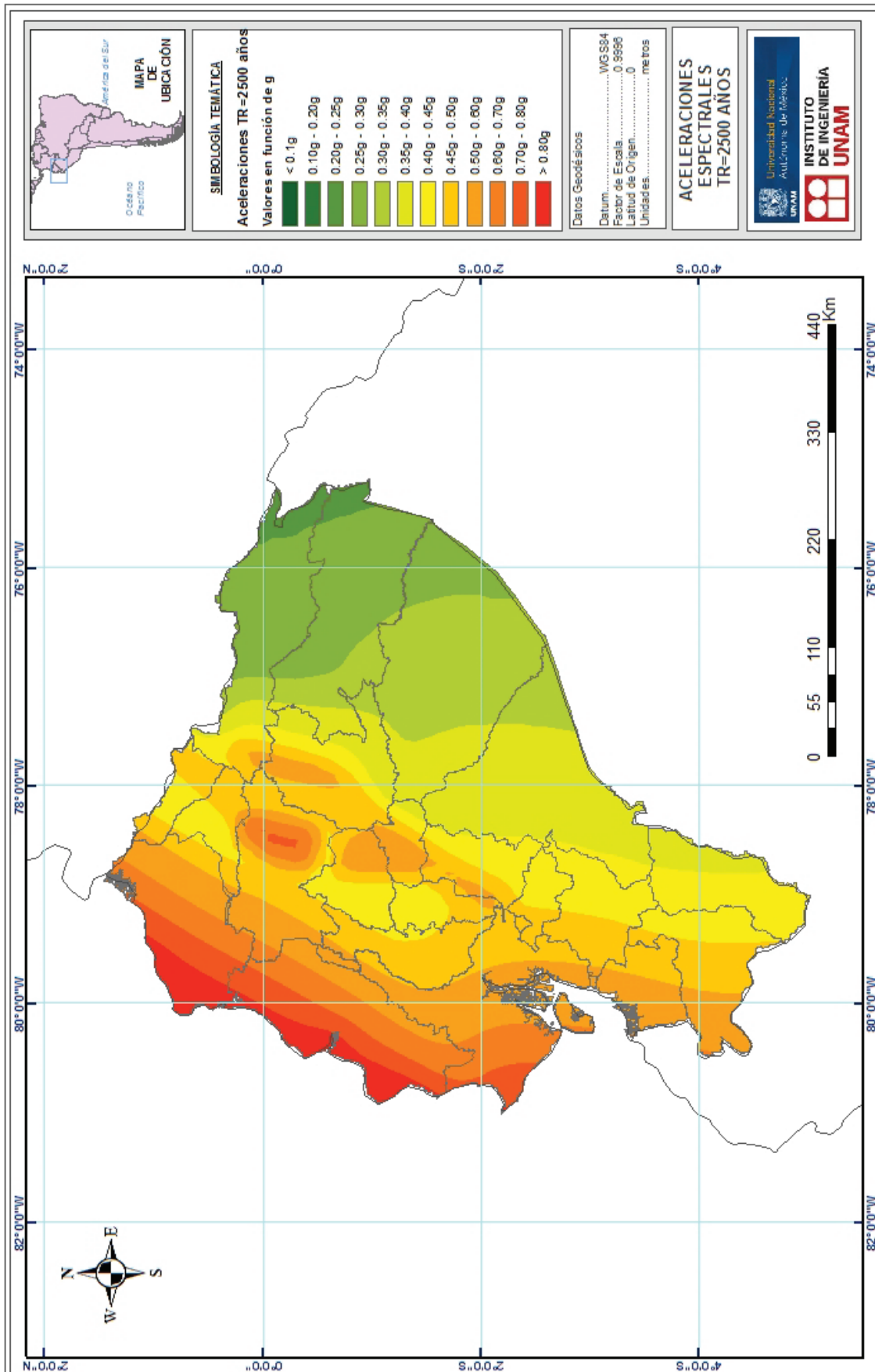


Figura 4.6.4: Mapa de peligro sísmico del Ecuador para un TR=2500 años.

EFFECTOS DE SITIO PARA CUENCA

En este capítulo se estudian los efectos de sitio únicamente de la ciudad de Cuenca. Se empieza por exponer ciertos conceptos básicos sobre este tema, y posteriormente el estudio se centra en la metodología utilizada en la ciudad.

Gran parte de este capítulo se basa en los estudios de vibración ambiental y geotécnicos realizados por la Universidad de Cuenca, y expuestos en la tesis de Encalada (2000, ref.[11]), en donde se evidencian pruebas de vibración ambiental realizadas en diferentes puntos de la ciudad, así como estudios de geotecnia en cinco zonas.

No se han realizado pruebas adicionales, ni se ha encontrado referencias existentes acerca del tema, que permitan corroborar los resultados expuestos en Encalada (2000, ref.[11]). Se analizaron los datos y se depuró la base de datos existente, de manera que los resultados estén relacionados con los estudios de la mecánica de suelos.

5.1 GENERALIDADES

En un estudio de peligro sísmico de un determinado sector, lo que generalmente se obtiene, son los valores de aceleraciones en roca. Sin embargo, lo que realmente interesa para el diseño, son los valores en la superficie, en donde las estructuras se encuentran sobreyaciendo con diferentes estratos de suelo.

Las ondas sísmicas sufren una serie de alteraciones al moverse por diferentes estratigrafías del terreno; estas modificaciones se manifiestan en duración, amplitud y contenido de frecuencias. Los efectos de sitio pueden deberse a diversos factores locales tales como:

- *Topografía*: varios estudios han demostrado la influencia de la topografía en la amplificación de ondas sísmicas, coincidiendo que superficies convexas (cimas de cerros) la señal se amplifica, mientras que en superficies cóncavas (bases de los cerros) la señal se deamplifica.
- *Zonas de contacto*: en estas zonas, la señal sísmica varía bruscamente.
- *Geología local*: este factor es el que más claramente muestra el efecto de sitio, ya que dependiendo del espesor y distribución de los estratos, propiedades mecánicas del suelo, etc., la amplitud puede cambiar considerablemente. Entre mayor sea el contraste de los tipos de suelo en la geología local, mayor será la amplificación de las ondas sísmicas. Por ejemplo, en un suelo arcilloso la velocidad de transmisión de onda es muy inferior a la de roca, por lo que la amplitud de la respuesta sísmica se incrementará para conservar la energía. Problemas que podrían presentarse debido a

la geología local serían licuación, densificación, deslizamientos (en conjunto con la topografía), entre otros.

Los efectos de sitio han sido estudiados a profundidad en las últimas décadas, en especial por los registros obtenidos durante sismos, en las que se evidencian daños más graves en zonas donde las estructuras se asienta en suelos blandos.

Uno de los ejemplos más representativos de este efecto, fue el ocurrido en la Ciudad de México en 1985, siendo este lugar el más afectado pese a su lejanía del epicentro del sismo. En la figura 5.1.1 se puede observar la amplificación que sufrió la señal sísmica en la zona de lago de la Ciudad de México durante del sismo de Michoacán de 1985, en donde los efectos de sitio son muy importantes.

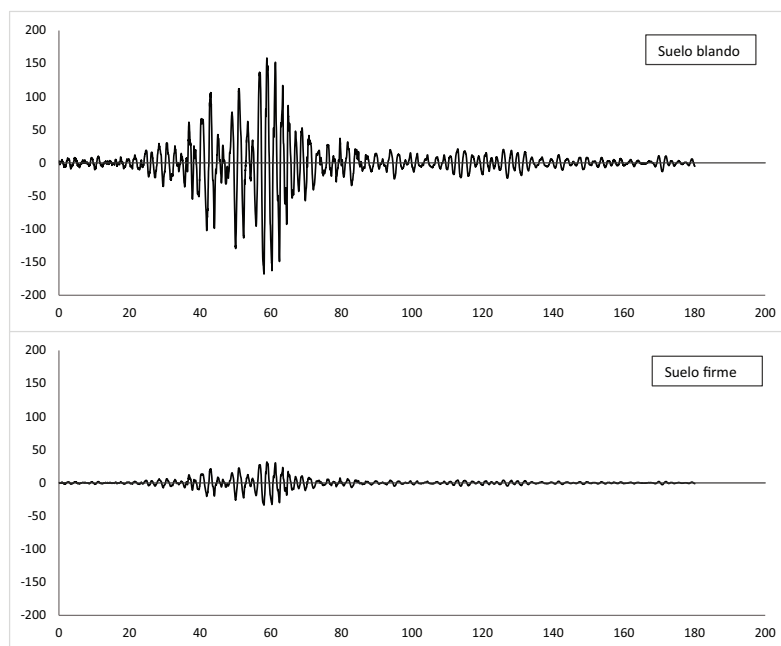


Figura 5.1.1: Registros de acelerogramas en la Ciudad de México del sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985, en distintas zonas

5.2 ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN PARA LA CIUDAD DE CUENCA

A partir del estudio de peligro sísmico, en conjunto con los efectos de sitio, se puede realizar una microzonificación de una determinada ciudad, considerando su zona urbana y posible expansión.

Una opción de metodología a seguir para una microzonificación sísmica es la siguiente:

- *Estudio de peligro sísmico regional*: análisis de amenaza sísmica similar al expuesto en el capítulo 3 del presente documento.
- *Estudio geomorfológico y geotécnico*: análisis de la geología regional, de manera que pueda determinarse subregiones geológicas, así como diversas características de la morfología local.

- *Monitoreo sísmico*: obtener parámetros de la respuesta del suelo ante posibles excitaciones sísmicas, mediante diferentes métodos, entre los que destacan, observaciones macrosísmicas, microtemores, movimientos débiles, movimientos fuertes, entre otros
- *Clasificación de las microzonas*: se realiza una clasificación de las zonas por orden de peligrosidad, en las que se exponen los parámetros necesarios para diseño sísmico. Se debería seguir realizando monitoreo en dichas zonas, de manera que los parámetros se ajusten más a la realidad.

En Cuenca, se han realizado estudios de geotecnia para diferentes puntos de la ciudad; sin embargo, esta técnica por sí sola no es suficiente para caracterizar. Adicional a estos estudios, se han realizado estudios de vibración ambiental, mediante los cuales es posible obtener los periodos dominantes para cada zona de terreno. Al unir estas dos características, se ha podido analizar los efectos de sitio de la región.

5.2.1 Modelo de características locales del suelo

En este punto es necesario contar con los resultados de los estudios geotécnicos en los que se pueda determinar, mediante la estratigrafía y propiedades mecánicas del suelo (velocidad de onda secundaria, V_s), la amplificación dinámica del sitio.

Adicionalmente, en la presente tesis, se tuvo acceso a pruebas de sísmica de refracción en el sector de la Universidad de Cuenca realizadas por la consultora *RASTER Ingeniería de Proyectos*, con las que se pudo obtener un perfil más actualizado de la zona, por lo que el perfil empleado corresponde a este último estudio. Así mismo, al revisar la información disponible, se decidió utilizar dicho perfil para la zona de la Ciudadela Simón Bolívar, por lo que se trabajó con cuatro funciones de transferencia.

Los perfiles mencionados se muestran de la figura 5.2.1 a la figura 5.2.4, incluyendo la variación de la velocidad de onda secundaria, V_s .

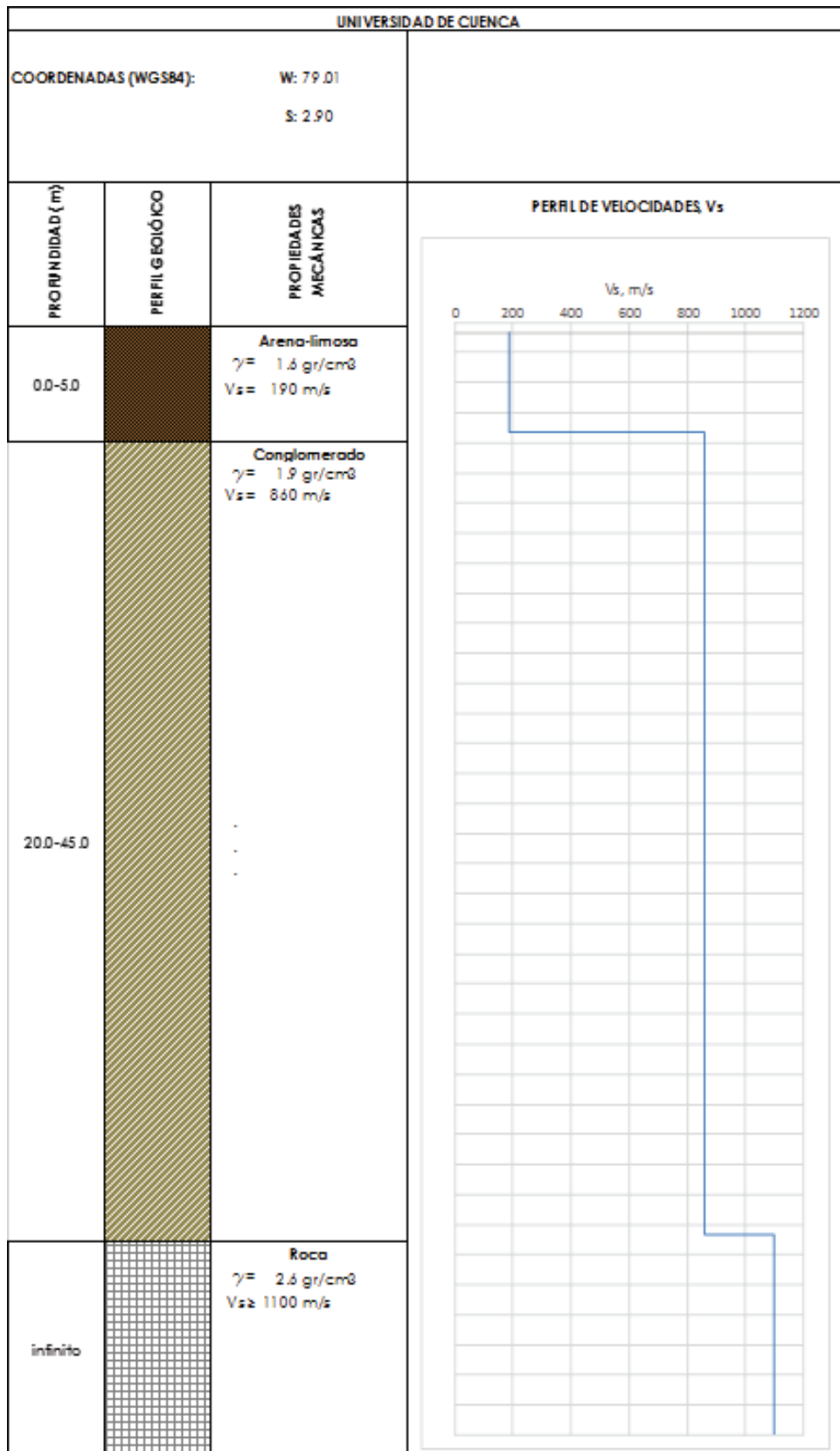


Figura 5.2.1: Perfil geológico, Universidad de Cuenca

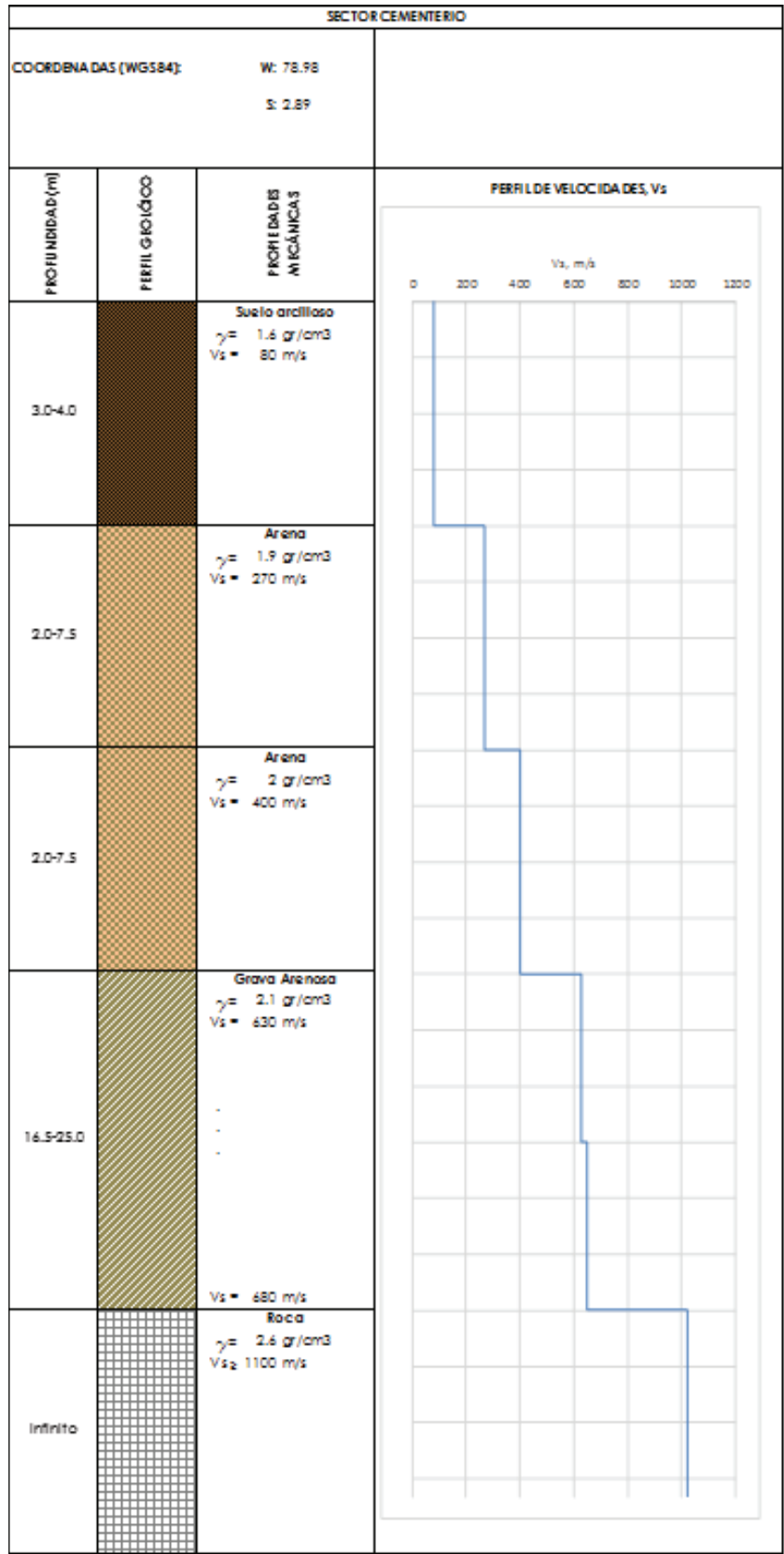


Figura 5.2.2: Perfil geológico, Sector Cementerio

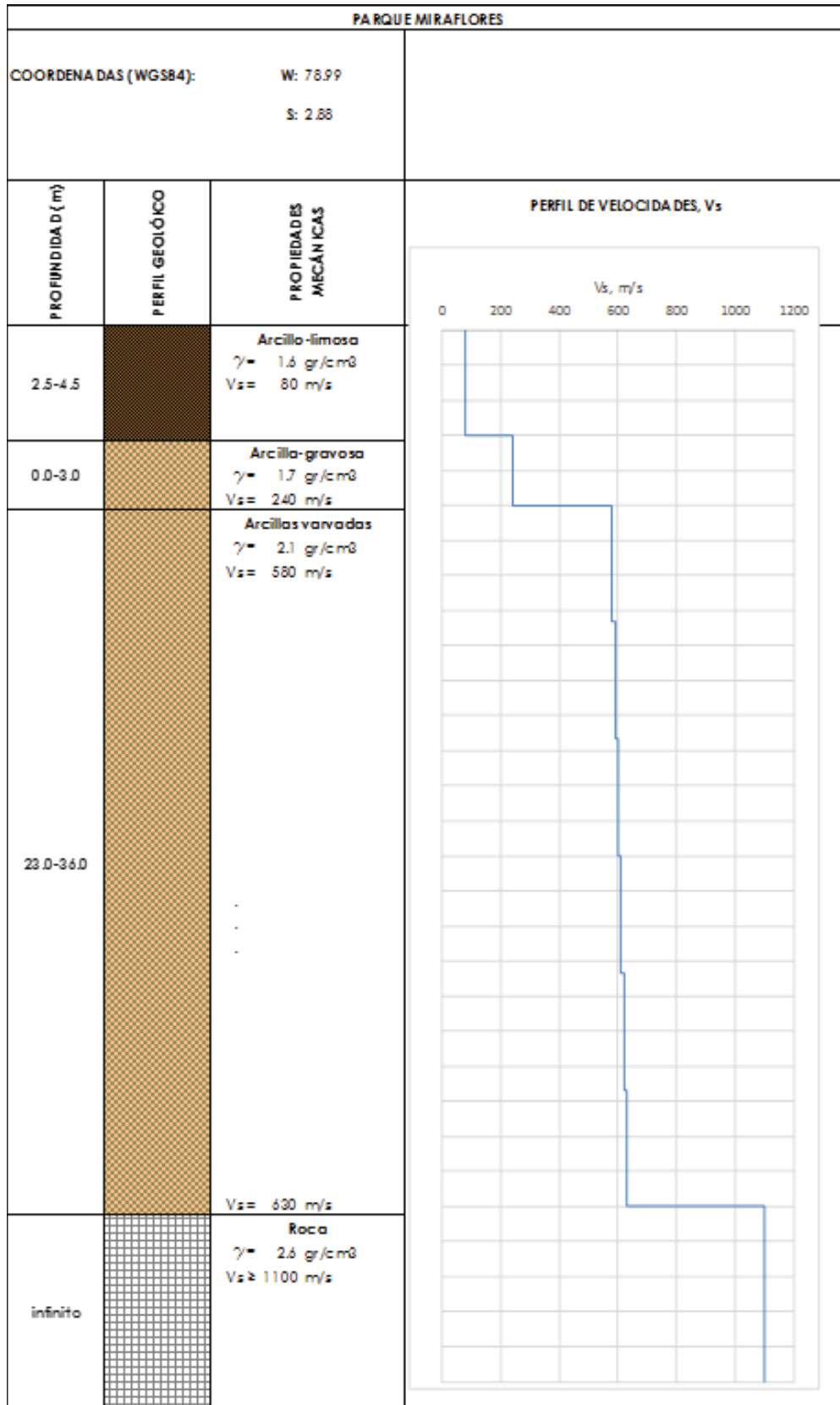


Figura 5.2.3: Perfil geológico, Parque Miraflores

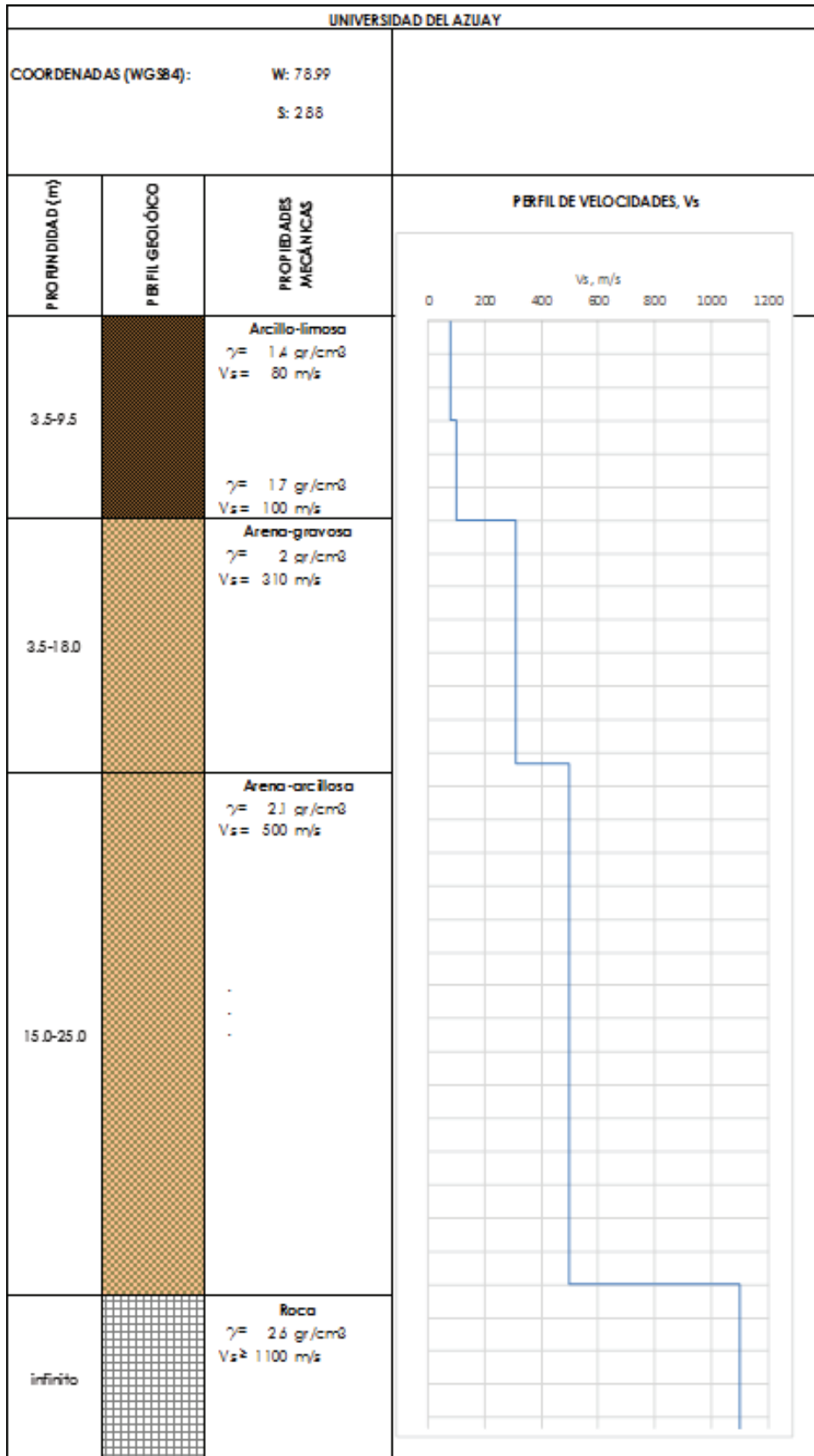


Figura 5.2.4: Perfil geológico, Universidad del Azuay

5.2.2 Amplificación dinámica del suelo

La amplificación dinámica del suelo, generalmente medida con funciones de transferencia (FT), permite determinar la amplitud que sufren las ondas sísmicas debido a las características de los suelos superficiales, para cierto movimiento producido en roca.

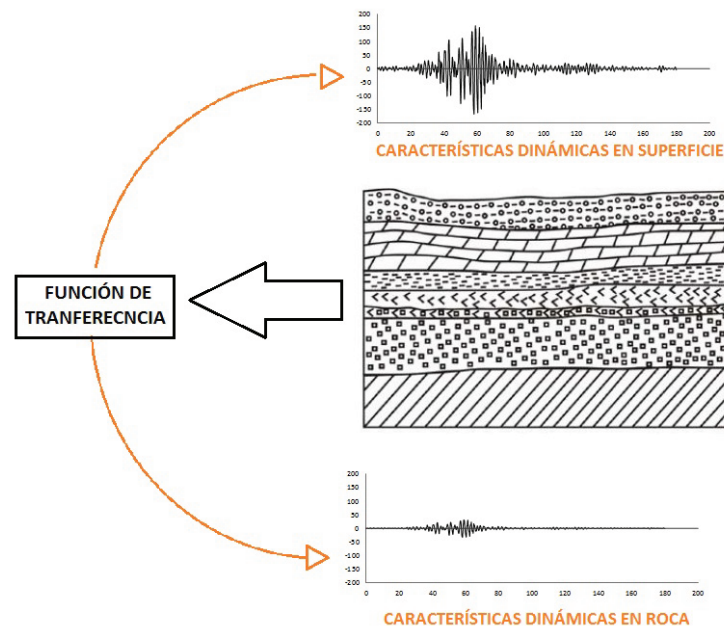


Figura 5.2.5: Esquema del concepto de amplificación dinámica del suelo

En esta técnica el modelo que se plantea es unidimensional, estudiando la propagación vertical de onda (ondas S), suponiendo un estrato de longitud infinita en cualquier dirección horizontal. Otra de las suposiciones de esta teoría es que los estratos presentan uniformidad en su espesor. Esta metodología fue planteada en un inicio por Haskell (1962, ref.[21]).

Las funciones de transferencia fueron obtenidas mediante los estudios geotécnicos, utilizando un modelo unidimensional y la herramienta computacional DEGTRA (Ordaz, 2011) para las cuatro zonas geológicas en las que se han dividido a la ciudad de Cuenca.

Al dividir estos dos espectros, se obtuvieron los cocientes espectrales de respuesta (CER), los mismos que se utilizaron para obtener los efectos de sitio en cada punto de la región. Las FT, y los CER para cada subzona de la ciudad, se muestran en la figura 5.2.6.

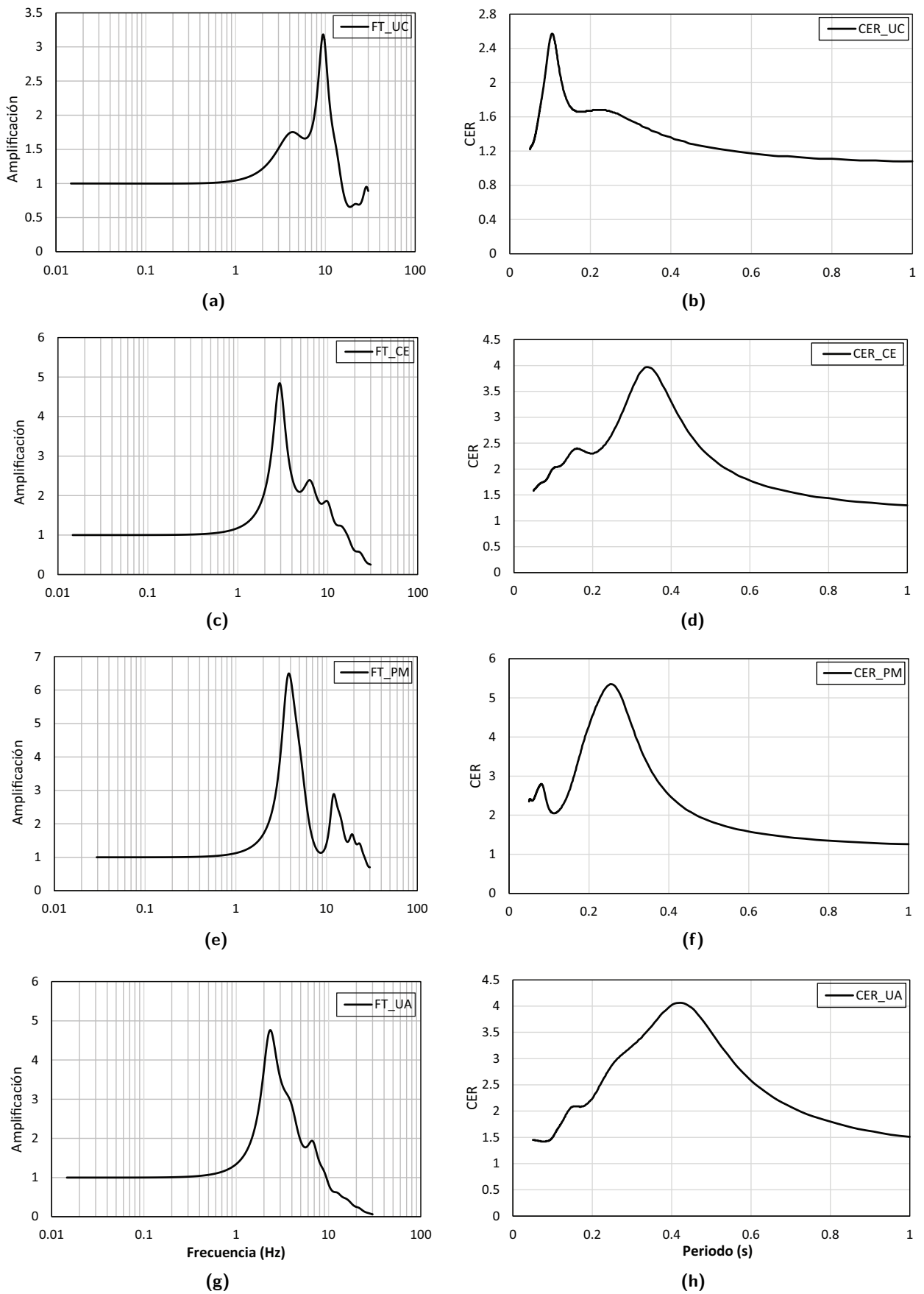


Figura 5.2.6: Cocientes espectrales de Fourier (FT) y cocientes espectrales de respuesta(CER). (a) y (b) Universidad de Cuenca, (c) y (d) Sector Cementerio, (e) y (f) Parque Miraflores, (g) y (h) Universidad del Azuay.

Una vez que se tienen los CER, es posible calcular los espectros de respuesta a nivel de superficie, a partir del espectro en roca, este último correspondiente al espectro de peligro uniforme para Cuenca.

5.3 MONITOREO SÍSMICO

El método que se estudió fue el de microtremores, ya que este método fue utilizado en los estudios previos de efectos de sitio de Cuenca, Encalada,(2000, ref.[11]).

5.3.1 Microtremores

Esta técnica mide los periodos dominantes del suelo utilizando equipos muy sensibles que miden la vibración ambiental causada por tráfico vehicular, sismos lejanos, sismos pequeños, entre otros. Es un método altamente utilizado debido a su sencillez de operación y bajo costo.

La Universidad de Cuenca, en el año de 1999 realizó 171 mediciones en diferentes puntos de la urbe, obteniendo mediciones que fueron analizadas en la tesis de Encalada,(2000, ref.[11]). El equipo usado consistió en 2 geófonos Mark modelo L-4C 1.0 Hz, uno horizontal y otro vertical, un analizador de señales digital HP, Modelo 3560^a, con dos canales de registro, un cable apantallado y una brújula para orientar el geófono horizontal en dirección norte-sur.

La resolución utilizada fue de 128 muestras por segundo. por cada punto se realizó un set de tres medidas, el primero corresponde a una señal de 32 segundos y dos sets de espectros de 160 segundos cada uno, procesados directamente por el equipo. Cada set de espectros consta de 10 señales de 16 segundos cada una. Los puntos estudiados se muestran en la figura 5.3.1.

El tiempo de medición de las pruebas presentadas en Encalada (2000) podría no llegar a ser representativo, ya que al ser tan pequeño se pueden obviar los picos más elevados de la señal. Si bien es cierto, no se contaba con equipos de mejores características, los tiempos de medición son muy cortos y existe una posibilidad alta que no represente la verdadera respuesta del suelo.

Lermo et al. (2011, ref.[28]), expone resultados en los que se considera que el cociente H/V es un buen estimador de la frecuencia y amplitud del movimiento, siempre y cuando el registro medido sea mayor a una hora. El mismo autor recomienda realizar registros de dos horas utilizando un sismógrafo de banda ancha.

Los resultados expuestos en Encalada (2000, ref.[11]) corresponden al único estudio de este tipo que se ha realizado en la ciudad de Cuenca, por lo que pese a que no se tiene una adecuada confiabilidad en los resultados del estudio de vibración ambiental, se han tomado estos valores para el estudio de efectos de sitio presentados en esta tesis.

Debido a estas anomalías presentadas en Encalada (2000, ref.[11]), se ha depurado la base de datos de los puntos de vibración ambiental, tomando como base las pruebas de geotecnia presentadas, ya que al compararlas con otros estudios más recientes, no se identifican diferencias considerables.

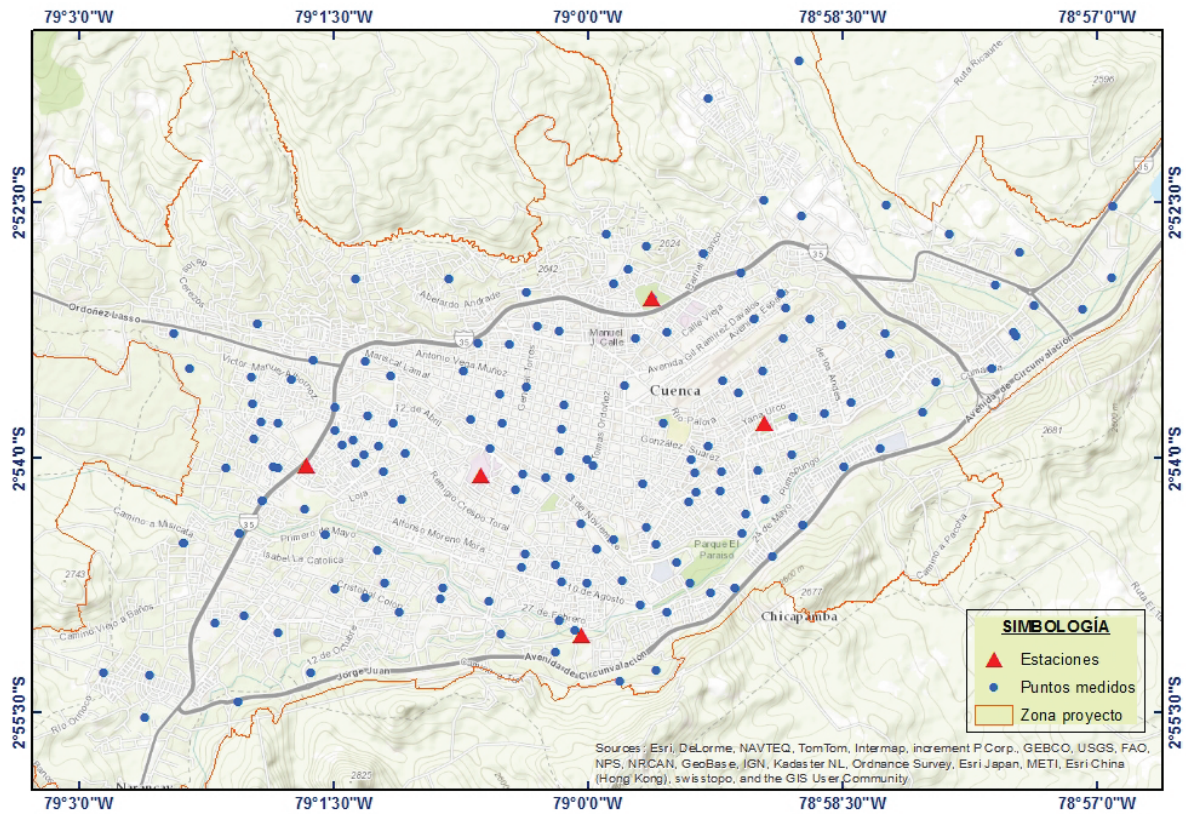


Figura 5.3.1: Puntos de vibración ambiental

5.3.2 Medición de periodos del suelo: Técnica de Nakamura

Una de las técnicas más utilizadas para medición de periodos del suelo mediante vibración ambiental es la técnica de Nakamura [35] (o REHV), la cual fue explicada por este autor en el años de 1989.

Esta técnica se basa en estimar la razón del espectro de Fourier entre las componentes horizontal y vertical de un mismo registro. La máxima amplitud del cociente H/V corresponde a la frecuencia dominante del terreno.

El método de Nakamura tiene mejores resultados cuando la diferencia de las propiedades de los estratos con relación al estrato de roca es grande. Si este no fuese el caso, se deberían realizar estudios adicionales mediante registros sísmicos de la zona, ya sea por movimientos fuertes o débiles. Este análisis ha sido utilizado en la tesis de Encalada (2000, ref.[11]), y no se ha podido comprobar los resultados mediante registros sísmicos, debido a que no se tuvo acceso a los registros sísmicos de la región.

5.3.3 Construcción de curvas de isoperiodos

Se puede realizar una microzonificación con base en los periodos dominantes de cada sector; para esto se construyeron curvas de isoperiodos.

Debido a que los valores de periodos del suelo solo se pueden obtener en los puntos donde se realizaron las mediciones, es necesario utilizar técnicas de interpolación para tener un mapa de isoperiodos en

toda la región en estudio.

Para tener una malla más refinada, se utilizan los estudios de la geología local, de manera que se puedan modificar zonas en las que se consideren que se encuentran en terreno firme o en zonas de iguales condiciones a las obtenidas en las mediciones de campo. Se debe mencionar que no todos los puntos del estudio de vibración ambiental fueron utilizados en la interpolación, ya que se depuró esta base de datos, considerando prioridad a los resultados de la geotecnia.

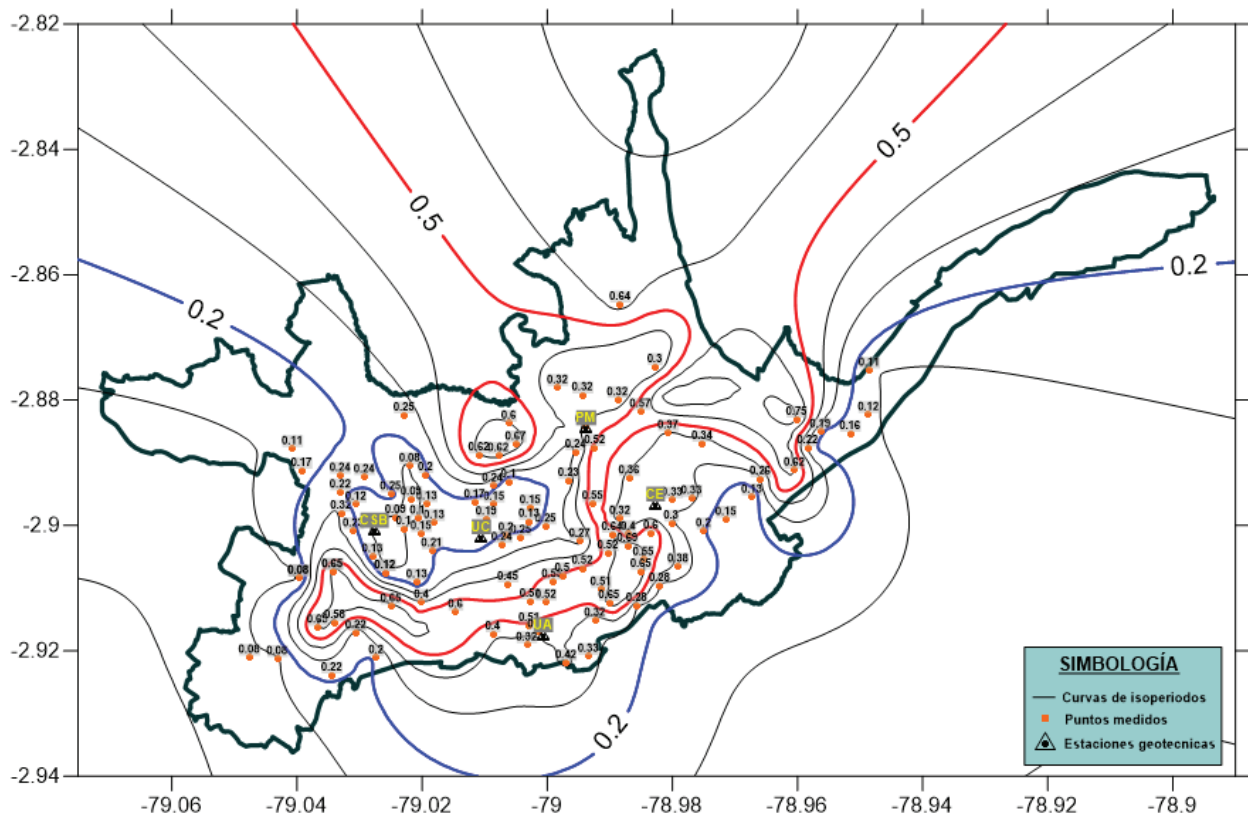


Figura 5.3.2: Curvas de isoperiodos. Puntos utilizados de estudio de Encalada (2000)

Los puntos de la figura 5.3.2 corresponden a los utilizados en la interpolación para las curvas de isoperiodos. El criterio usado para la depuración de la base de datos, fue la de considerar como principales a los resultados obtenidos del estudio de geotecnia de las cuatro estaciones mostradas de la figura 5.2.1 a 5.2.4. Se realizó esta suposición, ya que no se tuvo control sobre las pruebas ni sobre el procesamiento de la información.

Los puntos de la figura 5.3.3 no fueron considerados para la interpolación de los isoperiodos. Como se puede observar en la figura, y a criterio del autor de esta tesis, no concuerdan con los valores de las curvas de isoperiodos.

5.4 EFECTOS DE SITIO PARA LA CIUDAD DE CUENCA

Con la finalidad de evaluar los efectos de sitio en la ciudad de Cuenca, se construyó una malla de puntos, la cual corresponde a una de 100x100 con una separación constante de 0.002 \bar{r} en longitud y 0.001 \bar{r} en latitud. A cada uno de los puntos de esta malla le corresponde un periodo y se le asignó un

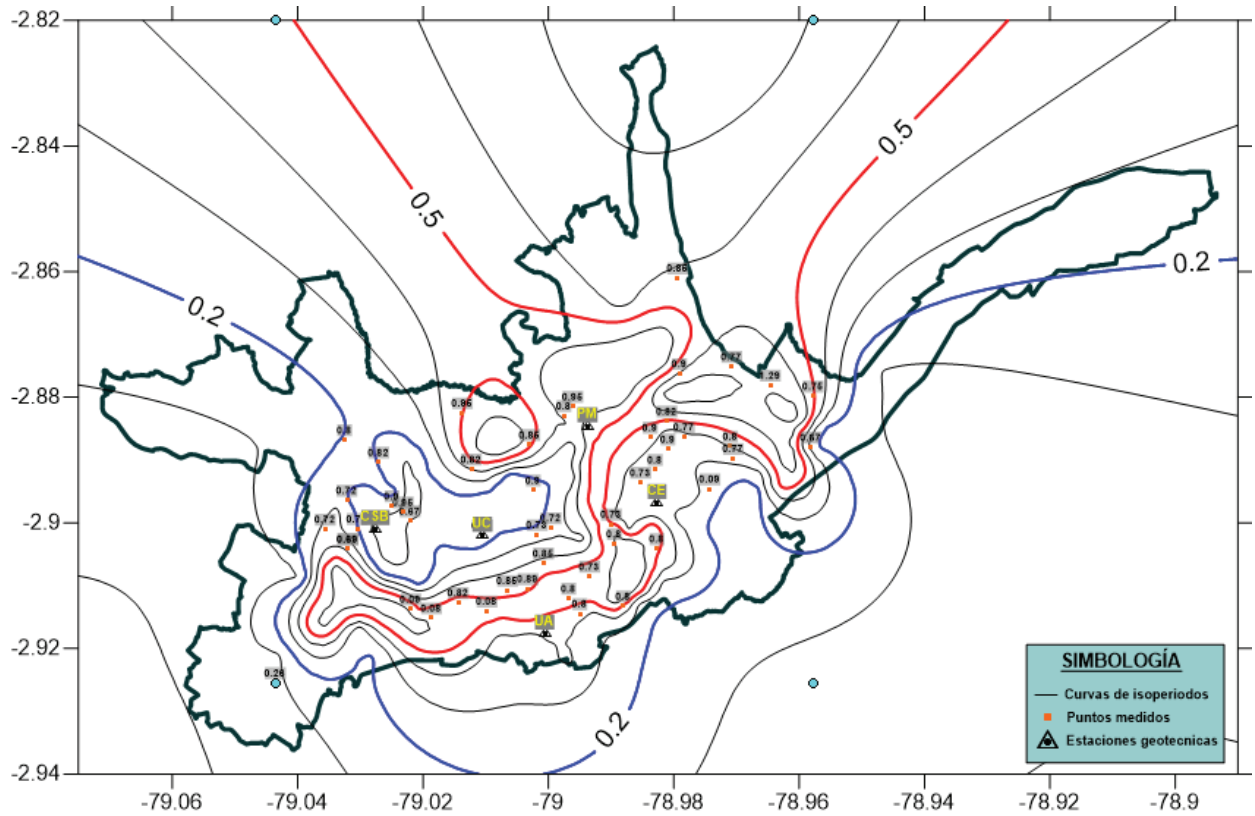


Figura 5.3.3: Curvas de isoperiodos. Puntos eliminados de estudio de Encalada (2000)

cociente espectral de respuesta, con la finalidad de considerar la amplificación posible.

Adicional a los CER presentados en la figura 5.2.6, se adicionó una función lineal (CER=1) la cual representa suelo firme en el cual no se producen amplificaciones espectrales.

La asignación de los cocientes espectrales se realizó considerando cinco rangos de periodos, los cuales abarcan todos los puntos de la malla. Estos rangos se observan en la tabla

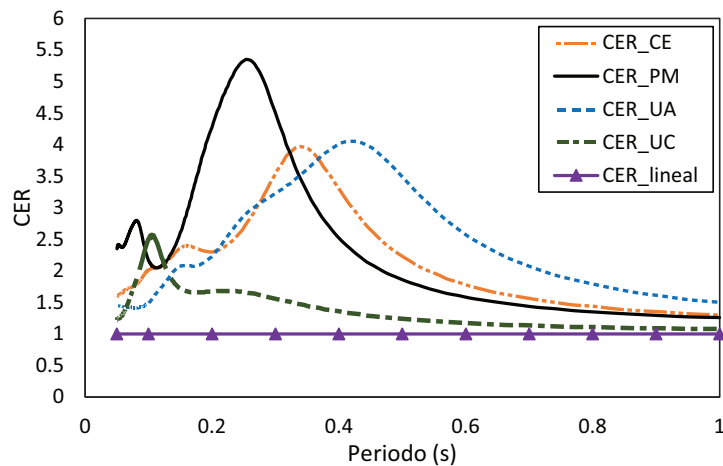


Figura 5.4.1: Cocientes espectrales de respuesta utilizados (CER)

Rangos de periodos	CER asignado
$0.00 < T \leq 0.05$	CER_lineal (ver figura5.4.1)
$0.05 < T \leq 0.15$	CER_UC (ver figura5.4.1)
$0.15 < T \leq 0.30$	CER_PM (ver figura5.4.1)
$0.30 < T \leq 0.40$	CER_CE (ver figura5.4.1)
$0.40 < T \leq 1.00$	CER_UA (ver figura5.4.1)

Tabla 5.4.1: Resumen de amplificación para cada subregión de la ciudad de Cuenca

Con los resultados obtenidos en los puntos anteriores, se pudieron encontrar los valores de los factores de amplificación, los cuales se muestran en la Tabla 5.1.

Perfil	Amplificación	Frecuencia	Periodo
	u	Hz	s
Universidad de Cuenca	3.18	9.39	0.11
Parque de Miraflores	6.50	3.79	0.26
Sector Cementerio	4.85	2.87	0.35
Universidad de Azuay	4.76	2.30	0.43

Tabla 5.4.2: Resumen de amplificación para cada subregión de la ciudad de Cuenca

Finalmente, se junta toda la información obtenida anteriormente en un solo archivo que contiene la información de efectos de sitio de manera continua para la ciudad de Cuenca. El archivo con toda esta información se presenta a través de un mapa de contornos de isoperiodo donde cada uno de los puntos tiene su respectiva función de transferencia.

Mediante la información de la figura 5.4.2 se pueden obtener las amplificaciones para el peligro sísmico. En este caso se utilizó el programa CRISIS para obtener los resultados de la amenaza sísmica en cuenca, incluyendo los efectos de sitio.

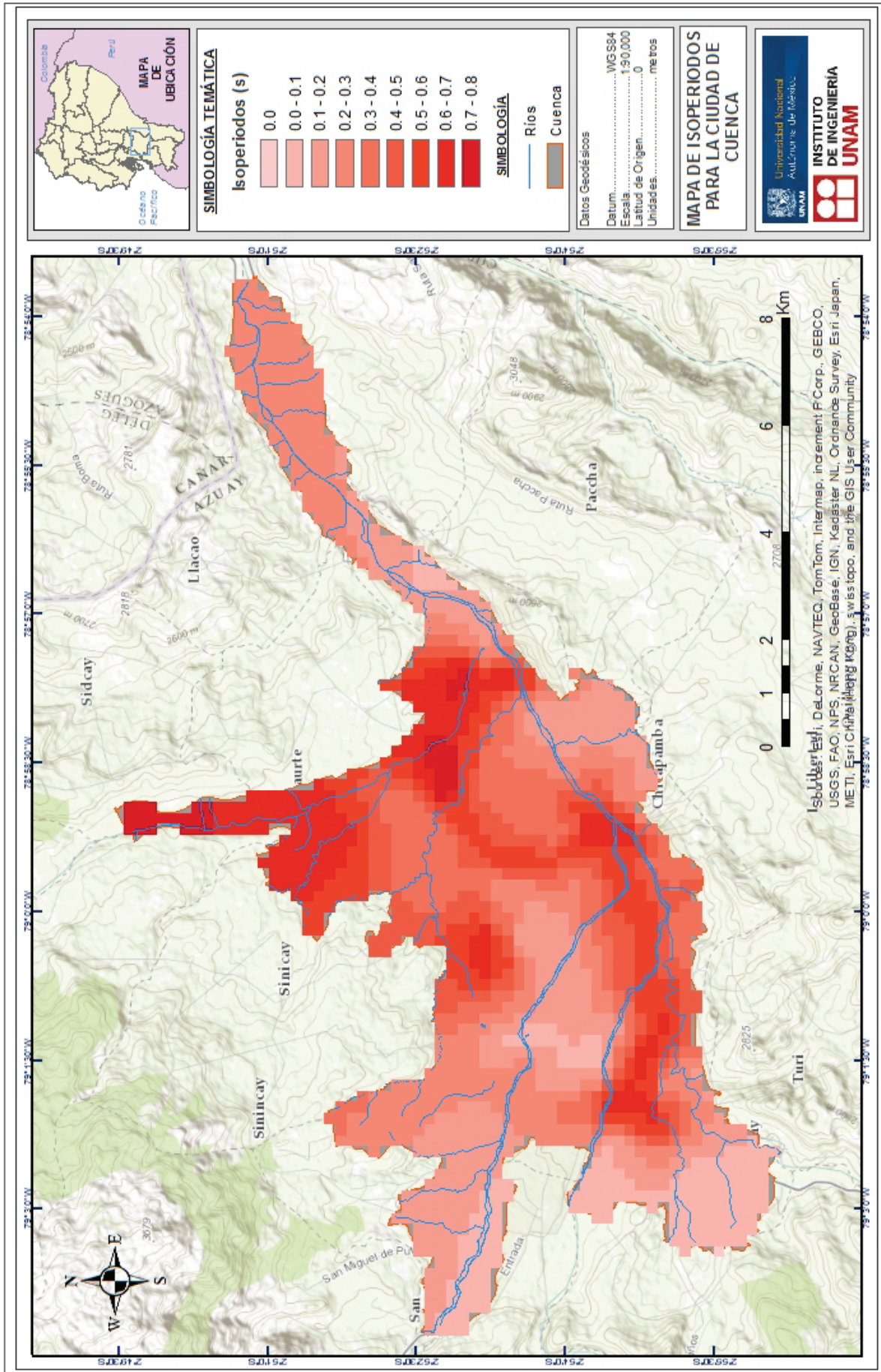


Figura 5.4.2: Mapa temático de isoperiodos para la ciudad de Cuenca

ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO

Los espectros de diseño sísmico son comúnmente utilizados en las metodologías de diseño sismoresistente. A partir de éste espectro se obtienen valores tales como aceleraciones máximas, desplazamientos, pseudovelocidades, etc.

En un inicio, se exponen las curvas de peligro sísmico obtenidas para las principales ciudades del país. A partir de estas curvas se obtienen los espectros de peligro uniforme, para las mismas locaciones. Estos espectros de peligro uniforme son comparados con los espectros de diseño presentados en la NEC11 [38].

A continuación se plantean los principales criterios utilizados para construir espectros de diseño elásticos para la ciudad de Cuenca, partiendo de los resultados de peligro sísmico del capítulo , así como de los efectos de sitio del capítulo . Mediante los factores de reducción, es posible obtener espectros inelásticos, los cuales se indican en la parte final del capítulo.

6.1 GENERALIDADES

Un espectro de respuesta caracteriza los efectos dinámicos que sufre una estructura, ante la ocurrencia de un movimiento sísmico. Dados el amortiguamiento y una sola componente horizontal de un sismo, se puede obtener un espectro de respuesta a partir de los valores absolutos máximos de la respuesta dinámica de un sistema estructural de un grado de libertad, considerando todos los periodos estructurales posibles que se podrían presentar. Los espectros se podrían generar para cualquier respuesta de la estructura que interese, ya sea aceleración, velocidad o desplazamiento.

Por otra parte, un espectro de diseño es una herramienta utilizada para determinar las demandas a las que estará sometida la estructura, como son las fuerzas y desplazamientos laterales, los cuales representan valores necesarios en un diseño sismoresistente. Este tipo de espectro también se refiere a un sistema de un grado de libertad.

Una diferencia entre espectro de respuesta y uno de diseño, es que las ordenadas de los espectros de respuesta corresponden a diferentes tasas de excedencia de intensidades, mientras que un espectro de diseño correspondería a la envolvente de una familia de espectros de peligro uniforme, es decir, asociado a un mismo periodo de retorno. Un espectro de diseño, teóricamente, se basa en un análisis estadístico de la respuesta espectral para la sismicidad de una región dada.

Dichos espectros de diseño deben considerar, por lo menos, los siguientes puntos (Miranda 1999, ref.[34]):

- Los espectros elásticos de diseño deben representar niveles de demanda apegados a la realidad, incluyendo reglas de la dinámica estructural.
- Deberían incluir parámetros que reflejen la posible amplificación ante efectos de sitio.
- Considerar los diferentes tipos de factores en las reducciones de ordenadas espectrales, aun cuando estos no estén estrictamente bien justificadas.

Para considerar estos criterios dentro de un espectro de diseño, se deben tomar en cuenta varios parámetros locales del suelo, referente a la amenaza sísmica y al comportamiento estructural de los diferentes sistemas involucrados.

La metodología adoptada para la construcción de los espectros de diseño consistió en obtener un conjunto de espectros de peligro uniforme, afectados por la amenaza sísmica de la región y efectos de sitio, para posteriormente suavizarlos y definir los principales parámetros del espectro de diseño.

Para esto, se empezó por tomar los espectros de peligro uniforme de pseudoaceleración partiendo de las curvas de peligro sísmico, las cuales pueden ser obtenidas a partir de los resultados de amenaza del capítulo .

6.2 CURVAS DE PELIGRO SÍSMICO

Una curva de peligro sísmico representa de manera gráfica la tasa anual de excedencia para valores de intensidades espectrales, la más común sería la aceleración máxima del terreno. Estas curvas se obtienen para un solo periodo de vibración. En la figura 6.2.1 se puede observar un ejemplo de curvas de peligro sísmico.

De la figura 6.2.1, $\nu(a)$ representa la tasa anual de excedencia de aceleraciones. El periodo de retorno equivale al inverso de la tasa, así:

$$T_R = \frac{1}{\nu(a)} \quad (6.1)$$

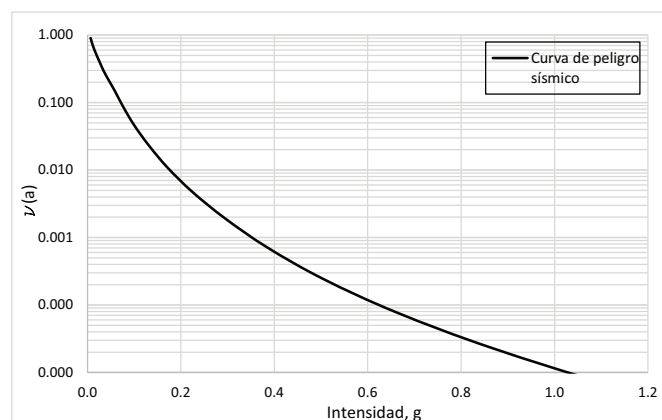


Figura 6.2.1: Curva de peligro sísmico

Por ejemplo, en la Figura 6.1, a un $T_R = 500$ años ($\nu(a) = 0.002$), le corresponde una aceleración de aproximadamente 0.28g.

A partir de las curvas de peligro sísmico para diferentes periodos estructurales y un mismo periodo de retorno, pueden ser encontrados los espectros de peligro uniforme (ver figura 6.2.2).

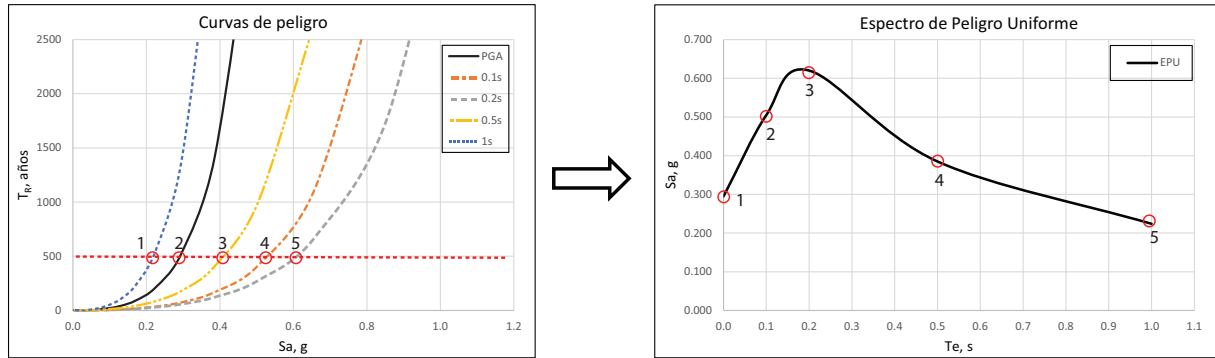


Figura 6.2.2: Construcción de un EPU a partir de las curvas de peligro sísmico

Estas curvas son necesarias para proyectos estructurales, en los cuales, es necesario definir diseños para varios niveles de desempeño sísmico o periodos de retorno, como es el caso de puentes de luces considerables. Son una herramienta muy útil para el diseño sísmico, ya que nos proporciona los diferentes niveles de aceleración sísmica en roca, en el sitio de interés.

6.2.1 Curvas de peligro sísmico para el Ecuador

Uno de los principales objetivos de este trabajo, es el de obtener resultados para el territorio ecuatoriano, sin embargo, dado que la información de las curvas de peligro es muy extensa, solo se presentan curvas de peligro sísmico para las 23 capitales de las provincias del territorio continental del Ecuador. De la figura 6.2.3 a la 6.2.5 se presentan las curvas de peligro sísmico para los puntos indicados. Cada figura contiene curvas correspondientes a cinco periodos estructurales: PGA, 0.1s, 0.2s, 0.5s y 1s, los cuales han sido escogidos con el fin de comparar con las curvas de peligro del NEC11.

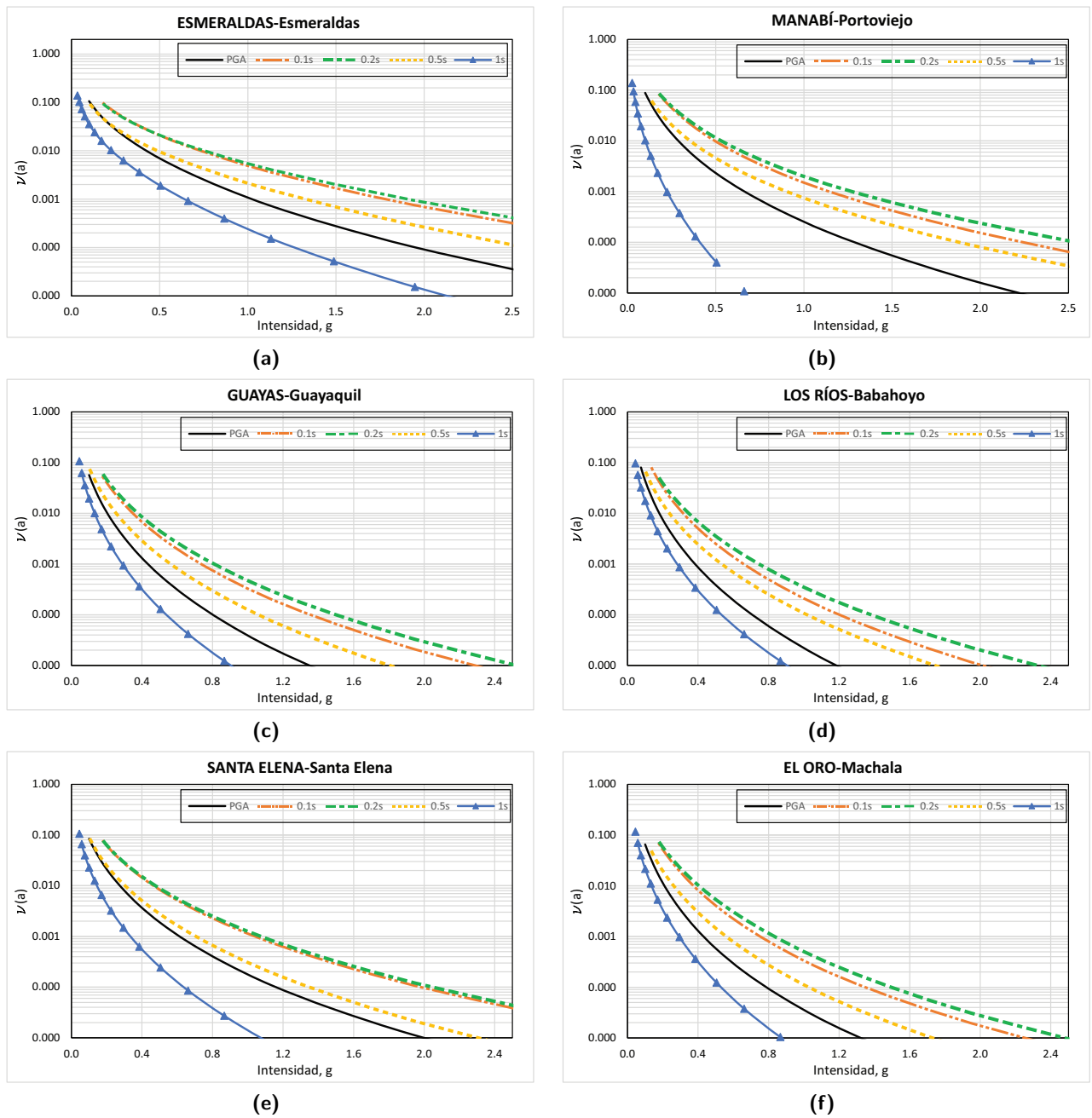
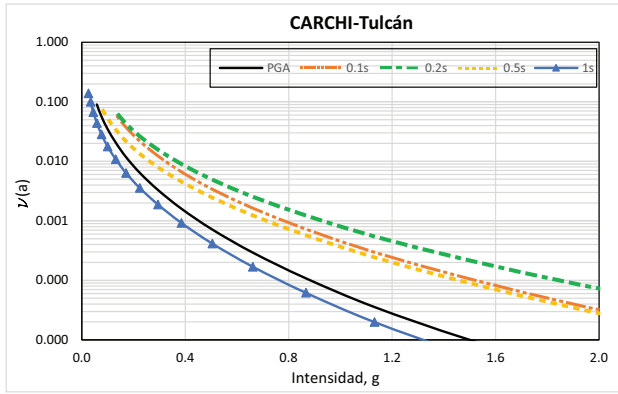
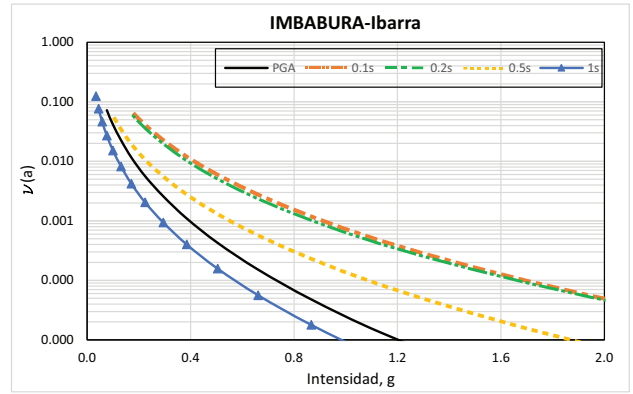


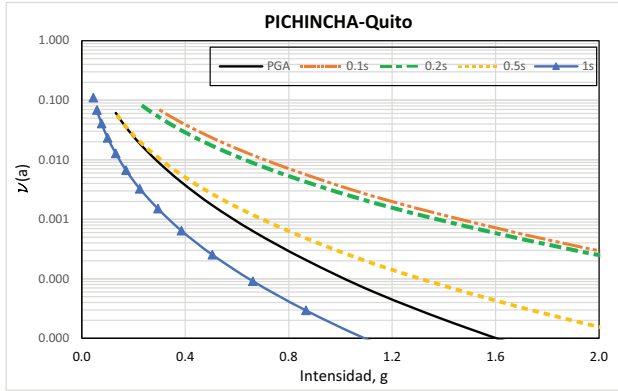
Figura 6.2.3: Curvas de peligro sísmico. Región Costa del Ecuador



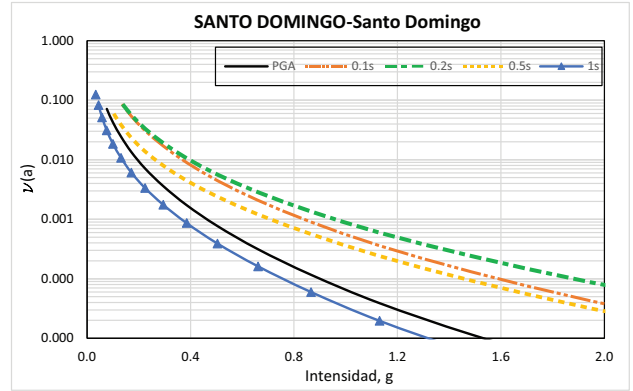
(a)



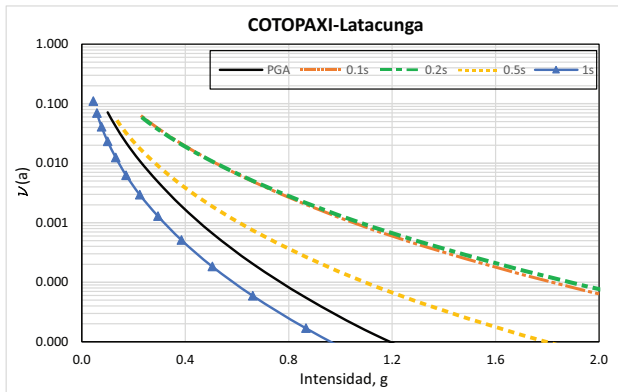
(b)



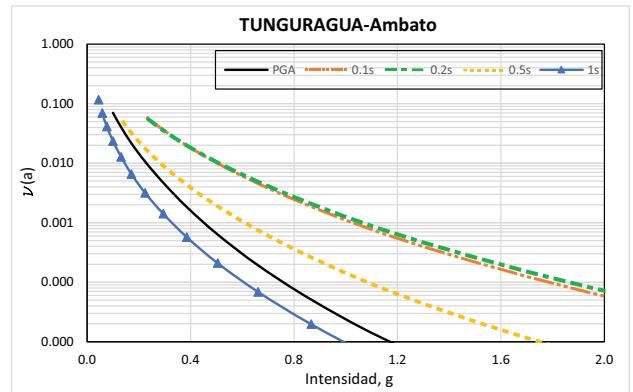
(c)



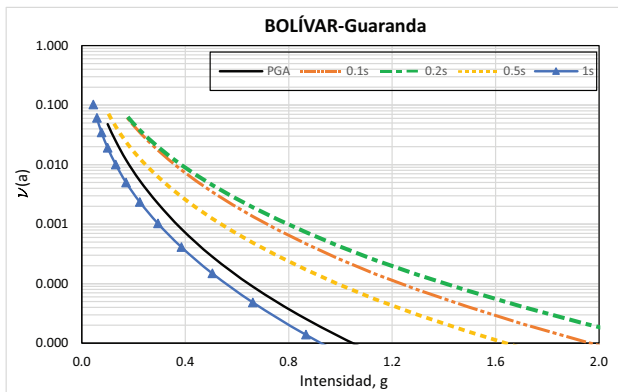
(d)



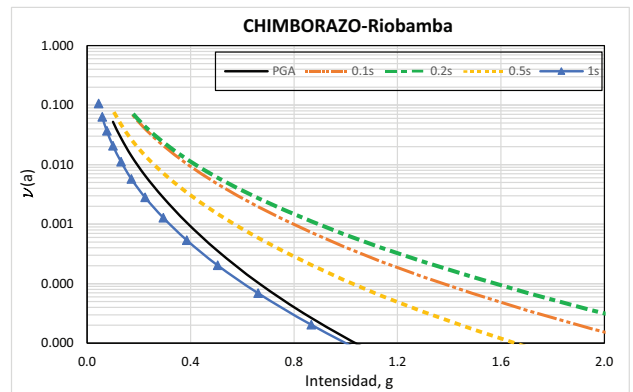
(e)



(f)



(g)



(h)

Continua figura en siguiente página

Continuación figura de página anterior

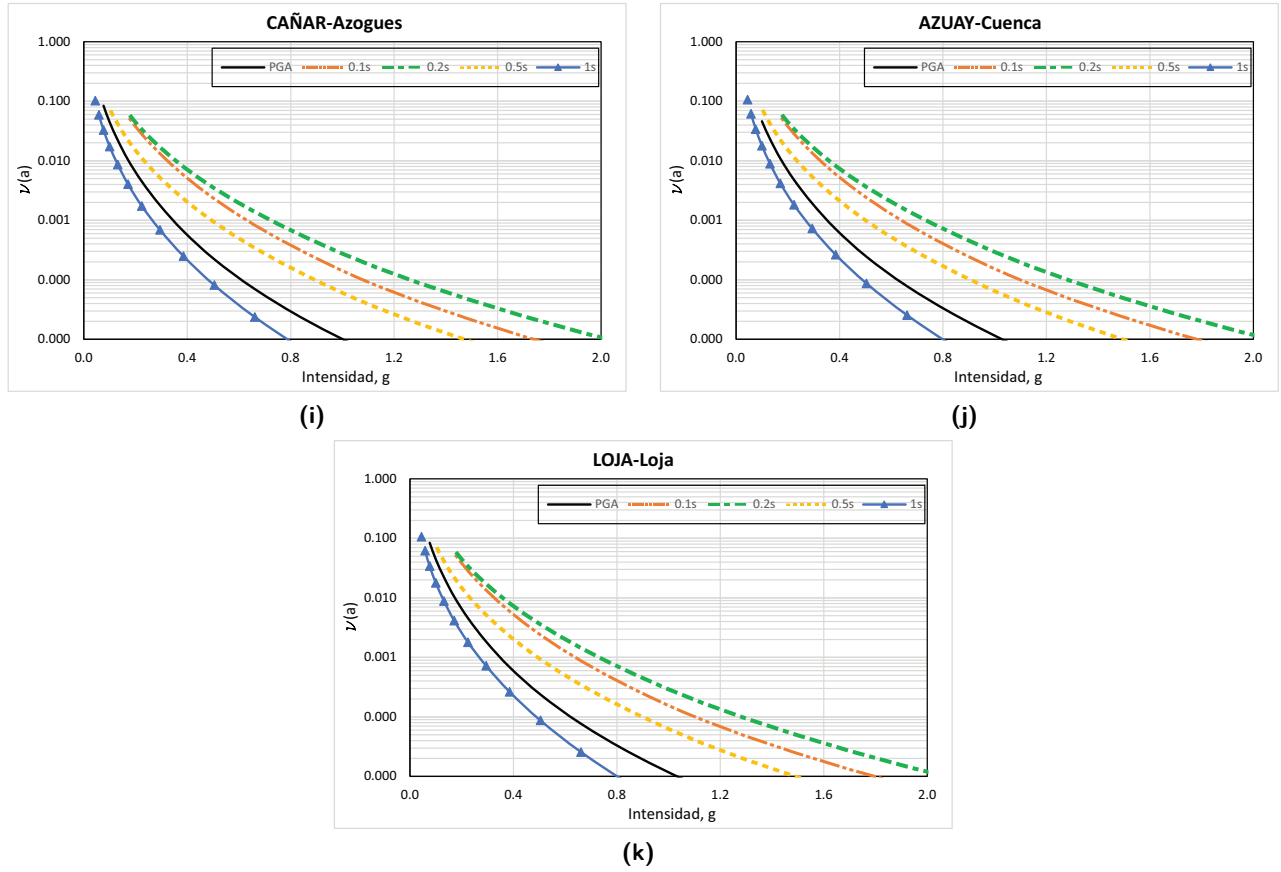


Figura 6.2.4: Curvas de peligro sísmico. Región Sierra del Ecuador

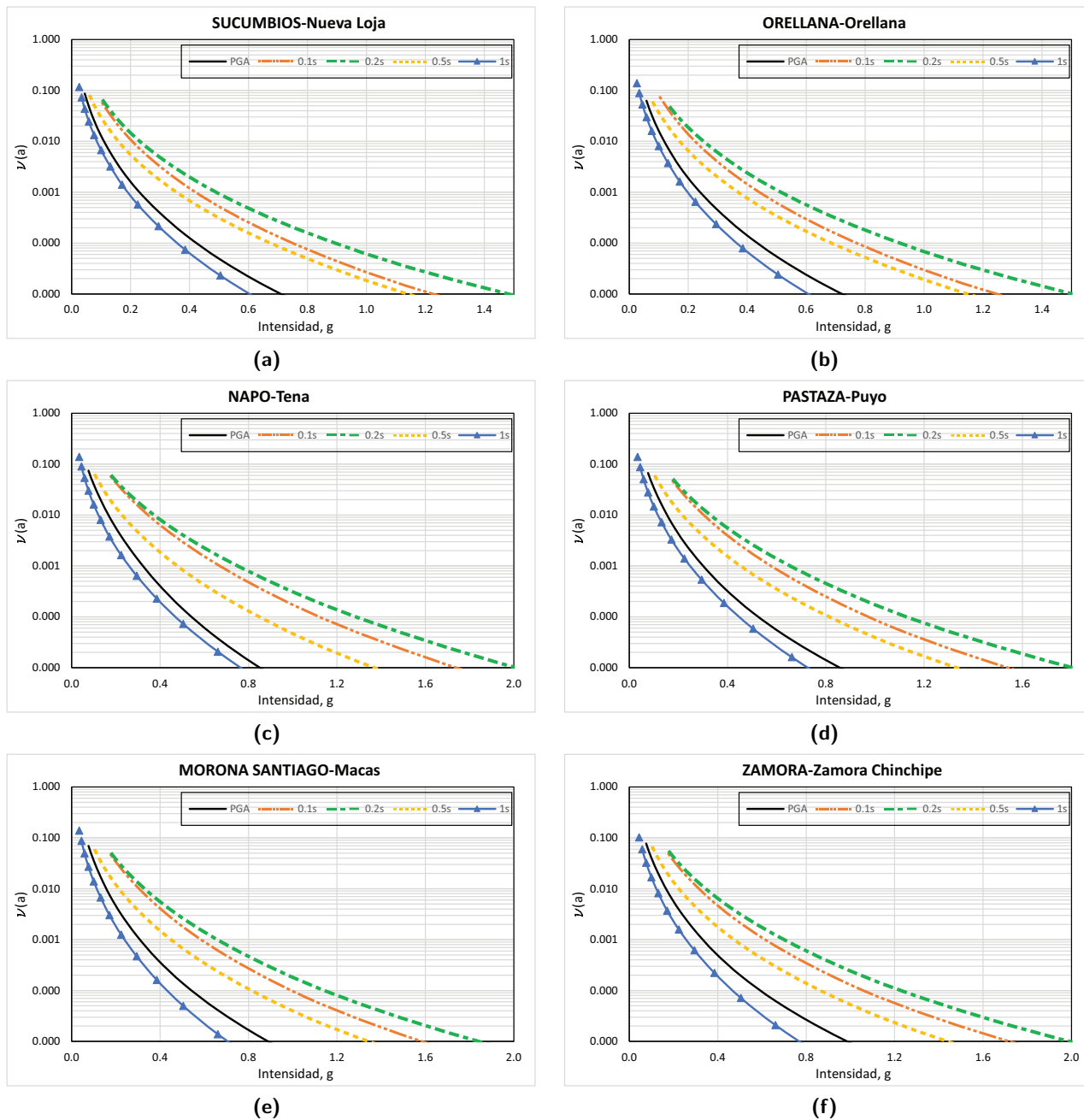


Figura 6.2.5: Curvas de peligro sísmico. Región Oriente del Ecuador

6.3 ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME (EPU)

Una metodología común para conocer las demandas sísmicas a las que podría estar sometida una estructura, es la de utilizar los espectros de diseño expuestos en los códigos u obtenidos a partir de estudios sísmicos in situ. Sin embargo, una alternativa que posiblemente sería la más adecuada, es la de utilizar directamente los espectros de peligro uniforme, ya que estos espectros tienen la cualidad que están asociados a una probabilidad de excedencia uniforme.

Es necesario incluir las incertidumbres de la distancia y magnitud, de manera que se obtenga un

espectro en los que todos los valores de su respuesta (aceleraciones, pseudovelocidades, etc.) tengan una probabilidad de excedencia uniforme.

El espectro de peligro uniforme (EPU), tiene la característica de que puede ser utilizado directamente para la estimación de las demandas sísmicas, sin necesidad de escalar sus valores.

6.3.1 Espectros de peligro uniforme para el Ecuador

Se obtuvieron espectros de peligro uniforme en los 23 puntos utilizados para exponer los resultados de las curvas de peligro sísmico, esto debido a que lo que se busca es exponer una muestra de todos los resultados que se han obtenido. Los cálculos fueron realizados a partir de las curvas de peligro sísmico, similar a lo presentado en la figura 6.2.2.

Adicionalmente, se obtuvieron los EPU correspondientes al desplazamiento espectral. Para esto, se utilizaron las leyes de la dinámica estructural, que nos dice lo siguiente:

$$S_d = \frac{S_a T^2}{4\pi^2} \quad (6.2)$$

Los espectros obtenidos se compararon con los de diseño estipulados en la Normativa Ecuatoriana de la Construcción 2011 (NEC11, ref.[38]), tanto de pseudoaceleración como de desplazamiento espectral. Esto se lo puede observar de la figura 6.3.1 a 6.4.2.

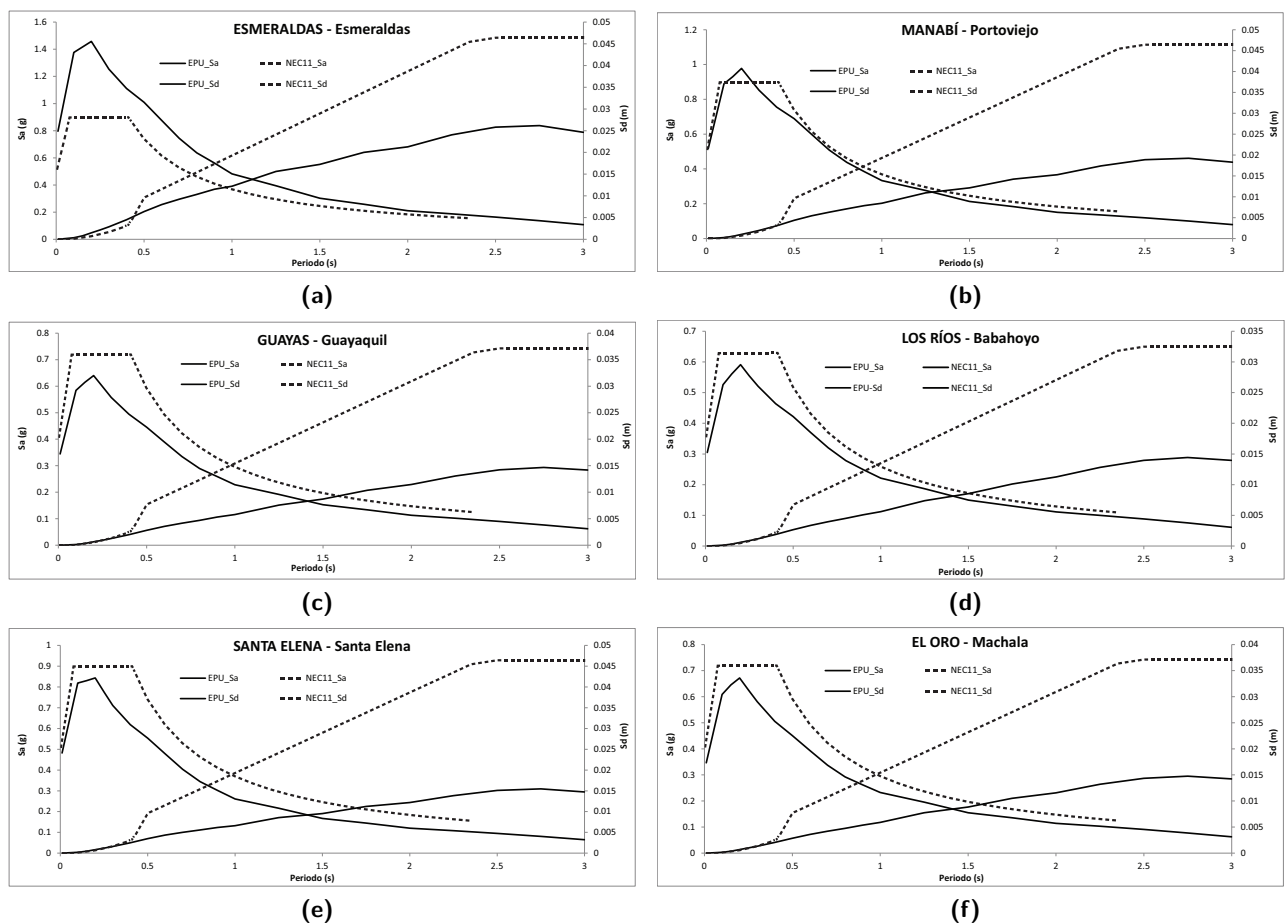


Figura 6.3.1: Espectros de peligro uniforme y espectros de diseño del NEC11. Región Costa del Ecuador

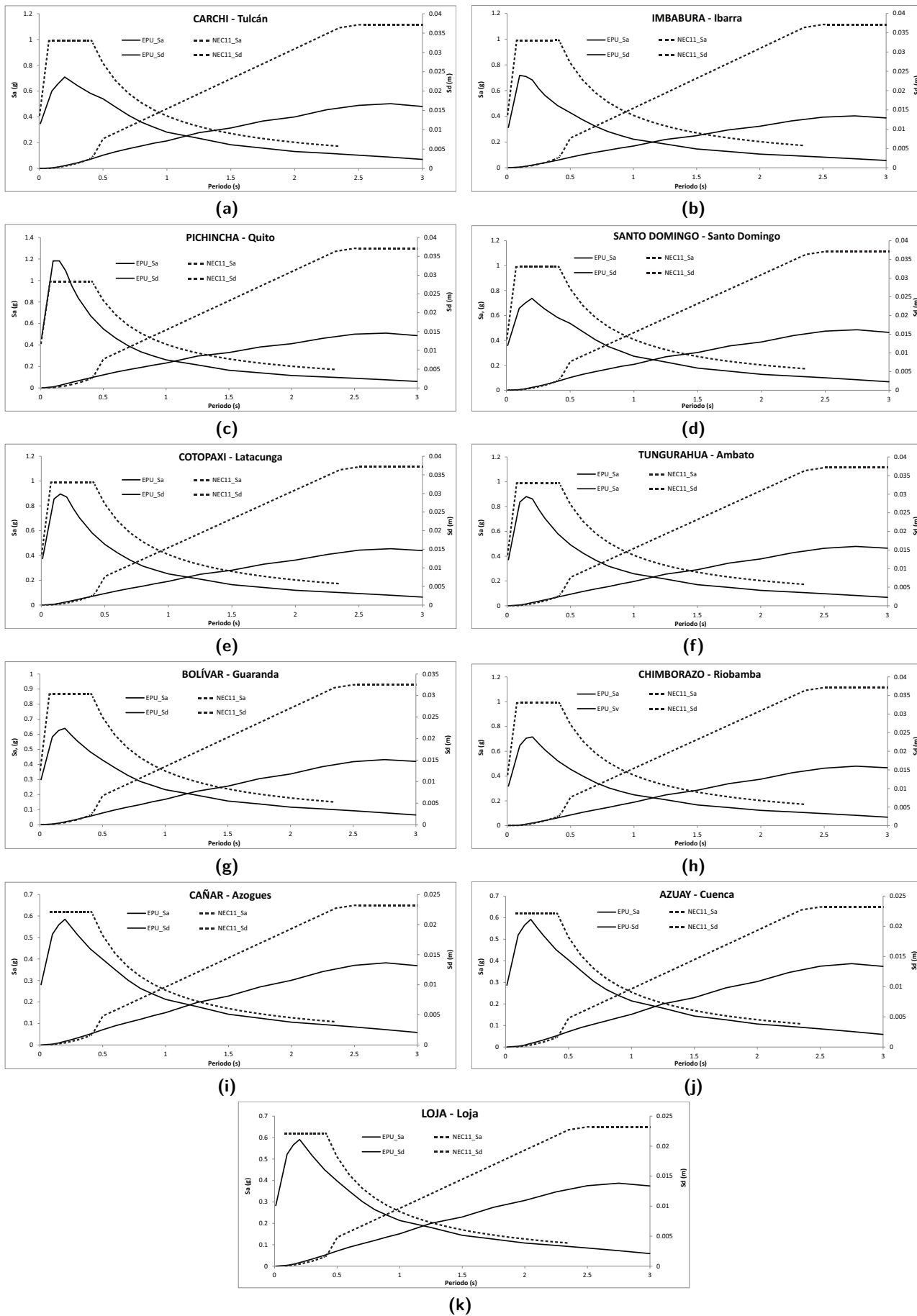


Figura 6.3.2: Espectros de peligro uniforme y espectros de diseño del NEC11. Región Sierra del Ecuador

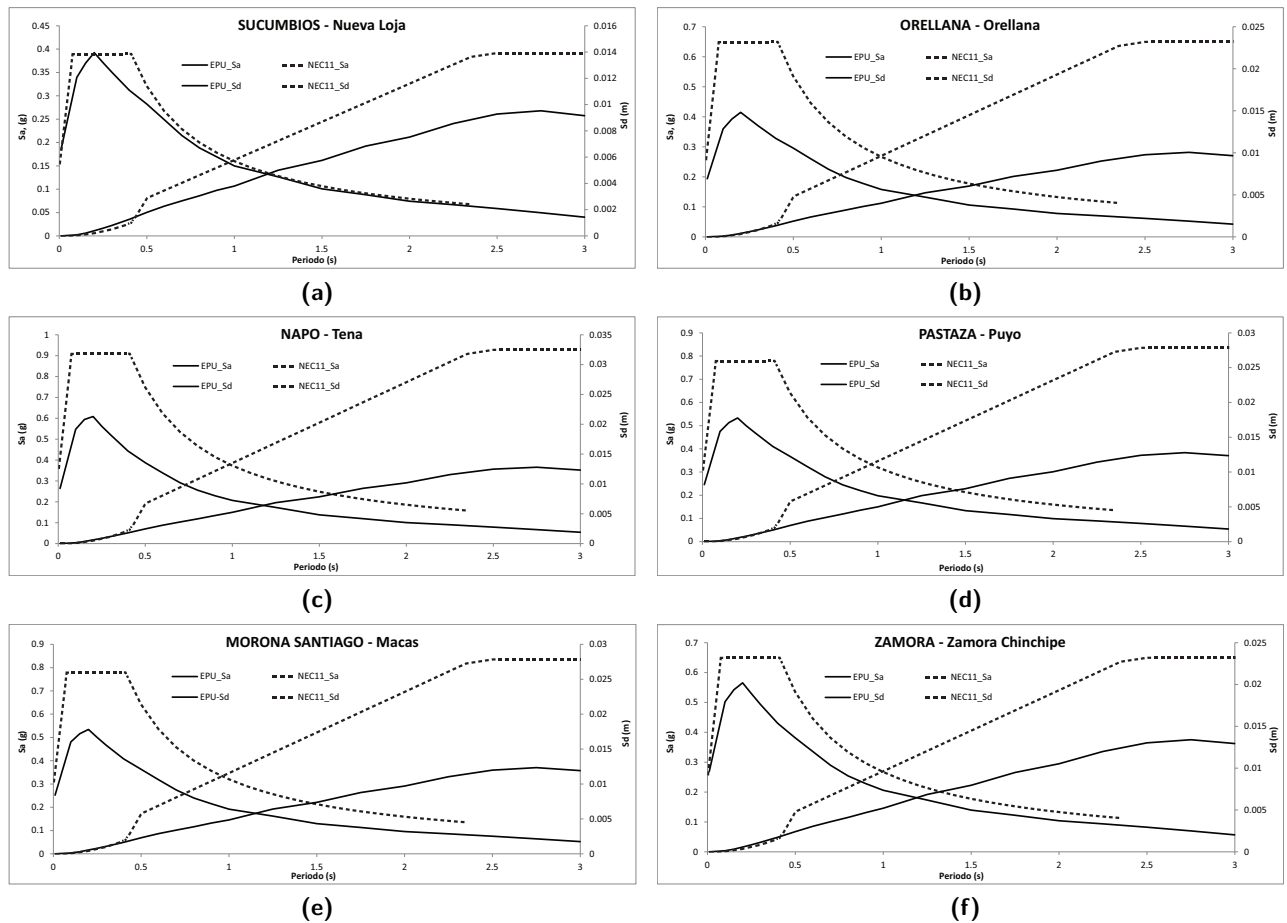


Figura 6.3.3: Espectros de peligro uniforme y espectros de diseño del NEC-11. Región Oriente del Ecuador.

Como se puede observar, en cuanto al espectro de pseudoaceleración, salvo las ciudades de Esmeraldas, Quito y Portoviejo, los espectros de diseño del NEC11 envuelven a su EPU respectivo. Por otra parte, los espectros de desplazamiento sí presentan serias diferencias con los resultados obtenidos en este estudio, lo cual puede traer complicaciones tanto técnicas como económicas. Se debe recalcar que estos resultados son únicamente para roca, hasta el momento no se han considerado los efectos de sitio.

6.4 ESPECTROS DE DISEÑO

Una práctica común en la mayoría de normativas de construcción, es la implementación de espectros de diseño, que provean las bases para el cálculo de las fuerzas y deformaciones de la estructura.

Al analizar los EPU, tal como se expusieron en el subcapítulo anterior, se puede identificar un conjunto amplio de curvas, las cuales no son usualmente integradas directamente en los códigos. Una alternativa utilizada es la de crear una curva envolvente y suavizada de estos espectros de peligro uniforme, que se denomina espectro de diseño sísmico, generalmente relacionado con la pseudoaceleración.

La forma estudiada en esta investigación, corresponde a cuatro zonas, las cuales se definen en la figura 6.4.1.

- *Zona 1*: Zona de periodos bajos, que tiene como límite el periodo T_0 . Parte del valor de A_0 que representa la aceleración máxima esperada del suelo, y crece con pendiente constante hasta Z , que corresponde a la aceleración espectral máxima.
- *Zona 2*: Zona de periodos intermedios, parte T_0 y termina en T_C . Valores de aceleraciones espectrales constantes e iguales a Z .
- *Zona 3*: Rama descendente controlada por la pseudovelocidad, comienza en T_C y termina en T_L . El valor de r define la forma de la caída del espectro, éste valor es unitario en basamento rocoso y sube en suelos blandos.
- *Zona 4*: Rama descendente controlada por el pseudodesplazamiento, comienza en T_L . Es inversamente proporcional al cuadrado del periodo.

El espectro debería quedar definido por tres periodos T_0 , T_C y T_L , así como por A_0 , Z y r . Las constantes C_1 y C_2 están ligadas al tipo del terreno y son de ayuda para aproximar las curvas a los resultados de los EPU.

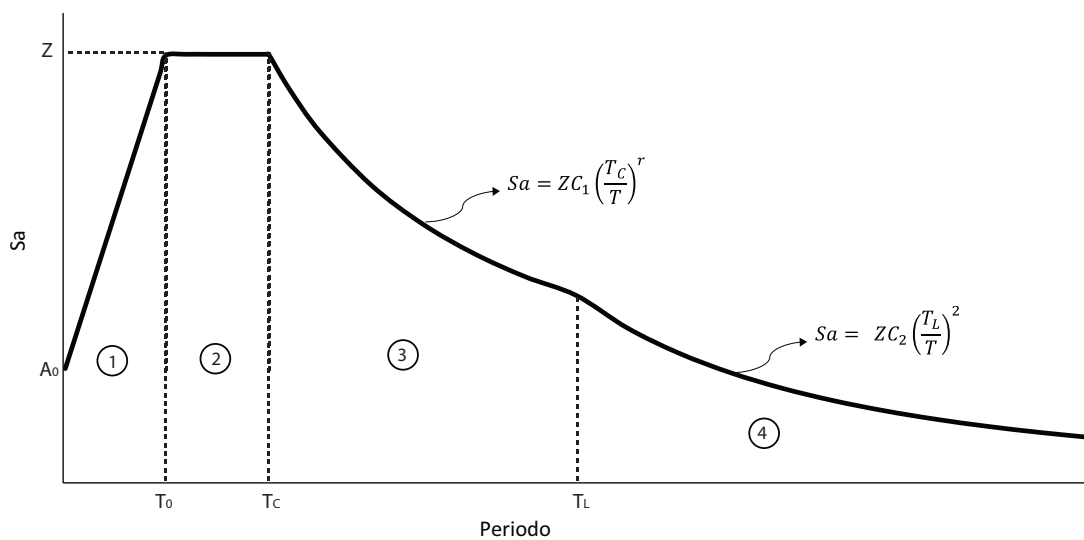


Figura 6.4.1: Espectro de diseño propuesto

La forma de las ramas descendentes está afectada por los efectos locales del terreno, siendo esta más pronunciada mientras más blando es el suelo.

Uno de los objetivos principales del estudio de espectro de diseño, es buscar un mayor detalle en la rama descendente, ya que los métodos de diseño y control de daños de las normativas actuales, están ligados a los desplazamientos y derivas de piso, y el utilizar espectros sobrevalorados en su rama descendente provocaría diseños antieconómicos.

Por otra parte, ciertos reglamentos, incluyendo la Normativa Ecuatoriana de Construcción 2011, no consideran los principios de la dinámica estructural ya que los desplazamientos máximos del terreno son considerados infinitos.

6.4.1 Período de retorno para el espectro de diseño

El estudio de los periodos de retorno se basó en la filosofía clásica de diseño estructural, en la cual se establecen diferentes niveles de desempeño, para los que se debe verificar el adecuado comportamiento estructural. Las etapas consideradas son tres, y se indican a continuación:

a) **Estado de servicio**

- Relacionado a *sismos frecuentes*.
- No debe existir daño en elementos estructurales y no estructurales (contenidos).

b) **Estado de daño**

- Relacionado a *sismos ocasionales*.
- Estructura en el límite del comportamiento elástico.
- No se permite daño elementos estructurales, pero si en los no estructurales.

c) **Estado de colapso**

- Relacionado a *sismos raros*.
- Estructura incursiona en rango inelástico.
- Se permite daño en elementos estructurales y no estructurales.

Los estados anteriores se encuentran relacionados a la probabilidad de excedencia de una intensidad durante la vida útil de la estructura. Una forma de obtener los periodos de retorno asociados a la probabilidad de excedencia, es a partir del proceso de Poisson, la cual en su forma más general nos dice lo siguiente:

$$P(N = n) = \frac{e^{-\lambda(M)t} \left[e^{-\lambda(M)t} \right]^n}{n!} \quad (6.3)$$

Donde, $P(N)$ es la probabilidad de ocurrencia de n eventos con magnitud $m \geq M$ en t años (tiempo de interés del estudio) y $\lambda(M)$ es la tasa de excedencia de sismos con magnitud $m \geq M$.

Para obtener la probabilidad de que exista al menos un evento en el mismo intervalo de tiempo t , se puede emplear la siguiente expresión:

$$P(1) = 1 - e^{-\nu(a)t} \quad (6.4)$$

Donde $e^{-\nu(a)t}$ corresponde a la probabilidad que no ocurra ningún evento.

Ahora, si reemplazamos a $\nu(a)$ por su igualdad $\frac{1}{T_R}$, y consideramos un tiempo fijo $t=n$ años, se llega a la siguiente expresión:

$$P(1) = 1 - e^{-\frac{n}{T_R}} \quad (6.5)$$

Aplicando la regla de logaritmos y despejamos T_R , se obtiene el periodo de retorno asociado a una probabilidad de excedencia p , para un tiempo fijo n (ver ec.(6.6)).

$$T_R = -\frac{n}{\ln(1-p)} \quad (6.6)$$

La estimación de un correcto periodo de retorno no tiene una metodología unificada. Depende de la realidad estructural de la zona, el peligro sísmico a la que está expuesta, así como de la experiencia que se tiene acerca de eventos de intensidades considerables.

Una de las preguntas fundamentales es la de definir ¿Qué periodo de retorno está asociado a cada nivel de desempeño? y ¿Cuál es el óptimo para la zona estudiada?. Estas preguntas no siempre se responden en las normativas sísmicas; como un ejemplo, si bien los parámetros propuestos por el programa VISION 2000 podrían ser los correctos para cierta región de los Estados Unidos, estos pueden que no abarquen la realidad a nivel mundial. Sin embargo, estos parámetros se utilizan en normativas de diferentes países, sin considerar, que en su caso, estos T_R no corresponden a estudios locales de probabilidades de excedencia de intensidades sísmicas ni de niveles de desempeño asociados a un determinado escenario sísmico.

Cada región está controlada por su movimiento tectónico, y realidad constructiva, lo que definiría el correcto periodo de retorno de diseño. La desafortunada experiencia de grandes eventos telúricos, ayudan a definir intensidades mínimas que se deberían cumplir dentro de las normativas de diseño.

El punto principal sería el encontrar un periodo de retorno óptimo para cada región de cada país. Se podría interpretar partiendo del hecho que mientras mayor es el peligro sísmico menor será el periodo de retorno del sismo de diseño, y de la misma manera, mientras menor sea la amenaza de una región, mayor será el periodo de retorno. Esto se asocia a niveles de desempeño y factores de carácter económico.

En la presente tesis, se han planteado definir espectros para diferentes periodos de retorno, más no encontrar un periodo específico para el Ecuador, ya que esto se encuentra fuera del alcance de esta tesis. Los periodos de retorno para los sismos relacionados a diferentes niveles de desempeño se indican en la tabla 6.4.1. Se ha escogido un valor de $n=50$ años, ya que se ha considerado este valor como el tiempo de vida útil de las estructuras.

Evento	n	p	T_R
1	50	64%	50
2	50	39%	100
3	50	22%	200
4	50	15%	300
5	50	12%	400
6	50	10%	500
7	50	6%	750
8	50	5%	1000
9	50	3%	1500
10	50	2%	2500

Tabla 6.4.1: Probabilidades de excedencia relacionados a diferentes periodos de retorno

Los espectros de diseño se estudiarán para cada uno de los periodos de retorno establecidos en la tabla 6.4.1, sin embargo, la metodología solo se expondrá para el espectro con un periodo de retorno de 100 años.

6.4.2 Espectro elástico para la ciudad de Cuenca

La forma planteada del espectro de diseño es similar a la presentada en la figura 6.4.1. Se partió de los resultados de peligro sísmico afectados por los efectos de sitio para la ciudad de Cuenca, mostrados en el capítulo 6.1. La forma paramétrica del espectro es la siguiente:

- Zona 1: $0 < T \leq T_0$

$$S_a = A_0 + (Z - A_0) \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (6.7)$$

- Zona 2: $T_0 < T \leq T_C$

$$S_a = Z \quad (6.8)$$

- Zona 3: $T_C < T \leq T_L$

$$S_a = C_1 Z \left(\frac{T_C}{T} \right)^r \quad (6.9)$$

- Zona 4: $T_C < T \leq T_L$

$$S_a = C_2 Z \left(\frac{T_L}{T} \right)^2 \quad (6.10)$$

Para encontrar las variables que definen dichas formas, se obtuvieron 670 espectros de peligro uniforme dentro de los límites de la ciudad, de los cuales se obtuvieron los valores de las siete constantes, ya que se consideró $T_L = 2.5s$. De la figura 6.4.2a a la 6.4.2e, se muestran los valores característicos de cada EPU. Se han adoptado las formas presentadas en las mismas figuras, y que corresponden a las ecuaciones (6.11) a (6.17).

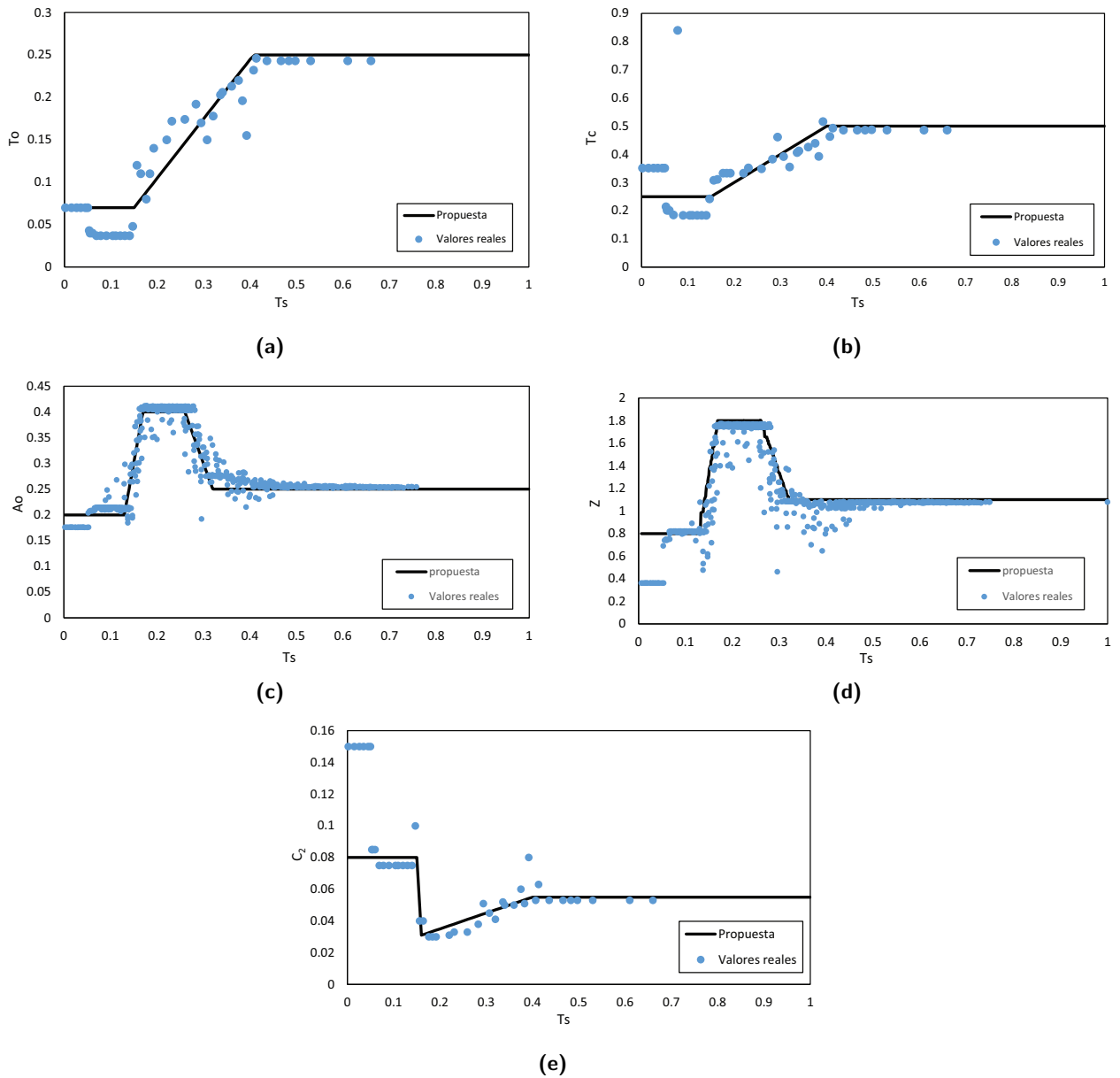


Figura 6.4.2: Valores promedio de los espectros estudiados. (a) Valores de T_0 . (b) Valores de T_c . (c) Valores de A_0 . (d) Valores de Z . (e) Valores de C_2 .

Se debe mencionar, que el hecho de considerar valores medios para las diferentes variables del espectro y tomar al espectro de diseño como la envolvente de varios EPU, involucra introducir cierta dispersión en los resultados, lo que ocasionaría que se pierda el control sobre la tasa de excedencia empujada. Sin embargo, se considera que dichas variaciones no son significativas y se seguirá asumiendo un periodo

de retorno constante para todo el espectro de diseño.

$$T_0 = \begin{cases} T_0 = 0.07 & \text{para } 0 < T_s \leq 0.15 \\ T_0 = 0.7T_s - 0.035 & \text{para } 0.15 < T_s < 0.4 \\ T_0 = 0.25 & \text{para } T_s > 0.4 \end{cases} \quad (6.11)$$

$$T_C = \begin{cases} T_C = 0.25 & \text{para } 0 < T_s \leq 0.15 \\ T_C = 0.65T_s - 0.2 & \text{para } 0.15 < T_s < 0.40 \\ T_C = 0.45 & \text{para } T_s > 0.40 \end{cases} \quad (6.12)$$

$$A_0 = \begin{cases} A_0 = 0.20 & \text{para } 0 < T_s \leq 0.13 \\ A_0 = 5.0T_s - 0.45 & \text{para } 0.13 < T_s < 0.17 \\ A_0 = 0.40 & \text{para } 0.17 < T_s \leq 0.26 \\ A_0 = -2.5T_s + 1.05 & \text{para } 0.26 < T_s < 0.32 \\ A_0 = 0.25 & \text{para } T_s > 0.32 \end{cases} \quad (6.13)$$

$$Z = \begin{cases} Z = 0.80 & \text{para } 0 < T_s \leq 0.13 \\ Z = 25T_s - 2.45 & \text{para } 0.13 < T_s < 0.17 \\ Z = 1.80 & \text{para } 0.17 < T_s \leq 0.26 \\ Z = -11.5T_s + 4.8 & \text{para } 0.26 < T_s < 0.32 \\ Z = 1.10 & \text{para } T_s > 0.32 \end{cases} \quad (6.14)$$

$$C_1 = \begin{cases} C_1 = 1.0 & \text{para } 0 < T_s \leq 0.15 \\ C_1 = 0.85 & \text{para } T_s > 0.15 \end{cases} \quad (6.15)$$

$$C_2 = \begin{cases} C_2 = 0.08 & \text{para } 0 < T_s \leq 0.15 \\ C_2 = 0.1T_s - 0.015 & \text{para } 0.15 < T_s \leq 0.40 \\ C_2 = 0.055 & \text{para } T_s > 0.40 \end{cases} \quad (6.16)$$

$$r = \begin{cases} r = 1.0 & \text{para } 0 < T_s \leq 0.15 \\ r = 1.6 & \text{para } T_s > 0.15 \end{cases} \quad (6.17)$$

Con las variables expuestas en las ecuaciones (6.11) a (6.17) y las ecuaciones (6.7) a (6.10), quedan definidos los espectros de diseño para la ciudad de Cuenca en función del periodo del suelo T_s y para un $TR=100$ años. Se debe indicar que estos espectros consideran un desplazamiento máximo del suelo, así como una pseudovelocidad máxima. En la figura 6.4.3 se muestran los espectros de pseudoaceleración, pseudovelocidad y desplazamiento para un periodo del suelo de $T_s = 0.1s$ y $0.4s$. En las mismas figuras se incluyen los EPU correspondientes, obtenidos a partir de las curvas de peligro sísmico, así como los espectros de diseño del NEC11.

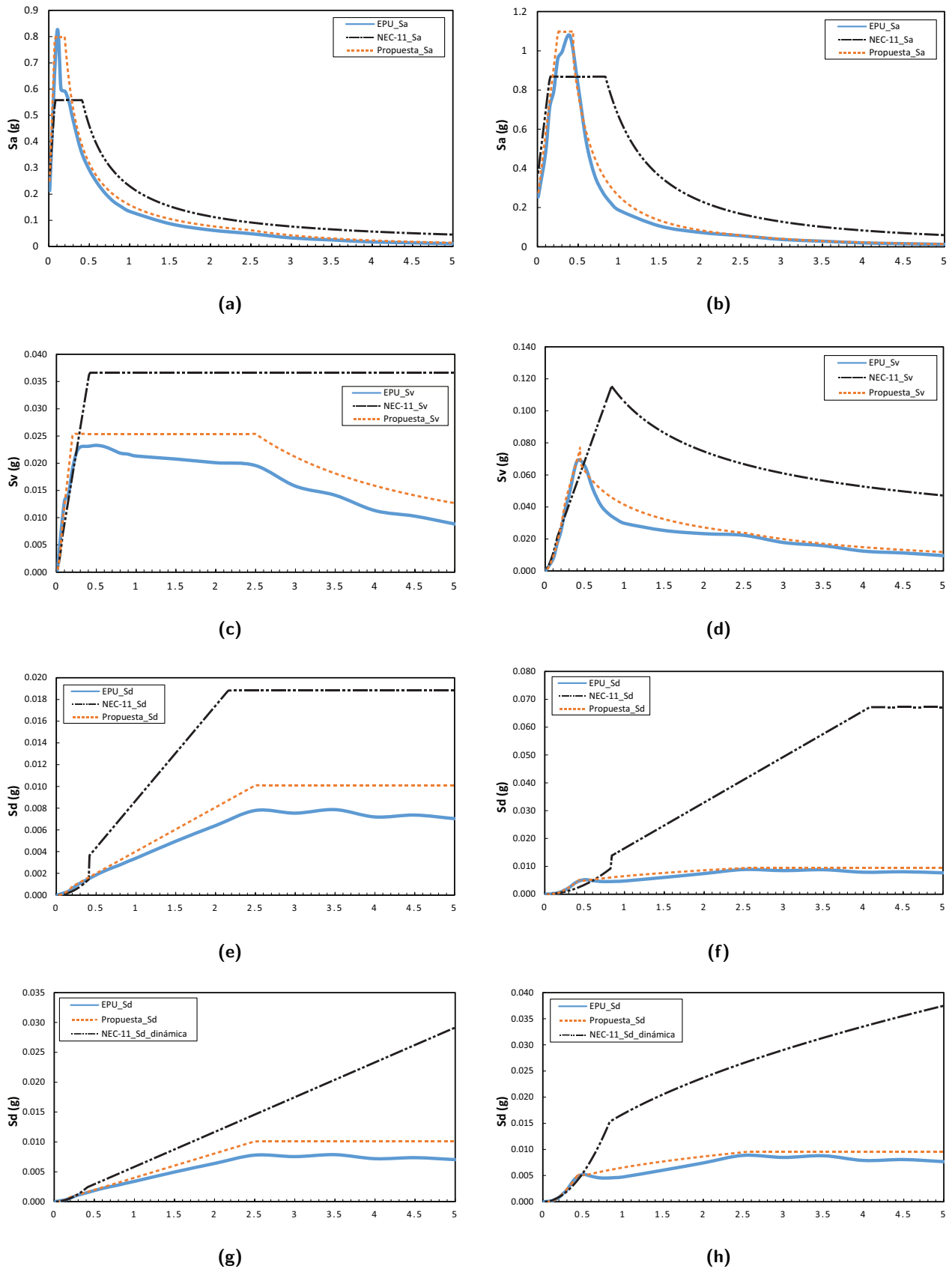


Figura 6.4.3: Comparación entre espectros de diseño propuestos, del NEC11 y EPU obtenidos en este trabajo. Columna izquierda $T_s = 0.1s$ y columna derecha $T_s = 0.4s$. (a) y (b) aceleración, (c) y (d) velocidad, (e), (f), (g) y (h) desplazamiento

Analizando los resultados obtenidos, se puede notar claramente, que a diferencia de los resultados obtenidos en roca, los espectros del NEC11 considerando efectos de sitio difieren considerablemente de los resultados obtenidos en este estudio. Los espectros de diseño del NEC11, en contraste con los propuestos en esta investigación, se alejan de las ordenadas de pseudoaceleración, y sobreestiman los resultados para periodos mayores a T_C . De una manera más notoria, las diferencias entre los desplazamientos generan una gran incertidumbre en las metodologías consideradas para proponer estos espectros por parte del NEC11, y dejan a la vista que los desplazamientos de diseño no son tan elevados como los que se consideran actualmente en la normativa. Esto puede acarrear posibles fallas frágiles en las estructuras, y una sobrevaloración en los presupuestos de construcción.

6.4.3 Espectro de diseño inelástico

Mantener diseños dentro del rango elástico es conservador, y se puede incrementar los costos económicos de manera considerable. Principalmente por esta razón, se permite que la estructura incurra en un comportamiento inelástico, conscientes de que esto se traduce en daño en los elementos estructurales.

Una manera de generar espectros de diseño inelásticos, es la de reducir los espectros elásticos mediante factores de reducción R .

$$A_i = \frac{A_e}{R} \quad (6.18)$$

6.4.4 Factores de reducción R

En la mayoría de las normativas de construcción, es posible construir espectros inelásticos a partir de espectros de diseño elásticos, similares a los indicados en el inciso anterior; para esto, se utilizan factores de reducción de respuesta.

El factor económico es fundamental en los criterios de diseño estructural, y es por esto, principalmente, que se permite a la estructura ingresar en rangos de comportamiento inelástico durante la ocurrencia de un evento sísmico. Es decir, se permite disipar la energía proveniente de las fuerzas inducidas por el sismo, a través del daño estructural.

Una manera de construir espectros de diseño inelásticos, es la disminución de las fuerzas espectrales de diseño a través de factores de reducción R . Se considera que existen reducciones debido a la ductilidad, sobrerresistencia y redundancia estructural, principalmente. Se puede definir a R mediante el producto de cuatro factores (Miranda y Bertero, 1991, Miranda 1991, Krawinkler y Rahnama, 1992).

$$R = R_\mu R_\Omega R_{VG} R_R \quad (6.19)$$

Donde, R corresponde al factor de reducción espectral, R_μ es el factor de reducción debido a la ductilidad, R_Ω corresponde a la reducción por sobrerresistencia, R_{VG} está relacionada con reducción para sistemas de múltiples grados de libertad, y R_R es un factor de reducción por redundancia estructural.

Al estudiar los factores de reducción, se debe considerar que son influenciados por los efectos de sitio y periodos predominantes del terreno, así como por la capacidad inelástica de la estructura (Miranda y Bertero, 1991, Miranda 1991, Ordaz y Pérez Rocha, 1998).

Factores de reducción por ductilidad R_μ

Para definir este factor, partimos de buscar la resistencia asociada con la ductilidad μ . Para definir esto, utilizamos un modelo de un grado de libertad con comportamiento elastoplástico.

La ductilidad se define como la relación entre el desplazamiento máximo desplazamiento alcanzado en el rango inelástico (x_{max}) y el desplazamiento de fluencia (x_f).

$$\mu = \frac{x_{max}}{x_f} \quad (6.20)$$

Este mismo concepto se puede ampliar para encontrar la resistencia necesaria para alcanzar una ductilidad. A R_μ se le puede representar como una fracción de resistencia correspondiente al comportamiento elástico (Ordaz y Pérez Rocha 1998, ref.[43]).

$$R_\mu(T) = \frac{F(T, 1)}{F(T, \mu)} \quad (6.21)$$

A partir varios registros acelerográficos en diferentes tipos de suelo, Ordaz y Pérez Rocha (1998), describen la siguiente forma de variación de R_μ :

$$R_\mu(T) = 1 + \left(\frac{D(T)}{D_{max}} \right)^{\beta(\mu)} (\mu - 1) \quad (6.22)$$

$$\beta(\mu) = 0.388(\mu - 1)^{0.173} \quad (6.23)$$

Los autores, mantienen la relación de R_μ , con los efectos locales y periodo predominante del suelo, pero lo hacen de una manera indirecta, al relacionar la forma de R_μ con la del desplazamiento espectral. Este estudio presenta esta misma expresión que funciona para diferentes tipos de suelo y un rango de amortiguamiento estructural entre 2% y 10%.

Las ecuaciones (6.22) y (6.23) se utilizaron en este trabajo para definir el factor de reducción por ductilidad.

El factor de reducción de ductilidad varía de acuerdo a la forma de los desplazamientos espectrales, así tenemos lo siguiente.

- **Zona 1:** $0 < T \leq T_0$

$$R_\mu(T) = 1 + \alpha_1^{\beta(\mu)} (\mu - 1) \quad (6.24)$$

$$\alpha_1 = \left[A_0 + (Z - A_0) \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2$$

Para D_{max} , dado que no se ha tenido acceso a registros acelerográficos, se planteó el concepto de iguales desplazamientos en periodos largos, es decir, $D_{max} = S_d$ para $T > 5s$. Analizando los espectros de pseudodesplazamiento, se tiene:

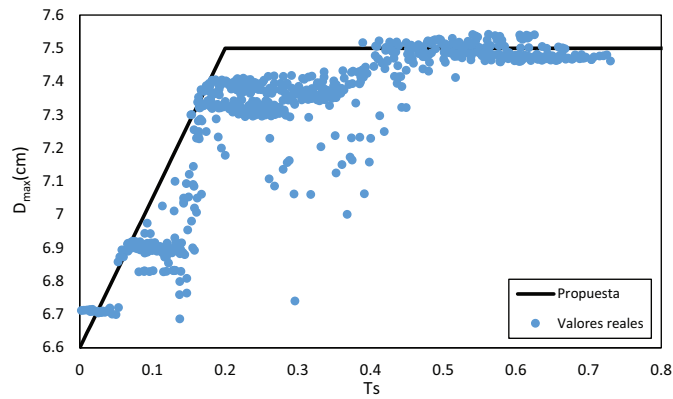


Figura 6.4.4: Valor de desplazamiento máximo del suelo en función de T_s

$$D_{max} = \begin{cases} D_{max} = 4.5T_s + 6.6 & \text{para } 0 < T_s \leq 0.20 \\ D_{max} = 7.5 & \text{para } T_s > 0.20 \end{cases} \quad (6.25)$$

El valor de β se obtiene de la ec. (6.23).

- **Zona 2:** $T_0 < T \leq T_C$

$$R_\mu(T) = 1 + \alpha_2^{\beta(\mu)}(\mu - 1) \quad (6.26)$$

$$\alpha_2 = \frac{Z}{D_{max}} \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2$$

- **Zona 3:** $T_C < T \leq T_L$

$$R_\mu(T) = 1 + \alpha_3^{\beta(\mu)}(\mu - 1) \quad (6.27)$$

$$\alpha_3 = \frac{ZC_1}{D_{max}} \left(\frac{T_C}{T} \right)^r \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2$$

- **Zona 4:** $T > T_L$

$$R_\mu(T) = 1 + \alpha_4^{\beta(\mu)}(\mu - 1) \quad (6.28)$$

$$\alpha_4 = \frac{ZC_2T_L^2}{4D_{max}\pi^2}$$

Factores de reducción por ductilidad R_Ω

La sobrerresistencia está presente en el diseño estructural, aumentando la capacidad supuesta de la estructura. Entre los principales factores que incrementan la resistencia de una estructura, con relación a la planteada en el diseño están:

- Resistencia real de los materiales superior a la establecida en el diseño. Y en el caso del concreto, un incremento de la resistencia (f'_c) con el tiempo.

- Factores de seguridad presentes en casi todas las metodologías de diseño sismoresistente.
- Hipótesis de diseño. Las estructuras no son perfectamente elastoplásticas, y solo ciertas secciones fluyen al alcanzar las demandas máximas de diseño, por lo que la resistencia real es superior.
- Elementos no estructurales, en ciertos casos, incrementan la resistencia.

Además de producir diseños sobrevalorados y antieconómicos, este incremento en la resistencia, puede llegar a ser desfavorable, ya que implicaría posibles fallas frágiles de la estructura, ya que las fuerzas cortantes pueden llegar a ser mayores a los estipulados en el diseño. Se puede definir a la sobrerresistencia como la relación entre el cortante basal último que soporta la estructura (V_U) y el cortante basal de diseño (V_D).

$$R_{\Omega} = \frac{V_U}{V_D} \quad (6.29)$$

Los valores de R_{Ω} pueden ser estudiados a partir de análisis dinámicos o estáticos no lineales, de manera que se pueda llevar a la estructura a su máxima capacidad.

Ya que es necesario que estos datos sean obtenidos de acuerdo a la realidad constructiva de la zona de estudio, se ha incorporado a este trabajo los resultados obtenidos por Aguiar y Guaiña (2008, ref.[2]), en un estudio de 432 edificios ubicados en distintas ciudades del Ecuador. En el estudio, los valores de sobrerresistencia dependen del periodo estructural y de la deriva máxima de piso en un rango de validez de periodo de $0.35 < T < 1.05$. Para periodos menores a $T=0.35$ s se asumió el mismo valor de $R_{\Omega}(T = 0.35)$ y para valores $T > 1$ se mantuvo el valor de $R_{\Omega}(T = 1.05)$.

γ	Ecuación	Error
0.5%	$R_{\Omega} = 1.69 + \frac{0.82}{T^{1.5}} - \frac{0.5}{T^2}$	10.0%
1%	$R_{\Omega} = 1.43 + 0.0229T^2 + 0.029 \log\left(\frac{T}{T^2}\right)$	10.4%
1.5%	$R_{\Omega} = -2.83T^3 + 6.27T^2 - 4.27T + 2.07$	8.0%
2%	$R_{\Omega} = -2.34T^3 + 4.93T^2 - 3.14T + 1.70$	8.0%

Tabla 6.4.2: Ecuaciones de sobrerresistencia Aguiar y Guaiña (2008)

Estos valores han sido utilizados en la propuesta del factor de sobrerresistencia. Se ha hecho especial énfasis en las curvas correspondiente a 1% y 2% de distorsión (ver figuras ?? y ??), que son los valores límites estipulados en la NEC11.

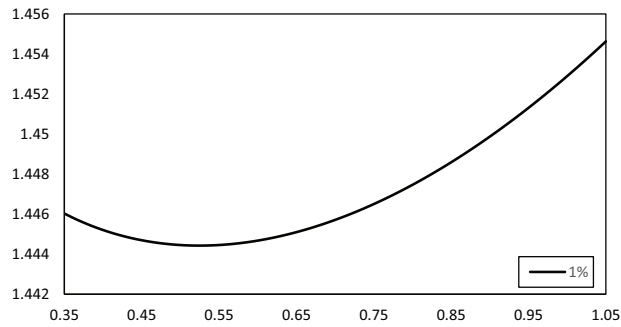


Figura 6.4.5: Valores de R_{Ω} para una distorsión del 1%

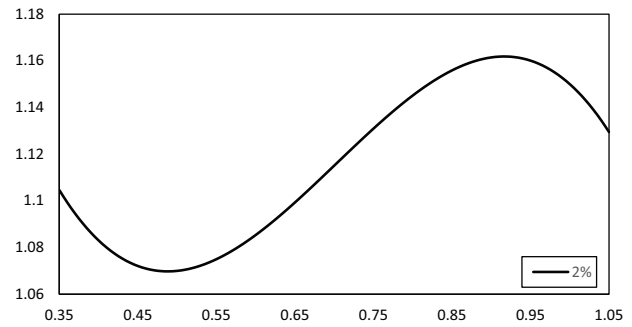


Figura 6.4.6: Valores de R_{Ω} para una distorsión del 2%

Factores de reducción por redundancia R_R

Este factor de reducción puede quedar definido como la relación existente entre el cortante basal máximo (V_U) y el cortante basal cuando se forma la primera articulación plástica (V_1), tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$R_R = \frac{V_U}{V_1} \quad (6.30)$$

Esta sobrerresistencia se debe a la capacidad de la estructura en distribuir los esfuerzos hacia elementos con menores solicitaciones, una vez que se hayan alcanzado posibles articulaciones plásticas. Debido a esto, mientras mayor número de posibles articulaciones plásticas, mayor sobrerresistencia por redundancia.

Se incorporó un estudio local realizado por Aguiar et al. (2007, ref.[3]), que es un complemento del estudio para sobrerresistencia mencionado en el inciso anterior. En este trabajo, se realizaron pruebas de tipo pushover encontrando una curva de capacidad sísmica, asumiendo el valor de V_1 como el cortante de fluencia (V_Y). Con esta variación se encontró la siguiente expresión para R_R . Para periodos menores a $T=0.35$ s se asumió el mismo valor de $R_R(T = 0.35)$ y para valores $T > 1$ se mantuvo el valor de $R_R(T = 1.05)$.

$$R_R = -2.99T^3 + 6.54T^2 - 3.26T + 1.30 \quad (6.31)$$

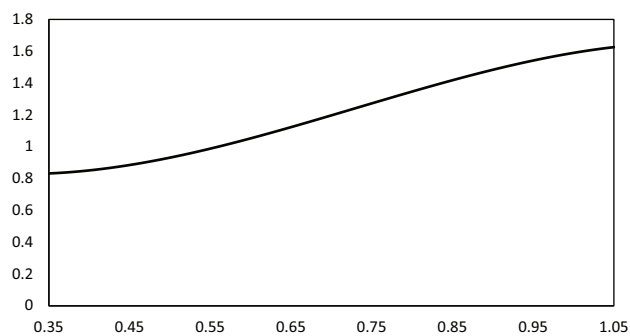


Figura 6.4.7: Valores de R_R

Para periodos menores a 0.55s, el factor de redundancia es menor a uno, posiblemente debido al número de ejes de columnas, ya que a menor número de pórticos (marcos), menores posibilidades de redundancia. Esto puede compararse con el ATC-19 (1995), el mismo que propone factores de redundancia inferiores a la unidad, para un número de ejes de columna menores a cuatro.

Adicionalmente a estas reducciones, en un espectro de diseño se deben considerar factores de importancia de estructuras, y otros relacionados con las características de las estructuras, sin embargo, estos estudios están fuera del alcance de esta tesis.

6.5 FACTORES DE CONVERSIÓN ESPECTRAL

Estudios similares a los expuestos en el subcapítulo 4.4, se realizaron para encontrar los espectros para los periodos de retorno de la tabla 6.5.1.

Se analizó una manera de encontrar estos espectros de diseño a partir del correspondiente a $T_R = 100$ años, obteniendo parámetros que modifican el espectro a diferentes periodos de retorno.

$$S_{aT_R}(T) = \eta S_{a100}(T) \quad (6.32)$$

Los valores de η para los diferentes periodos de retorno estudiados se muestran en la tabla 6.5.1.

Evento	T_R	η_{\min}	η_{\max}	η	Error $ _{\max}$
1	50	0.70	0.75	0.73	4.23%
2	100	1.00	1.00	1.00	0.00%
3	200	1.25	1.32	1.29	3.17%
4	300	1.42	1.54	1.48	4.22%
5	400	1.54	1.71	1.62	5.59%
6	500	1.62	1.82	1.72	5.80%
7	750	1.83	2.12	1.96	8.37%
8	1000	1.98	2.34	2.15	8.72%
9	1500	2.19	2.66	2.40	10.86%
10	2500	2.42	3.11	2.75	13.05%

Tabla 6.5.1: Valores de conversión para diferentes T_R , tomando como base 100años

Con los resultados de la figura 6.5.1 se pueden obtener los espectros de diseño para los diferentes periodos de retorno planteados. Los periodos considerados para el cálculo de η , van de PGA a 3s. En las figuras se puede observar los valores máximos y mínimos de η , junto con el error máximo que existe para cada T_R .

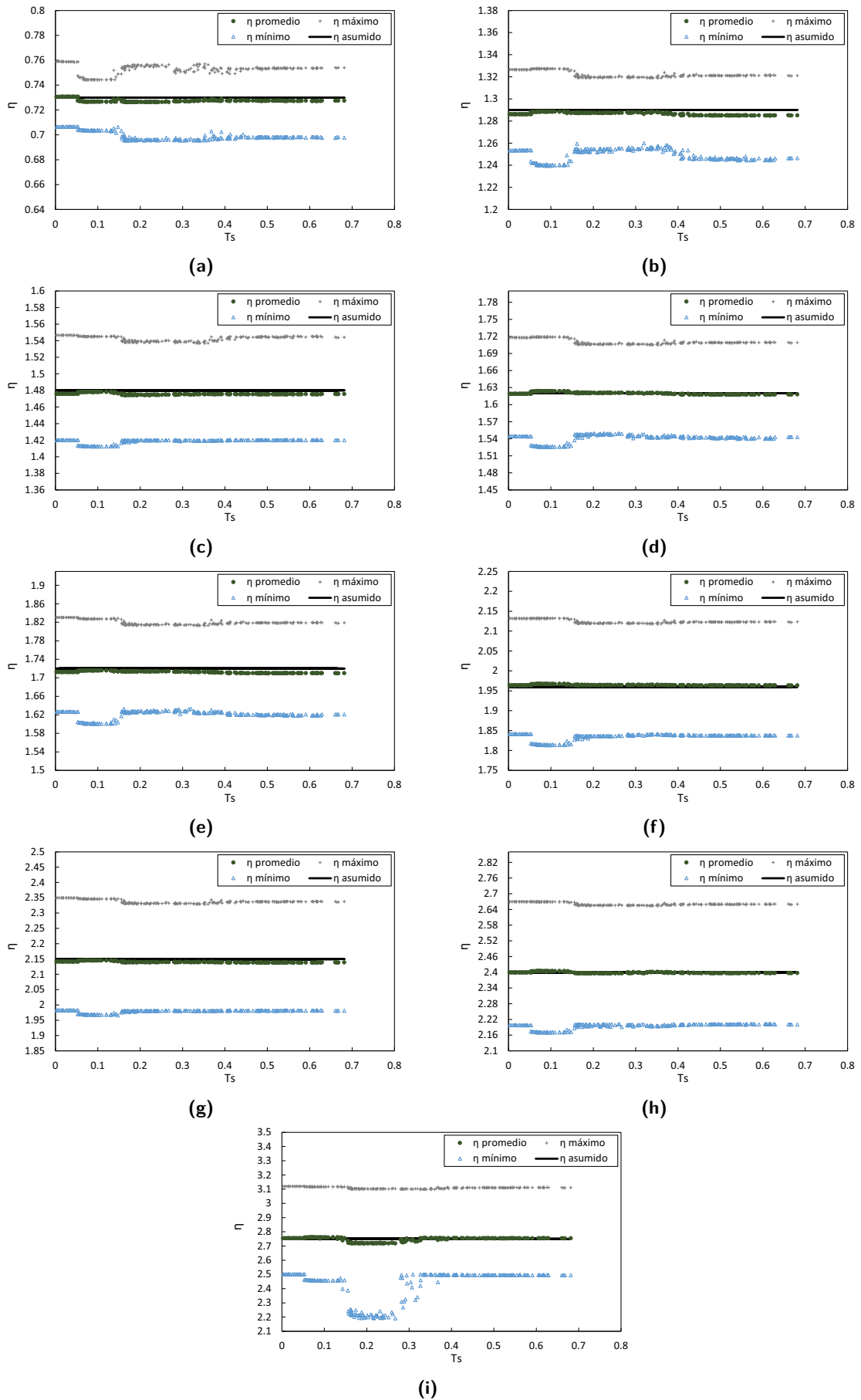


Figura 6.5.1: Factor de conversión espectral (a) $T_R=50$ años (b) $T_R=200$ años (c) $T_R=300$ años (d) $T_R=400$ años (e) $T_R=500$ años (f) $T_R=750$ años (g) $T_R=1000$ años (h) $T_R=1500$ años (i) $T_R=2500$ años

ESTUDIO DE LA NORMATIVA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (NEC11)

En este capítulo se estudia la Normativa Ecuatoriana de la Construcción del 2011 (NEC11, ref.[38]), siendo ésta la versión más actual del reglamento ecuatoriano. El capítulo en el que se centra el estudio corresponde al capítulo 2, denominado “Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sismo Resistente”. Los capítulos de la NEC11 se los puede obtener de manera digital de <http://www.normaconstruccion.ec>.

Se exponen aspectos, que se considera se podrían mejorar, y se compara con los resultados obtenidos en los capítulos anteriores de este trabajo, y en códigos existentes y vigentes, tal como la normativa mexicana NTCDF-2004.

7.1 ESTUDIO DEL CAPÍTULO 2 DEL NEC11: “PELIGRO SÍSMICO Y REQUISITOS DE DISEÑO SISMO RESISTENTE”

El capítulo 2 del NEC-11, presenta conceptos acerca del peligro sísmico del Ecuador, el espectro elástico de diseño, y las condiciones mínimas de separaciones y derivas de piso de diseño.

Uno de los problemas generales que se han identificado, es la falta de relación que debería existir entre algunos de los subcapítulos, ya que a partir de un solo estudio se pueden derivar varios resultados que se presentan. Por ejemplo, a partir del estudio de amenaza sísmica, se pueden adicionar las curvas de peligro, por lo que los resultados entre el mapa y curva de peligro deberían coincidir.

La falta de relación entre los subcapítulos queda reflejada en la omisión de una simbología al inicio del capítulo.

A continuación se presenta un análisis particular de cada problema encontrado en este capítulo.

7.1.1 Subcapítulo 2.5.2.2 “FUNDAMENTACIÓN DEL MAPA DE ZONIFICACIÓN”

No es posible tener acceso al estudio de peligro sísmico realizado, para poder analizar el mapa inalterado de peligro.

En el inciso 2.5.2.2, se reconoce el hecho de que existe un estudio de peligro sísmico, sin embargo, no se conoce fuentes sísmicas, catálogo, estudios del catálogo realizado, leyes de atenuación específicas utilizadas en cada fuente, modelo ni parámetros de sismicidad. Lo breve de la explicación del estudio no es suficiente como para realizar conjeturas acerca del estudio de peligro sísmico.

Dentro del código, el inciso 2.5.2.5, se reconoce el hecho de que el mapa ha sido alterado, por lo que no corresponde a un período de retorno de 475 años, pudiendo referirse a un mapa óptimo de peligro, sin embargo, es necesario conocer los valores reales de peligro, por lo que un estudio de peligro que sea de dominio público es necesario.

El estudio de peligro sísmico de una determinada región, es muy sensible a la metodología utilizada, así como al tratamiento que se le proporciona a la base de datos empleada, como por ejemplo el catálogo sísmico. Los resultados del estudio son fundamentales para el diseño sismoresistente. Sin un acceso al estudio de peligro sísmico, se dificulta realizar estudios específicos para estructuras esenciales o especiales.

Se recomienda que el estudio debería seguir una metodología probabilística de amenaza sísmica, tal como se indica en el capítulo 6.1 del presente trabajo.

7.1.2 Subcapítulo 2.5.3 “CURVAS DE PELIGRO SÍSMICO”

El código, en el inciso 2.5.3 nombra lo siguiente: “Para el diseño de estructuras de ocupación especial, esenciales, puentes, obras portuarias y otras estructuras diferentes a las de edificación, es necesario utilizar diferentes niveles de peligro sísmico con el fin de verificar el cumplimiento de diferentes niveles de desempeño, de acuerdo con lo estipulado en la sección 2.9”. Las curvas no concuerdan con los valores de PGA del mapa de amenaza que se muestra en la Figura 7.1. Además, se menciona en el NEC11 que las estructuras especiales se deben diseñar con las curvas de peligro, pudiendo esto ser desfavorable, ya que en ciertos casos los valores de PGA de las curvas son menores a los del mapa de amenaza. Se pone como ejemplo la ciudad de Ibarra, presentado en la figura 7.1.1 (Referencias a Figura 2.2.2 y Figura 2.1 del NEC-11).

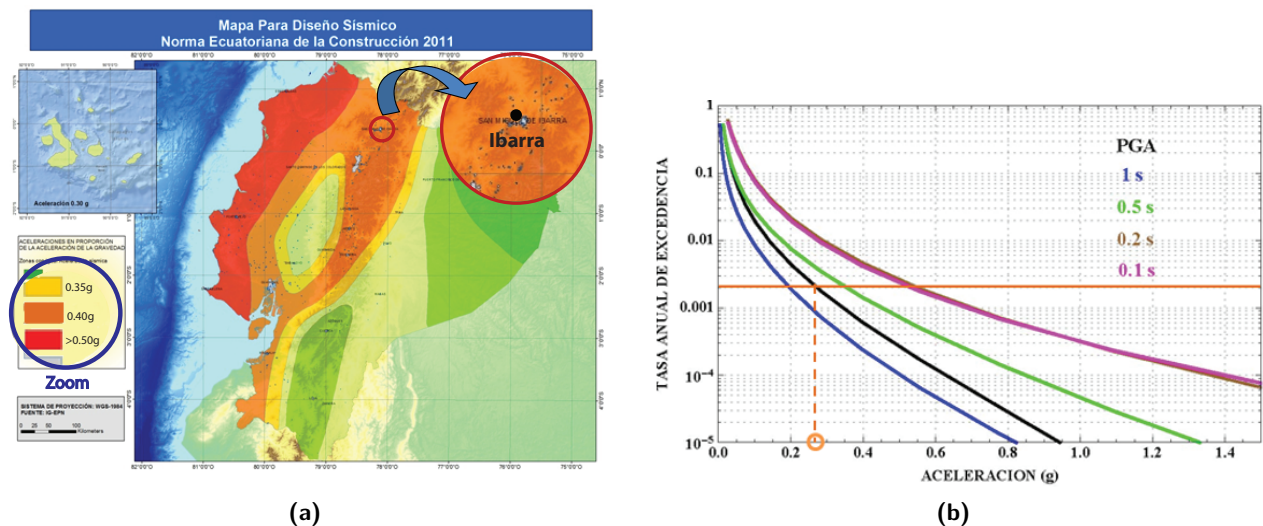


Figura 7.1.1: (a) Mapa de peligro sísmico del Ecuador, zoom en Ibarra, (b) Curva de peligro sísmico para Ibarra. (Figuras originales tomadas del NEC11)

En las curvas de peligro sísmico para Ibarra se puede observar que el valor de PGA para 475 años es de aproximadamente 0.28g, mientras que el mapa estipula un valor mínimo de 0.4g para el mismo lugar. No pueden existir dos valores de PGA para un mismo punto y periodo de retorno en un estudio de peligro. Un problema similar sucede en otros lugares del país.

Para estructuras esenciales se estaría diseñando para valores de pseudoaceleraciones menores que para estructuras normales, lo que sería una gran contradicción. Así mismo, se estaría exponiendo dos valores de Z para un mismo sitio, lo que sería un problema al momento de realizar las revisiones, y a su vez presenta una dificultad al diseñador, ya que no se sabe con certeza cuál es el valor a considerar para el diseño.

7.1.3 Subcapítulo 2.5.5 “ESPECTROS ELÁSTICOS DE DISEÑO”

No se establece una forma espectral debidamente justificada, y que corresponda a la región específica.

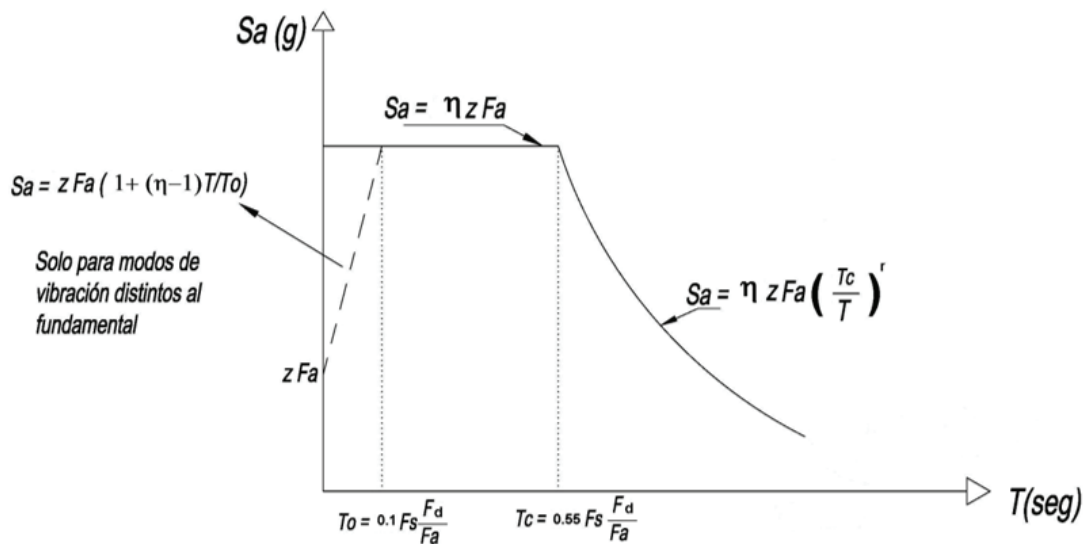


Figura 7.1.2: Espectro elástico de diseño del NEC11 (figura tomada del NEC11)

Es muy raro encontrar un caso en donde la rama ascendente sea despreciable. Por lo que no considerar esta rama dentro de los espectros, a criterio del autor de esta tesis, sería un grave error.

Al no considerar la rama ascendente, se estaría diseñando para valores de aceleraciones alejados de los reales, lo que se traduciría en un inadecuado diseño sísmico, afectando directamente la seguridad estructural, y todas las implicaciones que esto conlleva.

Lo que se recomienda es estudiar la forma del espectro de diseño, basándose en registros acelerográficos, simulaciones, vibración ambiental, etc., de manera que sea posible encontrar una forma espectral más adecuada, o en su defecto, garantizar que la existente es la más eficiente.

De manera general, una metodología podría ser la de realizar estudios sísmicos, similares a los de esta tesis, para encontrar una familia de espectros de peligro uniforme en cada punto de interés, los mismos que deberían incluir las posibles aceleraciones máximas y los efectos de sitios de cada zona.

Otra forma sería la de emplear registros sísmicos de la región, reales o sintéticos, y obtener los espectros de aceleraciones correspondientes a cada registro. Esto se debería realizar un número suficiente de veces de manera que se tenga una base de datos representativa para construir un espectro de diseño. Sin embargo, el uso de los registros depende de los temblores que se produzcan

Se debe tomar especial cuidado en la elección del método para suavizar y obtener el espectro de diseño, ya que en este se deberían incluir las características del terreno, y a su vez, estar relacionado con el espectro de desplazamientos.

7.1.4 Subcapítulo 2.5.5.1

Siguiendo con el estudio del espectro de diseño, no se muestra claramente que significa el valor de r , ni el por qué asume esos valores para los tipos de suelo. Las siguientes ecuaciones fueron tomadas del NEC11.

$$S_a = \eta Z F_a ; \text{ para } 0 \leq T \leq T_C \quad (7.1)$$

$$S_a = \eta Z F_a \left(\frac{T_C}{T} \right)^r ; \text{ para } T > T_C \quad (7.2)$$

$$S_a = Z F_a \left[1 + (\eta - 1) \frac{T}{T_0} \right] ; \text{ para } T \leq T_0 \quad (7.3)$$

donde $r=1$, para tipo de suelo A, B o C y $r = 1.5$, para tipo de suelo D o E.

Tampoco se nombra un valor de r para suelos tipo F. El espectro de diseño elástico, queda regido por este parámetro, por lo que se debería explicar su obtención y su posible manejo.

Por otra parte, el valor de η está definido solo para 3 constantes, $\eta= 1.8$ (Provincias de la Costa, excepto Esmeraldas), 2.48 (Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos), 2.6 (Provincias del Oriente), y siendo este un coeficiente de amplificación espectral, se debería proponer un rango de valores para poder calcular un espectro para diferentes periodos de retorno.

Al dar solo estos 3 valores, se condiciona a 475 años, y en muchos de los casos, ni siquiera corresponde a este valor ya que ciertas zonas del mapa de peligro han sido alteradas. No es posible amplificar el espectro de diseño para diferentes periodos de retorno.

Lo que se recomienda es realizar un estudio de este valor η , o brindar una mayor cantidad de datos para poder calcular diferentes espectros a diferentes periodos. El estudio de peligro sísmico debería incluir resultados para diferentes periodos de retorno, de manera que sea posible obtener un valor de η para puntos y periodos de retorno específicos. Estos valores de η deberían ser variables que se encuentren relacionados a los periodos de retorno y a las pseudoaceleraciones.

7.1.5 7.1.5. Subcapítulo 2.5.5.2 “ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN DESPLAZAMIENTOS”

La normativa ecuatoriana, propone una serie de expresiones para calcular el espectro de desplazamientos, las cuales se muestran a continuación:

$$S_d = 0.38ZF_aT^2 \left(0.4 + 0.6\frac{T}{T_0}\right) ; \text{para } 0 \leq T \leq T_0 \quad (7.4)$$

$$S_d = 0.38ZF_aT^2 ; \text{para } T_0 \leq T \leq T_C \quad (7.5)$$

$$S_d = 0.38ZF_dT ; \text{para } T_C \leq T \leq T_L \quad (7.6)$$

$$S_d = 0.38ZF_dT_L ; \text{para } T_0 \leq T \leq T_C \quad (7.7)$$

Si bien estas ecuaciones presentan un valor de desplazamiento del suelo máximo, no se relacionan con las expresiones indicadas para los espectros de aceleraciones. Al incorporar estas nuevas ecuaciones para los desplazamientos, el NEC11 viola las leyes básicas de la dinámica estructural, una de las cuales expresa lo siguiente:

$$S_d = S_a \frac{T^2}{4\pi^2} \quad (7.8)$$

Donde, S_a corresponde a la pseudoaceleración, S_d al desplazamiento y T se refiere al periodo estructural.

Un aspecto importante a considerar es que en el espectro de desplazamientos se debería llegar como valor máximo al desplazamiento del suelo, cosa que no sucede al transformar el espectro de pseudoaceleraciones utilizando la ec.(7.8). Los espectros de desplazamientos indicados en el código, no utilizan ni el parámetro del suelo r ni los de amplificación espectral.

A criterio del autor de esta tesis, no se cree conveniente que no se cumplan las ecuaciones básicas de la dinámica estructural, se podría sobredimensionar los elementos si se empelara un diseño basado en desplazamientos.

7.1.6 Subcapítulo 2.6.2 “CONTROL DE LA DERIVA DE PISO”

Los desplazamientos laterales, además del tipo de estructura, deberían tener relación con los elementos no estructurales que podrían sufrir daño. Los valores estipulados en la norma podrían ser elevados, pudiendo ocasionar daños en la estructura como en sus elementos no estructurales.

Tipo de estructura	Δ_{\max}
Hormigón armado, estructuras de acero y de madera	0.02
De mampostería	0.01

Tabla 7.1.1: Valores de ΔM máximos, expresados como fracción de la altura de piso (correspondiente a la tabla 2.8 del NEC-11)

Por ejemplo, comparándolo con el código mexicano, los valores son mayores, ya que en este se estipula lo siguiente: *Los desplazamientos laterales no excederán 0.006 veces la diferencia de elevaciones correspondientes, salvo que no haya elementos incapaces de soportar deformaciones apreciables, como muros de mampostería, o éstos estén separados de la estructura principal de manera que no sufran daños por sus deformaciones. En tal caso, el límite en cuestión será de 0.012.*

Subcapítulo 2.6.3.1 SEPARACIÓN ENTRE ESTRUCTURAS ADYACENTES

Este estudio está relacionado con el correspondiente a las derivas de piso, ya que se pueden estudiar los máximos desplazamientos laterales, y proponer límites de separaciones.

Lo que se debería mencionar dentro de la normativa, son los criterios de diseño con los que se deberían realizar estos cálculos para aceptar las separaciones estipuladas en el capítulo, o hacer referencia a otros subcapítulos en donde se indique el cálculo a seguir.

Subcapítulo 2.6.3.1 DENTRO DE LA MISMA ESTRUCTURA

No se especifica una separación mínima dentro del código, aparte de las separaciones dadas para los diferentes casos. Por ejemplo, el código mexicano estipula que no puede existir una separación menor a 5 cm, aparte de los diferentes casos existentes. Se recomienda colocar separaciones mínimas dentro del código, la cuáles deberían salvaguardar a las estructuras.

- *Cuando los niveles no coinciden:* En este caso, lo más desfavorable sería la suma de los desplazamientos horizontales máximos de cada nivel, pudiendo ser un poco inferiores dependiendo del tipo del suelo en que se encuentren, pero no al nivel que exige la norma actual.
- *Cuando los niveles coinciden:* La separación podría considerarse como la mitad de la suma de los desplazamientos laterales de cada edificio, y solo como la mitad del desplazamiento mayor de los dos edificios. Se considera que la separación de la NEC-11 es muy inferior al desplazamiento que podría existir, lo que podría ocasionar una colisión. Otro aspecto importante dentro de este punto, es que se debe especificar que, aparte de coincidir los niveles de losas, los edificios deben tener la misma estructuración, siendo esta una condición fundamental para tomar una separación menor en los edificios.

Subcapítulo 2.6.3.2 ENTRE DIFERENTES ESTRUCTURAS

Al igual que el punto anterior, no se especifica una separación mínima dentro del código, aparte de las separaciones dadas para los diferentes casos.

No se comparte el hecho de que las separaciones horizontales no lleguen, ni al menos a ser las máximas separaciones horizontales de uno de los edificios. Las separaciones podrían ser muy superiores a las mínimas establecidas.

En ninguno de los casos de separaciones se hace referencia a desplazamientos debido a giros en la base. El mismo código NEC11 establece que existe un suelo tipo F, el cual es blando y cohesivo, lo que podría producir una interacción suelo estructura desfavorable, y por ende incrementar los desplazamientos laterales. Se considera que se debería incluir este caso dentro de la NEC11.

Subcapítulo 2.6.3.3 “ESTABLECIMIENTO DE SEPARACIONES MÁXIMAS ENTRE ESTRUCTURAS”

El NEC11 establece lo siguiente: *Cabe mencionar que la exigencia impuesta está cerca al 50% del valor de separación máxima que debería estrictamente cumplirse. Esta consideración obedece a criterios de carácter económico.* Si bien se reconoce el hecho de que las separaciones mínimas deberían ser mayores, no se entiende el criterio de economía para disminuir las separaciones, ya que en un evento telúrico es muy probable que se produzcan golpeteos y colisiones entre edificios, lo que se traduciría en pérdidas económicas elevadas, inclusive se pondría en juego la seguridad humana.

Es importante señalar que las juntas deberían estar libres de todo material, para que las estructuras se desplacen sin ningún impedimento, ya que de lo contrario podrían presentarse problemas de deformaciones que podrían ocasionar graves daños en elementos estructurales y no estructurales.

Podrían existir golpeteos y colisiones entre edificios, lo que podría ir en contra de la economía, seguridad estructural y seguridad humana.

7.1.7 Subcapítulo 2.7.2.3 “FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA SÍSMICA R”

La NEC11 clasifica a las estructuras en grupos dúctiles y de ductilidad limitada. Dentro de las estructuras dúctiles se clasifican los edificios por su material y tipo de estructuración. Si bien estos parámetros de clasificación son importantes, se deberían incluir requerimientos mínimos de las estructuras en cuanto al detallado y propiedades de comportamiento estructural, ya que no basta con los materiales utilizados para que una estructura sea dúctil. La ductilidad está estrictamente relacionada al comportamiento estructural que se proponga.

Por ejemplo y de manera general, en sistemas duales, los pórticos, sin considerar los muros ni contraventeos, deberían ser capaces de soportar por lo menos el 50% de la fuerza sísmica actuante. Se debería hacer mención que los elementos cumplan con los requisitos mínimos de ductilidad, los cuales deberían estar estipulados en los capítulos de diseño correspondiente a cada material.

Se podría estar diseñando estructuras que no satisfagan los requerimientos mínimos para que sean dúctiles, lo que atentaría contra la seguridad de las mismas, y de sus ocupantes.

Se recomienda estudiar las condiciones mínimas de cada estructura para alcanzar la ductilidad especificada. Se deberían realizar pruebas de laboratorio, o en su defecto estudiar resultados existentes, modelos virtuales, etc., y tratar de realizar adaptaciones a los métodos de construcción local.

7.1.8 Subcapítulo 2.7.2.5.2 “DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DEL CORTANTE”

No se considera suficiente a la torsión accidental considerada, la cual es del 5% de la luz máxima del edificio aplicada en esa dirección. Por otra parte, esta torsión se la debería considerar en las dos direcciones del edificio, no solo en el de luz mayor. Se ha visto que la torsión accidental que existe en un edificio puede llegar a ser mayor a la existente.

Se podrían producir momentos y fuerzas cortantes mayores, lo que ocasionaría un incremento en los requerimientos de refuerzo, y por ende, mayor daño estructural.

Se debería revisar estudios existentes, o en su defecto realizar estudios propios, en los que se justifiquen valores de torsión accidental que proporcionen una mayor seguridad en el diseño estructural.

7.1.9 Subcapítulo 2.8 “MÉTODO DE DISEÑO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS”

A criterio del autor, no se considera conveniente introducir conceptos más avanzados de diseño en las primeras etapas de formación de una normativa ecuatoriana. Inclusive la metodología y límites de deformaciones todavía son debatibles y se encuentran en estudio. Por ejemplo, una manera de control de las deformaciones de una columna puede ser el pandeo de la barra de acero de refuerzo, la cual no se tiene establecido un valor específico, y el mismo está ligado a los materiales de construcción que se utilizan en la zona. Se podría prestar a una mala interpretación de los métodos de diseño

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

8.1 ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO DEL ECUADOR

- *Fuentes generadores de energía sísmica*

Se reconoce el hecho de que la subducción de la Placa de Nazca dentro de la Placa Sudamericana es la principal fuente de generación de energía sísmica en el Ecuador. A este hecho se añade un complejo sistema de fallamiento local superficial que produce sismos importantes en gran parte del territorio ecuatoriano.

Pese a que estuvo fuera del alcance de este proyecto, se puede mencionar que un correcto estudio de geodinámica del territorio, sería de gran ayuda en la definición de fuentes y por ende, en la definición de la peligrosidad y riesgo sísmico de la región.

- *Catálogo sísmico*

Al realizar el estudio de peligro sísmico, se pudo contemplar el hecho de que es necesaria la unificación de un catálogo sísmico. Si bien es cierto, en el Ecuador se realizan ciertas investigaciones acerca de este tema, no existe un catálogo ?oficial?, lo que conlleva a diferentes resultados de las investigaciones. Esto debilita esta rama de investigación a nivel del Ecuador. El manejo de un catálogo uniforme es necesario para continuar con las investigaciones.

El análisis del catálogo sísmico, es un punto sensible en el estudio de amenaza sísmica. De este dependen los parámetros de sismicidad de las fuentes, incluso la misma definición de geometría de fuentes se ve afectada por este estudio. Existen varios métodos para estudiar el catálogo, sin embargo, no se tiene la certeza de estar utilizando el método más apropiado, por lo que, se considera necesario emplear más de un método para cada punto de estudio, tales como, depuración de réplicas y premonitores, rangos de completitud del catálogo, magnitudes mínimas, entre otros.

- *Modelos de atenuación*

Los modelos de atenuación van de la mano con los espectros de peligro uniforme, lo que podría alterar las tasas de excedencia y valores fijados de aceleraciones en los diferentes puntos de

interés. Existen varias expresiones propuestas, sin embargo, se debe analizar con detenimiento cada una de ellas, ya que no todas son apropiadas para la misma región, así sean del mismo tipo de atenuación. La normativa ecuatoriana no especifica de manera clara los modelos de atenuación utilizados en los estudios de amenaza, inclusive nombra ciertas expresiones que no arrojan buenos resultados para la zona estudiada.

- *Peligrosidad sísmica*

Los resultados del estudio de amenaza sísmica presentan dos zonas principales con alta peligrosidad. Por una parte, se tienen valores elevados de intensidades espectrales en la zona de subducción, lo cual era de esperarse, en especial la provincia de Manabí. Esto concuerda con los eventos de magnitudes mayores a 7 que se han presentado en las últimas décadas. Sin embargo, otra zona presenta intensidades cercanas a 0.45g, y que se debe a eventos de tipo cortical, esta zona encierra a la ciudad de Quito. Debido al complejo sistema de fallas de la zona, se incrementa la peligrosidad sísmica, lo que lleva a pensar en que se deben realizar estudios sísmicos a mayor detalle, considerando los efectos locales que inclusive aumentarían las intensidades.

8.2 ESTUDIO DE EFECTOS DE SITIO PARA LA CIUDAD DE CUENCA

La ciudad de Cuenca se podría dividir en cuatro zonas sísmicas principales. Si bien es cierto, las intensidades presentadas en roca no varían mayormente, y el rango de periodos del suelo es pequeño, las funciones de transferencia del suelo generan amplitudes diferentes para cuatro zonas de la ciudad. Las amplitudes máximas se encuentran cercanas a cinco veces en las zonas más desfavorables.

Debido a la topografía irregular de la zona, así como a su hidrografía, se considera que se deberían realizar estudios a mayor detalle, ya que con los resultados actuales existen zonas donde no se pudo comprobar con seguridad la veracidad de los resultados.

8.3 ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO

- *Comparaciones entre los espectros obtenidos en esta tesis para el Ecuador, con los presentados en el NEC11*

Se compararon los espectros de diseño sísmico en roca existentes en el NEC11, con los espectros de peligro uniforme obtenidos en este proyecto. Las diferencias existentes, con excepción de Esmeraldas, Quito y Portoviejo, no son de consideración, y de cierta manera las solicitaciones sísmicas se encuentran cubiertas. Estas tres ciudades nombradas son en las que se producen las mayores intensidades espectrales.

Por otra parte, al momento de considerar efectos de sitio, las diferencias son notables, ya que la NEC11, utiliza factores de amplificación que se encuentran distantes, a los que según este estudio, se podrían llegar. La NEC11 propone factores máximos cercanos a 1.7, a diferencia de

lo observado en Cuenca, en donde las amplificaciones pueden llegar a valores cercanos a 5.

En los espectros de diseño sísmico de la NEC11, se presenta una zona de periodos cortos constantes. Esto puede ser un problema, ya que no permite que el diseñador tenga el suficiente conocimiento con el fenómeno con el que se está trabajando, ya que, por una parte, no expone la aceleración máxima del terreno, ni tampoco deja en evidencia la zona de periodos en los que se produce la máxima intensidad. Al hacer esto, no se sabe cuál es la amplificación máxima que se podría esperar. La información presentada en la NEC11 no es clara.

- *Comparaciones entre los espectros obtenidos en esta tesis para Cuenca, con los presentados en el NEC11*

Centrándonos en los resultados para la ciudad de Cuenca, se ven claras diferencias entre los espectros propuestos en este estudio con los estipulados en las NEC11. En las zonas de máximas amplificación espectral, la normativa actual sobreestima los valores en aproximadamente un 50% comparándolos con los resultados de este estudio, mientras que en las zonas de periodo largo, los valores de la NEC11 son considerablemente mayores a los expuestos en esta tesis.

- *Periodos de retorno*

En cuanto a los periodos de retorno, en el presente trabajo, no se pretende tomar una decisión que debería involucrar una serie de estudios complementarios, como por ejemplo de geofísica, y de la experiencia y debate de la sociedad vinculada con esta rama de la ingeniería sísmica. Más bien, se pretende exponer bases que permitan evolucionar los criterios de diseño sísmico típicos en el Ecuador. A criterio de autor, no se cree conveniente el utilizar directamente, en el código de construcción, resultados de otras regiones, que en muchos de los casos, ni siquiera presentan similitudes en la sismicidad, condiciones geotécnicas, ni realidades constructivas similares. Tal es el caso de los periodos de retorno del espectro de diseño sísmico del NEC11, el cual está asociado a lo establecido en la normativa de Estados Unidos.

- *Espectros de desplazamientos*

Por otra parte, los espectros de desplazamiento presentan variaciones muy importantes, llegando a ser en ciertos casos, varias veces mayores a los EPU obtenidos en este estudio. Es primordial mencionar, que los espectros del NEC11, violan los conceptos de la dinámica estructural, ya que presentan desplazamiento del terreno infinitos. Para tratar de corregir este grave error, se incluye en la normativa un espectro solo para desplazamientos, el cual sí presenta límites máximos, sin embargo, las diferencias siguen siendo considerables, incluso al compararlas con los resultados en roca. Se considera que esto es un error importante, ya que las tendencias del diseño sismoresistente, se basa en el control de los desplazamientos y derivas de piso, y esto genera diseño sobreestimados. Al no considerar esta sobrerresistencia, la estructura podría tener fallas frágiles e incrementos económicos.

- *Espectros inelásticos y factores de reducción*

Otro aspecto a considerar son los factores de reducción para transformar los espectros elásticos en inelásticos. Estos factores son influyentes en los diseños, ya que al intentar generar proyectos más económicos inciden en el daño estructural que se podría presentar. En Ecuador se han realizado pocos estudios al respecto, sin embargo, los resultados del estudio de Aguiar (2008) para reducción por sobrerresistencia y redundancia, expuestos en esta tesis, arrojan valores que se encuentran dentro de los rangos considerados normales, sin embargo, ya que estos son dependientes de la realidad local, se deberían realizar más pruebas para renovar estos parámetros.

Haciendo referencia al NEC11, no permite que se tenga un control suficiente sobre ninguno de los factores de reducción, ya que estipula un factor global ($R = R_{\mu}R_{\Omega}R_R$) y lo asocia a un tipo de estructura. Por una parte, no permite una lección libre de la ductilidad buscada por el diseñador, y además, los criterios expuestos en el código, y que definen las estructuras consideradas dúctiles, no son suficientes. Esto puede generar graves problemas, ya que el diseñador puede optar por los factores máximos, sin estar consciente de las consecuencias de esto.

El generar factores de reducción explícita, y espectros que no escondan sus conceptos básicos, podría generar ventajas en los diseños, ya que permitiría al diseñador tener control sobre su estructura y no al contrario, que es lo que normalmente sucede.

Referencias

- [1] Abrahamson N., Silva W. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1):94–127, 1997.
- [2] Aguiar R., Bernal O., Guaiña J. Factor de redundancia en edificios de dos y tres vanos de hormigón armado. *XX Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural. Escuela Politécnica Nacional.*, 1:14, 208.
- [3] Aguiar R., Guadalupe M., Mora P. Comparación de la sobre resistencia global en función de la deriva máxima de piso en edificios de dos y tres vanos. *II Congreso de Ciencia, Tecnología e Innovación. Escuela Politécnica del Ejército*, 1:14, 2007.
- [4] Aguiar R. Peligrosidad sísmica del ecuador y descripción de los puentes construidos sobre el estuario del río esmeraldas, con aisladores de base fps. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 15:85–119, 2010.
- [5] Alvarado A. *Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur*. PhD thesis, Université de Grenoble, France., 2012.
- [6] Beauval C., Yepes H., Palacios P., Segovia M., Alvarado A., Font Y., Aguilar J., Troncoso L., Vaca S. An earthquake catalog for seismic hazard assessment in ecuador. *Seismological Society of America*, 103(2A), 773:786, 2013.
- [7] Cahuari A., Tavera R. Cálculo de la magnitud local (ml) a partir de registros de aceleración: aplicación a sismos ocurridos en Perú. *Boletín*, 1, 102:117, 2007.
- [8] Cornell A. Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1538:1606, 1968.
- [9] Chiou J., Youngs R. An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 24(1), 173:215, 2008.
- [10] Dimate C., Yepes H., Ocola L., Rendon H., Grunthal G., Giardini D., Drake L. Seismic hazard assessment in the northern andes (piloto project). *Annali di geofisica*, 42 (6), 1999.
- [11] Encalada M. Zonificación de la ciudad de cuenca en función de los periodos dominantes de la ciudad de cuenca. *Tesis de pre-grado, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.*, 2000.
- [12] Esteva L. Criterios para la construcción de espectros de diseño sísmico. *Serie Azul del Instituto de Ingeniería, UNAM.*, 198, 1968.
- [13] Esteva L. Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería. *Serie Azul del Instituto de Ingeniería, UNAM.*, 246, 1970.
- [14] Gallegos M. Estimación de riesgo sísmico en la república de Colombia. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México., 2000.
- [15] Gamarra C., Aguilar Z. Nuevas fuentes sismogénicas para la evaluación del peligro sísmico y generación de espectros de peligro uniforme en el Perú. *Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú*, 2010.

- [16] García E. Informe de peligro sísmico proyecto precupa. Technical report, Universidad de Cuenca, 1996.
- [17] García J. *Atenuación sísmica. Aplicación a terremotos intraplaca en México Central*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México., 2001.
- [18] Gutenberg B., Richter C. Frequency of Earthquakes in California. *Journal of the Seismological Society of America*, 34(4), 1985:1988, 1944.
- [19] Haskell N. Crustal reflection of plane p and sv waves. *Journal of Geophysical Research*, 67(12), :4751:4768, 1962.
- [20] Heredia M. Prospección geofísica mediante sísmica de refracción aplicaca al estudio de riesgo sísmico en la ciudad de cuenca. Technical report, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador., 1999.
- [21] Huerta B. Comunicación personal. 2013.
- [22] Huerta B., Ordaz M., Reinoso E. Propuesta de formato estándar para estudios de microzonificación sísmica y la experiencia de su aplicación en sistemas computacionales. *Memorias XVIII del Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, México*, 2011.
- [23] Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. Informe sísmico para el ecuador año 2011. Technical report, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2011.
- [24] Jaramillo J. Modelo para la rama descendente de espectros de diseño sísmico y aplicaciones al caso de la ciudad de medellín. *Revista de Ingeniería Sísmica* , México, 68:1–20, 2003.
- [25] Kramer S. Geotechnical Earthquake Engineering. *Prentice Hall International Series*,1996.
- [26] Leonardo M. Psm2012: Aplicación web para la difusión y consulta de datos de peligro sísmico. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México., 2012.
- [27] Leonardo M. Comunicación personal. 2014.
- [28] Lermo J., Linera M., Sánchez-Sesma F., Riquer G., Leyva R., Pérez S., Rivera R. Mapas de Intensidades Sísmicas en la Zona Conurbada Veracruz-Boca del Río (Zcv), México, para el Sismo de Sayula del 25 de Febrero de 2011 (Mw6.0). *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, 2011.
- [29] Maeda K. The use of foreshocks in probabilistic prediction along the japan and kuril trenches. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86 (1A):242–254, 1996.
- [30] McGuire R. Probabilistic seismic hazard analysis: Early history. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37:329–338, 2007.
- [31] Mendoza M. Uso de familias espectrales obtenidas con registros de sismos y microtemores para la clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico. aplicación en las ciudades de veracruz-boca del río, oaxaca y acapulco. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México., 2009.
- [32] Miranda E., Bertero V. Evaluation of strenght reduction factors for earthquake resistant design. *Earthquake spectra*, 10 (2):357–379, 1994.
- [33] Miranda E. Hacia la transparencia en criterios de diseño sísmico. *X Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Mérida, Yucatán., México*, 1996.
- [34] Miranda E. Approximate seismic lateral deformation demand in multistory buildings. *Journal of Structural Engineering*, 125:417–425, 1999.
- [35] Nakamura Y. A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremors on ground surface. *QR of RTRI* 30, 1:25–33, 1989.
- [36] Newmark N., Rosenbleuth E. Fundamentals of Earthquake Engineering. *Prentice Hall, Inc.*, Englewood Cliffs, New Jersey, 1971.

- [37] Newmark N., Hall W. Earthquake spectra and design. *EERI Monograph*, page 103, 1982.
- [38] NEC11 Norma Ecuatoriana de la Construcción. *MIDUVI, Ecuador*, 2011.
- [39] Ordaz M., Aguilar A., Arboleda J. Program for computing seismic hazard: Crisis 2007 v1.1. *Instituto de Ingeniería, UNAM, México.*, 2007.
- [40] Ordaz M. Crisis 2008: user's manual. *Instituto de Ingeniería, UNAM, México.*, 2008.
- [41] Ordaz M. Comunicación personal. 2013.
- [42] Ordaz M., Miranda E., y Avilés J. Propuesta de espectros de diseño por sismo para el df. *Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León, México*, 2000.
- [43] Ordaz M., Pérez-Rocha L. Estimation of strength-reduction factors for elastoplastic systems: a new approach. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 889:01, 1998.
- [44] Palacios P., Yepes H. Analisis de la magnitud de duración. Technical report, Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2011.
- [45] Reasenberg P. Second-order moment of central California seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 90, 5479:5495, 1985.
- [46] Reinoso E., Jaimés E. Criterios para obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas usando como ejemplo el caso de terreno firme de la ciudad de México. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 81:1–18, 2009.
- [47] Reinoso E., Lermo J. Periodos del suelo del valle de México medidos en sismos *Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Manzanillo, México*, 2, 149:156, 1991.
- [48] Sadigh K., Egan J., Makdisi F., Youngs R.R., Chang C. Attenuation relationship for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seismological Research Letters*, 68(1), 1997.
- [49] Silva B., Campos J. Caracterización y determinación del peligro sísmico en la región metropolitana. Master's thesis, Universidad de Chile, 2008.
- [50] Stepp J. Analysis of completeness of the earthquake simple in the Puget Sound area and its effects in static estimates of earthquake hazard. *Proceedings of the microzonation conference, Washington University*, 2, 897:909, 1972.
- [51] Taipe L. Análisis de las ecuaciones de predicción de movimientos de suelo para el Ecuador, utilizando datos registrados durante el periodo 200-2011 en estaciones sísmicas de banda ancha y acelerógrafos. Master's thesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2013.
- [52] Utsu T. Aftershocks and earthquake statistics, further investigation of aftershocks and other earthquake sequences based on a new classification of earthquake sequences. *J. Fac. Sci. Hokkaido University.*, 7(3), 197:266, 1970.
- [53] Youngs R., Chiou S., Silva W. y Humprey J. Strong ground motions attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters.*, 64, 58:73, 1997.
- [54] Zhao J., Zhang J., Asano A., Ohno Y., Oouchi T., Takahashi T., Ogawa H., Irikura H., Thio H., Somerville P., Fukushima Y., Yoshimitsu Fukushima Y. Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period. *SBulletin of the Seismological Society of America.*, 3 898:913, 2006.
- [55] Zúñiga R., Suárez G., Ordaz M., García-Acosta V. Peligro sísmico en Latinoamérica y el Caribe. *Instituto Panamericano de Geografía e Historia, México*, 2, 1997.