

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS

**PROCESAMIENTO DE LOS ACELEROGRAMAS DE LA RED DE
ACELERÓGRAFOS DE LA CIUDAD DE QUITO**

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MÁSTER EN ESTRUCTURAS

DIEGO HERNÁN HIDALGO ROBALINO

diegohidalgo@hotmai.com

DIRECTOR: MSc. Ing. ROBERTO EDUARDO ARELLANO B.

roberto.arellano@epn.edu.ec

Quito, agosto 2011

DECLARACIÓN

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

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

Diego Hernán Hidalgo Robalino

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diego Hernán Hidalgo Robalino, bajo mi supervisión.

Msc. Ing. Roberto Arellano B.

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme esta vida.

A los mejores padres que un hijo pudiera desear, Marco y Carmita.

A mi hermano y amigo Washington, por su apoyo incondicional.

A mi hermana Lily y a su esposo Christian, por su entusiasmo y esfuerzo incesante en siempre colaborar conmigo.

Mi sincero agradecimiento al Ing. Arellano por su valiosa guía y por el ánimo para que salga adelante este proyecto.

Al Ing. Yépez por sus observaciones acertadas y al personal del Instituto Geofísico por su colaboración.

A mis queridos amigos Tavo, Sebas, Milton, Diana, Lili y Cris.

Para Carmita y Lily,
las dos flores en mi vida

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. SISMOS EN EL ECUADOR	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. CONSIDERACIONES SOBRE ESTUDIOS DE RIESGO SÍSMICO EN EL PAÍS 1	
1.3. ESTUDIOS PRELIMINARES DE RIESGO SÍSMICO	2
1.3.1. LEYES DE ATENUACIÓN	3
1.3.2. ECUACIONES DE LEYES DE ATENUACIÓN.....	3
1.3.3. FORMA DE LAS ECUACIONES DE LEYES DE ATENUACIÓN	3
1.4. CÓDIGO ECUATORIANO DE LA CONSTRUCCIÓN.....	4
1.4.1. FACTOR DE ZONA SÍSMICA: Z.....	5
1.4.2. ESPECTRO SÍSMICO ELÁSTICO DE DISEÑO: C.....	5
1.4.3. FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA SÍSMICA O COEFICIENTE DE REDUCCIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL: R	7
1.5. PARTICULARIDADES DE LOS SISMOS ECUATORIANOS.....	10
1.6. RED DE ACELEROGRAFOS DE LA CIUDAD DE QUITO	10
1.6.1. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES.....	10
1.6.2. ACELEROGRAMAS.....	15
 CAPÍTULO 2. PROCESAMIENTO Y CORRECCIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS	
22	
2.1. INTRODUCCIÓN.....	22
2.2. ACELERÓGRAFOS.....	22
2.3. ANÁLISIS DE ACELEROGRAMAS.....	24
2.4. DIGITALIZACIÓN DE ACELEROGRAMAS	25

2.5. CORRECCIÓN DE ACELEROGRAMAS.....	27
2.6. FILTROS	28
2.6.1. FILTRO ORMSBY	31
2.7. CORRECCIÓN DE LA LÍNEA BASE.....	31
2.7.1. MÉTODO DE BERG Y HOUSNER	33
2.8. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACELERÓGRAFOS CONSIDERADOS	35
2.9. CORRECCION DE LOS ACELEROGRAMAS CONSIDERADOS	36
CAPÍTULO 3. ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICOS	38
3.1. INTRODUCCIÓN.....	38
3.2. MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE	39
3.2.1. PROYECCIÓN HORIZONTAL DEL MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORME.....	39
3.2.2. VIBRACIÓN LIBRE DE UN SISTEMA MASA - RESORTE	41
3.3. SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD (1GDL)	42
3.3.1. SUPERPOSICIÓN DE LA EXCITACIÓN Y DE LA RESPUESTA	44
3.3.2. MOVIMIENTO DEL SOPORTE	45
3.4. RESPUESTA A EXCITACIONES DINÁMICAS GENERALES	46
3.4.1. RESPUESTA INDICIAL.....	46
3.4.2. RESPUESTA IMPULSIVA.....	48
3.4.3. INTEGRAL DE CONVOLUCIÓN	50
3.5. RESPUESTA PASO A PASO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.....	52
3.5.1. METODO BETA DE NEWMARK.....	54
3.6. ESPECTROS DE RESPUESTA DE UN SISMO	56
3.6.1. ESPECTROS DE RESPUESTA TRIPARTITOS	59
3.6.2. REPRESENTACIÓN DE LOS ESPECTROS TRIPARTITOS	61
3.6.3. VALORES LÍMITE DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA	65

3.6.4.	FACTORES QUE AFECTAN LOS ESPECTROS DE RESPUESTA.....	66
3.6.5.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN	68
3.7.	ESPECTROS DE RESPUESTA DE LOS ACELEROGRAMAS CONSIDERADOS.....	68
3.8.	ESPECTROS TRIPARTITOS DE LOS ACELEROGRAMAS CONSIDERADOS.....	70
CAPÍTULO 4.	ESPECTROS DE DUCTILIDAD DE SISTEMAS ELASTOPLÁSTICOS	75
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	75
4.2.	DUCTILIDAD Y COMPORTAMIENTO SÍSMICO	76
4.2.1.	CRITERIOS DE ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE REDUCCIÓN DE CARGA 81	
4.3.	SISTEMAS NO LINEALES	83
4.3.1.	SISTEMAS SIMPLES (1GDL)	83
4.3.2.	TIPOS DE NO LINEALIDAD	84
4.4.	CÁLCULO DE LA RESPUESTA DE UN SISTEMA ELASTOPLÁSTICO SIMPLE. ADAPTACIONES DEL MÉTODO BETA DE NEWMARK.....	85
4.4.1.	TRAMOS ELÁSTICOS.....	89
4.4.2.	TRAMOS PLÁSTICOS.....	91
4.4.3.	INTERVALO DE INTEGRACIÓN	91
4.5.	ESPECTROS ELASTOPLÁSTICOS DE RESPUESTA.....	91
4.5.1.	ESPECTROS ELASTOPLÁSTICOS DE SISMOS REALES	92
4.5.2.	ESPECTROS DE DISEÑO DE LOS SISTEMAS ELASTOPLÁSTICOS SIMPLES.....	94
4.6.	FACTOR DE REDUCCION DE FUERZAS SISMICAS	96
4.6.1.	FACTOR DE REDUCCION POR DUCTILIDAD	97

4.6.2.	ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE EL FACTOR DE REDUCCION POR DUCTILIDAD	98
4.6.3.	FACTOR DE REDUCCION POR RESISTENCIA.....	102
4.6.4.	FACTOR DE REDUCCION POR REDUNDANCIA	103
4.7.	ESPECTROS ELASTOPLÁSTICOS DE LOS ACELEROGRAMAS CONSIDERADOS.....	104
CAPÍTULO 5.	RESPUESTA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....	107
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	107
5.2.	VIBRACIÓN DE UN SISTEMA SIMPLE SUJETO A UNA FUERZA ARMÓNICA.....	107
5.3.	RESPUESTA ANTE UNA EXCITACIÓN PERIÓDICA	110
5.4.	RESPUESTA ANTE UNA EXCITACIÓN NO PERIÓDICA.....	112
5.5.	TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER	114
5.6.	ESPECTROS DE FOURIER	115
5.6.1.	ESPECTROS DE FOURIER DE UN SISMO.....	117
5.7.	ESPECTROS DE FOURIER DE LOS REGISTROS CONSIDERADOS	119
5.8.	ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS LOCALES EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	120
5.9.	ANÁLISIS ESPECTRAL DE LAS ESTACIONES.....	121
CAPÍTULO 6.	ESPECTROS DE DISEÑO.....	125
6.1.	INTRODUCCIÓN.....	125
6.2.	TIPOS DE ESPECTROS.....	125
6.3.	ESPECTROS DE DISEÑO DE ACCELERACION.....	127

6.4. DIFERENCIA ENTRE EL ESPECTRO DE DISEÑO Y EL ESPECTRO DE RESPUESTA	128
6.5. ESPECTROS ELASTICOS DE DISEÑO DE LOS ACELEROGRAMAS CONSIDERADOS.....	130
6.6. ESPECTROS INELASTICOS DE DISEÑO DE LOS ACELEROGRAMAS CONSIDERADOS.....	134
CAPÍTULO 7. COMPARACIÓN CON ESPECTROS ADICIONALES.....	148
7.1. INTRODUCCIÓN.....	148
7.2. FALLAS	148
7.2.1. ELEMENTOS DE UNA FALLA.....	148
7.2.2. CARACTERÍSTICAS DE UNA FALLA	149
7.2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS FALLAS DE ACUERDO AL MOVIMIENTO.....	151
7.3. FALLAS EN LA CIUDAD DE QUITO.....	152
7.3.1. SISTEMA DE FALLAS DE QUITO Y GUAYLLABAMBA.....	153
7.3.2. SISTEMA DE FALLAS DEL NOROCCIDENTE	155
7.3.3. FALLAS DE LA REGIÓN SUR.....	157
7.3.4. SUBDUCCIÓN	157
7.4. FALLAS CONSIDERADAS	160
7.5. REGISTROS OBTENIDOS DE BASE DE DATOS.....	162
7.5.1. PARECIDA A FALLA DE QUITO.....	166
7.5.2. PARECIDA A FALLA DE NONO	171
7.5.3. PARECIDA A FALLA DE OTAVALO.....	175
7.5.4. PARECIDA A FALLA DE PISAYAMBO.....	178
7.5.5. PARECIDA A FALLA DE SUBDUCCION.....	180
7.6. COMPARACIÓN CON EL ESPECTRO PROPUESTO POR EL CEC.....	188
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.....	203

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1-1: MODELO DE ATENUACIÓN DE ACELERACIÓN SEGÚN KATAYAMA, T.....	2
ECUACIÓN 1-2: MODELO DE ATENUACIÓN DE VELOCIDAD SEGÚN KANAI, K.....	2
ECUACIÓN 1-3: FORMA DE LA INTENSIDAD DEL MOVIMIENTO SÍSMICO	3
ECUACIÓN 1-4: ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO	6
ECUACIÓN 2-1: SEÑAL SÍSMICA MÁS RUIDO	26
ECUACIÓN 2-2: CÁLCULO DEL REGISTRO DE VELOCIDAD	33
ECUACIÓN 2-3: CÁLCULO DEL REGISTRO DEL DESPLAZAMIENTO	33
ECUACIÓN 2-4: DATOS CORREGIDOS DEL ACELEROGRAMA POR LÍNEA BASE	35
ECUACIÓN 3-1: ECUACIÓN DIFERENCIAL DE MOVIMIENTO	40
ECUACIÓN 3-2: SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DE MOVIMIENTO	40
ECUACIÓN 3-3: ECUACIÓN DEL SISTEMA DE 1GDL	43
ECUACIÓN 3-4: SOLUCIÓN A LA ECUACIÓN DEL SISTEMA DE 1GDL.....	43
ECUACIÓN 3-5: ECUACIÓN DEL SISTEMA DE 1GDL SUJETO A UNA ACELERACIÓN EN EL SOPORTE	46
ECUACIÓN 3-6: ECUACIÓN DEL SISTEMA DE 1GDL SUJETO A LA ACCIÓN DE UNA CARGA EXTERIOR.....	46
ECUACIÓN 3-7: RELACIÓN ENTRE FUERZA EXTERIOR Y ACELERACIÓN DEL SOPORTE.....	46
ECUACIÓN 3-8: RESPUESTA INDICIAL.....	48
ECUACIÓN 3-9: RESPUESTA IMPULSIVA.....	50
ECUACIÓN 3-10: INTEGRAL DE DUHAMEL.....	51
ECUACIÓN 3-11: INTEGRAL DE CONVOLUCIÓN DE LAS FUNCIONES F Y H	51
ECUACIÓN 3-12: RESPUESTA DEL ESTADO ESTACIONARIO ANTE UNA EXCITACIÓN CUALQUIERA.....	52
ECUACIÓN 3-13: RESPUESTA DEL ESTADO ESTACIONARIO ANTE UN MOVIMIENTO EN EL SOPORTE	52
ECUACIÓN 3-14: EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LA INTEGRAL DE DUHAMEL.....	53
ECUACIÓN 3-15: DESPLAZAMIENTO USANDO MÉTODO BETA DE NEWMARK.....	55
ECUACIÓN 3-16: VELOCIDAD USANDO MÉTODO BETA DE NEWMARK.....	55
ECUACIÓN 3-17: ACELERACIÓN USADA EN EL MÉTODO BETA DE NEWMARK.....	55
ECUACIÓN 3-18: ESPECTRO DE RESPUESTA	57
ECUACIÓN 3-19: ESPECTRO DE RESPUESTA PARA UN SISMO	59

ECUACIÓN 3-20: FUERZA SÍSMICA EFECTIVA	61
ECUACIÓN 4-1: FACTOR DE DUCTILIDAD DE UN SISTEMA.....	80
ECUACIÓN 4-2: FACTOR DE REDUCCIÓN DE CARGA.....	80
ECUACIÓN 4-3: CRITERIO DE IGUALDAD ENTRE DEFORMACIONES	81
ECUACIÓN 4-4: CRITERIO DE IGUALDAD ENTRE ENERGÍAS	82
ECUACIÓN 4-5: ECUACIÓN GENERAL DE UN SISTEMA NO LINEAL	83
ECUACIÓN 4-6: PARÁMETRO ADIMENSIONAL H.....	87
ECUACIÓN 4-7.....	88
ECUACIÓN 4-8: ECUACIÓN DE MOVIMIENTO CON MOVIMIENTO EN EL SOPORTE EN FUNCIÓN DE LA DUCTILIDAD DE DESPLAZAMIENTO Y DEL FACTOR H.....	88
ECUACIÓN 4-9.....	90
ECUACIÓN 4-10.....	90
ECUACIÓN 4-11: SEGUNDA DERIVADA DE LA DUCTILIDAD EN TRAMOS ELÁSTICOS	90
ECUACIÓN 4-12: PRIMERA DERIVADA DE LA DUCTILIDAD EN TRAMOS ELÁSTICOS	90
ECUACIÓN 4-13: DUCTILIDAD EN TRAMOS ELÁSTICOS	90
ECUACIÓN 4-14: DUCTILIDAD EN TRAMOS PLÁSTICOS	91
ECUACIÓN 4-15: ESPECTRO ELASTOPLÁSTICOS DE RESPUESTA PARA UN SISMO	92
ECUACIÓN 4-16: CARACTERÍSTICAS DE LA REGIÓN A	93
ECUACIÓN 4-17: CARACTERÍSTICAS DE LA REGIÓN V1	93
ECUACIÓN 4-18: CARACTERÍSTICAS DE LA REGIÓN V2	94
ECUACIÓN 4-19: CARACTERÍSTICAS DE LA REGIÓN A	94
ECUACIÓN 4-20: FACTOR DE REDUCCIÓN DE FUERZAS SÍSMICAS PROPUESTA POR WHITTAKER.....	96
ECUACIÓN 4-21: FACTOR DE REDUCCIÓN DE FUERZAS SÍSMICAS PROPUESTA POR ATC- 1995	97
ECUACIÓN 4-22: FACTOR DE REDUCCIÓN POR DUCTILIDAD.....	97
ECUACIÓN 4-23: RELACIÓN ENTRE EL DESPLAZAMIENTO MÁXIMO INELÁSTICO Y EL DESPLAZAMIENTO MÁXIMO ELÁSTICO	97
ECUACIÓN 4-24: FACTOR DE REDUCCIÓN POR DUCTILIDAD USANDO EL CORTE BASAL REDUCIDO Y EL CORTANTE DE REDUCCIÓN	98
ECUACIÓN 4-25: FACTOR DE REDUCCIÓN POR DUCTILIDAD SEGÚN NEWMARK Y HALL.....	99
ECUACIÓN 4-26: FACTOR DE REDUCCIÓN POR DUCTILIDAD SEGÚN AGUIAR, ROMO Y ARAGÓN	101

ECUACIÓN 5-1: FUERZA ARMÓNICA	107
ECUACIÓN 5-2: RELACIÓN DE EULER.....	107
ECUACIÓN 5-3: ECUACIÓN DEL SISTEMA BAJO FUERZA ARMÓNICA	108
ECUACIÓN 5-4: RESPUESTA DEL ESTADO ESTACIONARIO PARA UNA FUERZA ARMÓNICA ...	108
ECUACIÓN 5-5: FUNCIÓN DE RESPUESTA COMPLEJA DE FRECUENCIA	108
ECUACIÓN 5-6: FACTOR DINÁMICO DE MAGNIFICACIÓN.....	108
ECUACIÓN 5-7: FUNCIÓN DE RESPUESTA COMPLEJA DE FRECUENCIA	109
ECUACIÓN 5-8: SERIE DE FOURIER DE LA FUERZA ARMÓNICA	110
ECUACIÓN 5-9: COEFICIENTES DE FOURIER.....	111
ECUACIÓN 5-10: RESPUESTA DEL ESTADO ESTACIONARIO PARA UNA FUERZA ARMÓNICA EXPRESADA COMO SERIE DE FOURIER	111
ECUACIÓN 5-11: SERIE DE FOURIER DE LA FUERZA ARMÓNICA EN FORMA COMPLEJA.....	111
ECUACIÓN 5-12: COEFICIENTE DE FOURIER EN FORMA COMPLEJA	111
ECUACIÓN 5-13: RESPUESTA DEL ESTADO ESTACIONARIO PARA UNA FUERZA ARMÓNICA EXPRESADA COMO SERIE DE FOURIER EN FORMA COMPLEJA	112
ECUACIÓN 5-14: AMPLITUD DE LOS ARMÓNICOS.....	112
ECUACIÓN 5-15: TRANSFORMADA INVERSA DE FOURIER.....	113
ECUACIÓN 5-16: TRANSFORMADA DE FOURIER	113
ECUACIÓN 5-17: RESPUESTA DEL ESTADO ESTACIONARIO PARA UNA FUERZA NO ARMÓNICA	113
ECUACIÓN 5-18: RESPUESTA DEL ESTADO ESTACIONARIO PARA UNA FUERZA NO ARMÓNICA	114
ECUACIÓN 5-19: TRANSFORMADA DE FOURIER DE LA RESPUESTA	114
ECUACIÓN 5-20: ORDENADAS DEL ESPECTRO DE FRECUENCIAS DE LA FUERZA.....	116
ECUACIÓN 5-21: ORDENADAS DEL ESPECTRO DE FRECUENCIAS DE LA RESPUESTA ANTE UNA FUERZA NO PERIÓDICA	116
ECUACIÓN 5-22: ORDENADAS DEL ESPECTRO DE FRECUENCIAS DE LA RESPUESTA ANTE UNA FUERZA PERIÓDICA	116
ECUACIÓN 5-23: TRANSFORMADA INVERSA DE FOURIER DE $H(\omega)$	117
ECUACIÓN 5-24: TRANSFORMADA DE FOURIER DEL REGISTRO DE ACELERACIONES	117
ECUACIÓN 5-25: TRANSFORMADA DE FOURIER DEL REGISTRO DE ACELERACIONES	118
ECUACIÓN 5-26: ESPECTRO DE AMPLITUD DE FOURIER. HUDSON (1962)	118

ECUACIÓN 5-27: ESPECTRO DE AMPLITUD DE FOURIER EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA DE UN
AMORTIGUADOR NO AMORTIGUADO DE 1GDL..... 118

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1: ZONAS SÍSMICAS	6
FIGURA 1-2: ESPECTRO SÍSMICO ELÁSTICO DE DISEÑO	7
FIGURA 1-3: UBICACIÓN DE LOS ACELERÓGRAFOS DE LA CIUDAD DE QUITO	15
FIGURA 1-4: UBICACIÓN DE LOS SISMOS CONSIDERADOS	19
FIGURA 1-5: EVENTO 1	19
FIGURA 1-6: EVENTO 2	20
FIGURA 1-7: EVENTO 3	20
FIGURA 1-8: EVENTO 4	21
FIGURA 1-9: EVENTO 5	21
FIGURA 2-1: TIPOS DE ACELERÓGRAFOS	24
FIGURA 2-2: EFECTO DEL RUIDO DE ALTA Y BAJA FRECUENCIA	27
FIGURA 2-3: COMPORTAMIENTO DE LOS FILTROS IDEALES	29
FIGURA 2-4: FILTROS RECURSIVOS	30
FIGURA 2-5: FILTRO ORMSBY	31
FIGURA 3-1: MOVIMIENTO CIRCULAR	39
FIGURA 3-2: SISTEMA MASA – RESORTE	41
FIGURA 3-3: SISTEMA MASA, RESORTE, AMORTIGUADOR VISCOSO	42
FIGURA 3-4: SISTEMA DE 1GDL FORZADO	44
FIGURA 3-5: SISTEMA CON EXCITACIÓN EN EL SOPORTE	45
FIGURA 3-6: FUNCIÓN UNITARIA DE HEAVISIDE	47
FIGURA 3-7: FUNCIÓN DELTA DE DIRAC	49
FIGURA 3-8: FUERZA DE EXCITACIÓN CON VARIACIÓN EN T	50
FIGURA 3-9: VARIACIÓN DE LA CONSTANTE BETA EN EL MÉTODO DE NEWMARK	55
FIGURA 3-10: EJEMPLOS DE ESPECTRO DE RESPUESTA	59
FIGURA 3-11: COMPARACIÓN DE ESPECTROS DE VELOCIDAD RELATIVA Y PSEUDOVELOCIDAD	60
FIGURA 3-12: LECTURA DE LOS VALORES ESPECTRALES EN LA REPRESENTACIÓN COMBINADA	63
FIGURA 3-13: REPRESENTACIÓN COMBINADA DE ESPECTROS EN PAPEL LOGARÍTMICO. AMORTIGUAMIENTO 0, 2, 5 Y 10%. REGISTRO DE EL CENTRO (1940).....	64
FIGURA 3-14: ESPECTRO DE CAPACIDAD. TERREMOTO TURQUÍA (1999)	65

FIGURA 3-15: COMPARACIÓN DE ESPECTROS DE ACELERACIÓN PARA DISTINTOS TERREMOTOS (FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO 5%).....	67
FIGURA 3-16: ESPECTROS PROMEDIOS PARA DISTINTOS TIPOS DE SUELOS (FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO 5%).....	67
FIGURA 3-17: VALORES DE LOS RANGOS DE PERÍODO EN LA REGIÓN SENSIBLE A LA VELOCIDAD.....	72
FIGURA 3-18: TMIN Y TMAX PARA SUBGRUPO I.....	73
FIGURA 3-19: TMIN Y TMAX PARA SUBGRUPO II.....	74
FIGURA 4-1: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN.....	77
FIGURA 4-2: MODELO ELASTOPLÁSTICO LINEAL.....	79
FIGURA 4-3: CRITERIO DE IGUALDAD ENTRE DEFORMACIONES.....	81
FIGURA 4-4: CRITERIO DE IGUALDAD ENTRE ENERGÍAS.....	82
FIGURA 4-5: CURVAS INELÁSTICAS FUERZA - DEFORMACIÓN.....	86
FIGURA 4-6: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO P EN FUNCIÓN DE LA DUCTILIDAD.....	89
FIGURA 4-7: COEFICIENTE SÍSMICO DE DISEÑO.....	96
FIGURA 4-8: FACTOR DE REDUCCIÓN POR DUCTILIDAD SEGÚN NEWMARK Y HALL, PARA UNA DUCTILIDAD IGUAL A 4.....	100
FIGURA 4-9: FACTOR DE REDUCCIÓN POR DUCTILIDAD SEGÚN NEWMARK Y HALL, PARA UNA DUCTILIDAD IGUAL A 6.....	100
FIGURA 4-10: FACTOR DE REDUCCIÓN POR DUCTILIDAD SEGÚN AGUIAR, ROMO Y ARAGÓN, PARA UNA DUCTILIDAD IGUAL A 4.....	102
FIGURA 4-11: ESPECTROS DE DUCTILIDAD PARA CANAL1 CON ETA 0.2 Y AMORTIGUAMIENTO 5%.....	105
FIGURA 4-12: ESPECTROS DE DUCTILIDAD PARA CANAL2 CON ETA 0.2 Y AMORTIGUAMIENTO 5%.....	105
FIGURA 4-13: ESPECTROS DE DUCTILIDAD PARA CANAL3 CON ETA 0.2 Y AMORTIGUAMIENTO 5%.....	106
FIGURA 5-1: CURVAS DE RESONANCIA.....	109
FIGURA 5-2: TIEMPO REQUERIDO POR LA TRANSFORMADA DE FOURIER USANDO EL MÉTODO CONVENCIONAL Y EL MÉTODO RÁPIDO.....	115
FIGURA 5-3: DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS EN LA CIUDAD DE QUITO.....	123
FIGURA 6-1: EJEMPLO DE DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO A PARTIR DE CUATRO ESPECTROS DE RESPUESTA.....	128

FIGURA 6-2: ESPECTRO DE DISEÑO DEFINIDO COMO LA ENVOLVENTE DE ESPECTROS PARA SISMOS ORIGINADOS EN DIFERENTES FALLAS	129
FIGURA 6-3: PROMEDIO DE LOS ESPECTROS NORMALIZADOS A 0.4G Y EL ESPECTRO DEL C.E.C. PARA LAS COMPONENTES VERTICALES.....	131
FIGURA 6-4: PROMEDIO DE LOS ESPECTROS NORMALIZADOS A 0.4G Y ESPECTRO DEL C.E.C. PARA LAS COMPONENTES HORIZONTALES	132
FIGURA 6-5: PROMEDIO TOTAL DE LOS ESPECTROS PARA LAS COMPONENTES VERTICALES	133
FIGURA 6-6: PROMEDIO TOTAL DE LOS ESPECTROS PARA LAS COMPONENTES HORIZONTALES	133
FIGURA 6-7: PROMEDIO DE LAS COMPONENTES VERTICALES DE LOS ESPECTROS INELÁSTICOS NORMALIZADOS A 0.4G	136
FIGURA 6-8: PROMEDIO DE LAS COMPONENTES HORIZONTALES DE LOS ESPECTROS INELÁSTICOS NORMALIZADOS A 0.4G	137
FIGURA 6-9: PROMEDIO DEL FACTOR DE REDUCCIÓN POR DUCTILIDAD DE LAS COMPONENTES VERTICALES PARA UNA DUCTILIDAD $U=4$	138
FIGURA 6-10: PROMEDIO DEL FACTOR DE REDUCCIÓN POR DUCTILIDAD DE LAS COMPONENTES VERTICALES PARA UNA DUCTILIDAD $U=6$	139
FIGURA 6-11: PROMEDIO DEL FACTOR DE REDUCCIÓN POR DUCTILIDAD DE LAS COMPONENTES HORIZONTALES PARA UNA DUCTILIDAD $U=4$	140
FIGURA 6-12: PROMEDIO DEL FACTOR DE REDUCCIÓN POR DUCTILIDAD DE LAS COMPONENTES HORIZONTALES PARA UNA DUCTILIDAD $U=6$	141
FIGURA 6-13: PROMEDIO DE LAS COMPONENTES VERTICALES DE LOS ESPECTROS ELÁSTICOS REDUCIDOS, NORMALIZADOS A 0.4G PARA UNA DUCTILIDAD $U=4$	142
FIGURA 6-14: PROMEDIO DE LAS COMPONENTES VERTICALES DE LOS ESPECTROS ELÁSTICOS REDUCIDOS, NORMALIZADOS A 0.4G PARA UNA DUCTILIDAD $U=6$	143
FIGURA 6-15: PROMEDIO DE LAS COMPONENTES HORIZONTALES DE LOS ESPECTROS ELÁSTICOS REDUCIDOS, NORMALIZADOS A 0.4G PARA UNA DUCTILIDAD $U=4$	144
FIGURA 6-16: PROMEDIO DE LAS COMPONENTES HORIZONTALES DE LOS ESPECTROS ELÁSTICOS REDUCIDOS, NORMALIZADOS A 0.4G PARA UNA DUCTILIDAD $U=6$	145
FIGURA 6-17: PROMEDIO PARA LAS COMPONENTES VERTICALES, DUCTILIDAD $U=4$	146
FIGURA 6-18: PROMEDIO PARA LAS COMPONENTES VERTICALES, DUCTILIDAD $U=6$	146
FIGURA 6-19: PROMEDIO PARA LAS COMPONENTES HORIZONTALES, DUCTILIDAD $U=4$	147

FIGURA 6-20: PROMEDIO PARA LAS COMPONENTES HORIZONTALES, DUCTILIDAD $U=6$	147
FIGURA 7-1: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA FALLA	150
FIGURA 7-2: PATRÓN DE RADIACIÓN DE LAS ONDAS P Y S	150
FIGURA 7-3: REPRESENTACIÓN DE LOS MECANISMOS FOCALES MÁS COMUNES Y SUS CORRESPONDIENTES FALLAS GENERADORAS	151
FIGURA 7-4: FALLAS EN EL ECUADOR	152
FIGURA 7-5: FALLAS CERCA DE LA CIUDAD DE QUITO	154
FIGURA 7-6: FALLA INVERSA DE QUITO	155
FIGURA 7-7: FALLA DE NONO	156
FIGURA 7-8: FALLA DE OTAVALO	156
FIGURA 7-9: FALLA DE PISAYAMBO	157
FIGURA 7-10: FALLA DE SUBDUCCIÓN	160
FIGURA 7-11: FALLAS DE RUMBO CONSIDERADAS EN ESTE ESTUDIO	161
FIGURA 7-12: FORMA DE MEDICIÓN DEL AZIMUT PARA LA BASE DE DATOS DEL PEER	165
FIGURA 7-13: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UNIDADES DE G PARA EL REGISTRO 1048	168
FIGURA 7-14: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UNIDADES DE G PARA EL REGISTRO 1087	168
FIGURA 7-15: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UNIDADES DE G PARA EL REGISTRO 1078	169
FIGURA 7-16: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UNIDADES DE G PARA EL REGISTRO 1086	169
FIGURA 7-17: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UNIDADES DE G PARA EL REGISTRO 3549	170
FIGURA 7-18: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UNIDADES DE G PARA EL REGISTRO 1034	170
FIGURA 7-19: FALLAS PARECIDA A FALLA DE QUITO	171
FIGURA 7-20: FALLA DE SAN ANDRÉS (SAN ANDREAS FAULT)	172
FIGURA 7-21: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UNIDADES DE G PARA EL REGISTRO 28	173
FIGURA 7-22: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UNIDADES DE G PARA EL REGISTRO 31	174
FIGURA 7-23: FALLAS PARECIDA A FALLA DE NONO	174

FIGURA 7-24: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UNIDADES DE G PARA EL REGISTRO 471	176
FIGURA 7-25: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UNIDADES DE G PARA EL REGISTRO 472	176
FIGURA 7-26: FALLAS PARECIDA A FALLA DE OTAVALO.....	177
FIGURA 7-27: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UNIDADES DE G PARA EL REGISTRO 557	179
FIGURA 7-28: FALLAS PARECIDA A FALLA DE OTAVALO.....	179
FIGURA 7-29: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UNIDADES DE G PARA EL REGISTRO 1773.....	181
FIGURA 7-30: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UNIDADES DE G PARA EL REGISTRO 1833.....	181
FIGURA 7-31: FALLAS PARECIDA A FALLA DE PISAYAMBO	182
FIGURA 7-32: FALLAS PARECIDA A FALLA DE SUBDUCCIÓN	182
FIGURA 7-33: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL, AMORTIGUAMIENTO DE 5% (PERÚ, 1966)	183
FIGURA 7-34: FALLAS PARECIDA A FALLA DE SUBDUCCIÓN	184
FIGURA 7-35: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL, AMORTIGUAMIENTO DE 5% (PERÚ, 1970)	185
FIGURA 7-36: FALLAS PARECIDA A FALLA DE SUBDUCCIÓN	186
FIGURA 7-37: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL, AMORTIGUAMIENTO DE 5% (PERÚ, 1974)	187
FIGURA 7-38: ESPECTRO DE DISEÑO BAJO CONDICIONES NORMALES, PARA LA CIUDAD DE QUITO.....	192
FIGURA 7-39: ESPECTROS PARA FALLA INVERSA	192
FIGURA 7-40: ESPECTROS PARA FALLA INVERSA Y ESPECTRO PROPUESTO POR EL CEC .	192
FIGURA 7-41: ESPECTROS PARA FALLA DE RUMBO	193
FIGURA 7-42: ESPECTROS PARA FALLA DE RUMBO Y ESPECTRO PROPUESTO POR EL CEC	193
FIGURA 7-43: ESPECTROS PARA FALLA DE RUMBO Y ESPECTRO PROPUESTO POR EL CEC MÁXIMO.....	194
FIGURA 7-44: ESPECTROS PARA FALLA DE RUMBO Y ESPECTRO PROPUESTO POR EL CEC MÍNIMO.....	195

FIGURA 7-45: ESPECTROS PARA FALLA DE RUMBO Y ESPECTRO PROPUESTO POR EL CEC PARA UN HOSPITAL.....	196
FIGURA 7-46: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL, AMORTIGUAMIENTO DE 5% Y CEC (PERÚ, 1966).....	197
FIGURA 7-47: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL, AMORTIGUAMIENTO DE 5% (PERÚ, 1970)	198
FIGURA 7-48: PSEUDO ACELERACIÓN ESPECTRAL, AMORTIGUAMIENTO DE 5% (PERÚ, 1974)	199
FIGURA 7-49: ESPECTROS ELÁSTICOS NORMALIZADOS PARA FALLAS DE RUMBO	200
FIGURA 7-50: PROMEDIO DE ESPECTROS ELÁSTICOS NORMALIZADOS PARA FALLAS DE RUMBO.....	200
FIGURA 7-51: ESPECTROS ELÁSTICOS NORMALIZADOS PARA FALLAS INVERSAS	201
FIGURA 7-52: PROMEDIO DE ESPECTROS ELÁSTICOS NORMALIZADOS PARA FALLAS INVERSAS	201
FIGURA 7-53: PROMEDIO DE ESPECTROS ELÁSTICOS NORMALIZADOS PARA FALLAS DE RUMBO E INVERSAS.....	202

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1-1: VALORES LÍMITE DEL ESPECTRO DE RESPUESTA	7
TABLA 1-2: VALORES DEL COEFICIENTE DE REDUCCIÓN DE RESPUESTA ESTRUCTURAL R.....	8
TABLA 1-3: FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESPUESTA R PARA ESTRUCTURAS DIFERENTES A LAS DE EDIFICACIÓN.	9
TABLA 1-4: RESUMEN DE ESTACIONES.....	14
TABLA 1-5: FECHAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS ACELERÓGRAFOS	14
TABLA 1-6: VALORES MÁXIMOS DE REGISTROS REPRESENTATIVOS A NIVEL MUNDIAL	16
TABLA 1-7: RESUMEN DE ACELEROGRAMAS	17
TABLA 1-8: VALORES MÁXIMOS DE LOS REGISTROS DE ACELERACIONES SIN CORRECCIÓN DE LA LÍNEA BASE	17
TABLA 1-9: CARACTERÍSTICAS DE LOS SISMOS CONSIDERADOS	18
TABLA 1-10: UBICACIÓN DE LOS REGISTROS RESPECTO AL EVENTO	18
TABLA 3-1: VALORES LÍMITE DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA	66
TABLA 3-2: FACTORES DE AMPLIFICACIÓN.....	68
TABLA 3-3: AMPLITUDES MÁXIMAS DE LOS ESPECTROS ELÁSTICOS PARA 5%	69
TABLA 3-4: VALORES DE LOS RANGOS DE PERÍODOS EN LA REGIÓN SENSIBLE A LA VELOCIDAD.....	71
TABLA 3-5: TMIN Y TMAX PARA SUBGRUPO I.....	73
TABLA 3-6: TMIN Y TMAX PARA SUBGRUPO II.....	74
TABLA 4-1: VALORES DE Tc SEGÚN C.E.C.	99
TABLA 4-2: VALORES DE A SEGÚN AGUIAR, ROMO Y ARAGÓN.....	101
TABLA 4-3: VALORES PROPUESTOS DE R _R POR EL ATC-1995.....	103
TABLA 5-1: TIPOS DE SUELO SEGÚN C.E.C. PARA LAS ESTACIONES CONSIDERANDO LOS ESPECTROS DE FOURIER	120
TABLA 5-2: TIEMPO TOTAL DE LOS REGISTROS EN LAS ESTACIONES PARA EL MÉTODO DE NAKAMURA	121
TABLA 5-3: FACTORES DE CONVERSIÓN DE CUENTAS A M/S ²	122
TABLA 5-4: RESUMEN DE LOS TIPOS DE SUELO SEGÚN C.E.C. PARA LAS ESTACIONES	122
TABLA 7-1: TERREMOTOS DEL ECUADOR POR SUBDUCCIÓN CON INTENSIDAD MAYOR A VIII	159
TABLA 7-2: FALLAS Y PLIEGUES CUATERNARIOS CONSIDERADOS.....	162

TABLA 7-3: DISTANCIAS DE LAS FALLAS DE RUMBO TOMADAS HACIA LA CIUDAD DE QUITO 163
TABLA 7-4: AZIMUT DE LAS FALLAS DE RUMBO TOMADAS HACIA LA CIUDAD DE QUITO..... 164

RESUMEN

La presente tesis documenta los resultados del procesamiento de acelerogramas obtenidos con acelerógrafos analógicos de la red de acelerógrafos estacionados en la ciudad de Quito. Se presenta una comparación entre los registros, los mismos que son procesados desde la corrección por línea base. Las herramientas que se utilizan para el análisis de los acelerogramas son el espectro elástico de respuesta de aceleración, el espectro inelástico y el espectro de amplitudes de Fourier. Con base en la comparación efectuada, se aprecian diferencias notorias en el contenido de frecuencias y las formas de los respectivos espectros lo cual obedece a los efectos de acimut, distancia epicentral y características de los suelos donde se ubican los acelerógrafos.

En base al análisis de los espectros de respuesta de los registros mencionados y métodos estadísticos, se presentan consideraciones para la discusión del espectro elástico de diseño existente en el código actual. Se incluyen, además, comparaciones con espectros obtenidos en condiciones parecidas al Ecuador. Se presentan conclusiones y recomendaciones al respecto.

PRESENTACIÓN

El código ecuatoriano de la construcción (C.E.C.) presenta actualmente recomendaciones para el diseño sismorresistente utilizando, en el método estático para el cálculo de las fuerzas laterales, un espectro sísmico elástico de diseño.

Una de las deficiencias de este análisis (modal espectral) es que no incluye el efecto de la duración del temblor, lo que puede conducir a pérdida de resistencia de una estructura. Las especificaciones de diseño corresponden a un temblor cuya duración está entre 20 y 30 segundos. Este efecto es importante en el diseño de estructuras ubicadas en zonas cercanas a focos de sismos de larga duración, como aquellos ubicados en la zona de subducción (Ecuador). Es por eso que una mejor forma es el análisis de la respuesta en el tiempo, mediante el uso de acelerogramas (por lo menos 5).

De entre los trabajos existentes de este tipo, se ha tomado el informe técnico (Referencia 7) que trata el asunto. En el mismo se trabaja con nueve acelerogramas recopilados de siete estaciones. Dichos acelerogramas corresponden a cinco temblores registrados en la ciudad de Quito. (Arellano, 2006)

En dicho informe se presentan:

- acelerogramas registrados
- acelerogramas con corrección de la línea base
- espectros de amplitudes de Fourier
- espectros de respuesta de aceleración
- espectros promedios, espectros medios escalados y espectros del C.E.C.

El anteproyecto utilizó un software para la lectura y procesamiento de los acelerogramas registrados proveídos por los fabricantes de los acelerógrafos. Sin

embargo se notan deficiencias de los programas utilizados, ya que se presentan variaciones no razonables en las ordenadas para períodos grandes.

En el presente proyecto se pretende la obtención de los acelerogramas y espectros desarrollados en el anteproyecto pero utilizando la base teórica desarrollada en diferentes tesis y otras referencias bibliográficas para obtener valores más confiables. Para ello se procederá al procesamiento y corrección de los acelerogramas recopilados y mediante el uso de un software, se obtendrán los espectros de respuesta elásticos, inelásticos y los espectros de Fourier, para luego de un análisis estadístico, compararlos con el espectro actual del C.E.C. y de esta forma tener otro aporte para el manejo de acelerogramas, desde la toma de datos, las correcciones de los mismos y la obtención de los espectros resultantes, de modo de contribuir en la toma de decisiones en el diseño sismorresistente y ser una ayuda para la discusión del espectro propuesto por el C.E.C. y el valor adoptado para el diseño sismorresistente de estructuras.

CAPÍTULO 1. SISMOS EN EL ECUADOR

1.1. INTRODUCCIÓN

Los movimientos sísmicos son producidos por la liberación de energía en la corteza de la Tierra cuando ocurre un deslizamiento súbito a lo largo de una falla activa. Esta energía toma la forma de emisiones de ondas sísmicas a través de los estratos geológicos. Existen varios factores relacionados al mecanismo de la fuente, al camino de propagación de las ondas de la fuente al sitio y a las condiciones locales del suelo, que pueden afectar la vibración del suelo en un sitio determinado.

La alta peligrosidad sísmica en el Ecuador debido a su ubicación en el cinturón de fuego del Pacífico, influye directamente en la vulnerabilidad y en el riesgo sísmico a los que estamos expuestos sus habitantes. Es por esto que el diseño sismorresistente de estructuras toma especial interés en nuestro medio. Es válido por tanto, establecer parámetros de discusión sobre los valores actuales tomados por el código, de tal forma de que se pueda tener una manera diferente de percepción que influya en la apreciación del fenómeno. Es decir, considerando el análisis de la respuesta en el tiempo como ayuda al análisis modal espectral.

1.2. CONSIDERACIONES SOBRE ESTUDIOS DE RIESGO SÍSMICO EN EL PAÍS

El cálculo del peligro sísmico se realiza con la finalidad de predecir probabilísticamente las posibles aceleraciones, velocidades y desplazamientos que podrían ocurrir en un lugar determinado, considerando los datos de sismos pasados y las características tectónicas asociadas a la actividad sísmica.

El estudio de peligro sísmico en el país está aún en desarrollo. Falta definir nuevas zonas sismogénicas y el modelaje de fallas activas, así como el estudio de curvas de atenuación de aceleraciones, velocidades, desplazamientos e intensidades sísmicas que tomen en cuenta la anisotropía y heterogeneidad existentes, además de la

determinación de la recurrencia sísmica con las nuevas fuentes sismogénicas definidas y los catálogos de hipocentros actualizados.

1.3. ESTUDIOS PRELIMINARES DE RIESGO SÍSMICO

En el estudio preliminar de riesgo sísmico tomado de la Referencia 35, se trabaja con leyes de atenuación para el cálculo tanto de la aceleración máxima del suelo usando el modelo propuesto por Katayama como de la velocidad máxima del suelo usando el modelo propuesto por Kanai. Ya que estas relaciones son tomadas por estudios realizados en otras localidades, constituyen la mayor fuente de incertidumbre por la diversidad de los suelos, como menciona el autor. Se utiliza el siguiente criterio:

“Se decidió utilizar un modelo que sea representativo de los restantes, es decir un modelo promedio de los usados en el resto del mundo; entonces al tomar el promedio de los modelos propuestos por Sousa Oliveira y por Mc. Guire, que son los mas utilizados y representativos, se obtiene la mejor aproximación con las relaciones de T. Katayama para el cálculo de aceleraciones, y, la relación de K. Kanai para las velocidades.” (Posso, 1985). Dichas ecuaciones se presentan bajo el título de Ecuación 1-1 y Ecuación 1-2.

$$\log A = 2.308 - 1.637 \cdot \log(R + 30) + 0.411 \cdot M$$

Ecuación 1-1: Modelo de atenuación de aceleración según Katayama, T.

$$\log V = 0.61 \cdot M - (1.66 + 3.60 / x) \log x - (0.631 + 1.83 / x)$$

Ecuación 1-2: Modelo de atenuación de velocidad según Kanai, K.

Con las aceleraciones halladas en el estudio estadístico de la información contenida en el catálogo del Observatorio Astronómico de Quito, se procede a realizar un análisis probabilístico usando la distribución de Poisson para el cálculo de las tasas medias de ocurrencia anual de las aceleraciones y distribuciones de valores extremos para el cálculo de la aceleración asociada con una probabilidad de excedencia del 10% para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años.

1.3.1. LEYES DE ATENUACIÓN

La energía liberada por un sismo se disipa mediante la transmisión por tierra de un complicado tren ondulatorio, que sufre atenuaciones tanto de tipo geométrico como de tipo mecánico.

La atenuación geométrica es la disminución de la densidad de energía que atraviesa un área unitaria, al aumentar la distancia con respecto a la fuente (puede ser comparada con la atenuación que sufre la luz o el sonido con la distancia).

La atenuación mecánica se refiere al movimiento de las partículas en las ondas. En las de cortante las partículas se desplazan perpendicularmente a la transmisión de energía, mientras que en las ondas de compresión este movimiento es paralelo. Es decir que el movimiento de partículas implica fricción y por tanto atenuación en la energía, por eso en su viaje hay atenuación que tiene una forma geométrica.

1.3.2. ECUACIONES DE LEYES DE ATENUACIÓN

Son expresiones de ajuste matemático que pretenden relacionar la intensidad del movimiento sísmico en un lugar determinado y que pueden ser expresadas en términos de la aceleración máxima del terreno, de la velocidad del terreno, del desplazamiento máximo del terreno, etc. en función de la magnitud y de la distancia focal y que han sido obtenidas como ajuste matemático de los sismos alrededor del mundo.

1.3.3. FORMA DE LAS ECUACIONES DE LEYES DE ATENUACIÓN

La forma básica de estas ecuaciones debidas al Dr. Luis Esteva es la expuesta en la Ecuación 1-3: Forma de la intensidad del movimiento sísmico:

$$Y = b_1 \cdot \exp(b_2 \cdot M) \cdot (R + b_4)^{-b_3}$$

Ecuación 1-3: Forma de la intensidad del movimiento sísmico

donde:

Y: intensidad del movimiento sísmico expresada en función de: a_{max} [cm/s²], v_{max} [cm/s], d_{max} [cm], ordenadas espectrales S_a , S_v , S_d , etc.

M: magnitud del temblor. No se especifica la escala. Depende de la estadística que debe ser única y coherente.

R: distancia focal [km]

b_1 , b_2 , b_4 : constantes obtenidas del ajuste estadístico de los datos del autor, utilizados para las leyes de atenuación.

$\exp(b_2 M)$: trata de describir la relación entre la magnitud y la energía del temblor.

$(R+b_4)^{-b_3}$: atenuación geométrica de las ondas sísmicas en forma esférica o cilíndrica

b_4 [km]: factor correctivo de campo cercano. Efecto de la hipótesis de fuente puntual de energía sísmica en una zona.

1.4. CÓDIGO ECUATORIANO DE LA CONSTRUCCIÓN

El peligro sísmico en el Ecuador y la correspondiente determinación del sismo de diseño del Código de Práctica Ecuatoriano CPE INEN 5:2001, PARTE 1, CAPITULO 12 se basa en:

- El estudio de 53 fuentes sismogénicas contenidas en 10 provincias sismo tectónicas con sus parámetros sismológicos
 - magnitud mínima
 - tasa media de actividad sísmica
 - magnitud máxima probable
 - mecanismos focales

- sismicidad y neotectónica
 - características generales
-
- Los principales eventos históricos y la consideración de 22000 sismos locales de los que se han eliminado las réplicas y los premonitores, y la magnitud queda acotada entre $3.9 \leq M \leq 8.6$.
 - El uso de la base de datos microsísmicos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.
 - La utilización de las curvas de atenuación de Young para las fuentes de subducción y las curvas de Katayama para las fuentes de fallamiento continental.
 - El estudio de las incertidumbres en los parámetros utilizados.
 - La modelación de la ocurrencia de los sismos como un modelo estocástico de Poisson.
 - La suposición de que el sismo de diseño es un evento que tiene una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años.

1.4.1. FACTOR DE ZONA SÍSMICA: Z

Representa la aceleración máxima efectiva sobre roca, esperada, expresada como fracción de la gravedad. Depende del peligro sísmico esperado para el lugar de la edificación.

La Figura 1-1: Zonas sísmicas, muestra el mapa de Ecuador distribuido por franjas considerando el factor Z.

1.4.2. ESPECTRO SÍSMICO ELÁSTICO DE DISEÑO: C

Expresado como una fracción de la gravedad, es el espectro especificado tanto para el análisis estático como para el análisis dinámico y depende del tipo del perfil del suelo de cimentación. Se calcula con la Ecuación 1-4: Espectro elástico de diseño.

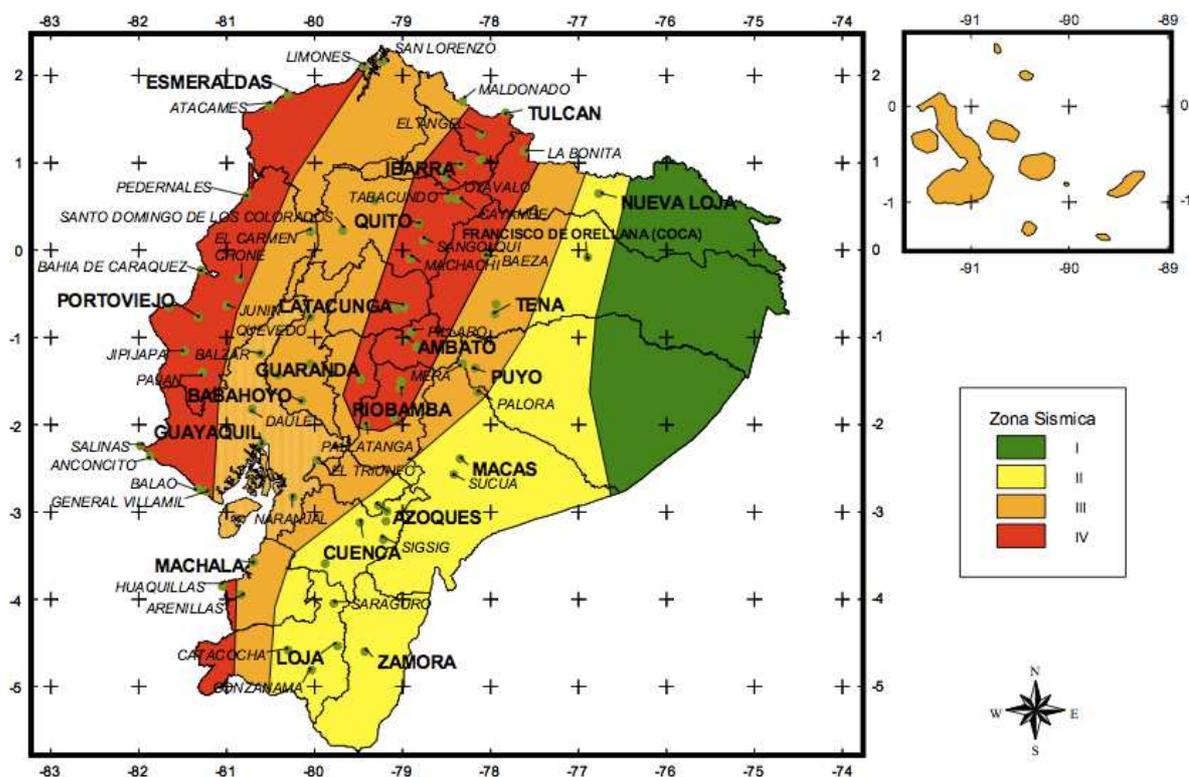


Figura 1-1: Zonas sísmicas

Fuente: Código Ecuatoriano de la Construcción (2002)

$$0.5 \leq C = \frac{1.25 \cdot S^S}{T} \leq C_m$$

Ecuación 1-4: Espectro elástico de diseño

Fuente: Código Ecuatoriano de la Construcción (2002)

El coeficiente límite C_m y el coeficiente de suelo S son constantes que dependen del perfil de suelo, mientras que T es el período fundamental.

La Tabla 1-1: Valores límite del espectro de respuesta, muestra, para cada tipo de suelo, el valor de la constante S usada en el cálculo de la curva exponencial de transición, la aceleración máxima del espectro en función de la gravedad C_m y el rango de los períodos en el cual la función no es constante. El gráfico de dichos valores en los rangos correspondientes se presenta en la Figura 1-2: Espectro sísmico elástico de diseño.

TIPO DE PERFIL DE SUELO	DESCRIPCION	S	Cm	T min	T máx.
S1	Roca o suelo firme	1.0	2.5	0.5	2.50
S2	Intermedio	1.2	3.0	0.52	3.11
S3	Blando	1.5	2.8	0.82	4.59
S4	Condiciones especiales	2.0	2.5	2.00	10.00

Tabla 1-1: Valores límite del espectro de respuesta

Fuente: Código Ecuatoriano de la Construcción (2002)

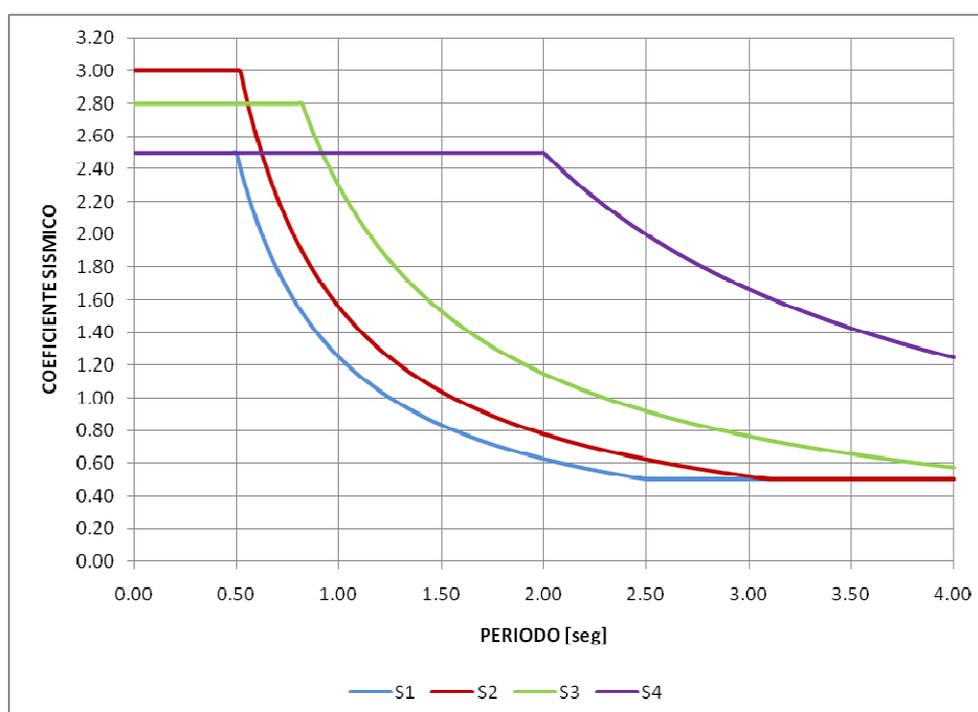


Figura 1-2: Espectro sísmico elástico de diseño

Fuente: Código Ecuatoriano de la Construcción (2002)

1.4.3. FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA SÍSMICA O COEFICIENTE DE REDUCCIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL: R

Según el CEC, debe tomarse el menor de los valores para los casos en los cuales el sistema resistente estructural resulte en una combinación de varios sistemas estructurales como los descritos en la Tabla 1-2: Valores del coeficiente de

reducción de respuesta estructural R. Para otro tipo de estructuras diferentes a las de edificación, se deberá cumplir con los requisitos establecidos en la sección 7 del mismo, en donde se presentan los valores expuestos en la Tabla 1-3: Factor de reducción de respuesta R para estructuras diferentes a las de edificación. El valor de R puede aplicarse en el cálculo del cortante basal, siempre y cuando la estructura sea diseñada cumpliendo con todos los requisitos de diseño sismorresistente acordes con la filosofía de diseño del código. (Código Ecuatoriano de la Construcción, 2002).

SISTEMA ESTRUCTURAL	R
Sistema de pórticos espaciales sismo-resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas o de acero laminado en caliente, con muros estructurales de hormigón armado (sistemas duales).	12
Sistema de pórticos espaciales sismo-resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas o de acero laminado en caliente.	10
Sistemas de pórticos espaciales sismo-resistentes, de hormigón armado con vigas banda y muros estructurales de hormigón armado (sistemas duales).	10
Sistema de pórticos espaciales sismo-resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas y diagonales rigidizadoras.	10
Sistemas de pórticos espaciales sismo-resistentes de hormigón armado con vigas banda y diagonales rigidizadoras.	9
Sistemas de pórticos espaciales sismo-resistentes de hormigón armado con vigas banda.	8
Estructuras de acero con elementos armados de palcas o con elementos de acero conformados en frío. Estructuras de aluminio.	7
Estructuras de madera.	7
Estructuras de mampostería reforzada o confinada.	5
Estructuras con muros portantes de tierra reforzada o confinada.	3

Tabla 1-2: Valores del coeficiente de reducción de respuesta estructural R
Fuente: Código Ecuatoriano de la Construcción (2002)

TIPO DE ESTRUCTURAS	R
Reservorios y depósitos, incluidos tanques y esferas, soportadas mediante columnas o soportes arriostrados o no arriostrados.	3
Silos de hormigón fundido en sitio y chimeneas que poseen paredes continuas desde la cimentación.	5
Estructuras tipo cantiliver tales chimeneas, silos y depósitos apoyados en sus bordes.	4
Torres en celosía (autoportantes o atirantadas).	4
Estructuras en forma de péndulo invertido.	3
Torres de enfriamiento.	5
Depósitos elevados soportados por un pila o por apoyos no arriostrados.	4
Letreros y carteleras.	5
Estructuras para vallas publicitarias y monumentos.	3
Otras estructuras no descritas en este código.	3

Tabla 1-3: Factor de reducción de respuesta R para estructuras diferentes a las de edificación.

Fuente: Código Ecuatoriano de la Construcción (2002)

La reducción de la resistencia depende de algunos factores, entre ellos: el tipo de estructura, el tipo del suelo, el período de vibración considerado (elástico o con pérdida de la rigidez), redundancia interna, amortiguamiento, ductilidad. El código considera la tipología y el material y pretende disminuir la ordenada espectral elástica para suponer un comportamiento inelástico de la estructura, pero para poder hacer esto, la estructura debe tener una adecuada ductilidad y suficiente disipación de energía, lo que se consigue con el detallamiento expresado en las normas, tales como confinamiento del nudo en el caso del hormigón armado. Es por esto que es muy importante prestar atención a las disposiciones especiales para el diseño sismorresistente.

1.5. PARTICULARIDADES DE LOS SISMOS ECUATORIANOS

La región ecuatoriana es un segmento del Cinturón Circum Pacífico, donde se nota una alta sismicidad existente en la Costa. Gran parte de los eventos sísmicos ocurridos en el país son producto de la interacción de las placas Sudamericana y Nazca. El resultado de este encuentro, y la subducción de ésta última, determina las diferentes características sísmicas entre el litoral y el interior del país.

Algunas investigaciones parecen indicar que las características de los terremotos de mecanismo focal de tipo subductivo (costa oeste sudamericana y Japón), tienen algunas diferencias con las correspondientes a mecanismos transcursivos, como los que azotan a la costa oeste de los Estados Unidos, lo cual podría introducir la posibilidad de cambios significativos en la magnitud de las acciones de diseño. (Fernández, 1984).

Los acelerogramas han mostrado características inusuales, en comparación con eventos sísmicos ocurridos en otras partes del mundo. En primer lugar, existe un fuerte contenido de altas frecuencias y en segundo lugar, una baja atenuación de las aceleraciones con la distancia. De igual forma, se observa un menor daño para el nivel de aceleraciones máximas registradas, en comparación con registros de otros lugares del mundo; esto es explicable debido a la relación inversa entre el daño estructural y el número de cortes por cero. (Meneses y Alva, 1986)

1.6. RED DE ACELEROGRAFOS DE LA CIUDAD DE QUITO

Los registros de aceleraciones utilizados para este estudio son tomados del informe mencionado en la referencia 7. Se presenta a continuación el detalle de los registros y las estaciones.

1.6.1. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES

ESTACIÓN Nº 1: Metalmecánica San Bartolo (SB)

UBICACIÓN: Avenida P. V. Maldonado y Calle Balzar.
Cda. Epiclachima. Sector 49. Guajaló.

COORDENADAS GEOGRAFICAS: LAT. 0°15'58" S, LONG. 78°31'32" W

CLASIFICACIÓN DEL SUELO: ML, SM

NIVELACIÓN DEL EJE 2: -44

NIVELACIÓN DEL EJE 3: -45

ORIENTACIÓN DEL EJE +3: N 15°45' E

OPERACIÓN: Desde el 24 de octubre de 1991.
Continúa hasta la presente fecha.

ESTACIÓN Nº 2: Colegio Borja Nº 2 (CB)

UBICACIÓN: Avenida 9 de octubre y Pasaje Murillo.
Cda. Mariscal Sucre. Sector 14.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS: LAT. 0°11'48" S, LONG. 78°29'30" W

CLASIFICACIÓN DEL SUELO: ML, SM

NIVELACIÓN DEL EJE 2: -38

NIVELACIÓN DEL EJE 3: -33

ORIENTACIÓN DEL EJE +3: N 11°15' E

OPERACIÓN: Desde el 25 de octubre de 1991
Hasta el 4 de julio de 1995.

ESTACIÓN Nº 3: Hospital Metropolitano (HM)

UBICACIÓN: Calle San Gabriel y Pasaje Espinosa.
Rumipamba. Sector 28.

COORDENADAS GEOGRAFICAS: LAT. 0°10'53" S, LONG. 78°30'05" W

CLASIFICACIÓN DEL SUELO: ML, SM, OL

NIVELACIÓN DEL EJE 2: -38

NIVELACIÓN DEL EJE 3: -35

ORIENTACIÓN DEL EJE +3: N°E

OPERACIÓN: Desde el 28 de noviembre de 1991.
Hasta el 28 de junio del 2005.

ESTACIÓN Nº 4: Convento de San Francisco (SF)

UBICACIÓN: Calles Imbabura y Mideros.
González Suárez. Sector 1.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS: LAT. 0°12'56" S, LONG. 78°30'48" W

CLASIFICACIÓN DEL SUELO: OL, ML, SM

NIVELACIÓN DEL EJE 2: -54

NIVELACIÓN DEL EJE 3: -66

ORIENTACIÓN DEL EJE +3: N 28°7.5' E

OPERACIÓN: Desde el 10 de diciembre de 1991.
Hasta el 15 de octubre de 1992.

ESTACIÓN Nº 5: Fundación Mundo Juvenil (MJ)

UBICACIÓN: Avenida de Los Shyris y Calle Bélgica.
La Carolina. Sector 30.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS: LAT. 0°10'56" S, LONG. 78°28'52" W

CLASIFICACIÓN DEL SUELO: ML, OL SM

NIVELACIÓN DEL EJE 2: -39

NIVELACIÓN DEL EJE 3: 01

ORIENTACIÓN DEL EJE +3: N 50°37.5' E

OPERACIÓN: Desde el 19 de diciembre de 1991.
Continúa hasta la presente fecha.

ESTACIÓN Nº 6: Museo Aurelio Espinosa Pólit (AE)

UBICACIÓN: Calles José Nogales y San Ignacio de Loyola.
Cotocollao. Sector 52.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS: LAT. 0°06'26" S, LONG. 78°29'33" W

CLASIFICACIÓN DEL SUELO: SM, ML

NIVELACIÓN DEL EJE 2: -95

NIVELACIÓN DEL EJE 3: -67

ORIENTACIÓN DEL EJE +3: N 21°22' W

OPERACIÓN: Desde el 27 de diciembre de 1991.
Hasta el 21 de diciembre del 2005.

ESTACIÓN Nº 7: Observatorio Astronómico de Quito (OA)**UBICACIÓN:** Parque de La Alameda.

El Belén.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS: LAT. 0°12'57" S, LONG. 78°29'56" W**CLASIFICACIÓN DEL SUELO:** SM, ML**NIVELACIÓN DEL EJE 2:** 54**NIVELACIÓN DEL EJE 3:** 37**ORIENTACIÓN DEL EJE +3:** N 0°E**OPERACIÓN:** Desde el 29 de septiembre del 2000.

Continúa hasta la presente fecha.

Los tipos de suelos presentes en las estaciones son clasificados según el Sistema Unificado De Clasificación De Suelos (S.U.C.S.) de acuerdo al cual se tiene:

Suelos de grano fino. Más de la mitad pasa por el tamiz No. 200

- ML: limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillas con ligera plasticidad.
- OL: limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad

Suelos de grano grueso. Más de la mitad es retenido por el tamiz No. 200

- SM: arenas limosas, mezclas de arena y limo mal graduadas.

La Tabla 1-4: Resumen de estaciones, presenta el tipo de suelo y la nomenclatura utilizada para identificar los sitios donde fueron registrados los acelerogramas.

Además, para una mejor guía, las estaciones han sido posicionadas geográficamente usando sus coordenadas. Esto se muestra en la Figura 1-3: Ubicación de los acelerógrafos de la ciudad de Quito.

Estación	Tipo de suelo	Ubicación	Nom.
1	ML, SM	San Bartolo	SB
2	ML, SM	Colegio Borja	CB
3	ML, SM, OL	Hospital Metropolitano	HM
4	OL, ML, SM	Convento San Francisco	SF
5	ML, OL, SM	Fundación Mundo Juvenil	MJ
6	SM, ML	Museo Aurelio Espinoza Pólit	AE
7	SM, ML	Observatorio Astronómico de Quito	OA

Tabla 1-4: Resumen de estaciones

Fuente: Arellano (2006)

Estación	Operación	Hasta
1	24 de Octubre de 1991	
2	25 de octubre de 1995	4 de julio de 1995
3	28 de noviembre de 1991	28 de junio del 2005
4	10 de diciembre de 1991	15 de octubre de 1992
5	19 de diciembre de 1991	
6	27 de diciembre de 1991	21 de diciembre del 2005
7	29 de septiembre del 2000	

Tabla 1-5: Fechas de funcionamiento de los acelerógrafos

Fuente: Arellano (2006)

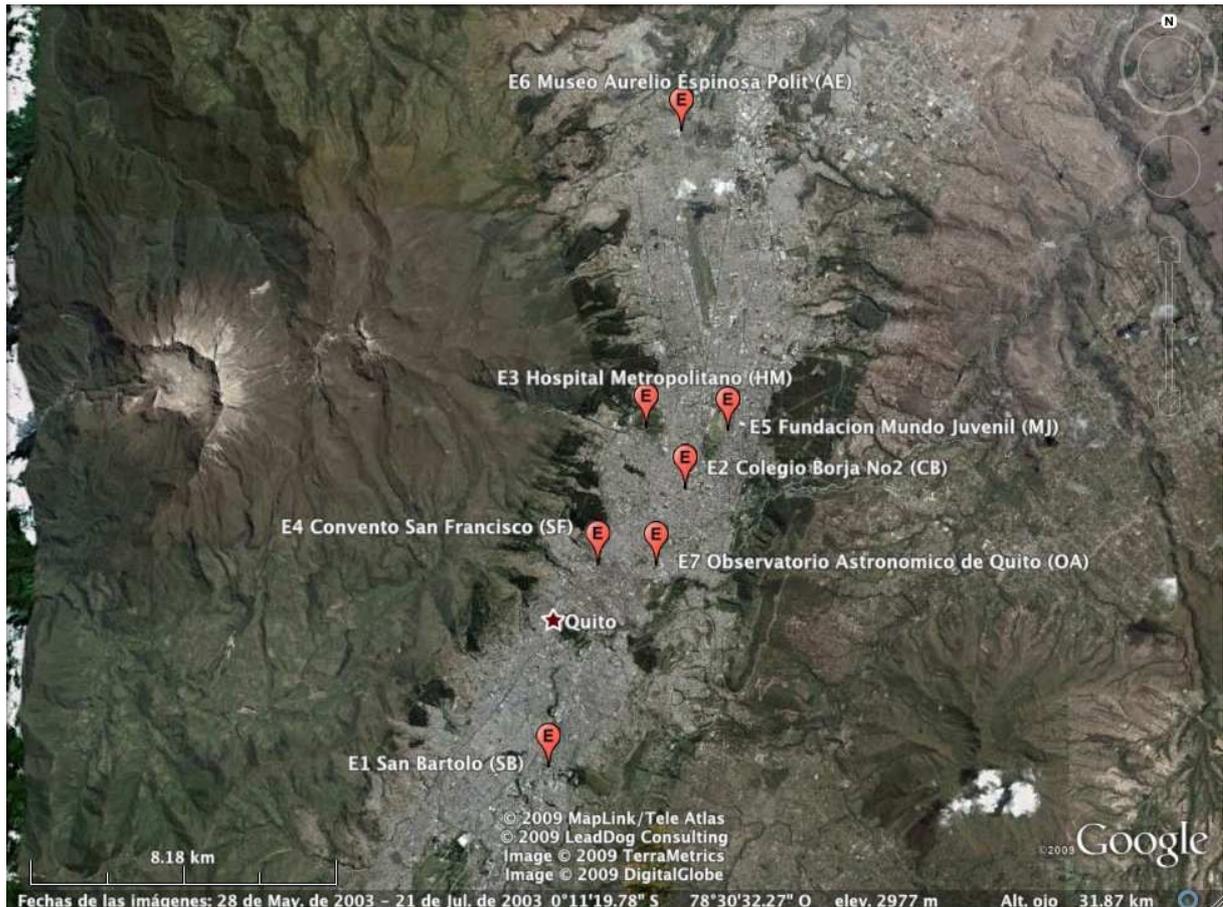


Figura 1-3: Ubicación de los acelerógrafos de la ciudad de Quito

1.6.2. ACELEROGRAMAS.

Después del análisis y depuración de todos los registros obtenidos con los acelerógrafos, se han obtenido nueve acelerogramas. Corresponden a cinco temblores registrados en Quito, que produjeron efectos de pequeña intensidad en la ciudad. Los obtenidos el día 2 de octubre de 1995 corresponden al sismo con epicentro cercano a la ciudad de Macas, y el obtenido el día 28 de marzo de 1996 corresponde al sismo con epicentro cercano a la ciudad de Pujilí. (Arellano, 2006)

La Tabla 1-7: Resumen de acelerogramas, presenta los nombres de los archivos, la fecha y hora en la que fueron registrados y la duración del registro. Las aceleraciones máximas de éstos se encuentran resumidas en la Tabla 1-8: Valores máximos de los registros de aceleraciones sin corrección de la línea base.

De modo de poder conocer los eventos a los cuales corresponden las aceleraciones registradas, se presenta la Tabla 1-9: Características de los sismos considerados. Además, utilizando las coordenadas geográficas de dicha tabla, se han dispuesto en el mapa del Ecuador. Dicho gráfico se presenta en la Figura 1-4: Ubicación de los sismos considerados. Conociendo esta información, se ha hallado la Tabla 1-10: Ubicación de los registros respecto al evento, la cual pretende mostrar cuales son los registros cercanos y cuales los lejanos a los eventos.

Desde la Figura 1-5: Evento 1 hasta la Figura 1-9: Evento 5, se muestra la ubicación de los sismos y de las estaciones en donde fueron registrados cada uno de ellos. De esta forma se puede notar más claramente la distancia y dirección de su posición.

Con el objeto de correlacionar la magnitud con los parámetros máximos de movimiento del suelo, se indican a continuación algunos valores de sismos a nivel mundial.

ESTACIÓN Y COMPONENTE	AÑO	M	A	V	D
			(g)	(cm/s)	(cm)
El Centro, S00E	1940	6.3	-0.348	-33.45	-12.36
Eureka, N97E	1954	6.5	0.258	-29.38	-12.55
Kushiro-Japón, N90E	1962	7	0.478	-20.01	5.22
Tokachi-Oki-Hachinoe, N00E	1968	7.9	0.269	-35.43	-9.68
Pacoima-San Fernando, S16E	1971	6.6	1.171	113.23	-41.92
Bucarest-Rumanía, S00E	1977	7.1	0.206	-25.12	-19.93
San Juan-Argentina, S90E	1977	7.4	0.193	-20.6	6.33
La Ligua-Chile, Long	1981	6.8	-0.469	-18.83	4.49
Llolleo-Chile, N10E	1985	7.8	-0.712	-40.29	-10.49
Coralito-USA, N00E	1989	7.1	0.63	-55.2	12.03
Sylmar-Northridge, N00E	1994	7.1	0.843	-128.88	-30.67
Santa Mónica-Northridge, N90E	1994	7.1	-0.883	41.75	-15.09

Tabla 1-6: Valores máximos de registros representativos a nivel mundial

Fuente: García (1997)

EVENTO	ARCHIVO	DÍA	FECHA	HORA	DURACIÓN
1	SB550001	227	11-May-94	6:53:44	39 seg.
	CB560001	227	11-May-94	6:53:36	47 seg.
	HM570001	227	11-May-94	6:54:06	15seg.
	AE600001	227	11-May-94	6:53:48	31 seg.
2	AE600002	736	02-Oct-95	20:52:55	14 seg.
	HM570003	736	02-Oct-95	20:53:10	12 seg.
3	SB550002	737	03-Oct-95	7:46:31	34 seg.
4	AE600003	843	17-Ene-96	11:41:52	19 seg.
5	SB550006	914	28-Mar-96	18:04:23	55 seg.

Tabla 1-7: Resumen de acelerogramas

Fuente: Arellano (2006)

FECHA	ESTACION	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3
		(g)	(g)	(g)
11 Mayo 1994	SB	0.029	0.029	0.028
	CB	0.028	0.037	0.025
	HM	0.028	0.033	0.041
	AE	0.056	0.086	0.065
2 Octubre 1995	AE	0.039	0.052	0.054
	HM	0.025	0.024	0.035
3 Octubre 1995	SB	0.027	0.026	0.027
17 Enero 1996	AE	0.038	0.048	0.056
28 Marzo 1996	SB	0.029	0.026	0.026

Tabla 1-8: Valores máximos de los registros de aceleraciones sin corrección de la línea base

FECHA	HORA	MAG	PROFUND	COORDENADAS	
				LATITUD	LONGITUD
11 Mayo 1994	6:53:26	5.3	22.96	0.428	-78.778
2 Octubre 1995	20:51:24	6.9	16	-2.807	-77.951
3 Octubre 1995	9:44:59	6.1	16	-2.742	-78.031
17 Enero 1996	11:41:29	4.4	13.12	-0.035	-78.415
28 Marzo 1996	18:02:46	5.7	14.36	-1.044	-78.724

Tabla 1-9: Características de los sismos considerados

Fuente: Geofísico (2009)

FECHA	ESTACION	DIST[km]	DIR [grados]
11 Mayo 1994	SB	81	160
	CB	78	156
	HM	76	156
	AE	68	153
2 Octubre 1995	AE	294	348
	HM	286	347
3 Octubre 1995	SB	269	348
17 Enero 1996	AE	12	225
28 Marzo 1996	SB	86	14

Tabla 1-10: Ubicación de los registros respecto al evento



Figura 1-4: Ubicación de los sismos considerados



Figura 1-5: Evento 1

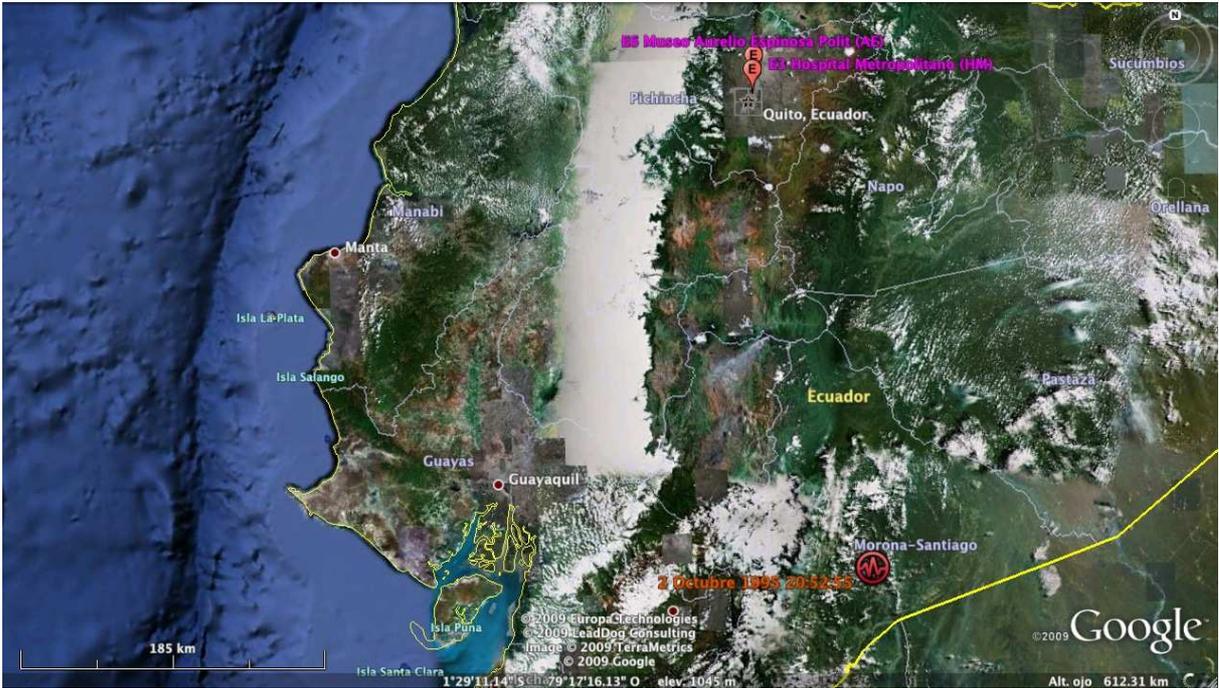


Figura 1-6: Evento 2

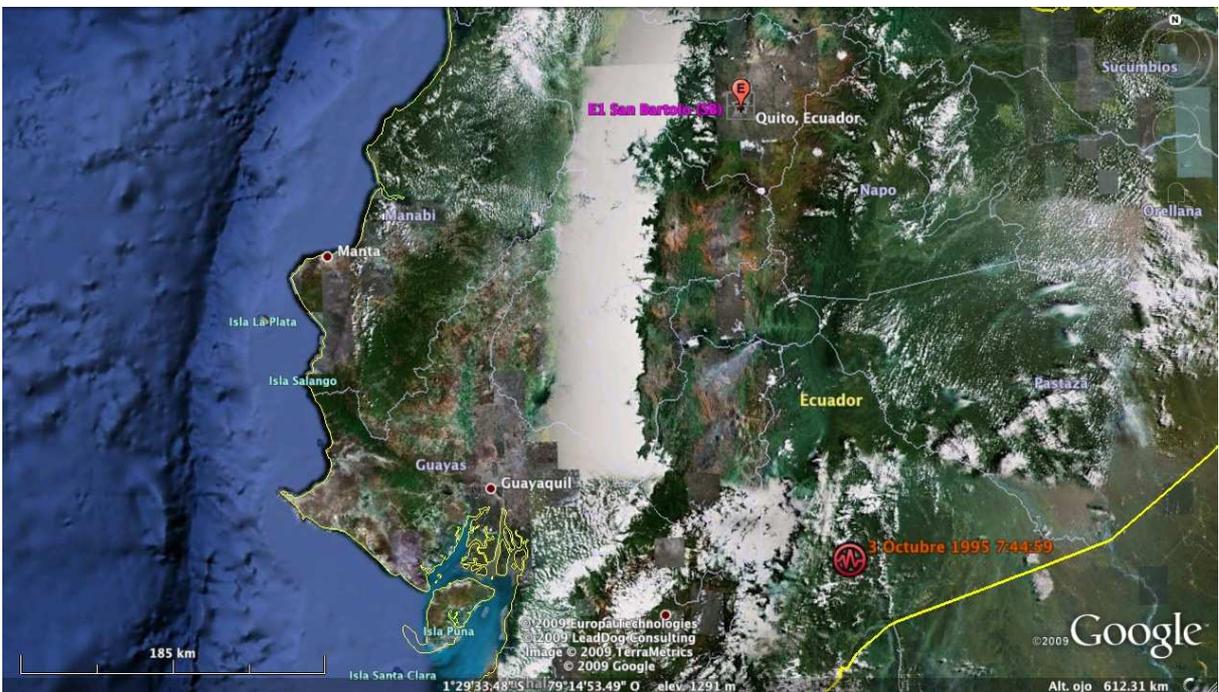


Figura 1-7: Evento 3



Figura 1-8: Evento 4

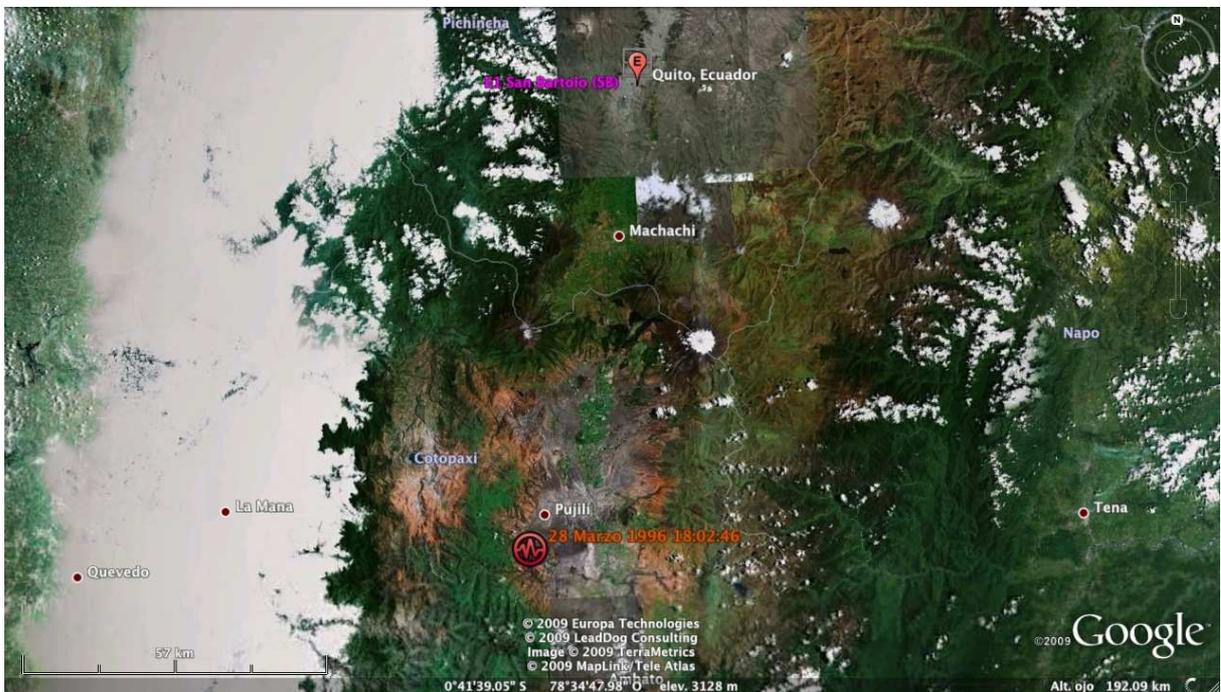


Figura 1-9: Evento 5

CAPÍTULO 2. PROCESAMIENTO Y CORRECCIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS

2.1. INTRODUCCIÓN

La información instrumental recopilada por los acelerogramas constituye un registro con contenido de datos objetivo, que permiten observar y analizar la historia de un sismo. La importancia del conocimiento de las características de los movimientos sísmicos radica en el grado de precisión del establecimiento del sismo de diseño de dicha región. Sin embargo, la señal digital obtenida sufre distorsiones, durante la etapa misma del registro y es por ello que es necesario establecer un procedimiento para extraer la información contenida en un acelerograma de una manera confiable y efectiva.

Existen dos razones fundamentales por las que se requiere que el acelerógrafo registre aceleraciones en lugar de desplazamientos:

- Para que estos últimos se registren se necesita que el instrumento disponga de un rango dinámico muy grande, puesto que un mismo valor de aceleraciones con diferentes frecuencias puede producir desplazamientos demasiado grandes o muy pequeños.
- Es más sencillo integrar numéricamente y obtener velocidades y desplazamientos a partir del registro de la aceleración, que el proceso inverso de derivación.

2.2. ACELERÓGRAFOS

El acelerógrafo es un instrumento que sirve para registrar la aceleración de un terreno en función del tiempo. Consta de dos partes: sensor triaxial y sistema de discriminación y registro, que pueden estar incluidos en una misma caja o separados en sistemas centralizables. (Roca, 1989)

Dependiendo del tipo de registro que se obtiene, los acelerógrafos pueden ser de dos tipos: analógicos y digitales.

a) Analógicos

- **Analógicos con registro gráfico directo.** Son equipos generalmente compactos. Cada uno de los sensores que constituyen la configuración triaxial lleva, solidario a la masa oscilante, un espejito sobre el que puede incidir un haz luminoso, que se refleja sobre el sistema de película fotográfica. Cuando se supera un cierto umbral de aceleración el sistema de arrastre de la película es accionado automáticamente, y la lámpara que produce el haz de luz incidente se ilumina. Una vez producido el registro, la película debe revelarse.
- **Analógico con registro en cinta magnética,** donde el registro se realiza en modulación de frecuencia (FM). El sistema modulador y de grabación en cassette es accionado automáticamente por un detector de nivel, cuando la aceleración observada supera el valor umbral prefijado. Mediante una unidad de reproducción se obtienen registros gráficos a partir de las grabaciones contenidas en los cassettes.

b) Digitales

Las principales ventajas son: mayor rango dinámico, memoria pre momento y facilidad de proceso posterior, eliminando el laborioso paso de digitalización. Pueden ser con registro en cinta magnética tipo cassette o con registro en memoria de estado sólido.

La Figura 2-1: Tipos de acelerógrafos, muestra un ejemplo de cada uno de los tipos de acelerógrafos mencionados.

		
Acelerógrafo analógico con registro en película fotográfica.	Acelerógrafo analógico con registro en cinta magnética.	Acelerógrafo digital con registro en memoria de estado sólido.
(Modelo SMA – 1 Kinematics)	(Modelo DCA – 333)	(Modelo CMG-5TD)

Figura 2-1: Tipos de acelerógrafos

Fuente: Ampere (2010)

2.3. ANÁLISIS DE ACELEROGRAMAS

Los registros obtenidos con los acelerógrafos son sometidos a un proceso más o menos complejo, dependiendo del tipo de instrumento y del objetivo del análisis.

Se trata de reproducir el movimiento del suelo con la mayor precisión posible a partir del registro obtenido, pero ya que no puede leerse directamente como un simple registro de aceleración ya que está contaminado, existen pasos implicados en la obtención del mismo.

En el caso de un acelerograma proveniente de un acelerógrafo analógico con registro fotográfico, éste es sometido a un proceso de revelado y ampliación, luego de lo cual es digitalizado en una mesa digitalizadora de forma manual (un operador sigue la traza con un cursor) o por un sistema automático. La salida del digitalizador consiste en pares de datos de tiempos y aceleraciones “no corregidas”.

En el caso del registro analógico en cinta magnética (FM), que resulta ser el caso del presente proyecto, puede obtenerse mediante la unidad de reproducción, un registro gráfico que se digitaliza como en el caso anterior; o bien, por medio de un conversor analógico/digital, si digitaliza automáticamente.

Para el caso de un acelerógrafo digital, el registro de campo ya está numerizado, todo el proceso anterior (transvase de datos en una unidad intermedia, pasa de cassette a ordenador) es un simple transporte que no modifica los datos.

Cada uno de los pasos anteriormente descritos puede modificar los registros y este hecho debe tenerse en cuenta a la hora de proceder al análisis de los mismos.

2.4. DIGITALIZACIÓN DE ACELEROGRAMAS

Como se ha mencionado, antiguamente los registros de movimientos sísmicos fuertes eran tomados en película fotográfica. Para poder analizarlos se necesitaba representar una señal análoga o una traza continua por medio de puntos referidos a un sistema de ejes de coordenadas arbitrario. Estos puntos debían tratar de caracterizar de la mejor manera a la señal. A este proceso se lo llama digitalización y es, en resumen, el proceso de transformar los datos de la señal original a un formato digital que debe ser compatible con un computador para luego procesarlo con el propósito de extraer la mayor información posible de él. El acelerograma digitalizado de esta forma podía presentar errores debido al instrumental, el proceso de revelado fotográfico y la digitalización. Se mencionarán brevemente los errores que esto ocasionaba:

1. Errores debido al instrumental: entre los que se encuentran

- Distorsiones de amplitud y fase del transductor
- Imperfecciones en el diseño del transductor, que junto con el anterior producen alta frecuencia.

- Movimiento transversal del papel del registro
- No uniformidad en la velocidad de grabación e inexactitudes en las marcas del tiempo
- Errores generados por el efecto “fuera de escala” (off scale)
- Fluctuaciones en el grosor del trazo y otros errores

2. Errores generados durante el proceso fotográfico

3. Errores en la digitalización

- Errores aleatorios y sistemáticos
- Efectos de filtrado pasa-bajos
- Errores durante el traslape de una señal seccionada

Debe tenerse en cuenta la repercusión que el ruido tiene sobre el acelerograma.

Los errores que se introducen en los distintos pasos afectan en algunos casos a las altas frecuencias y en otros a las bajas. Puede considerarse así que el acelerograma es la suma de la señal sísmica más el ruido: (Carreño et al. 1999), como se muestra en la Ecuación 2-1: Señal sísmica más ruido

$$a(t) = s(t) + r(t)$$

Ecuación 2-1: Señal sísmica más ruido

siendo $a(t)$ el acelerograma sin corregir, $s(t)$ la señal sísmica y $r(t)$ el ruido que afecta al acelerograma que puede ser de dos tipos:

- Ruido de alta frecuencia: cuando aparece por encima de la banda de frecuencias con la que se trabaja. Afecta a los picos de aceleración fundamentalmente; sin embargo, no afecta mucho en el proceso de integración ya que el área bajo la curva es prácticamente la misma que para

la señal corregida, dado que las desviaciones por encima y por debajo se compensan.

- Ruido de baja frecuencia: cuando este aparece por debajo de la banda de frecuencia con la que se trabaja. Afecta al proceso de integración básicamente, ya que al integrar la aceleración para obtener velocidad y desplazamiento, se está calculando el área bajo la curva.

Ambos tipos de ruido se presentan a la izquierda y derecha de la Figura 2-2: Efecto del ruido de alta y baja frecuencia, respectivamente.

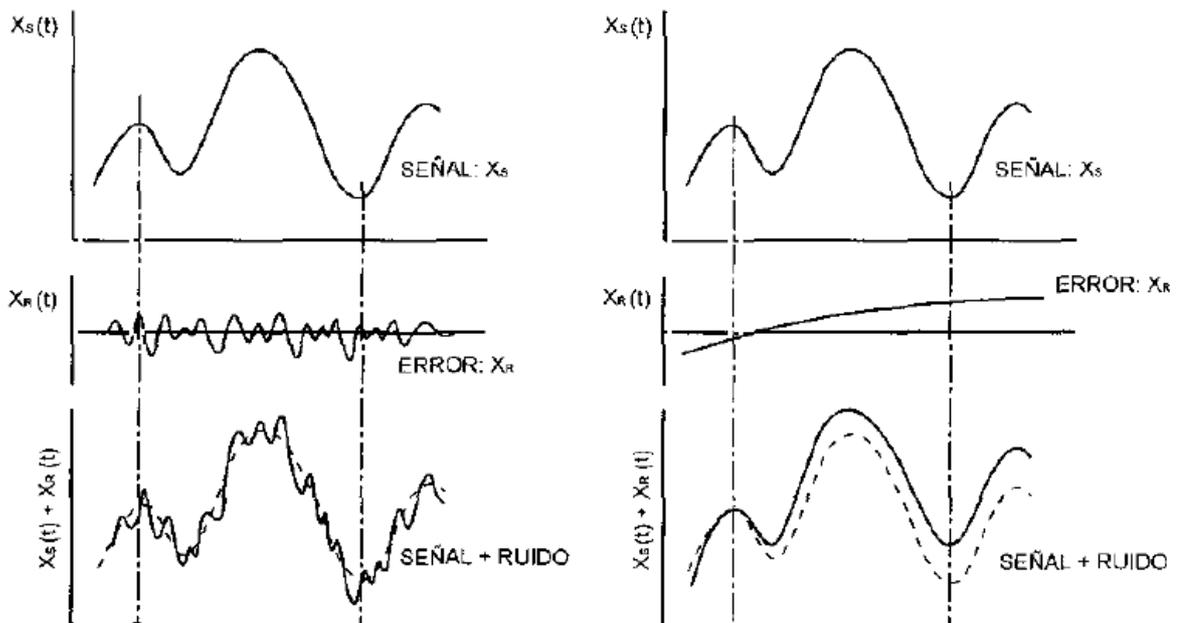


Figura 2-2: Efecto del ruido de alta y baja frecuencia

Fuente: Hudson (1979)

2.5. CORRECCIÓN DE ACELEROGRAMAS

Este es esencialmente un proceso en el cual la señal es separada del ruido. Entre las correcciones que se efectúan están aquellas que se proponen: (Andrade et al 1990)

- proporcionar los datos en unidades apropiadas de medida
- considerar las características del instrumento
- eliminar los errores de alta y baja frecuencia mediante el filtrado

Para ello existen las siguientes correcciones:

- filtrado de errores de baja y alta frecuencia
- corrección instrumental
- corrección por escala de tiempo
- corrección por valores de lectura
- corrección por escala de aceleración
- corrección de la línea base

Para que los errores no afecten de mayor manera, se limita la información a la banda de frecuencia deseada, en lugar de mantener información adicional a mayores o menores frecuencias que pueden contener gran cantidad de errores. Para hacerlo, se utilizan los filtros paso-baja para eliminar altas frecuencias, y los paso-alta para eliminar las bajas. Los filtros paso-banda eliminan el ruido de alta y baja frecuencia simultáneamente.

Lo mas importante en el momento de aplicar los filtros es elegir la frecuencia de corte adecuada, ya que una mala elección puede suponer eliminar parte de la señal que nos interesa, o por lo contrario no eliminar el ruido de la señal. Por eso es necesario tener un buen conocimiento de los espectros de Fourier fuera de la banda donde están contenidas las frecuencias importantes de la señal.

2.6. FILTROS

Filtros ideales son aquellos que están definidos como una función escalón del siguiente modo:

- Filtro ideal paso-bajas: elimina todas las frecuencias superiores a una dada, y deja pasar sin atenuación las frecuencias inferiores.

- Filtro ideal paso-altas: elimina todas las frecuencias inferiores a una dada, y deja pasar sin atenuación las frecuencias superiores.
- Filtro ideal paso-banda: elimina todas las frecuencias inferiores a una dada, y las superiores a otra, y deja pasar sin atenuación las frecuencias comprendidas entre ellas.

Los tres tipos de filtros mencionados se presentan en la Figura 2-3: Comportamiento de los filtros ideales.

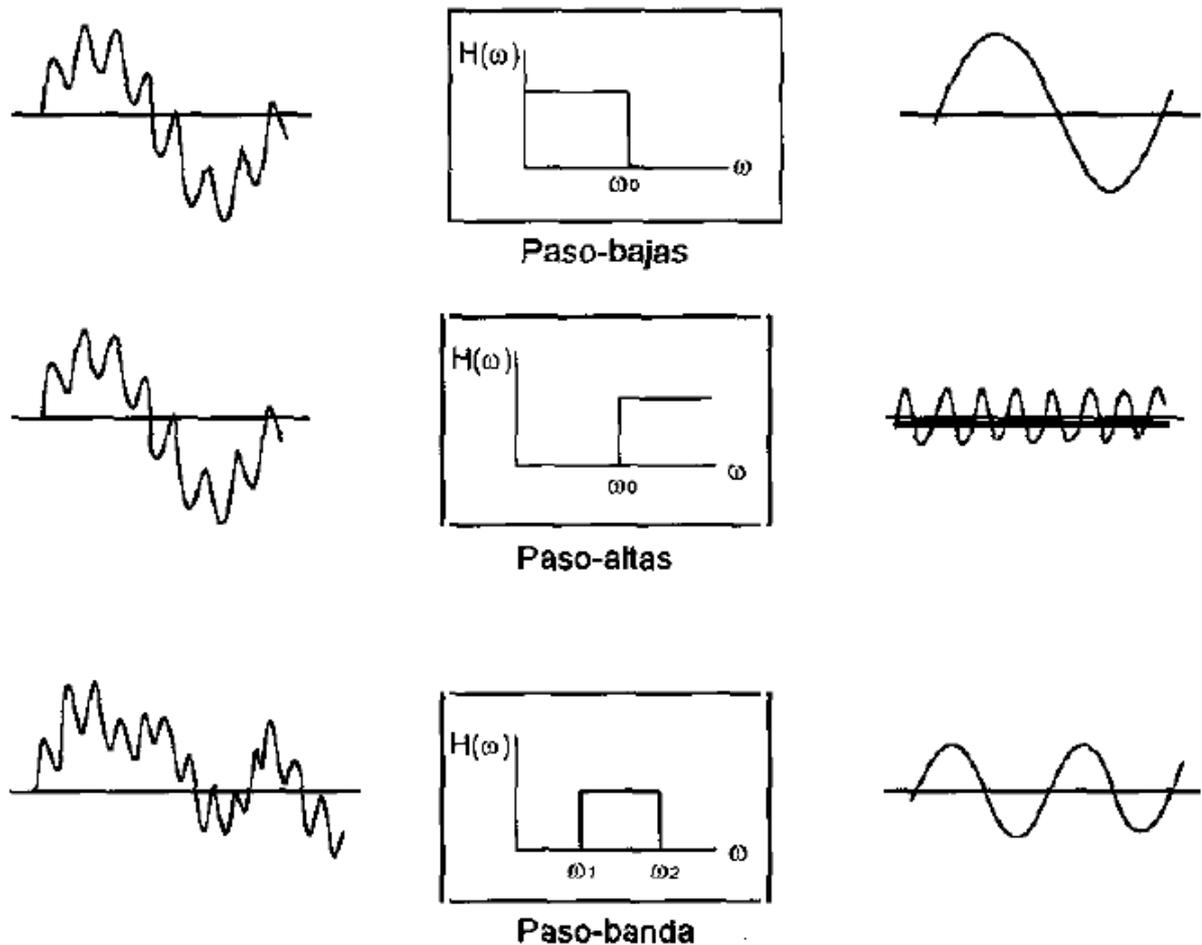


Figura 2-3: Comportamiento de los filtros ideales

Fuente: Hudson (1979)

Ya que en la práctica los filtros ideales no se pueden utilizar ya que su función de transferencia en el tiempo es de longitud infinita, se utilizan aproximaciones a ellos. Entre estas aproximaciones se encuentran filtros tales como el Box car, Bartlett, Hanning, Butterworth frecuencial, entre otros. La Figura 2-4: Filtros recursivos, muestra la magnitud contra la frecuencia para algunos de los filtros mencionados.

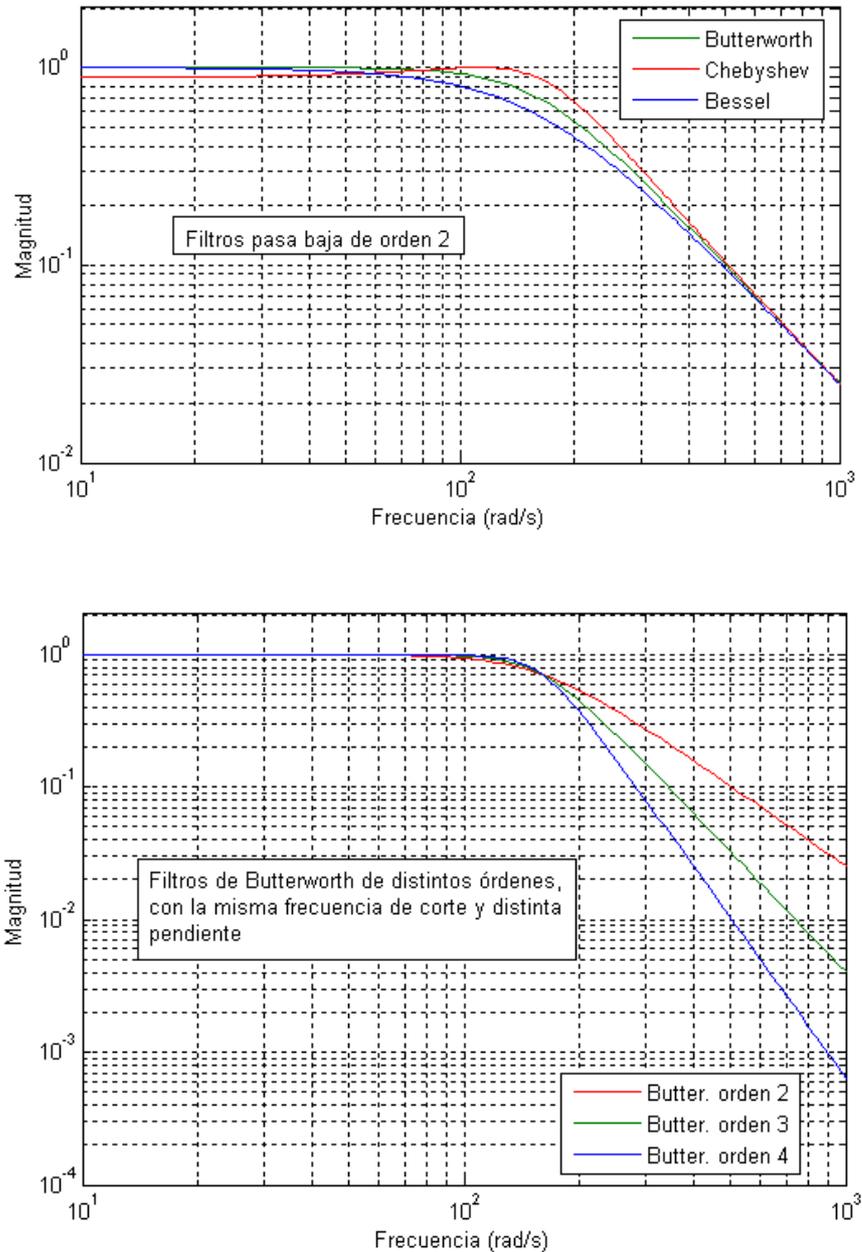


Figura 2-4: Filtros recursivos

Fuente: Hudson (1979)

2.6.1. FILTRO ORMSBY

El filtro digital más utilizado es el filtro Ormsby, que es una aproximación a un filtro ideal en el dominio de las frecuencias y que además tiene definición en el dominio del tiempo. Una de las principales ventajas es que permite conocer el error que se comete respecto a la función de transferencia ideal. La Figura 2-5: Filtro Ormsby, muestra la forma de este filtro.

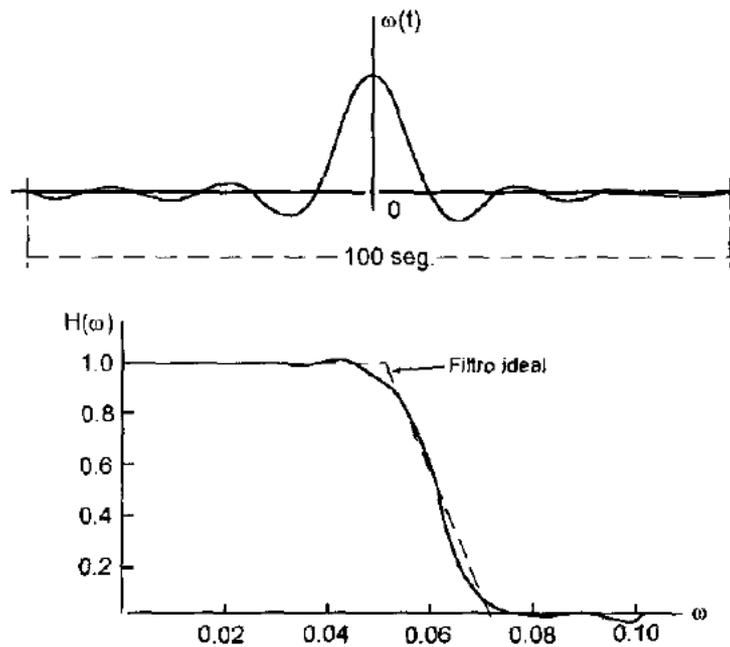


Figura 2-5: Filtro Ormsby

Fuente: Hudson (1979)

2.7. CORRECCIÓN DE LA LÍNEA BASE

El acelerograma se puede ver distorsionado en el proceso de registro, en la digitalización y por la introducción de componentes de baja frecuencia. De esta forma, tanto la velocidad como el desplazamiento, integrados numéricamente a partir de la aceleración original, llevan consigo la inclusión de tendencias irreales debidas a las distorsiones de período largo contenidas en el acelerograma no corregido. Es así que se puede apreciar comúnmente que la velocidad final no es nula ni oscila en torno a cero y la manifestación de ondas de período largo que son muy difíciles de detectar en el acelerograma original.

Por lo expuesto anteriormente, es necesaria la corrección por línea base, en donde el objetivo es identificar el eje de aceleraciones nulas de un acelerograma digitalizado y consiste en ajustar la señal a una curva cuya forma depende del método empleado para el efecto.

Las técnicas más simples para dicha corrección exponen:

- Trasladar uniformemente la línea base original con el propósito de obtener al final del registro una velocidad nula.
- Aplicar una serie de impulsos al acelerograma de manera que el diagrama de velocidades oscile con respecto a su línea de ceros hasta obtener una velocidad final nula.

Una de las condiciones de optimización es minimizar el valor cuadrático media de la velocidad. Esto no corresponde a ningún requerimiento físico, sin embargo provee una técnica razonable y se justifica porque en la mayoría de eventos sísmicos de duración significativa, la velocidad oscila aproximadamente en forma simétrica alrededor del eje cero y al finalizar el sismo se aproxima a cero.

De entre las correcciones, la corrección de la línea base ajustada a una recta tiene la ventaja de una justificación física más directa y una mínima introducción de información extraña en los resultados. La desventaja radica en que las componentes de periodo largo que quedan en los desplazamientos del suelo son de dudosa exactitud.

La corrección parabólica de la línea base posee ciertas ventajas desde el punto de vista matemático, pues se basa en un sistema de optimización por mínimos cuadrados. Sin embargo para acelerogramas de duración intermedia o larga, los resultados pueden no ser satisfactorios. Es así que esta corrección no contempla todos los requerimientos para constituir un proceso normalizado de corrección porque depende ampliamente de la longitud del registro.

La corrección de la línea base por filtrados permite un procesamiento uniforme de los acelerogramas no corregidos ya que es independiente de la duración del registro. Además tiene mayor precisión que la corrección parabólica en estructuras con períodos fundamentales de vibración largos.

2.7.1. MÉTODO DE BERG Y HOUSNER

La corrección se realiza a partir del acelerograma digitalizado, sin corrección, y de la duración del sismo. Se utiliza el siguiente procedimiento de corrección de todos los datos del acelerograma:

1. Cálculo de los registros de velocidad $v_i = \dot{s}_i$ y desplazamiento $d_i = s_i$, mediante la Ecuación 2-2: Cálculo del registro de velocidad y la Ecuación 2-3: Cálculo del registro del desplazamiento.

$$v_{i+1} = v_i + \frac{a_i + a_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i$$

$$v_{i+1} = \left[\sum_{j=0}^{i+1} a_j - \frac{a_0 + a_{i+1}}{2} \right] \cdot \Delta t_i$$

Ecuación 2-2: Cálculo del registro de velocidad

$$d_{i+1} = d_i + v_i \cdot \Delta t_i + \frac{2 \cdot a_i + a_{i+1}}{6} \cdot \Delta t_i^2$$

$$d_{i+1} = \left[\sum_{j=0}^{i+1} v_j - \frac{v_0 + v_{i+1}}{2} \right] \cdot \Delta t_i$$

Ecuación 2-3: Cálculo del registro del desplazamiento

en donde $i = 1, 2, 3, \dots, T$ y $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$

2. Cálculo de la línea base del acelerograma, mediante la aplicación de la Ecuación 2-4: Datos corregidos del acelerograma por línea base, y todas las demás ecuaciones usadas para su cómputo.

$$A1_0 = 0$$

$$A2_0 = 0$$

$$A3_0 = 0$$

Para $i = 1, 2, 3, \dots, T$

$$A1_i = \frac{1}{2} \cdot v_i \cdot \Delta t_i \cdot (t_i + t_{i+1}) + \frac{1}{24} \cdot \Delta t_i^2 \cdot [a_i \cdot (3 \cdot t_i + 5 \cdot t_{i+1}) + a_{i+1} \cdot (t_i + 3 \cdot t_{i+1})]$$

$$A2_i = \frac{1}{3} \cdot v_i \cdot \Delta t_i \cdot (t_i^2 + t_i \cdot t_{i+1} + t_{i+1}^2) + \frac{1}{60} \cdot \Delta t_i^2 \cdot [a_i \cdot (4 \cdot t_i^2 + 7 \cdot t_i \cdot t_{i+1} + 9 \cdot t_{i+1}^2) + a_{i+1} \cdot (t_i^2 + 3 \cdot t_i \cdot t_{i+1} + 6 \cdot t_{i+1}^2)]$$

$$A3_i = \frac{1}{4} \cdot v_i \cdot \Delta t_i \cdot (t_i^3 + t_i^2 \cdot t_{i+1} + t_i \cdot t_{i+1}^2 + t_{i+1}^3) + \frac{1}{120} \cdot \Delta t_i^2 \cdot [a_i \cdot (5 \cdot t_i^3 + 9 \cdot t_i^2 \cdot t_{i+1} + 12 \cdot t_i \cdot t_{i+1}^2 + 14 \cdot t_{i+1}^3) + a_{i+1} \cdot (t_i^3 + 3 \cdot t_i^2 \cdot t_{i+1} + 6 \cdot t_i \cdot t_{i+1}^2 + 10 \cdot t_{i+1}^3)]$$

$$A1 = \sum_{i=1}^T A1_i \quad A2 = \sum_{i=1}^T A2_i \quad A3 = \sum_{i=1}^T A3_i \quad W = \frac{378000}{t_T^7}$$

$$S_{11} = \frac{W \cdot t_T^4}{1260} = \frac{300}{t_T^3} \quad S_{12} = S_{21} = -\frac{W \cdot t_T^3}{420} = -\frac{900}{t_T^4} \quad S_{13} = S_{31} = \frac{W \cdot t_T^2}{600} = \frac{630}{t_T^5}$$

$$S_{22} = \frac{4 \cdot W \cdot t_T^2}{525} = \frac{2880}{t_T^5} \quad S_{23} = S_{32} = -\frac{W \cdot t_T}{180} = -\frac{2100}{t_T^6} \quad S_{33} = \frac{W}{240} = \frac{1575}{t_T^7}$$

$$\begin{aligned}
C_0 &= S_{11} \cdot A1 + S_{12} \cdot A2 + S_{13} \cdot A3 &= \frac{300}{t_T^3} \cdot A1 - \frac{900}{t_T^4} \cdot A2 + \frac{630}{t_T^5} \cdot A3 \\
C_1 &= S_{21} \cdot A1 + S_{22} \cdot A2 + S_{23} \cdot A3 &= -\frac{900}{t_T^4} \cdot A1 + \frac{2880}{t_T^5} \cdot A2 - \frac{2100}{t_T^6} \cdot A3 \\
C_2 &= S_{31} \cdot A1 + S_{32} \cdot A2 + S_{33} \cdot A3 &= \frac{630}{t_T^5} \cdot A1 - \frac{2100}{t_T^6} \cdot A2 + \frac{1575}{t_T^7} \cdot A3
\end{aligned}$$

Para $i = 1, 2, 3, \dots, T$:

$$\begin{aligned}
a_{i,corr} &= a_i - C_0 - 2 \cdot C_1 \cdot t_i - 3 \cdot C_2 \cdot t_i^2 \\
v_{i,corr} &= v_i - C_0 \cdot t_i - C_1 \cdot t_i^2 - C_2 \cdot t_i^3 \\
d_{i,corr} &= d_i - \frac{1}{2} \cdot C_0 \cdot t_i^2 - \frac{1}{3} \cdot C_1 \cdot t_i^3 - \frac{1}{4} \cdot C_2 \cdot t_i^4
\end{aligned}$$

Ecuación 2-4: Datos corregidos del acelerograma por línea base

2.8. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACELERÓGRAFOS CONSIDERADOS

MARCA: TERRA – TECHNOLOGY.

MODELO: DCA – 333.

NÚMEROS DE SERIE: 355, 356, 357, 358, 359, 360.

SEÑAL DE ENTRADA: servo – acelerómetros internos de fuerza, balanceados.

CANALES DE ENTRADA: tres, montados triaxialmente.

RANGO TOTAL DE ACELERACION: ± 1.0 g.

FRECUENCIAS DE RESPUESTA: 30 hz.

AMORTIGUAMIENTO: 0.7 ± 0.1 .

SENSITIVIDAD DEL EJE TRANSVERSAL: menor que 0.0005 g / g.

ALINEACIÓN DEL EJE: menor que 0.017 g / g.

RESOLUCIÓN DIGITAL: 1 en 4096 (12 bits de longitud de palabra).

AMPLIFICADOR DE RUIDO: menor que la mitad del bit más pequeño, referido a la entrada.

FORMATO DE REGISTRO: NRZI, flujo resincronizado de datos con cada muestra.

RELACIÓN DE MUESTRA: 100 muestras / segundo / canal, registradas en tres canales.

DENSIDAD DE BITS: 1200 bits / plg.

VELOCIDAD DE LA CINTA: 4 plg / seg.

CAPACIDAD DE GRABACION: 14 minutos, en casete CDS – 3000, a la relación de muestra estándar.

DISPARADOR: nivel seleccionable entre 0.1 % y 9.9 % de la escala total; los tres canales de entrada son filtrados individualmente y comparados con el nivel de disparo seleccionado.

PRE – REGISTRO DIGITAL: 1, 2, 3, 4 segundos, seleccionable.

POST-REGISTRO: 15 segundos.

RELOJ: Precisión: 1×10^{-6} .

Estabilidad de frecuencias: 5×10^{-6} en un rango de temperatura de 0°C a 50°C.

Retraso: 5×10^{-6} / año.

SALIDAS EN PANTALLA: Días, horas, minutos, segundos, sincronizados a 3.3 mseg del pulso externo.

Diferencia del tiempo (en muestras) entre los relojes interno y externo.

Contador de eventos, contador glitch, raw, canal de datos, picos filtrados.

CONSUMO DE ENERGIA: 60 mA sin registro, 250 mA registrando.

VOLTAJE DE ENTRADA: +12 VDC (nominal), internamente suministrado.

TAMAÑO (L x W x H): 30 x 30 x 15 cm.

PESO: 13.6 kg.

RANGO DE OPERACION: Temperatura: -30°C a +65°C.

Humedad relativa: 0% a 100% no-condens.

2.9. CORRECCION DE LOS ACELEROGRAMAS CONSIDERADOS

La primera parte para el tratamiento de los acelerogramas consiste en realizar una corrección por línea base; es importante mencionar que no se ha ejecutado ningún filtrado de frecuencias a estos registros, ya que el objetivo fué analizar el contenido

de frecuencias de los movimientos del suelo de manera completa, es decir, tal como fueron registrados.

Usando el método de Berg y Housner se ha procedido a realizar la corrección para cada una de las componentes (3 canales) de cada uno de los acelerogramas y son comparadas con las correcciones usadas en el informe de la referencia 7.

Puede notarse que la variación se presenta principalmente en los desplazamientos. Para los acelerogramas corregidos usando el método de los promedios, el desplazamiento final no satisface el requerimiento físico de desplazamiento final nulo. En el otro caso, usando la corrección parabólica, la aproximación a desplazamiento final nulo es bastante buena. Se nota sin embargo que existen ciertos acelerogramas que no satisfacen totalmente este requerimiento pero con una tolerancia aceptable.

En el Anexo No. 1 se presentan aceleraciones no corregidas para las componentes horizontales y luego para la componente vertical, mientras que en el Anexo No. 2, los gráficos de la corrección por línea base de los acelerogramas originales para el canal 2, correspondientes a las aceleraciones horizontales de los registros dados. El Anexo No. 3 presenta las aceleraciones corregidas.

Para sismos lejanos existe un filtrado de las ondas; las amplitudes más bajas y las frecuencias más altas se pierden del registro, llegando a registrarse únicamente las amplitudes altas de la aceleración y las frecuencias más bajas. Para verificar este hecho puede observarse los registros de las aceleraciones para un sismo cercano, en donde se observa una gran cantidad de componentes de amplitud y frecuencia, mientras que, para un sismo lejano, se observa claramente que tanto la amplitud como la frecuencia de la señal tienden a una armónica.

CAPÍTULO 3. ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICOS

3.1. INTRODUCCIÓN

En ingeniería se tienen suposiciones e idealizaciones para conseguir un planteamiento matemático más fácil de manejar, tratando siempre que los resultados sean lo suficientemente cercanos a los reales y sin descuidar aspectos tales como los de seguridad y economía. Esto se consigue a través de los denominados modelos matemáticos, que representan en forma simplificada el hecho físico real que interesa considerar. Una de las simplificaciones en el análisis dinámico se da en el número de grados de libertad. Para ello se plantean modelos matemáticos que tengan un número discreto de los mismos y poder luego hallar las respuestas correspondientes.

Existen dos modalidades ampliamente utilizadas para el cálculo de respuestas dinámicas de estructuras que están sujetas a la acción de movimientos sísmicos. La primera consiste en plantear el modelo matemático y someterlo a la acción del registro sísmico y mediante algún método numérico obtener las respuestas para cada instante de tiempo (análisis paso a paso). La segunda manera consiste en utilizar los espectros de respuesta, lo que permite el diseño sísmico de estructuras que, desde su introducción en los años de 1930 y 1940, han sido útiles en el diseño y en el análisis estructural.

El espectro, calculado a partir de una componente de la aceleración del suelo, constituye una gráfica de la máxima respuesta de un oscilador simple para un rango de valores de su frecuencia natural y amortiguamiento. Estas curvas proveen la descripción de las características de frecuencia del movimiento del suelo. Mediante la superposición de los diferentes modos de respuesta, las técnicas espectrales pueden ser aplicadas al diseño y análisis de estructuras complejas como edificios y presas. De esta manera, la técnica espectral representa una aproximación intermedia entre un diseño basado en cargas estáticas y la integración completa de la ecuación de movimiento de la estructura compleja.

3.2. MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE

3.2.1. PROYECCIÓN HORIZONTAL DEL MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORME

Considérese la Figura 3-1: Movimiento circular. En el mismo ω_o es la velocidad angular constante, R es el radio del círculo y θ es el desplazamiento angular.

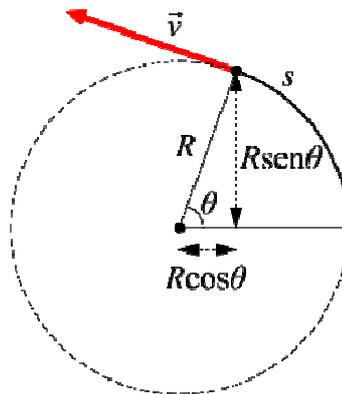


Figura 3-1: Movimiento circular

El desplazamiento angular es:

$$\theta = \omega_o \cdot t$$

mientras que la proyección horizontal de dicho desplazamiento angular resulta:

$$x = R \cdot \cos(\omega_o \cdot t)$$

Obteniendo la primera derivada de la proyección horizontal resulta la velocidad, expresada como:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = -R \cdot \omega_o \cdot \sin(\omega_o \cdot t)$$

La segunda derivada es la aceleración, que es:

$$\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} = -R \cdot \omega_o^2 \cdot \cos(\omega_o \cdot t) = -\omega_o^2 \cdot x$$

en donde se ha reemplazado el valor de la proyección horizontal. Finalmente se tiene la Ecuación diferencial de movimiento que es:

$$\ddot{x} + \omega_o^2 \cdot x = 0$$

Ecuación 3-1: Ecuación diferencial de movimiento

Por tanto, la solución para la ecuación diferencial de movimiento es el desplazamiento.

Considerando además que para $t = 0$, la amplitud R (valor máximo que se puede alcanzar) y el ángulo de fase son:

$$R = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega_o}\right)^2}$$

$$\phi = \arctan\left(-\frac{\dot{x}_0}{\omega_o \cdot x_0}\right)$$

y reemplazándolos en el desplazamiento resulta:

$$x = R \cdot [\cos(\omega_o \cdot t) \cdot \cos \phi - \sin(\omega_o \cdot t) \cdot \sin \phi]$$

$$x = x_0 \cdot \cos(\omega_o \cdot t) + \frac{\dot{x}_0}{\omega_o} \cdot \sin(\omega_o \cdot t)$$

Ecuación 3-2: Solución de la ecuación diferencial de movimiento

3.2.2. VIBRACIÓN LIBRE DE UN SISTEMA MASA - RESORTE

En la Figura 3-2: Sistema masa – resorte, el sistema tiene las condiciones iniciales:

$$x_0 \text{ y } \dot{x}_0.$$

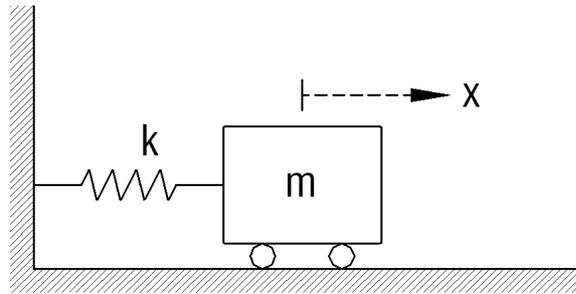


Figura 3-2: Sistema masa – resorte

Los parámetros representativos son:

- m : Masa
 k : Constante de rigidez

En la configuración deformada se puede notar:

- $m \cdot \ddot{x}_t$: Fuerza inercial
 $k \cdot x$: Fuerza resistente del sistema

Aplicando la segunda ley de Newton al diagrama de cuerpo libre y considerando

$\omega_o = \sqrt{\frac{k}{m}}$, se obtiene la ecuación diferencial de equilibrio dinámico cuya solución es ya conocida.

El periodo natural del sistema se define como $T_o = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega_o}$, donde f es frecuencia natural expresada en ciclos por segundo (cps) y ω_o la frecuencia circular natural,

expresada en radianes por segundo (rad/seg). Estos valores pueden también ser expresados de forma alternativa como:

$$\omega_o = \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}} \quad f_o = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}} \quad T_o = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\delta_{st}}{g}}$$

donde $\delta_{st} = \frac{m \cdot g}{k}$ y g es la aceleración de la gravedad. Es la deflexión estática de la masa m suspendida de un resorte de masa k , es decir, un sistema orientado en dirección vertical. Para un marco de un nivel δ_{st} es el desplazamiento lateral de la masa debido a la fuerza $m \cdot g$.

3.3. SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD (1GDL)

El sistema de la Figura 3-3: Sistema masa, resorte, amortiguador viscoso, tiene las condiciones iniciales: x_0 y \dot{x}_0 .

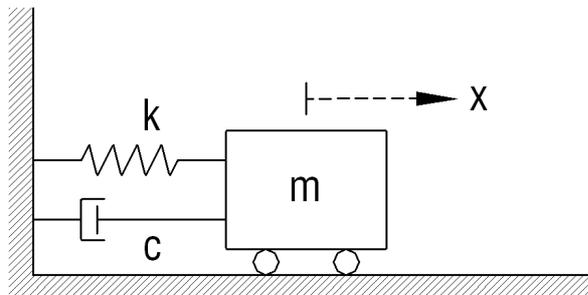


Figura 3-3: Sistema masa, resorte, amortiguador viscoso

El parámetro representativo adicional es:

$$c = 2 \cdot m \cdot \omega_o \cdot \xi: \quad \text{Constante de amortiguamiento}$$

$$\xi = \frac{c}{c_c}: \quad \text{Factor de amortiguamiento viscoso}$$

$$c_c = 2 \cdot \sqrt{k \cdot m}: \quad \text{Amortiguamiento crítico}$$

En la configuración deformada se puede notar:

$c \cdot \dot{x}$: Fuerza generada por el amortiguador

Aplicando la segunda ley de Newton al diagrama de cuerpo libre resulta la Ecuación 3-4: Solución a la ecuación del sistema de 1GDL:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \xi \cdot \omega_o \cdot \dot{x} + \omega_o^2 \cdot x = 0$$

Ecuación 3-3: Ecuación del sistema de 1GDL

Si se considera que el amortiguamiento es subcrítico, es decir $\xi < 1$, la respuesta del sistema es:

$$x = \exp(-\xi \cdot \omega_o \cdot t) \cdot [A \cdot \cos(\omega_\xi \cdot t) + B \cdot \sin(\omega_\xi \cdot t)]$$

Ecuación 3-4: Solución a la ecuación del sistema de 1GDL

donde:

$$A = x_0$$

$$B = \frac{\dot{x}_0 + \xi \cdot \omega_o \cdot x_0}{\omega_\xi}$$

La amplitud y el ángulo de fase son respectivamente:

$$R = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0 + \xi \cdot \omega_o \cdot x_0}{\omega_\xi} \right)^2}$$

$$\phi = \arctan\left(-\frac{\dot{x}_0 + \xi \cdot \omega_0 \cdot x_0}{\omega_\xi \cdot x_0}\right)$$

El periodo con amortiguamiento es:

$$T_\xi = \frac{2\pi}{\omega_\xi} = \frac{2\pi}{\omega_0 \cdot \sqrt{1-\xi^2}} = \frac{T_0}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

3.3.1. SUPERPOSICIÓN DE LA EXCITACIÓN Y DE LA RESPUESTA

Considérese la Figura 3-4: Sistema de 1GDL forzado. Aquí, el sistema simple, no conservativo, conformado por: resorte, amortiguamiento viscoso y masa, se considera que está forzado mediante:

1. Fuerza: $f_1(t) = 0$: condiciones iniciales $x_{1,0} = x_0$, $\dot{x}_{1,0} = \dot{x}_0$
2. Fuerza: $f_2(t) \neq 0$: condiciones iniciales $x_{2,0} = 0$, $\dot{x}_{2,0} = 0$

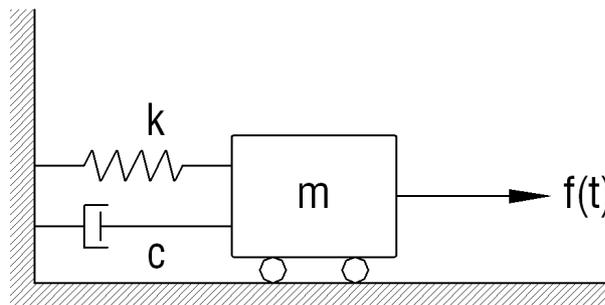


Figura 3-4: Sistema de 1GDL forzado

El sistema 1 se encuentra en vibración libre y el sistema 2 en vibración forzada. Para un tiempo cualquiera la fuerza resultante será la suma de ambas fuerzas. El primer estado es llamado como transiente o transitorio y tiende a desaparecer con el tiempo, mientras que el segundo es llamado estado estacionario. Para el primer estado la solución corresponde a la Ecuación 3-4: Solución a la ecuación del sistema

de 1GDL. La solución del segundo estado se detallará en la sección siguiente. La solución resultante es la superposición de ambas.

3.3.2. MOVIMIENTO DEL SOPORTE

Para el sistema mostrado en la Figura 3-5: Sistema con excitación en el soporte, se tiene:

x : Alargamiento del resorte

\ddot{S}_g : Aceleración del soporte del sistema (historia de la función de la variación del soporte en función del tiempo)

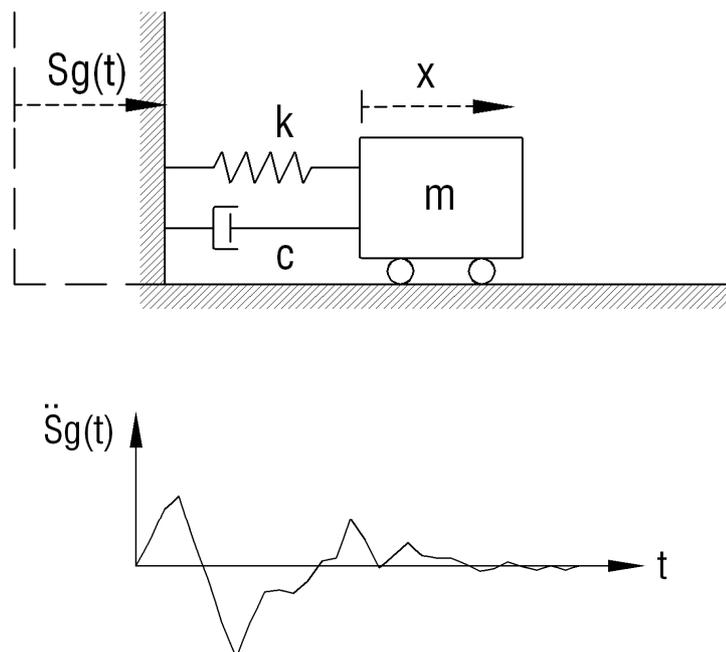


Figura 3-5: Sistema con excitación en el soporte

En la configuración deformada se puede notar que:

$$\ddot{x}_t = \ddot{x} + \ddot{S}_g: \text{ Aceleración total de la masa}$$

De la condición de equilibrio dinámico de todas las fuerzas proviene la ecuación que representa el comportamiento dinámico de los sistemas de 1GDL:

$$m \cdot \left(\ddot{x} + \ddot{S}g \right) + 2 \cdot m \cdot \omega_o \cdot \dot{\xi} \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0$$

$$m \cdot \ddot{x} + 2 \cdot m \cdot \omega_o \cdot \dot{\xi} \cdot \dot{x} + k \cdot x = -m \cdot \ddot{S}g$$

Ecuación 3-5: Ecuación del sistema de 1GDL sujeto a una aceleración en el soporte

Y considerando que en un sistema de 1GDL sujeto a la acción de una carga exterior función del tiempo, el equilibrio dinámico se da por:

$$m \cdot \ddot{x} + 2 \cdot \xi \cdot m \cdot \omega_o \cdot \dot{x} + k \cdot x = f(t)$$

Ecuación 3-6: Ecuación del sistema de 1GDL sujeto a la acción de una carga exterior

Se puede notar que un sistema responderá exactamente igual ante la aceleración del suelo o bajo la acción de una fuerza exterior, donde:

$$f(t) = -m \cdot \ddot{S}g$$

Ecuación 3-7: Relación entre fuerza exterior y aceleración del soporte

3.4. RESPUESTA A EXCITACIONES DINÁMICAS GENERALES

3.4.1. RESPUESTA INDICIAL

Para el estado estacionario del sistema no conservativo de 1GDL, considérese el caso especial en que la excitación consiste en una fuerza tal que:

$$U(t) = \begin{cases} 0: & t < 0 \\ 1: & t > 0 \end{cases}$$

como se muestra en la Figura 3-6: Función unitaria de Heaviside. El sistema tiene las condiciones iniciales $x(0) = 0$ y $\dot{x}(0) = 0$.

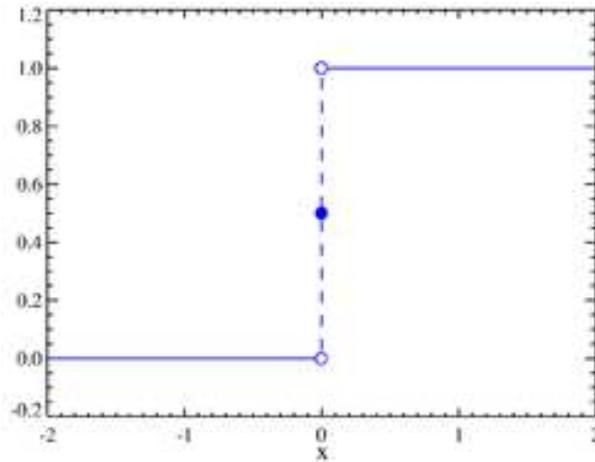


Figura 3-6: Función unitaria de Heaviside

La ecuación de equilibrio está entonces dada por:

$$m \cdot \ddot{x}_t + c \cdot \dot{x}_t + k \cdot x = U(t) : \begin{cases} t < 0: & m \cdot \ddot{x}_t + c \cdot \dot{x}_t + k \cdot x = 0 \\ t > 0: & \ddot{x} + 2 \cdot \omega_o \cdot \xi \cdot \dot{x} + \omega_o^2 \cdot x = \frac{1}{m} \end{cases}$$

La solución de la parte homogénea x_h , corresponde a la solución de la ecuación del sistema de 1GDL, donde:

$$A = \frac{1}{k}$$

$$B = \frac{-\xi \cdot \omega_o}{k \cdot \omega_\xi}$$

La solución particular resulta:

$$x_p = \frac{1}{k}$$

La solución general incluye a las dos anteriores:

$$x = x_h + x_p$$

$$x = \frac{1}{k} \cdot \left[1 - \exp(-\xi \cdot \omega_o \cdot t) \cdot \left[\cos(\omega_\xi \cdot t) + \frac{\xi \cdot \omega_o}{\omega_\xi} \cdot \sin(\omega_\xi \cdot t) \right] \right]$$

$$g(t) = \frac{U(t)}{k} \cdot \left[1 - \exp(-\xi \cdot \omega_o \cdot t) \cdot \left[\cos(\omega_\xi \cdot t) + \frac{\xi \cdot \omega_o}{\omega_\xi} \cdot \sin(\omega_\xi \cdot t) \right] \right]$$

Ecuación 3-8: Respuesta indicial

De manera más general, un tipo de “función escalón”, es la que se expresa de la siguiente forma:

$$U(t-\tau) = \begin{cases} 0 & : t-\tau < 0 \\ 1 & : t-\tau > 0 \end{cases}$$

Derivando la respuesta indicial con respecto al tiempo se obtiene:

$$\dot{g}(t) = \frac{U(t)}{m \cdot \omega_\xi} \cdot \exp(-\xi \cdot \omega_o \cdot t) \cdot \sin(\omega_\xi \cdot t)$$

3.4.2. RESPUESTA IMPULSIVA

Para el estado estacionario del sistema no conservativo de 1GDL, considérese el caso en el que la excitación tiene la forma:

$$\delta(t) = \begin{cases} 1 & : t = 0 \\ \varepsilon & \\ 0 & : t \neq 0 \end{cases}$$

Como se muestra en la Figura 3-7: Función delta de Dirac. Para la misma se cumple

$$\text{que: } \varepsilon \rightarrow 0: \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot dt = 1.$$

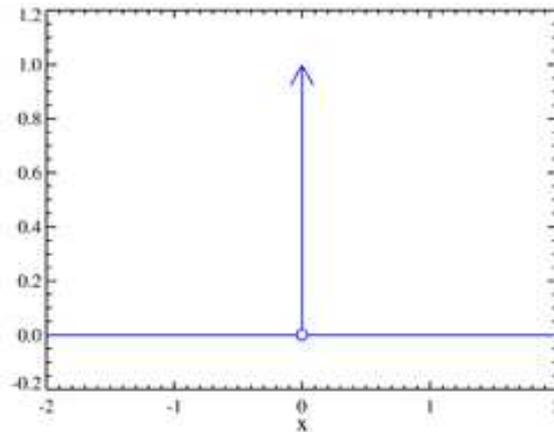


Figura 3-7: Función delta de Dirac

La ecuación diferencial tiene la forma:

$$m \cdot \ddot{x}_t + c \cdot \dot{x}_t + k \cdot x = \delta(t)$$

En el instante infinitesimal después de $t = 0$, $x(0^+) = x_0 = 0$ y $\dot{x}(0^-) = \dot{x}_0 \neq 0$.

Igualando la cantidad de movimiento al impulso, en el instante $t = 0^+$:

$$m \cdot \dot{x}_0 = 1: \quad \dot{x}_0 = \frac{1}{m}$$

Sustituyendo las condiciones iniciales en la solución a la ecuación del sistema de 1GDL, donde:

$$A = 0$$

$$B = \frac{1}{m \cdot \omega_\xi}$$

La solución resulta:

$$h(t) = \frac{1}{m \cdot \omega_\xi} \cdot \exp(-\xi \cdot \omega_o \cdot t) \cdot \sin(\omega_\xi \cdot t)$$

Ecuación 3-9: Respuesta impulsiva

Para $t > 0$:
$$h(t) = \dot{g}(t)$$

La respuesta impulsiva es igual a la derivada de la respuesta indicial con respecto al tiempo.

3.4.3. INTEGRAL DE CONVOLUCIÓN

Considérese una excitación, compuesta por un escalón inicial de intensidad $f(0)$ aplicado en $t = 0$ y una serie de escalones aplicados donde, a un incremento de $\Delta\tau$ corresponde un incremento de $\Delta f(\tau)$, como se muestra en la Figura 3-8: Fuerza de excitación con variación en τ . Las condiciones iniciales son $x(0) = 0$ y $\dot{x}(0) = 0$

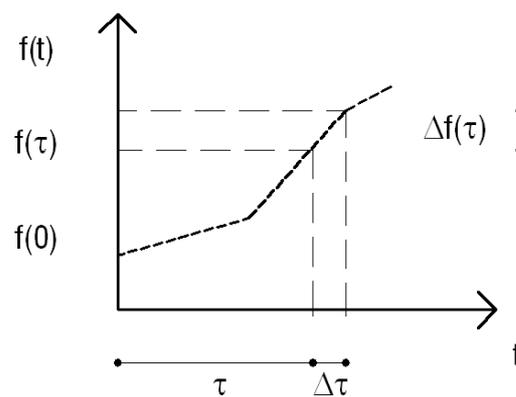


Figura 3-8: Fuerza de excitación con variación en τ

La contribución a la respuesta de la función escalón de amplitud $\Delta f(\tau)$, aplicada aproximadamente en el instante $t = \tau$ es:

$$\Delta x_\tau \approx \Delta f(\tau) \cdot g(t - \tau)$$

$$\Delta x_\tau \approx \frac{\Delta f(\tau)}{\Delta \tau} \cdot g(t - \tau) \cdot \Delta \tau$$

La respuesta en un instante t cualquiera será:

$$x \approx f(0) \cdot g(t) + \sum_0^t \left[\frac{\Delta f(\tau)}{\Delta \tau} \cdot g(t - \tau) \cdot \Delta \tau \right]$$

En el límite, cuando $\Delta \tau \rightarrow 0$, la sumatoria se transforma en integral:

$$\int_0^t \left[\frac{df(\tau)}{d\tau} \cdot g(t - \tau) \cdot d\tau \right]$$

Ecuación 3-10: Integral de Duhamel

Y la respuesta resulta:

$$x = f(0) \cdot g(t) + \int_0^t \left[\frac{df(\tau)}{d\tau} \cdot g(t - \tau) \cdot d\tau \right]$$

Integrando por partes y denominando $\frac{dg(t - \tau)}{d(t - \tau)} = \dot{g}(t - \tau) = h(t - \tau)$, resulta

$$x = \int_0^t [f(\tau) \cdot h(t - \tau) \cdot d\tau]$$

Ecuación 3-11: Integral de Convolución de las funciones f y h

Puesto que $g(0) = 0$ para $x(0) = 0$.

Por tanto, la respuesta del estado estacionario del sistema ante una excitación cualquiera, está dado por:

$$x(t) = \frac{1}{m \cdot \omega_\xi} \int_0^t [f(\tau) \cdot \exp(-\xi \cdot \omega_o \cdot t) \cdot \sin(\omega_\xi \cdot t) \cdot d\tau]$$

Ecuación 3-12: Respuesta del estado estacionario ante una excitación cualquiera

Considerando la relación entre la fuerza exterior y la aceleración del soporte, resulta

$$x(t) = -\frac{1}{\omega_\xi} \int_0^t \left\{ \ddot{S}g(\tau) \cdot \exp[-\xi \cdot \omega_o \cdot (t-\tau)] \cdot \sin[\omega_\xi \cdot (t-\tau)] \cdot d\tau \right\}$$

$$\dot{x}(t) = -\int_0^t \left\{ \ddot{S}g(\tau) \cdot \exp[-\xi \cdot \omega_o \cdot (t-\tau)] \cdot \cos[\omega_\xi \cdot (t-\tau)] \cdot d\tau \right\} - \xi \cdot \omega_o \cdot x(t)$$

$$\ddot{y}(t) = \ddot{x}(t) + \ddot{S}g(t) = -\omega_o^2 \cdot x(t) - 2 \cdot \xi \cdot \omega_o \cdot \dot{x}(t)$$

Ecuación 3-13: Respuesta del estado estacionario ante un movimiento en el soporte

En resumen, se puede decir que cualquier diagrama de velocidad del subsuelo puede aproximarse mediante una serie de pasos o pulsos, cada uno de magnitud $\ddot{S}g(\tau) \cdot \Delta\tau$, donde $\ddot{S}g(\tau)$ es la aceleración media del subsuelo en el intervalo $\Delta\tau$. La respuesta tendrá la forma de una suma de expresiones semejantes a la respuesta impulsiva multiplicada por el valor de $\ddot{S}g(\tau) \cdot \Delta\tau$ que en el límite los pulsos se convierten en $\ddot{S}g(\tau) \cdot d\tau$ y la suma se convierte en una integral.

3.5. RESPUESTA PASO A PASO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

La ecuación diferencial del movimiento correspondiente a la vibración de sistemas de 1GDL sujetos a una excitación cualquiera, tiene solución cerrada solamente en los casos en que la excitación tiene forma analítica simple

Se puede superar el problema de varias formas, pero quizás la más evidente sea utilizar un método de integración directa mediante el desarrollo de la función $\exp[-\xi \cdot \omega_o \cdot (t-\tau)] \cdot \sin[\omega_\xi \cdot (t-\tau)]$ de la respuesta del estado estacionario con movimiento en el soporte. Resulta entonces:

$$x(t) = -\frac{\exp(-\xi \cdot \omega_o \cdot t)}{\omega_o} \cdot [\sin(\omega_o \cdot t) \cdot A(t) + \cos(\omega_o \cdot t) \cdot B(t)]$$

$$A(t) = \int_0^t \ddot{S}g(\tau) \cdot \exp(\xi \cdot \omega_o \cdot t) \cdot \cos(\omega_\xi \cdot t) \cdot d\tau$$

$$B(t) = \int_0^t \ddot{S}g(\tau) \cdot \exp(\xi \cdot \omega_o \cdot t) \cdot \sin(\omega_\xi \cdot t) \cdot d\tau$$

Ecuación 3-14: Evaluación numérica de la integral de Duhamel

El método descrito tiene dos inconvenientes principales. Primero, está limitado a los sistemas lineales. Segundo, a menos que el amortiguamiento sea sumamente pequeño y la duración del movimiento no muy larga, las exponenciales que quedan dentro de los signos de integral alcanzan valores excesivamente grandes disminuyendo mucho la precisión.

Como se ha mencionado, la integración directa puede conducir a resultados imprecisos y dado que los movimientos del terreno que nos incumben son irregulares, se debe desechar la evaluación analítica de las respuestas estructurales y considerar el uso de métodos numéricos que den directamente las respuestas, en vez de usar uno que trate de hacer la evaluación explícita de las integrales de Duhamel.

Una solución numérica consiste en obtener valores de las respuestas en una sucesión de instantes mediante un proceso de integración paso a paso a partir de las condiciones iniciales.

Los métodos numéricos de integración pueden clasificarse en:

1. Métodos basados en una forma de variación de la aceleración asumida en un intervalo de tiempo:
 - a. Método de la aceleración constante
 - b. Método de la aceleración lineal
 - c. Método de velocidad constante
 - d. Método beta de Newmark

2. Métodos que expresan la ordenada futura como una combinación lineal de las ordenadas y pendientes presentes y anteriores:
 - a. Método de Euler
 - b. Método de Adams

3. Métodos que involucran el cálculo de derivadas de mayor grado:
 - a. Método de series de Taylor
 - b. Método de Milne

4. Métodos en los que la determinación de la ordenada futura no depende del conocimiento de las anteriores:
 - a. Método de Runge – Kutta
 - b. Método de ecuaciones diferenciales
 - c. Método de diferencias finitas

3.5.1. METODO BETA DE NEWMARK

Es un método de variación asumida en la aceleración mediante el uso de un factor Beta en un intervalo de tiempo, como se muestra en la Figura 3-9: Variación de la

constante Beta en el Método de Newmark. Se ha demostrado que dentro del rango $1/6 \leq \beta \leq 1/4$ se asegura estabilidad, convergencia y suficiente aproximación.

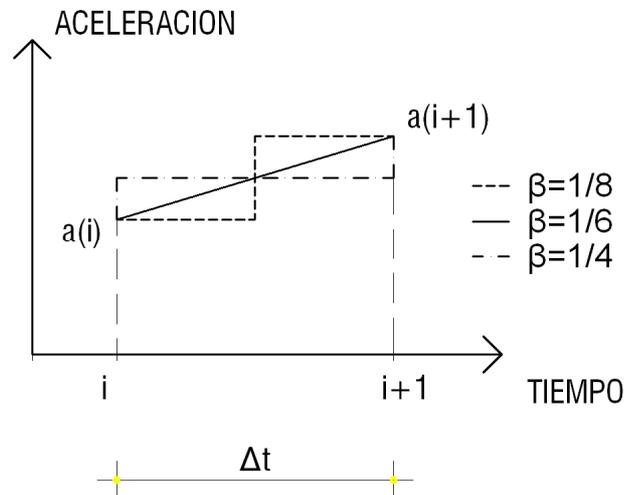


Figura 3-9: Variación de la constante Beta en el Método de Newmark

Las ecuaciones usadas en el método son:

$$x_{i+1} = x_i + \Delta t \cdot \dot{x}_i + (0.5 - \beta) \cdot \Delta t^2 \cdot \ddot{x}_i + \beta \cdot \Delta t^2 \cdot \ddot{x}_{i+1}$$

Ecuación 3-15: desplazamiento usando Método Beta de Newmark

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + (1 - \delta) \cdot \Delta t \cdot \ddot{x}_i + \delta \cdot \Delta t \cdot \ddot{x}_{i+1}$$

Ecuación 3-16: velocidad usando Método Beta de Newmark

El valor de la aceleración \ddot{x}_{n+1} puede suponerse en forma totalmente arbitraria o estimarse asumiendo una variación lineal de la aceleración en dos intervalos iguales y sucesivos de tiempo y reemplazando en la solución del sistema de 1GDL sujeto a una acción exterior. Para el segundo caso resulta:

$$\ddot{x}_{n+1} = \frac{f(t_{n+1})}{m} - 2 \cdot \xi \cdot \omega_o \cdot \dot{x}_{n+1} - \omega_o^2 \cdot x_{n+1}$$

Ecuación 3-17: aceleración usada en el Método Beta de Newmark

donde:

Δt : Intervalo de tiempo

$i, i+1$: Subíndices que indican el intervalo considerado y el inmediatamente posterior

δ : Constante tomada igual a $\frac{1}{2}$ para evitar que se auto genere un amortiguamiento ficticio aun sin que esté presente un verdadero amortiguamiento en el problema.

β : Constante que considera la variación de la aceleración en el intervalo de tiempo.

La convergencia y estabilidad del método se presenta cuando:

$$\frac{\Delta t_n}{T_o} < \frac{1}{2\pi\sqrt{\beta}}$$

$$\frac{\Delta t_n}{T_o} < \frac{1}{\pi\sqrt{1-4\beta}}$$

En general:

$$\frac{\Delta t_n}{T_o} < \frac{1}{10}$$

Deben realizarse chequeos tanto en los cambios bruscos del acelerograma como en los cruces por cero de la velocidad, cambiando el intervalo para evitar el corte de picos de la respuesta.

3.6. ESPECTROS DE RESPUESTA DE UN SISMO

Para el diseño se está interesado en el valor numérico máximo de cierta respuesta de un movimiento sísmico, algunas de las cuales dependen solamente del periodo natural y del grado de amortiguamiento del sistema. Interesa por tanto, construir curvas que representen valores numéricos máximos de las respuestas en cuestión como funciones del periodo o frecuencia natural de las estructuras simples,

correspondiendo cada curva a un valor de ξ . A estas curvas se las llama espectros de respuesta.

Bajo estas consideraciones, el espectro de respuesta está dado por:

$$S_{dr}(\omega_o, \xi) = \max_{i=1, N} \left[x(\omega_o, \xi) \right]$$

$$S_{vr}(\omega_o, \xi) = \max_{i=1, N} \left[\dot{x}(\omega_o, \xi) \right]$$

$$S_{aa}(\omega_o, \xi) = \max_{i=1, N} \left[\ddot{y}(\omega_o, \xi) \right]$$

Ecuación 3-18: Espectro de respuesta

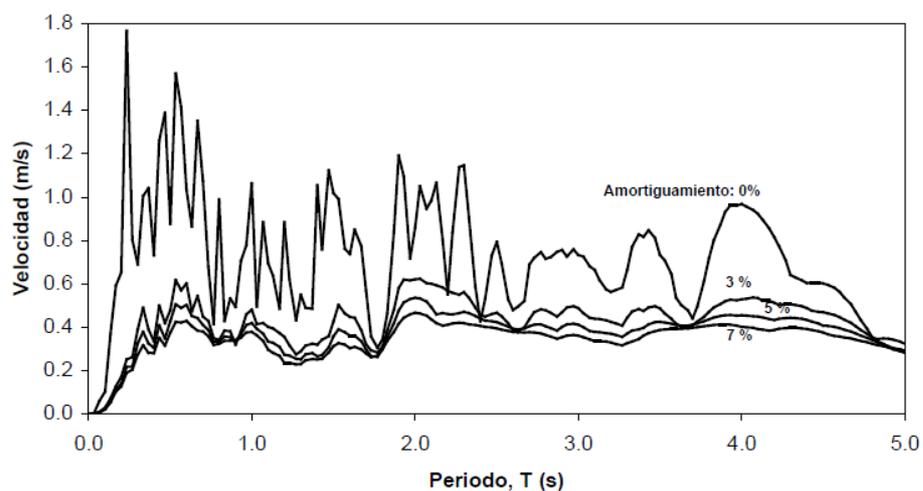
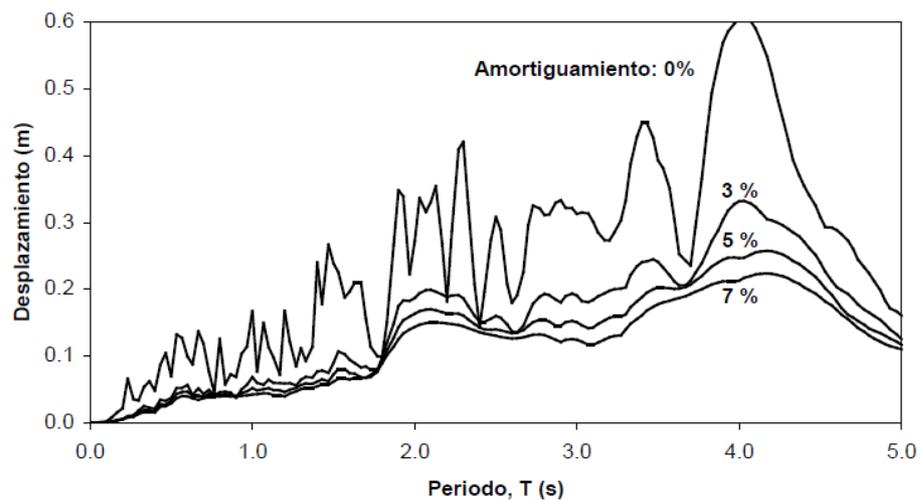
En donde S_{dr} , S_{vr} y S_{aa} son, respectivamente, los valores espectrales de desplazamiento relativo de la base, velocidad relativa de la base y aceleración total (o absoluta), para los valores elegidos de amortiguamiento y frecuencia natural; N es el número total de puntos discretos para el cual el espectro es obtenido.

Para construir un espectro completo se repite el procedimiento indicado para estructuras con distintos periodos; normalmente los espectros se grafican considerando un rango de periodos de vibración que varía entre 0 y 3.0 o 5.0 segundos, que comprende la mayoría de las construcciones comunes. Las curvas se construyen para valores constantes del factor de amortiguamiento.

Algunos espectros de respuesta determinados para diferentes valores de amortiguamiento se muestran en la Figura 3-10: Ejemplos de espectro de respuesta. Se incluyen curvas espectrales para el caso de amortiguamiento nulo, el cual no tiene aplicación práctica, pero sirve para mostrar la significativa influencia en la respuesta de este parámetro. Se puede observar que el amortiguamiento tiene un efecto benéfico sobre la respuesta estructural dado que reduce los valores de desplazamiento, velocidad y aceleración máxima. Esto se debe a que por acción del

amortiguamiento se disipa energía, generalmente en forma de calor y sonido, disminuyendo así la vibración de la estructura. Se nota también que en cierto rango de periodos, se produce una amplificación del movimiento del suelo. Es decir que la estructura vibra y experimenta aceleraciones, velocidades y desplazamientos que pueden ser significativamente mayores que los correspondientes al movimiento del suelo.

La acción sísmica sobre la construcción depende no solo de las características del terremoto sino también de las propiedades estructurales. Estos aspectos se ponen en evidencia, por ejemplo, en el caso de edificios con aisladores sísmicos, con los cuales se logra aumentar significativamente el periodo de vibración de la construcción, “alejando” a la misma de la zona de aceleraciones espectrales elevadas.



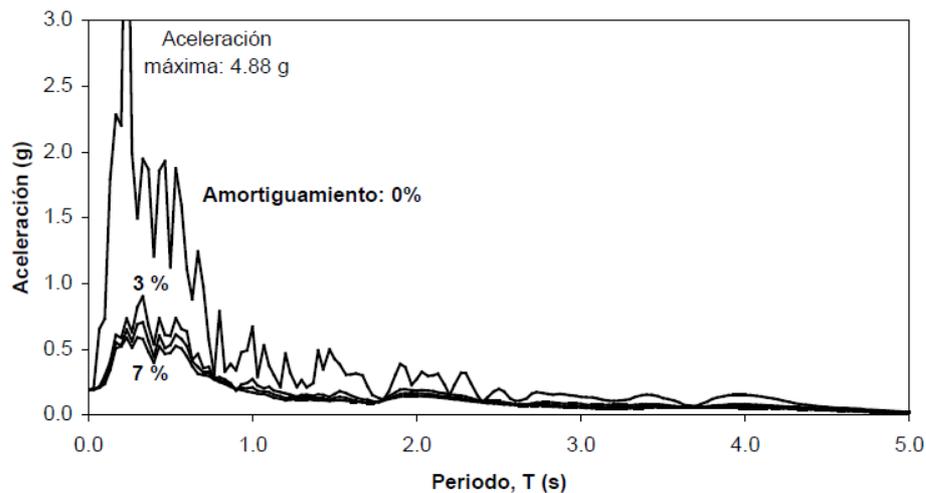


Figura 3-10: Ejemplos de espectro de respuesta

Fuente: Crisafulli et al. (2002)

3.6.1. ESPECTROS DE RESPUESTA TRIPARTITOS

A pesar de que se pueden considerar los valores expresados anteriormente, a menudo, en lugar de eso, se establece uno de la velocidad y otro de la aceleración, que representan, respectivamente, las cantidades:

$$S_v(\omega_o, \xi) = \omega_o \cdot S_{dr}$$

$$S_a(\omega_o, \xi) = \omega_o^2 \cdot S_{dr} .$$

Ecuación 3-19: Espectro de respuesta para un sismo

La primera de estas expresiones se conoce con el nombre de valor numérico máximo de pseudovelocidad con relación al terreno, porque resulta al sustituir seno por coseno en el integrando de la ecuación de la respuesta de velocidad del estado estacionario ante un movimiento en el soporte. Dentro del rango usual de diseño sísmico, S_v se aproxima mucho estadísticamente a la velocidad real con relación al terreno, excepto para periodos naturales muy largos, como se nota en la Figura 3-11: Comparación de espectros de velocidad relativa y pseudovelocidad.

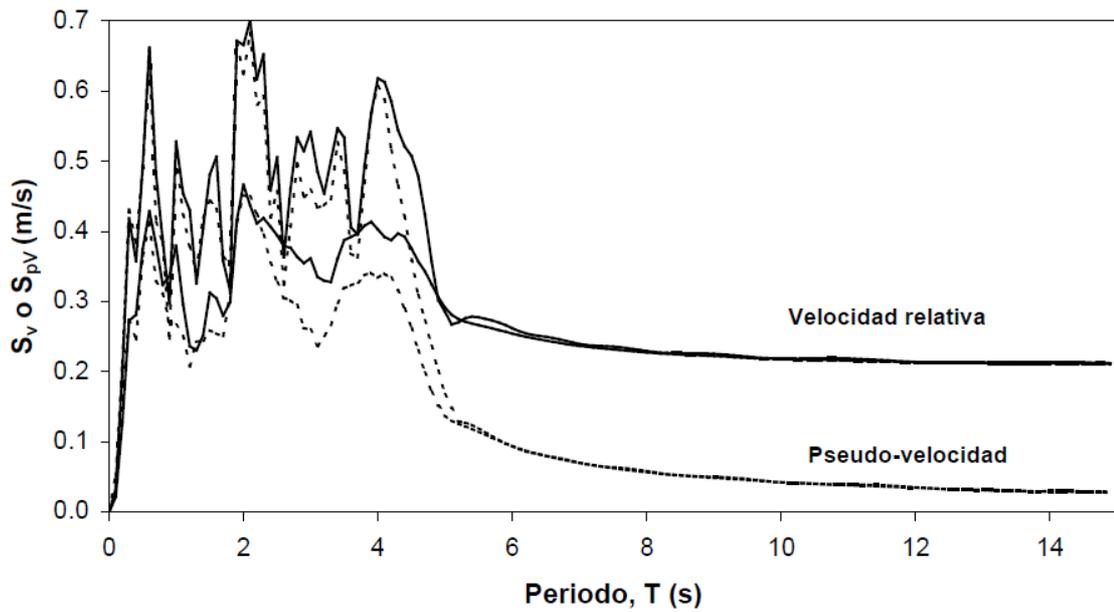


Figura 3-11: Comparación de espectros de velocidad relativa y pseudovelocidad
Fuente: Crisafulli et al. (2002)

La segunda de las expresiones es llamada como el valor numérico máximo de la pseudoaceleración absoluta y se aproxima al máximo absoluto de \ddot{y} . S_a representa aquella parte de la aceleración absoluta cuyo producto por la masa suministra la fuerza máxima del resorte, es decir, desprecia la parte de x cuyo producto por m nos daría la fuerza en el amortiguador.

Para demostrar este hecho, se considera la ecuación de movimiento de un sistema masa resorte no amortiguado con movimiento en la base:

$$m \cdot \ddot{y} + k \cdot x = 0$$

$$Q_e = k \cdot x = m \cdot \omega_o^2 \cdot x$$

$$Q_e = m \cdot \ddot{y}$$

$$|Q_e| = m \cdot S_a$$

Ecuación 3-20: Fuerza sísmica efectiva

Puede notarse que la aceleración absoluta o total siempre es proporcional al desplazamiento relativo bajo estas condiciones. Se observa también que todas las gráficas del espectro de aceleración no salen de cero sino de $\ddot{S}g(t)_{\max}$ (aceleración del suelo), ya que se transmite al elemento de medición. Si las estructuras tienen un periodo parecido al periodo del suelo la respuesta tiende a amplificarse.

Es importante recordar que los valores espectrales de desplazamiento y velocidad están asociados al desplazamiento relativo, mientras que la aceleración espectral representa la aceleración total de la masa vibrante. Sin embargo, es común referirse a ellos simplemente como espectros de desplazamiento, velocidad y aceleración, sin aclarar si se trata de valores relativos o totales. Es importante recordar siempre estos conceptos por más que no se emplee la denominación completa, como es usual en la literatura.

La diferencia con S_{aa} puede llegar a ser importante para sistemas muy rígidos, pero se justifica su uso no solo por la sencillez sino porque algunos materiales estructurales constituye una variable mas adecuada para compararla con la capacidad estructural; la resistencia aparente aumenta con la rapidez de deformación y es así como esta circunstancia contrarresta en una forma parcial la omisión de la fuerza en el elemento amortiguador.

3.6.2. REPRESENTACIÓN DE LOS ESPECTROS TRIPARTITOS

La forma de entender el espectro tripartito es comprendiendo las rectas que lo componen. Usando en el eje de las abscisas el período, las líneas de pendiente negativa corresponden a:

$$S_v = \omega_o \cdot S_{dr} = \frac{2\pi}{T_o} \cdot S_{dr}$$

$$\log(S_v) = -1 \cdot \log(T_o) + \log(2\pi \cdot S_{dr})$$

y las líneas con pendiente positiva resultan:

$$S_a = \omega_o^2 \cdot S_{dr}$$

$$S_v = \frac{S_a}{\omega_o} = \left(\frac{T_o}{2\pi} \right) \cdot S_{dr}$$

$$\log(S_v) = +1 \cdot \log(T_o) + \log\left(\frac{S_a}{2\pi}\right)$$

Se nota entonces que la ecuación para $\log(S_v)$ representa a una recta de pendiente (-1) si S_{dr} es constante, y de pendiente (+1) si S_a es constante. Se invertiría el orden de las pendientes si se consideraría la frecuencia natural f en lugar del periodo T_o , de la siguiente forma:

$$\log(S_v) = +1 \cdot \log(f) + \log(2\pi \cdot S_{dr})$$

$$\log(S_v) = -1 \cdot \log(f) + \log\left(\frac{S_a}{2\pi}\right)$$

La Figura 3-12: Lectura de los valores espectrales en la representación combinada, muestra la forma de la lectura de un espectro tripartito, con los períodos como abscisas.

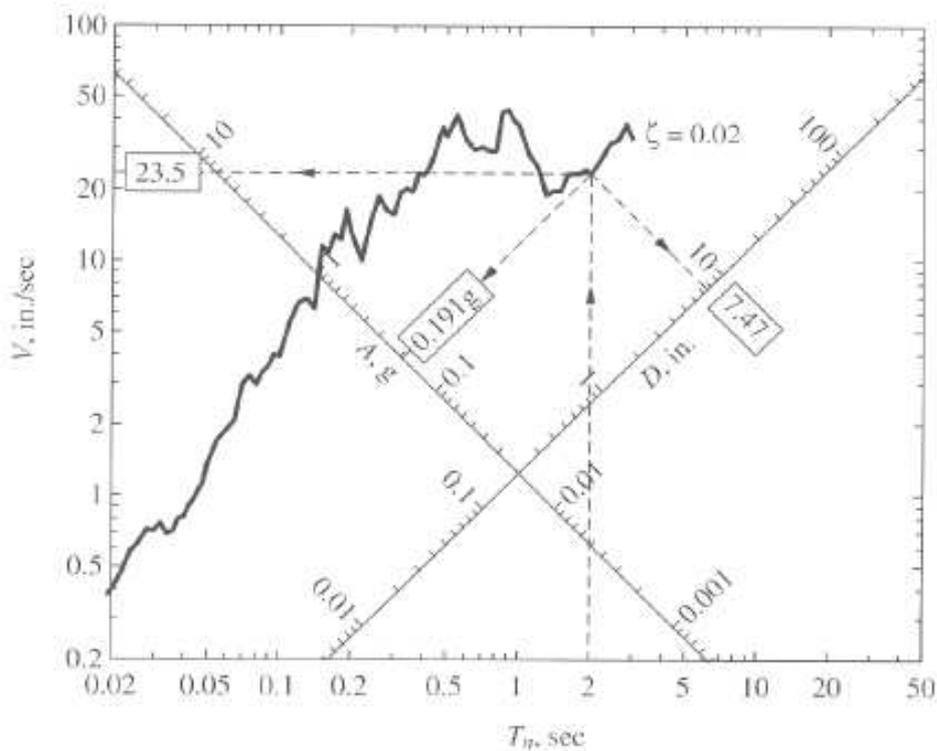


Figura 3-12: Lectura de los valores espectrales en la representación combinada
Fuente: Crisafulli et al. (2002)

En la Figura 3-13: Representación combinada de espectros en papel logarítmico. Amortiguamiento 0, 2, 5 y 10%. Registro de El Centro (1940), puede notarse que los valores máximos del movimiento del suelo, desplazamiento, velocidad y aceleración, se pueden representar en el gráfico combinado mediante tres rectas (en dicha figura se indican con líneas de trazo). Las curvas de respuesta espectral para distintos valores de amortiguamiento se ubican en general por encima de las líneas que definen el movimiento del suelo, indicando así que la vibración propia de la estructura amplifica dicho movimiento. En el rango de periodos bajos la aceleración espectral tiende a la aceleración máxima del suelo y lo mismo ocurre con los desplazamientos en la zona de periodos elevados, cumpliendo así con los límites indicados.

La representación en papel logarítmico no es un tipo diferente de espectro, sino una alternativa conveniente para graficar en forma unificada las tres variables y suele utilizarse tanto para espectros de respuesta como para espectros de diseño.

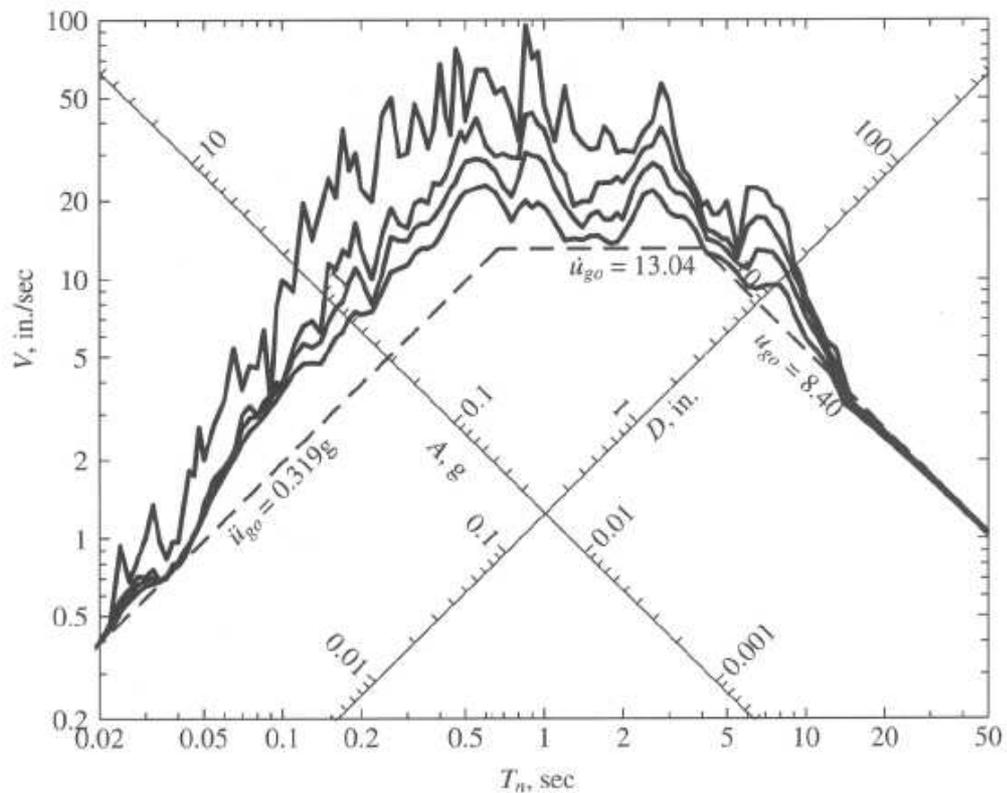


Figura 3-13: Representación combinada de espectros en papel logarítmico. Amortiguamiento 0, 2, 5 y 10%. Registro de El Centro (1940)

Fuente: Crisafulli et al. (2002)

Los valores espectrales también pueden representarse mediante un gráfico donde se ubican en abscisas el desplazamiento y en ordenadas la aceleración, mientras que los periodos de vibración se indican mediante líneas oblicuas. Este tipo de representación se conoce como espectro de capacidad, a pesar de que conceptualmente sería más conveniente llamarlos espectros combinados de aceleración y desplazamiento. La ventaja de este tipo de gráfico es que permite superponer al espectro la curva de capacidad (resistencia lateral-desplazamiento) de la estructura y compararla con la demanda sísmica. La Figura 3-14: Espectro de capacidad. Terremoto Turquía (1999), presenta un ejemplo de este tipo de espectros.

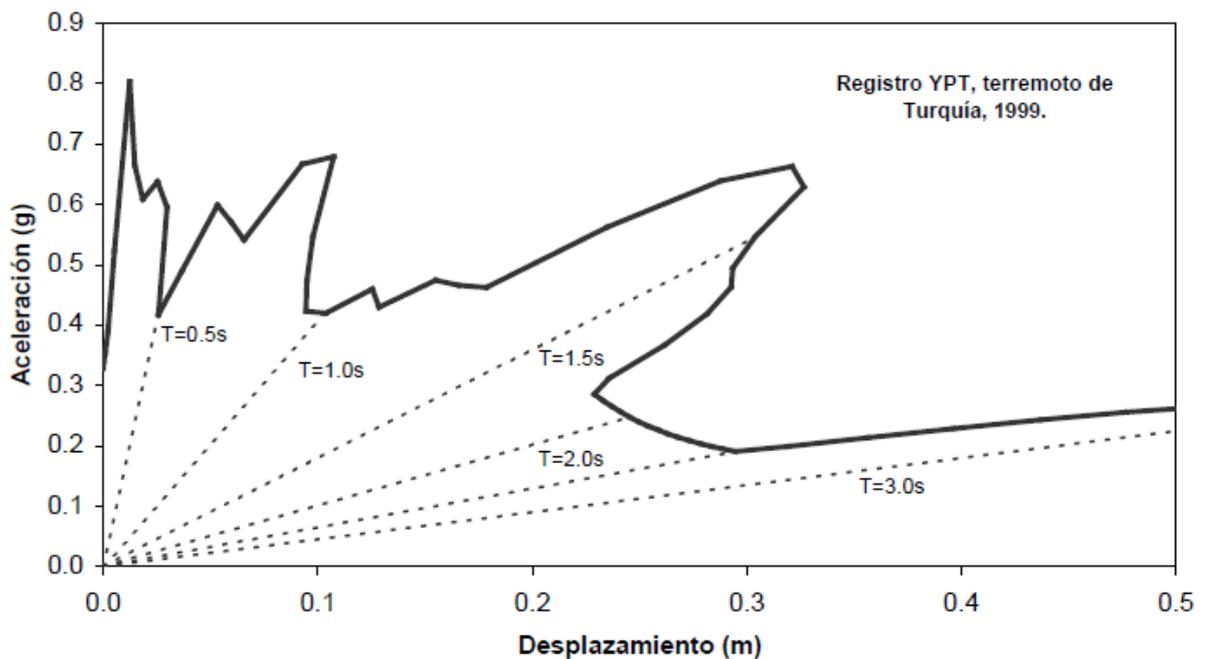


Figura 3-14: Espectro de capacidad. Terremoto Turquía (1999)

Fuente: Crisafulli et al. (2002)

3.6.3. VALORES LÍMITE DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA

Es conveniente realizar ciertas consideraciones conceptuales para comprender la Tabla 3-1: Valores límite de los espectros de respuesta.

En primer lugar para el caso de una estructura muy rígida (periodo de vibración cercano a cero), el desplazamiento relativo será prácticamente nulo debido a que no hay deformaciones internas por la gran rigidez de la estructura, mientras que el desplazamiento y la aceleración total tenderán a ser iguales a los del terreno. Es decir, que la aceleración total máxima, será prácticamente igual a la aceleración máxima del terreno. Si por el contrario, suponemos ahora el caso de una estructura muy flexible (periodos de vibración mayores de 10 o 15 s), cuyo periodo de vibración tiende a infinito, el desplazamiento total es nulo (al igual que la aceleración total) porque la masa no vibra por acción del terremoto. Sin embargo, el desplazamiento relativo tiende a ser igual al desplazamiento máximo del terreno. Por lo tanto el desplazamiento y la velocidad espectral tienden a los valores máximos de desplazamiento y velocidad del terreno.

Caso	S_D	S_V	S_{pV}	S_A	S_{pA}
Estructura muy rígida $T \rightarrow 0, \omega \rightarrow \infty$	0	0	0	$\ddot{u}_{g \max}$	$\ddot{u}_{g \max}$
Estructura muy flexible $T \rightarrow \infty, \omega \rightarrow 0$	$u_{g \max}$	$u_{g \max}$	0	0	0

Tabla 3-1: Valores límite de los espectros de respuesta

3.6.4. FACTORES QUE AFECTAN LOS ESPECTROS DE RESPUESTA

Son muchas las variables que pueden influir significativamente sobre los registros de aceleración y por lo tanto sobre los espectros de respuesta. Entre las más importantes podemos mencionar: los valores máximo del movimiento del terreno (aceleración, velocidad y desplazamiento), contenido de frecuencias del terremoto, duración del movimiento fuerte, mecanismo de generación del terremoto, magnitud, tipo de suelo, etc.

La Figura 3-15: Comparación de espectros de aceleración para distintos terremotos (factor de amortiguamiento 5%), muestra las curvas de aceleración espectral que corresponden a cuatro terremotos diferentes. Puede observarse claramente cómo una misma estructura (igual periodo de vibración e igual factor de amortiguamiento) experimentará aceleraciones máximas notablemente diferentes para los distintos terremotos.

Una de las variables de significativa importancia en el diseño sismorresistente es el tipo de suelo. Los estudios realizados con registros de aceleración tomados en distintos terremotos y en distintos lugares muestran que en estratos de suelos blandos puede originarse una amplificación del movimiento con respecto al movimiento medido en la roca o en suelos firmes.

En la Figura 3-16: Espectros promedios para distintos tipos de suelos (factor de amortiguamiento 5%), se muestran resultados de un estudio conducido por Seed donde se obtuvieron curvas de aceleración espectral para distintos tipos de suelos.

Las distintas curvas de este gráfico, las cuales se derivaron considerando el promedio de un número significativo de terremotos, muestran la significativa influencia del terreno de fundación, especialmente sobre el rango de periodos de vibración en el cual se producen las mayores aceleraciones espectrales. Debe notarse que en este gráfico las aceleraciones espectrales se presentan en forma relativa, es decir divididas por la aceleración máxima del suelo. Es por ello que todas las curvas parten de un valor unitario para el caso de periodo de vibración nulo.

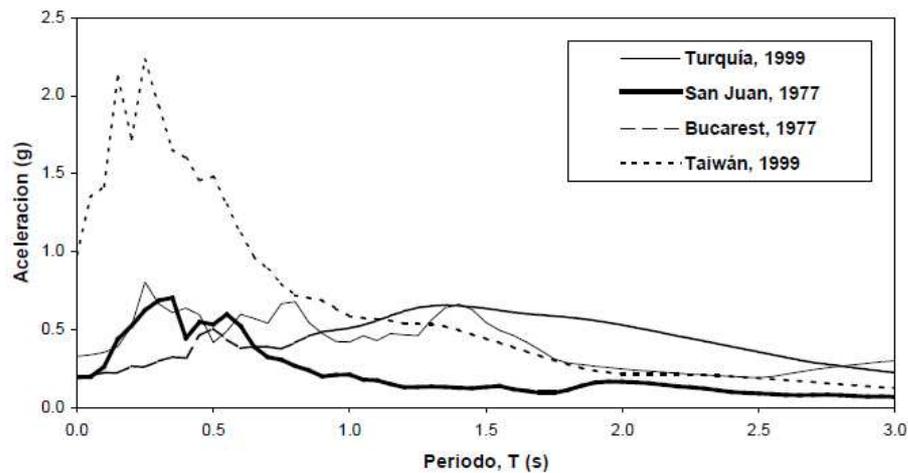


Figura 3-15: Comparación de espectros de aceleración para distintos terremotos (factor de amortiguamiento 5%)

Fuente: Crisafulli et al. (2002)

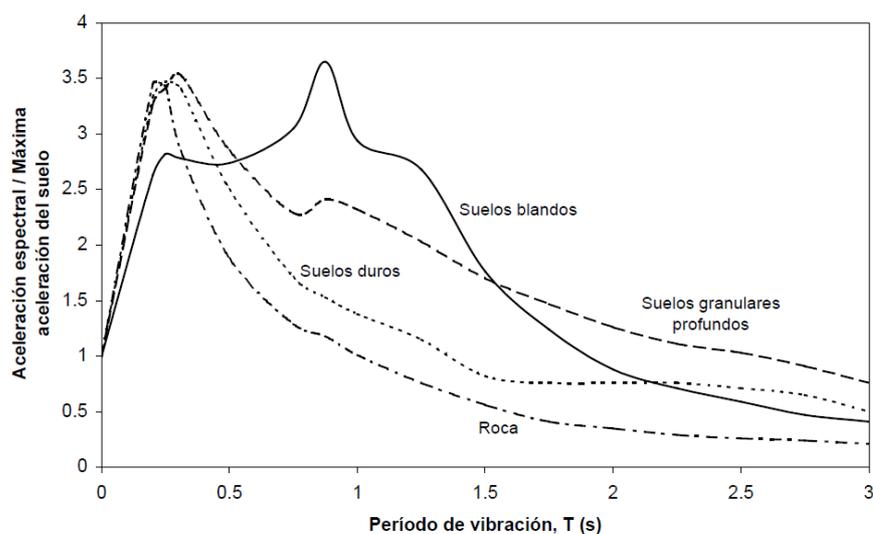


Figura 3-16: Espectros promedio para distintos tipos de suelos (factor de amortiguamiento 5%)

Fuente: Crisafulli et al. (2002)

3.6.5. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN

Son valores estadísticos representativos formulados con base a espectros elásticos de sismos fuertes registrados en diferentes localizaciones del mundo y considerando una probabilidad de excedencia del orden del 10%. Newmark y Hall han mostrado que un espectro de respuesta suavizado de un movimiento idealizado puede obtenerse mediante la amplificación del movimiento del terreno usando factores que dependen del amortiguamiento. Estos se muestran en la Tabla 3-2: Factores de amplificación.

Amort. respecto al crítico %	Factores de amplificación del movimiento del terreno		
	Desplazam.	Velocidad	Aceleración
0	2.5	4.0	6.4
0.5	2.2	3.6	5.2
1	2.0	3.2	5.2
2	1.8	2.8	4.3
5	1.4	1.9	2.6
7	1.2	1.5	1.9
10	1.1	1.3	1.5
20	1.0	1.1	1.2

Tabla 3-2: Factores de amplificación

Fuente: Newmark, N. M y W. Hall. "Procedures and criteria for earthquake resistant design" Building practices for disaster mitigation, dept. of commerce, (1973)

3.7. ESPECTROS DE RESPUESTA DE LOS ACELEROGRAMAS CONSIDERADOS

Considerando la teoría expuesta se ha procedido a calcular los espectros de respuesta tanto para las aceleraciones corregidas por el método de Berg – Housner, como para aquellas propuestas en el informe, las mismas que fueron corregidas

usando el método de los promedios. Dichas gráficas se muestran en el Anexo No. 4, en donde se observan las aceleraciones corregidas y los espectros elásticos para el canal 2 de todos los registros considerados.

Puede notarse que la variación es más notoria en el desplazamiento que en la aceleración; al comparar los espectros elásticos calculados para las dos formas de corrección de los acelerogramas, se nota que la variación es mínima.

Por otro lado, considerando la propuesta del Código Ecuatoriano de la Construcción (C.E.C.) para la aceleración máxima esperada en roca, con una probabilidad del 10% de excedencia en 50 años para la ciudad de Quito, se ha procedido a normalizar los registros al 40% de la aceleración de la gravedad. El Anexo No. 5 muestra los espectros elásticos obtenidos luego de la normalización, para amortiguamientos de 2, 5 y 10%, primero para los canales horizontales (2 y 3) y luego para el canal vertical (1). En la Tabla 3-3: Amplitudes máximas de los espectros elásticos para 5%, se puede distinguir que estos valores son aproximadamente 5 veces más que la aceleración máxima del suelo, que es 0.4g.

FECHA	ESTACION	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3
		(g)	(g)	(g)
11 Mayo 1994	SB	1.73	2.03	1.13
	CB	1.25	1.42	1.71
	HM	1.67	1.29	1.48
	AE	1.69	2.02	1.97
2 Octubre 1995	AE	1.30	0.93	1.06
	HM	1.18	1.27	1.36
3 Octubre 1995	SB	1.78	1.15	1.93
17 Enero 1996	AE	1.40	1.13	1.24
28 Marzo 1996	SB	1.92	1.86	1.62
	PROMEDIO	1.52	1.46	1.50

Tabla 3-3: Amplitudes máximas de los espectros elásticos para 5%

Los espectros obtenidos son comparados con el propuesto por el C.E.C. En el Anexo No. 6 se presentan las figuras que muestran estas comparaciones, en primer lugar para las componentes horizontales y al final para la componente vertical. La recomendación del C.E.C. para esta última, expresa que debe ser $2/3$ de los valores tomados para la componente horizontal.

3.8. ESPECTROS TRIPARTITOS DE LOS ACELEROGRAMAS CONSIDERADOS

En base a los valores obtenidos para la pseudovelocidad relativa y para los valores de amortiguamiento crítico de 2%, 5% y 10%, se obtienen los espectros tripartitos para las componentes horizontales de los registros normalizados con respecto a 0.4g. Estos gráficos se muestran en el Anexo No. 7. En los mismos se pueden distinguir los valores de desplazamiento relativo, y pseudoaceleración absoluta.

En base a la observación de los espectros tripartitos, puede dividirse al espectro en tres rangos de períodos:

- Para períodos largos existe una *región sensible al desplazamiento* y la respuesta estructural está más directamente relacionada con el desplazamiento del suelo.
- La región de períodos cortos es llamada *región sensible a la aceleración* porque la respuesta estructural está más directamente relacionada con la aceleración del suelo.
- Los períodos intermedios forman parte de la *región sensible a la velocidad*, debido a que la respuesta estructural parece estar mejor relacionada con la velocidad del suelo que con los otros parámetros del movimiento del suelo.

Para un movimiento particular del suelo, los períodos límites entre estas regiones varían con el amortiguamiento. (Chopra, 1995)

El Anexo No. 8 presenta a los espectros suavizados. Estos se han obtenido en base a los espectros tripartitos, considerando la región sensible a la velocidad. El resumen

de los valores de períodos obtenidos se presenta en la Tabla 3-4: Valores de los rangos de períodos en la región sensible a la velocidad. Estos valores han sido graficados para notar su variación. En la Figura 3-17: Valores de los rangos de período en la región sensible a la velocidad, se presentan el período mínimo y máximo en esta región para los canales horizontales de los acelerogramas considerados en este estudio.

	Tc	Td
a1c2	0.42	1.3
a1c3	0.6	1.8
a2c2	0.3	0.88
a2c3	0.25	0.9
a3c2	0.23	1.2
a3c3	0.3	1
a4c2	0.25	0.6
a4c3	0.19	0.8
a5c2	2	3
a5c3	1.9	3
a6c2	0.85	3
a6c3	0.9	3.2
a7c2	0.6	2.3
a7c3	1.3	2.46
a8c2	0.29	0.53
a8c3	0.19	0.7
a9c2	1.2	2.2
a9c3	1	2.3
PROM	0.71	1.73

Tabla 3-4: Valores de los rangos de períodos en la región sensible a la velocidad

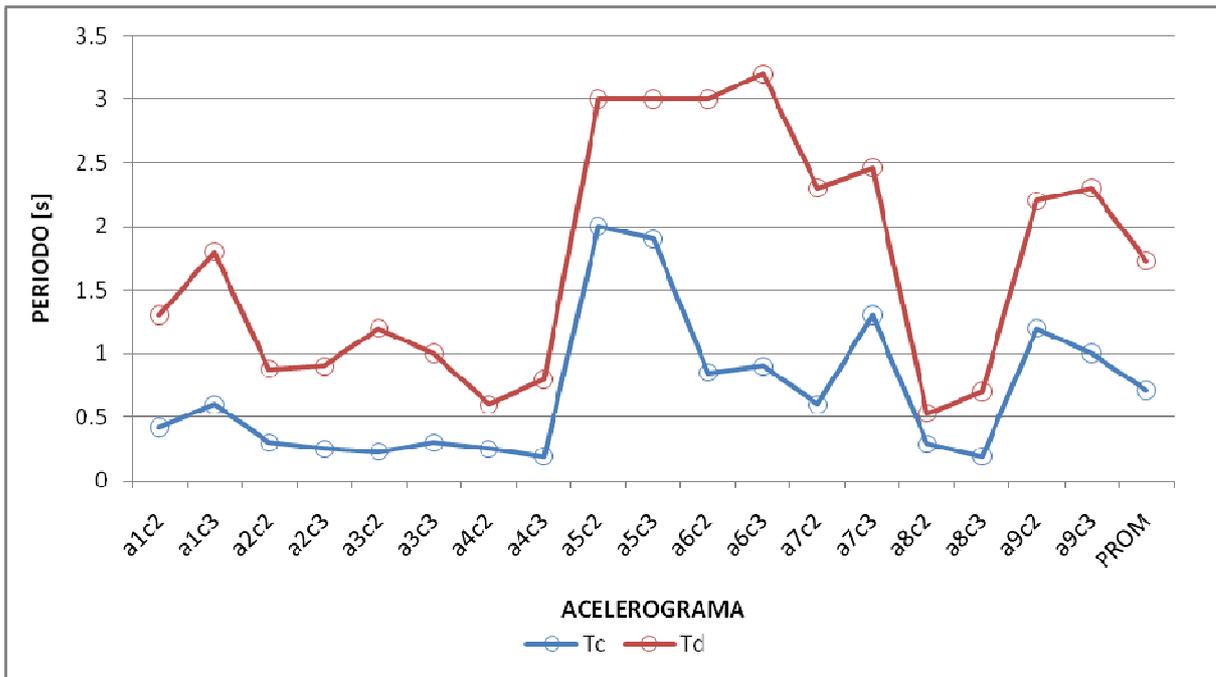


Figura 3-17: Valores de los rangos de período en la región sensible a la velocidad

Se observa que existe una dispersión entre los datos, por lo que, para disminuirla, se han clasificado en dos subgrupos. El primero corresponde a los acelerogramas 1, 2, 3, 4, 8 y el segundo a los acelerogramas 5,6,7 y 9.

En subgrupo I presenta características similares. Los acelerogramas corresponden a sismos registrados cerca de la falla. En la Tabla 3-5: T_{min} y T_{max} para subgrupo I, se presenta el promedio de estos períodos, el cual puede observarse graficado en la Figura 3-18: T_{min} y T_{max} para subgrupo I

La Figura 3-19: T_{min} y T_{max} para subgrupo II, corresponde a los valores de la Tabla 3-6: T_{min} y T_{max} para subgrupo II. Este subgrupo presenta los acelerogramas que fueron registrados lejos de la falla.

Si se consideran los valores máximos del período mínimo del rango de valores, se nota que el subgrupo I se ajusta a la curva S1 o a la curva S2 de la propuesta del coeficiente sísmico del C.E.C., el subgrupo II a la curva S4 y el promedio de los dos a la curva S3.

	Tc	Td
a1c2	0.42	1.3
a1c3	0.6	1.8
a2c2	0.3	0.88
a2c3	0.25	0.9
a3c2	0.23	1.2
a3c3	0.3	1
a4c2	0.25	0.6
a4c3	0.19	0.8
a8c2	0.29	0.53
a8c3	0.19	0.7
PROM	0.302	0.971

Tabla 3-5: Tmin y Tmax para subgrupo I

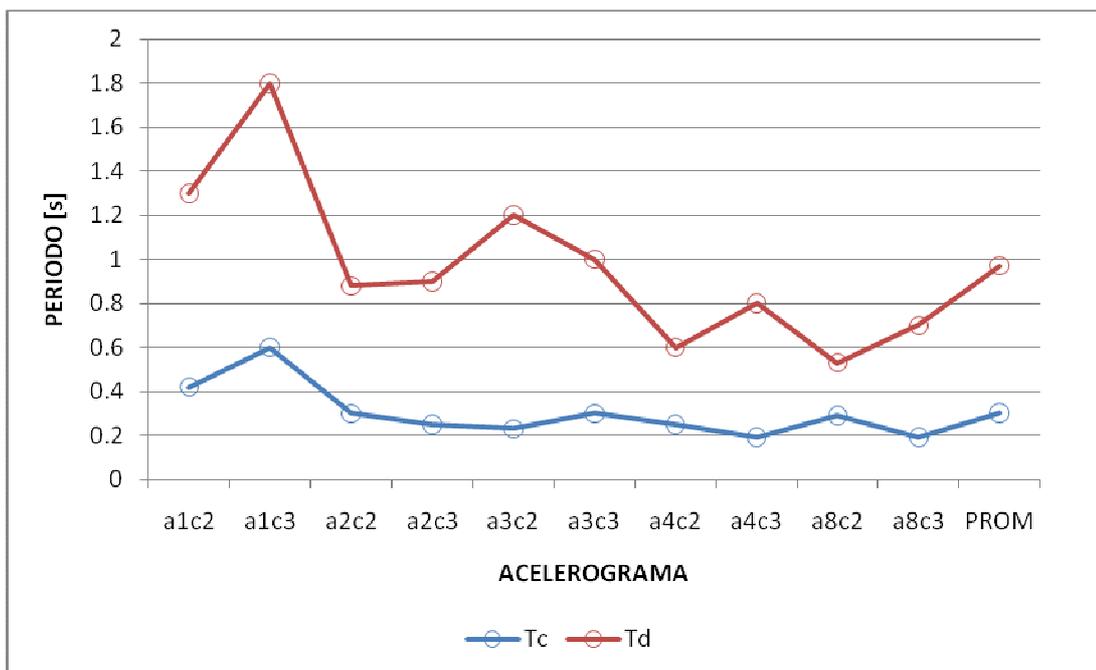


Figura 3-18: Tmin y Tmax para subgrupo I

	Tc	Td
a5c2	2	3
a5c3	1.9	3
a6c2	0.85	3
a6c3	0.9	3.2
a7c2	0.6	2.3
a7c3	1.3	2.46
a9c2	1.2	2.2
a9c3	1	2.3
PROM	1.22	2.68

Tabla 3-6: Tmin y Tmax para subgrupo II

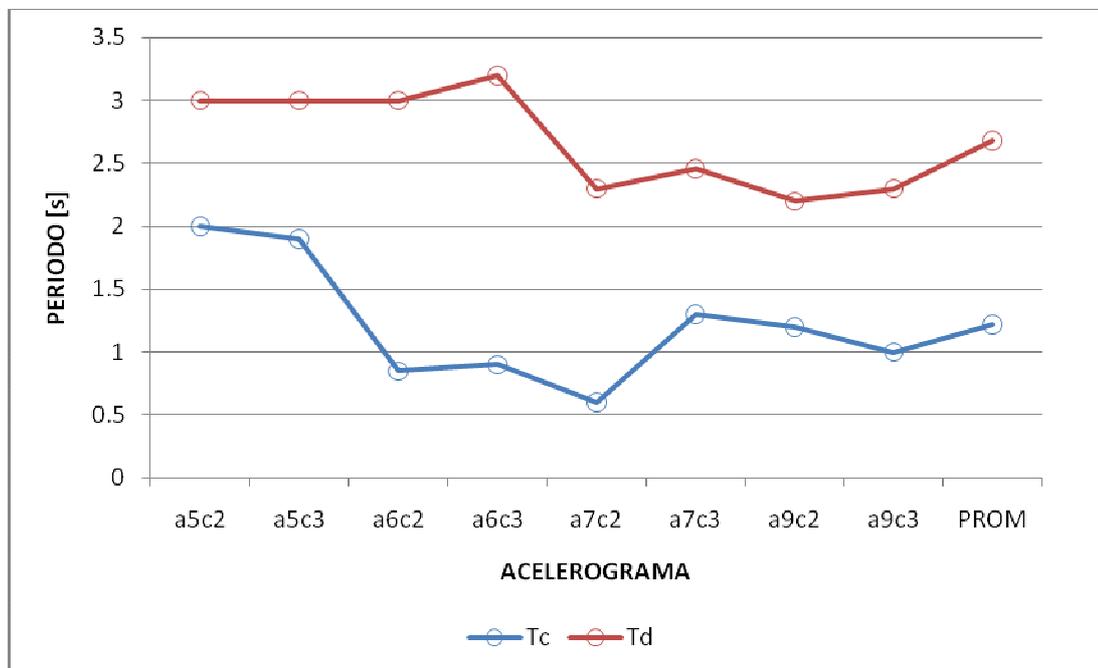


Figura 3-19: Tmin y Tmax para subgrupo II

CAPÍTULO 4. ESPECTROS DE DUCTILIDAD DE SISTEMAS ELASTOPLÁSTICOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras son diseñadas asumiendo que las mismas son linealmente elásticas y que permanecen así cuando está sujeta a cualquier excitación dinámica esperada. Sin embargo, hay situaciones en las cuales la estructura tiene que estar diseñada para una excitación eventual de gran magnitud como un terremoto fuerte o los efectos de una explosión nuclear. En estas condiciones las estructuras incursionan en el rango inelástico rápidamente, ya que sufren inversiones de carga, por lo que no es real asumir que la estructura permanecerá en el rango elástico y es necesario diseñarlo para los casos en que se tenga deformaciones más allá del límite elástico.

El movimiento en los apoyos al igual que las fuerzas exteriores, produce esfuerzos y deflexiones dinámicas y dependiendo de la intensidad de dichos movimientos, podría ocurrir que algunas propiedades de la estructura se vean afectadas. Uno de los casos más comunes es el cambio de rigidez asociado con las deformaciones incrementales que sufre el sistema. Es por eso que en zonas con alta peligrosidad sísmica, es importante considerar los criterios de ductilidad, de modo que las estructuras sean capaces de resistir sismos fuertes y evitar su colapso.

Las estructuras pueden ser diseñadas para resistir sismos severos, pero no es económicamente factible diseñar estructuras con comportamiento elástico ante sismos de gran intensidad previsible. Es así, que la más simple y aceptada suposición para el diseño fuera del límite elástico es asumir un comportamiento elastoplástico. En este tipo de comportamiento y sin considerar los efectos de segundo orden, la estructura es elástica hasta que la fuerza restauradora alcance un valor máximo (en tensión o compresión) luego de la cual permanece constante hasta que el movimiento invierte su dirección y retorna al comportamiento elástico.

En el caso de comportamiento inelástico no es posible hacer un análisis de tipo modal. La teoría espectral tiene limitaciones en la aplicación a estructuras con comportamiento histerético. Sin embargo, el enfoque es aceptado ya que no se ha encontrado una técnica confiable y suficientemente práctica para ser incluida de carácter normativo y porque con las precauciones debidas, se puede contar con estructuras aceptablemente seguras.

Los códigos actuales de diseño sismorresistente especifican las acciones de diseño mediante espectros elásticos de pseudoaceleraciones cuyas ordenadas pueden o no presentarse reducidas para considerar la capacidad de disipación en el rango no lineal. Además, permiten la incursión de las estructuras en el campo no lineal o inelástico ante terremotos con escasa probabilidad de ocurrencia.

Sin embargo debe notarse que el espectro elástico por sí mismo no puede indicar la severidad de destructividad de un terremoto ya que la excitación crítica de las estructuras elásticas (fenómeno de resonancia) es diferente al de las inelásticas (pulsos largos e intensos de aceleración, asociados a altos valores de velocidad incremental), siendo estos últimos los que parecen conducir a su respuesta máxima.

Considerando lo planteado se nota la importancia del estudio de la respuesta de sistemas no lineales ya que mediante el análisis de la respuesta de un sistema de un grado de libertad se puede llegar a conclusiones que pueden guiar al diseñador en cuanto a los requerimientos de los sistemas estructurales. Las demandas de ductilidad son las que se asocian con el daño, es por eso que el espectro de ductilidad, al barrer con el rango de períodos, permite visualizar un panorama más completo del fenómeno sísmico.

4.2. DUCTILIDAD Y COMPORTAMIENTO SÍSMICO

A continuación se presentan algunas definiciones:

Ductilidad: Habilidad para deformarse plásticamente.

Capacidad de absorción de energía: habilidad para acumular energía mediante la deformación plástica durante un ensayo estándar de una probeta en tracción.

Resiliencia: capacidad para absorber energía en el rango elástico

Capacidad de disipación de energía: habilidad para entregar en el proceso de descarga la energía acumulada en el proceso de carga. Está dada por el área de la curva esfuerzo deformación del proceso completo de carga y descarga.

Esqueleto de curva: relación fuerza – deflexión que se obtiene al incrementar, progresivamente desde cero, la magnitud de la deformación que sufre la estructura. Bajo un proceso repetitivo de carga y descarga en estructuras elásticas la curva carga – deflexión no se separa de la que constituye el esqueleto inicial de la curva, no así para aquellas que pueden fluir y que sobrepasan el límite de fluencia

Curvas histeréticas: gráficas de carga – deflexión que se asocian a cargas alternas que varían entre dos extremos. El área encerrada por la curva o lazo representa la energía acumulada en el proceso de carga y que se disipa durante la descarga

Considerando el Figura 4-1: Curva esfuerzo – deformación, puede definirse:

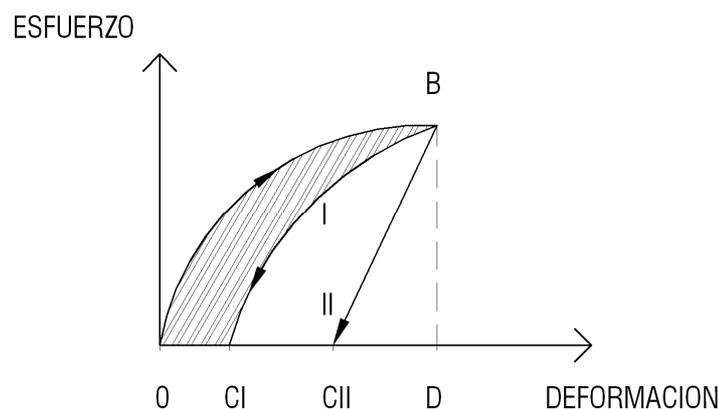


Figura 4-1: Curva esfuerzo – deformación

Capacidad de absorción de energía: para I y para II corresponde al área O-B-D.

Capacidad de disipación de energía: para I corresponde al área histerética O-B-CI, mientras que para II corresponde al área O-B-CII. Es deseable una alta capacidad de disipación de energía en las estructuras

Aquel que disipa mas energía termina con deformación permanente cuando se retira la carga. Esto implica daño permanente.

Sistema estructural dúctil: aquel que es capaz de soportar deformaciones importantes cuando se lo somete a un régimen de cargas prácticamente constantes, sin alcanzar niveles excesivos de daño o disminución de la resistencia ante aplicaciones subsecuentes de varios ciclos de carga y descarga.

El empleo de materiales dúctiles no implica necesariamente el logro de un sistema dúctil; por otro lado, con buena tecnología constructiva y detallamiento se puede aumentar su ductilidad en ciertos materiales que no son dúctiles como el hormigón.

En una estructura se pueden determinar los siguientes tipos de ductilidad:

- Ductilidad en un miembro estructural, por ejemplo: una viga
- Ductilidad en un grupo de miembros estructurales, por ejemplo: el entrepiso de una estructura
- Ductilidad de la estructura completa

Las deformaciones asociadas pueden ser de tipo lineal o angular.

Sistema Elasto – plástico simple: sistema idealizado no lineal, cuya resistencia varía en la forma cuyo esquema fundamental se muestra en la Figura 4-2: Modelo elastoplástico lineal.

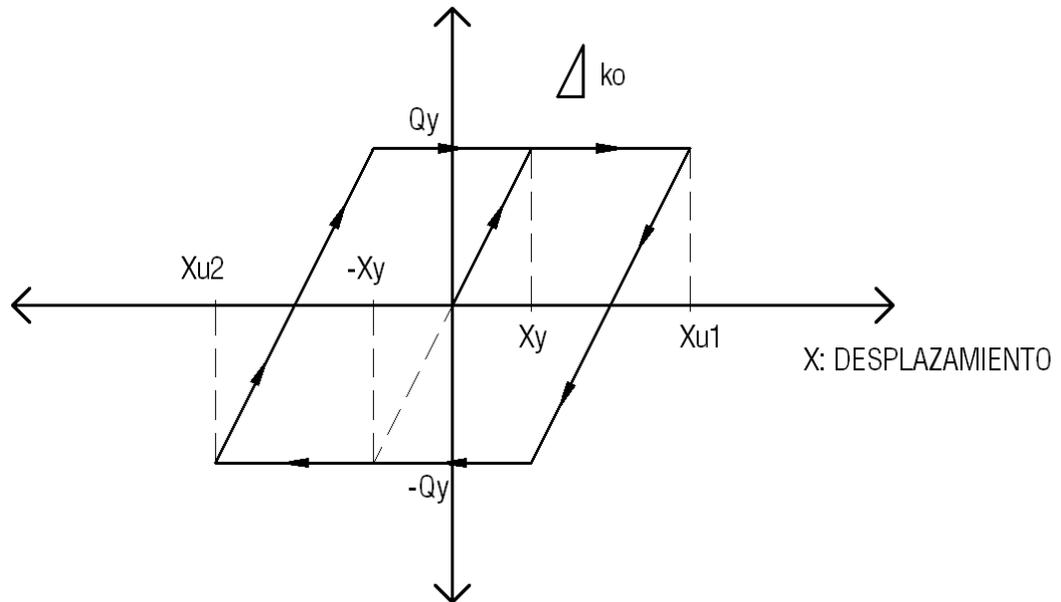


Figura 4-2: Modelo elastoplástico lineal

donde:

k_0 : Rigidez inicial del sistema elastoplástico

Q_y : Resistencia en la fluencia

X_y : Deformación de plastificación

X_{u1} , X_{u2} : Deformación máxima

Del gráfico anterior pueden establecerse las características en el proceso de carga y descarga:

1. Carga: comportamiento elástico – lineal. (0 – X_y)
2. Rango plástico: iniciación de la fluencia. Incremento de deformaciones sin aumento de carga. (X_y – X_{u1})
3. Descarga: tramo elástico – lineal pero con deformación permanente. (X_{u1} – X)
4. Rango plástico: fluencia. (X – X_{u2})

La energía que se disipa en cada ciclo se puede evaluar como el área encerrada bajo la curva.

Sistema elástico asociado a un sistema elastoplástico simple: sistema lineal, elástico que tiene la misma rigidez que la rigidez inicial del sistema elastoplástico simple.

Factor de ductilidad de un sistema: Relación que existe entre la deformación máxima alcanzada por el sistema elastoplástico y la deformación que se produce en el primer ingreso en el intervalo plástico, en valor absoluto. Es una medida de la fluencia alcanzada por un sistema. Dicha relación se expresa en la Ecuación 4-1: Factor de ductilidad de un sistema.

$$\mu = \left| \frac{x_u}{x_y} \right|$$

Ecuación 4-1: Factor de ductilidad de un sistema

Factor de reducción de carga (R): Relación entre la resistencia requerida por el sistema elástico asociado y la resistencia del sistema elastoplástico en valor absoluto ante una sollicitación sísmica dada. Es decir, es la respuesta del sistema en relación al elastoplástico, como lo muestra la Ecuación 4-2: Factor de reducción de carga.

$$R = \left| \frac{Q_{el}}{Q_y} \right|$$

Ecuación 4-2: Factor de reducción de carga

Q_{el} : Respuesta máxima del sistema elástico

Q_y : Respuesta máxima del sistema elastoplástico simple

4.2.1. CRITERIOS DE ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE REDUCCIÓN DE CARGA

Primer criterio: igualdad entre deformaciones del sistema elastoplástico y del sistema plástico asociado. En ciertos intervalos de T_0 puede aplicarse el criterio de igualdad. La representación gráfica de éste criterio se muestra en la Figura 4-3: Criterio de igualdad entre deformaciones y las expresiones corresponden a las mostradas en la Ecuación 4-3: Criterio de igualdad entre deformaciones.

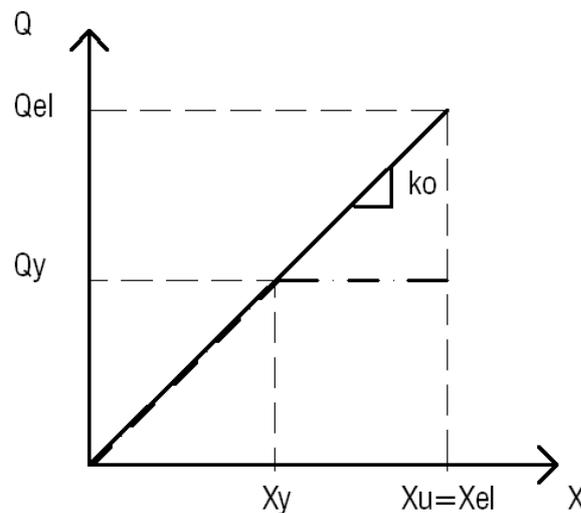


Figura 4-3: Criterio de igualdad entre deformaciones

$$R = \frac{k_o \cdot x_u}{k_o \cdot x_y}$$

$$R = \frac{x_u}{x_y} = \mu$$

Ecuación 4-3: Criterio de igualdad entre deformaciones

Segundo criterio: igualdad entre energías acumuladas correspondientes a la deformación máxima del sistema elastoplástico y del sistema elástico asociado. La Figura 4-4: Criterio de igualdad entre energías, muestra la forma de este criterio,

mientras que la Ecuación 4-4: Criterio de igualdad entre energías, indica el factor de reducción de carga para el mismo.

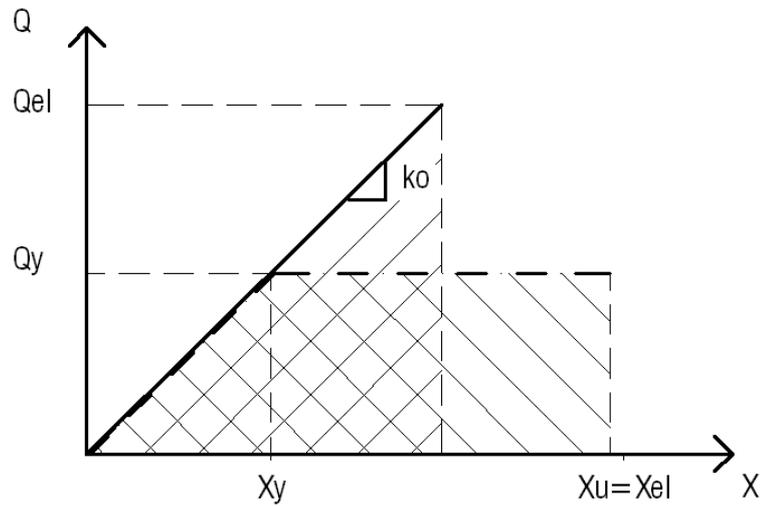


Figura 4-4: Criterio de igualdad entre energías

$$E_{el} = E_{ep}$$

$$\frac{(k_o \cdot x_{el}) \cdot x_{el}}{2} = \frac{(k_o \cdot x_y) \cdot x_y}{2} + (k_o \cdot x_y) \cdot (x_u - x_y)$$

$$\frac{x_{el}^2}{x_y^2} = 2 \cdot \frac{x_u}{x_y} - 1$$

$$R = \frac{k_o \cdot x_{el}}{k_o \cdot x_y} = \frac{x_{el}}{x_y}$$

$$R = \sqrt{2 \cdot \mu - 1}$$

Ecuación 4-4: Criterio de igualdad entre energías

4.3. SISTEMAS NO LINEALES

4.3.1. SISTEMAS SIMPLES (1GDL)

El movimiento de un tipo general de sistema no lineal con un solo grado de libertad es regido por la ecuación diferencial:

$$m \cdot \ddot{x} + Q_R \cdot \left(x, \dot{x} \right) = f(t)$$

Ecuación 4-5: Ecuación general de un sistema no lineal

en la cual:

$f(t)$: Fuerza exterior.

Q_R : Fuerza de resistencia (fuerza restauradora), incluyendo el efecto del amortiguamiento y que depende del desplazamiento como de la velocidad.

m : Masa.

\ddot{x} : Aceleración.

m y Q_R pueden ser funciones del tiempo, de la fuerza aplicada y de la historia de la deformación. Aquí solamente se referirá al caso en que m es constante y en que Q_R es solo función de la fuerza aplicada y de la historia de la deformación.

Si la fuerza del amortiguador es igual a $F_c = c \cdot \dot{x}$, la ecuación resulta:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + Q(x) = f(t)$$

En la ecuación anterior, $Q(x)$ es la resistencia del sistema. Dicha función de resistencia puede tener un solo valor y ser independiente de la historia del movimiento. En este caso se dice que el sistema es elástico y $Q(x) = k \cdot x$, de lo contrario es inelástico y la ecuación resulta:

$$\ddot{x} = \frac{f(t)}{m} - \frac{c}{m} \cdot \dot{x} - \frac{Q(x)}{m}$$

$$\ddot{x} = \frac{f(t)}{m} - 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot \dot{x} - \frac{Q(x)}{m}$$

Si la excitación no es una fuerza externa sino la aceleración del suelo, la ecuación en cualquier instante resulta:

$$\ddot{x} = -\ddot{S}g - 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot \dot{x} - \frac{Q(x)}{m}$$

La frecuencia circular natural inicial del sistema ω_0 depende de la rigidez inicial k_0 .

4.3.2. TIPOS DE NO LINEALIDAD

En la Figura 4-5: Curvas inelásticas fuerza - deformación se notan algunos casos de interés. Los mismos que se detallan a continuación:

- Comportamiento rígido plástico (caso a): $Q = -Q_1$ si $\dot{x} < 0$ y $Q = Q_2$ si $\dot{x} > 0$. La esquematización describe adecuadamente el comportamiento de terraplenes, presas de enrocamiento y estructuras parecidas, en una amplia gama de condiciones cuando se consideran explícitamente deslizamientos parciales a lo largo de superficies de fallas.
- Comportamiento elastoplástico linealmente amortiguado (caso b): $Q = Q_1(x) + c \cdot \dot{x}$ con $Q_1(x)$ como se muestra en la figura y con c constante. Muchos marcos de acero quedan comprendidos adecuadamente por la idealización.
- Comportamientos bilineales con amortiguamiento lineal (caso c o caso d): $Q = Q_1(x) + c \cdot \dot{x}$ con $Q_1(x)$ como se muestra en las figuras. El caso c corresponde al

endurecimiento por deformación, mientras que la rama descendente de el caso d corresponde al ablandamiento por deformación. Estas esquematizaciones abarcan con suficiente precisión la mayor parte de los casos de sistemas con un grado de libertad que se encuentran en la practica. El caso d describe el comportamiento de estructuras cuyos miembros sufren pandeo inelástico (que puede ser producido por una carga vertical) o fractura progresiva por falla frágil.

- Comportamiento tipo Masing (1926) o de degradación resistencia - rigidez (caso e): $\frac{Q - Q_0}{2} = Q_1 \cdot \left(\frac{x - x_0}{2} \right)$ donde Q_0 y x_0 son la fuerza y deformación inicial a la que el proceso de carga se invirtió por última vez, excepto que, si la curva definida por la ecuación cruza a una curva descrita en un ciclo de carga anterior, la curva carga - deformación continua según la del ciclo anterior.

Como se mencionó anteriormente, la solución de tipo analítico presenta limitaciones para los movimientos aleatorios sísmicos representados a través de la historia de aceleraciones del suelo, cuando la rigidez cambia según su estado de deformaciones.

Por ello, para calcular la respuesta con cualquier tipo de comportamiento se usa el cálculo numérico de la integración en un proceso paso a paso. El más utilizado es el Método Beta de Newmark con las adaptaciones apropiadas, como se indica a continuación.

4.4. CÁLCULO DE LA RESPUESTA DE UN SISTEMA ELASTOPLÁSTICO SIMPLE. ADAPTACIONES DEL MÉTODO BETA DE NEWMARK

De modo de escribirla en forma adimensional, la ecuación del sistema de 1GDL sujeto a una aceleración en el soporte, se la divide para la masa y el desplazamiento de fluencia:

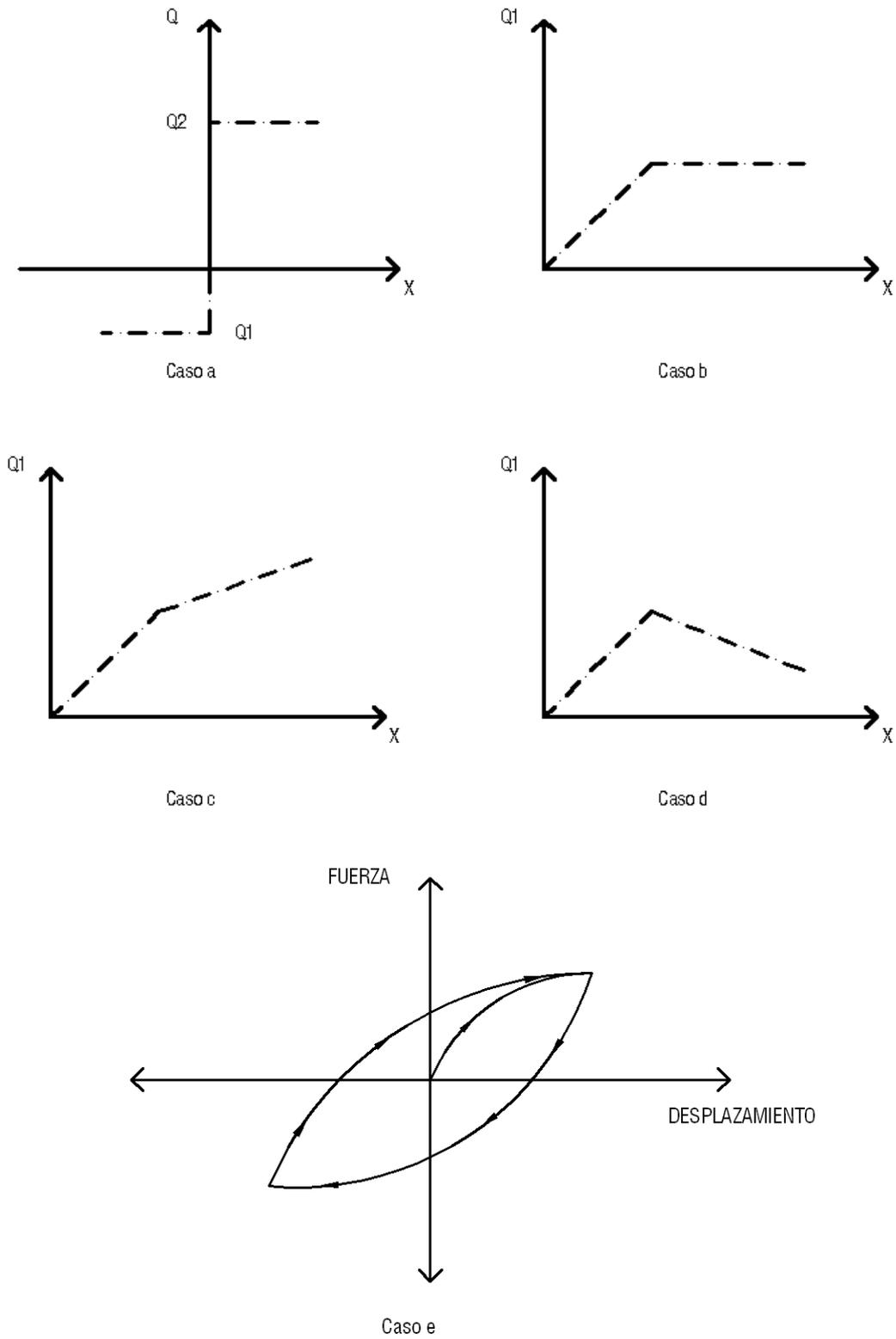


Figura 4-5: Curvas inelásticas fuerza - deformación

$$\frac{\ddot{x}}{x_y} + 2 \cdot \omega_o \cdot \xi \cdot \frac{\dot{x}}{x_y} + \frac{k}{m} \cdot \frac{x}{x_y} = -\frac{\ddot{S}g}{x_y}$$

Considerando además la ductilidad y sus derivadas y reemplazándolas en la ecuación anterior resulta:

$$\ddot{\mu} = \frac{\ddot{x}}{x_y} : \quad \dot{\mu} = \frac{\dot{x}}{x_y} : \quad \mu = \frac{x}{x_y}$$

$$\ddot{\mu} + 2 \cdot \omega \cdot \xi \cdot \dot{\mu} + \omega^2 \cdot \mu = -\frac{\ddot{S}g}{x_y}$$

Para modificar el término independiente de la ecuación con el criterio de escribirla en forma adimensional, se toma la ecuación de la fuerza sísmica de corte para definir el parámetro η :

$$Q_y = C_y \cdot m \cdot g$$

$$\eta = \frac{Q_y}{m \cdot Sg_{\max}^{\ddot{}}}$$

Ecuación 4-6: Parámetro adimensional η

en donde:

Q_y : Fuerza sísmica de corte, resistencia del sistema en la fluencia

C_y : Coeficiente sísmico

$m \cdot g$: Peso de la estructura

m : Masa del sistema

$Sg_{\max}^{\ddot{}}$: Valor máximo de la aceleración del suelo

Además, considerando que las fuerzas pueden expresarse en función del desplazamiento $Q_y = k \cdot x_y$, las expresiones anteriores resultan:

$$\eta = \frac{k \cdot x_y}{m \cdot \ddot{Sg}_{\max}} : \quad x_y = \eta \cdot \ddot{Sg}_{\max} \frac{1}{k/m} : \quad x_y = \frac{\eta \cdot \ddot{Sg}_{\max}}{\omega^2}$$

$$\ddot{\mu} + 2 \cdot \omega \cdot \dot{\xi} \cdot \dot{\mu} + \omega^2 \cdot \mu = - \frac{\ddot{Sg} \cdot \omega^2}{\ddot{Sg}_{\max} \cdot \eta}$$

Ecuación 4-7

La ecuación anterior puede escribirse alternativamente:

$$\ddot{\mu} + 2 \cdot \omega \cdot \dot{\xi} \cdot \dot{\mu} + \omega^2 \cdot \rho = - \frac{\omega^2}{\eta} \cdot \frac{\ddot{Sg}}{\ddot{Sg}_{\max}}$$

Ecuación 4-8: Ecuación de movimiento con movimiento en el soporte en función de la ductilidad de desplazamiento y del factor η

donde:

$$\rho = \frac{R}{R_y}$$

ρ : función de resistencia, factor adimensional que considera la variación de la ductilidad de desplazamiento en los sistemas elastoplásticos ideales

R: resistencia lateral del sistema en cualquier instante

R_y : resistencia en el momento de la fluencia

Graficando la variación del parámetro anterior en función de la ductilidad de desplazamiento, resulta la Figura 4-6: Variación del parámetro ρ en función de la ductilidad.

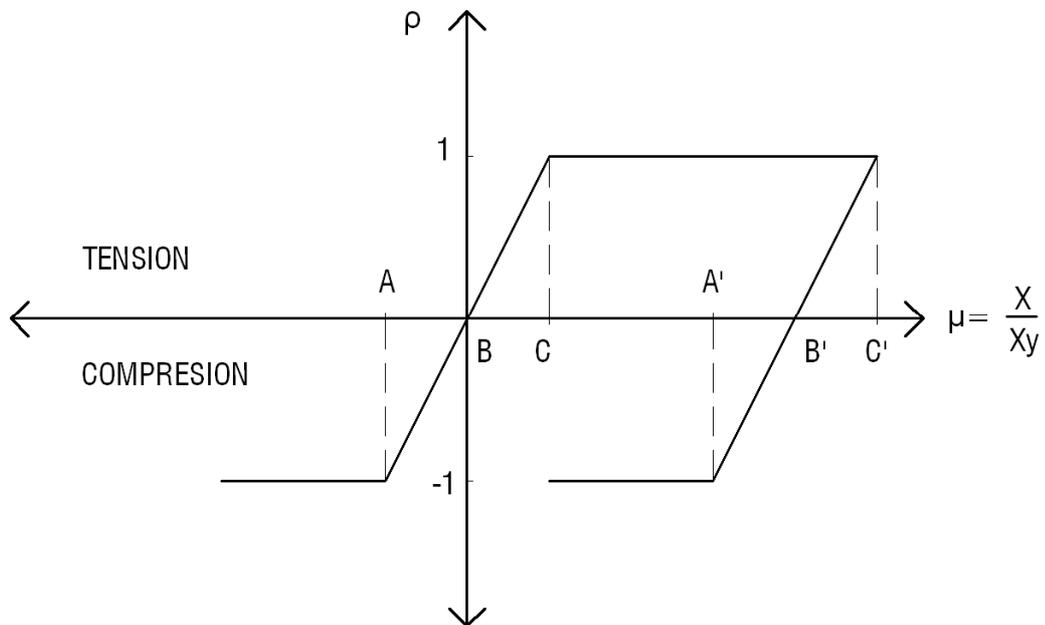


Figura 4-6: Variación del parámetro ρ en función de la ductilidad

Se puede notar que los tramos elásticos A-C dependen de la ductilidad de desplazamiento, y pueden expresarse como:

$$\rho = \mu - B$$

donde:

B: valor de la ductilidad cuando $\rho = 0$

Fuera de estos tramos, es decir, para aquellos con comportamiento plástico, ρ tomará valores de 1 o -1 según esté en tensión o compresión.

4.4.1. TRAMOS ELÁSTICOS

En las ecuaciones del método de Newmark se realiza un cambio de variable para tenerlas en función de la ductilidad de desplazamiento, resulta por tanto:

$$\mu_{i+1} = \mu_i + \Delta t \cdot \dot{\mu}_i + (0.5 - \beta) \cdot \Delta t^2 \cdot \ddot{\mu}_i + \beta \cdot \Delta t^2 \cdot \ddot{\mu}_{i+1}$$

Ecuación 4-9

$$\dot{\mu}_{i+1} = \dot{\mu}_i + \left(\ddot{\mu}_i + \ddot{\mu}_{i+1} \right) \cdot \frac{\Delta t}{2}$$

Ecuación 4-10

Puede notarse que la ecuación 4-9, ecuación 4-10 y ecuación 4-7, constituyen un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas. Resolviéndolas resulta:

$$\ddot{\mu}_{i+1} = \frac{-S \cdot \ddot{S}g_{i+1} - Q \cdot \ddot{\mu}_i - R \cdot \dot{\mu}_i - \rho_i}{P}$$

Ecuación 4-11: Segunda derivada de la ductilidad en tramos elásticos

$$\dot{\mu}_{i+1} = \dot{\mu}_i + \frac{\Delta t}{2} \cdot \left(\ddot{\mu}_i + \ddot{\mu}_{i+1} \right)$$

Ecuación 4-12: Primera derivada de la ductilidad en tramos elásticos

$$\mu_{i+1} = \mu_i + \Delta t \cdot \dot{\mu}_i + (0.5 - \beta) \cdot \Delta t^2 \cdot \ddot{\mu}_i + \beta \cdot \Delta t^2 \cdot \ddot{\mu}_{i+1}$$

Ecuación 4-13: Ductilidad en tramos elásticos

donde:

$$P = 1 + \omega \cdot \xi \cdot \Delta t + \omega^2 \cdot \beta \cdot \Delta t^2$$

$$Q = \omega \cdot \xi \cdot \Delta t + (0.5 - \beta) \cdot \omega^2 \cdot \Delta t^2$$

$$R = 2 \cdot \omega \cdot \xi + \omega^2 \cdot \Delta t$$

$$S = \frac{\omega^2}{\ddot{S}g_{\max} \cdot \eta}$$

4.4.2. TRAMOS PLÁSTICOS

Como se mencionó, en los tramos con comportamiento plástico, ρ tomará valores de 1 o -1 según esté en tensión o compresión. Resulta por tanto:

$$\ddot{\mu}_{i+1} = \frac{-S \cdot \ddot{S}g_{i+1} - Q \cdot \ddot{\mu}_i - R \cdot \dot{\mu}_i - \omega^2 \cdot \rho_i}{P}$$

Ecuación 4-14: Ductilidad en tramos plásticos

donde:

$$P = 1 + \omega \cdot \xi \cdot \Delta t$$

$$Q = \omega \cdot \xi \cdot \Delta t$$

$$R = 2 \cdot \omega \cdot \xi$$

$$S = \frac{\omega^2}{\ddot{S}g_{\max} \cdot \eta}$$

4.4.3. INTERVALO DE INTEGRACIÓN

Para obtener respuesta numéricas estables y que el error sea lo suficientemente pequeño para considerarlo tolerable, se considera el intervalo en segundos como el

menor entre $\Delta t = \frac{T}{40}$ y $\Delta t = 0.02$.

4.5. ESPECTROS ELASTOPLÁSTICOS DE RESPUESTA

Para un conjunto de osciladores que tengan períodos naturales de vibración diferentes puede graficarse el período versus el valor absoluto de la ductilidad máxima alcanzada durante la respuesta para un valor especificado de amortiguamiento y distintos valores de η . A dichos gráficos se los denomina

espectros de ductilidad. De esta forma y en concordancia con los elásticos, se pueden definir los espectros de los sistemas elastoplásticos como:

$$S_d(T_o, \xi, \mu) = \max_{i=1, N} \left[\left| x_y(T_o, \xi, \mu) \right| \right]$$

$$S_v(T_o, \xi, \mu) = \omega_o \cdot S_{dr}$$

$$S_a(T_o, \xi, \mu) = \omega_o^2 \cdot S_{dr}$$

$$|x_u| = \mu \cdot |x_y| = \mu \cdot S_d$$

Ecuación 4-15: Espectro elastoplásticos de respuesta para un sismo

en donde:

S_d : Espectro de desplazamiento de fluencia

S_v : Espectro de pseudovelocity

S_a : Espectro de aceleración

x_u : Espectro inelástico de desplazamiento

ω_o : Frecuencia circular natural calculada con la rigidez inicial k_o

4.5.1. ESPECTROS ELASTOPLÁSTICOS DE SISMOS REALES

Poseen características similares a los elásticos, pero en general las ordenadas espectrales tiene valores menores y la proporción depende del factor de ductilidad. Además, la influencia del amortiguamiento parece disminuir a medida que aumenta el factor de ductilidad. La disipación de energía por ductilidad se vuelve más importante que la disipación por amortiguamiento.

A partir de un análisis de espectros de sismos reales se pueden hacer ciertas generalidades, dividiendo el espectro por regiones:

1. Región A: $0 \leq T_o \leq 0.10$ [s]:

Las ordenadas del espectro de aceleración de los sistemas elastoplástico y lineales son aproximadamente iguales, por consiguiente, el factor de reducción de carga es aproximadamente uno. Los dos sistemas deben diseñarse para resistir la aceleración máxima del suelo:

$$R \cong 1.0$$

$$Q \cong m \cdot \ddot{S}g_{\max}$$

Ecuación 4-16: Características de la Región A

2. Región V: Se puede subdividir en dos subregiones:

a. V1: $0.35 \leq T_o \leq 1.50$ [s]:

Se puede considerar aplicable la igualdad de energías acumuladas por el sistema elastoplástico y el sistema elástico asociado:

$$R \cong \frac{x_{el}}{x_{\mu}}$$

$$Q \cong \frac{Q_{el}}{\sqrt{2 \cdot \mu - 1}}$$

Ecuación 4-17: Características de la Región V1

b. V2: $1.50 \leq T_o \leq 2.50$ [s]:

Se puede considerar aplicable de manera aproximada el criterio de igualdad de los desplazamientos máximos del sistema elastoplástico y el sistema elástico asociado:

$$\sqrt{2 \cdot \mu - 1} \leq R \leq \mu$$

$$\frac{Q_{el}}{\mu} \leq Q \leq \frac{Q_{el}}{\sqrt{2 \cdot \mu - 1}}$$

Ecuación 4-18: Características de la Región V2

3. Región D: $T_o \geq 2.50$ [s]:

Donde es aplicable aproximadamente la igualdad de los desplazamientos máximos del sistema elastoplástico y del sistema elástico asociado:

$$R \cong \mu$$

$$Q \cong \frac{Q_{el}}{\mu} = \frac{m \cdot \omega_o^2 \cdot \ddot{S}g_{max}}{\mu}$$

Ecuación 4-19: Características de la Región A

Las ecuaciones expresadas son utilizadas para construir criterios para un espectro de diseño y fueron propuestos por Newmark a partir de un análisis estadístico de sismos reales.

4.5.2. ESPECTROS DE DISEÑO DE LOS SISTEMAS ELASTOPLÁSTICOS SIMPLES

Dentro de los límites de lo previsible, de las características de los sismos se puede concluir que un espectro de diseño razonable para un sistema elastoplástico simple se puede obtener con base en que el desplazamiento espectral del sistema elastoplástico es, para fines prácticos, el mismo que el del sistema elástico de igual período de vibración; consecuentemente, el espectro de diseño del sistema elastoplástico se puede obtener dividiendo las ordenadas del espectro de respuesta del sistema elástico para el factor de ductilidad que se desea en el diseño. Esta idea

básica se puede mejorar utilizando las consideraciones anotadas para regiones para un espectro crítico.

En cuanto al factor de ductilidad, se considera que un valor de aproximadamente cuatro es consistente con la relación entre las ordenadas espectrales del sismo de El Centro y de la mayoría de códigos de diseño actuales. No es deseable el diseño con valores mayores ya que la magnitud de la ductilidad que se puede alcanzar en una estructura depende de varios factores como las características de los materiales, configuración y complejidad estructural, velocidad de carga, tendencia de materiales a fallar con fractura frágil, tipo y características de las conexiones de los miembros, concentración de esfuerzos, etc.

Se estima que las estructuras con configuraciones comunes construidas con marcos de estructuras dúctiles tienen una ductilidad disponible entre tres y ocho. Sin embargo, los miembros estructurales aislados tienen ductilidades mayores, de modo que la ductilidad de la estructura es diferente a la ductilidad de miembros aislados.

Para estructuras de hormigón armado sujetas a sismos, se considera que se deben diseñar, detallar y construir de tal manera que la ductilidad mínima sea cuatro, con relación a un daño visible y aun mayor que ese valor, con relaciones al inicio del daño estructural.

La Figura 4-7: Coeficiente sísmico de diseño, muestra el coeficiente sísmico que necesitan los sistemas elastoplásticos de sismos importantes a nivel mundial, para alcanzar una ductilidad de 4, con una aceleración máxima del suelo de 0.5 g y un amortiguamiento del 5%, como lo sugieren las referencias.

Como se puede ver, las fuerzas que se necesitan para alcanzar una ductilidad de 4, son notablemente más altas que la que recomienda el código, sobretodo en el rango de períodos cortos. Por tanto, para diseñar estructuras que estén ubicadas cerca de fuentes potenciales de sismos fuertes, se deberán considerar fuerzas bastante mayores que las que el código recomienda.

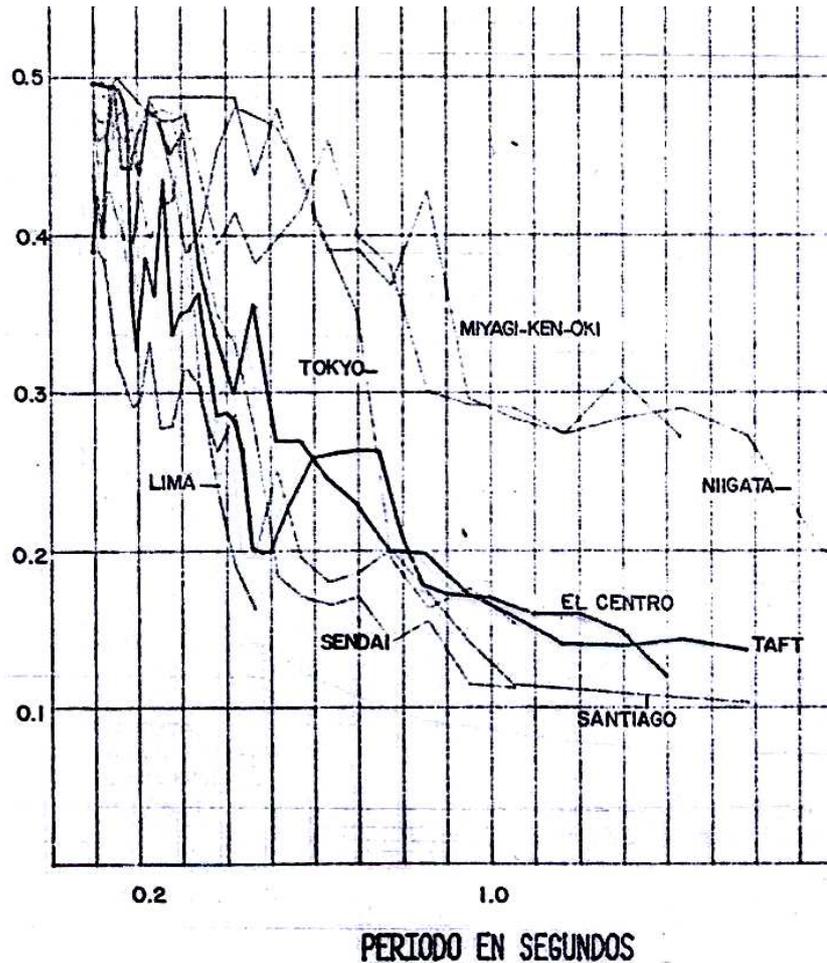


Figura 4-7: Coeficiente sísmico de diseño

Fuente: Fernández (1984)

4.6. FACTOR DE REDUCCION DE FUERZAS SISMICAS

Existen varias formulaciones para la evaluación del factor de reducción de las fuerzas sísmicas R , con el cual se pasa del espectro de diseño elástico al espectro de diseño inelástico. Una de ellas es la propuesta por Whittaker et al (1999) que se indica a continuación:

$$R = R_{\mu} \cdot R_{\sigma} \cdot R_{\xi}$$

Ecuación 4-20: Factor de reducción de fuerzas sísmicas propuesta por Whittaker

en donde:

R_{μ} : Factor de ductilidad

R_S : Factor de resistencia

R_{ξ} : Factor de amortiguamiento

Otra formulación para el cálculo del factor de reducción R es la propuesta del ATC-1995 en el que se cambia el factor de amortiguamiento R_{ξ} por el factor de redundancia R_R . Resulta por tanto:

$$R = R_{\mu} \cdot R_S \cdot R_R$$

Ecuación 4-21: Factor de reducción de fuerzas sísmicas propuesta por ATC-1995

4.6.1. FACTOR DE REDUCCION POR DUCTILIDAD

Existen dos caminos para hallar el factor de reducción R_{μ} . El uno es a partir de la relación entre el desplazamiento máximo inelástico Δ_{INE} con respecto al desplazamiento máximo elástico S_d , en este caso se obtiene C_{μ} y luego se halla R_{μ} con las siguientes ecuaciones:

$$R_{\mu} = \frac{\mu}{C_{\mu}}$$

$$C_{\mu} = \frac{\Delta_{INE}}{S_d}$$

Ecuación 4-22: Factor de reducción por ductilidad

Por tanto,

$$\Delta_{INE} = \frac{\mu}{R_{\mu}} \cdot S_d$$

Ecuación 4-23: Relación entre el desplazamiento máximo inelástico y el desplazamiento máximo elástico

La segunda forma de calcular R_{μ} es mediante un análisis lineal elástico de las estructuras o en sistemas de un grado de libertad, en el que se determinan el

cortante basal reducción V_e y encontrando la curva de capacidad sísmica de la estructura aplicando la técnica del pushover. En esta curva de capacidad se halla el cortante de reducción V_μ :

$$R_\mu = \frac{V_e}{V_\mu}$$

Ecuación 4-24: Factor de reducción por ductilidad usando el corte basal reducido y el cortante de reducción

Se ha establecido que existe una buena aproximación entre los resultados obtenidos del factor de reducción R_μ entre los acelerogramas de sismos registrados en Estados Unidos de Norte América con acelerogramas de sismos registrados en Sur América. Esto conduce a pensar que el factor R_μ no depende del origen de los sismos. (Aguar 2007).

4.6.2. ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE EL FACTOR DE REDUCCION POR DUCTILIDAD

- **Newmark y Hall (1982)**

Dos de los valores de R_μ son los correspondientes a la regla de igual desplazamiento y a la regla de igual energía. Los valores propuestos son:

$R_\mu = 1$	$T \leq T_a$
$R_\mu = (2\mu - 1)^{\beta}$	$T_a \leq T \leq T_b$
$R_\mu = \sqrt{2\mu - 1}$	$T_a \leq T \leq T_c'$
$R_\mu = \mu \cdot \frac{T}{T_c}$	$T_c' \leq T \leq T_c$
$R_\mu = \mu$	$T \geq T_c$

en donde:

$$\beta = \frac{\log\left(\frac{T}{T_a}\right)}{2 \cdot \log\left(\frac{T_b}{T_a}\right)}$$

$$T_a = \frac{1}{33} s$$

$$T_b = 0.125 s$$

$$T_c' = \frac{\sqrt{2\mu - 1}}{\mu} \cdot T_c s$$

Ecuación 4-25: Factor de reducción por ductilidad según Newmark y Hall

Según el C.E.C. los valores de T_c resultan:

TIPO DE PERFIL DE SUELO	T_c
S1	0.50
S2	0.52
S3	0.82
S4	2.00

Tabla 4-1: Valores de T_c según C.E.C.

Fuente: Aguiar (2007)

Considerando la Ecuación 4-23: Relación entre el desplazamiento máximo inelástico y el desplazamiento máximo elástico, el estudio realizado concluye que para períodos de vibración muy pequeños que tienden a cero, el desplazamiento máximo inelástico es igual a la ductilidad del sistema por el desplazamiento máximo elástico. Por otro lado, para períodos grandes, el desplazamiento máximo inelástico es igual al desplazamiento máximo elástico y para los periodos intermedios se tienen valores intermedios calculados mediante la Ecuación 4-25: Factor de reducción por ductilidad según Newmark y Hall.

Considerando las ecuaciones propuestas por Newmark y Hall resultan las siguientes gráficas:

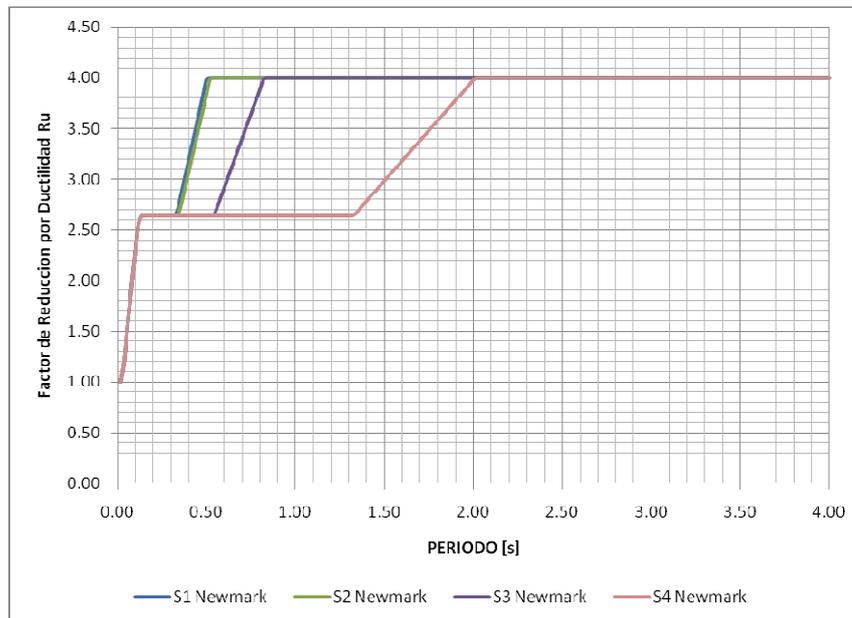


Figura 4-8: Factor de reducción por ductilidad según Newmark y Hall, para una ductilidad igual a 4

Fuente: Aguiar (2007)

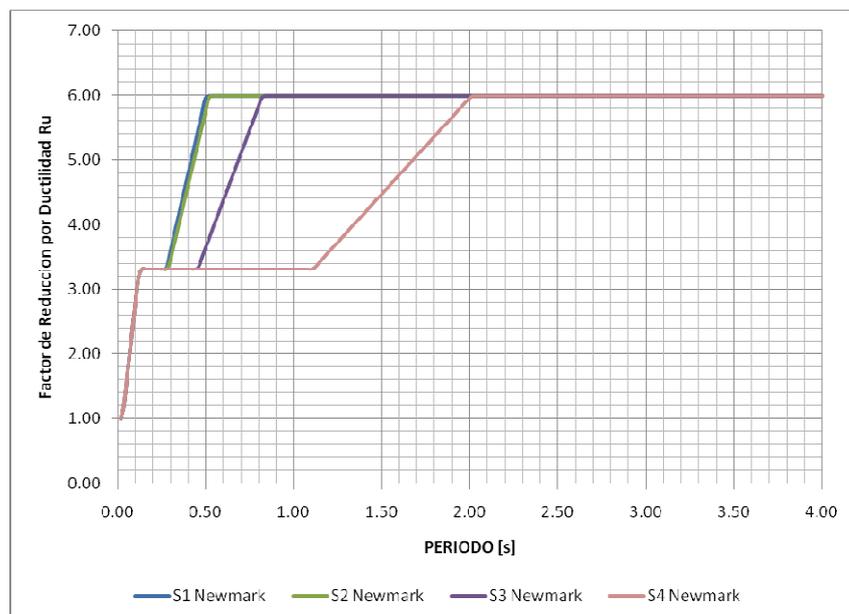


Figura 4-9: Factor de reducción por ductilidad según Newmark y Hall, para una ductilidad igual a 6

Fuente: Aguiar (2007)

- **Aguiar, Romo y Aragón (2007)**

En base a 80 acelerogramas registrados en el Ecuador con aceleraciones menores al 10% de la aceleración de la gravedad y 112 sismos artificiales para las cuatro zonas de peligrosidad sísmica del CEC-2000, se ha obtenido la siguiente ecuación para R_μ , válida para ductilidades menores a 4:

$$R_\mu = 1 + (\mu - 1) \cdot \left[\frac{\alpha \cdot T \cdot (1 - 0.165 \cdot \mu)}{\alpha \cdot T \cdot (1 - 0.165 \cdot \mu) + 4900} \right]$$

Ecuación 4-26: Factor de reducción por ductilidad según Aguiar, Romo y Aragón

Los valores de a para los cuatro tipos de suelo se indican en la siguiente tabla:

TIPO DE PERFIL DE SUELO	a
S1	100500
S2	91000
S3	73600
S4	38900

Tabla 4-2: Valores de a según Aguiar, Romo y Aragón

Fuente: Aguiar (2007)

La Figura 4-10: Factor de reducción por ductilidad según Aguiar, Romo y Aragón, para una ductilidad igual a 4 presenta las curvas realizadas a partir de la ecuación del factor de reducción por ductilidad, para cada uno de los diferentes tipos de perfil de suelo. Dichas curvas tienen la particularidad de partir de la unidad, es decir que para períodos cortos el desplazamiento máximo inelástico es prácticamente igual al desplazamiento máximo elástico, cumpliéndose de esta forma la regla de igual desplazamiento. Para períodos largos, la relación entre el desplazamiento máximo inelástico con respecto al desplazamiento elástico tienden a la ductilidad, como expresa el trabajo desarrollado por Newmark y Hall.

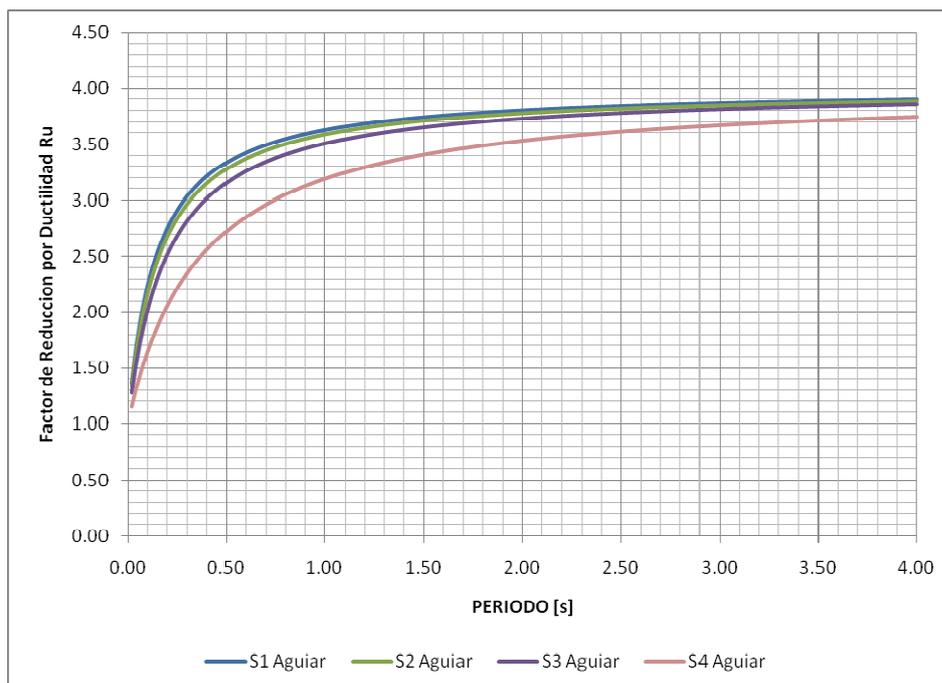


Figura 4-10: Factor de reducción por ductilidad según Aguiar, Romo y Aragón, para una ductilidad igual a 4

Fuente: Aguiar (2007)

4.6.3. FACTOR DE REDUCCION POR RESISTENCIA

Cuando se realiza el análisis sísmico se encuentran las fuerzas laterales estáticas equivalentes con las que se procede al diseño de la estructura. La sumatoria de estas fuerzas laterales representa el corte basal de diseño.

Para facilitar el sistema constructivo, mientras se diseñan los elementos estructurales, se requiere colocar más armadura o se agrandan las secciones de los elementos para poder utilizar los mismos encofrados o para facilitar el armado. Adicionalmente durante el cálculo se deben realizar una serie de controles, como por ejemplo el control de las conexiones, el mismo que suele conducir a incrementar la sección de todos los elementos. Todo esto ocasiona un incremento en la capacidad al corte basal de la estructura lo que da origen al factor de resistencia, que no es más que la relación entre la verdadera capacidad al corte en la base que tiene la estructura con relación al corte basal de diseño.

En estructuras bien detalladas que tengas ductilidades por curvatura en las vigas mayores a 12, se puede pensar en una ductilidad de 4 y un factor de resistencia de 1.5, de tal manera que la ductilidad global de la estructura es de 6. (Aguiar, 2006).

4.6.4. FACTOR DE REDUCCION POR REDUNDANCIA

Cuando la estructura ingresa en el rango no lineal, es importante que la mayor parte de los elementos tome partido soportando las fuerzas sísmicas para que de esta manera se de una redistribución de esfuerzos en la estructura. El índice de redundancia es el parámetro que permite calificar la redistribución de esfuerzos en la estructura cuando ésta incursiona en el campo no lineal.

El índice de redundancia es función del número de elementos que tenga el pórtico y del número de pórticos que tenga la estructura, ya que a mayor cantidad de elementos se tendrá mayor cantidad de rótulas plásticas. Sin embargo, no es función únicamente del número de rótulas plásticas, sino también de qué tanto permite dicha rótula a incursionar en el rango no lineal. De esta forma, el factor de reducción por redundancia puede calcularse en base al número de rótulas plásticas y a la capacidad de incursionar en el rango inelástico del elemento. (Aguiar, 2006)

En la Tabla 4-3: Valores propuestos de R_R por el ATC-1995, puede verse los valores de penalización a las estructuras que tienen menos de 4 ejes de columnas.

Número de ejes de columnas	Factor R_R
2	0.71
3	0.86
4	1.00

Tabla 4-3: Valores propuestos de R_R por el ATC-1995

Fuente: Aguiar (2006)

4.7. ESPECTROS ELASTOPLÁSTICOS DE LOS ACELEROGRAMAS CONSIDERADOS.

Mientras que el Anexo No. 9 presenta los espectros de ductilidad para cada uno de los acelerogramas corregidos por línea base, la Figura 4-11: Espectros de ductilidad para canal1 con $\eta = 0.2$ y amortiguamiento 5%, muestra un resumen de la variación de las demandas de ductilidad con el período. En dicho gráfico pueden notarse que los registros para los que las demandas de ductilidad son mayores, corresponden a las aceleraciones de los registros 5, 6, 7, 9 que pertenecen al subgrupo II según la clasificación expuesta en el capítulo anterior.

Las aceleraciones 5 y 6 corresponden al sismo del 2 de octubre de 1995, de magnitud 6.9, registradas en las estaciones Aurelio Pólit y Hospital Metropolitano, ubicadas a 294 y 286 km respectivamente; la aceleración del registro 7 corresponde a un sismo de magnitud 6.1, ocurrido el 3 de octubre de 1995, que fue registrado en la estación ubicada a 269 km; mientras que la aceleración 9, corresponde al registro del sismo de magnitud 5.7 del 17 de enero de 1996, registrada a 86 km.

Puede notarse que, a pesar de que las aceleraciones han sido registradas a distancias mayores, las demandas de ductilidad son parecidas a los registros cercanos a los eventos. Este se justifica por la forma de los acelerogramas: en el primer caso, los registros corresponden, de manera general, a pulsos de larga duración, mientras que en el segundo, no. Por tanto, este es un factor importante a considerar en el diseño de estructuras para lograr adecuadas demandas de ductilidad.

Se presenta los resúmenes de las otras componentes en la Figura 4-12: Espectros de ductilidad para canal2 con $\eta = 0.2$ y amortiguamiento 5% y en la Figura 4-13: Espectros de ductilidad para canal3 con $\eta = 0.2$ y amortiguamiento 5%.

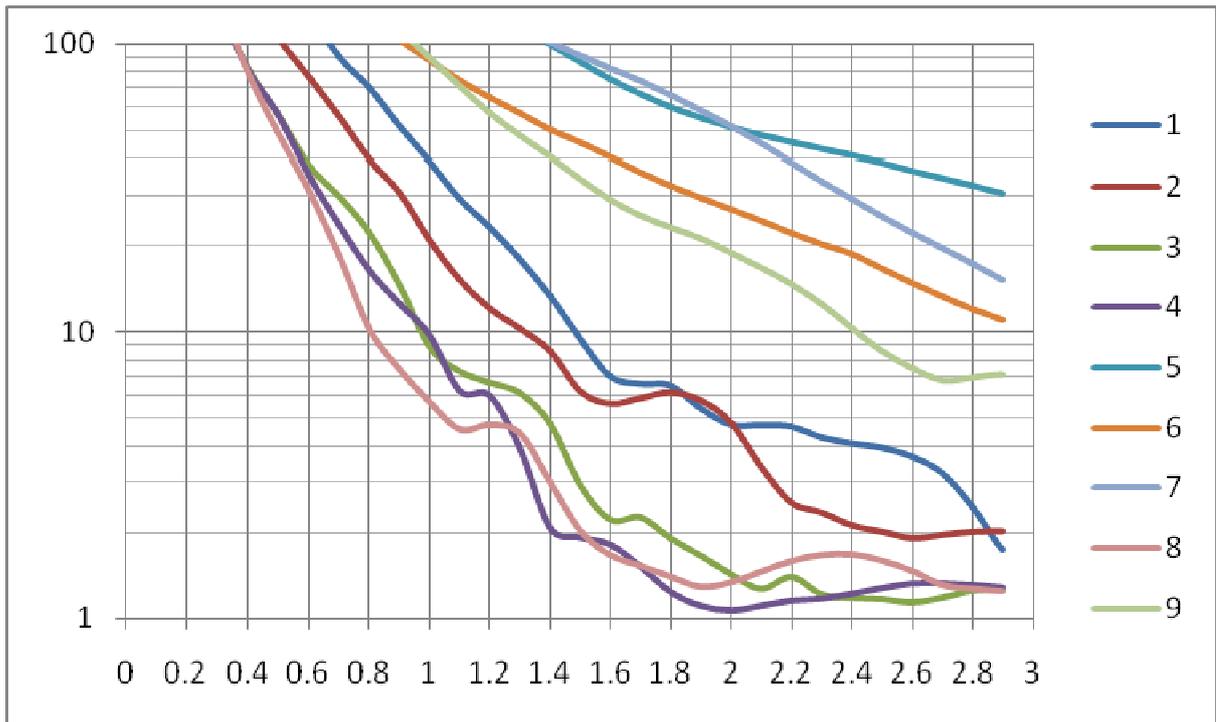


Figura 4-11: Espectros de ductilidad para canal1 con eta 0.2 y amortiguamiento 5%

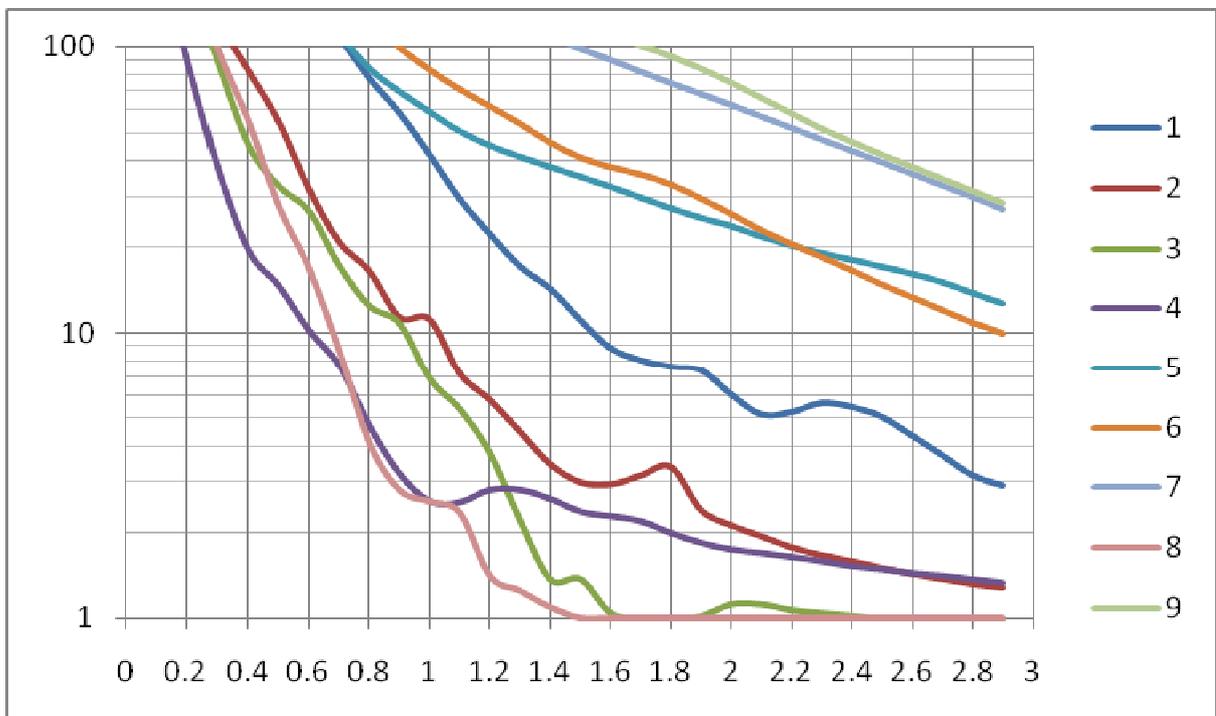


Figura 4-12: Espectros de ductilidad para canal2 con eta 0.2 y amortiguamiento 5%

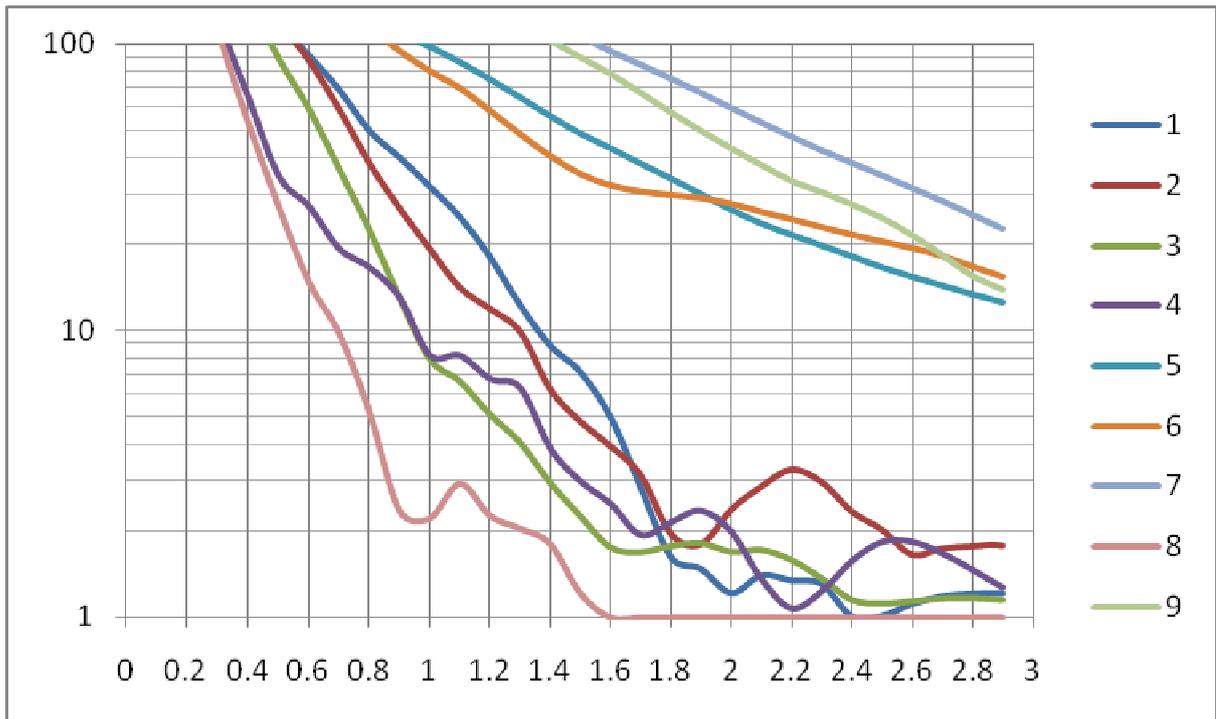


Figura 4-13: Espectros de ductilidad para canal3 con eta 0.2 y amortiguamiento 5%

CAPÍTULO 5. RESPUESTA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

5.1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de las series de Fourier es usada para determinar la respuesta de un sistema sujeto a fuerzas periódicas, y la respuesta de un sistema sujeto a fuerzas no periódicas en el dominio de la frecuencia como un enfoque alternativo al análisis en el dominio del tiempo. En cualquiera de los dos casos, el cálculo requiere la evaluación de integrales las cuales, excepto por algunas relativamente simples, emplean métodos numéricos para su evaluación. Así, en general, para hacer práctico el uso del método de Fourier, es necesario remplazar la integración con sumas finitas.

5.2. VIBRACIÓN DE UN SISTEMA SIMPLE SUJETO A UNA FUERZA ARMÓNICA

Considérese el sistema de 1GDL forzado para la que f ahora corresponde a la parte real de una fuerza armónica:

$$f(t) = \exp(i \cdot \omega_F \cdot t)$$

Ecuación 5-1: Fuerza armónica

donde:

$$\exp(i \cdot \omega_F \cdot t) = \cos(\omega_F \cdot t) + i \cdot \sin(\omega_F \cdot t)$$

Ecuación 5-2: Relación de Euler

ω_F : Frecuencia de la excitación armónica

La ecuación diferencial de equilibrio resulta:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \omega_0 \cdot \xi \cdot \dot{x} + \omega_0^2 \cdot x = \frac{1}{m} \cdot \exp(j \cdot \omega_F \cdot t)$$

Ecuación 5-3: Ecuación del sistema bajo fuerza armónica

La respuesta del sistema es la parte real de x , que para la parte homogénea (estado transiente) corresponde a la solución del sistema de 1GDL, mientras que la solución particular (estado estacionario) resulta:

$$x_p(t) = H(\omega_F) \cdot \exp(j \cdot \omega_F \cdot t)$$

$$x_p(t) = H(\omega_F) \cdot f(t)$$

Ecuación 5-4: Respuesta del estado estacionario para una fuerza armónica

La respuesta del estado estacionario del sistema es proporcional a la frecuencia armónica, siendo la constante de proporcionalidad, la frecuencia compleja de frecuencia:

$$H(\omega_F) = \frac{1}{k} \cdot \left[\frac{1}{(1 - \beta^2) + (2 \cdot \xi \cdot \beta \cdot i)} \right]$$

Ecuación 5-5: Función de respuesta compleja de frecuencia

$$D = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2) + (2 \cdot \xi \cdot \beta)^2}} = \frac{|x_p(t)|_{\max}}{x_{st}}$$

Ecuación 5-6: Factor dinámico de magnificación

El factor de respuesta adimensional o factor dinámico de magnificación, cuya variación se representa en la Figura 5-1: Curvas de resonancia, es igual a la relación de amplitudes de respuesta de desplazamiento dinámico al estático, es decir, representa la manera cómo se amplifica la carga dinámica al aplicarse en forma estática.

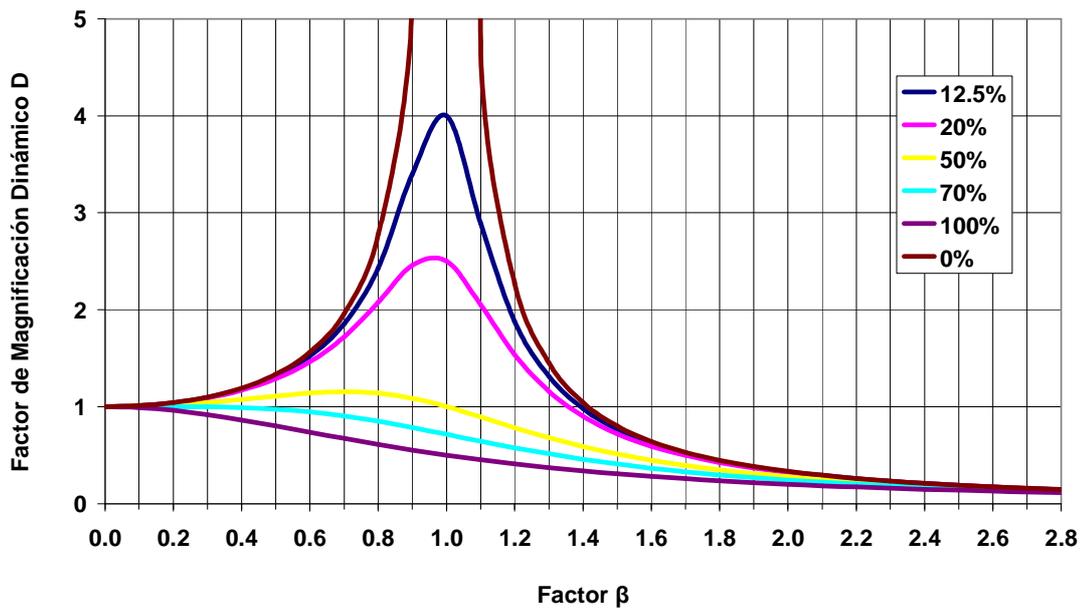


Figura 5-1: Curvas de resonancia

Al observar las curvas de resonancia, se nota que el factor de magnificación dinámico D es constante y aproximadamente igual a la unidad para valores de $0 < \beta \leq 0.6$ y $\xi = 0.7$. Además $D_{\max} = \frac{1}{2 \cdot \xi \cdot \sqrt{1 - \xi^2}}$ para $\beta = \sqrt{1 - 2 \cdot \xi^2}$

Racionalizando, la función compleja de frecuencia resulta:

$$H(\omega_F) = \frac{1}{k} \cdot \frac{(1 - \beta^2) + (2 \cdot \xi \cdot \beta \cdot i)}{(1 - \beta^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot \beta)^2}$$

$$x_p(t) = \frac{1}{k} \cdot \left[\frac{1}{(1 - \beta^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot \beta)^2} \right] \cdot [(1 - \beta^2) \cdot \cos(\omega_F \cdot t) + 2 \cdot \xi \cdot \beta \cdot \sin(\omega_F \cdot t) \cdot i]$$

Ecuación 5-7: Función de respuesta compleja de frecuencia

en donde:

$\beta = \frac{\omega_F}{\omega_o}$: relación entre la frecuencia de vibración de la función de excitación y la frecuencia natural del sistema

La respuesta por tanto es un número complejo, de la forma:

$$x + y \cdot i = R \cdot \exp(\phi \cdot i)$$

con:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} = |H(\omega_F)| \quad : \quad \text{Amplitud de la respuesta del estado estacionario}$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) = \arctan\left(\frac{2 \cdot \xi \cdot \beta}{1 - \beta^2}\right) \quad : \quad \text{Ángulo de fase.}$$

5.3. RESPUESTA ANTE UNA EXCITACIÓN PERIÓDICA

Fourier ha demostrado que una función periódica puede expresarse en términos de una combinación de funciones seno y coseno de frecuencias sucesivas múltiplos de la frecuencia de la función, a la que se le denomina como Serie de Fourier:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cdot \cos(\omega \cdot t) + a_2 \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) + \dots + a_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) + \\ + b_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + b_2 \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t) + \dots + b_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t)$$

Considérese entonces la siguiente fuerza armónica expresada como una serie de Fourier:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n \cdot \omega_F \cdot t) + b_n \cdot \sin(n \cdot \omega_F \cdot t)]$$

Ecuación 5-8: Serie de Fourier de la fuerza armónica

Los coeficientes de Fourier toman los valores de:

$$a_0 = \frac{1}{T_F} \cdot \int_{-T_F/2}^{T_F/2} [f(t) \cdot dt]$$

$$a_n = \frac{2}{T_F} \cdot \int_{-T_F/2}^{T_F/2} [f(t) \cdot \cos(n \cdot \omega_F \cdot t)] \cdot dt$$

$$b_n = \frac{2}{T_F} \cdot \int_{-T_F/2}^{T_F/2} [f(t) \cdot \sin(n \cdot \omega_F \cdot t)] \cdot dt$$

Ecuación 5-9: Coeficientes de Fourier

donde a_0 es el valor medio de la función $f(t)$ sobre el período de la función T_F

La respuesta estacionaria del sistema dinámico se obtiene, entonces, como la superposición de las respuestas para cada término de las componentes de la excitación expresada por la serie de Fourier:

$$x(t) = \frac{a_0}{k} + \frac{1}{k} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{a_n \cdot [1 - (n \cdot \beta)^2] - b_n \cdot [2 \cdot \xi \cdot (n \cdot \beta)]}{[1 - (n \cdot \beta)^2]^2 + [2 \cdot \xi \cdot (n \cdot \beta)]^2} \cdot \cos(n \cdot \omega_F \cdot t) + \frac{a_n \cdot [2 \cdot \xi \cdot (n \cdot \beta)] + b_n \cdot [1 - (n \cdot \beta)^2]}{[1 - (n \cdot \beta)^2]^2 + [2 \cdot \xi \cdot (n \cdot \beta)]^2} \cdot \sin(n \cdot \omega_F \cdot t) \right\}$$

Ecuación 5-10: Respuesta del estado estacionario para una fuerza armónica expresada como serie de Fourier

Por la identidad de Euler, las fórmulas pueden expresarse en su forma compleja:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [C_n \cdot \exp(n \cdot \omega_F \cdot i \cdot t)]$$

Ecuación 5-11: Serie de Fourier de la fuerza armónica en forma compleja

Los coeficientes ahora serían:

$$C_n = \frac{2}{T_F} \cdot \int_{-T_F/2}^{T_F/2} [f(t) \cdot \exp(-n \cdot \omega_F \cdot i \cdot t)] \cdot dt$$

Ecuación 5-12: Coeficiente de Fourier en forma compleja

La respuesta estacionaria del sistema dinámico resulta

$$x_p(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [H(n \cdot \omega_F) \cdot C_n \cdot \exp(n \cdot \omega_F \cdot i \cdot t)]$$

Ecuación 5-13: Respuesta del estado estacionario para una fuerza armónica expresada como serie de Fourier en forma compleja

$$H(n \cdot \omega_F) = \frac{1}{k} \cdot \left\{ \frac{1}{[1 - (n \cdot \beta)^2] + [2 \cdot \xi \cdot (n \cdot \beta) \cdot i]} \right\}$$

$$H(n \cdot \omega_F) = |H(n \cdot \omega_F)| \cdot \exp(-\phi \cdot n \cdot i)$$

$$|H(n \cdot \omega_F)| = \frac{1}{k \cdot \sqrt{[1 - (n \cdot \beta)^2]^2 + [2 \cdot \xi \cdot (n \cdot \beta)]^2}}$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{2 \cdot \xi \cdot n \cdot \beta}{1 - (n \cdot \beta)^2}\right)$$

$$x_p(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [H(n \cdot \omega_F) \cdot C_n \cdot \exp(n \cdot \omega_F \cdot t - \phi) \cdot i]$$

$$|H(n \cdot \omega_F)| \cdot C_n = \frac{C_n}{k \cdot \sqrt{[1 - (n \cdot \beta)^2]^2 + [2 \cdot \xi \cdot (n \cdot \beta)]^2}}$$

Ecuación 5-14: Amplitud de los armónicos

5.4. RESPUESTA ANTE UNA EXCITACIÓN NO PERIÓDICA

En la mayoría de situaciones físicas una función $f(t)$ no es necesariamente periódica, pero existe la posibilidad de resolver este tipo de problemas suponiendo que la función no periódica $f(t)$ sí lo es, pero con un período infinito. De esta forma,

la extensión de la serie de Fourier a funciones no periódicas conduce a expresiones integrales que se conocen con el nombre de transformadas de Fourier, las cuales, son utilizadas para pasar una señal al dominio frecuencial y de esta forma obtener información que no es evidente en el dominio temporal.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t) \cdot d\omega$$

Ecuación 5-15: Transformada inversa de Fourier

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t) \cdot dt$$

Ecuación 5-16: Transformada de Fourier

A las expresiones anteriores se las conoce como par de Fourier. La función debe cumplir con las siguientes condiciones de modo de que exista su transformada:

- La función $f(t)$ debe tener un número finito de máximos y mínimos desde $t = -\infty$ a $+\infty$.
- La función $f(t)$ debe tener un número finito de discontinuidades finitas en el intervalo $-\infty$ a $+\infty$.
- La integral, en todo el dominio del intervalo en valor absoluto de la función, debe ser convergente.

Puede extenderse la solución del estado estacionario para fuerzas periódicas usando la definición de la transformada de Fourier:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [H(\omega) \cdot F(\omega) \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t) \cdot d\omega]$$

Ecuación 5-17: Respuesta del estado estacionario para una fuerza no armónica

Denominando al producto de la función de respuesta compleja de frecuencia y la transformada de Fourier de la excitación como $X(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega)$, resulta:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [X(\omega) \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t) \cdot d\omega]$$

Ecuación 5-18: Respuesta del estado estacionario para una fuerza no armónica

Por tanto, la respuesta en el dominio del tiempo es una integral de Fourier. De acuerdo a la definición de par de Fourier:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t) \cdot dt$$

Ecuación 5-19: Transformada de Fourier de la respuesta

5.5. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

La forma discreta de estas transformadas permite su empleo en aplicaciones numéricas. Un algoritmo extremadamente eficiente, conocido como transformada rápida de Fourier (FFT), puede economizar hasta el 99% del tiempo que un computador emplearía para el cálculo directo de los coeficientes complejos de Fourier. La reducción en el tiempo de cálculo que resulta de esta formulación es significativa cuando el intervalo de tiempo es dividido en gran número de incrementos. El tiempo comparativo requerido para el cálculo de las series de Fourier por un programa convencional y por el algoritmo de la transformada rápida de Fourier se muestra en la Figura 5-2: Tiempo requerido por la transformada de Fourier usando el método convencional y el método rápido. Como se ve, para grandes valores de N, se puede consumir rápidamente tanto tiempo que el método resulta ineficiente.

5.6. ESPECTROS DE FOURIER

Los espectros de Fourier son gráficos de los valores absolutos de las amplitudes de los armónicos de una fuerza periódica en función de sus frecuencias. Puesto que las frecuencias de los armónicos son múltiplos enteros de ω_F , los espectros de Fourier de una fuerza periódica y de la respuesta del sistema, se representan mediante puntos discretos.

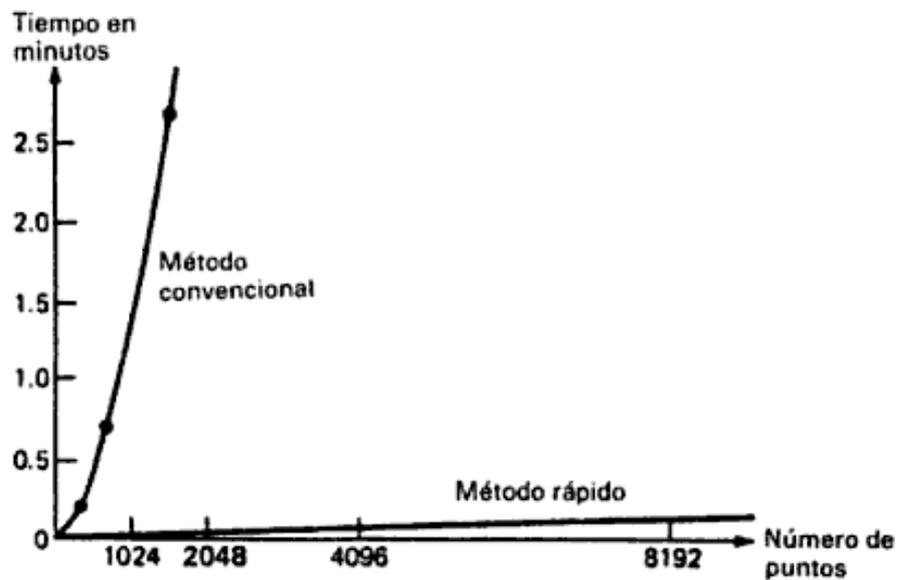


Figura 5-2: Tiempo requerido por la transformada de Fourier usando el método convencional y el método rápido

Fuente: Cooley, J.W., Lewis, P.A.W., y Welch, P.D., IEEE Transactions and Education, Vol. E-12, No1. Marzo (1969)

Usando la relación de Euler en la definición de la transformada de Fourier se tiene:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot [\cos(\omega \cdot t) - i \cdot \sin(\omega \cdot t)] \cdot dt$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot dt - i \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt$$

$$F(\omega) = \sqrt{\left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot dt \right]^2 + \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt \right]^2}$$

Ecuación 5-20: Ordenadas del espectro de frecuencias de la Fuerza

Para las ordenadas del espectro de frecuencia de la respuesta ante una fuerza no periódica:

$$|X(\omega)| = |H(\omega) \cdot F(\omega)|$$

$$X(\omega) = \frac{\sqrt{\left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot dt \right]^2 + \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt \right]^2}}{k \cdot \sqrt{[1 - (\beta)^2]^2 + [2 \cdot \xi \cdot (\beta)]^2}}$$

Ecuación 5-21: Ordenadas del espectro de frecuencias de la Respuesta ante una fuerza no periódica

Para una fuerza periódica, considerando la amplitud de los armónicos resulta:

$$|H(n \cdot \omega_F)| \cdot C_n = \frac{\omega_F \cdot \int_{-T_F/2}^{T_F/2} [f(t) \cdot \exp(-n \cdot \omega_F \cdot i \cdot t)] \cdot dt}{k \cdot \pi \cdot \sqrt{[1 - (n \cdot \beta)^2]^2 + [2 \cdot \xi \cdot (n \cdot \beta)]^2}}$$

Ecuación 5-22: Ordenadas del espectro de frecuencias de la Respuesta ante una fuerza periódica

Si se considera la fuerza igual a la función delta de Dirac, se tiene que su transformada de Fourier es igual a:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t) \cdot dt \equiv 1$$

Si se considera además que $X(\omega) = H(\omega) \cdot 1$, se tiene que:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t) \cdot d\omega$$

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t) \cdot d\omega$$

Ecuación 5-23: transformada inversa de Fourier de H(ω)

Por tanto, la respuesta impulsiva $h(t)$ y la función compleja de frecuencia $H(\omega)$ forman un par de Fourier.

5.6.1. ESPECTROS DE FOURIER DE UN SISMO

En particular, el acelerograma de tiempo real de un movimiento sísmico es una función aleatoria compuesta por una secuencia no periódica de pulsos de aceleración y ya que cumple con las condiciones indicadas, puede conocerse el contenido de frecuencias de un acelerograma registrado durante un sismo utilizando el criterio de la transformada de Fourier.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{S}g(t) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t) \cdot dt$$

Ecuación 5-24: transformada de Fourier del registro de aceleraciones

Considerando la relación de Euler y si además t_0 es la duración total del sismo y se cumple con las siguientes condiciones:

$$\ddot{S}g(t) = 0 \text{ para } t > t_0$$

$$\ddot{S}g(t) = 0 \text{ para } t < 0$$

Puede escribirse la ecuación 5-24 como:

$$F(\omega) = \int_0^{t_0} \ddot{S}g(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot dt - i \cdot \int_0^{t_0} \ddot{S}g(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt$$

Ecuación 5-25: transformada de Fourier del registro de aceleraciones

Se define el espectro de amplitud de Fourier para las aceleraciones del suelo como:

$$|F(\omega)| = \sqrt{\left[\int_0^{t_0} \ddot{S}g(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot dt \right]^2 + \left[\int_0^{t_0} \ddot{S}g(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt \right]^2}$$

Ecuación 5-26: Espectro de Amplitud de Fourier. Hudson (1962)

Se ha demostrado que el espectro de amplitudes de Fourier es proporcional a la raíz cuadrada de la energía de un oscilador no amortiguado de 1GDL al término del temblor, de esta manera se concluye que para aquellas frecuencias ω o períodos T para los cuales se presentan picos acentuados, el terremoto entregó una cantidad apreciable de energía al oscilador.

$$|F(\omega)| \approx \sqrt{\frac{2 \cdot E}{m}}$$

Ecuación 5-27: Espectro de Amplitud de Fourier en función de la energía de un amortiguador no amortiguado de 1GDL

Los espectros de Fourier contienen toda la información con respecto al movimiento del terreno porque su transformada de Fourier restituye ese movimiento. Además, el

valor $\frac{|F(\omega)|^2}{t_0}$ conocido como densidad espectral de potencia encuentra numerosas

aplicaciones en la teoría de los movimientos aleatorios como la distribución probabilística de las ordenadas espectrales de respuesta. y predicción de daños por fatiga. Sin embargo, en el diseño estructural a prueba de sismos, los espectros de respuesta son probablemente más significativos y generalmente preferibles para describir los movimientos del terreno, ya que estos espectros dan directamente valores máximos de las respuestas.

Es también especialmente útil en el análisis dinámico de estructuras interactuando con medios sin límites, como por ejemplo: el análisis del espectro de respuesta de una estructura donde los efectos de la interacción entre la estructura y el suelo subyacente ilimitado son significativos y el análisis del espectro de respuesta de presas de hormigón interactuando con el agua embalsada en el reservorio que se extiende hasta grandes distancias en dirección aguas arriba.

5.7. ESPECTROS DE FOURIER DE LOS REGISTROS CONSIDERADOS

Se ha procedido a hallar los espectros de Fourier para los canales horizontales de cada uno de los nueve registros. Los mismos constan en el Anexo No. 13.

Los tipos de perfiles de suelo propuestos por el C.E.C. sugieren las siguientes frecuencias para la clasificación:

- S1: $T_0 < 0.20$ [s]: $f > 5$ [Hz]
- S2: $0.20 < T_0 < 0.60$ [s]: $1.67 < f < 5$ [Hz]
- S3: $T_0 > 0.60$ [s]: $f < 1.67$ [Hz]

De acuerdo a esto puede clasificarse a los suelos de las estaciones según la Tabla 5-1: Tipos de suelo según C.E.C. para las estaciones. En la misma se muestra el número del registro, la ubicación de la estación en donde fue registrada y el tipo de suelo según la clasificación propuesta por el código. Se observa que los registros 1, 2, 3, 4 y 8 tienen un contenido de frecuencias parecidas. Estos pertenecen al subgrupo de aceleraciones registradas cerca del evento.

Los registros 5, 6, 7 y 9 también presentan similitud en las frecuencias. Corresponden a los registros de los eventos ocurridos lejos de las estaciones, es decir, el subgrupo II.

Registro	Tipo de suelo	Ubicación
1	S1, S2	San Bartolo
2	S1, S2	Colegio Borja
3	S1, S2	Hospital Metropolitano
4	S1	Museo Aurelio Espinoza
5	S2, S3	Museo Aurelio Espinoza
6	S2, S3	Hospital Metropolitano
7	S2, S3	San Bartolo
8	S1, S2	Museo Aurelio Espinoza
9	S2, S3	San Bartolo

Tabla 5-1: Tipos de suelo según C.E.C. para las estaciones considerando los espectros de Fourier

5.8. ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS LOCALES EN LA ZONA DE ESTUDIO

En el estudio de los efectos locales se aplican métodos experimentales y numéricos; para el presente trabajo se ha seleccionado el método experimental de Nakamura a partir de registros de microsismos.

Dicho método se basa en la relación entre los espectros de Fourier de las componentes horizontal y vertical de registros de microsismos en la superficie. Este método ha sido ampliamente difundido en los últimos años y utilizando por la rapidez y economía en su ejecución.

El método propuesto por Nakamura para estimar la respuesta empírica de las capas superficiales de suelo supone que el ruido de los microterremotos está compuesto por varios tipos de ondas. Este método pretende eliminar el efecto de las ondas

Rayleigh. Se considera que las componentes horizontal y vertical del registro son similares a la base rocosa.

Dichos registros son amplificados por las capas de suelo blando que yacen sobre el substrato rocoso. Se considera además que las componentes horizontales se amplifican debido a multirreflexiones de la onda S, en tanto que los microterremotos verticales lo hacen por multirreflexiones de la onda P. La velocidad de propagación de la onda P generalmente mayor que 100 m/s, y los movimientos con frecuencias de aproximadamente 10 Hz o menos pueden no amplificarse, debido a la multirreflexiones en las capas superficiales de varias decenas de metros de espesor.

5.9. ANALISIS ESPECTRAL DE LAS ESTACIONES

Con el objeto de determinar el contenido de frecuencias de los sitios donde fueron registrados los acelerogramas, se ha procedido a realizar estudios de campo, utilizando un acelerógrafo digital facilitado por el Instituto Geofísico de la EPN usando el método de Nakamura.

Dichos acelerógrafos han sido ubicados en las estaciones por el tiempo promedio de media hora, con una frecuencia de muestreo correspondiente a 0.00250 segundos.

Estación	Ubicación	Tiempo (min).
1	San Bartolo	39
2	Colegio Borja	27
3	Hospital Metropolitano	80
4	Convento San Francisco	29
5	Fundación Mundo Juvenil	25
6	Museo Aurelio Espinoza Pólit	-
7	Observatorio Astronómico de Quito	41

Tabla 5-2: Tiempo total de los registros en las estaciones para el método de Nakamura
Fuente: IG (2009)

Los valores para corrección de cuentas a m/s² son:

Dirección	Factor
Vertical	322410.15
Norte	317945.24
Este	319215.86

Tabla 5-3: Factores de conversión de cuentas a m/s²

Fuente: IG (2009)

El Anexo No. 14 muestra las relaciones espectrales horizontal/vertical para los sitios donde han sido posicionadas las estaciones. Considerando los rangos de frecuencias propuestos por el C.E.C. se halla la Tabla 5-4: Resumen de los tipos de suelo según C.E.C. para las estaciones. En la misma se muestran la clasificación considerando los espectros de Fourier, así como los obtenidos por el método de Nakamura. La última columna de la tabla muestra que para sismos cercanos existe una amplificación para los períodos cortos, mientras que para los lejanos, la amplificación se da en los períodos largos.

Archivo	Ubicación	Fourier	Nakamura	Amplificación
1	San Bartolo	S1, S2	S2	S1
2	Colegio Borja	S1, S2	S2	S1
3	Hospital Metropolitano	S1, S2	S1, S2	S1
4	Museo Aurelio Espinoza	S1	S1	S1
5	Museo Aurelio Espinoza	S2, S3	S1	S3
6	Hospital Metropolitano	S2, S3	S1, S2	S3
7	San Bartolo	S2, S3	S2	S3
8	Museo Aurelio Espinoza	S1, S2	S1	S2
9	San Bartolo	S2, S3	S2	S3

Tabla 5-4: Resumen de los tipos de suelo según C.E.C. para las estaciones

En la Figura 5-3: Distribución de frecuencias en la ciudad de Quito, se muestran las zonas principales propuestas en un estudio realizado por Guéguen et al. 2000.

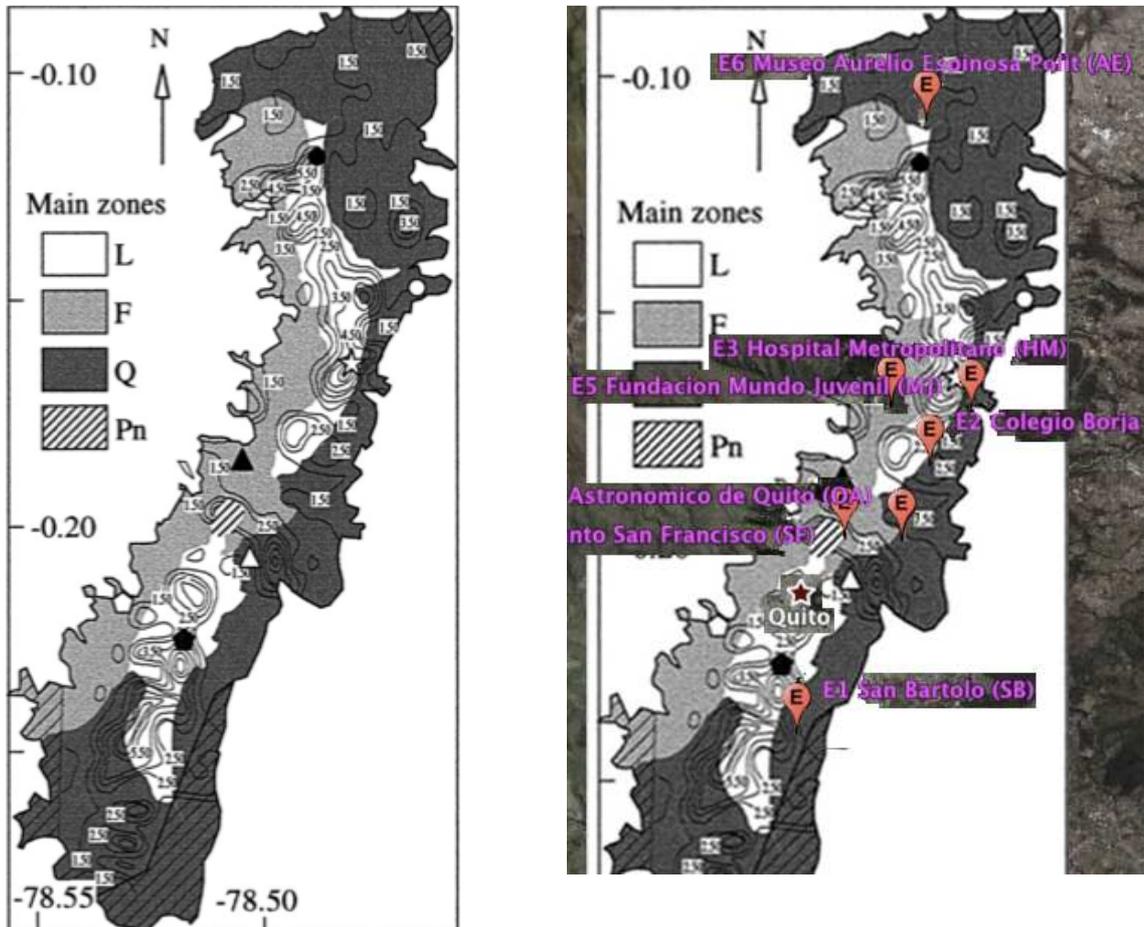


Figura 5-3: Distribución de frecuencias en la ciudad de Quito

Fuente: Guéguen et al. (2000)

1. Las laderas del volcán Pichincha (F), localizado en el oeste de la ciudad y constituido por depósitos de cangahua, ceniza volcánica y depósitos aluviales.
2. Una depresión central (L), cubierta de depósitos lacustres recientes, con capas altas de tierra suave y canales de agua provenientes de las laderas del Pichincha.

3. El lado oriental de la ciudad, compuesto de depósitos de cangahua y cubierta en algunas partes por capas superficiales de tierra suave a lo largo de sus límites occidentales.

Una zona secundaria, El Panecillo, localizada en la parte central de la ciudad, está principalmente compuesta por antiguas formaciones volcánicas.

Frecuencias bajas (entre 0,8 y 1,5 Hz) se observan en las faldas de Pichincha (F) y a lo largo del lado oriental de la ciudad (Q), mientras que las frecuencias más altas (arriba de 10 Hz) aparecen en la depresión central (L). Estos últimos se dividen en dos grupos, al norte y al sur de la ciudad, separadas por la zona del Panecillo (Pn), donde las frecuencias más bajas se observan en conformidad con la geología de superficie.

Los resultados muestran que una segunda frecuencia amplificada aparece en aproximadamente el 10% de los sitios que se encuentran principalmente en la depresión central. La depresión central se caracteriza por depósitos lacustres blandos y está atravesado por canales de agua que viene de los flancos del volcán Pichincha. La presencia de la segunda frecuencia se debe a una delgada capa más suave, que se comporta de manera independiente del resto de la columna de suelo. Esta hipótesis fue confirmada por simulación y por los datos experimentales tomados en el caso de la cuenca de México, donde se atribuyó el segundo pico a la presencia de una capa de arcilla muy suave superior apoyada en medios semi-infinito. El comportamiento de esta capa debe tenerse en cuenta en estudios de riesgo sísmico en lugares donde se espere eventos sísmicos locales como la ciudad de Quito. (Guénguen et al. 2000).

CAPÍTULO 6. ESPECTROS DE DISEÑO

6.1. INTRODUCCIÓN

El espectro de diseño se basa en un análisis estadístico del espectro de respuesta para un conjunto de movimientos del suelo. Para una serie de registros sísmicos a cada período natural le correspondería un número i de valores espectrales igual al número de registros de movimientos del suelo. El análisis estadístico de estos datos provee la distribución de probabilidades para las ordenadas espectrales, el valor de la media y la desviación estándar para cada periodo T_n . Conectando todos los valores medios se obtiene el espectro de respuesta medio en forma normalizada y el espectro de respuesta de la media más una desviación estándar es obtenida de forma similar.

6.2. TIPOS DE ESPECTROS

La importancia de los espectros en el diseño de estructuras radica en el hecho de que estos gráficos condensan la compleja respuesta dinámica en un parámetro clave: los valores de respuesta máxima, que son usualmente los requeridos por el diseñador para el cálculo de estructuras. Se debe sin embargo aclarar que los espectros de respuesta omiten información importante dado que los efectos del terremoto sobre la estructura dependen no solo de la respuesta máxima sino también de la duración del movimiento y del número de ciclos con demanda significativa de desplazamientos.

El concepto de espectro ha ganado una amplia aceptación como herramienta de la dinámica estructural. Es por ello que se han desarrollado varios tipos de espectros, los cuales presentan características diferentes y se utilizan con distintos objetivos.

Espectros de respuesta elástica: representan parámetros de respuesta máxima para un terremoto determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento. Se utilizan fundamentalmente para estudiar

las características del terremoto y su efecto sobre las estructuras. Las curvas de los espectros de respuesta presentan variaciones bruscas, con numerosos picos y valles, que resultan de la complejidad del registro de aceleraciones del terremoto.

Espectros de respuesta inelástica: son similares a los anteriores pero en este caso se supone que el oscilador de un grado de libertad exhibe comportamiento no-lineal, es decir que la estructura puede experimentar deformaciones en rango plástico por acción del terremoto. Este tipo de espectros son muy importantes en el diseño sismorresistente, dado que por razones prácticas y económicas la mayoría de las construcciones se diseñan bajo la hipótesis que incursionarán en campo plástico. Como ejemplo, podemos mencionar los espectros de ductilidad (recordemos que ductilidad de desplazamientos es la relación entre el desplazamiento máximo que experimenta la estructura y el desplazamiento de fluencia). Estos espectros representan la ductilidad requerida por un terremoto dado en función del periodo de vibración de la estructura y se grafican usualmente para distintos niveles de resistencia. También, se construyen espectros de aceleración, desplazamiento de fluencia o desplazamiento último de sistemas inelásticos, en donde se consideran distintos niveles de ductilidad o distintos tipos de comportamiento histerético de la estructura.

Espectros de diseño: las construcciones no pueden diseñarse para resistir un terremoto en particular en una zona dada, puesto que el próximo terremoto probablemente presentará características diferentes. Por lo tanto, los espectros de respuesta elástica o inelástica no pueden utilizarse para el diseño sismorresistente. Por esta razón, el diseño o verificación de las construcciones sismorresistentes se realiza a partir de espectros que son suavizados (no tienen variaciones bruscas) y que consideran el efecto de varios terremotos, es decir que representan una envolvente de los espectros de respuesta de los terremotos típicos de una zona. Los espectros de diseño se obtienen generalmente mediante procedimientos estadísticos.

Es importante distinguir entre espectros de respuesta, que se obtienen para un terremoto dado, y espectros de diseño, los cuales se aplican al cálculo y verificación de estructuras y representan la sismicidad probable del lugar.

6.3. ESPECTROS DE DISEÑO DE ACELERACION

Se han desarrollado varias metodologías basadas en procedimientos estadísticos para obtener los espectros de diseño. El procedimiento más usual es considerar el valor promedio más la desviación estándar de los espectros de respuesta de varios terremotos representativos. Si los valores de los espectros de respuesta son similares, la desviación estándar es baja y la curva espectral se asemeja al promedio. Por el contrario, si los valores presentan diferencias significativas, la desviación estándar es alta y la curva espectral se acerca al valor máximo, o incluso puede superarlo. De modo que este procedimiento tiene en cuenta la mayor o menor dispersión de los datos y conduce a resultados conservadores.

En la figura 6-1: ejemplo de determinación del espectro de diseño a partir de cuatro espectros de respuesta, se presenta el espectro promedio y promedio más la desviación. Puede observarse claramente que la definición del espectro de diseño a partir de valores promedio conduce a resultados poco seguros en la mayoría de los casos para los datos considerados. Este es un simple ejemplo didáctico dado que los cuatro terremotos considerados corresponden a regiones y fuentes sismogénicas totalmente diferentes.

Para los efectos del diseño resulta conveniente que las curvas espectrales se suavicen con líneas envolventes para evitar los valles o variaciones bruscas que surgen de las formas complejas que presentan los espectros de respuesta. Es por ello que los espectros de diseño que definen los códigos están formados por una serie de líneas o curvas, las cuales pueden expresarse mediante ecuaciones simples. Los espectros de diseño de aceleración suelen presentar una rama lineal creciente (con origen en el valor de aceleración máxima del terreno), luego una zona de aceleración constante o plafón, con un valor 2 a 3 veces superior a la aceleración máxima del terreno y finalmente una o más curvas decrecientes.

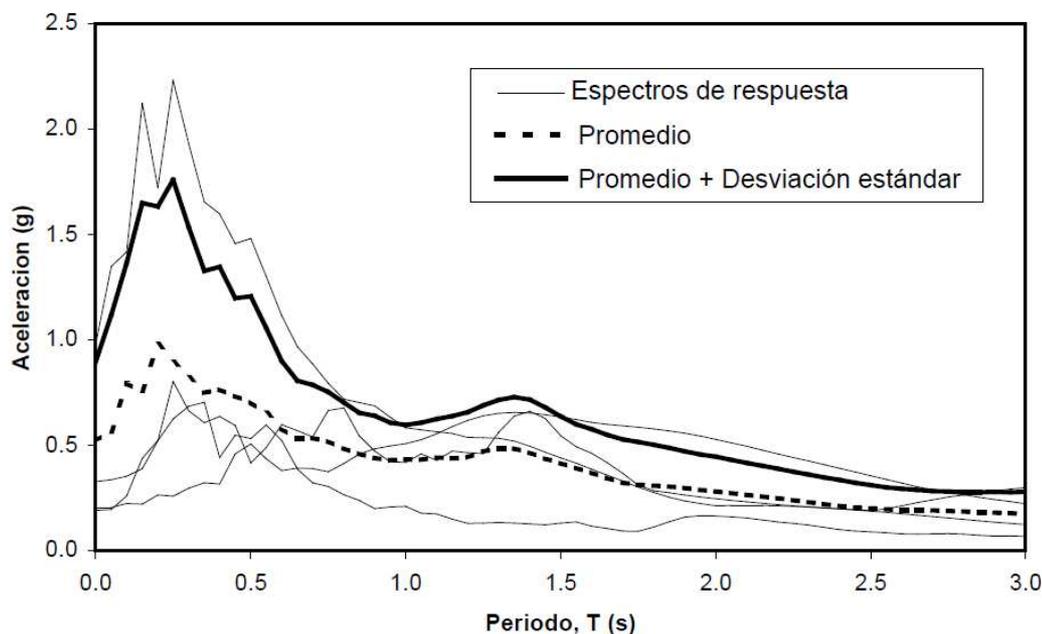


Figura 6-1: Ejemplo de determinación del espectro de diseño a partir de cuatro espectros de respuesta

Fuente: Crisafulli et al. (2002)

Como los códigos de diseño sismorresistente admiten el comportamiento en rango no lineal como mecanismo de disipación de energía, los valores de aceleración espectral deben disminuirse mediante el factor de reducción, R , que depende principalmente de la ductilidad del sistema estructural y del periodo de vibración.

6.4. DIFERENCIA ENTRE EL ESPECTRO DE DISEÑO Y EL ESPECTRO DE RESPUESTA

Un espectro de diseño difiere conceptualmente del espectro de respuesta en dos formas diferentes:

En primer lugar, el áspero espectro de respuesta es un gráfico de las respuestas máximas de todos los posibles sistemas de 1GDL y por consiguiente es una descripción de un movimiento del suelo particular. El espectro de diseño suavizado, sin embargo, es una especificación del nivel de la fuerza sísmica de diseño, por

deformación, como una función del período natural de vibración y del factor de amortiguamiento. Esta diferencia conceptual entre los dos espectros debe ser reconocido, a pesar de que en algunas situaciones, sus formas pueden ser similares. Tal es el caso cuando el espectro de diseño es determinado por análisis estadístico de varios espectros de respuesta.

En segundo lugar, para algunos sitios un espectro de diseño es la envolvente de dos diferentes espectros elásticos de diseño. Considérese un sitio como el sur de California, el mismo que podría ser afectado por dos tipos de terremotos: un sismo de magnitud de 6.5 originado en una falla cercana y un sismo de magnitud 8.5 en la distante falla de San Andrés. El espectro de diseño para cada sismo puede ser determinado independientemente. Las ordenadas y formas de los dos espectros de diseño podrían diferir, como lo muestra la Figura 6-2: Espectro de diseño definido como la envolvente de espectros para sismos originados en diferentes fallas, debido a las diferencias de los sismos en magnitud y distancia del sitio desde la falla.

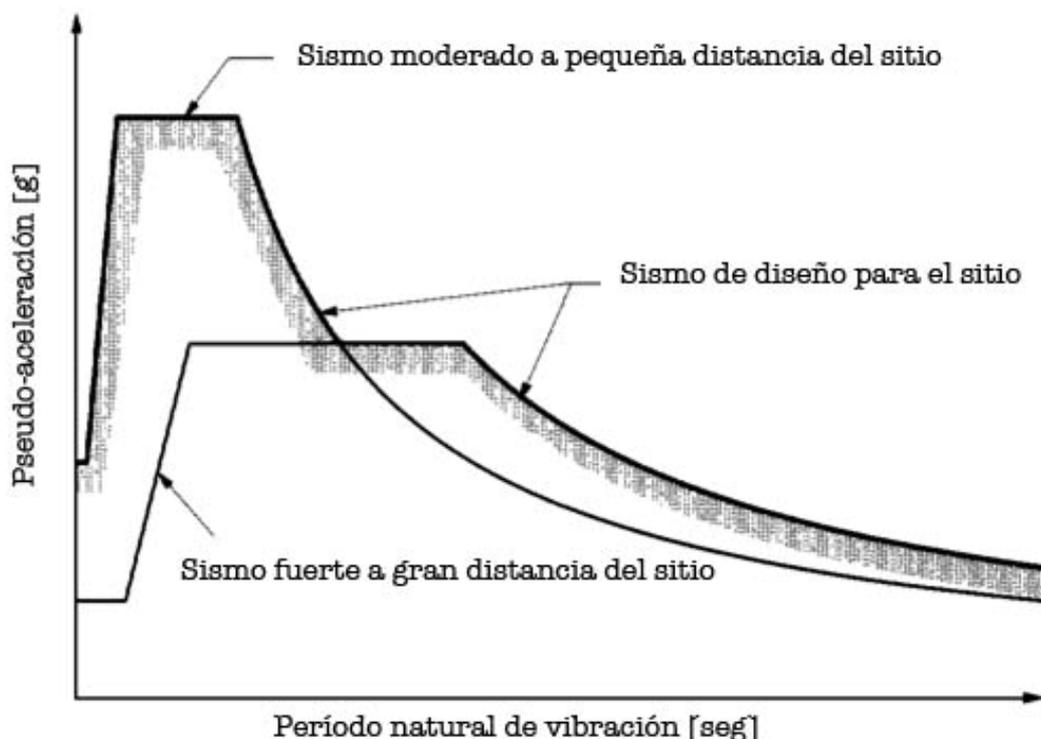


Figura 6-2: Espectro de diseño definido como la envolvente de espectros para sismos originados en diferentes fallas

Fuente: Chopra (1995)

El espectro de diseño para este sitio esta definido como la envolvente del espectro de diseño para los dos diferentes tipos de sismos. Nótese que para la parte de períodos cortos del espectro de diseño esta gobernado por el sismo cercano, mientras que para la parte de los períodos largos del espectro de diseño esta controlado por el sismo lejano. (Chopra, 1995)

6.5. ESPECTROS ELASTICOS DE DISEÑO DE LOS ACELEROGRAMAS CONSIDERADOS

Luego de clasificar los acelerogramas por su forma, (acelerogramas 1, 2, 3, 4, 8 y acelerogramas 5,6,7,9), se procede a calcular el promedio de éstos de modo de poderlo comparar con el espectro de diseño propuesto por el C.E.C. Se incluye la desviación estandar de los datos de modo de notar la dispersión de los datos.

La Figura 6-3: Promedio de los espectros normalizados a 0.4g y el espectro del C.E.C. para las componentes verticales y la Figura 6-4: Promedio de los espectros normalizados a 0.4g y espectro del C.E.C. para las componentes horizontales, muestran el resultado de estas comparaciones. Para el primer caso se toma $2/3$ de los valores como lo sugiere el código.

Posterior a la clasificación y de modo de encontrar un espectro unificado, se halla el promedio de todos los acelerogramas. Como puede observarse en la Figura 6-5: Promedio total de los espectros para las componentes verticales, la curva que se ajusta a este promedio total corresponde al tipo de suelo S3 de la propuesta del C.E.C., escalado a $2/3$. De igual forma, para la Figura 6-6: Promedio total de los espectros para las componentes horizontales, la curva de tipo de suelo S3, es la que se ajusta a las ordenadas en todo el rango de períodos.

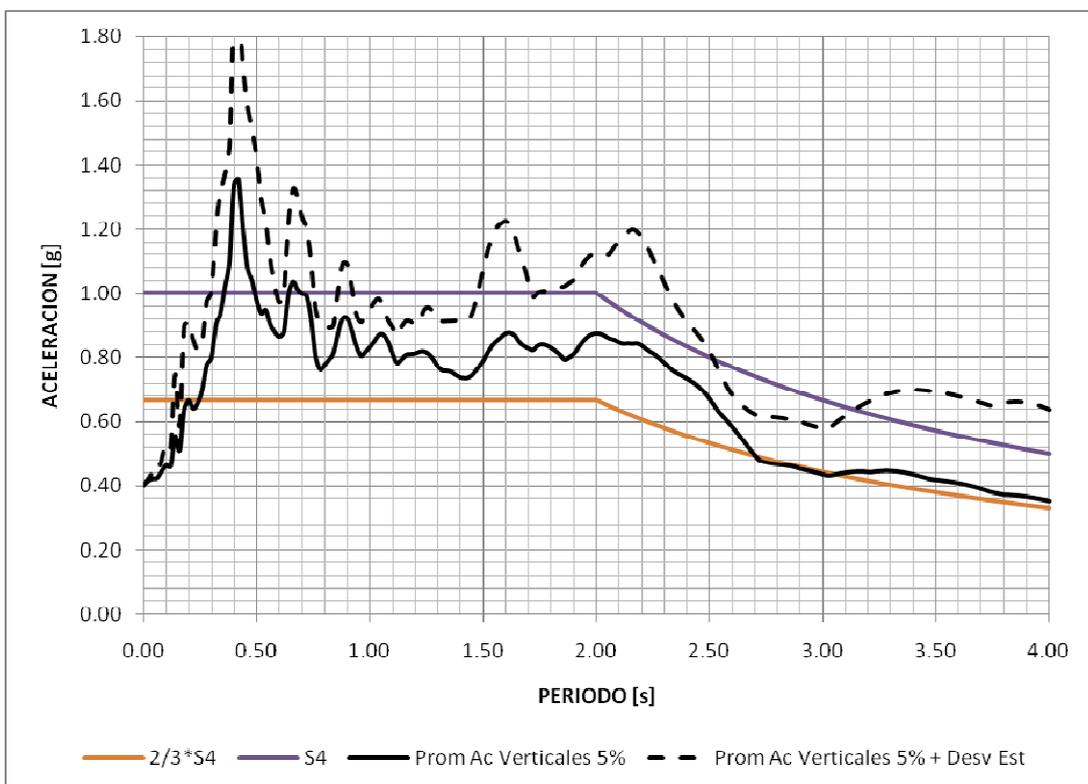
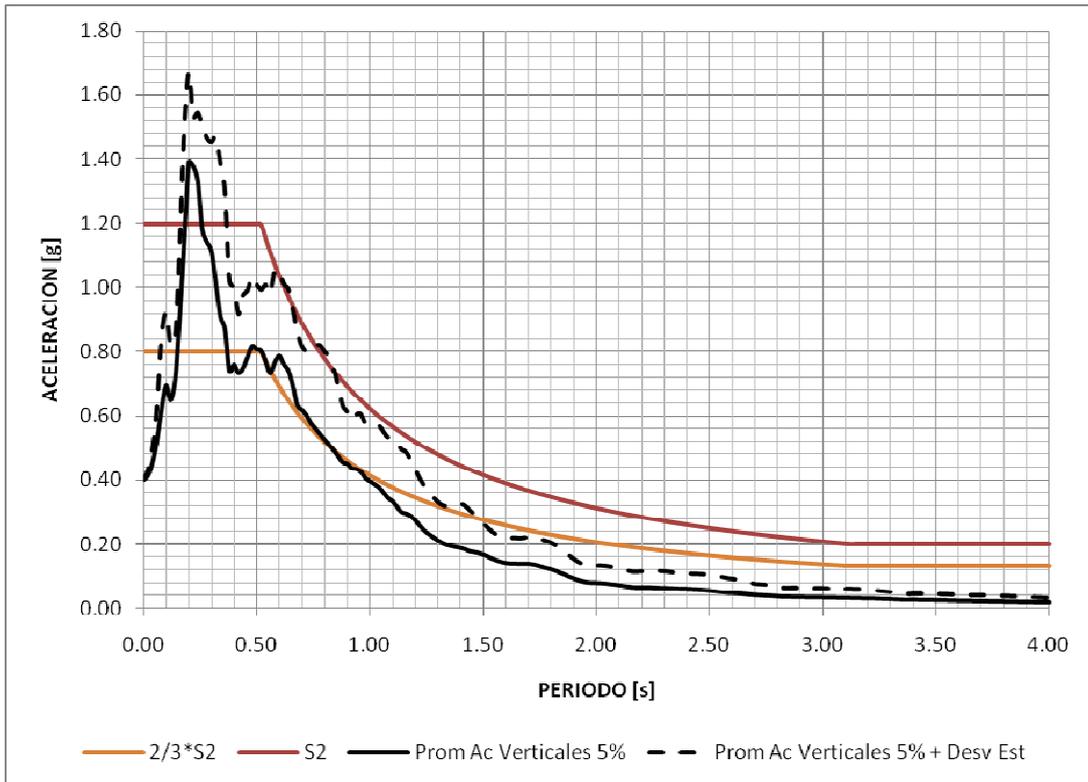


Figura 6-3: Promedio de los espectros normalizados a 0.4g y el espectro del C.E.C. para las componentes verticales

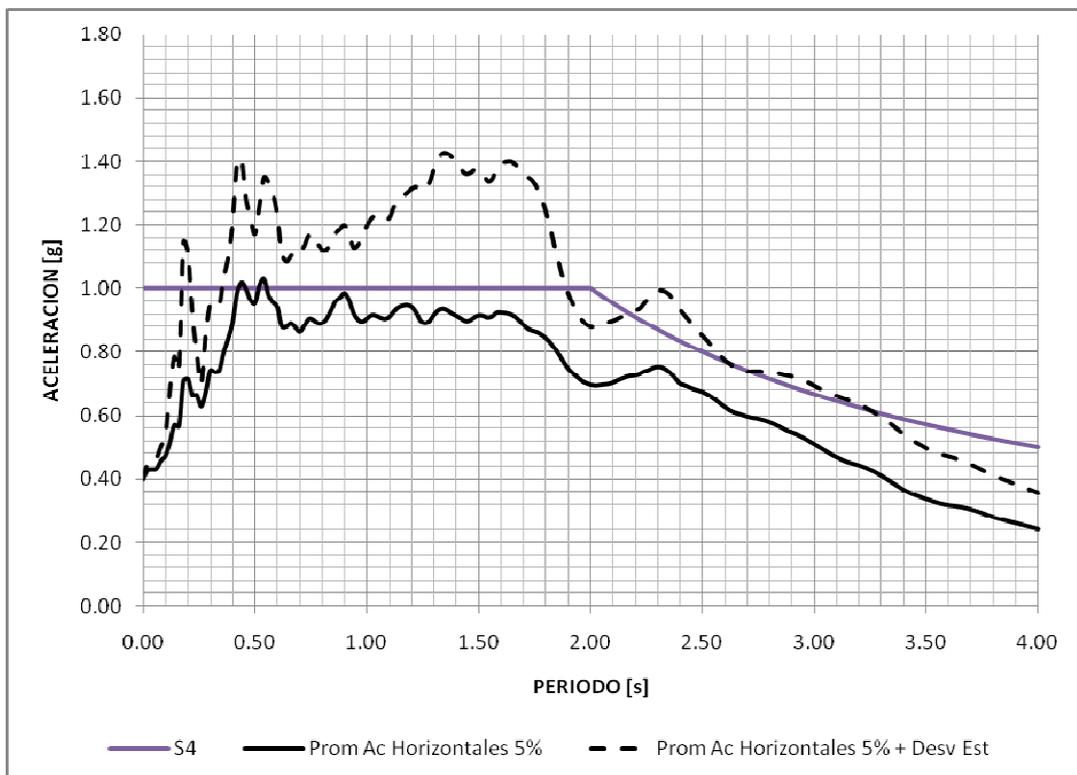
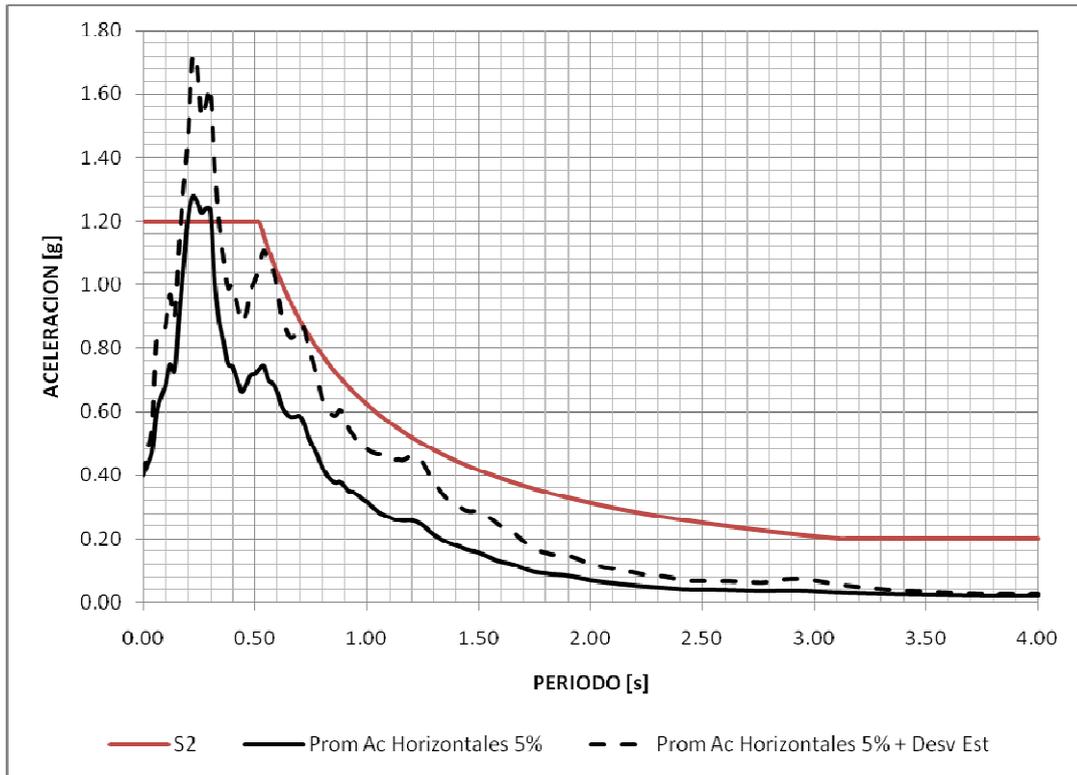


Figura 6-4: Promedio de los espectros normalizados a 0.4g y espectro del C.E.C. para las componentes horizontales

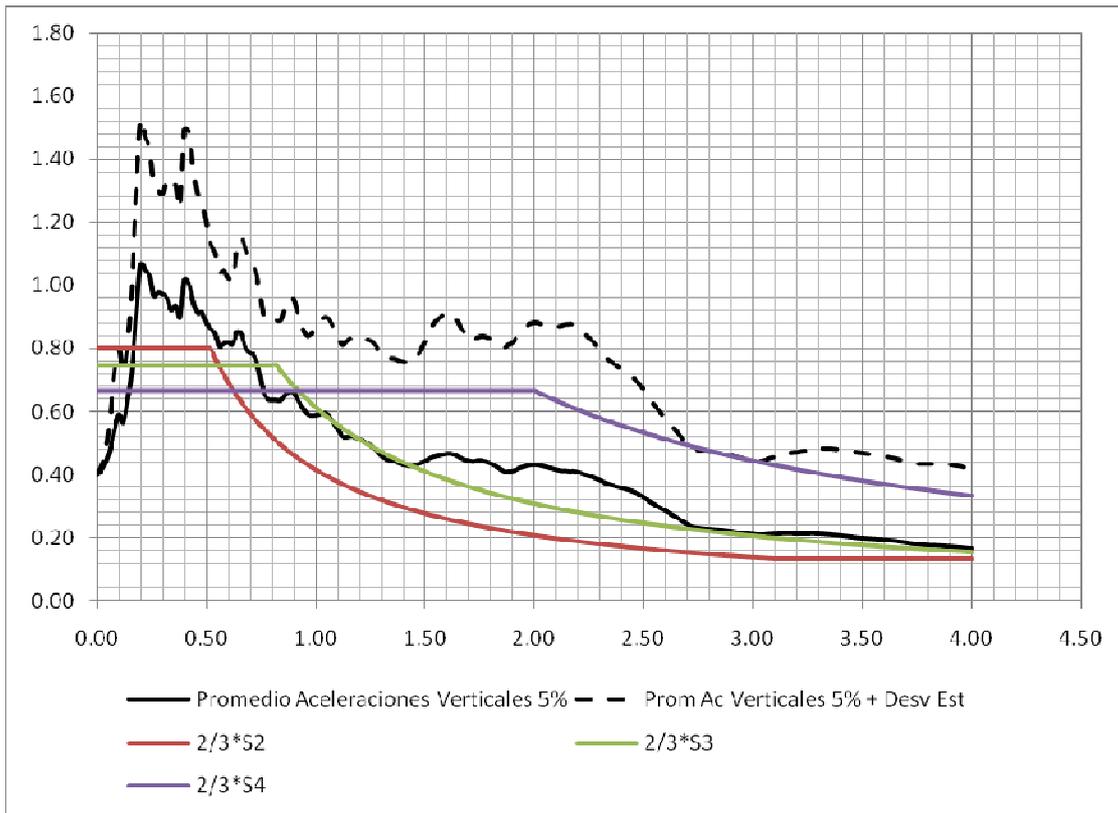


Figura 6-5: Promedio total de los espectros para las componentes verticales

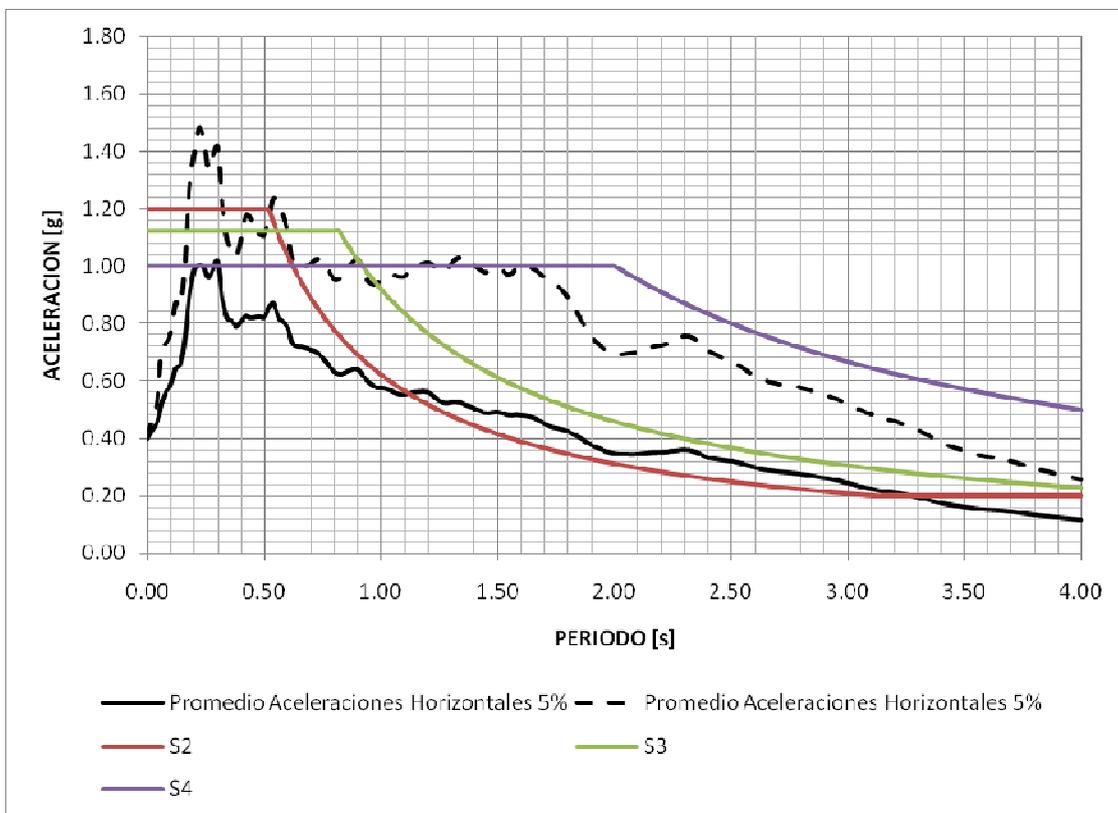


Figura 6-6: Promedio total de los espectros para las componentes horizontales

6.6. ESPECTROS INELASTICOS DE DISEÑO DE LOS ACELEROGRAMAS CONSIDERADOS

Tanto la Figura 6-7: Promedio de las componentes verticales de los espectros inelásticos normalizados a 0.4g, como la Figura 6-8: Promedio de las componentes horizontales de los espectros inelásticos normalizados a 0.4g, muestran la variación de la ductilidad en el período para diferentes valores de η . De estos, la figura superior corresponde a la primera clasificación de los acelerogramas, considerando un tipo de suelo S2, mientras que el inferior expone los valores para los acelerogramas según la segunda clasificación. Dichas gráficas han sido obtenidas considerando los resultados expuestos en el Anexo No. 9.

A partir de la Figura 6-9: Promedio del factor de reducción por ductilidad de las componentes verticales para una ductilidad $U=4$, hasta la Figura 6-12: Promedio del factor de reducción por ductilidad de las componentes horizontales para una ductilidad $U=6$, se presentan las medias de los esquemas del Anexo No. 11. En dichas representaciones se presentan la comparación de éste factor con propuestas hechas para el cálculo del mismo, según las ecuaciones Ecuación 4-25: Factor de reducción por ductilidad según Newmark y Hall, y Ecuación 4-26: Factor de reducción por ductilidad según Aguiar, Romo y Aragón.

De esta comparación se concluye que las propuestas de las ecuaciones corresponden a valores medios, más no a envolventes de este factor. En casi todo el rango de períodos los calculados a partir de las ecuaciones propuestas, satisfacen a la tendencia del factor.

Puede además reconocerse que existe una buena aproximación entre los resultados obtenidos del factor de reducción R_{μ} entre los acelerogramas de sismos registrados en Estados Unidos de Norte América con acelerogramas de sismos registrados en Sur América. Esto conduce a pensar que el factor R_{μ} no depende del origen de los sismos.

Desde la Figura 6-13: Promedio de las componentes verticales de los espectros elásticos reducidos, normalizados a 0.4g para una ductilidad $U=4$, hasta la Figura 6-16: Promedio de las componentes horizontales de los espectros elásticos reducidos, normalizados a 0.4g para una ductilidad $U=6$, se presentan la tendencia media de los canales verticales y horizontales clasificados por el tipo de suelo, para ductilidades de 4 y 6. Estas figuras muestran el promedio de los espectros elásticos reducidos con el factor de reducción de fuerzas sísmicas hallado para cada uno de ellos. En dicho factor se ha considerado una estructura con una ductilidad global de la estructura igual a 6 con 4 ejes de columnas, de modo de obtener un factor de reducción por resistencia igual a 1.5 y un factor de reducción por redundancia de 1 según la Tabla 4-3: Valores propuestos de R_R por el ATC-1995, respectivamente.

Los promedios totales son hallados considerando todos los acelerogramas para los canales verticales y todos para los horizontales. Estas gráficas se presentan desde la Figura 6-17: Promedio para las componentes verticales, ductilidad $U=4$, hasta la Figura 6-20: Promedio para las componentes horizontales, ductilidad $U=6$.

Se nota en estos gráficos con las características especificadas, que especialmente para períodos menores a 0.5 segundos no se debería trabajar considerando un factor de reducción de las fuerzas sísmicas igual a 10 ya que para estos valores existe una mayor demanda de fuerzas sísmicas. Para el resto de valores de períodos, un valor del factor de reducción igual a 6.5 sería más apropiado de modo de satisfacer las condiciones de ductilidad requerida en cada caso.

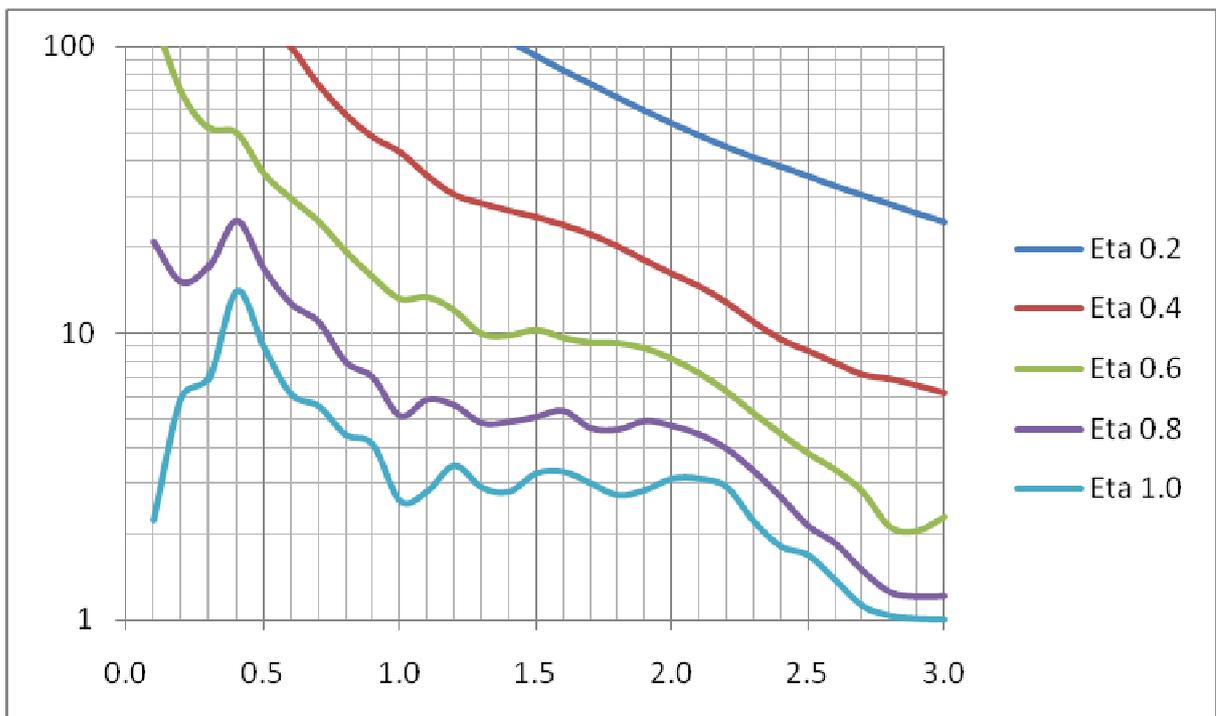
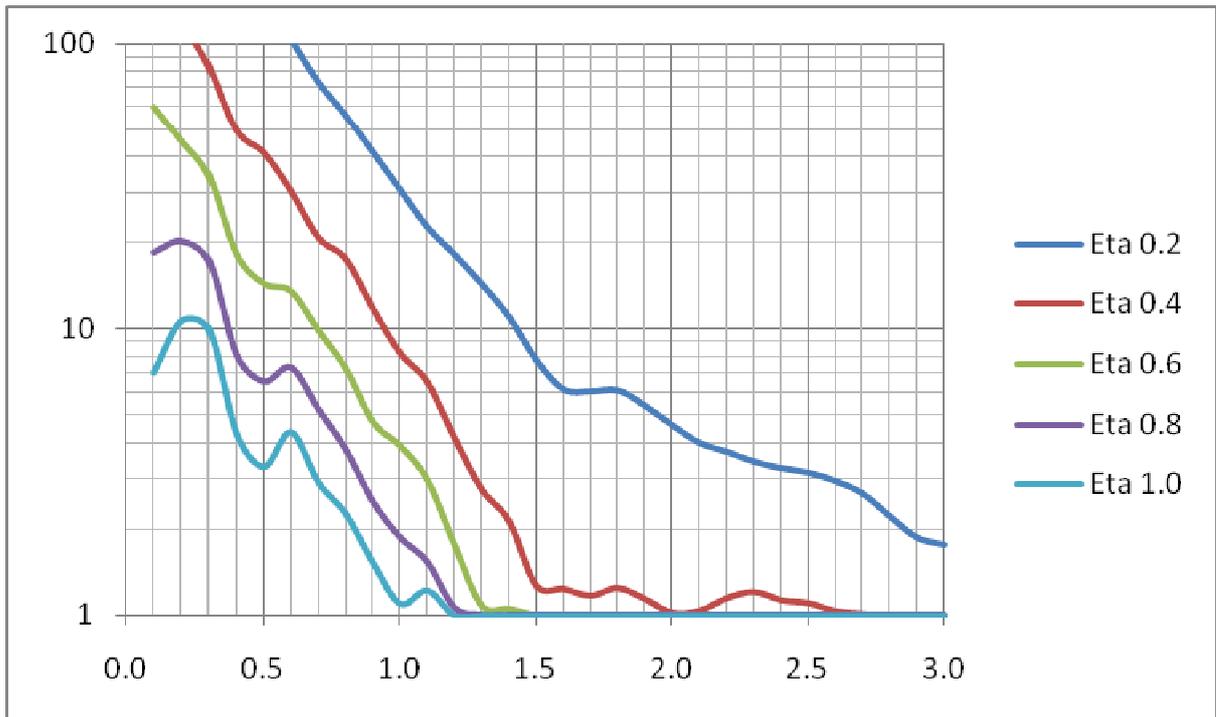


Figura 6-7: Promedio de las componentes verticales de los espectros inelásticos normalizados a 0.4g

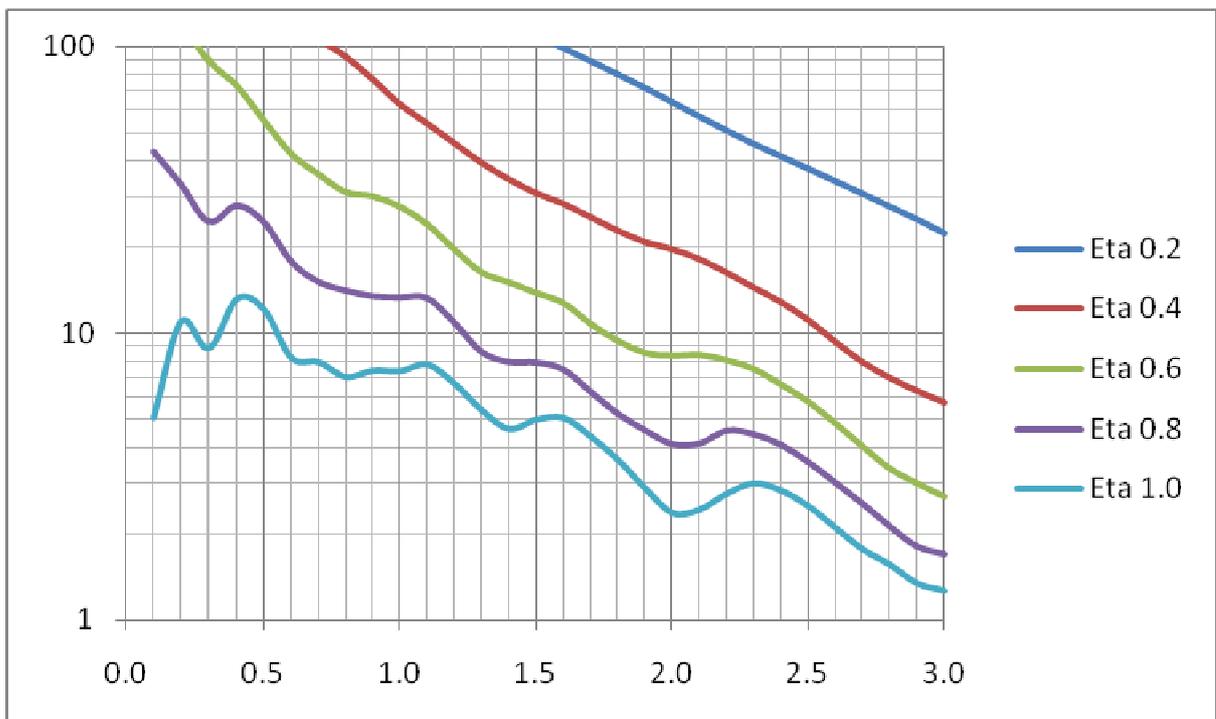
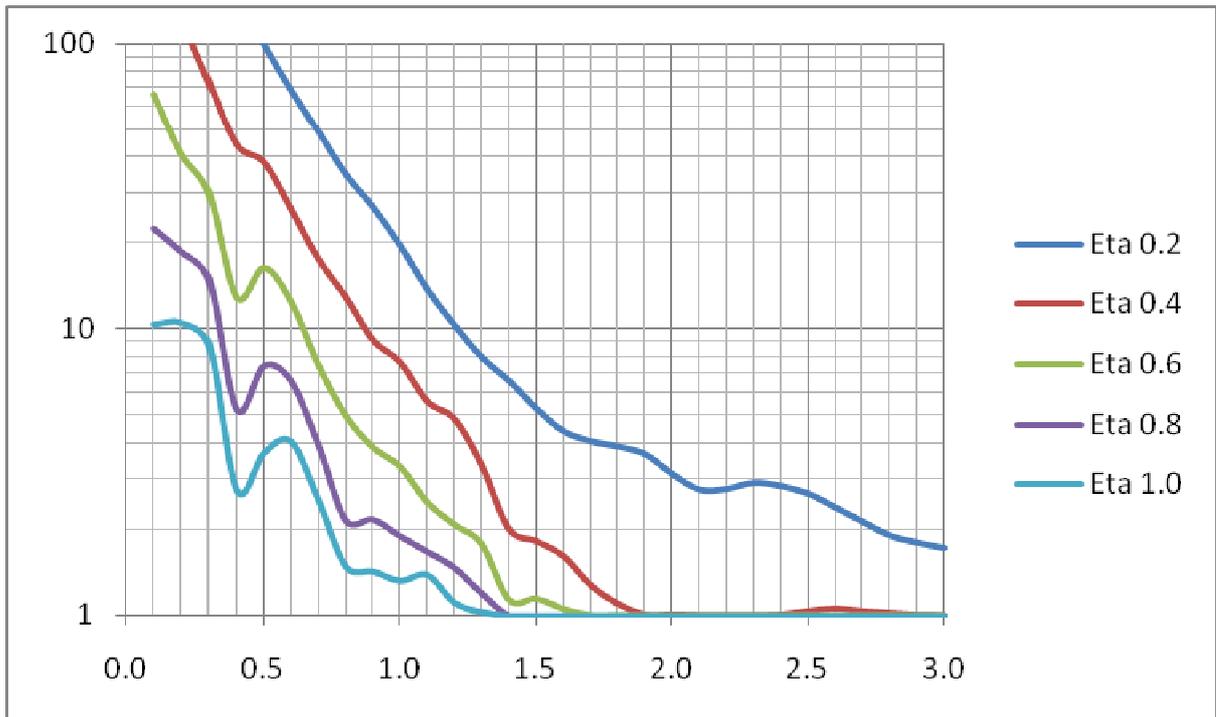


Figura 6-8: Promedio de las componentes horizontales de los espectros inelásticos normalizados a 0.4g

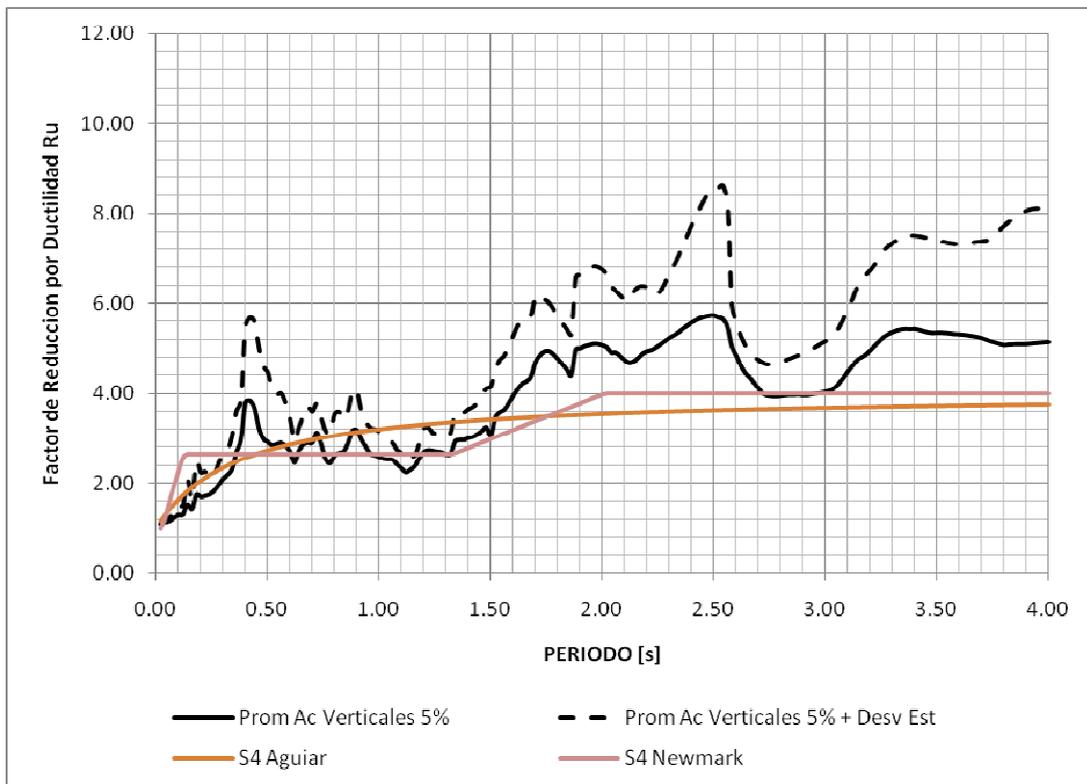
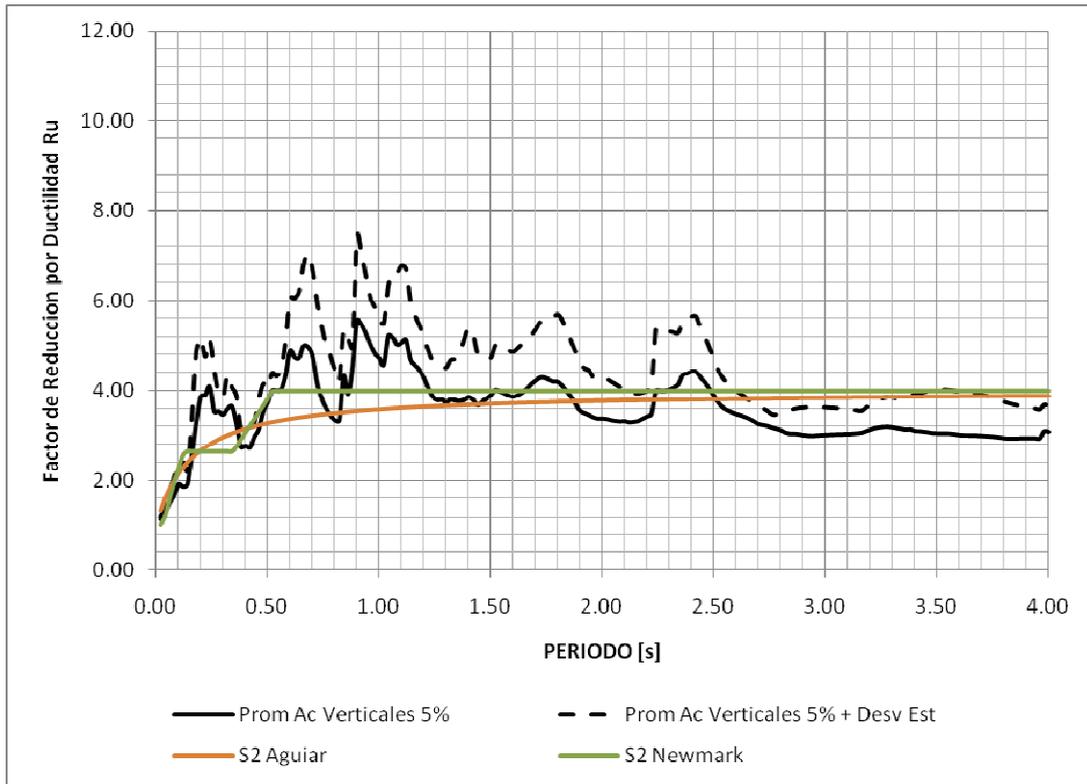


Figura 6-9: Promedio del factor de reducción por ductilidad de las componentes verticales para una ductilidad $U=4$

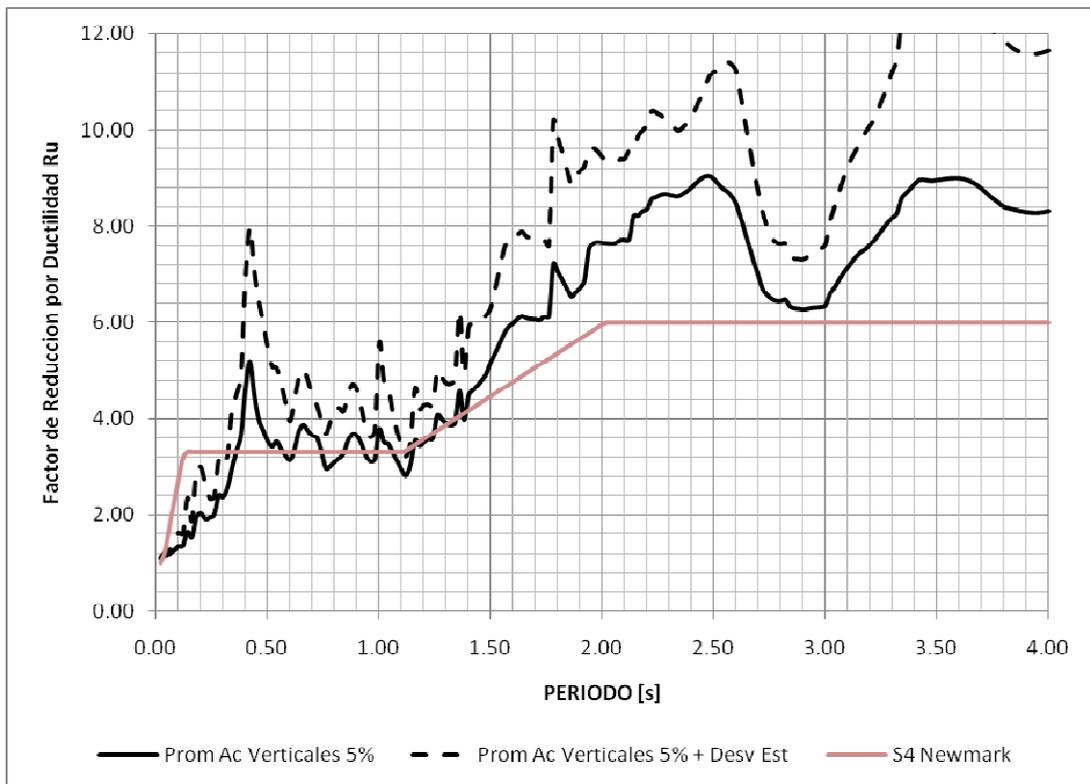
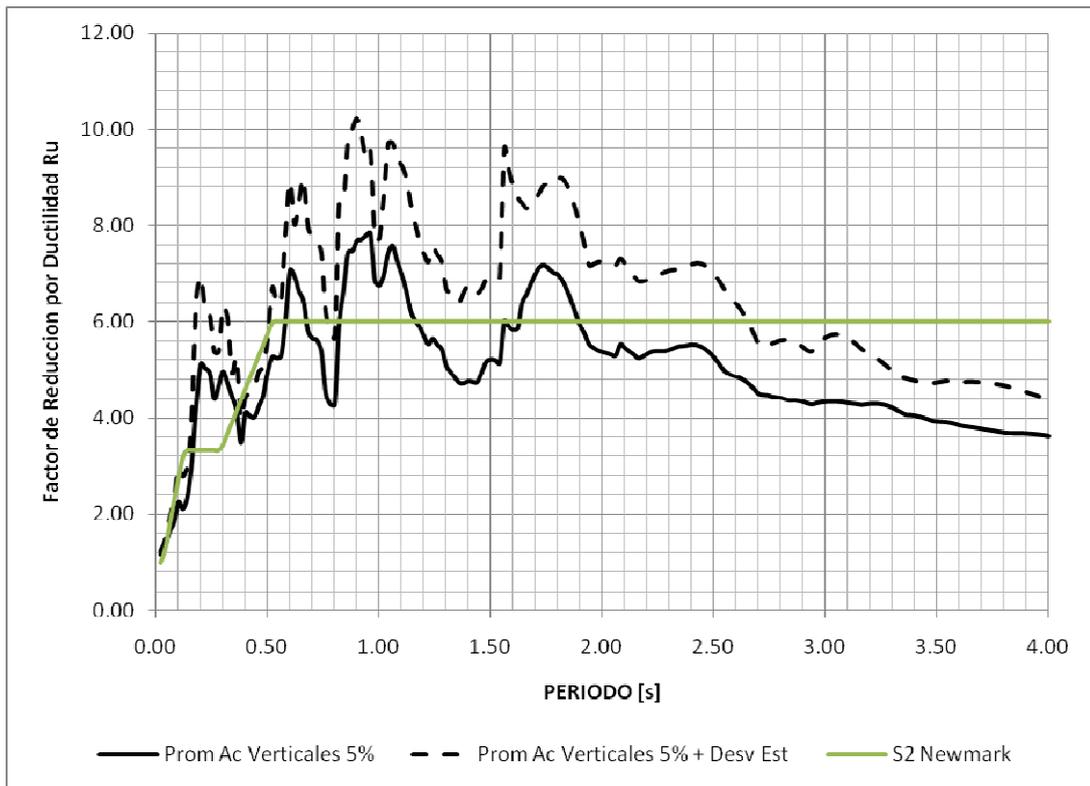


Figura 6-10: Promedio del factor de reducción por ductilidad de las componentes verticales para una ductilidad U=6

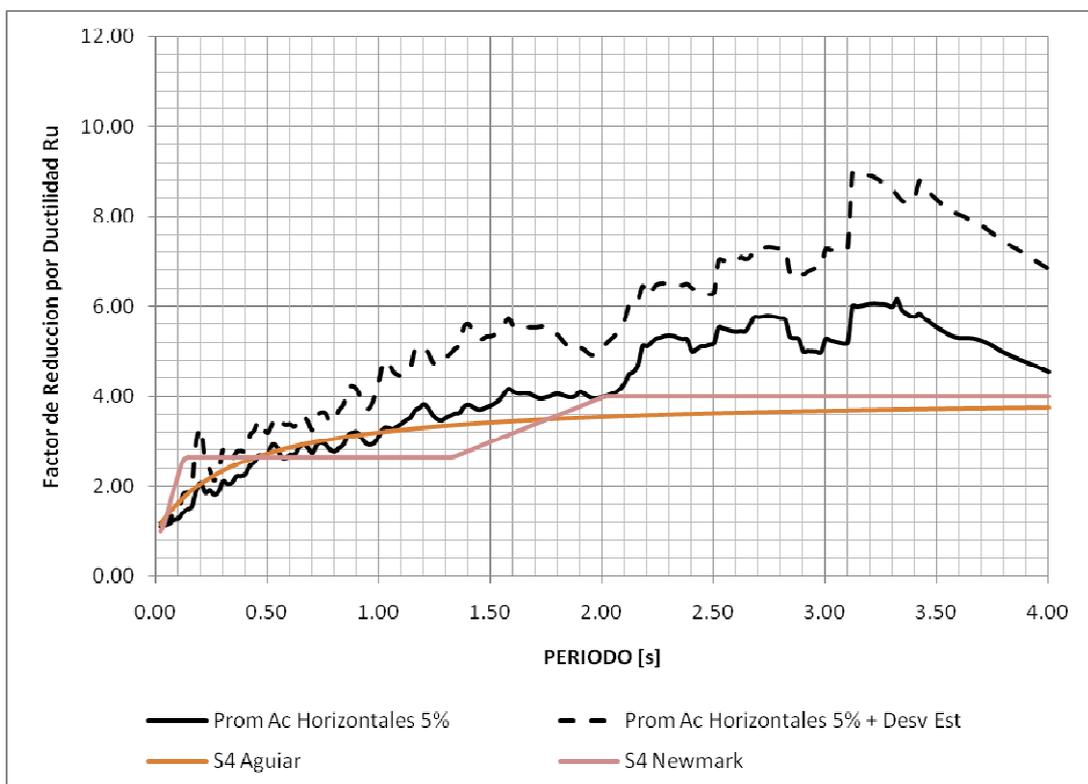
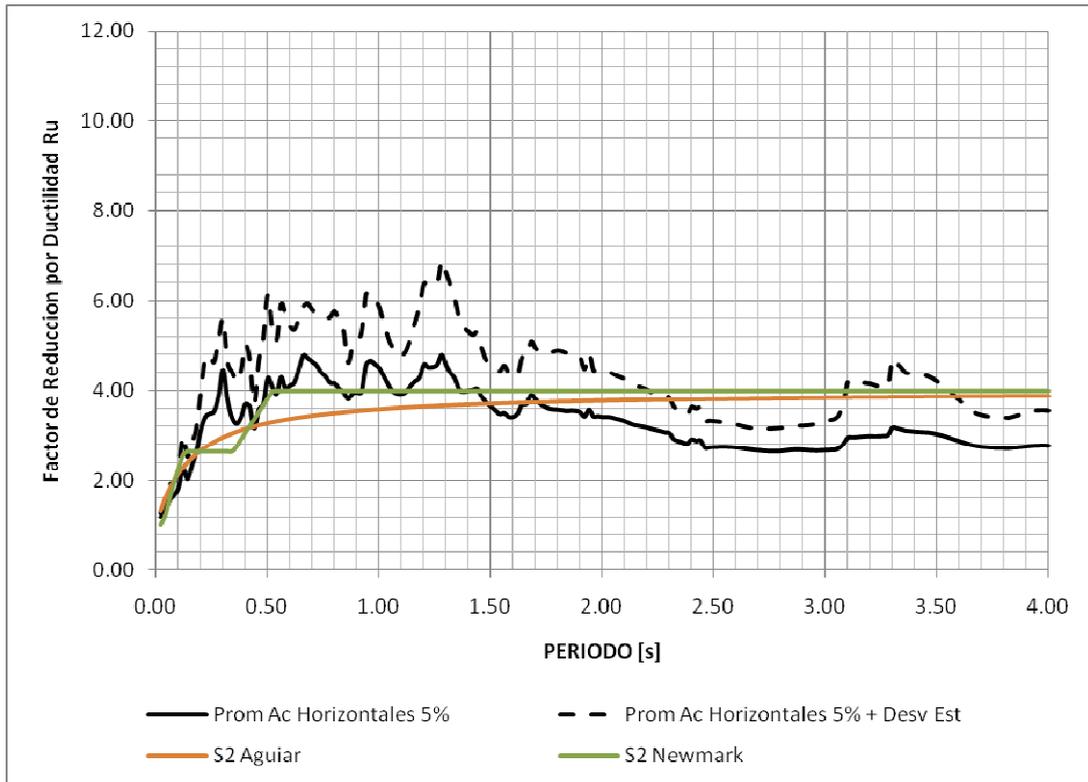


Figura 6-11: Promedio del factor de reducción por ductilidad de las componentes horizontales para una ductilidad $U=4$

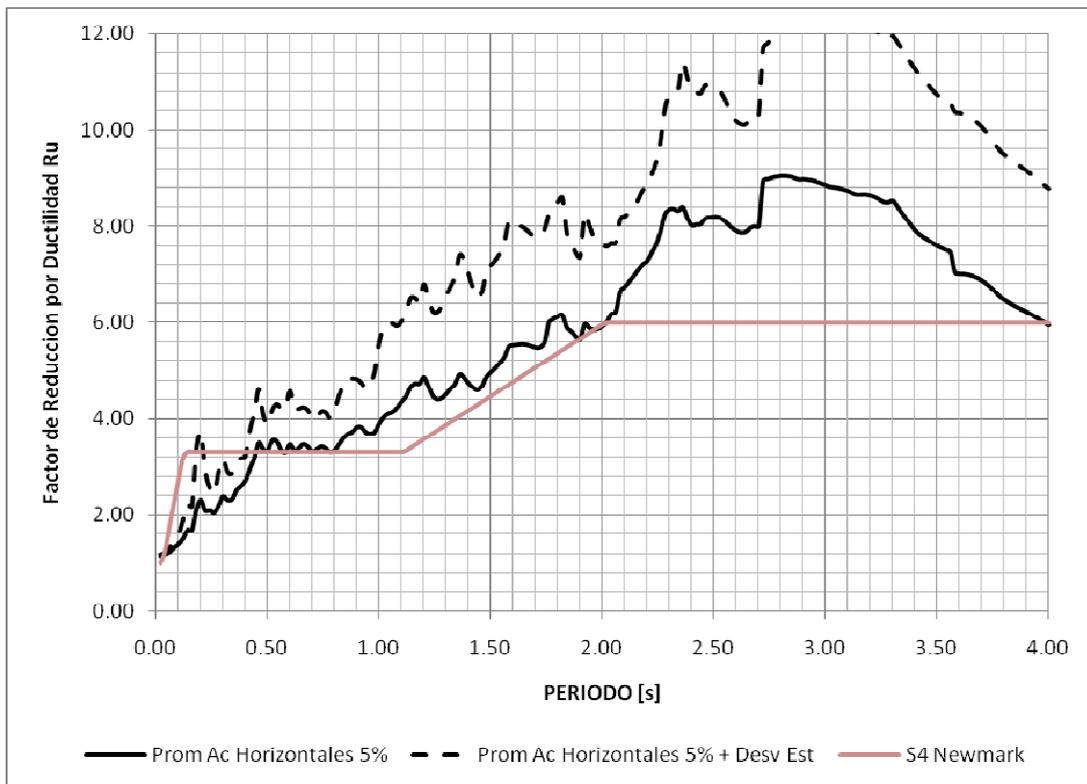
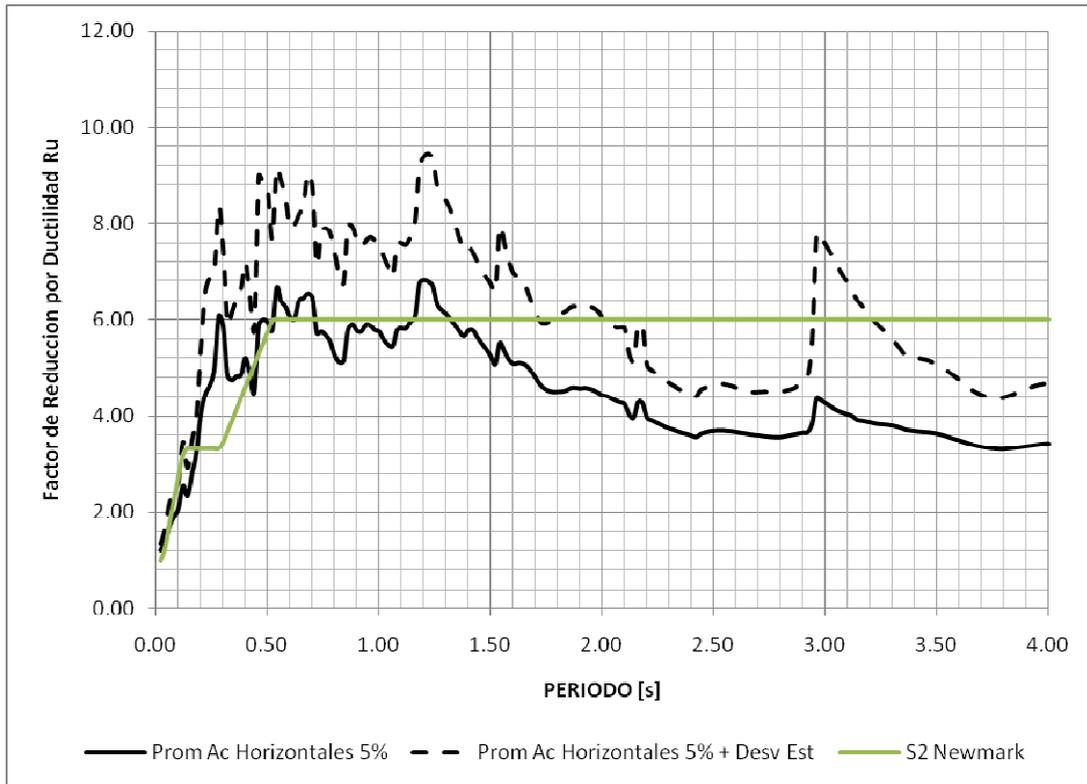


Figura 6-12: Promedio del factor de reducción por ductilidad de las componentes horizontales para una ductilidad U=6

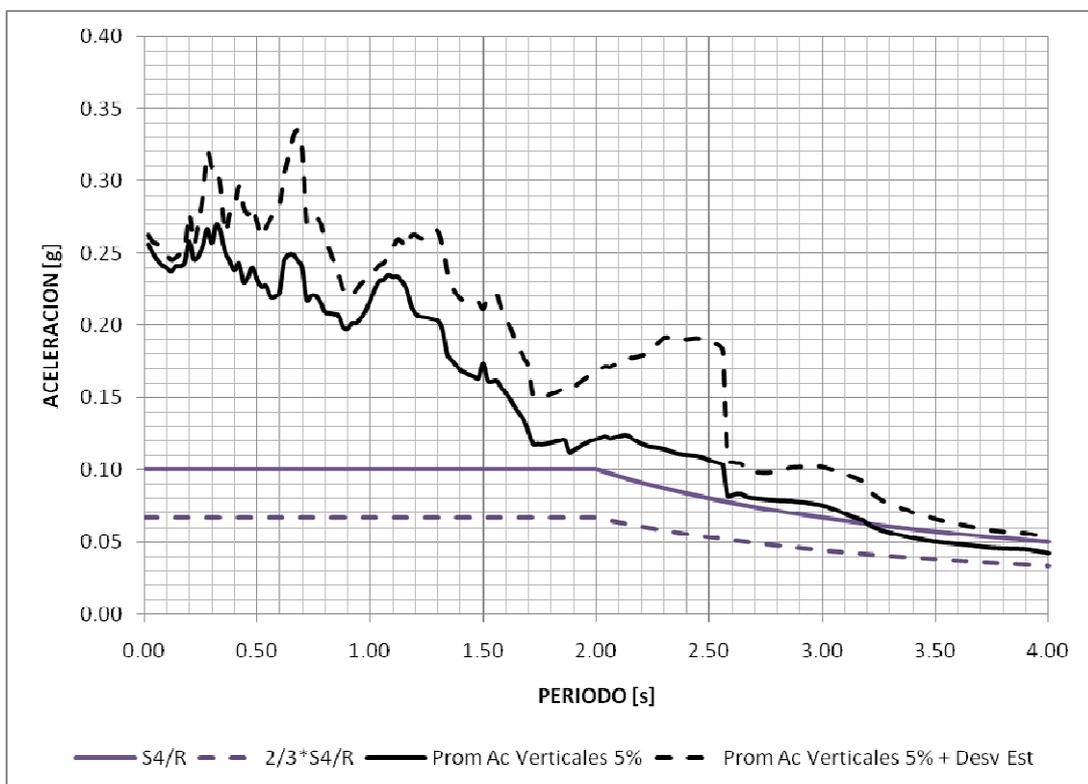
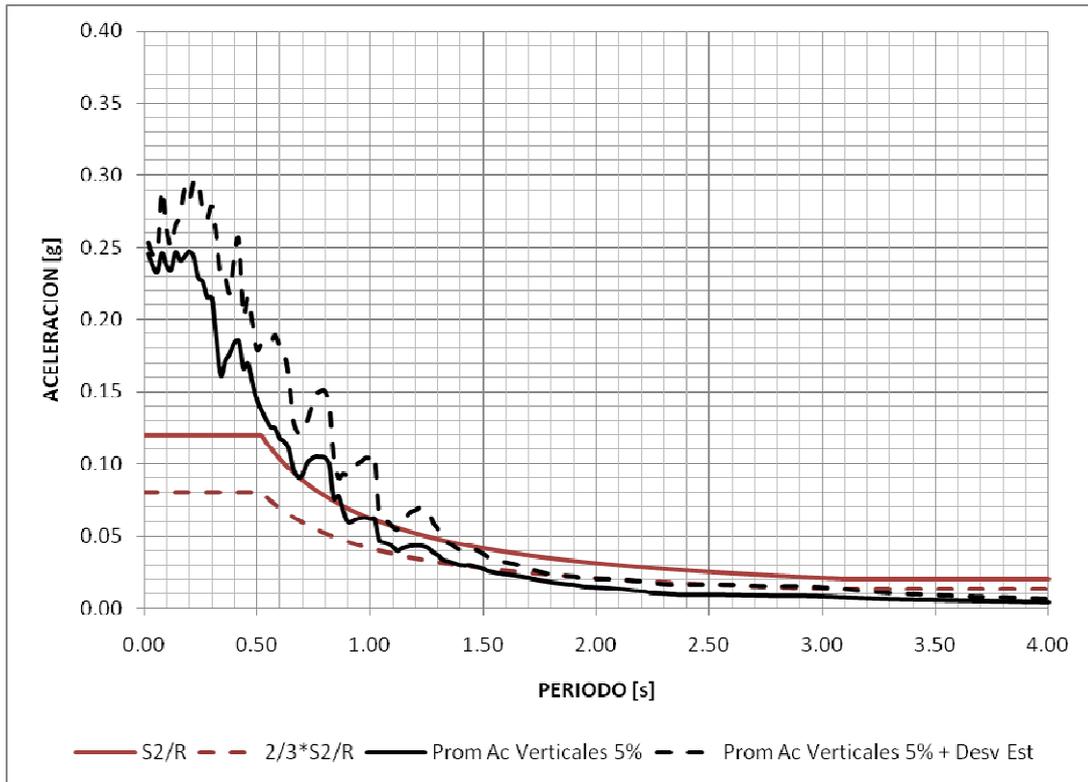


Figura 6-13: Promedio de las componentes verticales de los espectros elásticos reducidos, normalizados a 0.4g para una ductilidad $U=4$

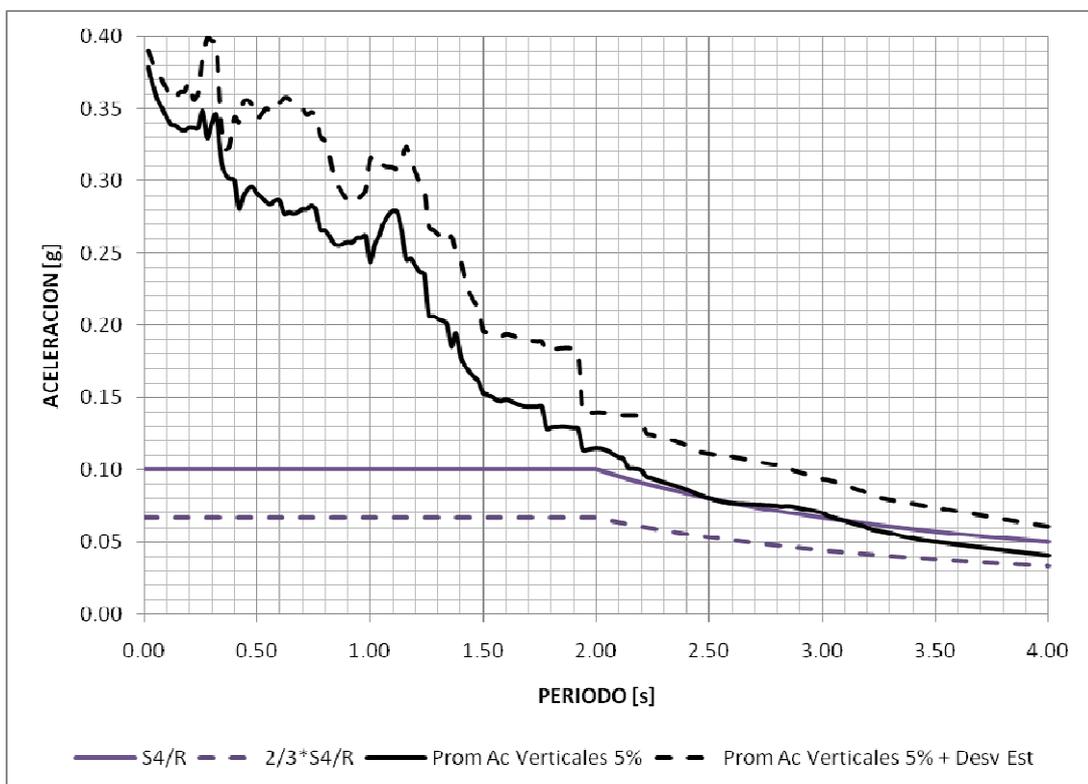
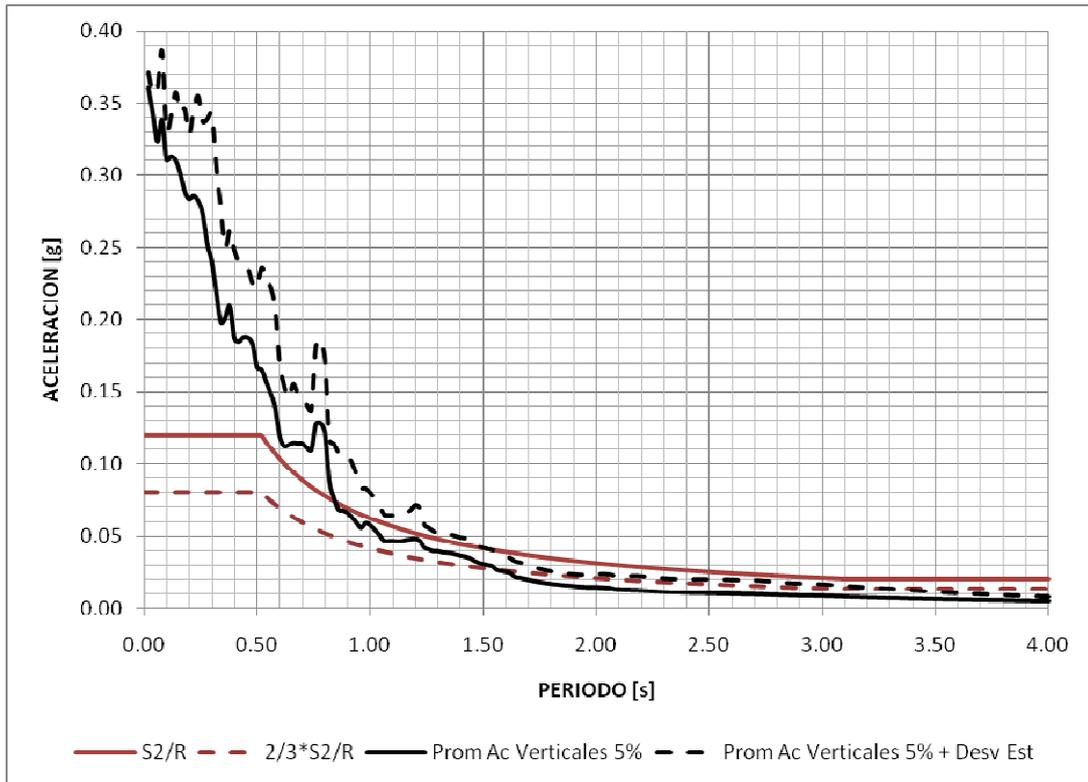


Figura 6-14: Promedio de las componentes verticales de los espectros elásticos reducidos, normalizados a 0.4g para una ductilidad $U=6$

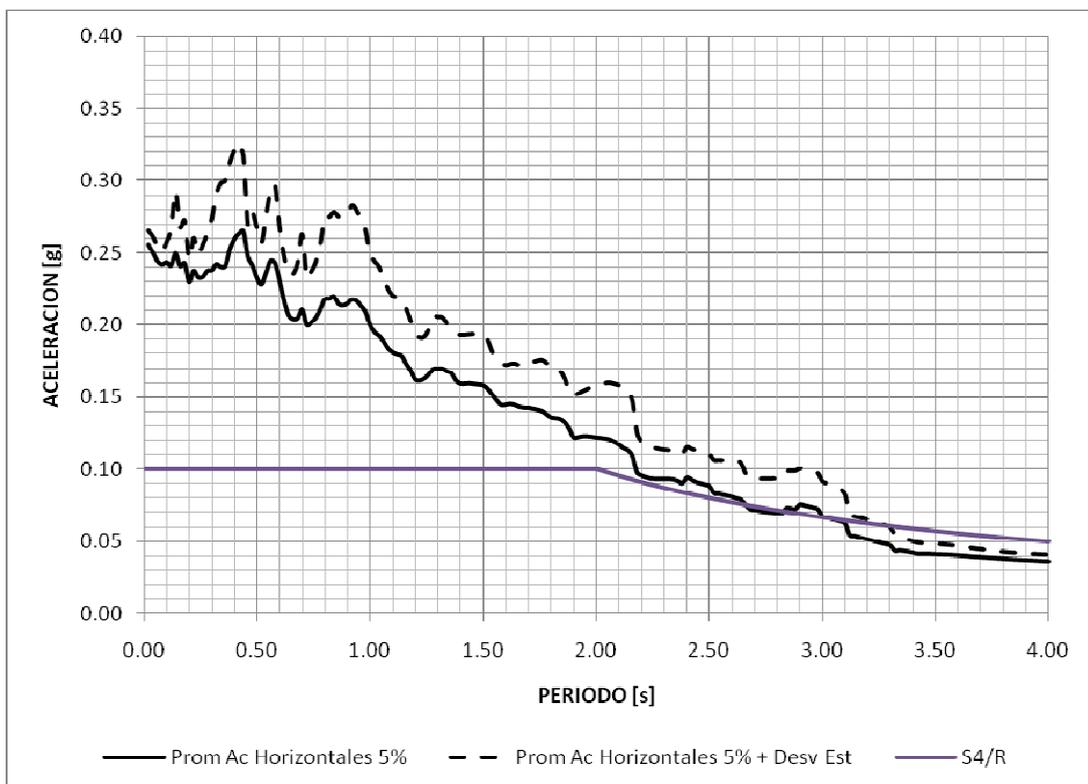
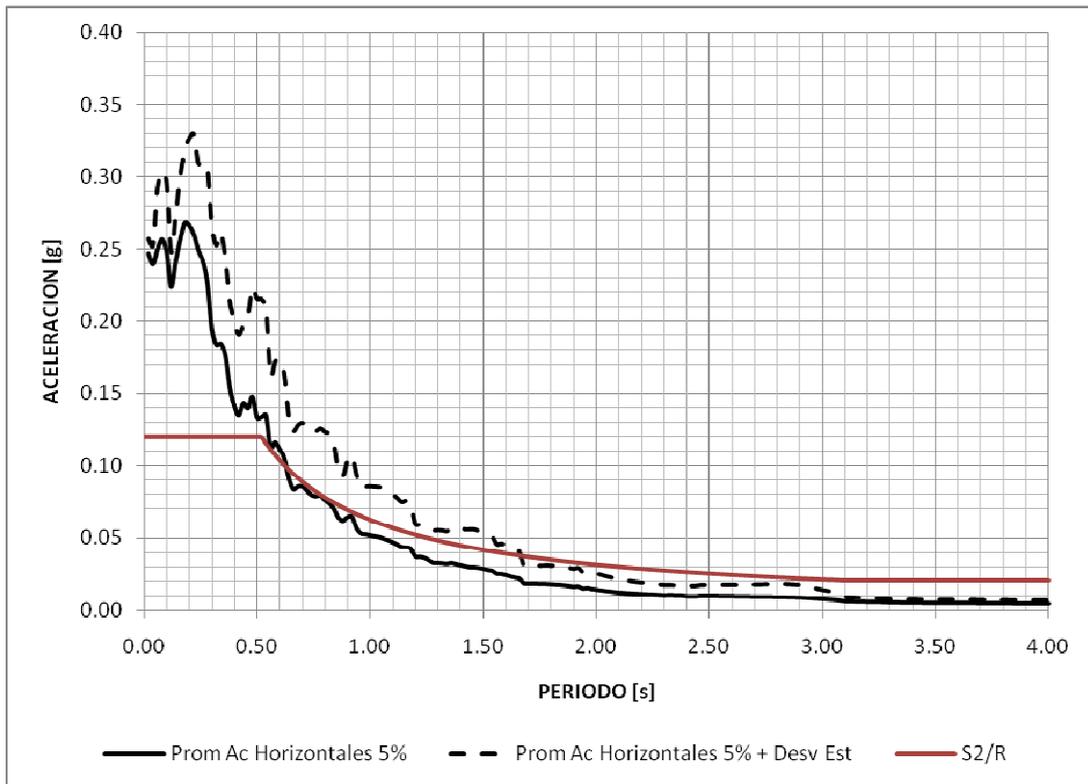


Figura 6-15: Promedio de las componentes horizontales de los espectros elásticos reducidos, normalizados a 0.4g para una ductilidad $U=4$

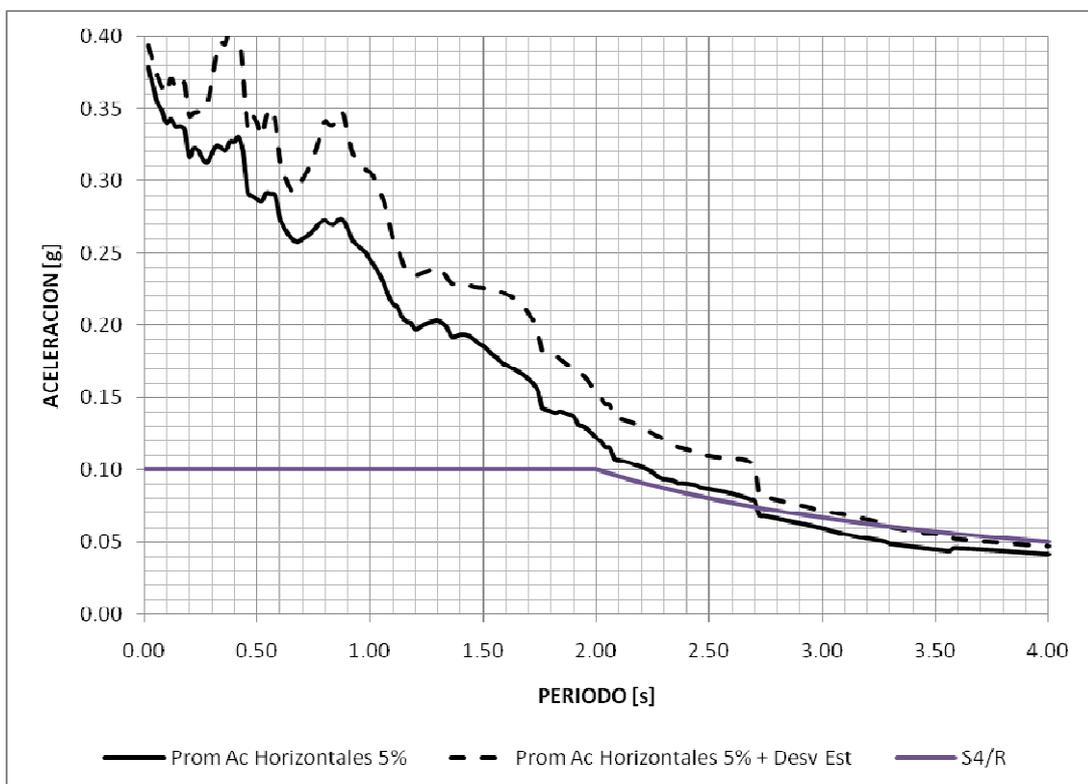
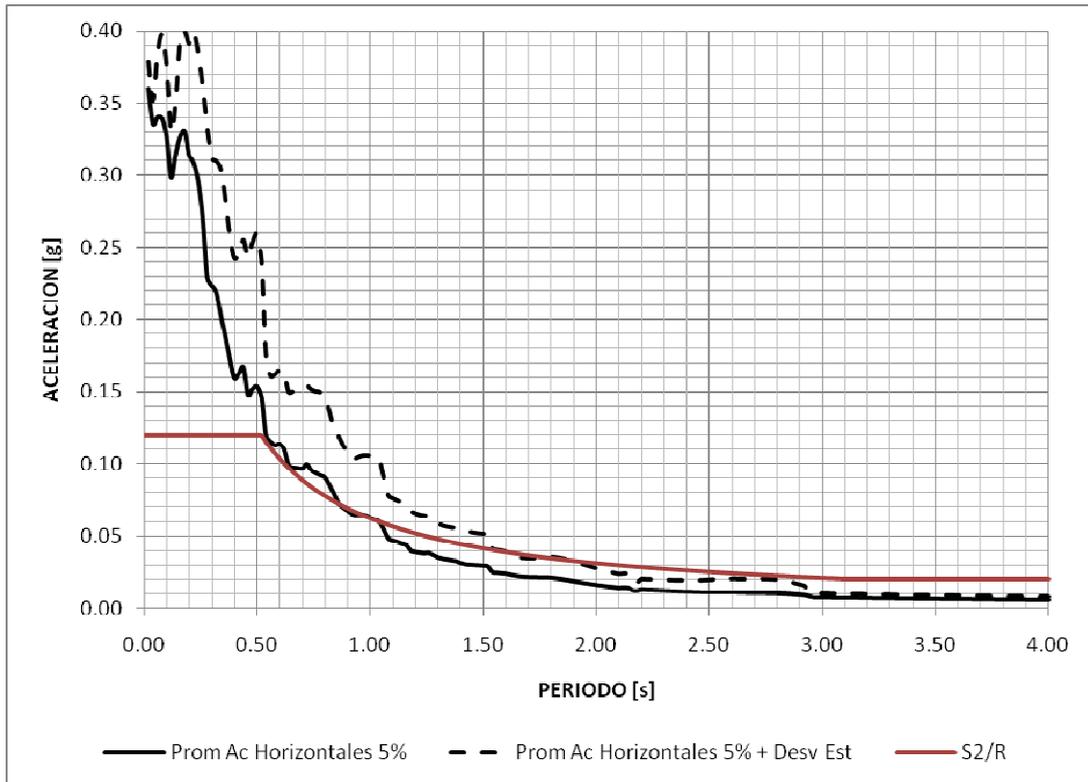


Figura 6-16: Promedio de las componentes horizontales de los espectros elásticos reducidos, normalizados a 0.4g para una ductilidad U=6

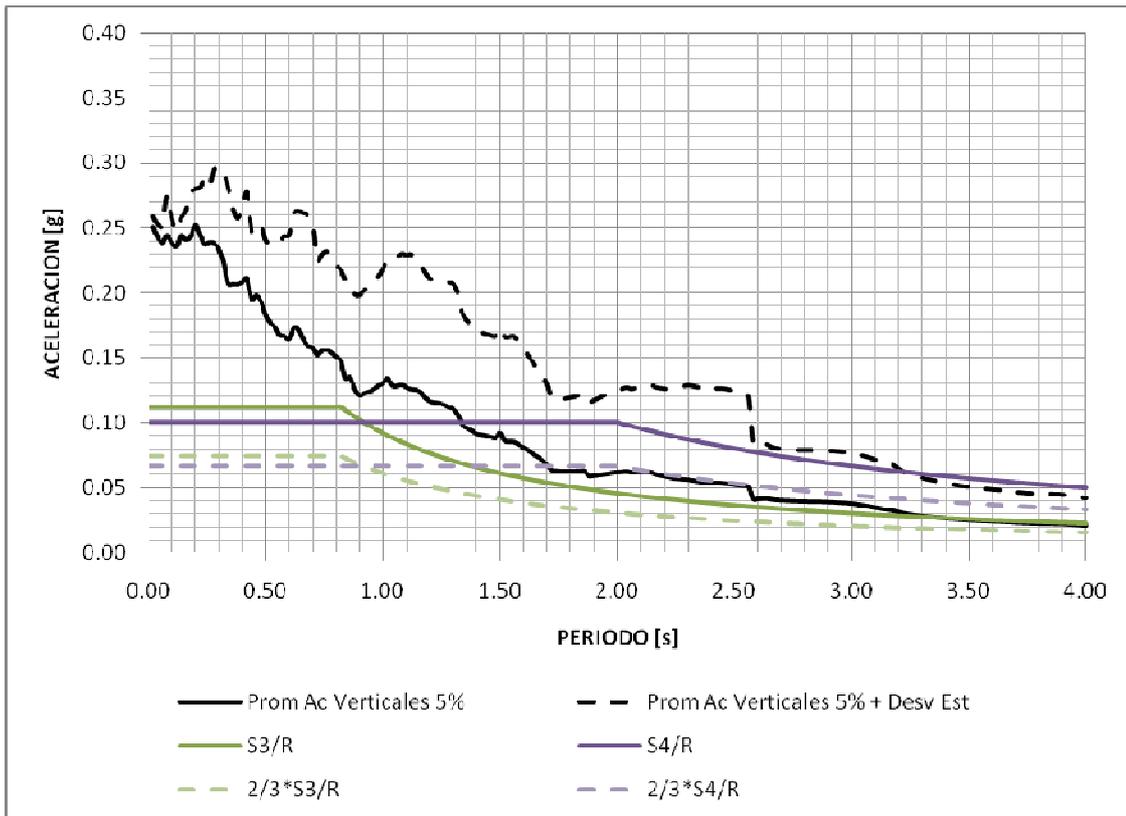


Figura 6-17: Promedio para las componentes verticales, ductilidad $U=4$

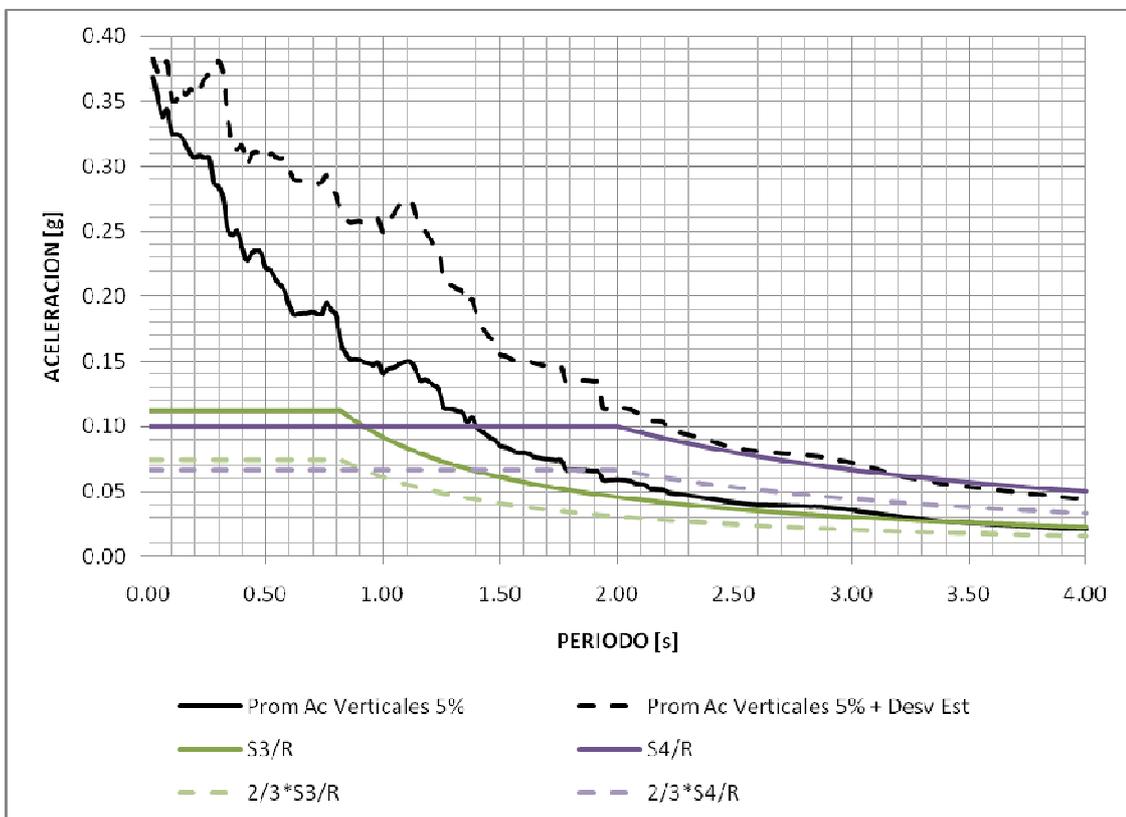


Figura 6-18: Promedio para las componentes verticales, ductilidad $U=6$

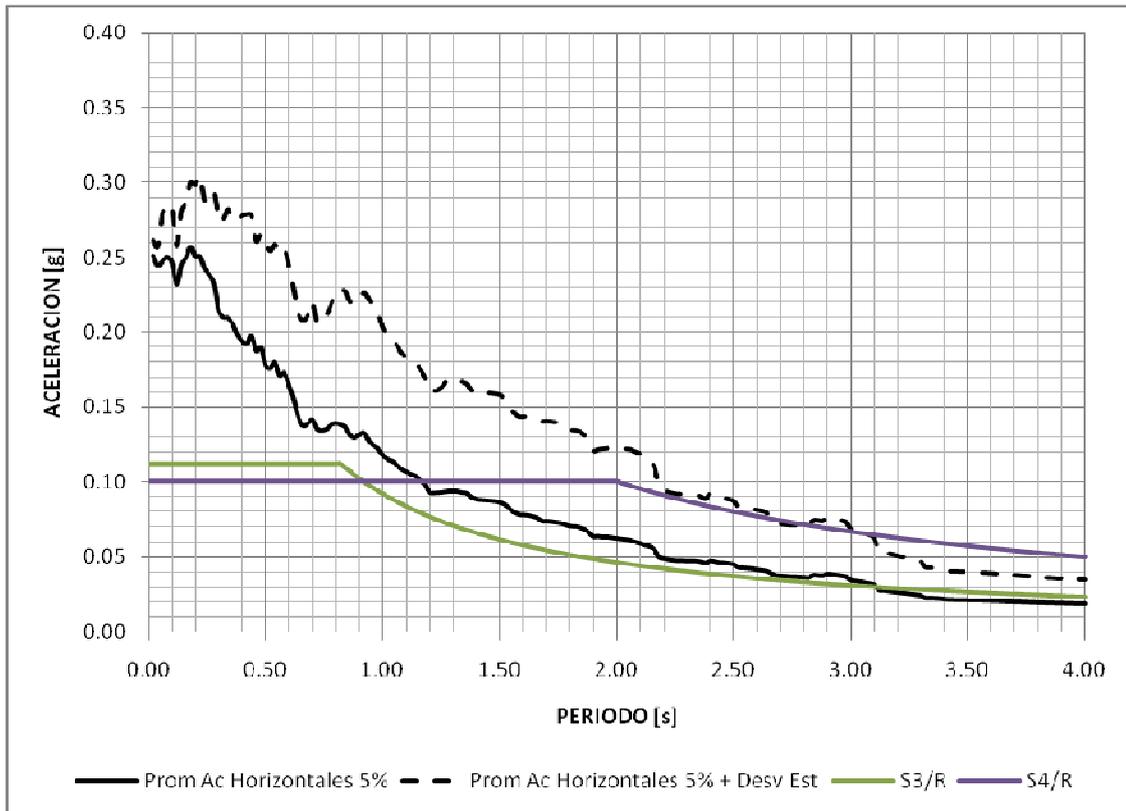


Figura 6-19: Promedio para las componentes horizontales, ductilidad U=4

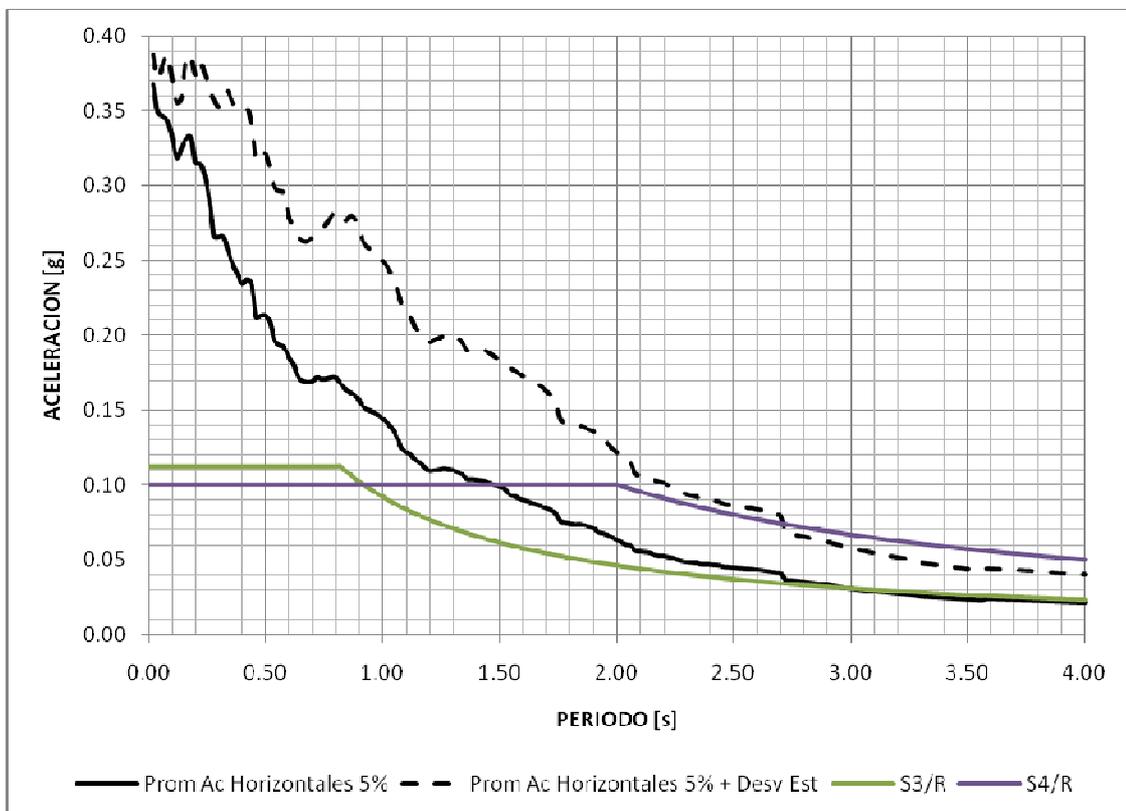


Figura 6-20: Promedio para las componentes horizontales, ductilidad U=6

CAPÍTULO 7. COMPARACIÓN CON ESPECTROS ADICIONALES

7.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se pretende encontrar las aceleraciones máximas para eventos sísmicos importantes ya ocurridos en otros sitios del mundo, registrados en lugares con características parecidas a nuestro medio. Para esto se busca, en primera instancia, describir aquellas fallas que afectarían en la ciudad a Quito, y luego, encontrar dentro de bases de datos al alcance, registros que contengan características parecidas a las descritas.

7.2. FALLAS

Una falla es una discontinuidad que se forma en las rocas superficiales de la Tierra (hasta unos 200 km de profundidad) por fractura, cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas. La zona de ruptura tiene una superficie generalmente bien definida denominada plano de falla y su formación va acompañada de un deslizamiento de las rocas, tangenciales a este plano.

El movimiento causante de la dislocación puede tener diversas direcciones: vertical, horizontal o una combinación de ambas. En las masas montañosas que se han alzado por movimiento de fallas, el desplazamiento puede ser de miles de metros y muestra el efecto acumulado, durante largos períodos, de pequeños e imperceptibles desplazamientos, en vez de un gran levantamiento único. Sin embargo, cuando la actividad en una falla es repentina y brusca, se puede producir un gran terremoto, e incluso una ruptura de la superficie terrestre, generando una forma topográfica llamada escarpe de falla.

7.2.1. ELEMENTOS DE UNA FALLA

Los elementos más representativos de una falla son los siguientes:

- Plano de falla: plano o superficie a lo largo de la cual se desplazan los bloques que se separan en la falla. Con frecuencia el plano de falla presenta estrías, que se originan por el rozamiento de los dos bloques.
- Labio levantado: también llamado Bloque Superior, es el bloque que queda por encima del plano de falla.
- Labio hundido: también llamado Bloque Inferior, es el bloque que queda por debajo del plano de falla.

7.2.2. CARACTERÍSTICAS DE UNA FALLA

Las siguientes características permiten describir las fallas:

- Dirección: ángulo que forma una línea horizontal contenida en el plano de falla con el eje norte-sur. Es usado para aproximar la superficie de falla causante que se encuentra entre 0° y 360° .
- Buzamiento: ángulo de máxima inclinación que forma el plano de falla con la horizontal.
- Azimut o azimuth: es la dirección de la fuente (finita) al sitio, tomado como el ángulo medido en sentido horario, en la superficie de proyección del plano superior de la falla. Puede variar entre 0° a 360° en el sentido horario.

El mecanismo focal de un terremoto describe la deformación inelástica en la región de la fuente que genera las ondas sísmicas. En el caso de un evento relacionado con una falla, se refiere a la orientación del plano de falla que se deslizó y el vector de deslizamiento que se conoce también como solución del plano de falla. Los mecanismos focales se derivan de una solución del tensor de momento para el terremoto, el cual es calculado por un análisis de formas de onda sísmica observada.

Los diversos parámetros que describen la geometría de la falla que originó el sismo pueden extraerse del mecanismo focal obtenido para el evento sísmico. Para ello debe definirse cual de los 2 planos es el que corresponde con la falla donde se

produce la fractura (plano principal), y sobre éste calcular el azimut y el buzamiento como se ilustra en la Figura 7-1: Características geométricas de la falla.

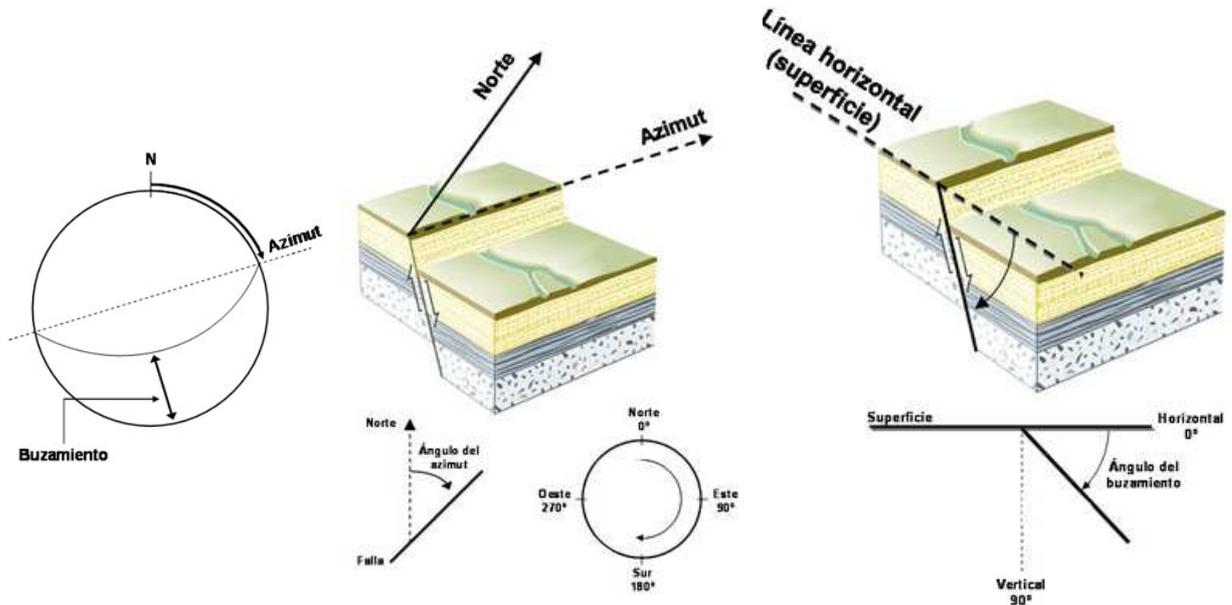


Figura 7-1: Características geométricas de la falla

Fuente: FUNVISIS (2010)

En la Figura 7-2: Patrón de radiación de las ondas P y S, se presenta el patrón de radiación de la onda P y S -izquierda y derecha respectivamente- basado en la configuración de una falla transcurrente de orientación dextral. El patrón de radiación corresponde con una descripción geométrica de la amplitud de la onda y su distribución a lo largo del foco del sismo.

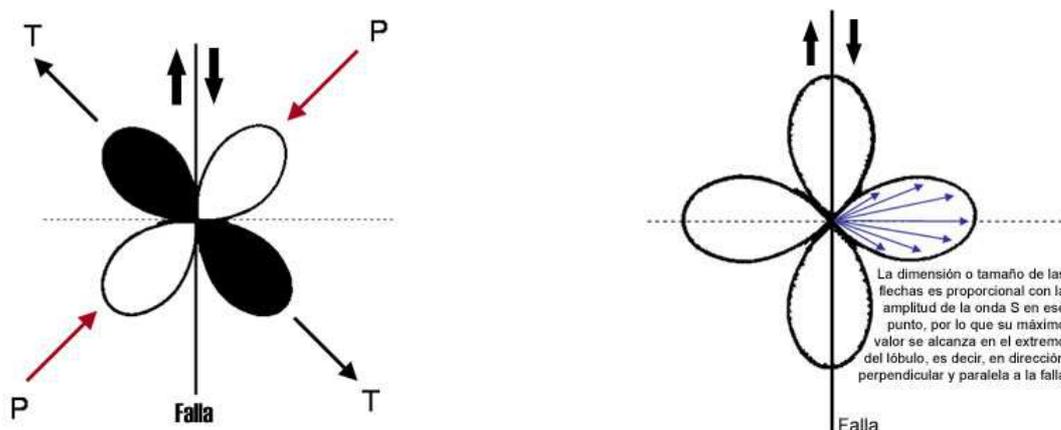


Figura 7-2: Patrón de radiación de las ondas P y S

Fuente: FUNVISIS (2010)

7.2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS FALLAS DE ACUERDO AL MOVIMIENTO

A continuación se detalla las características de las fallas expuestas en la Figura 7-3: Representación de los mecanismos focales más comunes y sus correspondientes fallas generadoras:

- Falla de rumbo: falla que consiste en movimiento horizontal, de modo que los bloques en lados opuestos del plano de falla se deslizan uno al lado del otro.
- Falla transcurrente: falla de rumbo de orden cortical (frágil).
- Falla normal: Falla de desplazamiento en la cual el bloque techo ha descendido en relación con el bloque piso.
- Falla inversa: falla de desplazamiento en la que el bloque techo se mueve hacia arriba en relación con el bloque piso.
- Falla oblicua: es aquella que presenta movimiento en una componente vertical y una componente horizontal.

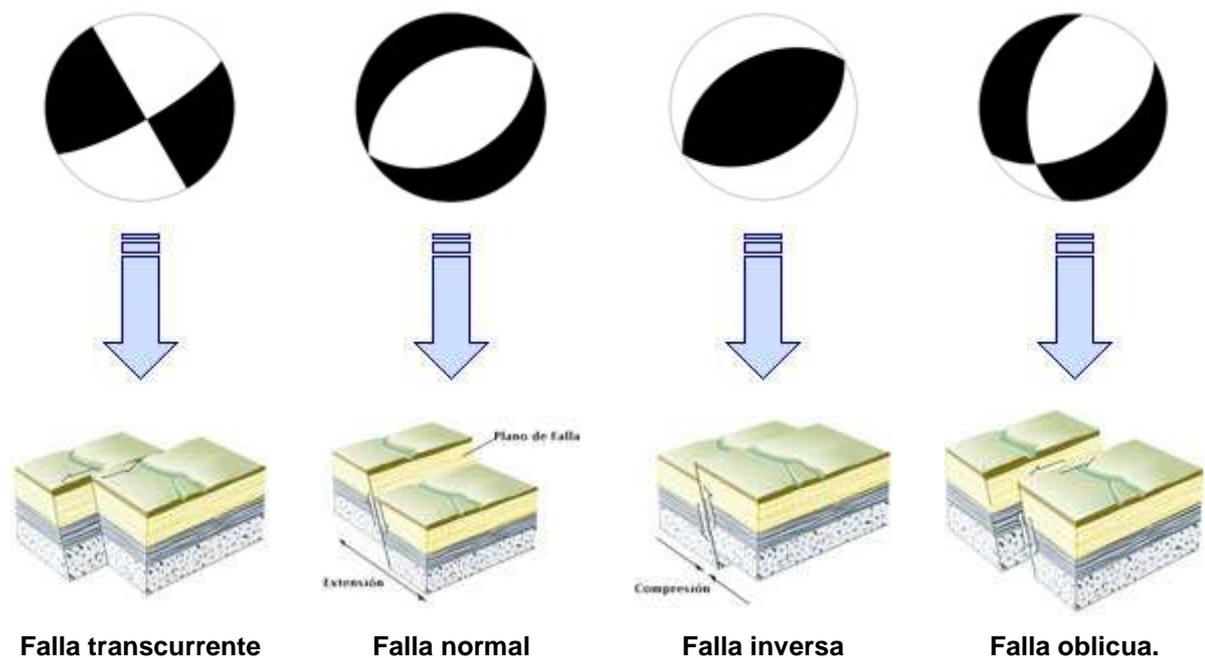


Figura 7-3: Representación de los mecanismos focales más comunes y sus correspondientes fallas generadoras

Fuente: FUNVISIS (2010)

7.3. FALLAS EN LA CIUDAD DE QUITO

El Ecuador se localiza en una región de alta sismicidad controlada por la subducción de la placa oceánica Nazca bajo la placa continental de América del Sur y la interacción de éstas con la placa de Cocos. Los Andes septentrionales del país están directamente afectados por los sistemas de fallas que se proyectan desde Colombia, relacionados con el límite de placas entre el Bloque Norandino y Sudamérica, como se muestra en la Figura 7-4: Fallas en el Ecuador

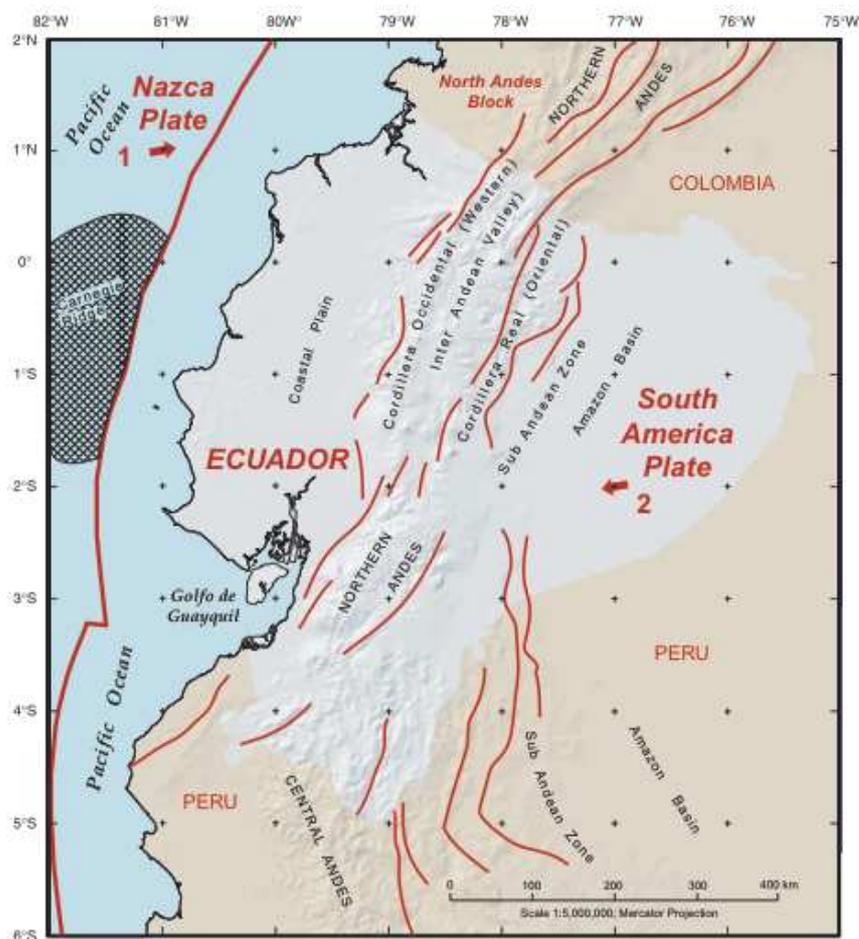


Figura 7-4: Fallas en el Ecuador

Fuente: Instituto Geofísico (2009)

El fallamiento transcurrente dextral es el más importante, con dirección NE-SW a NNE-SSW y mostrando una geometría casi paralela a la cadena montañosa andina. Considerando la longitud del sistema de fallas, su papel de límite de placas de estilo

intracontinental y su rata de desplazamiento estimada entre 4 y 8 mm/año, el sistema tiene un alto potencial sismogénico regional. Las fallas del sistema dextral interactúan con las fallas inversas o transpresivas de la zona subandina, con las fallas inversas del Callejón Interandino y con aquellas del piedemonte al oeste de la Cordillera Occidental, las cuales tienen direcciones preferenciales N-S, las cuales tienen una rata de desplazamiento en el orden de 1 mm/año.

Las fallas del sistema de piedemonte andino oriental son esencialmente inversas de dirección N-S y absorben parte del empuje E-W de la placa continental. En la Costa se destaca el sistema de fallas transpresivas dextrales e inversas de Jama-Mache-Esmeraldas, que limitan al oeste la cuenca de ante-arco. Otras fallas menores tienen dirección NW- SE y son transpresivas siniéstrales e inversas. (ASTECC, 2005)

La Figura 7-5: Fallas cerca de la ciudad de Quito, ha sido facilitada por el Instituto Geofísico y muestra las fallas más importantes para la zona de estudio.

7.3.1. SISTEMA DE FALLAS DE QUITO Y GUAYLLABAMBA

Pertencen al sistema de fallas del Callejón Interandino y básicamente tienen una fuerte componente inversa que se manifiesta con fracturas y plegamientos que controlan la morfología con relieves y drenajes alineados en dirección preferente N - S.

- Falla de Quito: La falla de Quito, anteriormente denominada falla de Ilumbisí por algunos autores, consta por lo menos de tres segmentos que se corresponden morfológicamente con las colinas de Puengasí, Ilumbisí y Batán - La Bota. Las evidencias morfodinámicas presentadas por Soulas et al. (1987; 1991) para falla inversa, fueron sustentadas con observaciones de varias evidencias reportadas por Ego (1992), y son principalmente: flexuramiento de las capas, trazo de falla sinuoso que sugiere un ángulo de buzamiento de 50° a 70° al oeste, escarpe inestable con deslizamientos frecuentes y activos, fallas normales gravitacionales, morfología de copa de vino en las quebradas transversales (EPN-PETROTRANSPORTE, 1991).

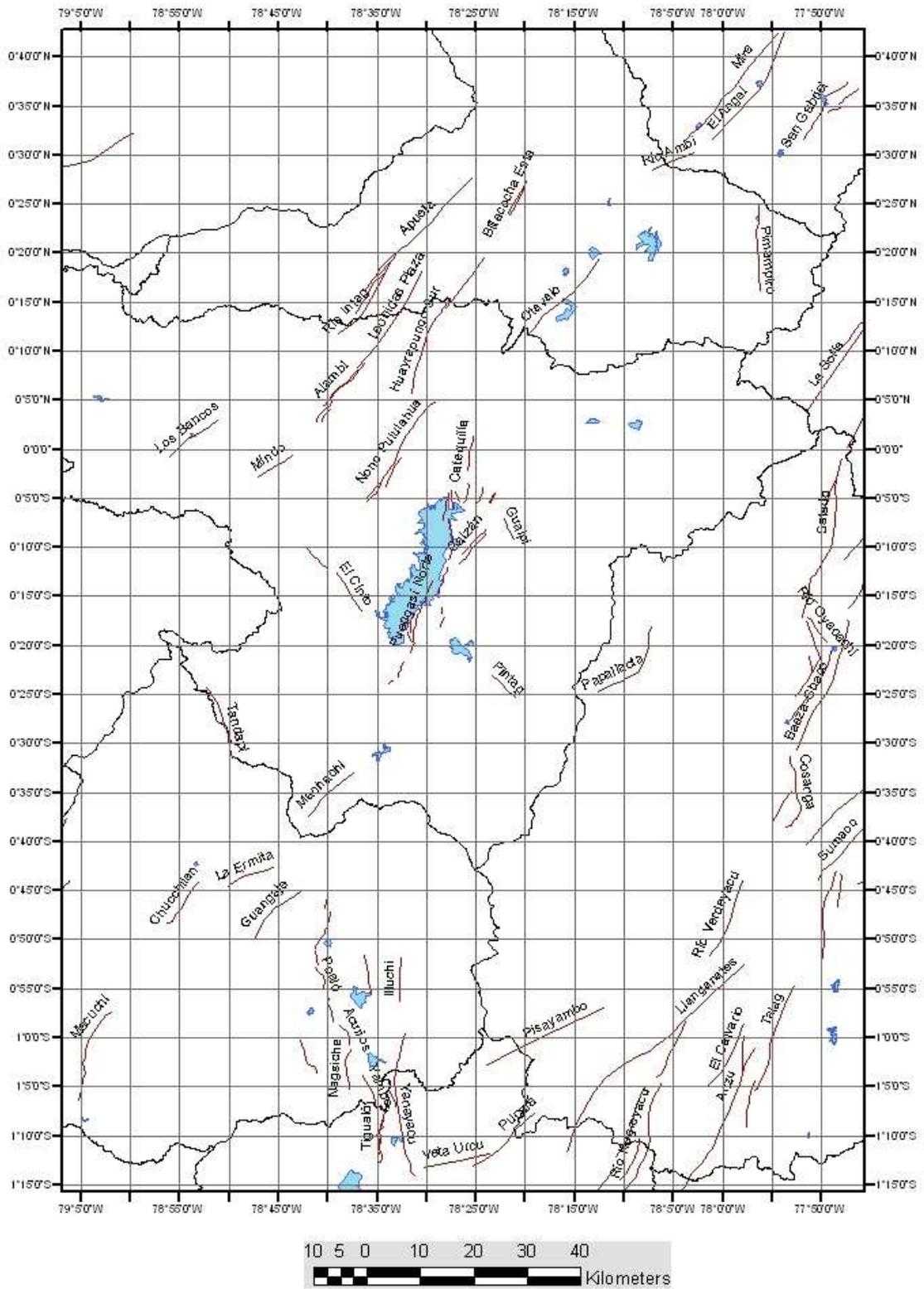


Figura 7-5: Fallas cerca de la ciudad de Quito

Fuente: Instituto Geofísico (2009)

La Figura 7-6: Falla inversa de Quito ha sido obtenida de la página del Instituto Geofísico y muestra dicha falla con la numeración 31.

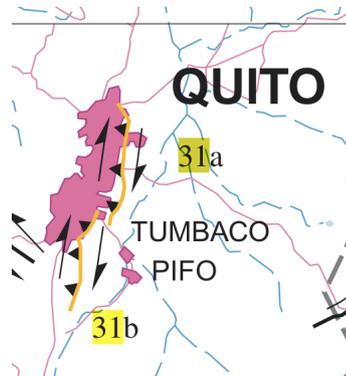


Figura 7-6: Falla inversa de Quito

Fuente: Instituto Geofísico (2009)

7.3.2. SISTEMA DE FALLAS DEL NOROCCIDENTE

Constituyen la prolongación del sistema de Cauca Patía en Colombia, que se proyecta desde el oeste de Tulcán (Falla de San Isidro) de manera oblicua a la cordillera. Son fallas esencialmente transcurrentes con rumbo predominante NE-SW.

De importancia, para el presente proyecto de tesis, son las fallas de Nono y de Otavalo, las que se las describe brevemente.

- Falla de Nono: Es una falla transcurrente que se prolonga en dirección NE, atravesando las inmediaciones de la población del mismo nombre en donde presenta hasta dos trazas. Trabajos recientes indican que la tasa de movimiento de esta falla es del orden de 1 mm/año (Soulas et al, 2001). Esta falla está marcada con el número 29 en la Figura 7-7: Falla de Nono.

Otras fallas importantes de este sistema constituyen las Fallas de Apuela, Huayrapungo y Otavalo.

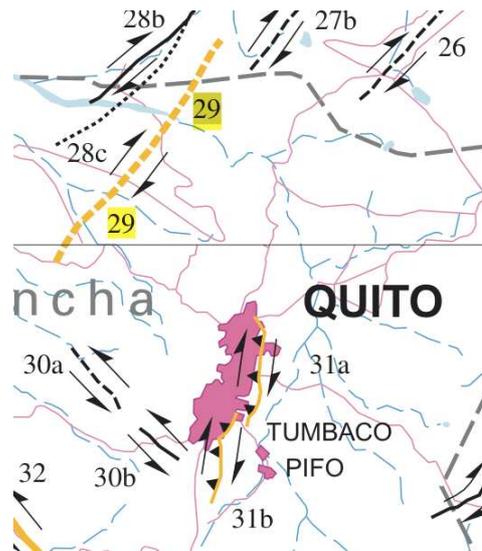


Figura 7-7: Falla de Nono

Fuente: Instituto Geofísico (2009)

- Falla de Otavalo: Se pueden encontrar fallas de orden secundario por el camino Cotacachi-Otavalo con un rumbo NE-SW (Right lateral dextral strike-slip fault). En la Figura 7-8: Falla de Otavalo, corresponde a la numerada como 26.

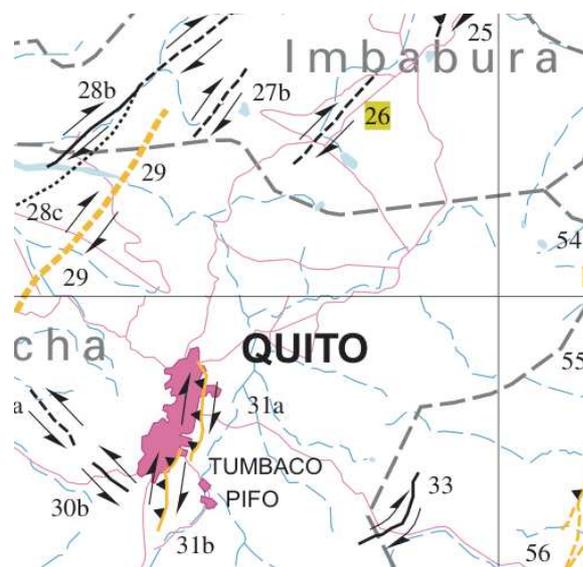


Figura 7-8: Falla de Otavalo

Fuente: Instituto Geofísico (2009)

7.3.3. FALLAS DE LA REGIÓN SUR

- Falla de Pisayambo: La Cordillera Real se encuentra definida dentro de zonas con peligrosidad sísmica desde baja a alta y presenta curvas de aceleración con rumbo NNE-SSO. De norte a sur se pueden definir claramente dos zonas principales de concentración de aceleraciones: la primera que se encuentra dentro del sistema constituido por las fallas Chingual, Reventador, Salado, Baeza-Chaco, Casanga, Guacamayos y Pisayambo con peligrosidad sísmica de media a alta y un rumbo predominante NNE-SSO. Corresponde al número 60 en la Figura 7-9: Falla de Pisayambo.

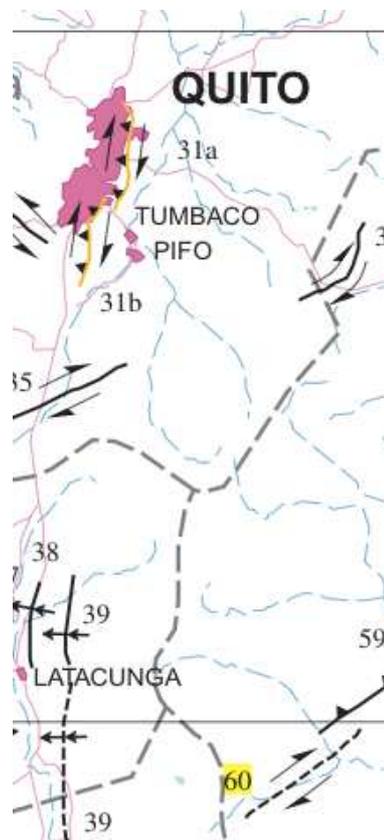


Figura 7-9: Falla de Pisayambo

Fuente: Instituto Geofísico (2009)

7.3.4. SUBDUCCIÓN

La subducción de la Placa de Nazca dentro de la Placa Sudamericana es la principal fuente de generación de energía sísmica en el Ecuador. (CEC 2002)

El segmento Ecuador-Colombia de la subducción ha sido capaz de producir grandes terremotos en la fosa. La magnitud y duración de estos terremotos puede dar lugar a problemas de amplificación local, en especial en los contenidos bajos de frecuencia de las ondas sísmicas (ASTECC, 2005)

La placa de Nazca se encuentra ubicada aproximadamente a 290 km de distancia en línea recta de la ciudad de Quito. Sin embargo, los eventos sísmicos importantes han tenido lugar cerca de la costa ecuatoriana (aproximadamente a 225 km), como se nota en la Figura 7-10. Las coordenadas para los eventos han sido tomadas de la Tabla 7-1.

A continuación se describe algunos de los eventos localizados:

Esmeraldas, 1096: El miércoles 31 de enero de 1906, a las 10:36 a.m. hora local (15:36 UT), se registró un violento sismo de magnitud 8.8 (M_w), y que está considerado como uno de los más grandes registrados en la historia sísmica del mundo. Su epicentro fue localizado en el Mar Pacífico, cerca a la costa norte ecuatoriana, en 1.0° latitud norte y 80.0° longitud occidental, con una profundidad superficial. (Instituto Colombiano de Geología y Minas, 2010)

Jama, 1942: El 13 de Mayo de 1942, un terremoto de magnitud 7.9 en la Escala de Richter y de intensidad IX en la de Mercalli, se generó en las costas del Pacífico, cerca de la ciudad de Jama al norte de la Provincia de Manabí, que fue sentido con gran intensidad en la ciudad de Guayaquil, generando gran destrucción en las estructuras del casco comercial de la ciudad de Guayaquil, por la amplitud de las vibraciones debido al tipo de suelo presente en la zona. (Chenche, 2005).

Esmeraldas, 1958: el 19 de Enero se presentó un sismo a las 14h07m26s, en la región fronteriza de Ecuador - Colombia. Su epicentro fue ubicado en las coordenadas 1.37 ° N y 79.34 ° W con magnitud M_s = 7.7 (Catálogo CERECIS 1.985); otras fuentes dan diferentes magnitudes y coordenadas. Este terremoto originó un tsunami haciendo que una embarcación casi se hunda frente a

Esmeraldas, se reportaron 4 muertos por efectos del maremoto. La altura con que legaron las olas a las costas fueron del orden de 2.0 a 5.9 m., (Lockridge 1984). Las olas originadas ocasionaron daños tanto en Tumaco y la costa norte de la Provincia de Esmeraldas. (Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador, 2010)

Tumaco, 1979: El miércoles 12 de diciembre de 1979, a las 2:59 a.m. hora local (07:59 UT), ocurrió uno de los sismos más fuertes del Siglo XX. Su epicentro fue localizado en el Océano Pacífico, a 75 kilómetros de la costa de Tumaco, en 1.602° N y 79.363° W, magnitud 8.1 (Mw), y profundidad superficial. (Instituto Colombiano de Geología y Minas, 2010).

FECHA	EPICENTRO		INT	MAG	PROVINCIA DE REFERENCIA.
	LAT	LONG			
1906 01 31	1.00	-81.30	IX	8.8	Esmeraldas, Nariño (Colombia)
1942 05 14	0.01	-80.12	IX	8.0	Manabí, Guayas, Bolívar
1958 01 19	1.37	-79.34	VIII	7.7	Esmeraldas
1979 12 12	1.60	-79.36	IX	8.1	Tumaco

Tabla 7-1: Terremotos del Ecuador por subducción con intensidad mayor a VIII

Fuente: Correa Cristian et al. (2003)



Figura 7-10: Falla de subducción

Fuente: Instituto Geofísico (2009)

7.4. FALLAS CONSIDERADAS

Estas se muestran en la Figura 7-11: Fallas de rumbo consideradas en este estudio, las mismas que son: Falla de Nono, Falla de Otavalo y la Falla de Pisayambo. Se considera también la falla inversa de Quito (Figura 7-6: Falla inversa de Quito) y la falla de subducción (Figura 7-10: Falla de subducción).

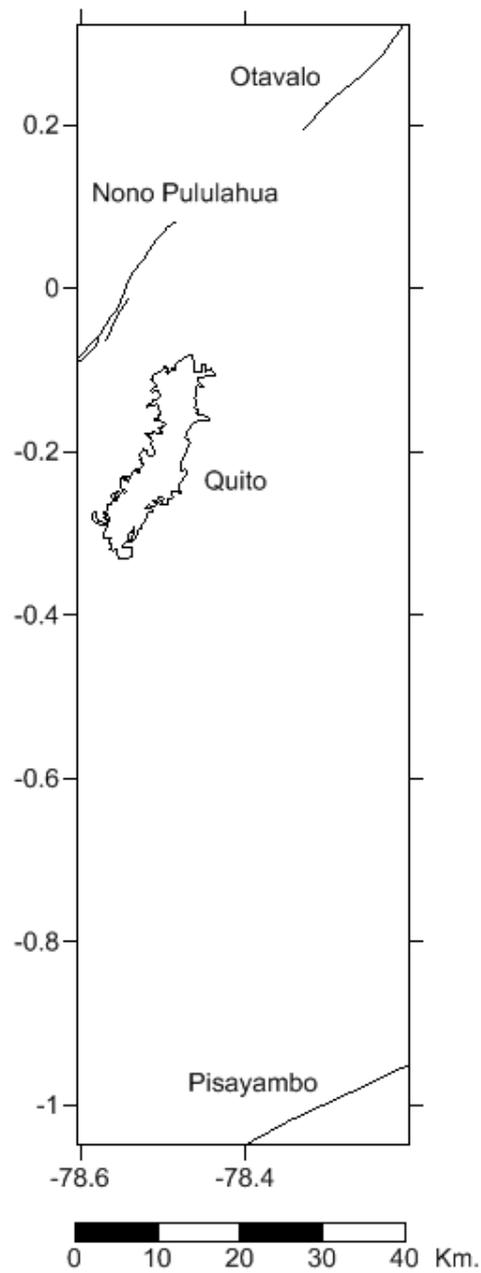


Figura 7-11: Fallas de rumbo consideradas en este estudio

Fuente: Instituto Geofísico (2009)

La Tabla 7-2: Fallas y pliegues cuaternarios considerados, muestra características de las fallas de rumbo y de la falla inversa que son escogidas para el estudio.

No.	Nombre estructura	Sentido movimiento (mayor/menor)
	Falla de Nono	Dextral
26	Falla de Otavalo	Dextral
60	Falla de Pisayambo	Dextral
31a	Falla de quito sección norte	Reverse, dextral
31a	Falla de quito sección sur	Reverse, dextral

Tabla 7-2: Fallas y pliegues cuaternarios considerados

Fuente: Instituto Geofísico (2009)

Tomando estas fallas como referencia, se pretende encontrar otras que tengan características parecidas, pero en las que existan datos de acelerógrafos para sismos importantes. Para ello, es necesaria la caracterización de dichas fallas considerando su distancia y el azimut existente respecto a la ciudad de Quito. El cálculo de la distancia y los resultados finales se muestran en la Tabla 7-3: Distancias de las fallas de rumbo tomadas hacia la ciudad de Quito. De igual forma la Tabla 7-4: Azimut de las fallas de rumbo tomadas hacia la ciudad de Quito se muestra como se han calculado los azimuts correspondientes.

7.5. REGISTROS OBTENIDOS DE BASE DE DATOS

Para el dominio público existen bases de datos de acelerogramas, principalmente para sismos ocurridos en América del Norte, de donde se han tomado los acelerogramas

			Quito Sur		Quito Centro		Quito Norte	
	Lat	Long	Lat	Long	Lat	Long	Lat	Long
	Falla de Nono		-78.55	-0.33	-78.50	-0.21	-78.47	-0.08
Sur	-78.61	-0.08	28.17		18.07		15.53	
Centro	-78.55	0.00	36.65		23.26		12.60	
Norte	-78.48	0.08	46.66		31.97		18.18	
	Falla de Otavalo							
Sur	-78.33	0.19	63.61		48.27		34.23	
Centro	-78.26	0.26	72.78		57.47		43.67	
Norte	-78.21	0.32	82.35		67.06		53.37	
	Falla Pisayambo							
Sur	-78.40	-1.05	81.41		94.33		107.80	
Centro	-78.30	-1.00	78.86		90.51		103.32	
Norte	-78.20	-0.95	78.80		88.87		100.78	

Falla de Nono	
Mín.	12.6
Máx.	46.7
Promedio	25.7
Falla de Otavalo	
Mín.	34.2
Máx.	82.3
Promedio	58.1
Falla Pisayambo	
Mín.	78.8
Máx.	107.8
Promedio	91.6

Tabla 7-3: Distancias de las fallas de rumbo tomadas hacia la ciudad de Quito

				Quito Sur		Quito Centro		Quito Norte	
	Lat.	Long.	Ang. Falla	Lat.	Long.	Lat.	Long.	Lat.	Long.
	Falla de Nono		53.37	-78.55	-0.33	-78.50	-0.21	-78.47	-0.08
Sur	-78.61	-0.08		48.84		78.45		128.02	
Centro	-78.55	0.00		35.88		50.58		82.76	
Norte	-78.48	0.08		27.04		33.61		42.31	
	Falla de Otavalo		46.63						
Sur	-78.33	0.19		20.47		20.63		17.04	
Centro	-78.26	0.26		17.20		16.46		12.30	
Norte	-78.21	0.32		15.68		14.69		10.84	
	Falla Pisayambo		26.81						
Sur	-78.40	-1.05		255.19		249.78		247.10	
Centro	-78.30	-1.00		263.86		257.09		253.37	
Norte	-78.20	-0.95		272.84		264.91		260.16	

Falla de Nono	
Mín.	27.0
Máx.	128.0
Promedio	58.6
Falla de Otavalo	
Mín.	10.8
Máx.	20.6
Promedio	16.1
Falla Pisayambo	
Mín.	247.1
Máx.	272.8
Promedio	258.3

Tabla 7-4: Azimut de las fallas de rumbo tomadas hacia la ciudad de Quito

Usando las bases de datos de las referencias que constan en la sección correspondiente, se ha procedido a buscar eventos sísmicos que contengan características que puedan dar una idea de las aceleraciones que se producirían en estaciones ubicadas en la ciudad de Quito debido a las fallas consideradas para este estudio.

Para las fallas de rumbo e inversa se han tomado las bases de datos del PEER (referencia 33), ya que existe una información completa sobre los eventos y las estaciones donde han sido registrados.

Para la consideración de la subducción se ha tomado la base de datos publicada por COSMOS, ya que contiene información sobre ciudades cercanas al país. Además se ha preferido ésta, ya que se ha considerando que la subducción por la placa de Nazca tiene características específicas.

Es necesario aclarar que el azimut en la base de datos de PEER, es tomado respecto a la dirección de la falla, tal como muestra la Figura 7-12: Forma de medición del azimut para la base de datos del PEER.

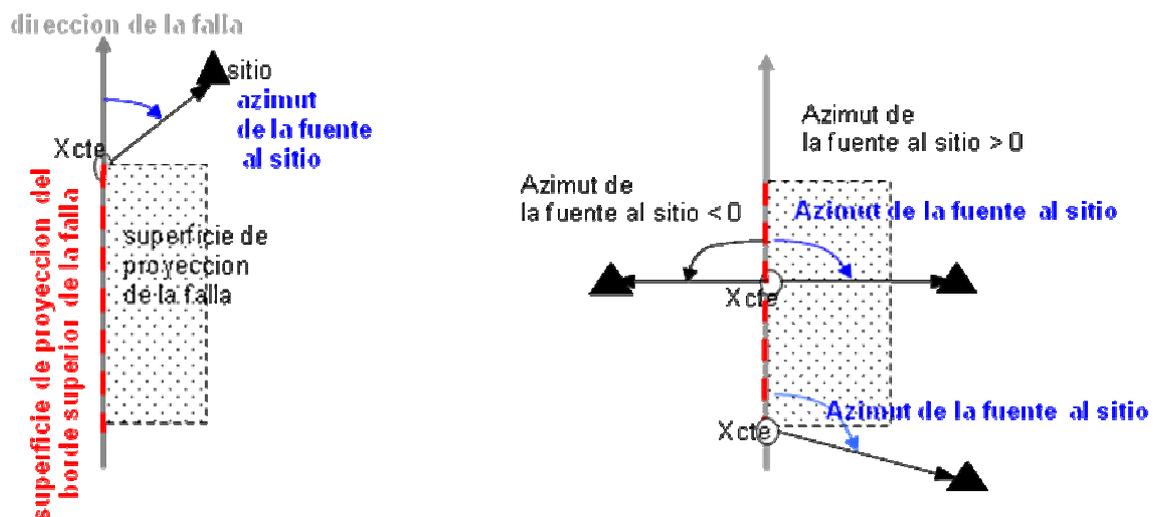


Figura 7-12: Forma de medición del azimut para la base de datos del PEER
Fuente: PEER (2010)

7.5.1. PARECIDA A FALLA DE QUITO

Se considera una falla inversa

- Falla de Northridge Blind Thrust (Oak Ridge Fault)

Tipo de falla: inversa

Longitud: 90 kilómetros.

Comunidades cercanas: Santa Paula, Fillmore, Saticoy, Ventura

Última gran ruptura: Holoceno, en parte. Principalmente en el Cuaternario Tardío.

Grado de deslizamiento: entre 3.5 y 6 mm por año

Intervalo entre rupturas principales: desconocido

Magnitudes probables: $M_w = 6.5 - 7.5$

(SCEC, 2010)

Registros escogidos:

Terremoto de Northridge-01 (1994)

Magnitud: 6.69

Falla de Northridge Blind Thrust (Falla inversa)

Características:

1048

Estación: Northridge - 17645 Saticoy St

Distancia a la falla desde el sitio de registro: 3.42 km

Azimut de la fuente al sitio: 90 grados

Tipo de suelo: D deep stiff soil

1087

Estación: Tarzana - Cedar Hill A

Distancia a la falla desde el sitio de registro: 5.41 km

Azimut de la fuente al sitio: 89 grados

Tipo de suelo: C weathered soft rock/ shallow stiff soil

1078

Estación: Santa Susana Ground

Distancia a la falla desde el sitio de registro: 14.66 km

Azimut de la fuente al sitio: 90 grados

Tipo de suelo: C weathered soft rock/ shallow stiff soil

1086

Estación: Sylmar - Olive View Med FF

Distancia a la falla desde el sitio de registro: 16.77 km

Azimut de la fuente al sitio: -90 grados

Tipo de suelo: D deep stiff soil

3549

Estación: Monte Nido Fire Station

Distancia a la falla desde el sitio de registro: 19.19 km

Azimut de la fuente al sitio: 90 grados

Tipo de suelo: B roca

1034

Estación: Monte Nido Fire Station

Distancia a la falla desde el sitio de registro: 31.21 km

Azimut de la fuente al sitio: 90 grados

Tipo de suelo: C weathered soft rock/ shallow stiff soil

Desde la Figura 7-13: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 1048 hasta la Figura 7-18: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 1034, se presentan los espectros para los registros escogidos con características parecidas a la falla inversa de Quito. Mientras que la Figura 7-19: Fallas parecida a falla de Quito, muestra la ubicación de la falla de Northridge Blind Thrust y de las estaciones en donde fue registrado el Terremoto de Northridge-01 (1994).

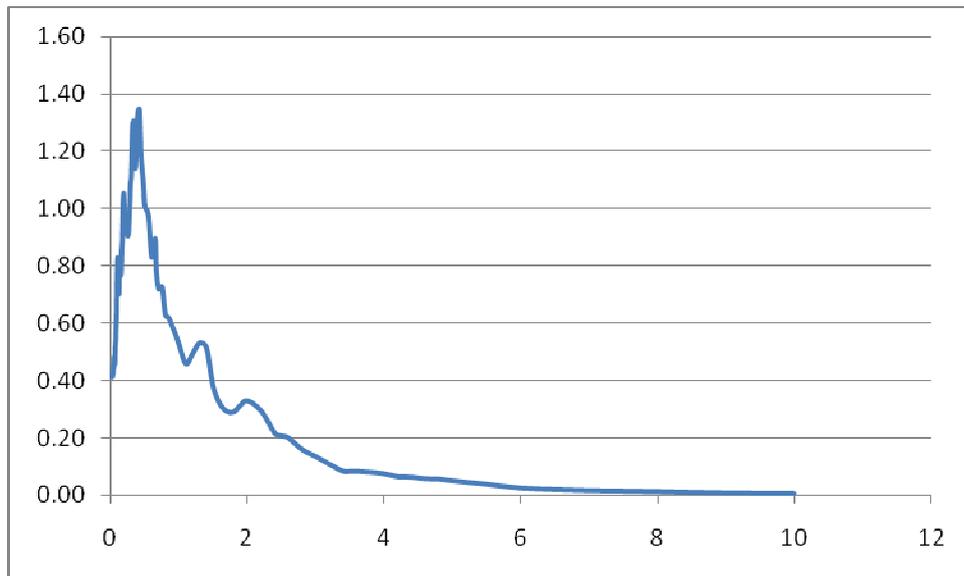


Figura 7-13: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 1048
Fuente: PEER (2010)

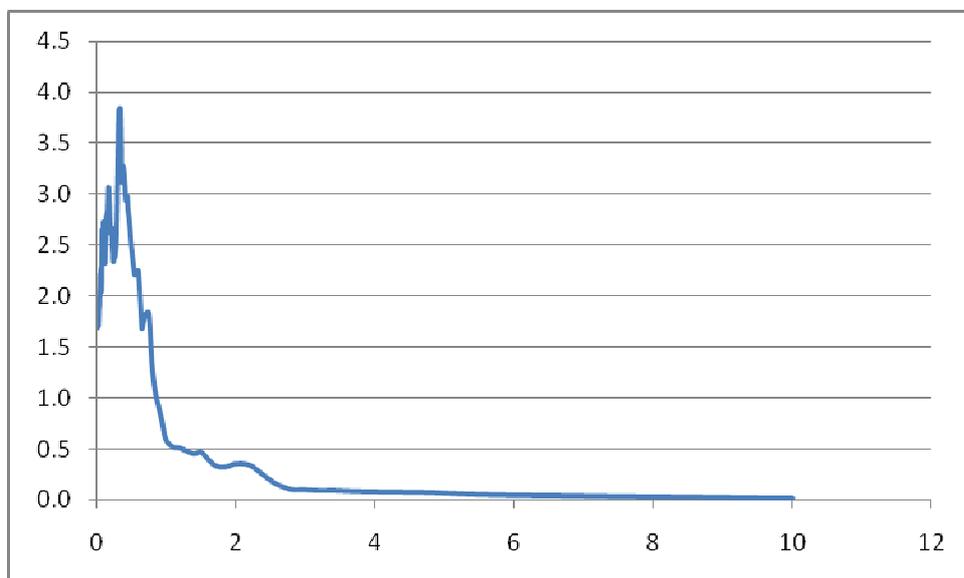


Figura 7-14: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 1087
Fuente: PEER (2010)

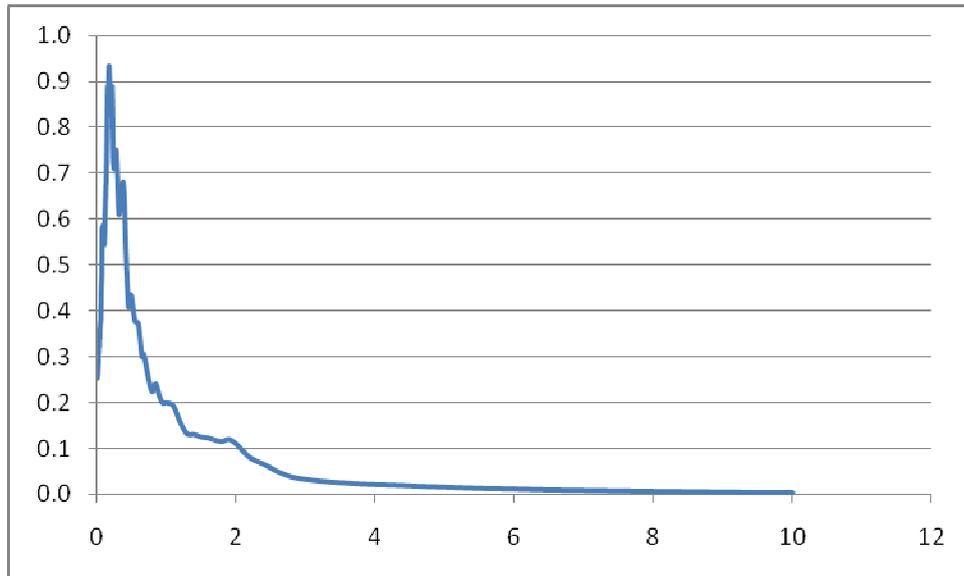


Figura 7-15: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 1078
Fuente: PEER (2010)

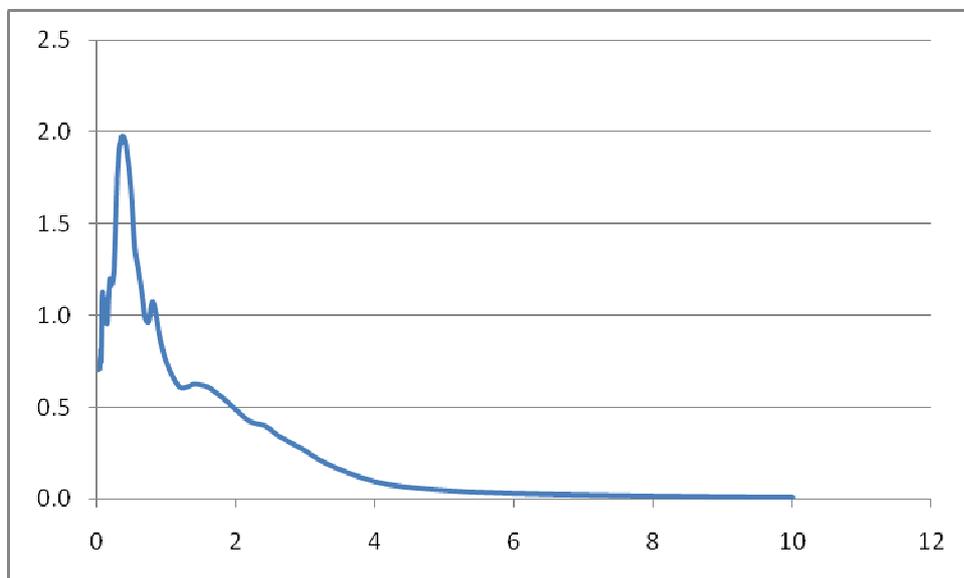


Figura 7-16: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 1086
Fuente: PEER (2010)

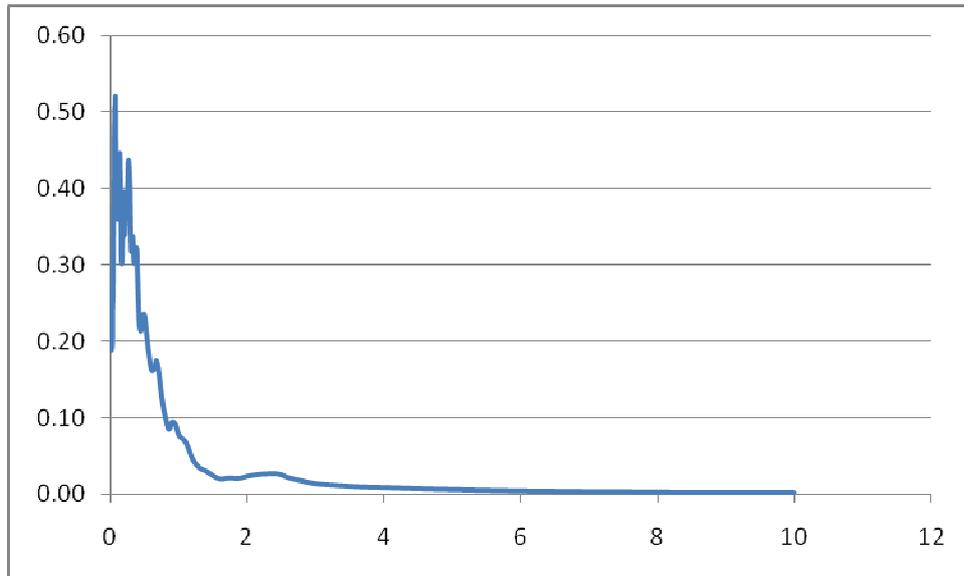


Figura 7-17: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 3549
Fuente: PEER (2010)

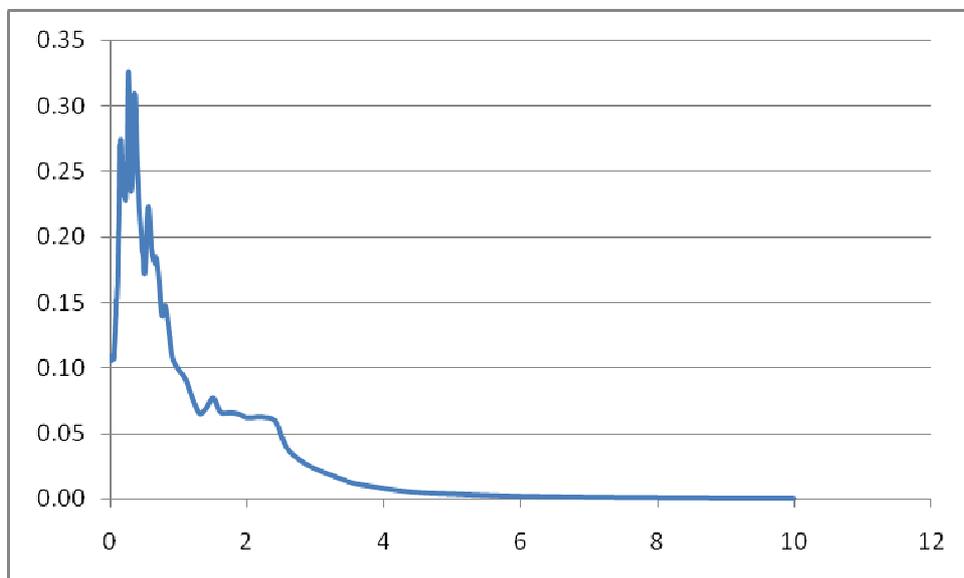


Figura 7-18: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 1034
Fuente: PEER (2010)

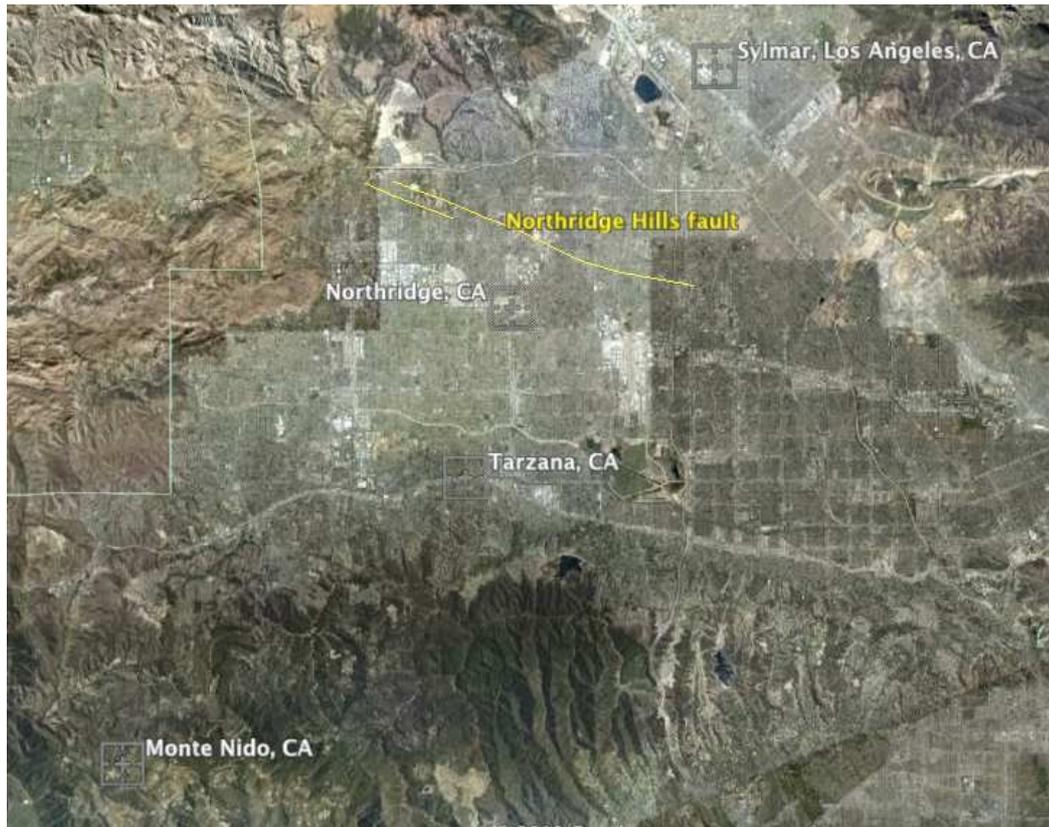


Figura 7-19: Fallas parecida a falla de Quito

Fuente: Earthquake Hazard Program (2010).

7.5.2. PARECIDA A FALLA DE NONO

Las características buscadas son: falla de rumbo con distancia: 26 km y azimut: 60 grados respecto al sitio de registro.

- Falla de San Andrés

Tipo de falla: falla de rumbo con deslizamiento lateral

Longitud: 1.200 kilómetros. 550 km al sur de Parkfield, 650 kilómetros al norte

Comunidades cercanas: Parkfield, Frazier Park, Palmdale, Wrightwood, San Bernardino, Banning, Indio,

Última gran ruptura: 9 de enero 1857 (segmento de Mojave), 18 de abril 1906 (segmento del Norte)

Grado de deslizamiento: de 20 a 35 mm por año

Intervalo entre rupturas principales: promedio de cerca de 140 años en el segmento de Mojave;

Intervalo de recurrencia varía en gran medida - de menos de 20 años (en Parkfield solamente) a más de 300 años

Magnitudes probables: $M_w = 6.8 - 8.0$

(SCEC, 2010)

Se presenta en la Figura 7-20: Falla de San Andrés (San Andreas Fault) la ubicación de ésta falla.

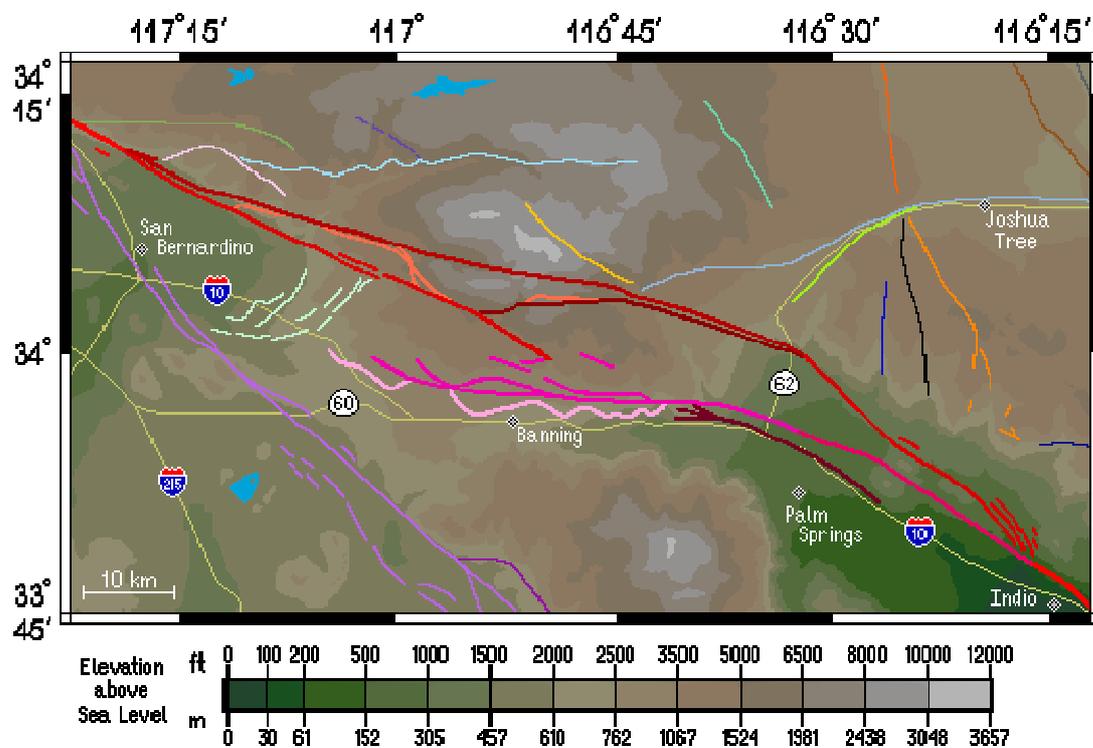


Figura 7-20: Falla de San Andrés (San Andreas Fault)

Fuente: SCEC (2010)

Registros escogidos:

Terremoto de Parkfield (1966)

Estación: Cholame - Shandon Array #12

Magnitud: 6.19

Falla de San Andrés, sección Parkfield (Falla de rumbo)

Características:

28

Distancia a la falla desde el sitio de registro: 36.18 km

Azimut de la fuente al sitio: 59 grados

Tipo de suelo: D Deep Stiff Soil

31

Distancia a la falla desde el sitio de registro: 34.01 km

Azimut de la fuente al sitio: 49 grados

Tipo de suelo: C weathered soft rock/ shallow stiff soil

La Figura 7-21: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 28 y la Figura 7-22: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 31 presentan los espectros obtenidos para los registros correspondientes.

La Figura 7-23: Fallas parecida a falla de Nono muestra la ubicación de la falla de San Andrés y de las estaciones en donde fue registrado el Terremoto de Parkfield (1966).

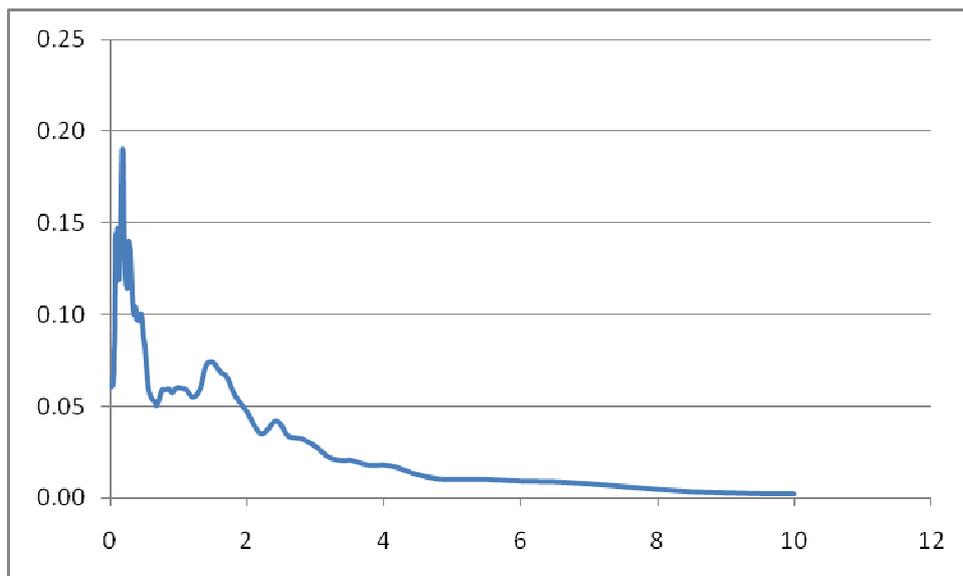


Figura 7-21: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 28

Fuente: PEER (2010)

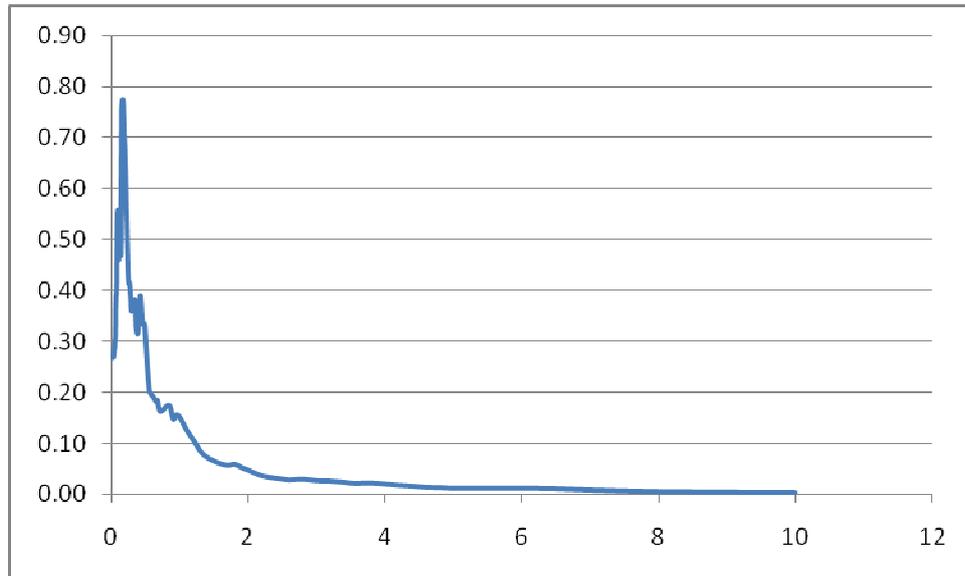


Figura 7-22: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 31
Fuente: PEER (2010)



Figura 7-23: Fallas parecida a falla de Nono
Fuente: Earthquake Hazard Program (2010).

7.5.3. PARECIDA A FALLA DE OTAVALO

Las características buscadas son: falla de rumbo con distancia: 58 km y azimut: 16 grados respecto al sitio de registro.

- Falla de Calaveras Sur

Esta falla es una rama importante de la Falla de San Andrés ubicada en el norte de California en la Bahía de San Francisco. Discurre al este de la de San Andrés, apartándose de éstas en las proximidades de Hollister, California, y es responsable de la formación del Valle de Calaveras (SCEC, 2010)

Registros escogidos:

Terremoto de Morgan Hill (1984)

Magnitud: 6.19

Falla de Calaveras sur (Falla de rumbo)

Características:

471

Estación: Presa de San Justo (L Abut)

Distancia a la falla desde el sitio de registro: 57.74 km

Azimut de la fuente al sitio: 17 grados

Tipo de suelo: D deep stiff soil

472

Estación: Presa de San Justo (R Abut)

Distancia a la falla desde el sitio de registro: 57.74 km

Azimut de la fuente al sitio: 17 grados

Tipo de suelo: D deep stiff soil

La Figura 7-24: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 471, y la Figura 7-25: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 472 corresponden a los espectros obtenidos y la Figura 7-26: Fallas parecida a falla de Otavalo, muestra la ubicación de la falla de Calaveras Sur y de las estaciones en donde fueron registradas.

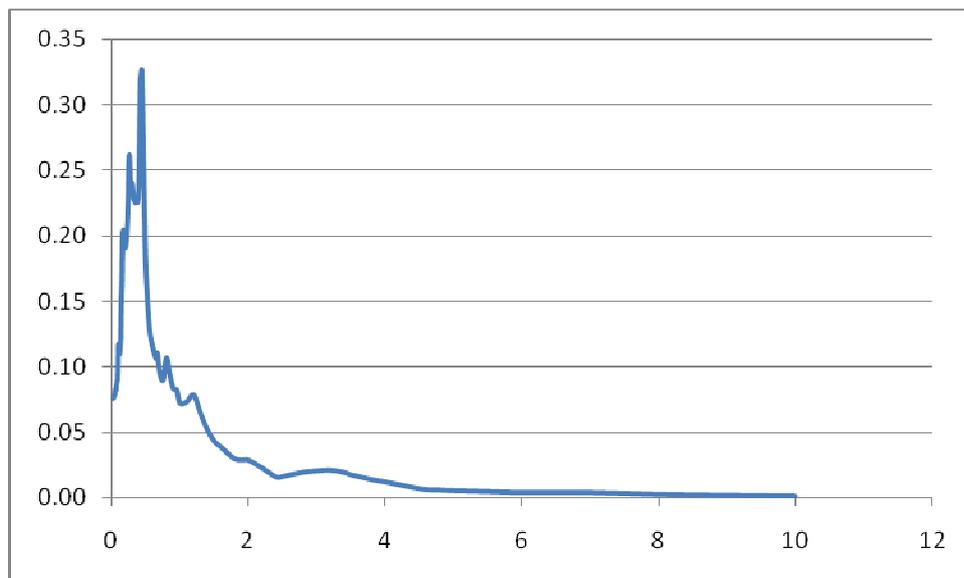


Figura 7-24: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 471
Fuente: PEER (2010)

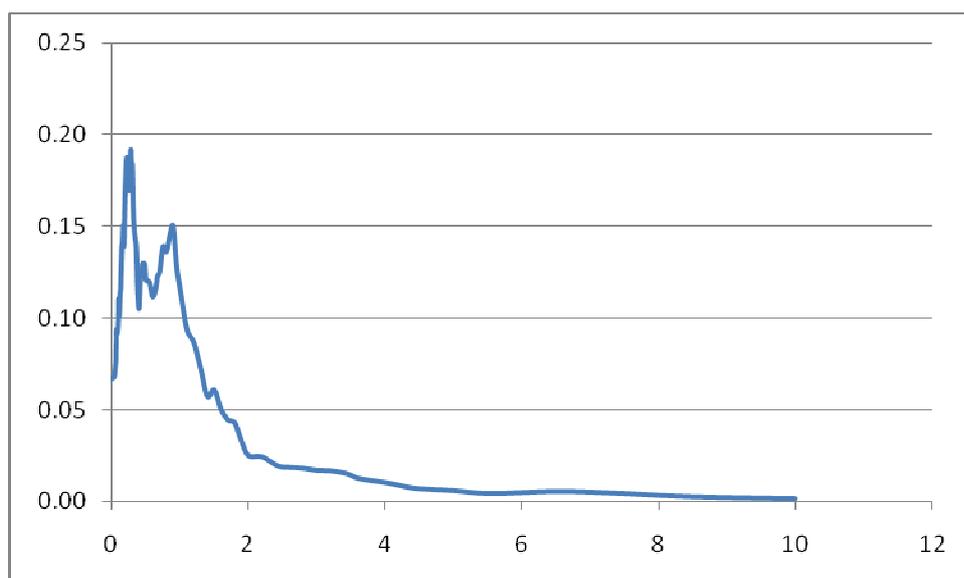


Figura 7-25: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 472
Fuente: PEER (2010)



Figura 7-26: Fallas parecida a falla de Otavalo

Fuente: Earthquake Hazard Program (2010).

- Falla de Fish Slough

Registros escogidos:

Terremoto de Chalfant Valley-02 (1986)

Magnitud: 6.19

Falla Fish Slough (Falla de rumbo)

Características:

557

Estación: Tinemaha Res. Free Field

Distancia a la falla desde el sitio de registro: 57.12 km

Azimut de la fuente al sitio: 19 grados

Tipo de suelo: B roca

La Figura 7-27: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 557 presenta el espectro obtenido, mientras que la Figura 7-28: Fallas parecida a falla de Otavalo, muestra la ubicación de la falla de Fish Slough y de la estación Tinemaha Res. Free Field en donde registrado el Terremoto de Chalfant Valley-02 (1986)

7.5.4. PARECIDA A FALLA DE PISAYAMBO

Las características buscadas son: falla de rumbo con distancia: 91 km y azimut: 258 grados respecto al sitio de registro.

- Falla de Pisgah-Bullion-Mesquite Lake-Lavic Lake

Tipo de falla: falla de rumbo con deslizamiento lateral

Longitud: 34 kilómetros.

Última gran ruptura: Holoceno.

Grado de deslizamiento: 0.8 mm por año

Intervalo entre rupturas principales: desconocido

Magnitudes probables: $M_w = 6.0 - 7.0$

(SCEC, 2010)

Registros escogidos:

Terremoto de Hector Mine (1999)

Magnitud: 7.13

Falla de Pisgah-Bullion-Mesquite Lake-Lavic Lake (Falla de rumbo)

Características:

1773

Estación: Cabazon

Distancia a la falla desde el sitio de registro: 89.40 km

Azimut de la fuente al sitio: -94 grados

Tipo de suelo: D deep stiff soil

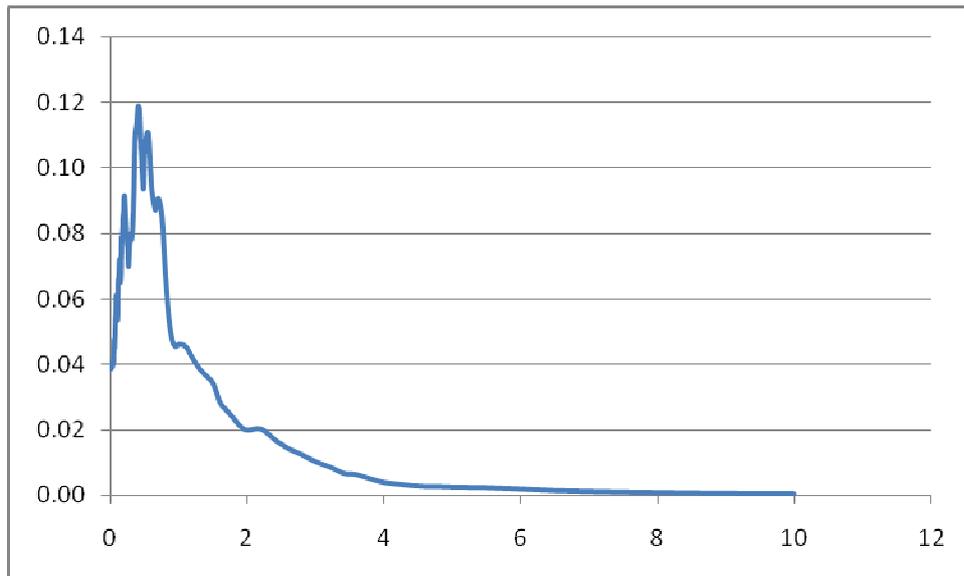


Figura 7-27: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 557
Fuente: PEER (2010)



Figura 7-28: Fallas parecida a falla de Otavalo
Fuente: Earthquake Hazard Program (2010).

1833

Estación: Snow Creek

Distancia a la falla desde el sitio de registro: 87.94 km

Azimut de la fuente al sitio: -100 grados

Tipo de suelo: B roca

La Figura 7-29: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 1773, y la Figura 7-30: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 1833 muestran los espectros obtenidos. La Figura 7-31: Fallas parecida a falla de Pisayambo, muestra la ubicación de la falla de Pisgah-Bullion-Mesquite Lake-Lavic Lake y de las estaciones en donde fue registrado el Terremoto de Hector Mine (1999)

7.5.5. PARECIDA A FALLA DE SUBDUCCION

Se expone a continuación evento sucedidos en ambientes parecidos al Ecuador. En primer lugar, se presentan los registros obtenidos en el Perú.

Fecha del evento: 1966-10-17 21:41:56 UTC

Estación: Lima

Latitud y Longitud: -12.0700, -77.0400

Profundidad: 38 km

Sismo en la costa del Perú

Distancia epicentral: 237.0 km

Magnitud: 8.0

Mecanismo: desconocido

“Entre los posibles mecanismos de falla se sugiere un movimiento a lo largo de una gran falla aproximadamente paralela a la costa, originado al sur este de la localización calculada por el USCGS, involucrando en el comienzo masas relativamente pequeñas, propagándose hacia el NW con poca velocidad y adquiriendo mayores proporciones en las proximidades del epicentro calculado.”

(Esteve et al, 1967, Misión de reconocimiento sismológico terremoto del 17 de octubre de 1966 destructor en el Perú)

La Figura 7-32: Fallas parecida a falla de Subducción, presenta la ubicación del evento sísmico con sus características, así como la posición del lugar donde ha sido registrado, mientras que la Figura 7-33: Pseudo aceleración espectral, amortiguamiento de 5%, presenta el espectro correspondiente a dicho evento.

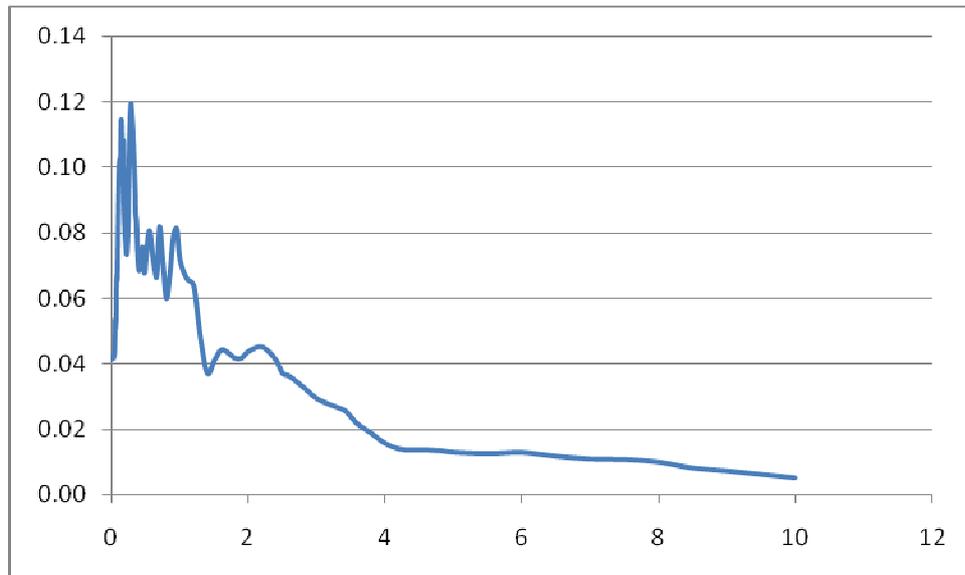


Figura 7-29: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 1773

Fuente: PEER (2010)

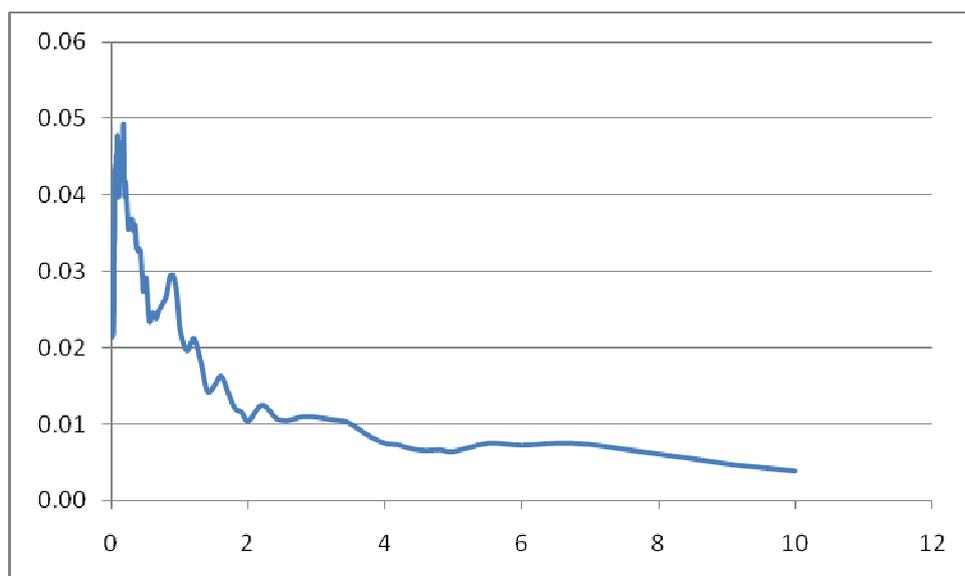


Figura 7-30: Pseudo aceleración espectral en unidades de g para el registro 1833

Fuente: PEER (2010)



Figura 7-31: Fallas parecida a falla de Pisayambo

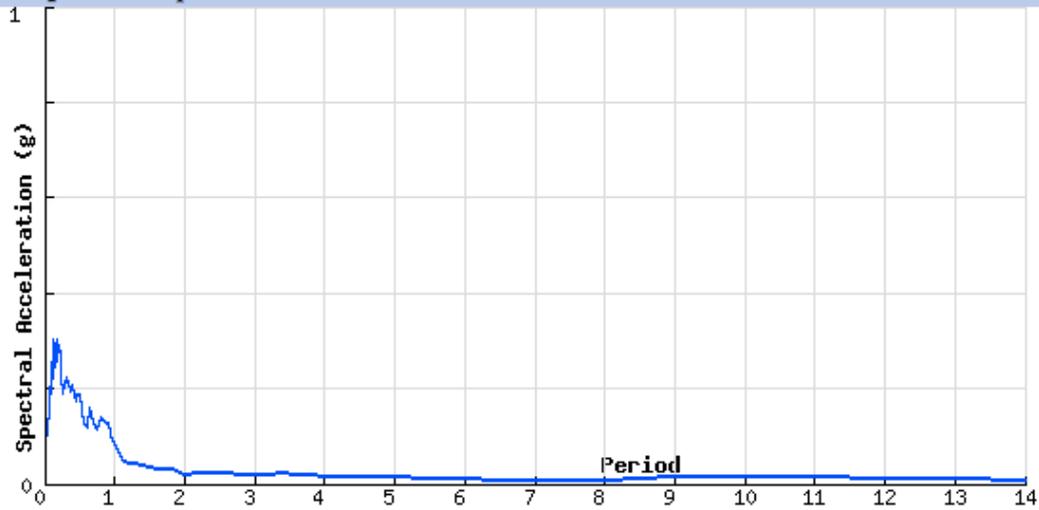
Fuente: Earthquake Hazard Program (2010).



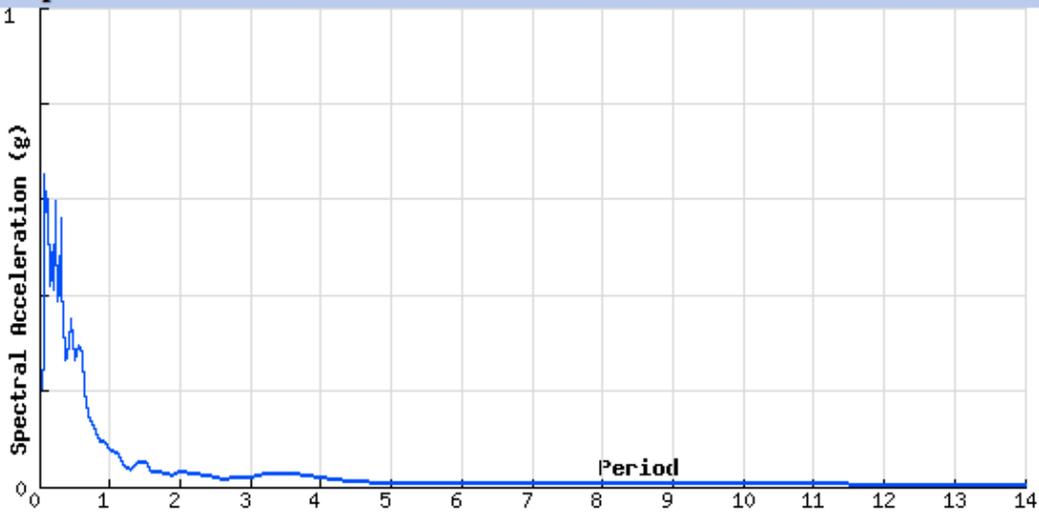
Figura 7-32: Fallas parecida a falla de Subducción

Fuente: COSMOS (2010).

Component: Up **PGA: 94.25 cm/s/s**



Component: 278 **PGA: -180.59 cm/s/s**



Component: 8 **PGA: -269.34 cm/s/s**

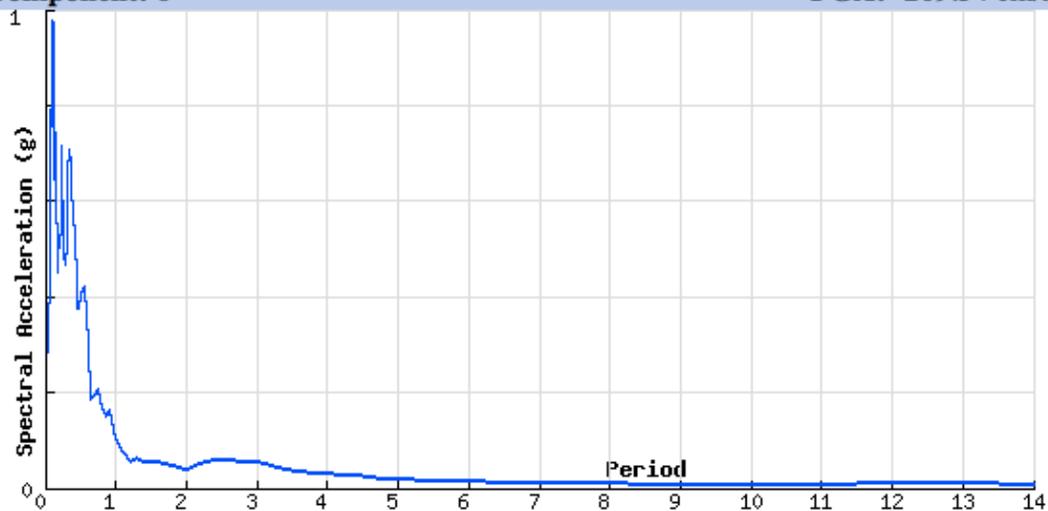


Figura 7-33: Pseudo aceleración espectral, amortiguamiento de 5% (Perú, 1966)
Fuente: COSMOS (2010).

Fecha del evento: 1970-05-31 20:23:27 UTC

Estación: Lima

Latitud y Longitud: -9.2, -78.8

Profundidad 56 km.

Sismo en la costa del Perú

Distancia epicentral: 373 km

Magnitud: 7.8

Mecanismo: desconocido

La Figura 7-34: Fallas parecida a falla de Subducción, presenta el segundo evento sísmico considerado para el Perú. La Figura 7-35: Pseudo aceleración espectral, amortiguamiento de 5% presenta el espectro correspondiente.



Figura 7-34: Fallas parecida a falla de Subducción

Fuente: COSMOS (2010).

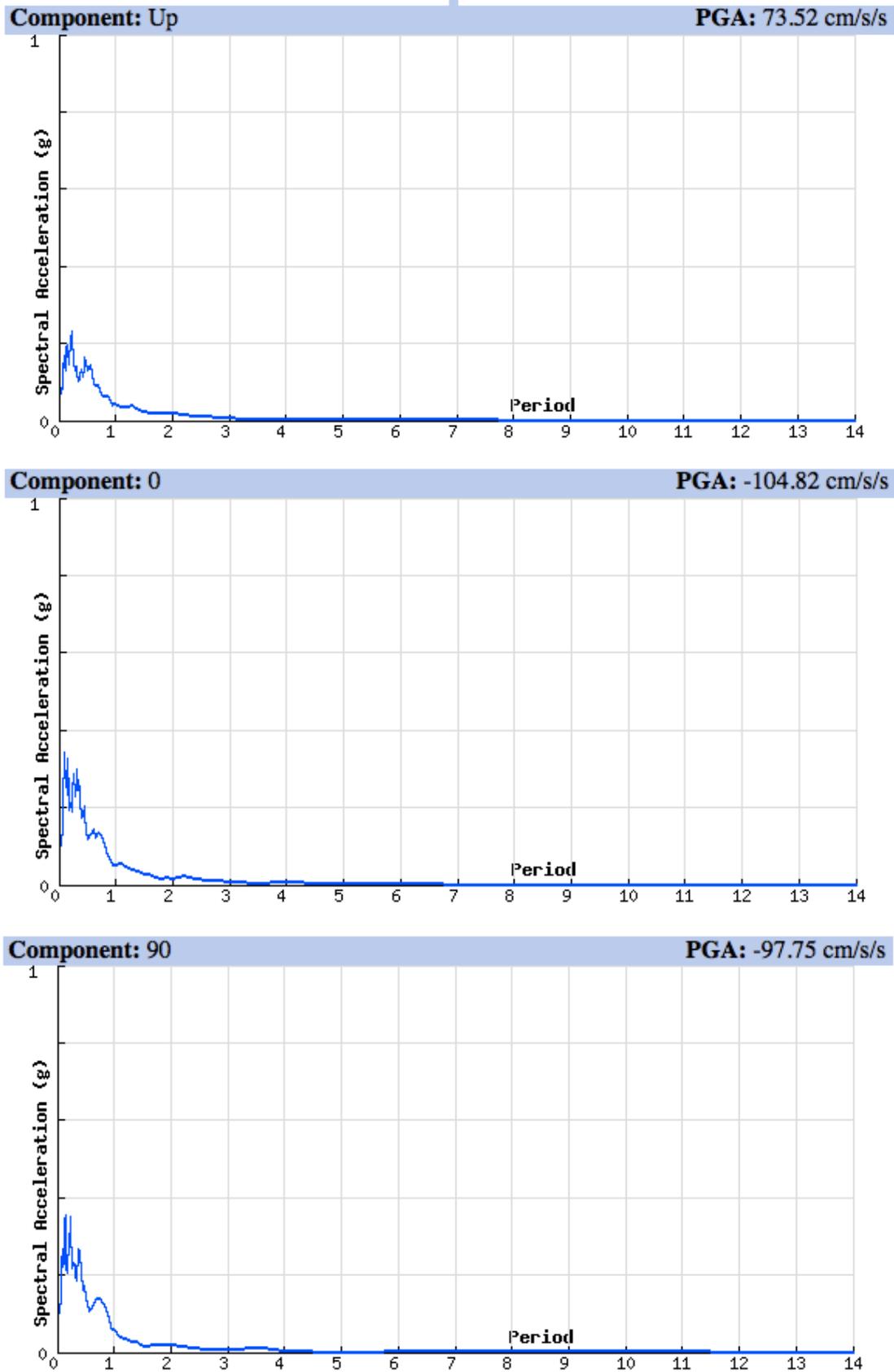


Figura 7-35: Pseudo aceleración espectral, amortiguamiento de 5% (Perú, 1970)
Fuente: COSMOS (2010).

Fecha del evento: 1974-10-03 14:21:29 UTC

Estación: Lima

Latitud y Longitud: -12.26, -77.79

Profundidad 9 km.

Sismo en la costa del Perú

Distancia epicentral: 84 km

Magnitud: 7.6

Mecanismo: desconocido

La Figura 7-36: Fallas parecida a falla de Subducción, presenta el tercer evento sísmico considerado para el Perú. La Figura 7-37: Pseudo aceleración espectral, amortiguamiento de 5%, presenta el espectro correspondiente.



Figura 7-36: Fallas parecida a falla de Subducción

Fuente: COSMOS (2010).

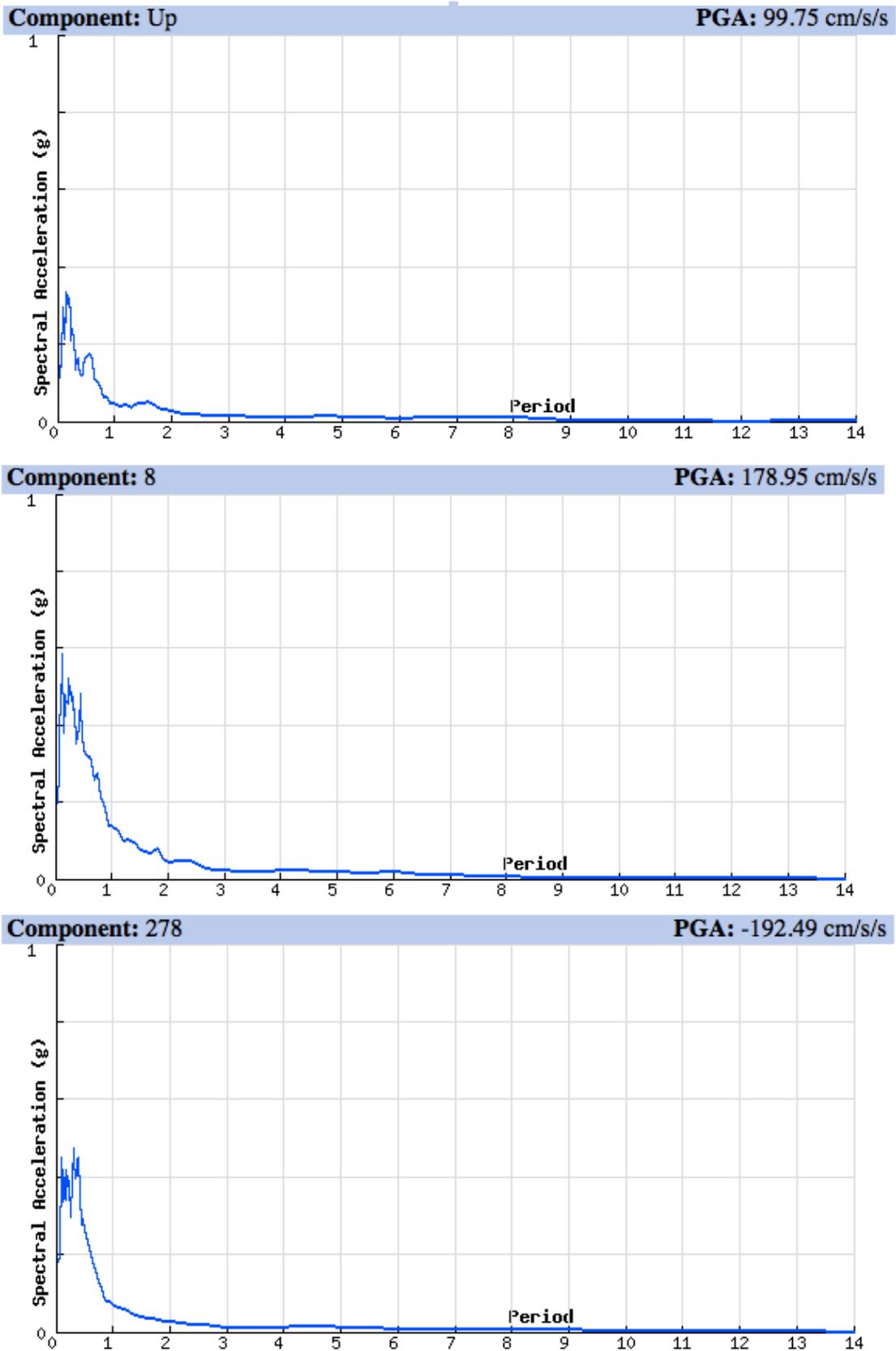


Figura 7-37: Pseudo aceleración espectral, amortiguamiento de 5% (Perú, 1974)
Fuente: COSMOS (2010).

7.6. COMPARACIÓN CON EL ESPECTRO PROPUESTO POR EL CEC

De modo de establecer un parámetro de comparación, se ha procedido a ubicar los espectros de los registros de la base de datos junto con el espectro propuesto por el CEC. Para ello, se consideran los siguientes factores:

- el espectro elástico de diseño (C)
- el factor de zona sísmica para la ciudad de Quito ($z = 0.4$)
- el factor de reducción de resistencia sísmica para edificaciones de hormigón armado ($R = 10$)

Considerando el factor de importancia y los coeficientes de configuración estructural como uno, se tiene que:

$$\frac{z \cdot I \cdot C}{R \cdot \Phi} = \frac{0.4 \cdot 1.0 \cdot C}{10 \cdot 1.0} = 0.04 \cdot C$$

de donde se obtiene la Figura 7-38: Espectro de diseño bajo condiciones normales, para la ciudad de Quito.

Además, considerando que los suelos de las estaciones en donde han sido registradas son:

Falla de Quito

1048 Tipo de suelo: D deep stiff soil

1087 Tipo de suelo: C weathered soft rock/ shallow stiff soil

1078 Tipo de suelo: C weathered soft rock/ shallow stiff soil

1086 Tipo de suelo: D deep stiff soil

3549 Tipo de suelo: B roca

1034 Tipo de suelo: C weathered soft rock/ shallow stiff soil

se ha procurado hallar el equivalente de esta clasificación para la realizada por el código ecuatoriano de la construcción, considerando la sección 5.3.2 del reglamento, concierne a las características de los tipos de suelos. Por tanto se tiene que:

Tipo de suelo B = S1 (roca)

Tipo de suelo C = S4 (alto potencial de licuefacción)

Tipo de suelo D = S3 (estratos de gran espesor)

La Figura 7-39: Espectros para falla inversa, corresponde a la recopilación de todos los espectros de este tipo de falla. Los valores de las aceleraciones para períodos pequeños son extremadamente grandes debido a la cercanía de los registros. Es por eso que en el siguiente gráfico, la Figura 7-40: Espectros para falla inversa y espectro propuesto por el CEC, se han eliminado algunos de ellos para poder tener una mejor visualización y poder compararlos con el espectro de diseño.

Realizando el mismo procedimiento para las fallas de rumbo resulta la Figura 7-41: Espectros para falla de rumbo, la misma que es un resumen de este otro tipo de fallas. Para establecer nuevamente la comparación con respecto al espectro del CEC se considera el tipo de suelo como en el caso anterior. Los tipos de suelos para los registros son:

Falla del Nono

28 Tipo de suelo: D Deep Stiff Soil

31 Tipo de suelo: C weathered soft rock/ shallow stiff soil

Falla de Otavalo

471 Tipo de suelo: D deep stiff soil

472 Tipo de suelo: D deep stiff soil

557 Tipo de suelo: B roca

Pisayambo

1773 Tipo de suelo: D deep stiff soil

1833 Tipo de suelo: B roca

La Figura 7-42: Espectros para falla de rumbo y espectro propuesto por el CEC, presenta la segunda comparación.

Utilizando los factores de modo de obtener el espectro de diseño recomendado por el CEC de mayor valor para la ciudad de Quito se tiene la Figura 7-43: Espectros para falla de rumbo y espectro propuesto por el CEC máximo:

$$\frac{z \cdot I \cdot C}{R \cdot \Phi} = \frac{0.4 \cdot 1.5 \cdot C}{3 \cdot 0.8} = 0.25 \cdot C$$

Para el menor valor resulta la Figura 7-44: Espectros para falla de rumbo y espectro propuesto por el CEC mínimo:

$$\frac{z \cdot I \cdot C}{R \cdot \Phi} = \frac{0.4 \cdot 1.0 \cdot C}{12 \cdot 1.0} = 0.03 \cdot C$$

Sin embargo, en el primer caso, las características de la edificación corresponderían a una estructura con muros portantes, de condición esencial y con piso débil, un caso muy extraño. Por tanto, considerando un caso más real, se toma como ejemplo un hospital de hormigón armado con vigas descolgadas y sin irregularidades. Para ese caso resulta la Figura 7-45: Espectros para falla de rumbo y espectro propuesto por el CEC para un hospital:

$$\frac{z \cdot I \cdot C}{R \cdot \Phi} = \frac{0.4 \cdot 1.5 \cdot C}{12 \cdot 1.0} = 0.05 \cdot C$$

Para este último caso se comparan también los espectros de subducción. La Figura 7-46: Pseudo aceleración espectral, amortiguamiento de 5% y CEC (Perú, 1966), presenta junto con el espectro del registro, la curva S3 (suelo blando) del CEC.

De manera de establecer un parámetro de comparación considerando los espectros elásticos, se normalizan con respecto a 0.4 g y se hallan los promedios. Dichos

gráficos se exponen en la Figura 7-52: Promedio de espectros elásticos normalizados para fallas inversas y en la Figura 7-53: Promedio de espectros elásticos normalizados para fallas de rumbo e inversas.

Puede notarse que la dispersión entre los datos es baja, como lo indica la curva del promedio más la desviación estándar. Se nota que la curva media cae dentro de la propuesta del código.

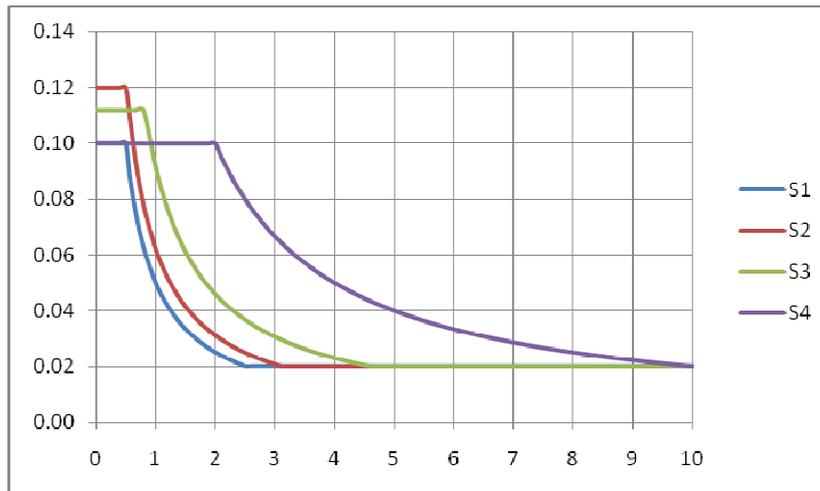


Figura 7-38: Espectro de diseño bajo condiciones normales, para la ciudad de Quito

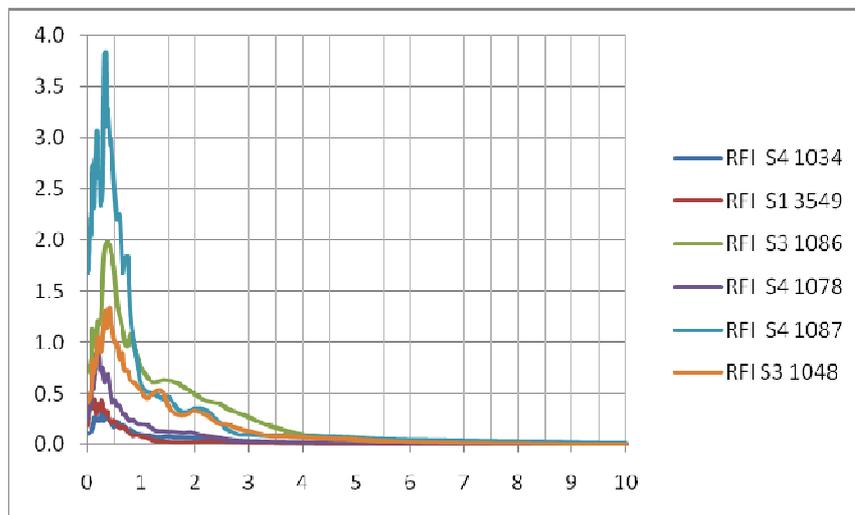


Figura 7-39: Espectros para falla inversa

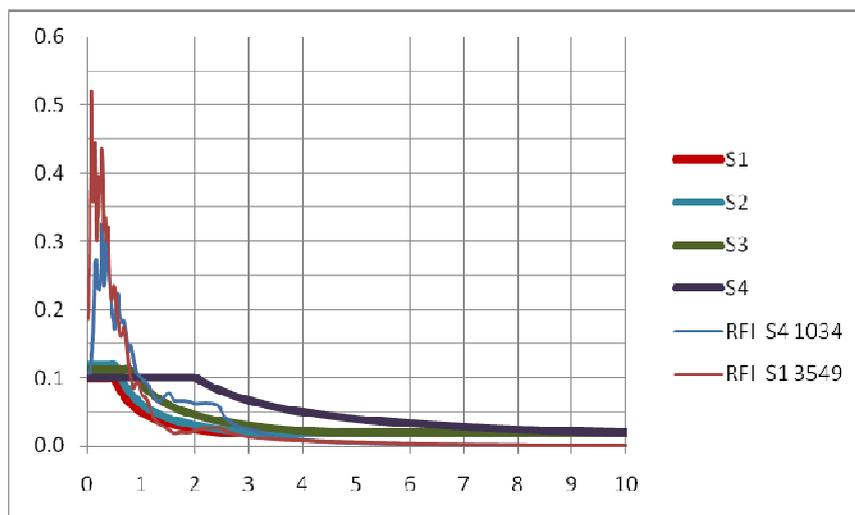


Figura 7-40: Espectros para falla inversa y espectro propuesto por el CEC

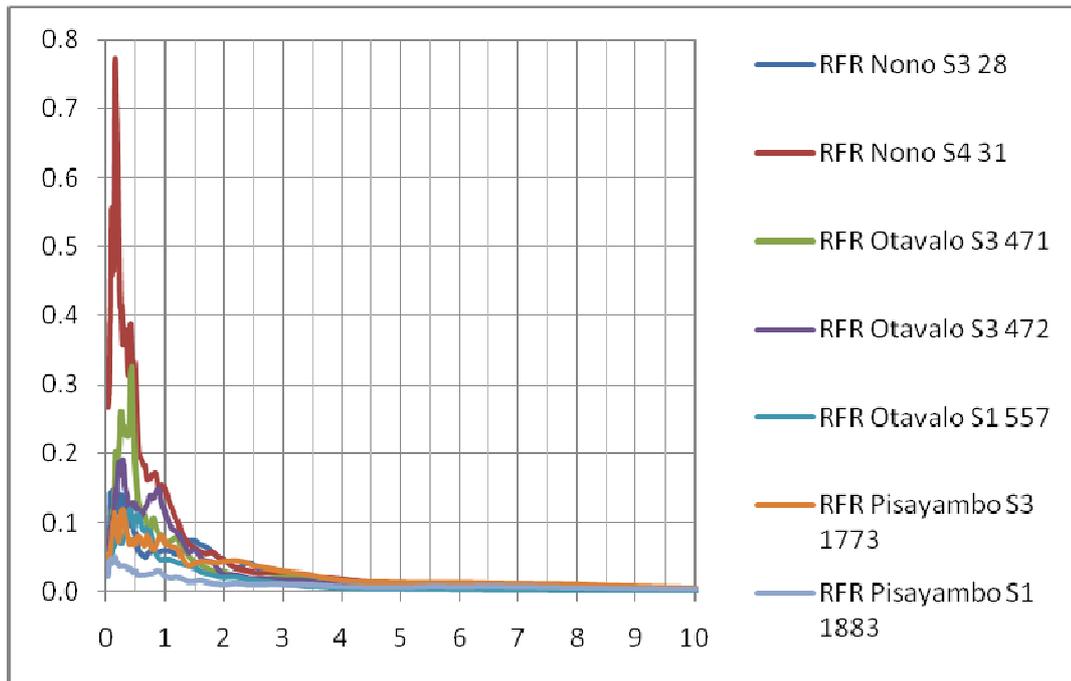


Figura 7-41: Espectros para falla de rumbo

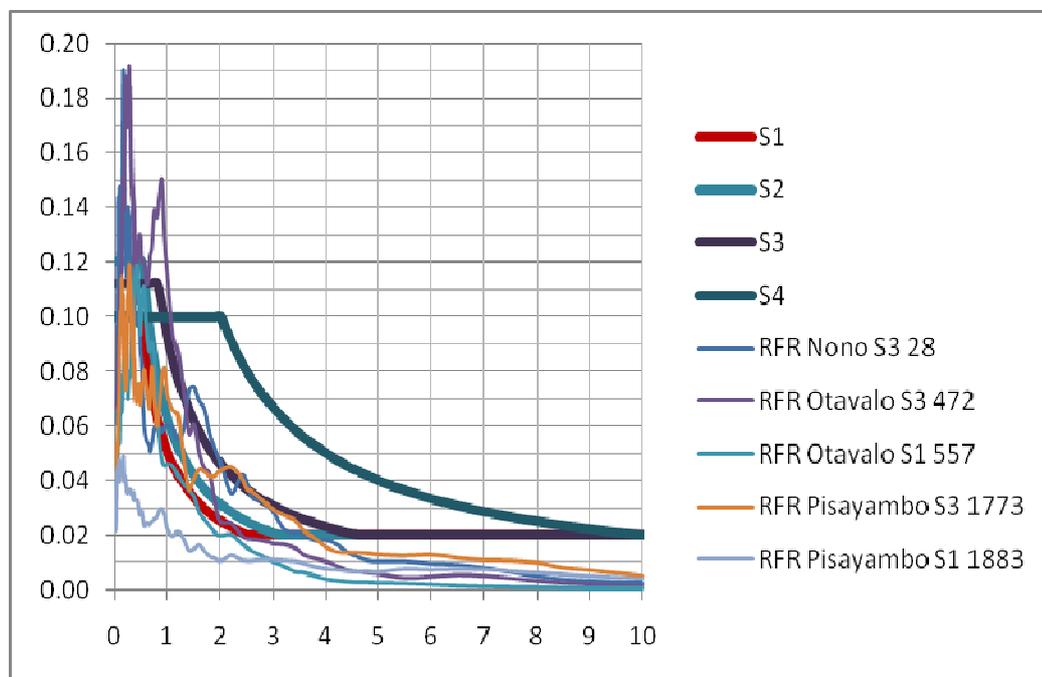


Figura 7-42: Espectros para falla de rumbo y espectro propuesto por el CEC

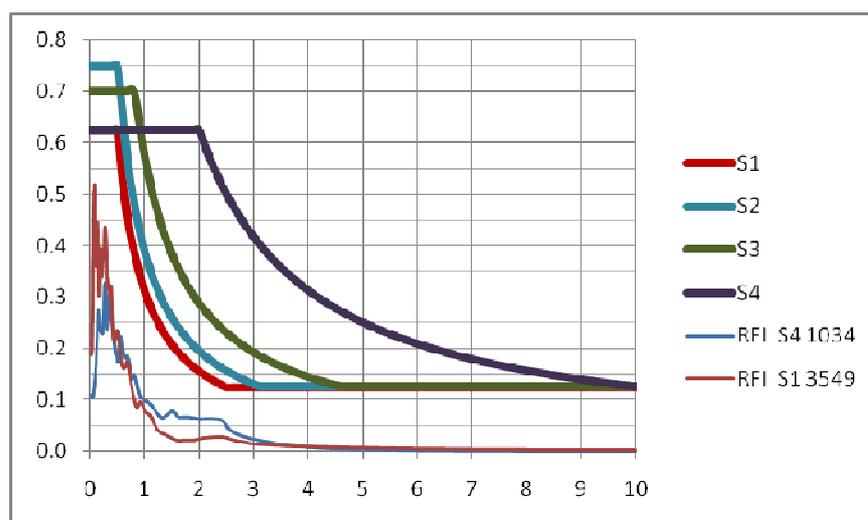
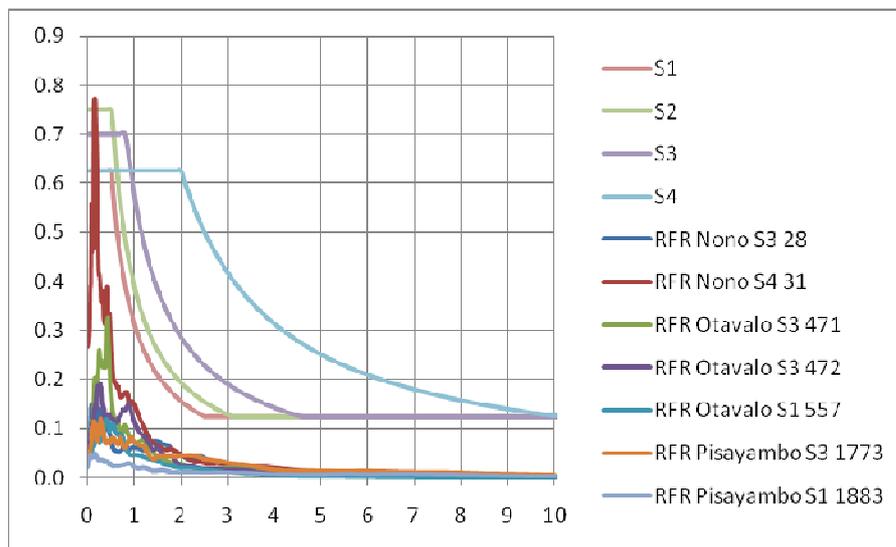
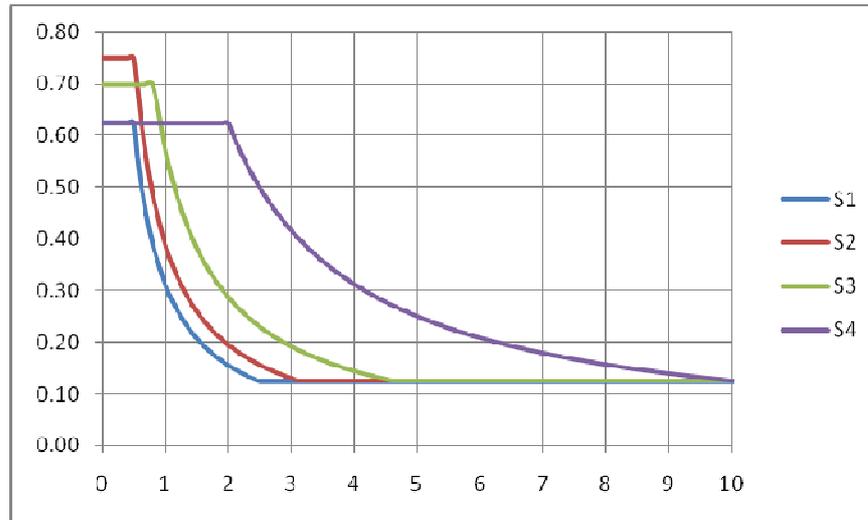


Figura 7-43: Espectros para falla de rumbo y espectro propuesto por el CEC máximo

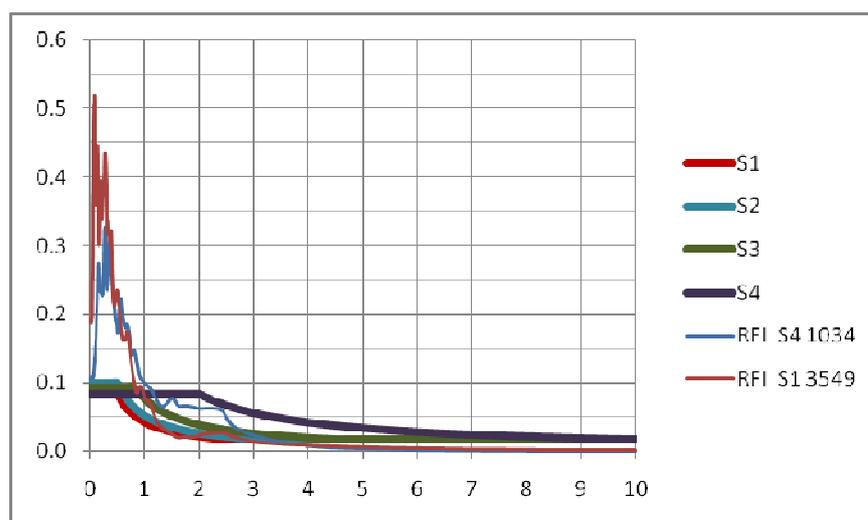
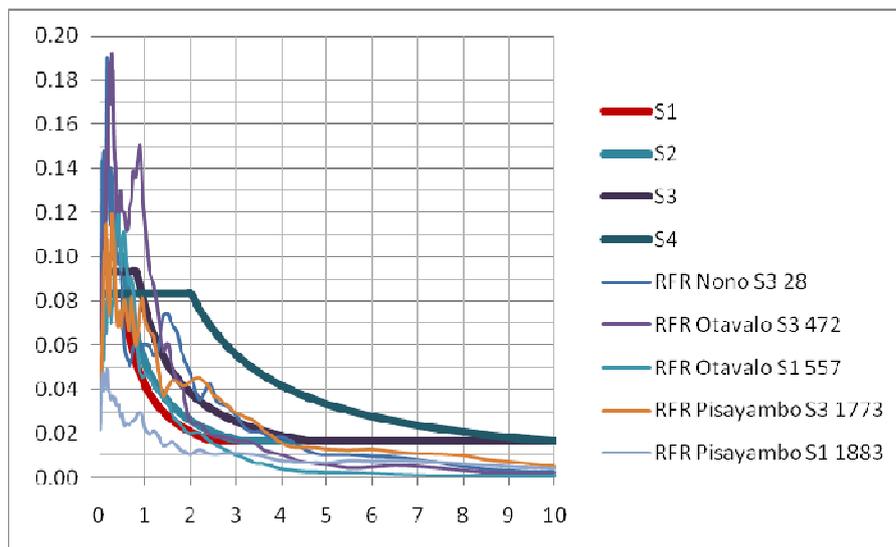
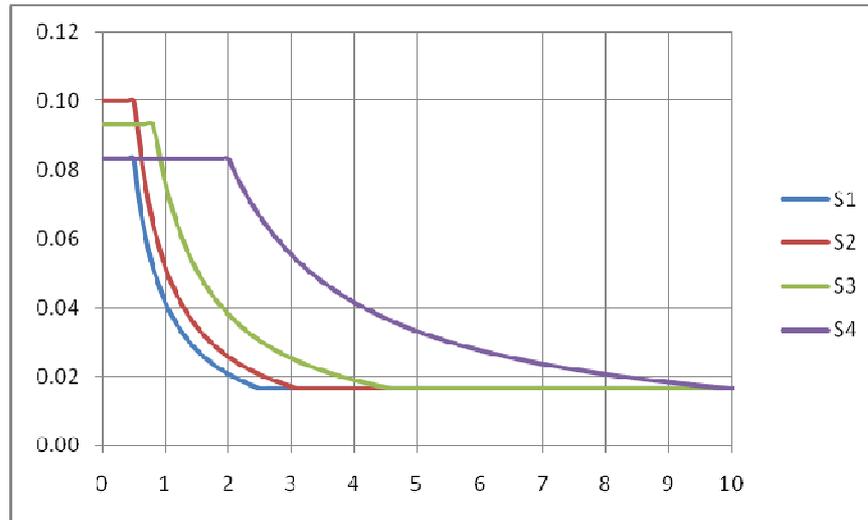


Figura 7-44: Espectros para falla de rumbo y espectro propuesto por el CEC mínimo

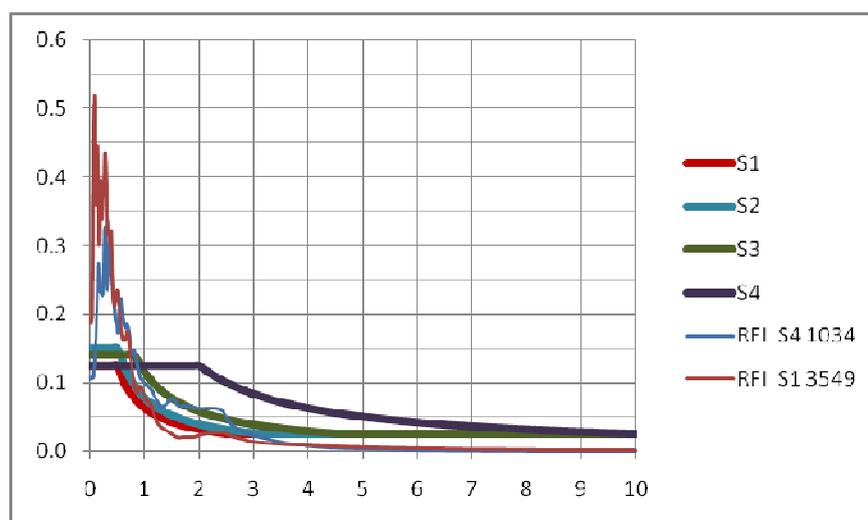
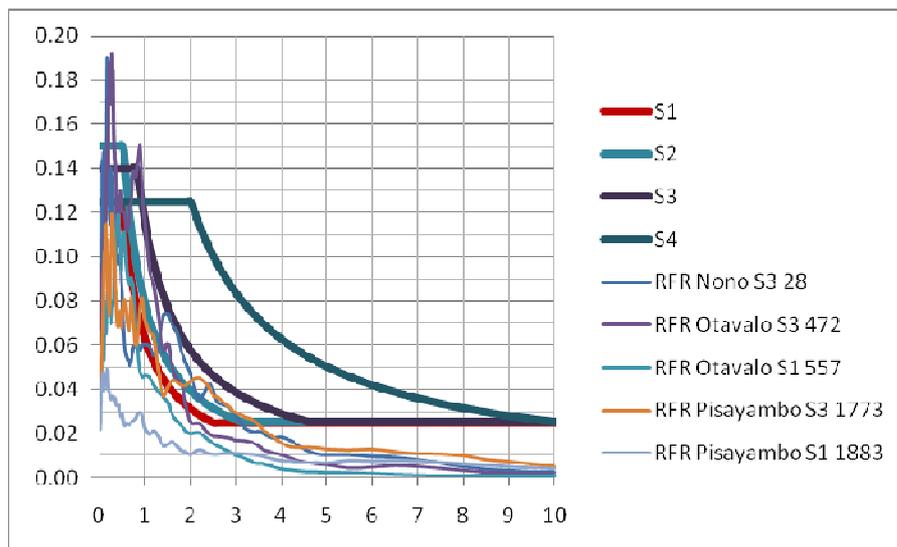
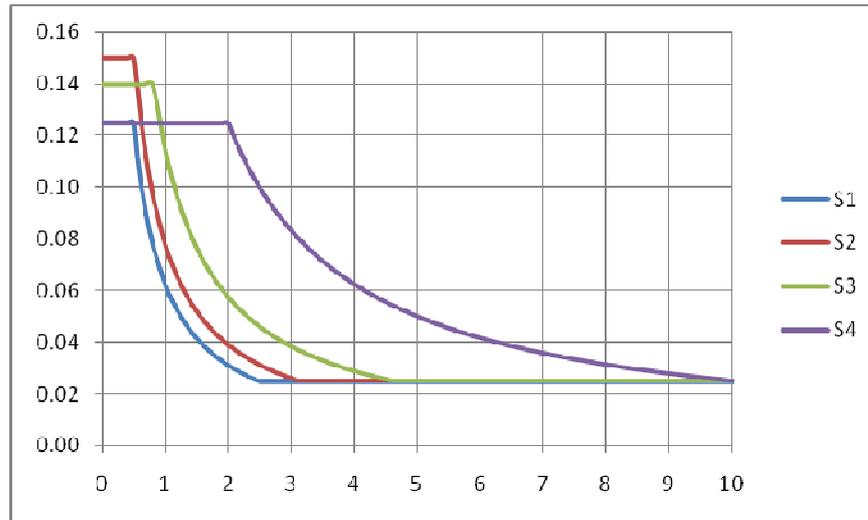


Figura 7-45: Espectros para falla de rumbo y espectro propuesto por el CEC para un hospital

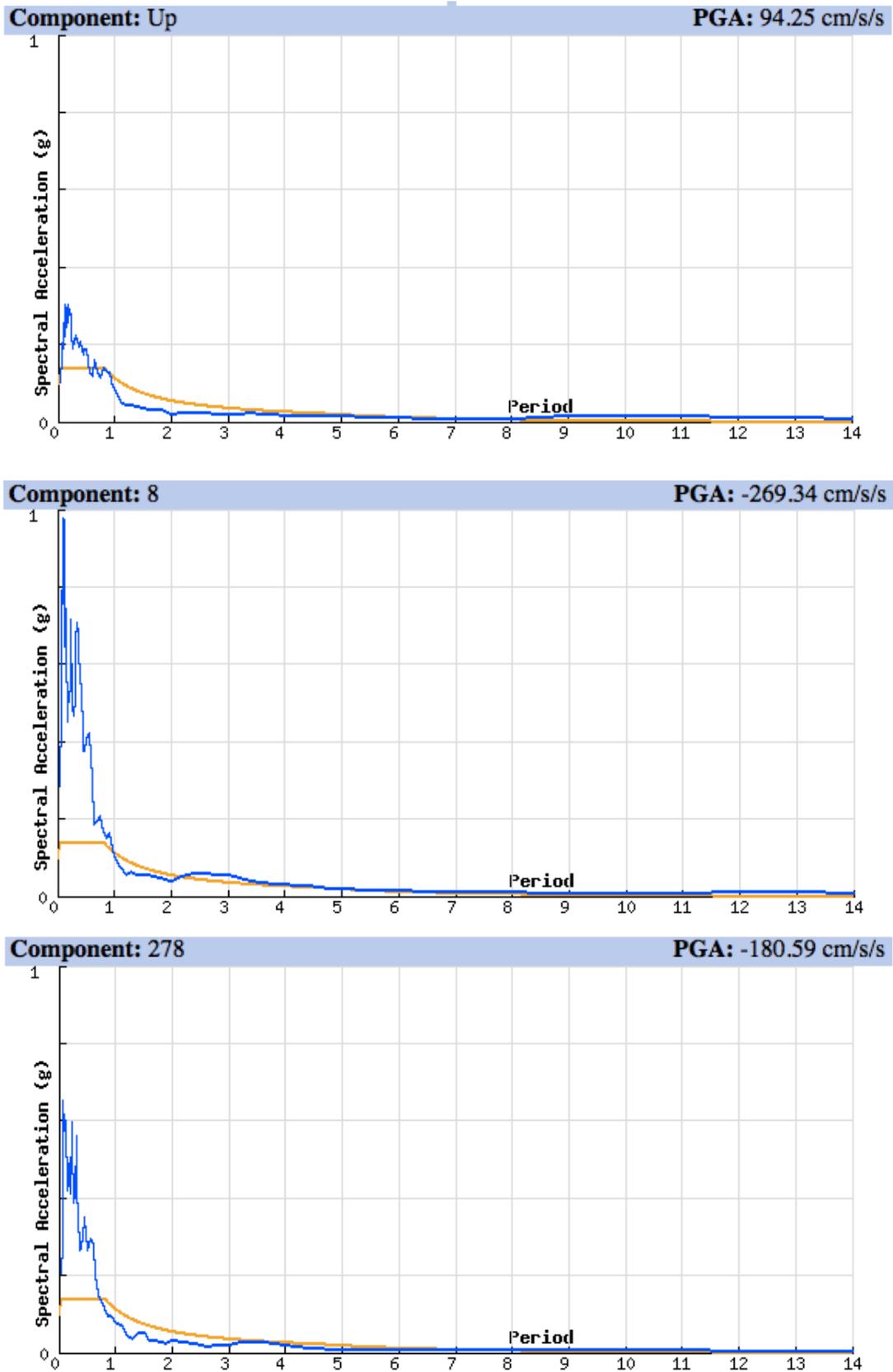


Figura 7-46: Pseudo aceleración espectral, amortiguamiento de 5% y CEC (Perú, 1966)
Fuente: COSMOS (2010).

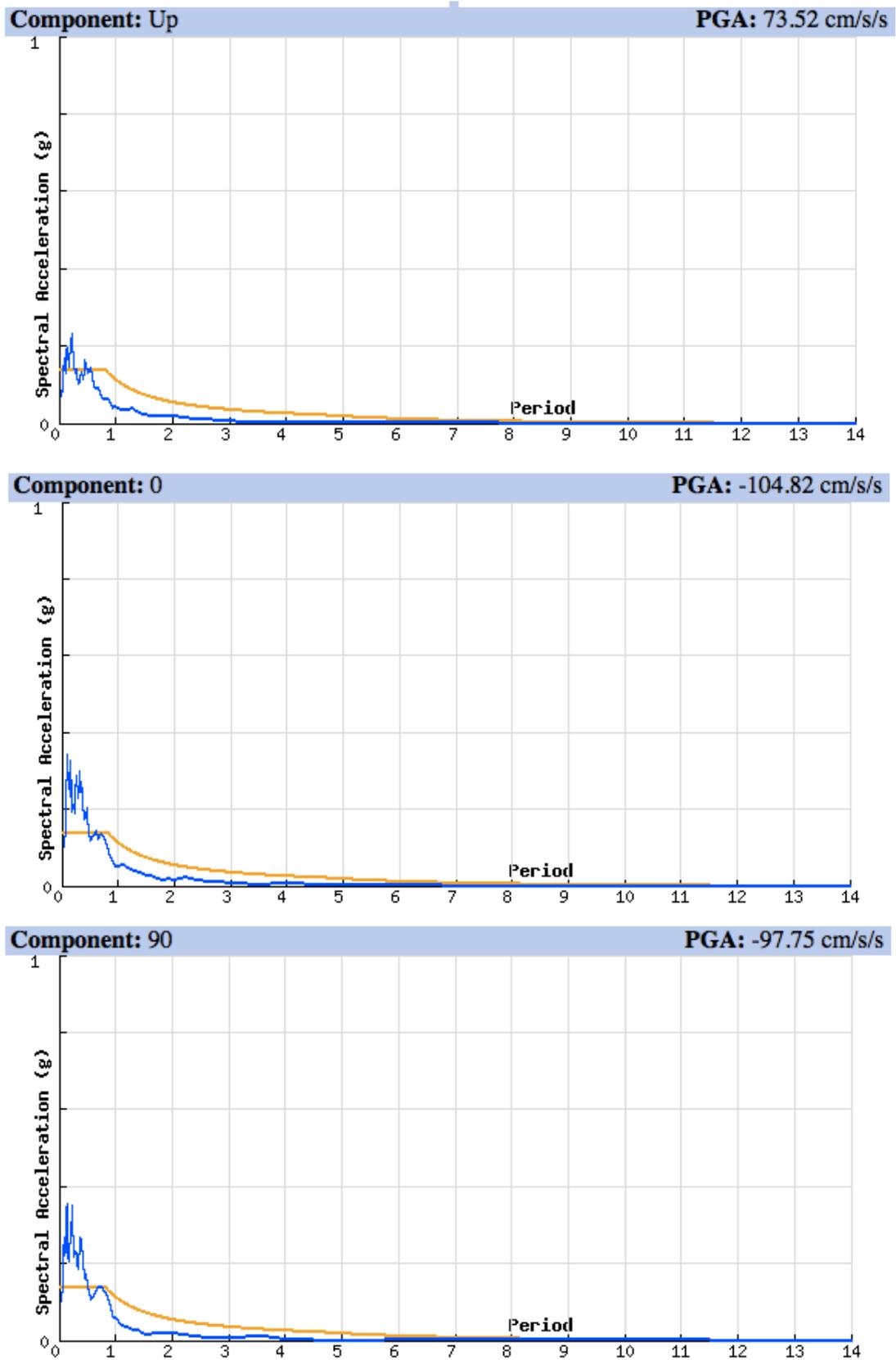


Figura 7-47: Pseudo aceleración espectral, amortiguamiento de 5% (Perú, 1970)
Fuente: COSMOS (2010).

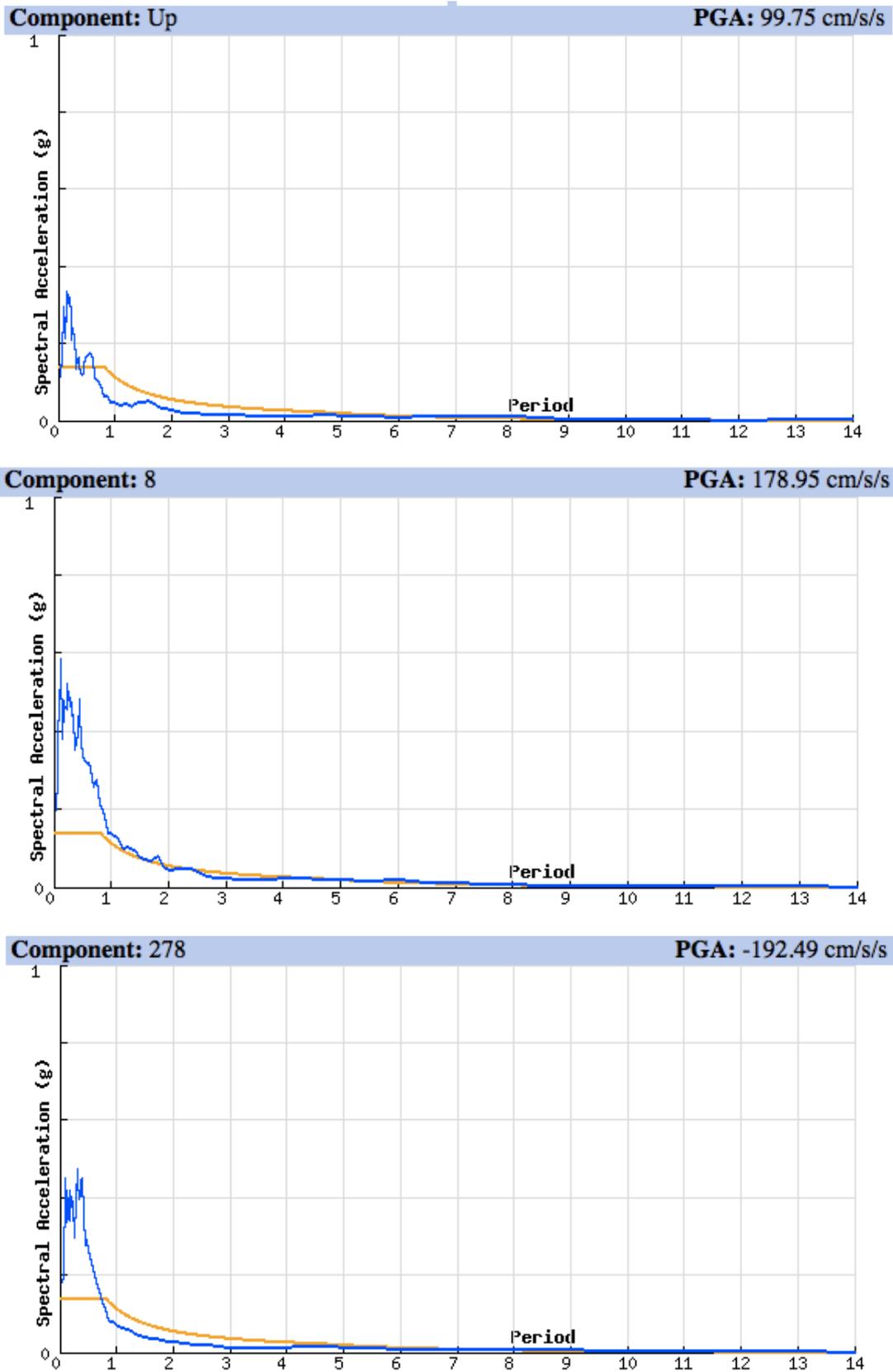


Figura 7-48: Pseudo aceleración espectral, amortiguamiento de 5% (Perú, 1974)
Fuente: COSMOS (2010).

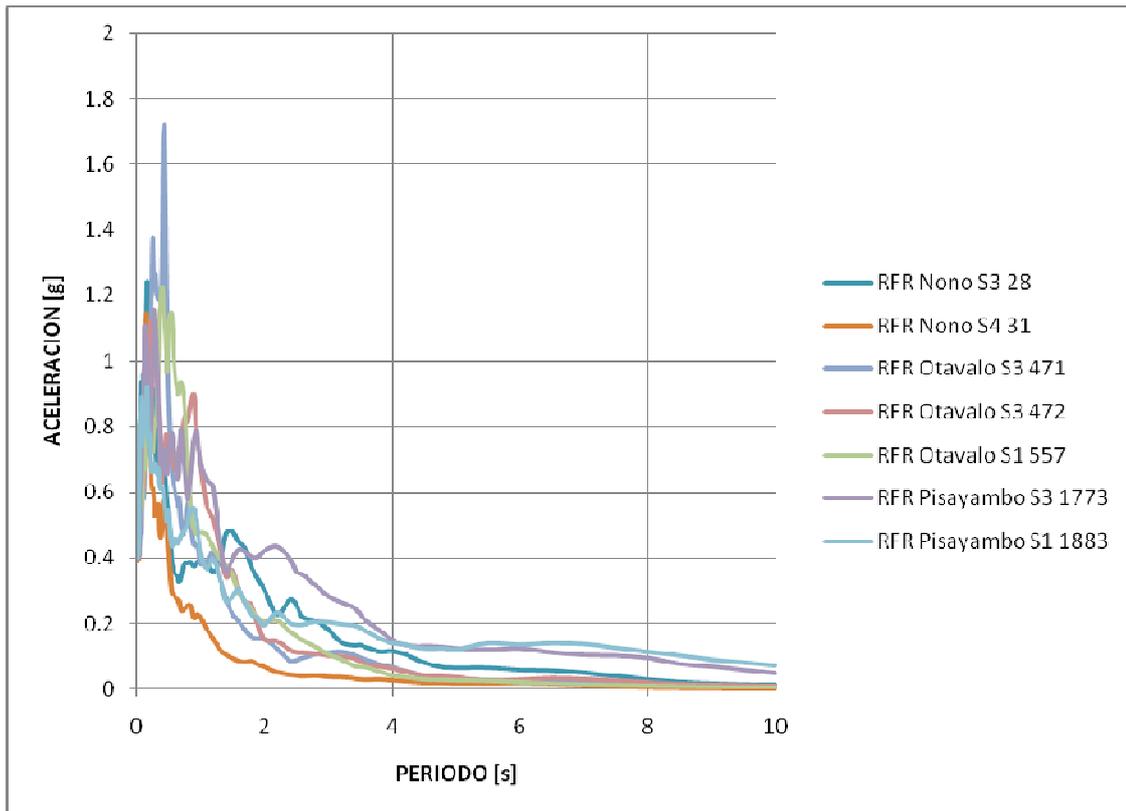


Figura 7-49: Espectros elásticos normalizados para fallas de rumbo

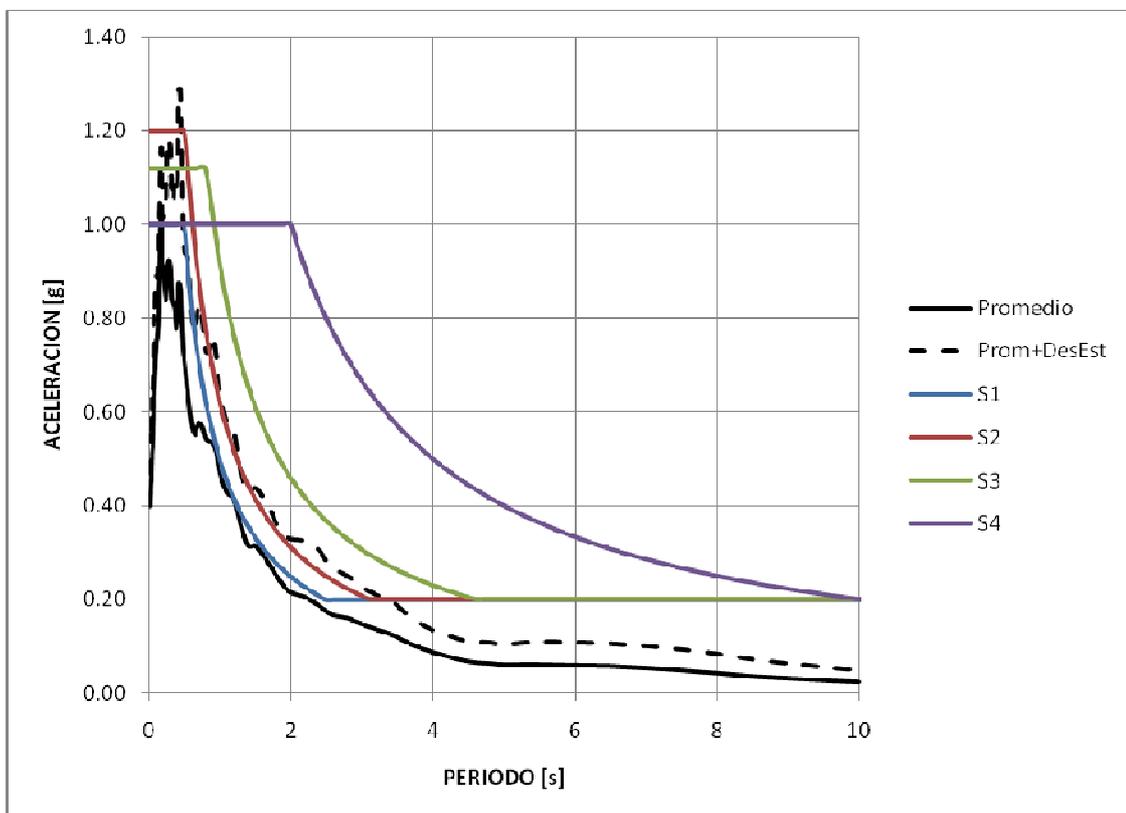


Figura 7-50: Promedio de espectros elásticos normalizados para fallas de rumbo

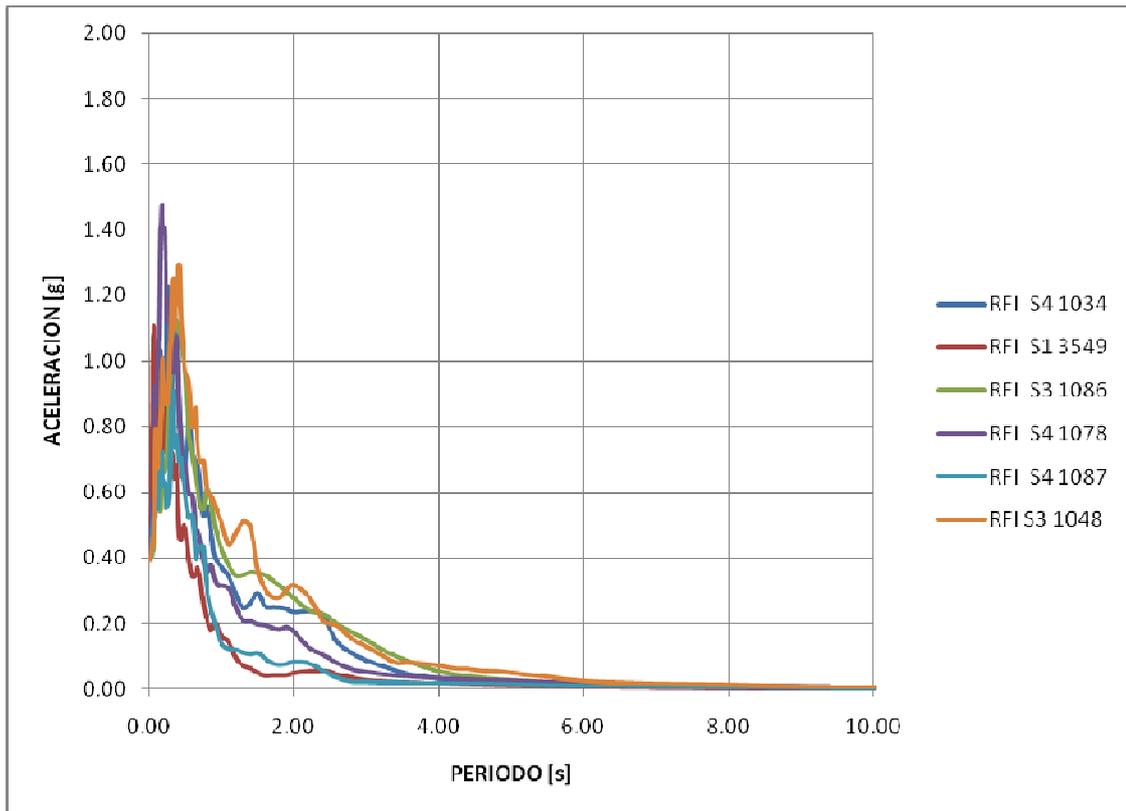


Figura 7-51: Espectros elásticos normalizados para fallas inversas

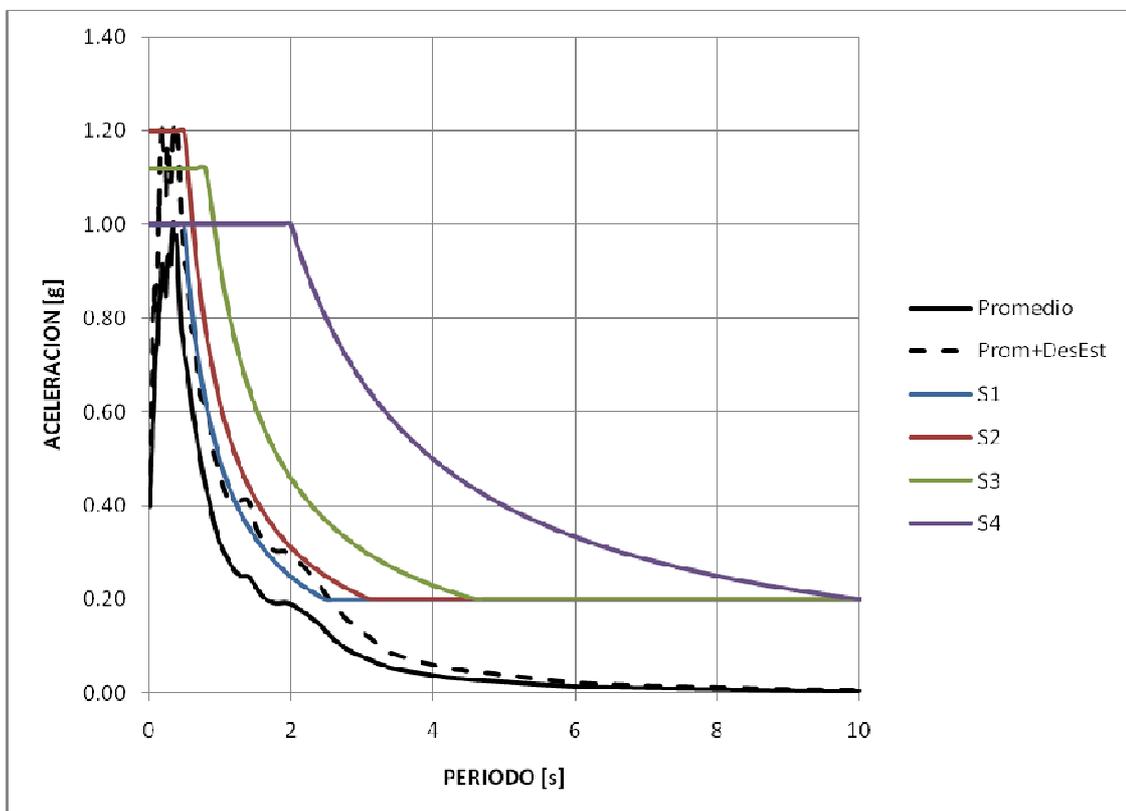


Figura 7-52: Promedio de espectros elásticos normalizados para fallas inversas

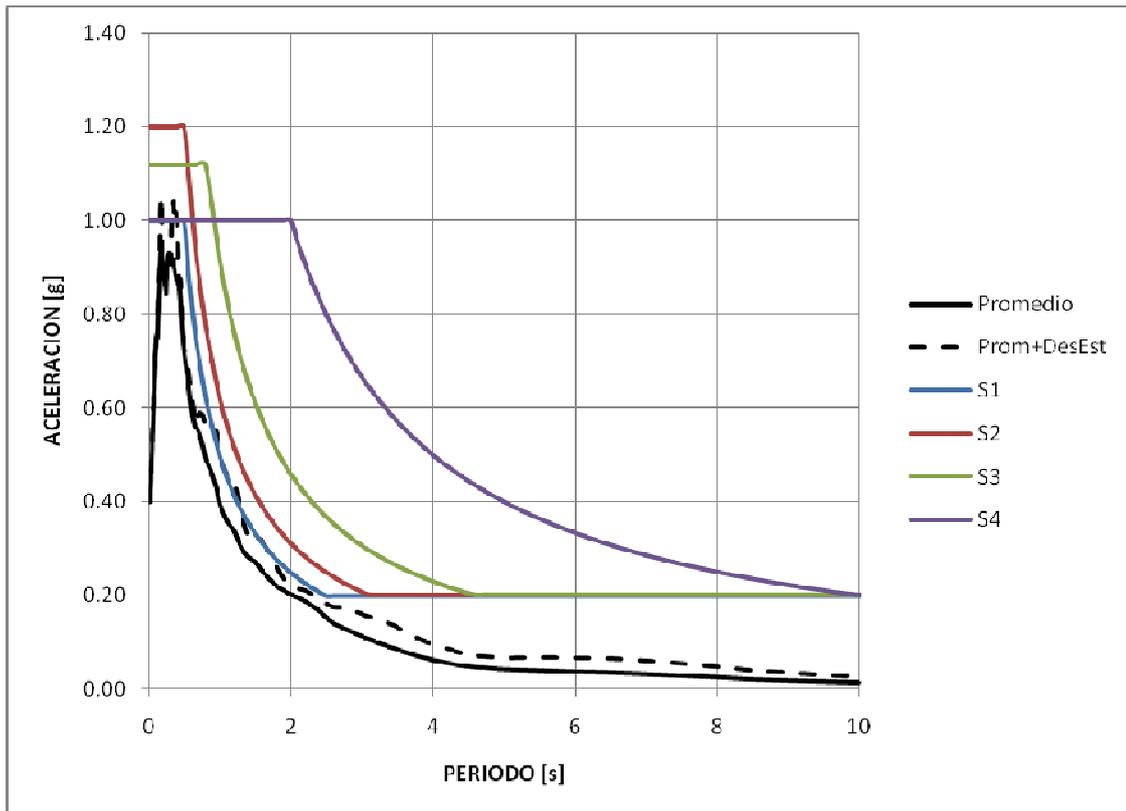


Figura 7-53: Promedio de espectros elásticos normalizados para fallas de rumbo e inversas

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

- El valor máximo del conjunto de aceleraciones máximas del suelo para todos los registros, es de 0.086 respecto a la aceleración de la gravedad (84.28 cm/s²), correspondiente a la componente horizontal del sismo del 11 de mayo de 1994, con magnitud 5.3, registrada en la estación Aurelio Espinoza Pólit ubicada a 81 km del evento. El valor mínimo del conjunto de aceleraciones máximas del suelo para todos los registros, es de 0.024 respecto a la aceleración de la gravedad (23.52 cm/s²), correspondiente a la componente horizontal del sismo del 2 de octubre de 1995, con magnitud 6.9, registrada en la estación del Hospital Metropolitano ubicada a 286 km. Como se puede comprobar, la influencia de la magnitud del sismo es menor que la influencia de la distancia en donde se registró debido a las leyes de atenuación. De ahí que debe tomarse en cuenta este factor.
- Para la corrección de los registros no se consideran filtros de frecuencias. En lugar de ello se realiza la corrección parabólica de la línea base usando el método de Housner, el mismo que halla el eje de velocidades nulas. Existen diferencias con la corrección del informe. En esta última los desplazamientos no cumplen con requerimientos físicos (el desplazamiento al final del registro no es cero).
- Para sismos lejanos existe un filtrado de las ondas; las amplitudes más bajas y las frecuencias más altas se pierden del registro, llegando a registrarse únicamente las amplitudes altas de la aceleración y las frecuencias más bajas. Para verificar este hecho puede observarse los registros de las aceleraciones para un sismo cercano, en donde se observa una gran cantidad de componentes de amplitud y frecuencia, mientras que, para un sismo lejano, se observa claramente que tanto la amplitud como la frecuencia de la señal tienden a una armónica.

- Las respuestas de la aceleración usando el método de Newmark para variación lineal ($\text{Beta}=1/6$) y el método de integración directa, presentan pocas variaciones. La comparación con los espectros dados en el informe de referencia, no presentan diferencias significativas. Por tanto, la corrección de la línea base usando el método de los promedios ó usando el método de Housner, producen resultados parecidos en la generación de los espectros elásticos de aceleración.
- Los períodos intermedios forman parte de la *región sensible a la velocidad*, debido a que la respuesta estructural parece estar mejor relacionada con la velocidad del suelo que con los otros parámetros del movimiento del suelo. Esta región se nota más claramente en los espectros tripartitos. Para un movimiento particular del suelo, los períodos límites entre estas regiones varían con el amortiguamiento.
- Posterior a la obtención de los espectros tripartitos, se pueden conseguir los valores de períodos para el rango sensible a la velocidad. El promedio de estos valores para todos los acelerogramas horizontales resulta 0.71 para el período mínimo y 1.73 para el período máximo. Sin embargo se ha realizado una clasificación; de esta forma resulta que el subgrupo I presenta un período mínimo de 0.30 y un período máximo de 0.97, mientras que el subgrupo II tiene un período mínimo de 1.22 y un período máximo de 2.68 segundos.
- Considerando los valores máximos de los períodos mínimos del rango de valores, se nota que el subgrupo I se ajusta a la curva S1 o a la curva S2 de la propuesta del coeficiente sísmico del C.E.C., el subgrupo II, a la curva S4, y el promedio de los dos a la curva S3.
- Luego de obtener los espectros elásticos se han hallado los espectros elásticos normalizados al 40% de la aceleración de la gravedad, es decir, tomando los datos respecto a cada aceleración máxima del suelo de cada uno de los registros y multiplicándolos por 0.4g. De esta forma se ha pretendido hallar la “forma” de cada sismo usando la aceleración máxima esperada en

roca, con una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años para la ciudad de Quito, propuesto por el Código Ecuatoriano de la Construcción.

- Usando las aceleraciones normalizadas a 0.4g, se ha procedido a hallar los espectros elásticos. Los valores de las máximas amplitudes son aproximadamente 5 veces más que la aceleración máxima del suelo.
- Los espectros son usados para el diseño de estructuras, sin embargo no puede utilizarse los espectros de respuesta ya que estos son hallados para movimientos determinados, por lo que deben obtenerse los espectros de diseño. El procedimiento más usual es considerar el valor promedio más la desviación estándar de los espectros de respuesta de varios terremotos representativos.
- Al hallar el promedio más la desviación de los espectros normalizados, se nota que entre ésta y el espectro medio, existe diferencia. Dicha diferencia representa la disimilitud de cada evento registrado y que, en un caso más estricto, debería tender a disminuirse. En este caso no se ha considerado el caso más estricto dado la falta de registros existentes en nuestro medio. Lo que sí se ha considerado es una clasificación de los espectros de modo de disminuir dicha desviación de los datos.
- Se han clasificado los nueve registros debido a la forma del espectro, hecho que se relaciona con la distancia a los lugares donde ocurrió el evento sísmico y a la magnitud de estos.

La primera clasificación incluye a los acelerogramas 1, 2, 3, 4, los cuales corresponden al sismo ocurrido el 11 de Mayo de 1994, que tuvo una magnitud de 5.3 y que fue registrado en las estaciones que se encontraban a una distancia media de 76 km, y con el acelerograma 8, correspondiente al sismo ocurrido el 17 de enero de 1996, con magnitud 4.4 y registrado a 12 km.

Ambos eventos presentan características en común; estos fueron registrados a distancias cortas y sus magnitudes son menores en relación a los demás. Sus espectros de respuesta presentan un gran parecido, el mismo que puede notarse en la baja desviación estándar entre ellos. Para estos registros, los valores de los espectros de respuesta presentan valores mayores para períodos cortos.

La segunda clasificación corresponde a los acelerogramas 5 y 6, registros del sismo ocurrido el 2 de octubre de 1995, con magnitud de 6.9, a una distancia media de 290 km; así como el acelerograma 7 del sismo suscitado el 3 de octubre de 1995, de magnitud 6.1, registrado a 269 km, y del acelerograma 9 que es el registro del sismo del 28 de marzo de 1996, de magnitud 5.7, registrado a 86 km.

Para estos acelerogramas, los espectros de respuesta presentan valores mayores para períodos largos.

- La naturaleza de los movimientos sísmicos es aleatoria; la rigidez, propiedad fundamental del sistema, cambia según su estado de deformaciones. Deben por tanto considerarse los espectros elastoplásticos, los cuales, tienen características similares a los elásticos pero en general las ordenadas espectrales tienen valores menores, cuya proporción depende del factor de ductilidad.
- Los valores de η representan la relación entre los esfuerzos que la estructura es capaz de resistir sin sobrepasar el umbral de cedencia frente a los esfuerzos a la que está sometida, mientras que los valores de la ductilidad representan la relación entre la máxima deformación permitida por el sistema dividida para la deformación de cedencia.
- Se puede notar que las demandas de ductilidad tienden a aumentar a medida que el parámetro η disminuye. Es decir que mientras mayor sea la

resistencia en la fluencia del sistema, las demandas de ductilidad son menores.

- Existe una marcada influencia del tipo de onda sísmica en la respuesta de sistemas elastoplásticos simples. A diferencia de lo que ocurre con los sistemas elásticos lineales, la excitación crítica, es decir aquella que lleva a la estructura a su respuesta crítica, no está asociado al fenómeno de la resonancia. Existe evidencia de que son los pulsos largos e intensos de aceleración que pueden contener los registros de un sismo real, los que producen las mayores demandas de ductilidad. Es importante considerar, por tanto, no solo la aceleración máxima del suelo, sino además el tipo de pulsos de la aceleración.
- Cuando la ductilidad es igual a 1 el sistema inicia la fluencia, por tanto, ductilidades menores que 1 corresponden a un sistema elastoplástico lineal. El hecho de que las demandas de ductilidad disminuyan sensiblemente a medida que aumenta el período, no puede interpretarse como que debería preferirse estructuras muy flexibles, puesto que esto podría producir deformaciones permanentes en la estructura, así como causar daños no estructurales de importancia.
- En las figuras comparativas entre el factor de reducción por ductilidad hallado en esta tesis, con los valores propuestos por Newmark – Hall y Aguiar, se observa que las propuestas de las ecuaciones corresponden a valores medios, más no a envolventes de este factor. En casi todo el rango de períodos los calculados a partir de las ecuaciones propuestas, satisfacen a la tendencia del factor.
- Puede reconocerse que existe una buena aproximación entre los resultados obtenidos del factor de reducción R_{μ} entre los acelerogramas de sismos registrados en Estados Unidos de Norte América con acelerogramas de sismos registrados en Sur América. Esto conduce a pensar que el factor R_{μ} no depende del origen de los sismos.

- Se nota en los gráficos de los espectros elásticos reducidos, que especialmente para períodos menores a 0.5 s no se debería trabajar considerando un factor de reducción de las fuerzas sísmicas igual a 10 ya que para estos valores existe una mayor demanda de fuerzas sísmicas. Para el resto de valores de períodos, un valor del factor de reducción igual a 6.5 sería más apropiado de modo de satisfacer las condiciones de ductilidad requerida en cada caso.
- El desconocimiento de la forma como se evalúa el factor de reducción de las fuerzas sísmicas puede llevar a que se emplee el mayor valor que estipula el código y de esta manera obtener fuerzas estáticas por sismo muy bajas que estarían en general, mal evaluadas.
- Entre las precauciones que se deben considerar está la de disminuir al máximo la probabilidad de que las deformaciones plásticas se concentren en solo algunos puntos de las estructuras, exigiendo que la energía se disipe de manera uniforme, para poder contar simultáneamente con el mayor número posible de fuentes de disipación de energía, de forma que las demandas locales de ductilidad sean tales que no superen la capacidad de rotación de los miembros.
- El código considera la tipología y el material y pretende disminuir la ordenada espectral elástica para suponer un comportamiento inelástico de la estructura, pero para poder hacer esto, la estructura debe tener una adecuada ductilidad y suficiente disipación de energía, lo que se consigue con el detallamiento expresado en las normas, tales como confinamiento del nudo en el caso del hormigón armado. Es por esto que es muy importante prestar atención a las disposiciones especiales para el diseño sismorresistente.
- Los espectros de Fourier se hallan mediante la transformada rápida de Fourier cuyo proceso es mucho más eficiente que la transformada discreta. La eficiencia se nota en un gran número de puntos a calcular. Los espectros de

Fourier muestran el contenido de frecuencias de una señal, en este caso, del registro de aceleraciones. Los registros sísmicos de la zona se caracterizan por un fuerte contenido de frecuencias.

- Para obtener una clasificación de los tipos de suelo se ha usado el método de Nakamura. Además para confirmar dichos resultados se ha revisado información sobre dicho asunto. Como resultado de la aplicación del método experimental de Nakamura, se puede concluir que los contenidos de frecuencia de los diferentes tipos de suelos de las zonas de estudio amplifican los efectos sísmicos locales.
- El segmento Ecuador-Colombia de la subducción ha sido capaz de producir grandes terremotos en la fosa, distinguiéndose varios sismos muy grandes ($M_s > 8$) registrados en la historia del país, como los de 1906 y 1942. La magnitud y duración de estos terremotos puede dar lugar a problemas de amplificación local, en especial en los contenidos bajos de frecuencia de las ondas sísmicas.
- Como puede notarse, son varios los ambientes geológicos donde se deberían esperar los terremotos más importantes provenientes de la deformación de la corteza continental y que podrían afectar a Quito. Es muy importante, por tanto, estudiar de manera específica y detallada las fallas activas recopiladas en la presente investigación, en especial aquellas que podrían tener efecto sobre las obras a construirse, esto permitirá posteriormente incluir esos datos en las evaluaciones del peligro sísmico para el diseño sismo resistente de las obras.

Las fuerzas de diseño propuesta por el código, pueden resultar sensiblemente menores para sectores ubicados en zonas de alto riesgo sísmico, como lo indican los espectros obtenidos para condiciones parecidas al Ecuador, en los que se nota aceleraciones que sobrepasan aquellas propuestas por el código en especial para períodos bajos. De igual forma se nota el mismo patrón en la comparación de los espectros de los acelerogramas registrados,

normalizados respecto a la aceleración máxima del suelo. Para períodos mayores, la curva S4, correspondiente a suelos con condiciones especiales, satisface los requerimientos.

- La filosofía de diseño sismorresistente plantea que, ante sismos menores, no debe haber daño ni en la estructura ni en las paredes. Ante sismos medianos, no debe haber daño en la estructura pero puede haber fisuras en las paredes. Ante sismos muy fuertes, poco probables pero posibles, no debe colapsar la estructura, es decir no debe derrumbarse, aunque puede haber gran daño en las paredes. Si una edificación pasa la prueba de un sismo pequeño, no quiere decir que necesariamente sea resistente para uno muy fuerte. Por otro lado, se podría pensar que ante un sismo muy fuerte es imposible que un edificio resista, entonces se aceptaría que se caiga. Esto no es aceptable para un diseño sismorresistente. Este debe garantizar que no colapse el edificio en el momento del evento telúrico. Podría ser que presente daños, tanto que, luego, con la evaluación de algún técnico, se concluyeran que la reparación costaría más que construir uno nuevo y decidieran derrumbarlo. Pero, debería después, no en el momento del sismo.
- De modo de tener edificaciones más seguras en nuestro país, deberían considerarse cinco aspectos en el diseño: un planteamiento arquitectónico sismorresistente, un muy buen diseño estructural para enfrentar cualquier escenario, ya sea de sismo pequeño, mediano o grande; control municipal, excelencia en la construcción y control de la construcción en la parte estructural y finalmente la fiscalización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referencia 1

Aguiar Roberto (2006). Dinámica de estructuras con MatLab. Quito. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Superior Politécnica del Ejército.

Referencia 2

Aguiar Roberto (2007). Factor de reducción por ductilidad. Quito. Escuela Superior Politécnica del Ejército.

Referencia 3

Aguiar R., Aragón E. y Marcelo Romo (2006). Revista internacional de Ingeniería de Estructuras. Vol. XI. Quito. Escuela Superior Politécnica del Ejército.

Referencia 4

Ampere (2010). Marcas y productos. <http://www.ampere.com.mx/index.php>

Referencia 5

Andrade, Sandra, y Blanca Chávez. (1990). Procesamiento y corrección de registros sísmicos. Quito. Escuela Politécnica Nacional.

Referencia 6

Arellano, Roberto. (1981). Apuntes de análisis vibracional de estructuras. Quito. Escuela Politécnica Nacional.

Referencia 7

Arellano, Roberto. (2006). Obtención de parámetros de diseño sismo-resistente, mediante una red de acelerógrafos. Informe técnico. Quito. Escuela Politécnica Nacional.

Referencia 8

Asociación ASTEC. (2005). Propuesta de red vial básica para optimizar el desarrollo de la zona nororiental del DMQ, incluyendo el NAIQ y la zona franca. Informe técnico. Quito.

Referencia 9

Barbat, Alex. (1982). Cálculo sísmico de las estructuras. Barcelona. Editores Técnicos Asociados, S. A.

Referencia 10

Carreño E., Bravo B., Suarez A. y J.M. Torde sillas (1999). Registro y Tratamiento de Acelerogramas. Instituto Geográfico Nacional.
<http://revistas.ucm.es/fis/02144557/articulos/FITE9999110081A.PDF>

Referencia 11

Chenche, T (2005). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de Guayaquil. ESPOL.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8384/3/8400.pdf>

Referencia 12

Chopra, Anil. (1995). Dynamics of Structures: Theory and applications to earthquake engineering. New Jersey. Prentice – Hall, Inc.

Referencia 13

Clough, Ray, y Joseph Penzien. (1995). Dynamics of Structures: Theory and applications to earthquake engineering. Berkeley. Computers & Structures, Inc.

Referencia 14

Código Ecuatoriano de la Construcción (2002). Peligro sísmico, espectros de diseño y requisitos mínimos de cálculos para diseño sismo-resistente. Quito.

Referencia 15

Coral, Hugo, (1998). Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra. UPC.
http://www.tdr.cesca.es/TDX-0129103-133444/index_cs.html

Referencia 16

Correa, Cristian, Hinojosa, Dayanara y Taipe Mercedes (2003). Sismicidad histórica en el Ecuador. Quito. Instituto Geofísico EPN.

Referencia 17

Cosmos Strong Motion Program (2010). COSMOS Virtual Data Center.
<http://db.cosmos-eq.org/scripts/earthquakes.plx>

Referencia 18

Crisafulli, Francisco y Elbio Villafañe (2002). Espectro de respuesta y de diseño. Cuyo. Universidad Nacional de Cuyo.

Referencia 19

Earthquake Hazard Program (2010). Quaternary Faults in Google Earth.
<http://earthquake.usgs.gov/hazards/qfaults/google.php>

Referencia 20

Egred, J. (1999) Los terremotos y su incidencia en el Ecuador. Quito. Instituto Geofísico EPN.

Referencia 21

Fernández, Genoveva. (1984). Espectros de Ductilidad de Sistemas Elasto-Plásticos. Quito. Escuela Politécnica Nacional.

Referencia 22

Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (2010). Glosario Sismológico. http://www.funvisis.gob.ve/mecanismos_focales.php

Referencia 23

García, E. (1997). Espectros de Energía. X Curso Nacional de Estructuras. Escuela Politécnica del Ejército. Sangolquí.

Referencia 24

Guéguen P., Chatelain J.-L., Guillier B. y H. Yepes (2000). An indication of the soil topmost layer response in Quito (Ecuador) using noise H/V spectral ratio. Soil Dynamics and Earthquake Engineering Vol. 19. 127–133.

Referencia 25

Hudson, D.E. (1979). Reading and interpreting strong motion accelerograms. Earthquakes Engineering Research Institute. Pasadena, California.

Referencia 26

INEN (2001). Código Ecuatoriano de la Construcción. Requisitos Generales de Diseño. Primera edición. Quito, Ecuador.

Referencia 27

Instituto Colombiano de Geología y Minas (2010). Red Sismológica Nacional de Colombia. <http://seisan.ingominas.gov.co/RSNC/>

Referencia 28

Instituto Geofísico (2009). Mapa y base de datos de pliegues y fallas cuaternarios del Ecuador y su zona costera. EPN. <http://www.igepn.edu.ec/>

Referencia 29

Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador (2010). Estudios de Tsunamis: Eventos en el Ecuador.
<http://www.inocar.mil.ec/links.php?C=6&S=4&SbS=0&idC=4>

Referencia 30

Meneses, Jorge F. y Jorge Alva (1986). Determinación del espectro elástico de diseño y coeficiente sísmico para Lima. Centro peruano japonés de investigaciones sísmicas y mitigación de desastres. Perú.
www.cismid.uni.edu.pe/descargas/redacis/redacis14_a.pdf

Referencia 31

Nigam, Navin C., y Paul Jennings. (1968). Digital calculation of response spectra from strong motion earthquakes records. California.

Referencia 32

Organización Panamericana de la Salud. (2004). Guías de reducción de vulnerabilidad en el diseño de nuevos establecimientos de salud. Washington D.C.

Referencia 33

Pacific Earthquake Engineering Research Center (2010). PEER Strong Motion Database. <http://peer.berkeley.edu/>

Referencia 34

Paz Mario. (1985). Structural Dynamics: Theory and Computation. New York. Van Nostrand Reinhold Company.

Referencia 35

Posso Gerardo. (1985). Estudio preliminar del riesgo sísmico en el Ecuador. Quito. Escuela Politécnica Nacional.

Referencia 36

Roca Antoni (1989). Instrumentación para campo cercano y análisis de acelerogramas. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.

<http://revistas.ucm.es/fis/02144557/articulos/FITE8989110131A.PDF>.

Referencia 37

Rosenblueth E., y Nathan Newmark. (1971). Fundamentos de Ingeniería Sísmica. México. Editorial Diana.

Referencia 38

Southern California Earthquake Data Center (2010). SCEC Clickable Fault Map of Southern California. <http://www.data.scec.org/faults/faultmap.html>

Referencia 39

Swanberg Paúl. (1982). Cálculo digital de espectros de respuesta a partir de movimientos sísmicos fuertes. Quito. Escuela Politécnica Nacional.

Referencia 40

Villacres Alex (1993). Análisis espectral de acelerogramas de movimientos fuertes del terreno y estructuras. Guayaquil. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Referencia 41

Whittaker A., Hart G., y Rojahn C., (1999). Seismic response modification factors. Journal of Structural Engineering.

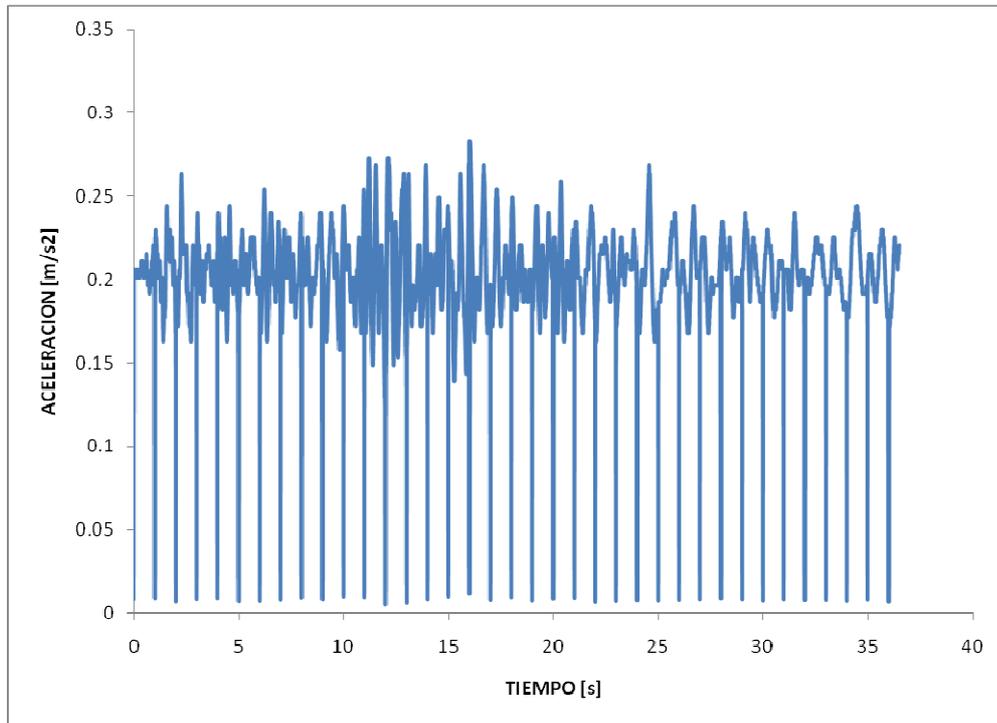
ANEXOS

ANEXO No. 1**ACELERACIONES NO CORREGIDAS**

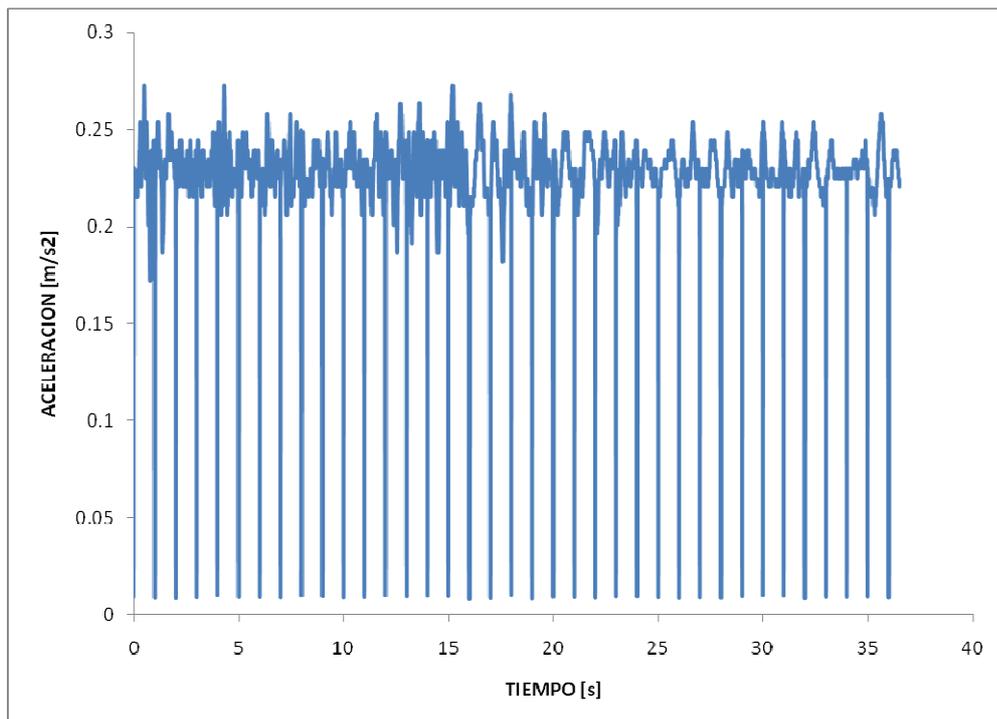
ACELERACIONES NO CORREGIDAS

1. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C001. COMPONENTE S 15 45' W.



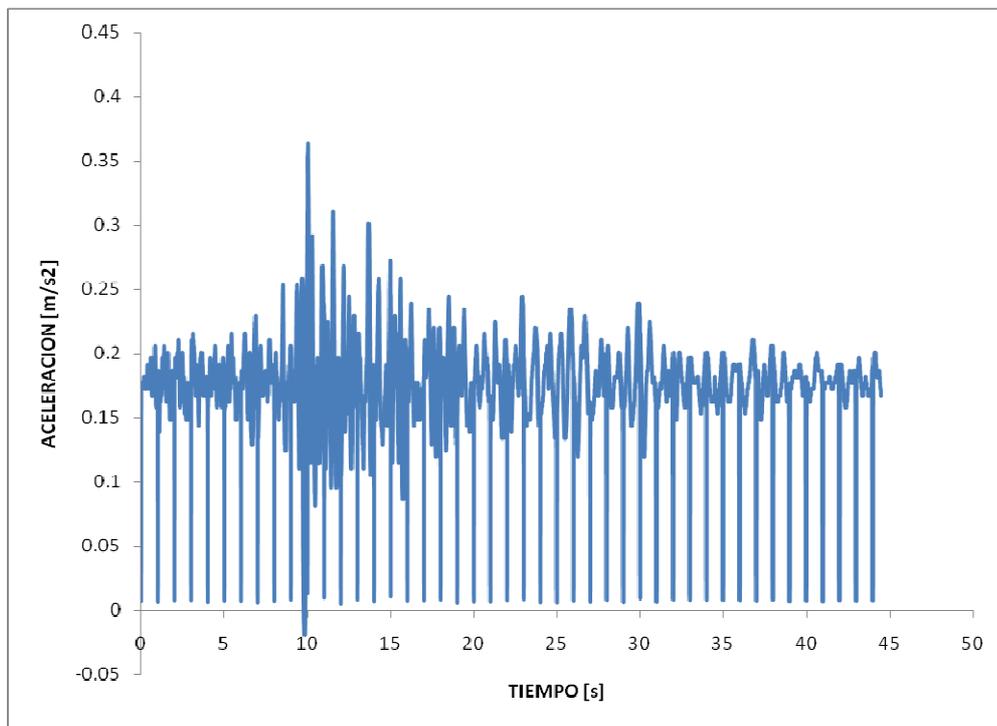
SB55C001. COMPONENTE N 15 45' E.



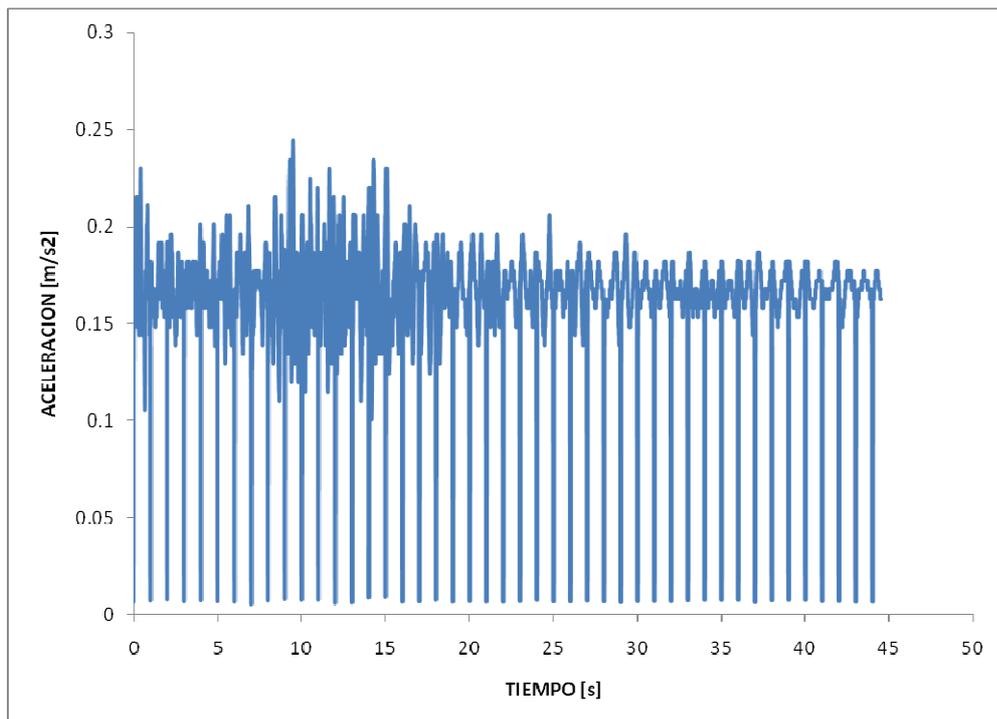
ACELERACIONES NO CORREGIDAS

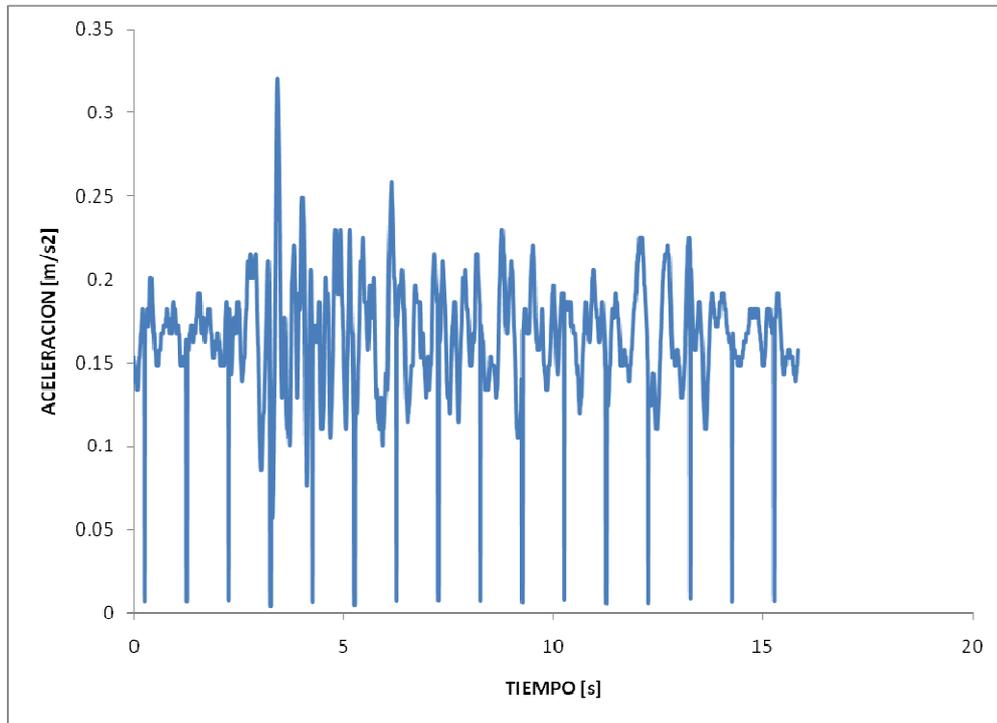
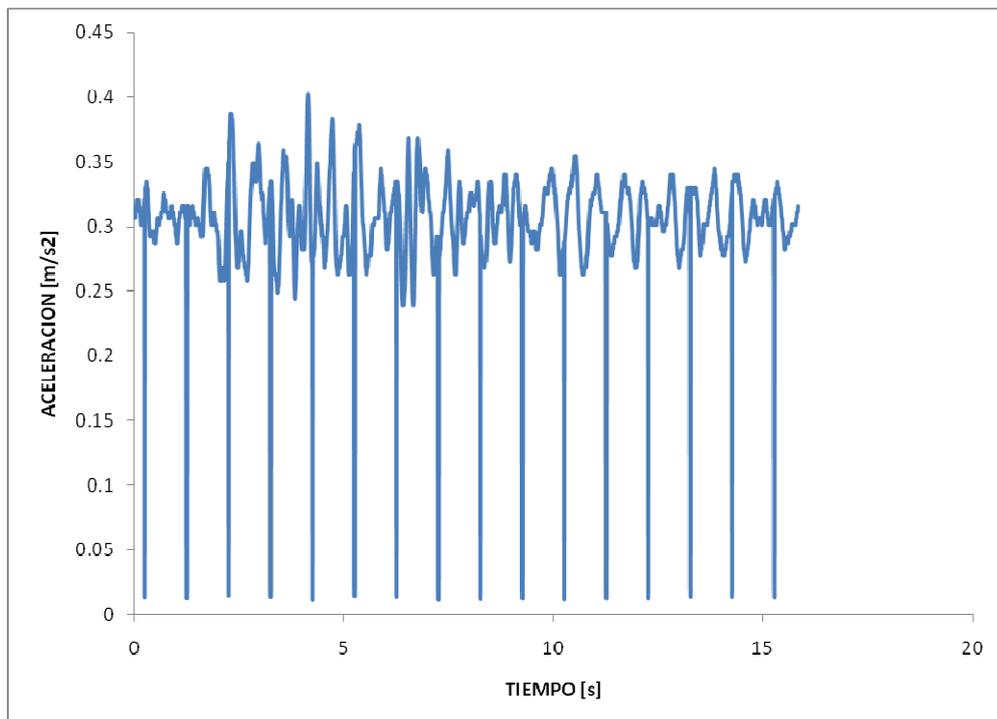
2. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 2: COLEGIO BORJA

CB56C001. COMPONENTE S 11 15' W.



CB56C001. COMPONENTE N 11 15' E.

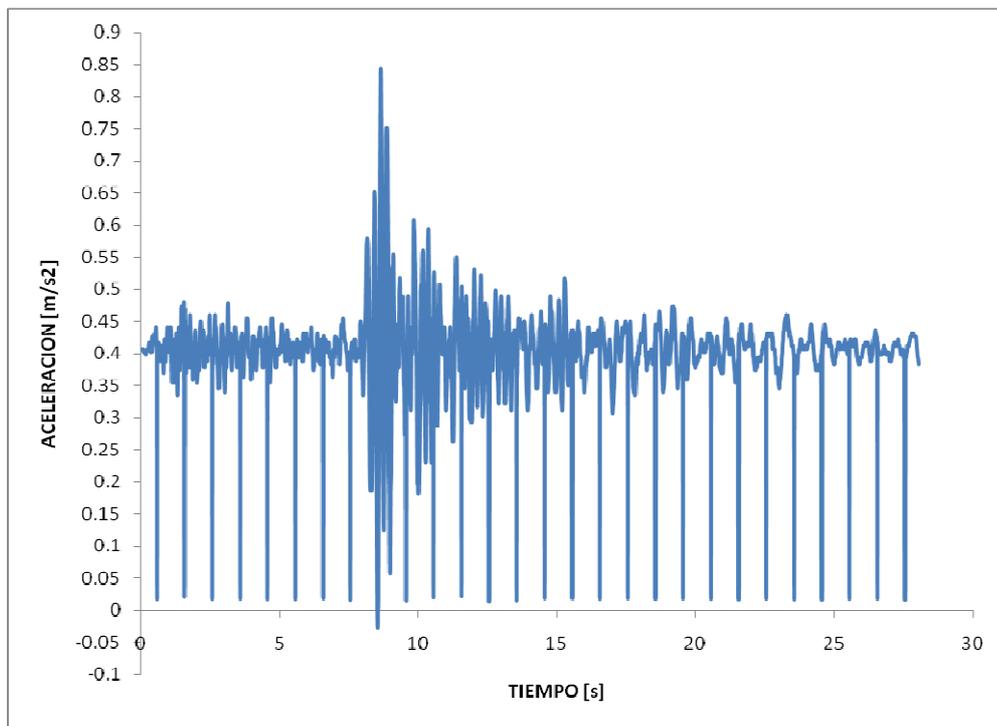


ACELERACIONES NO CORREGIDAS**3. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 3: HOSPITAL METROPOLITANO****HM57C001. COMPONENTE E - W.****HM57C001. COMPONENTE N - S.**

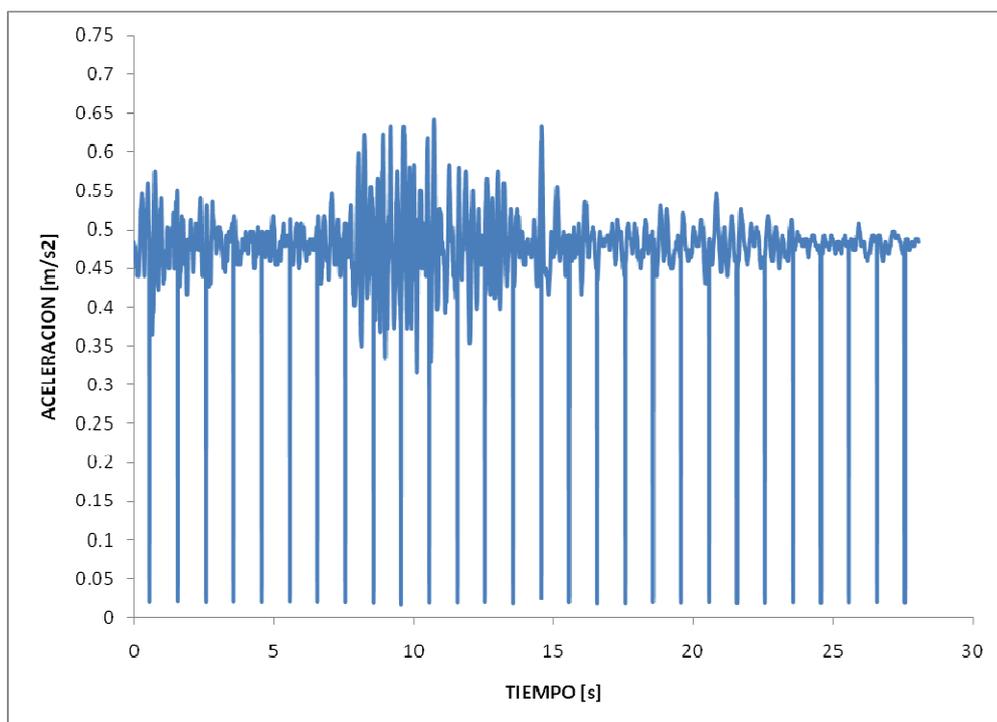
ACELERACIONES NO CORREGIDAS

4. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 4: MUSEO AURELIO ESPINOSA

AE60C001. COMPONENTE S 21 22' E.



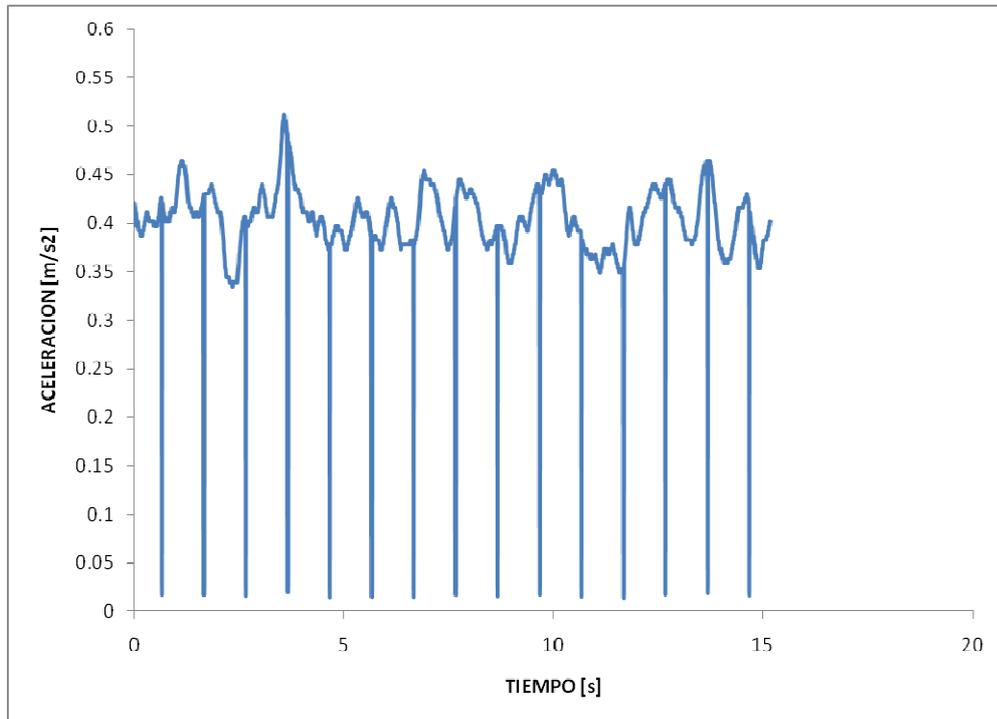
AE60C001. COMPONENTE N 21 22' W.



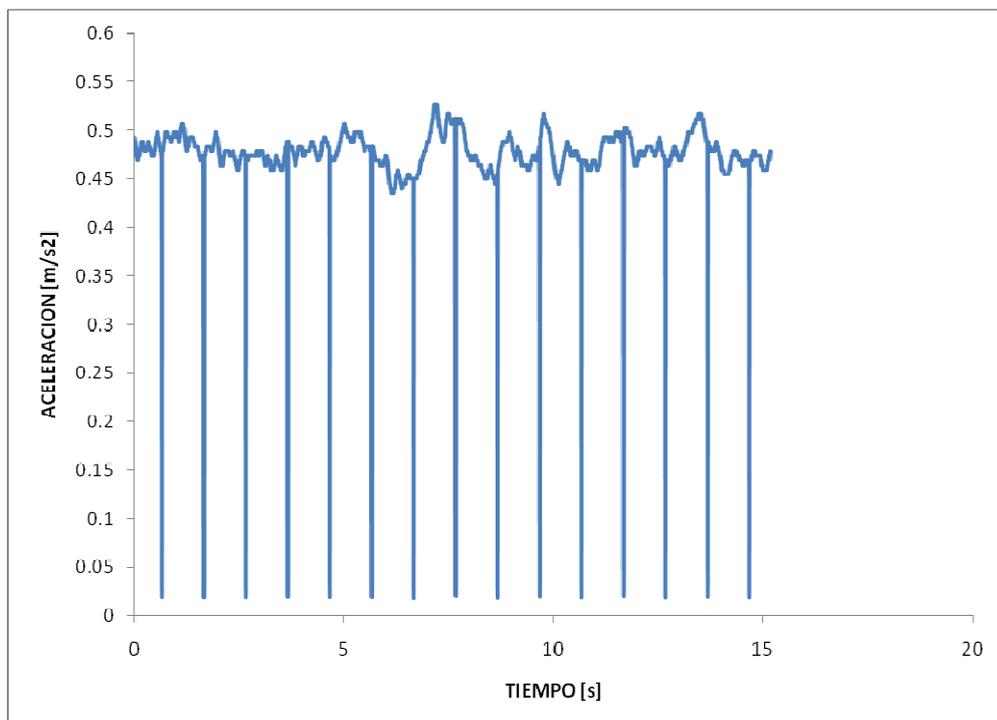
ACELERACIONES NO CORREGIDAS

5. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

AE60C002. COMPONENTE S 21 22' E.



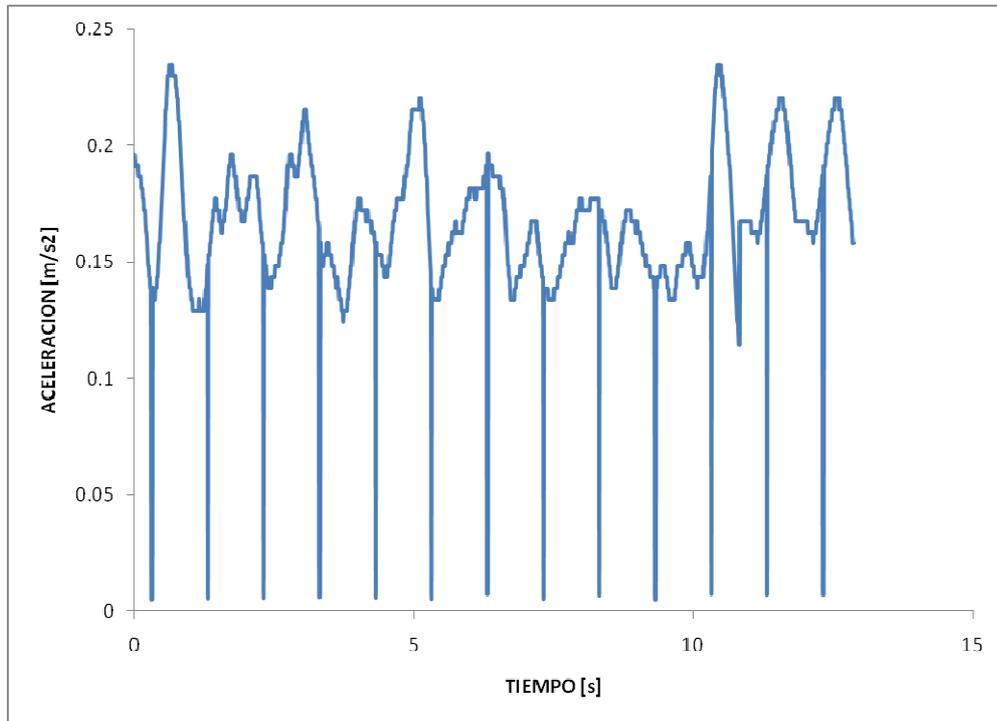
AE60C002. COMPONENTE N 21 22' W.



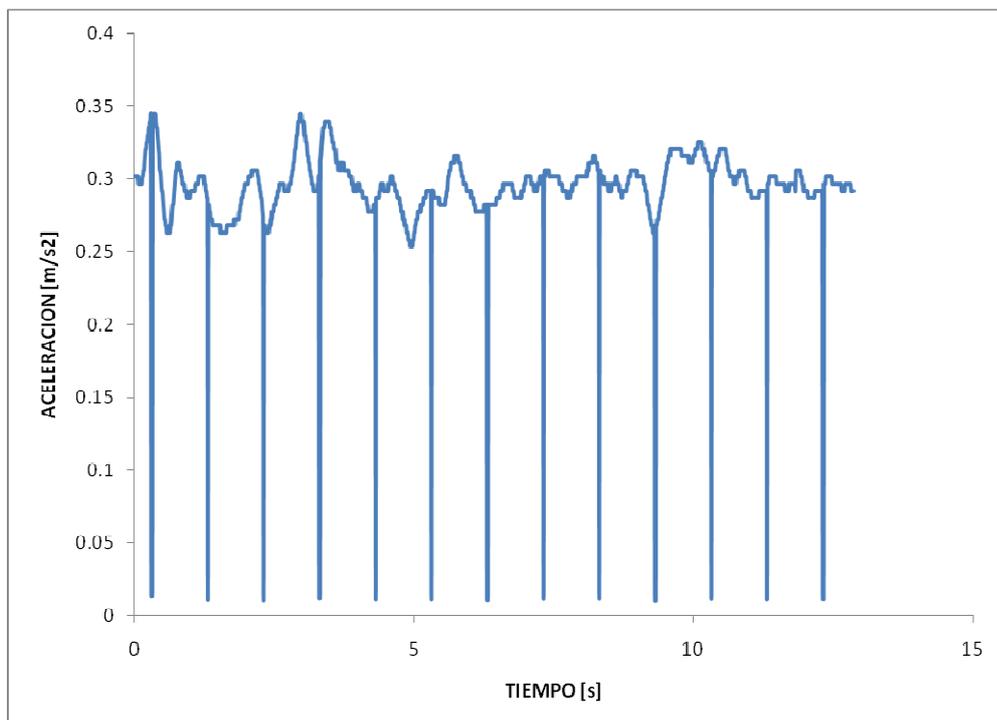
ACELERACIONES NO CORREGIDAS

6. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 2: HOSPITAL METROPOLITANO

HM57C003. COMPONENTE E - W.



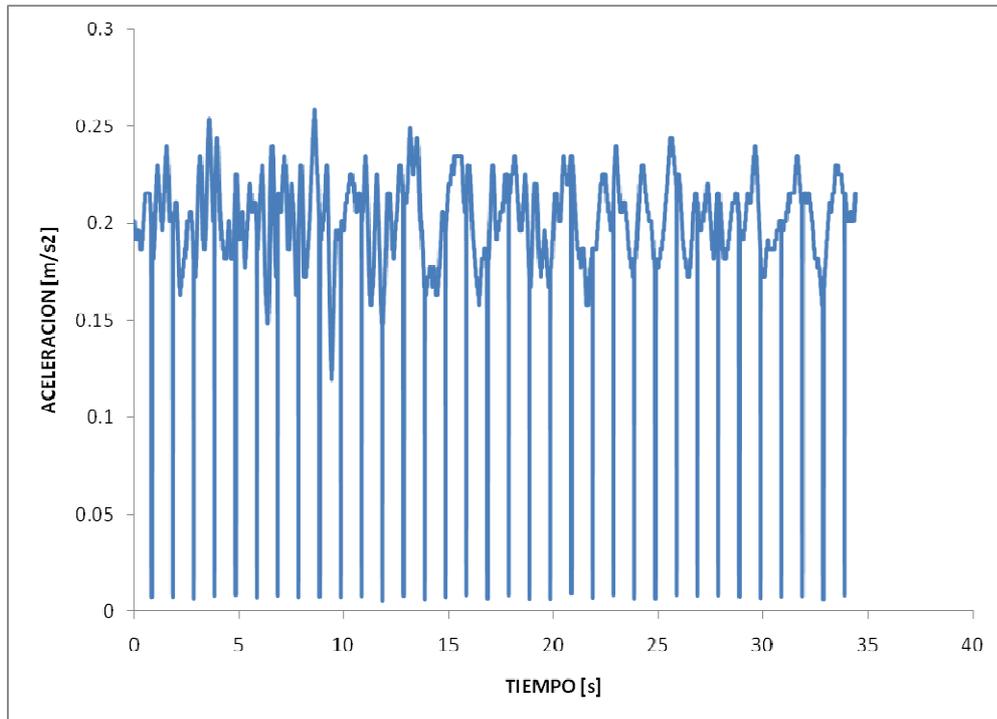
HM57C003. COMPONENTE N - S.



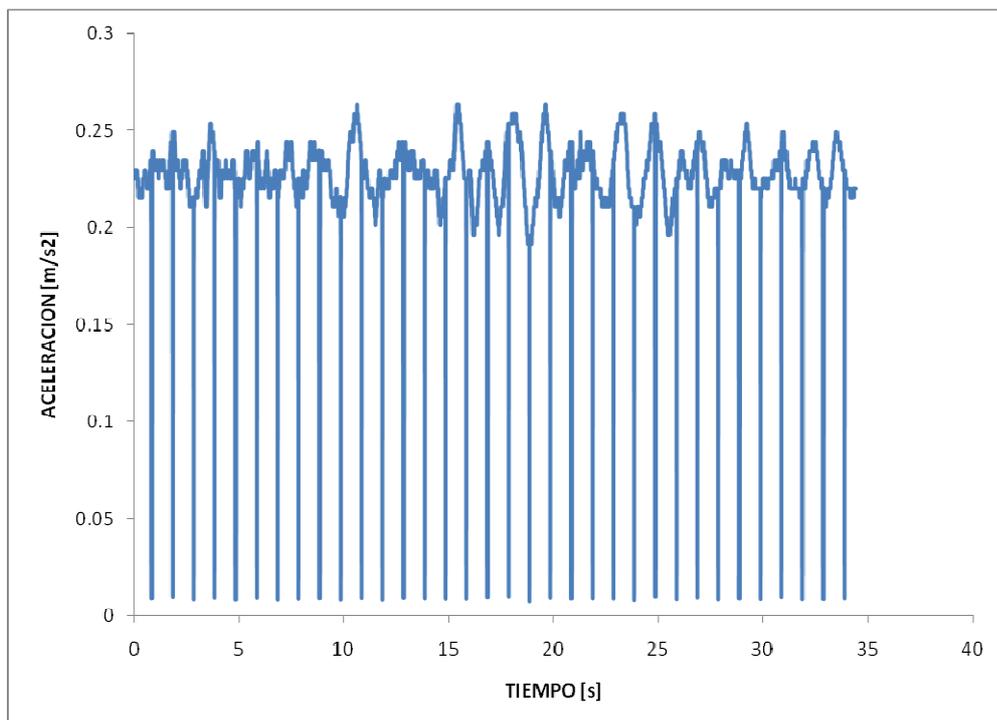
ACELERACIONES NO CORREGIDAS

7. EVENTO 3: 3 octubre 95. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C002. COMPONENTE S 15 45' W.



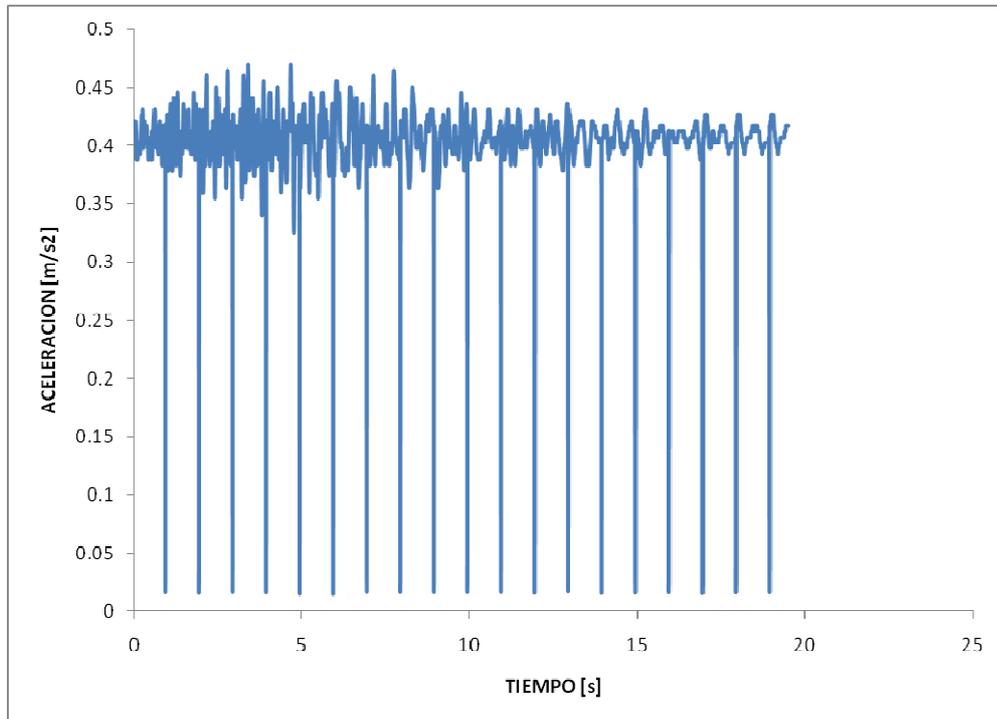
SB55C002. COMPONENTE N 15 45' E.



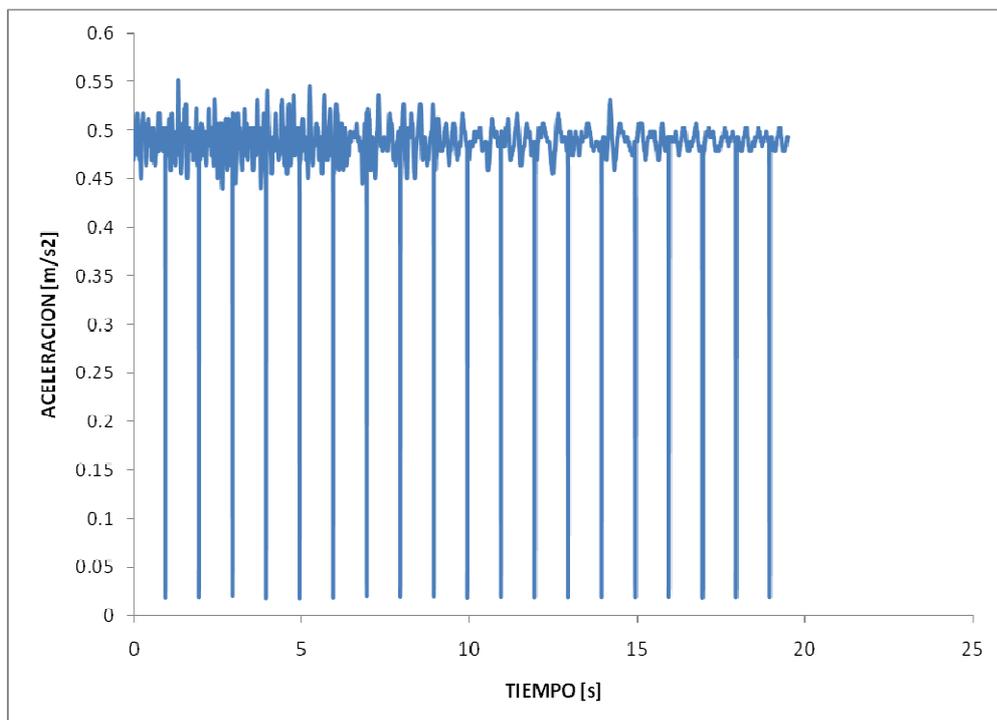
ACELERACIONES NO CORREGIDAS

8. EVENTO 4: 17 enero 96. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

AE60C003. COMPONENTE S 21 22' E.



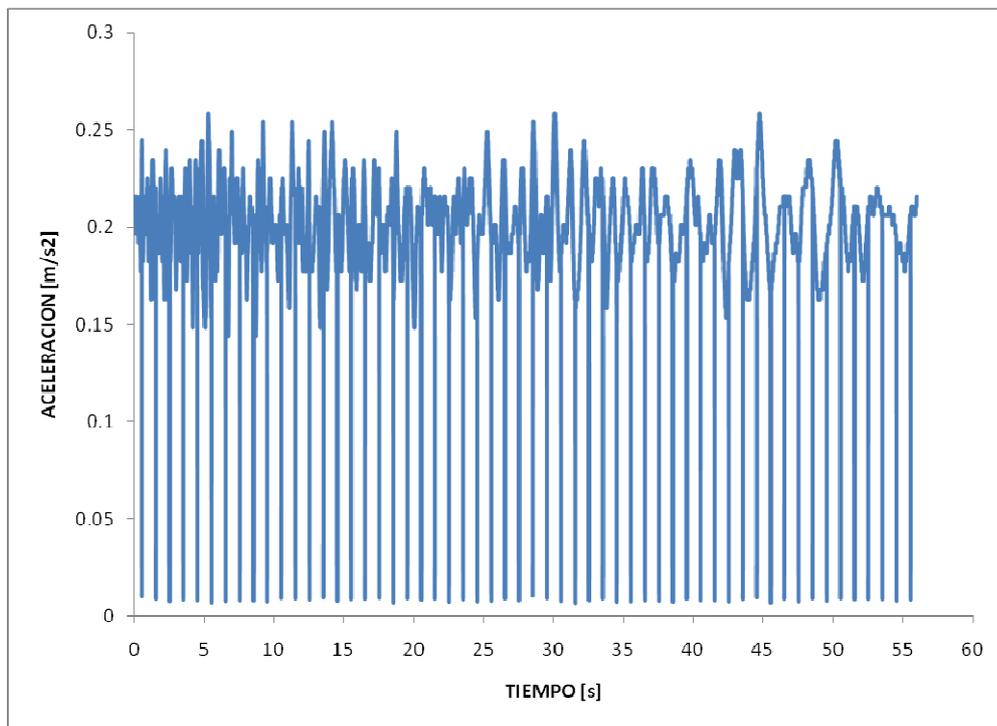
AE60C003. COMPONENTE N 21 22' W.



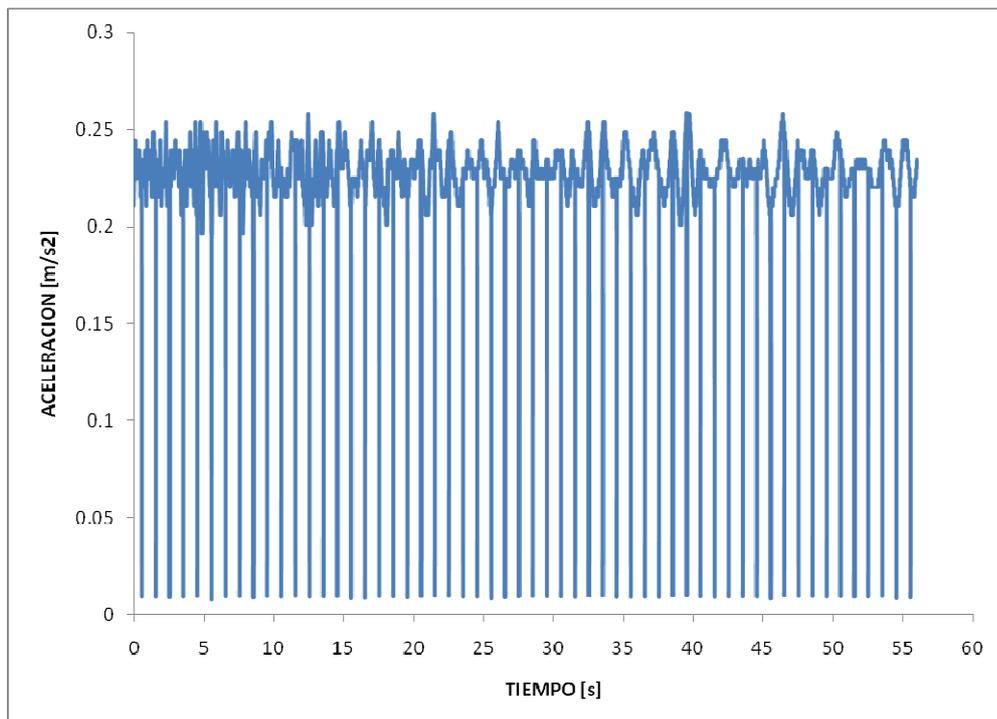
ACELERACIONES NO CORREGIDAS

9. EVENTO 5: 28 marzo 96. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C006. COMPONENTE S 15 45' W.

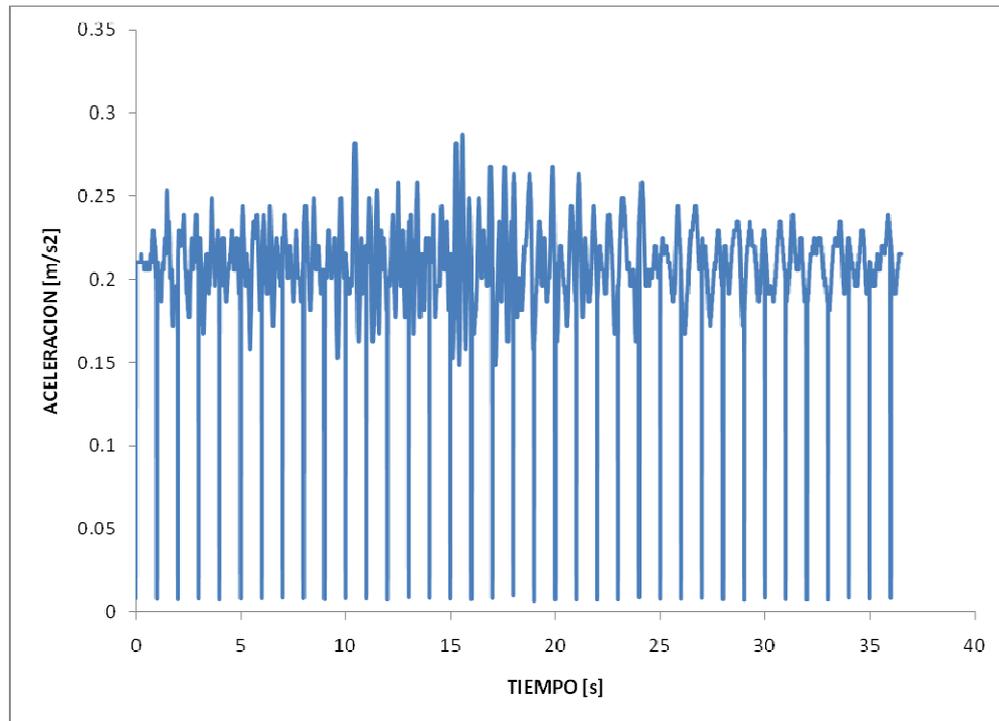


SB55C006. COMPONENTE N 15 45' E.

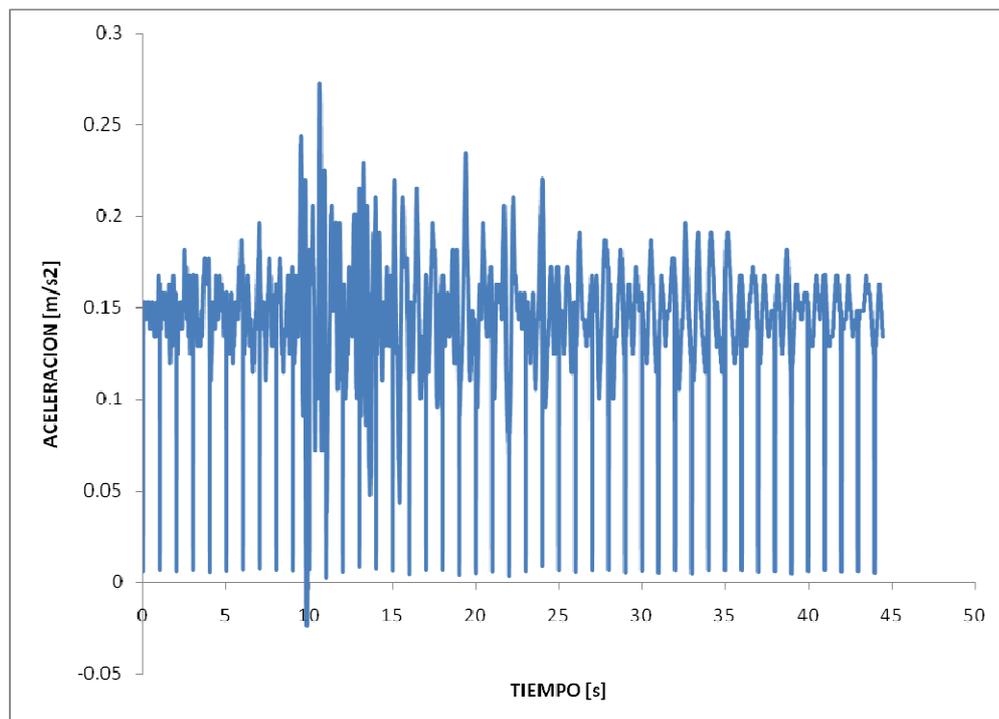


ACELERACIONES NO CORREGIDAS

1. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 1: SAN BARTOLO
SB55C001. COMPONENTE VERTICAL.

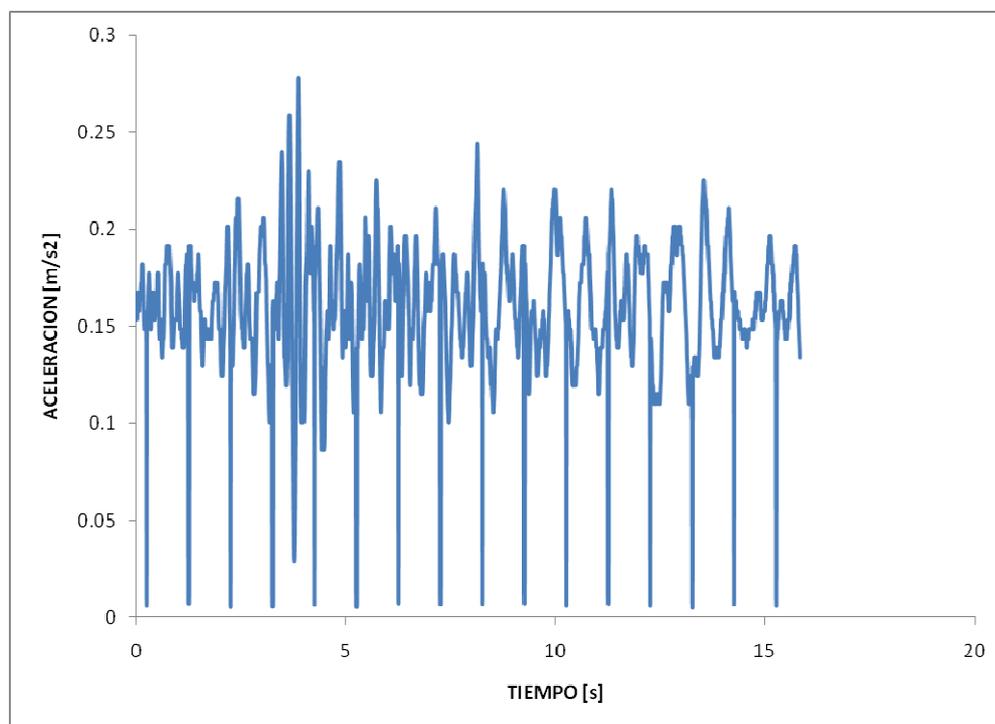


2. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 2: COLEGIO BORJA
CB56C001. COMPONENTE VERTICAL

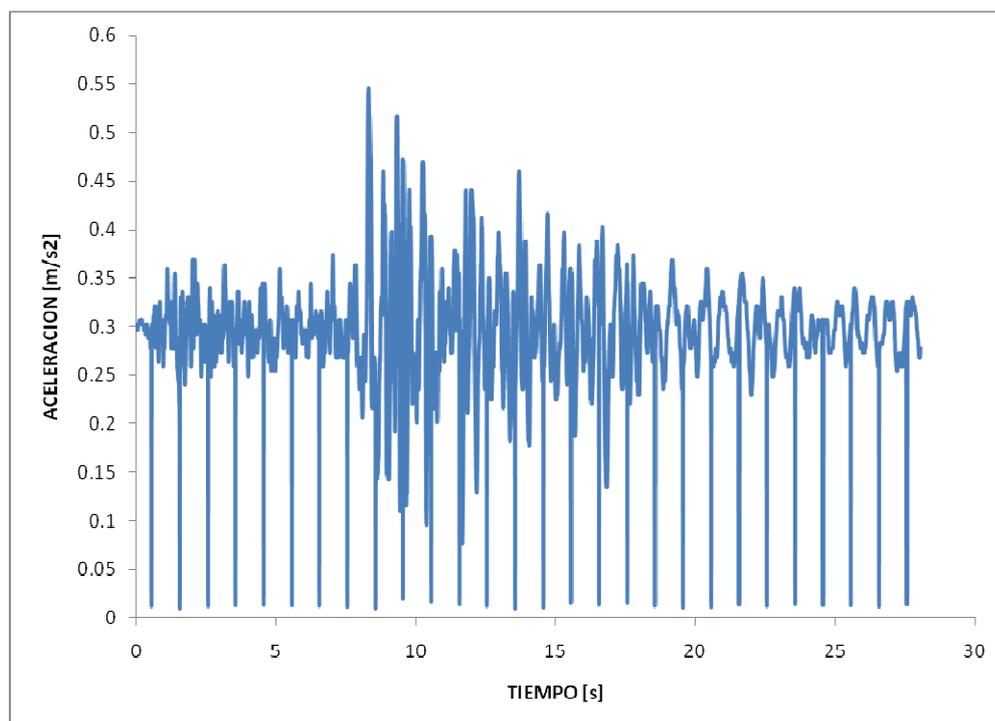


ACELERACIONES NO CORREGIDAS

3. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 3: HOSPITAL METROPOLITANO
HM57C001. COMPONENTE VERTICAL.

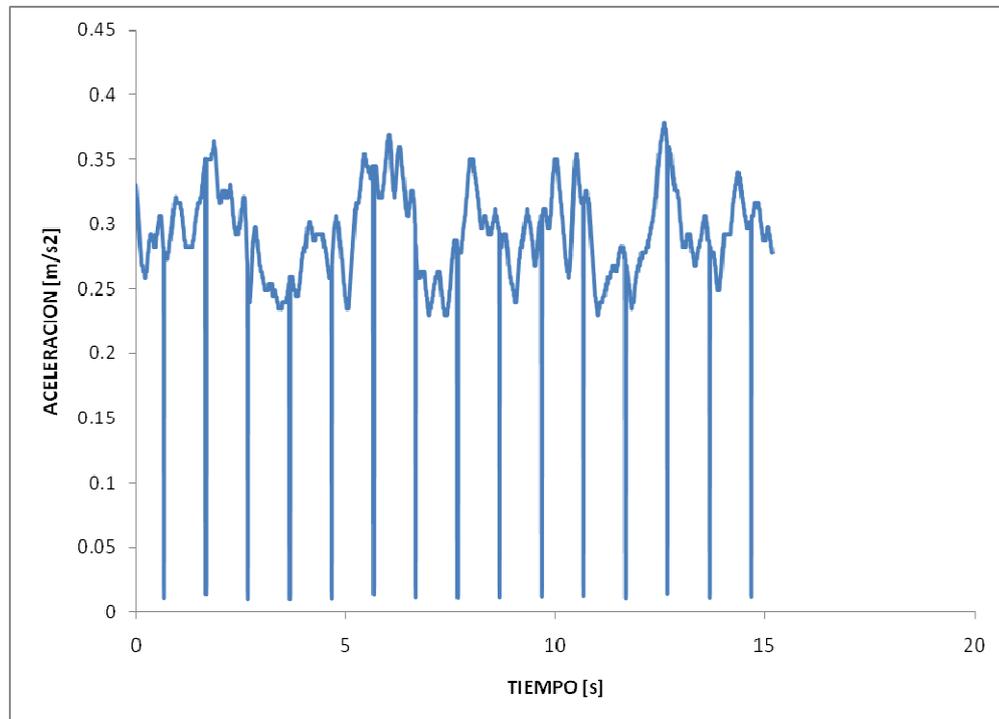


4. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 4: MUSEO AURELIO ESPINOSA
AE60C001. COMPONENTE VERTICAL

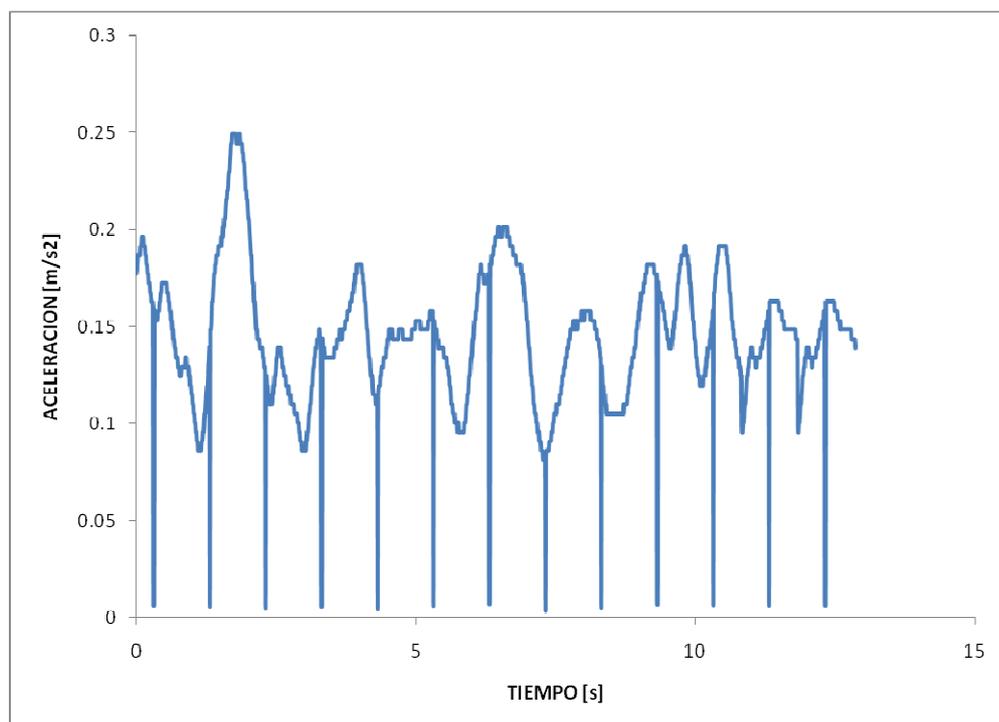


ACELERACIONES NO CORREGIDAS

5. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA
AE60C002. COMPONENTE VERTICAL

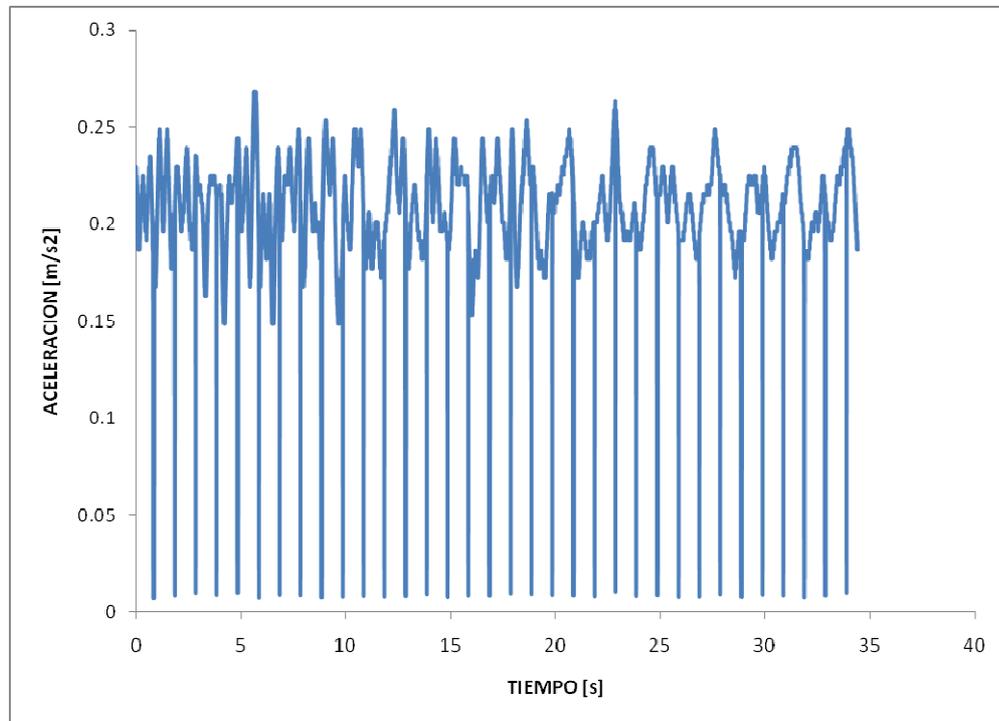


6. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 2: HOSPITAL METROPOLITANO
HM57C003. COMPONENTE VERTICAL

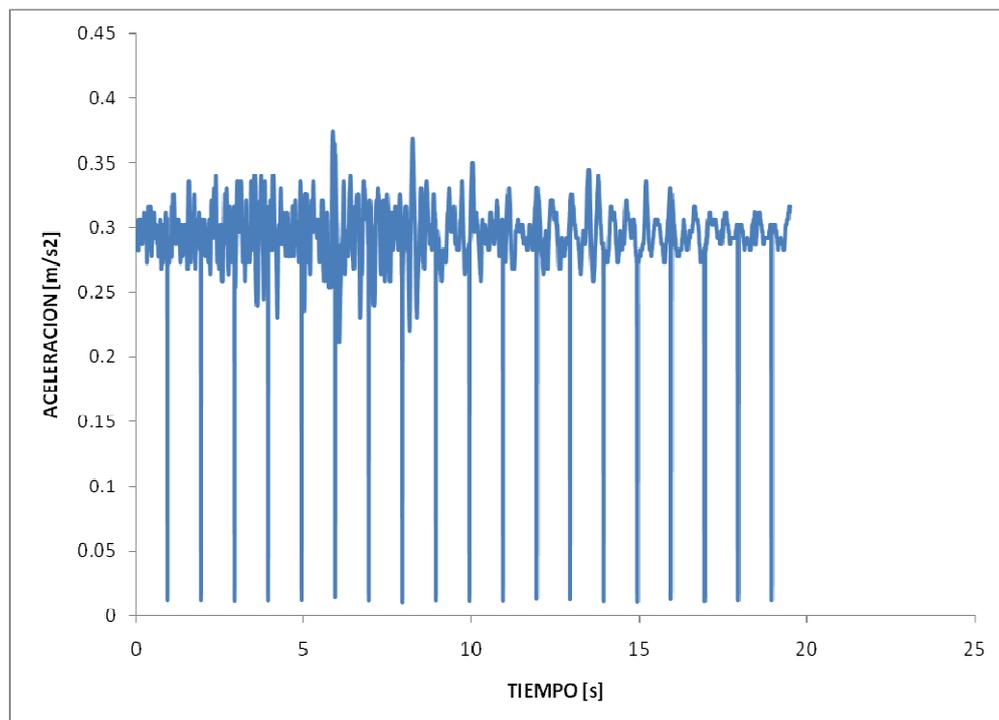


ACELERACIONES NO CORREGIDAS

7. EVENTO 3: 3 octubre 95. ESTACION 1: SAN BARTOLO
SB55C002. COMPONENTE VERTICAL

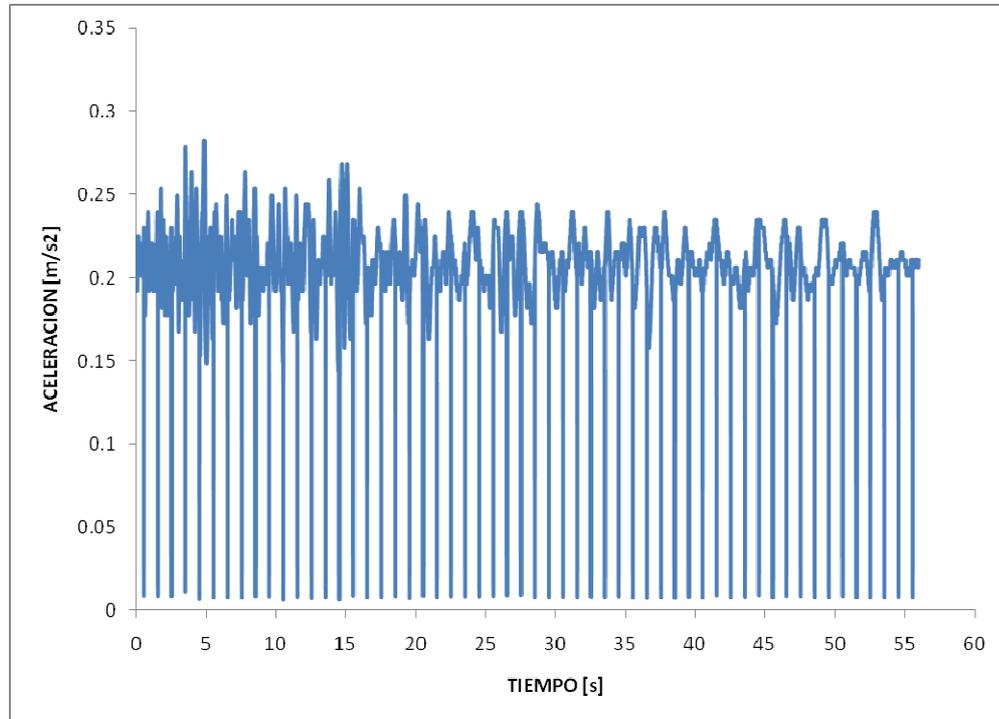


8. EVENTO 4: 17 enero 96. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA
AE60C003. COMPONENTE VERTICAL



ACELERACIONES NO CORREGIDAS

9. EVENTO 5: 28 marzo 96. ESTACION 1: SAN BARTOLO
SB55C006. COMPONENTE VERTICAL



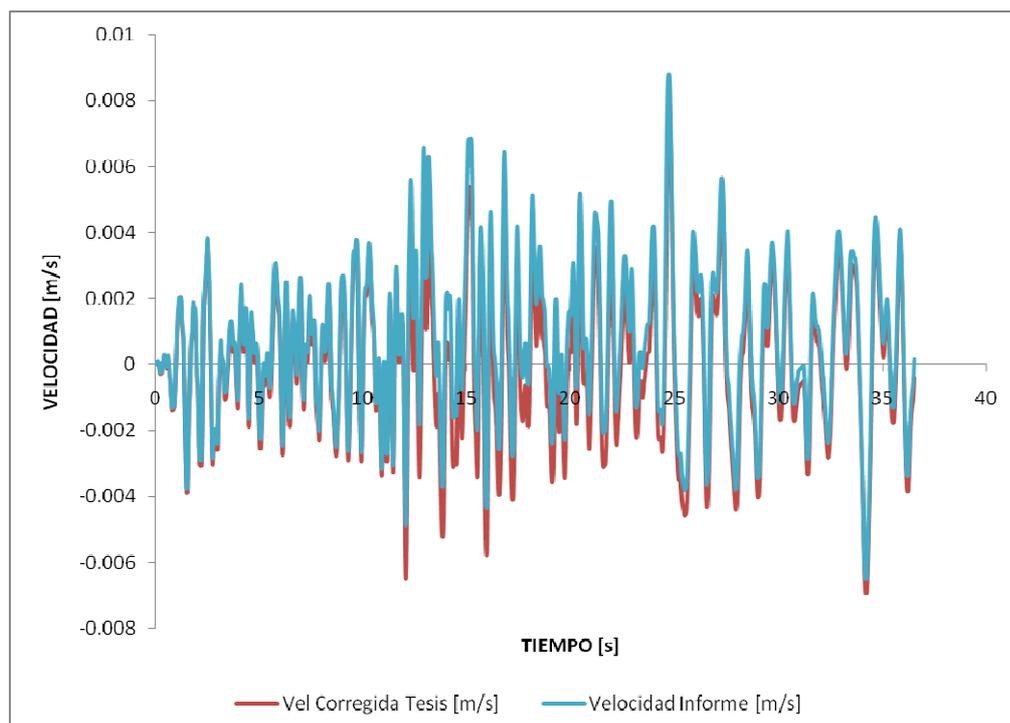
ANEXO No. 2

CORRECCIÓN POR LÍNEA BASE

CORRECCIÓN POR LÍNEA BASE

1. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 1: SAN BARTOLO

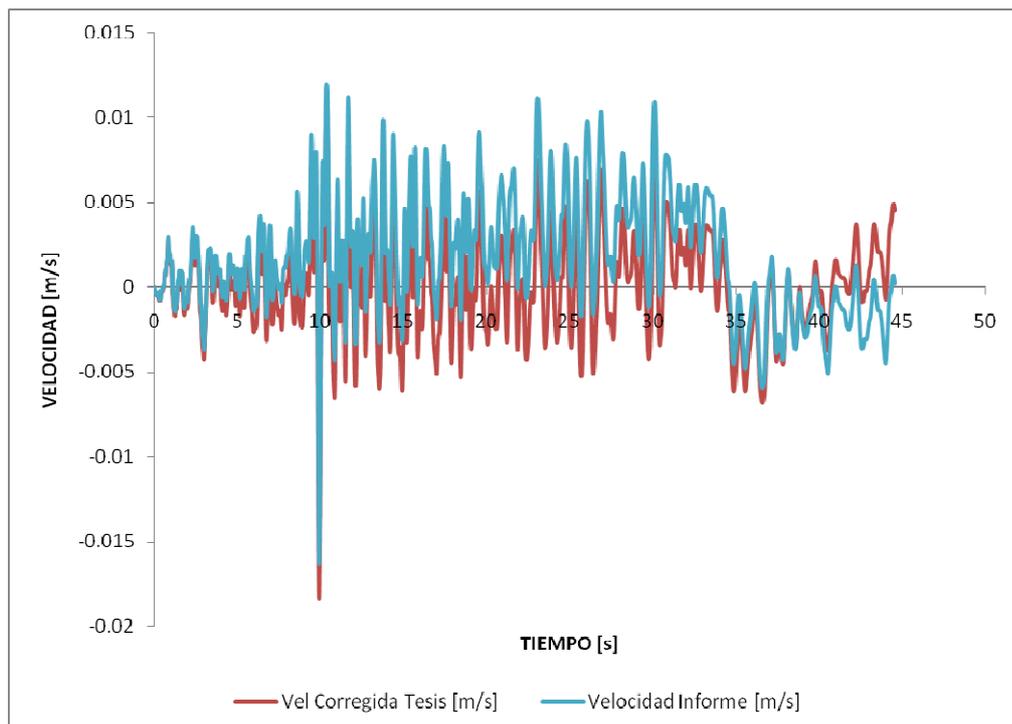
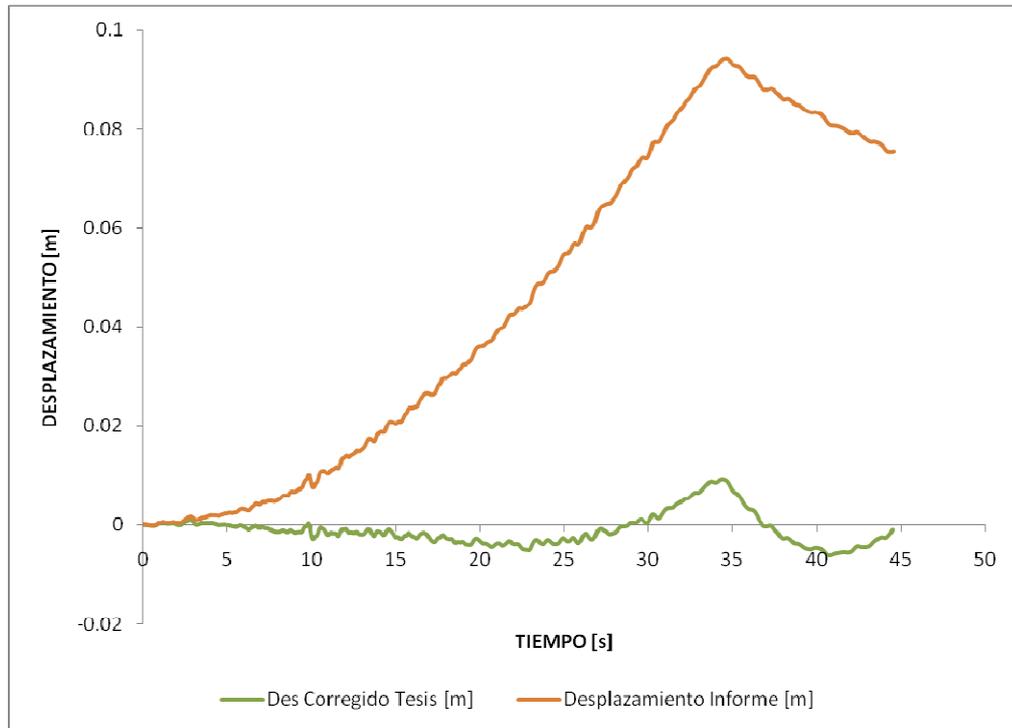
SB55C001. COMPONENTE S 15 45' W.



CORRECCIÓN POR LÍNEA BASE

2. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 2: COLEGIO BORJA

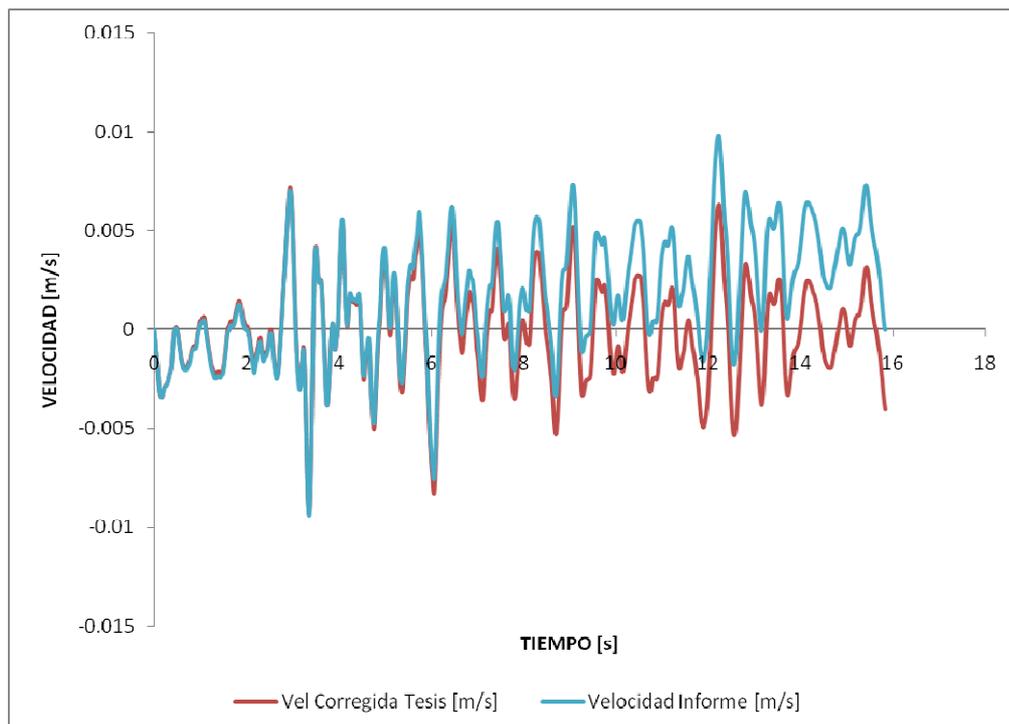
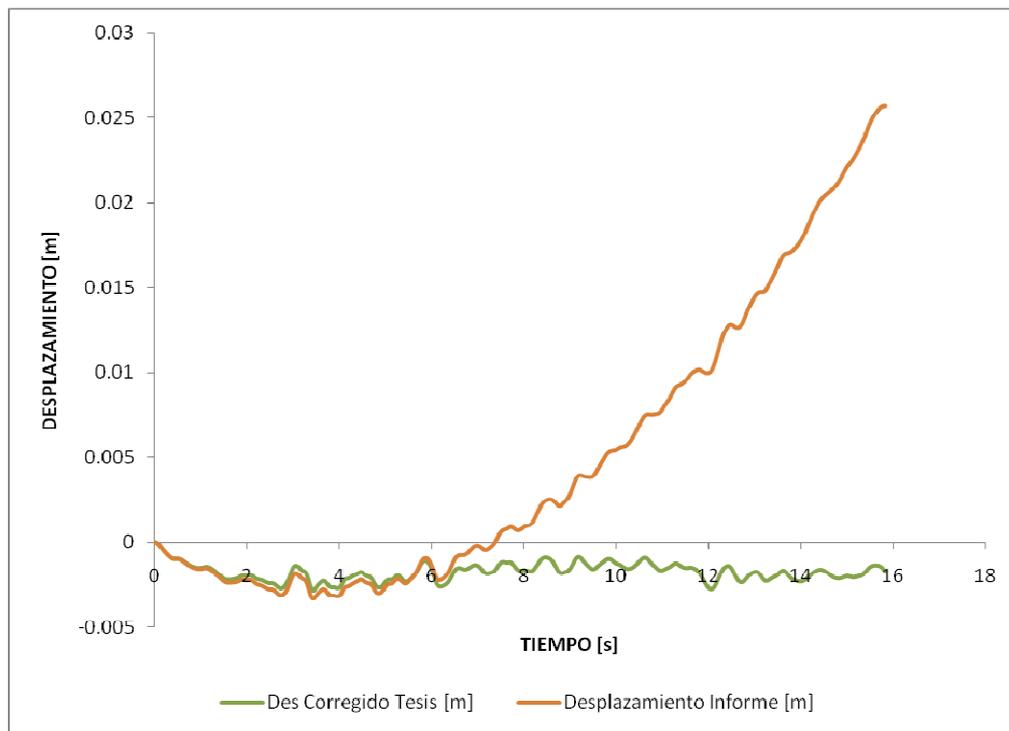
CB56C001. COMPONENTE S 11 15' W.



CORRECCIÓN POR LÍNEA BASE

3. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 3: HOSPITAL METROPOLITANO

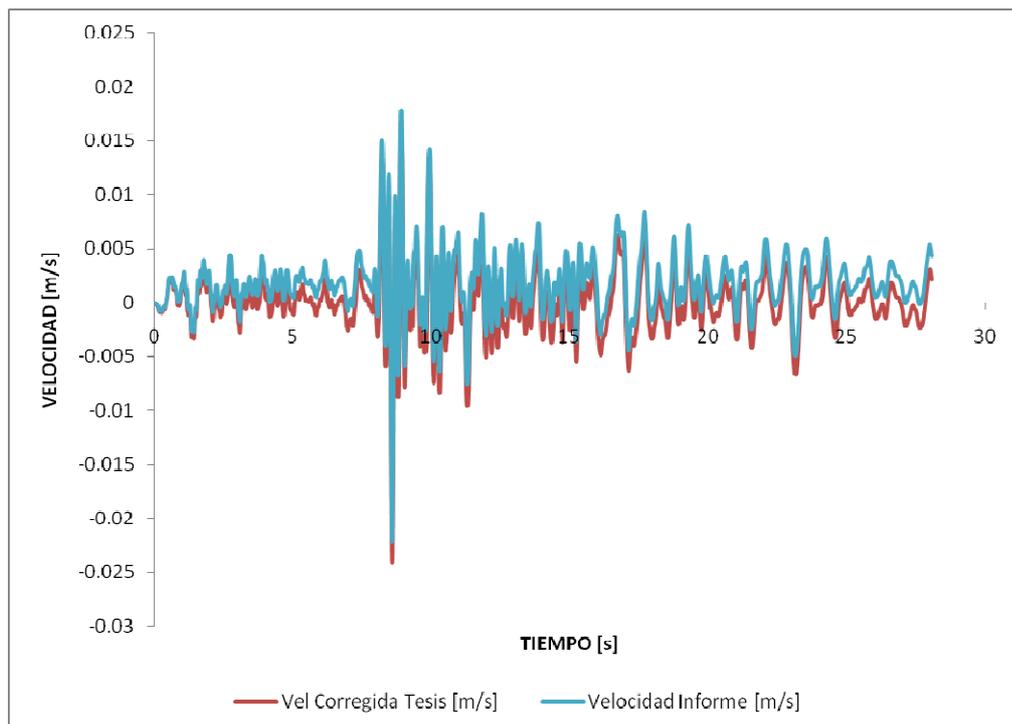
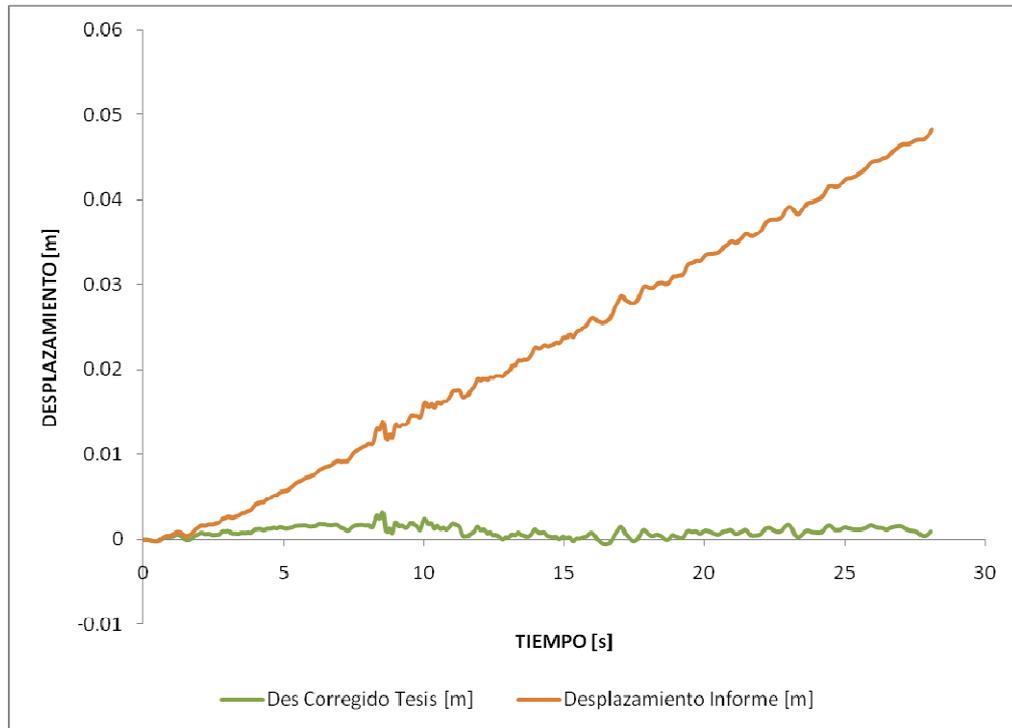
HM57C001. COMPONENTE E - W.



CORRECCIÓN POR LÍNEA BASE

4. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 4: MUSEO AURELIO ESPINOSA

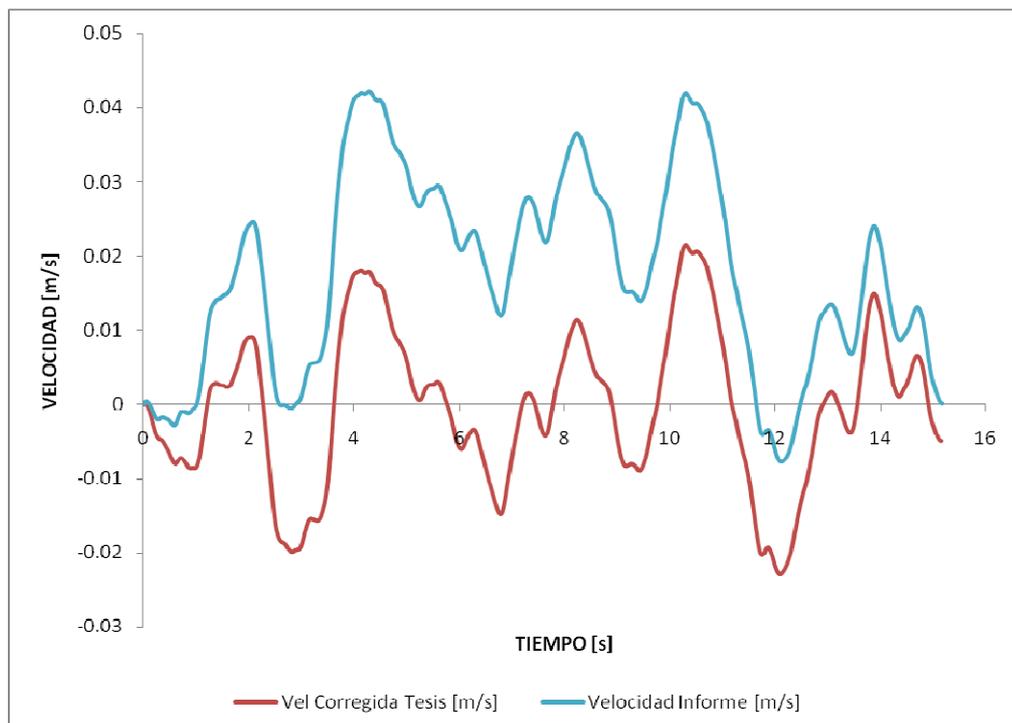
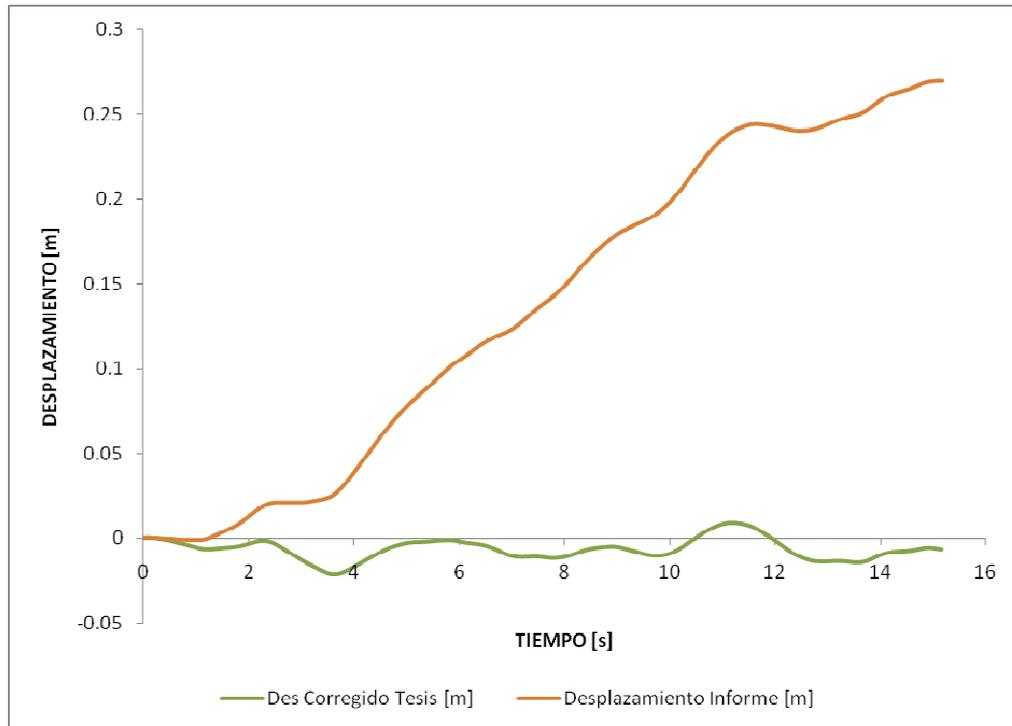
AE60C001. COMPONENTE S 21 22' E.



CORRECCIÓN POR LÍNEA BASE

5. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

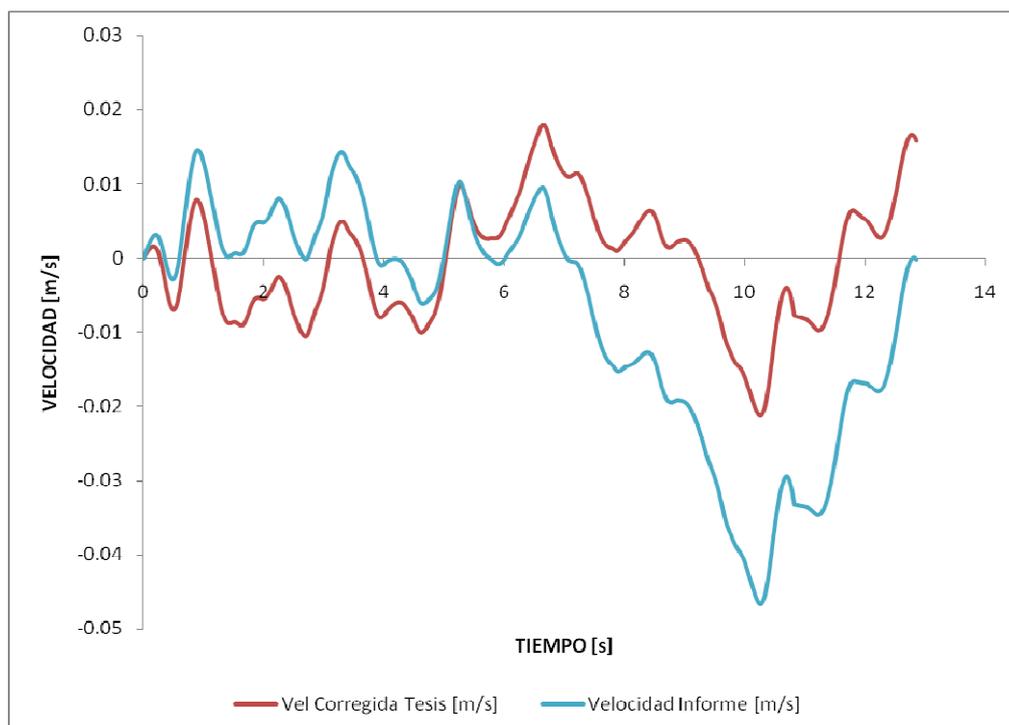
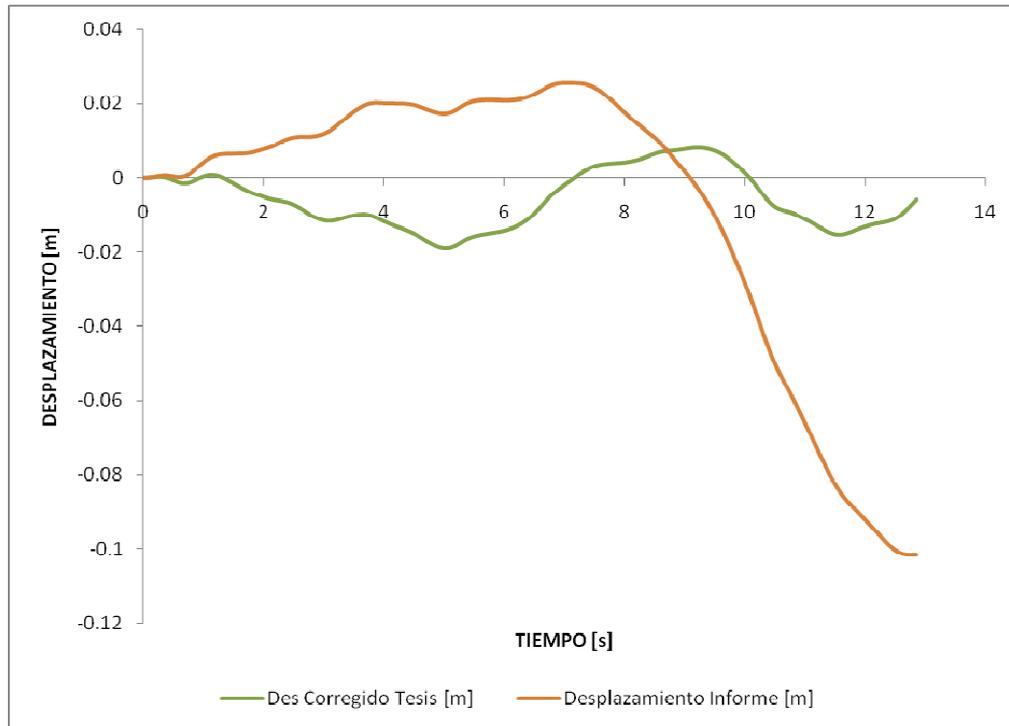
AE60C002. COMPONENTE S 21 22' E.



CORRECCIÓN POR LÍNEA BASE

6. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 2: HOSPITAL METROPOLITANO

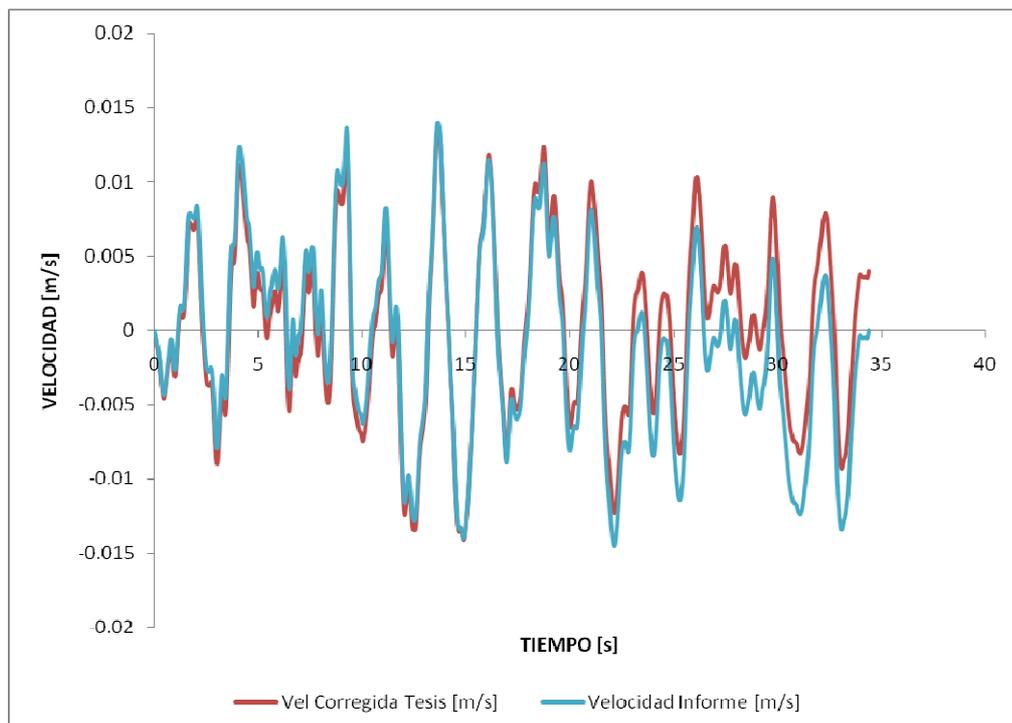
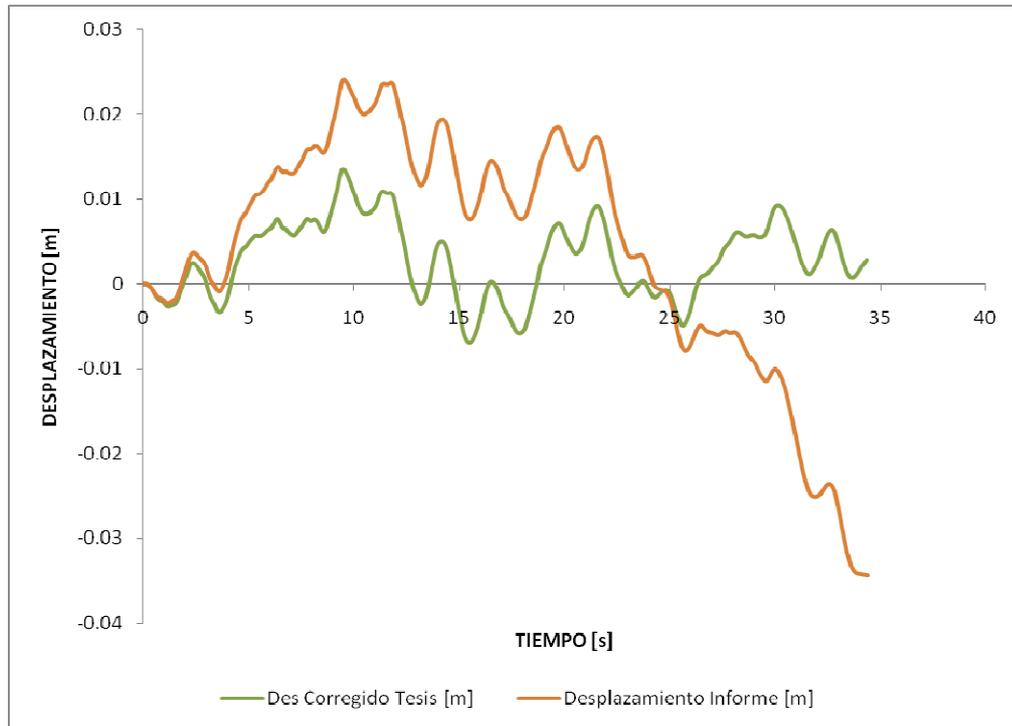
HM57C003. COMPONENTE E - W.



CORRECCIÓN POR LÍNEA BASE

7. EVENTO 3: 3 octubre 95. ESTACION 1: SAN BARTOLO

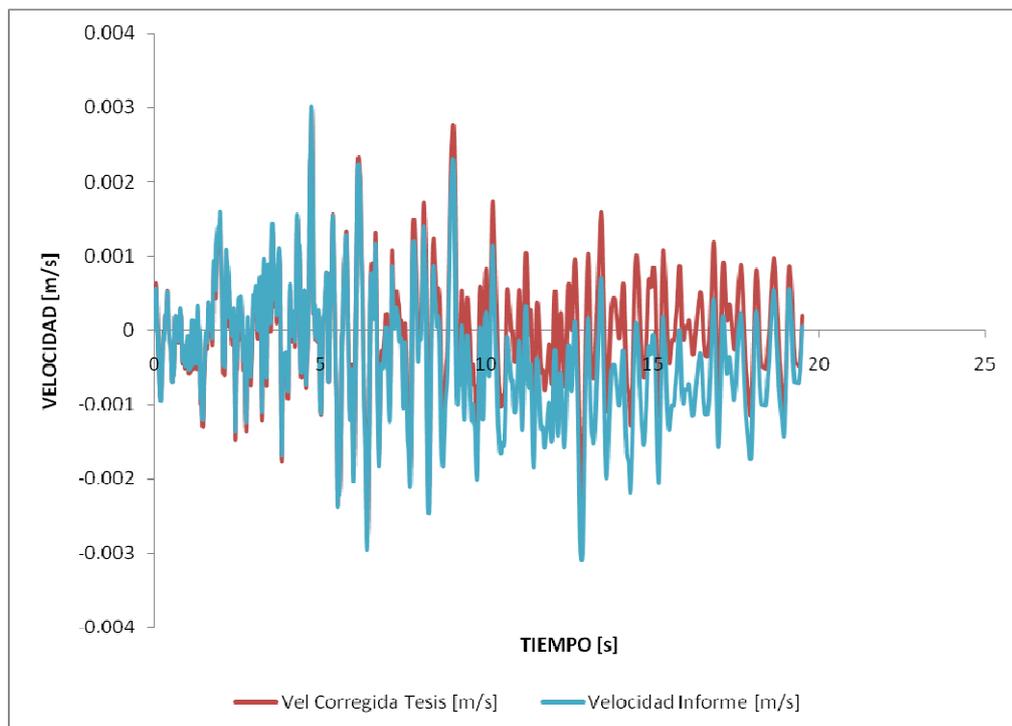
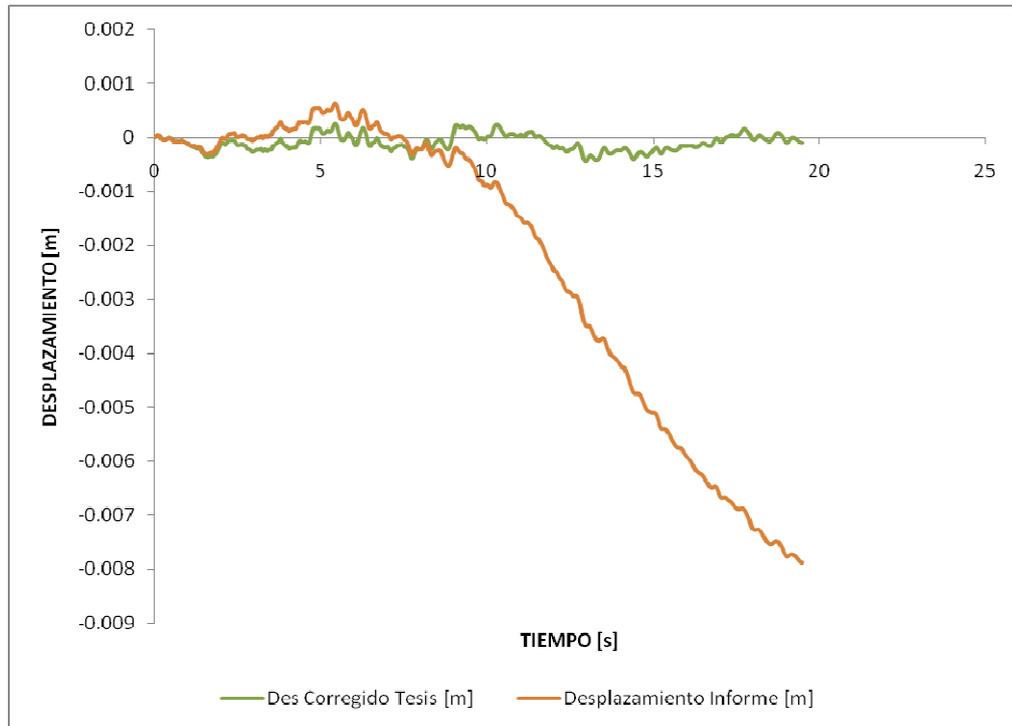
SB55C002. COMPONENTE S 15 45' W.



CORRECCIÓN POR LÍNEA BASE

8. EVENTO 4: 17 enero 96. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

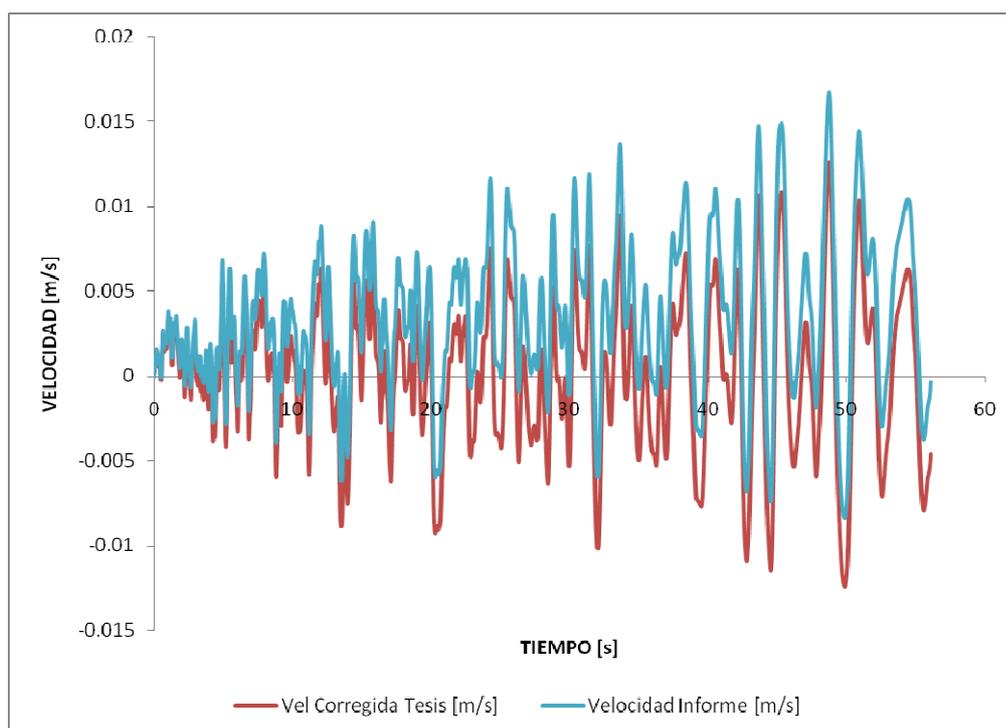
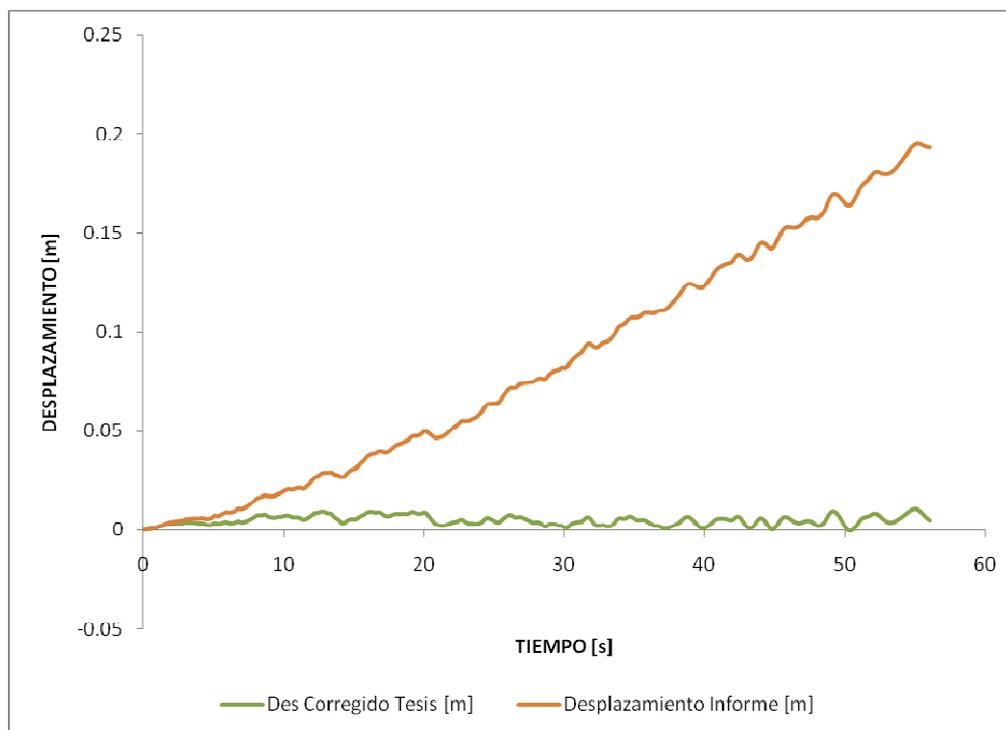
AE60C003. COMPONENTE S 21 22' E.



CORRECCIÓN POR LÍNEA BASE

9. EVENTO 5: 28 marzo 96. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C006. COMPONENTE S 15 45' W.



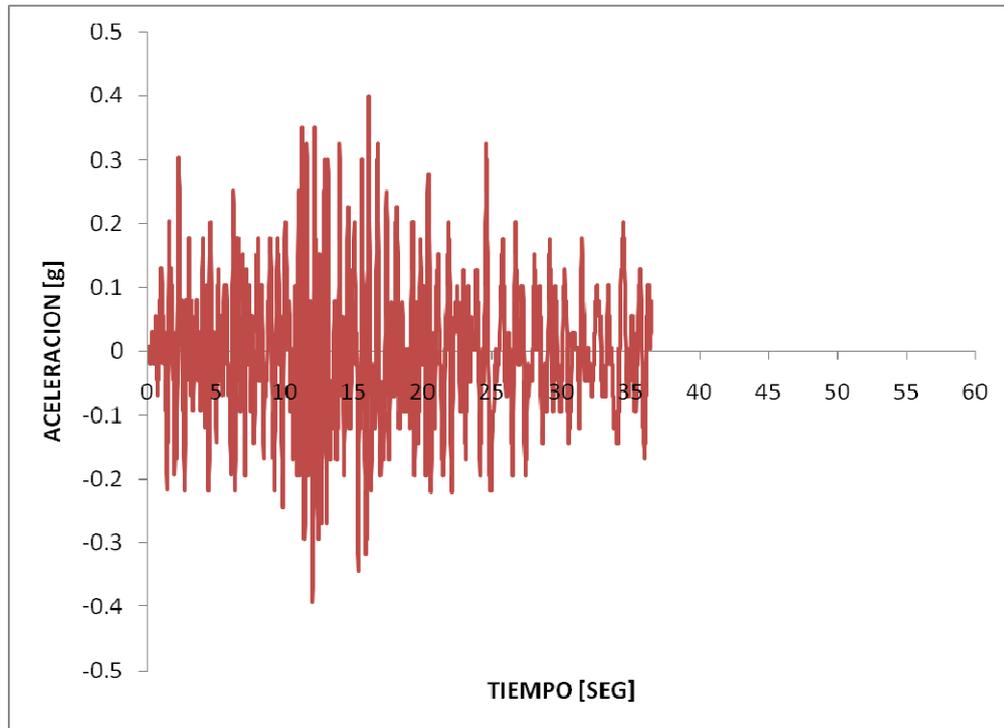
ANEXO No. 3

ACELERACIONES CORREGIDAS

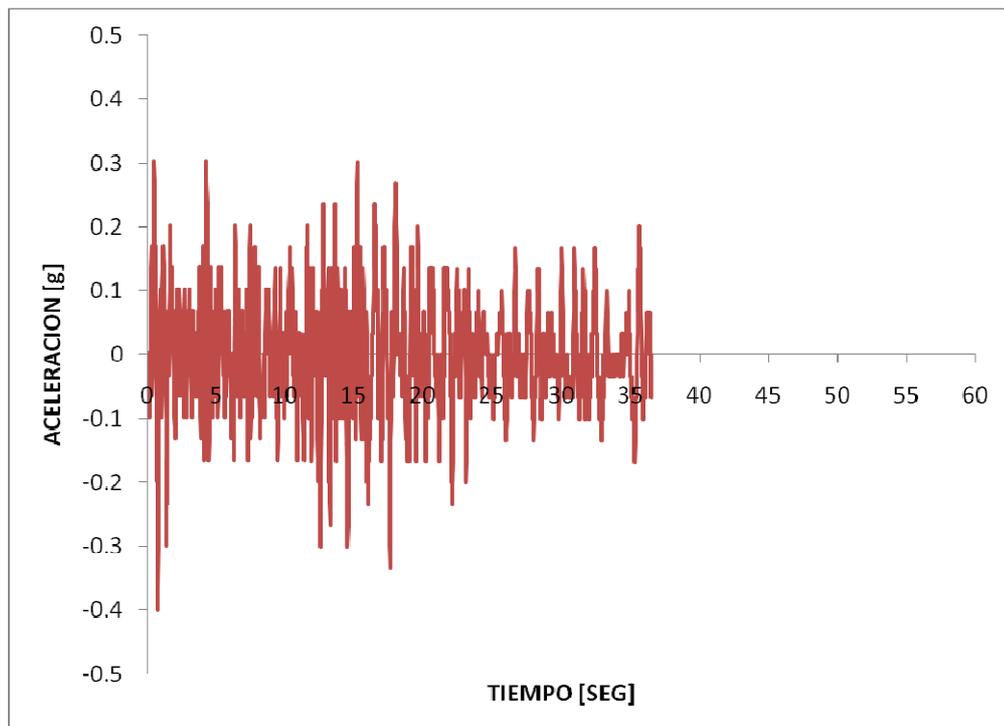
ACELERACIONES CORREGIDAS

1. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C001. COMPONENTE S 15 45' W.



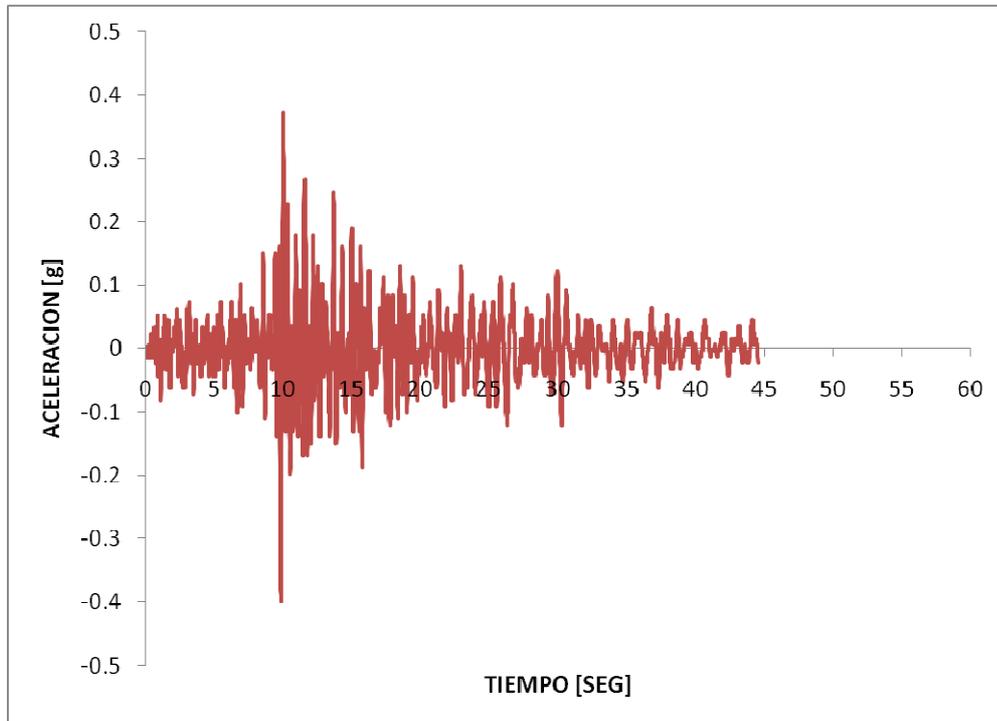
SB55C001. COMPONENTE N 15 45' E.



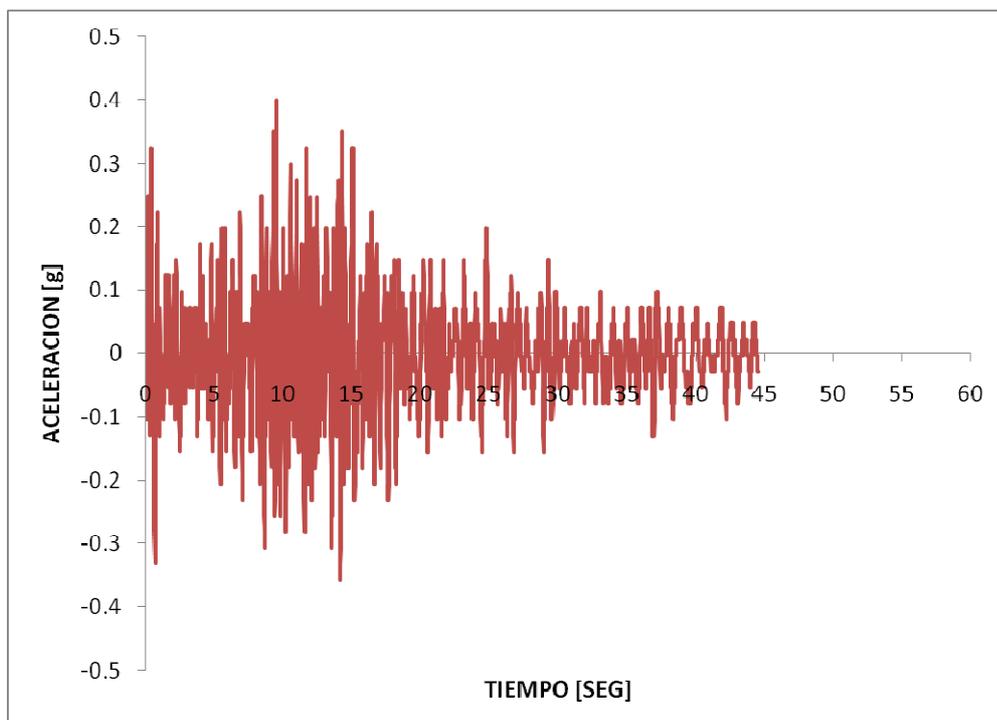
ACELERACIONES CORREGIDAS

2. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 2: COLEGIO BORJA

CB56C001. COMPONENTE S 11 15' W.



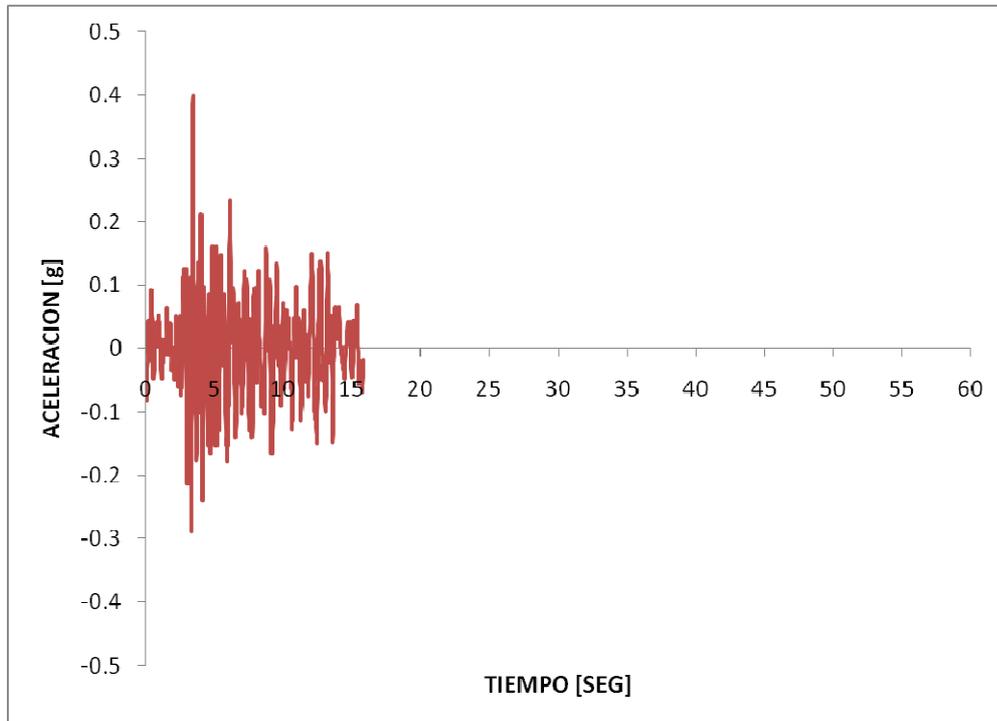
CB56C001. COMPONENTE N 11 15' E.



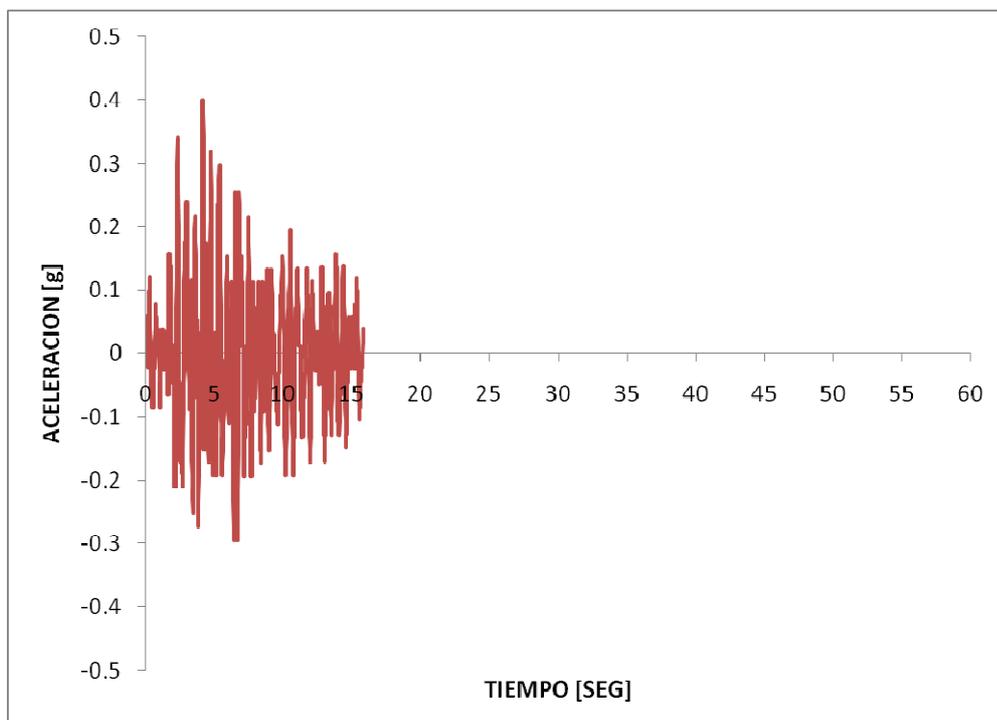
ACELERACIONES CORREGIDAS

3. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 3: HOSPITAL METROPOLITANO

HM57C001. COMPONENTE E - W.



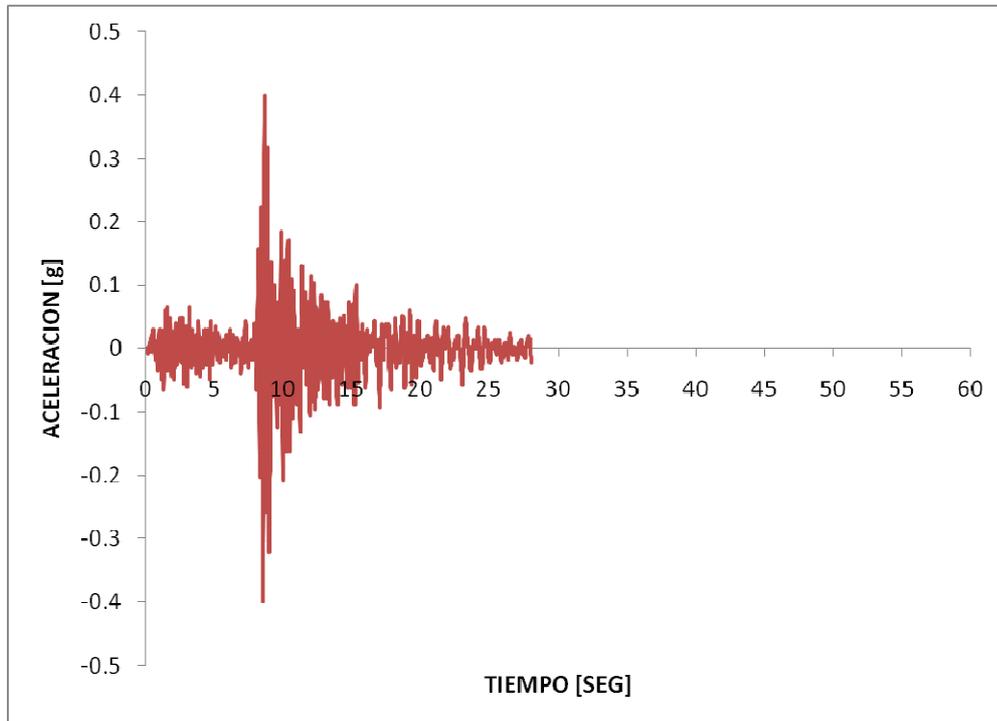
HM57C001. COMPONENTE N - S.



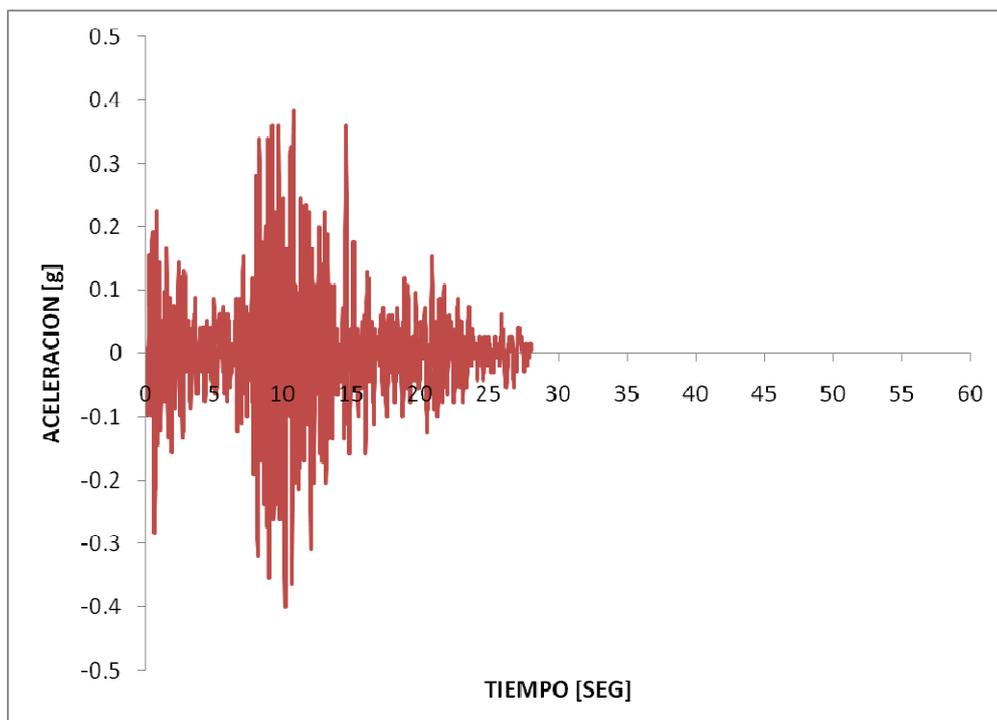
ACELERACIONES CORREGIDAS

4. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 4: MUSEO AURELIO ESPINOSA

AE60C001. COMPONENTE S 21 22' E.



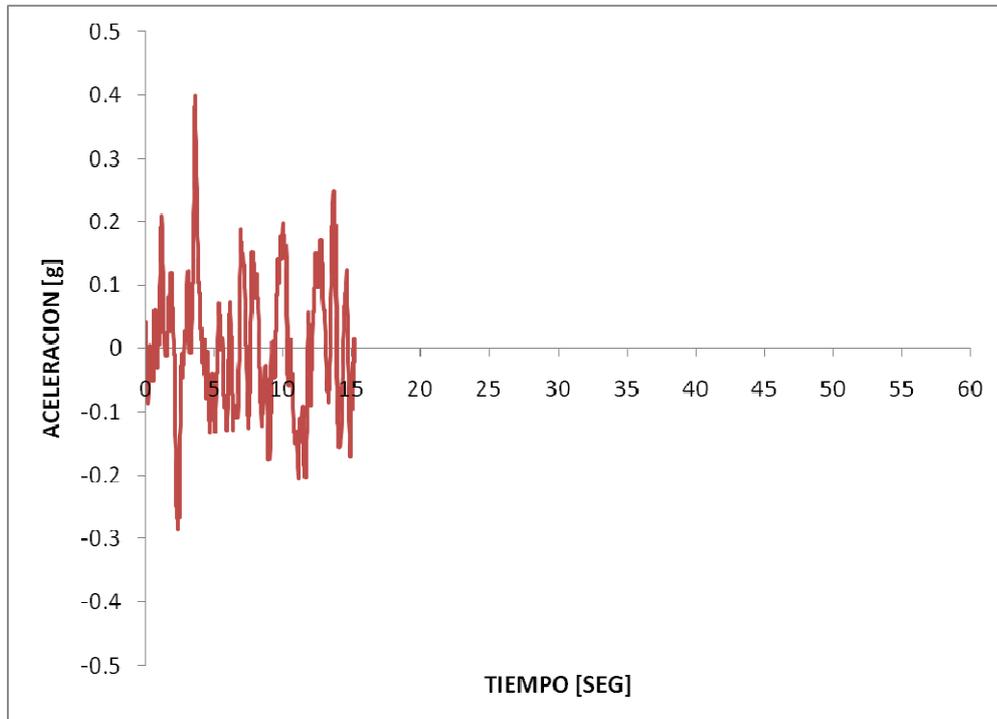
AE60C001. COMPONENTE N 21 22' W.



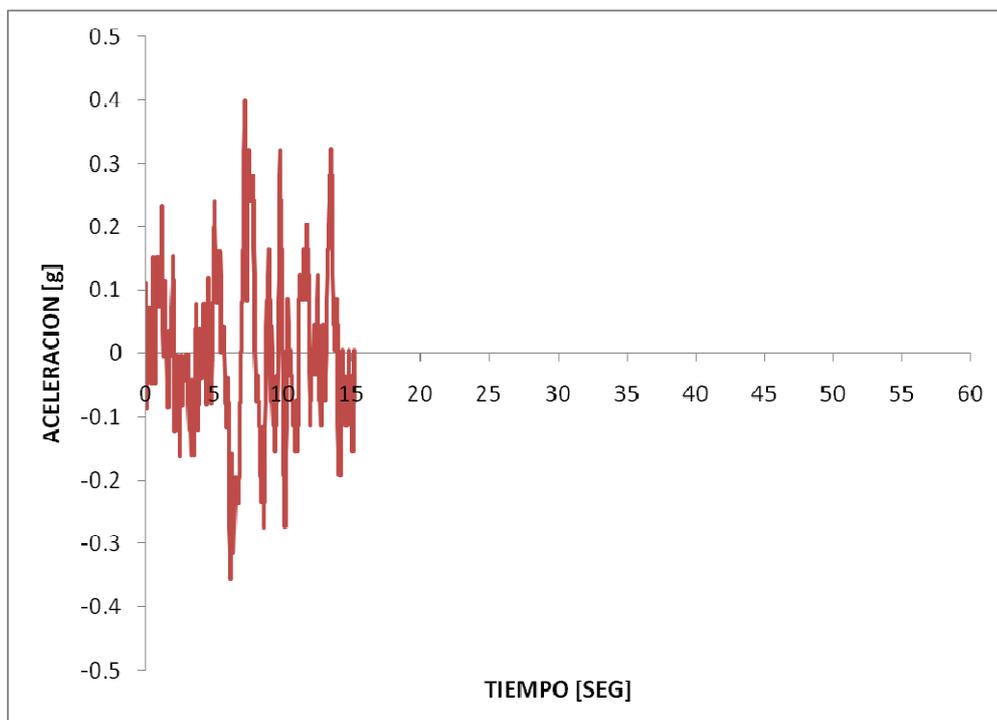
ACELERACIONES CORREGIDAS

5. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

AE60C002. COMPONENTE S 21 22' E.



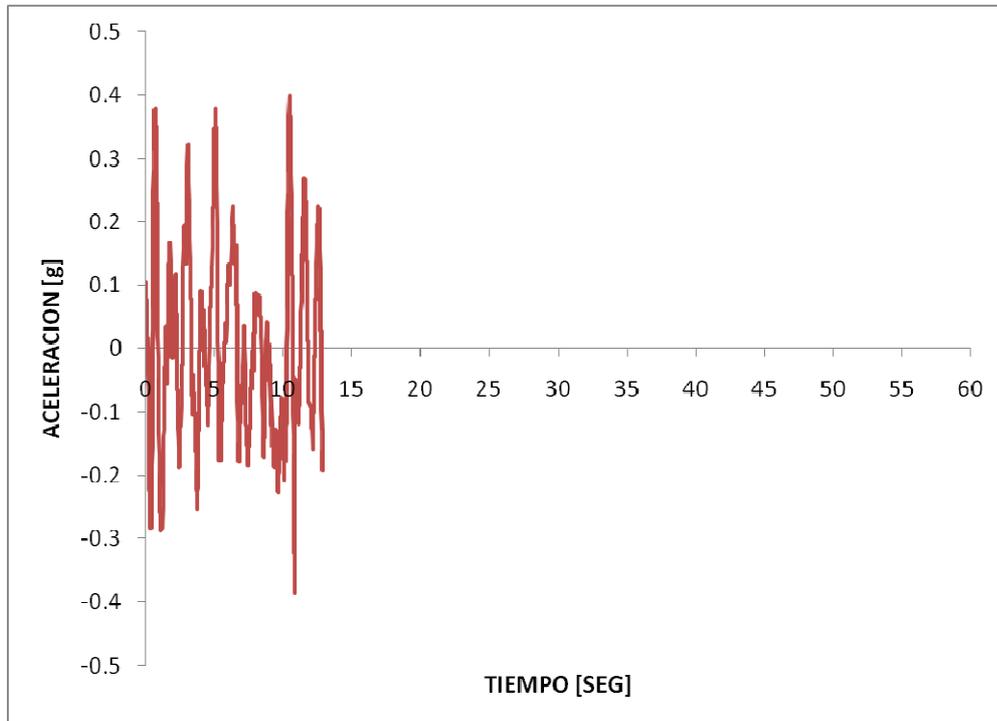
AE60C002. COMPONENTE N 21 22' W.



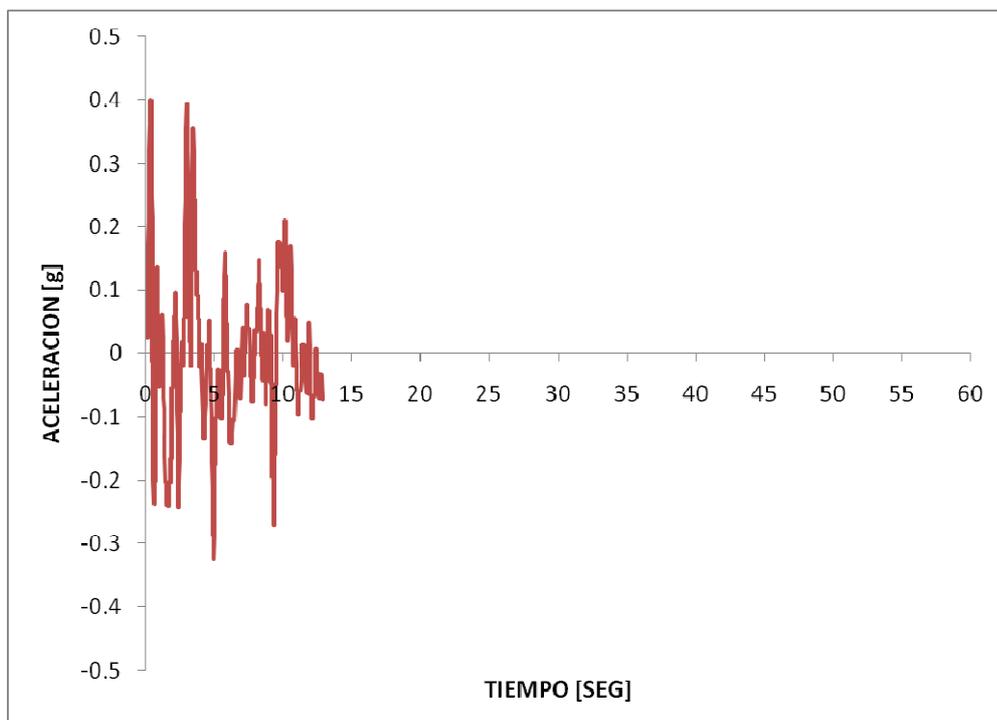
ACELERACIONES CORREGIDAS

6. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 2: HOSPITAL METROPOLITANO

HM57C003. COMPONENTE E - W.



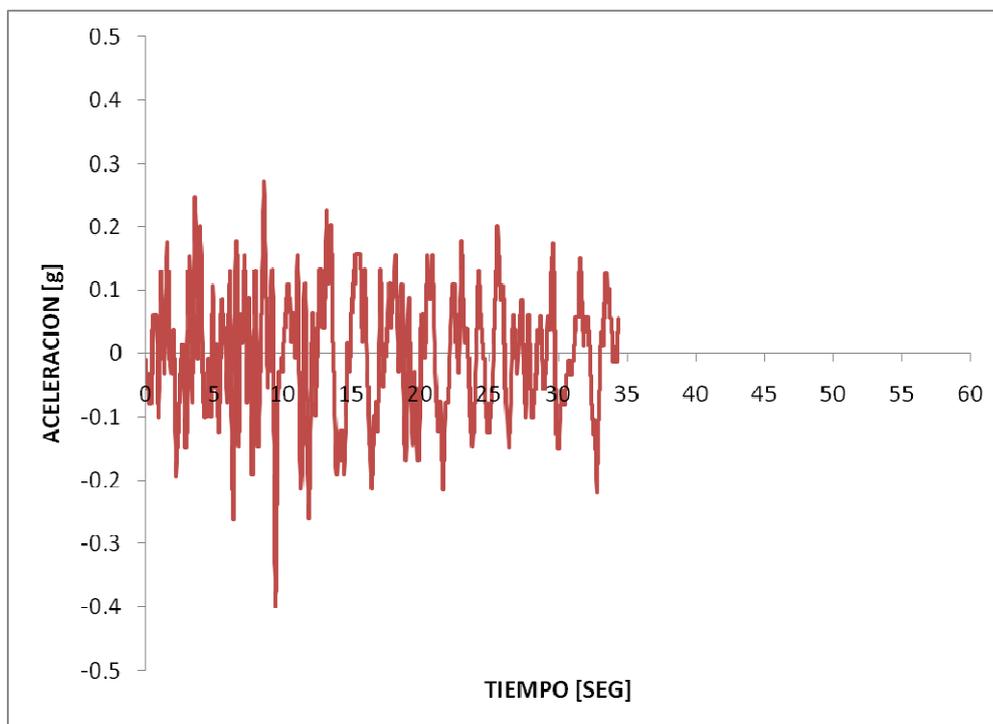
HM57C003. COMPONENTE N - S.



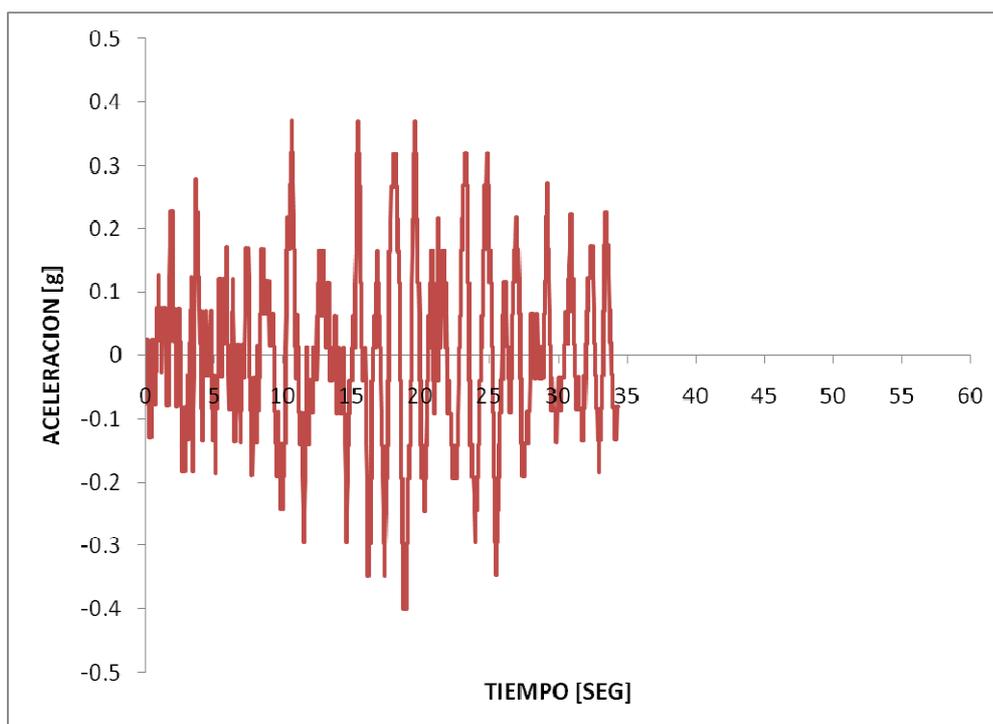
ACELERACIONES CORREGIDAS

7. EVENTO 3: 3 octubre 95. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C002. COMPONENTE S 15 45' W.



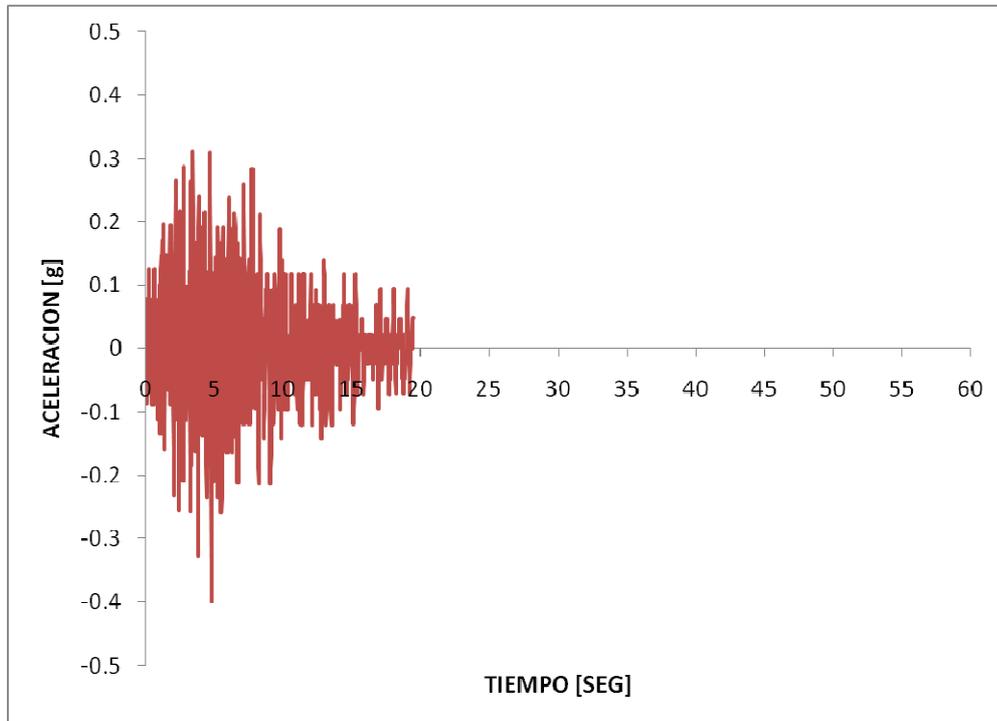
SB55C002. COMPONENTE N 15 45' E.



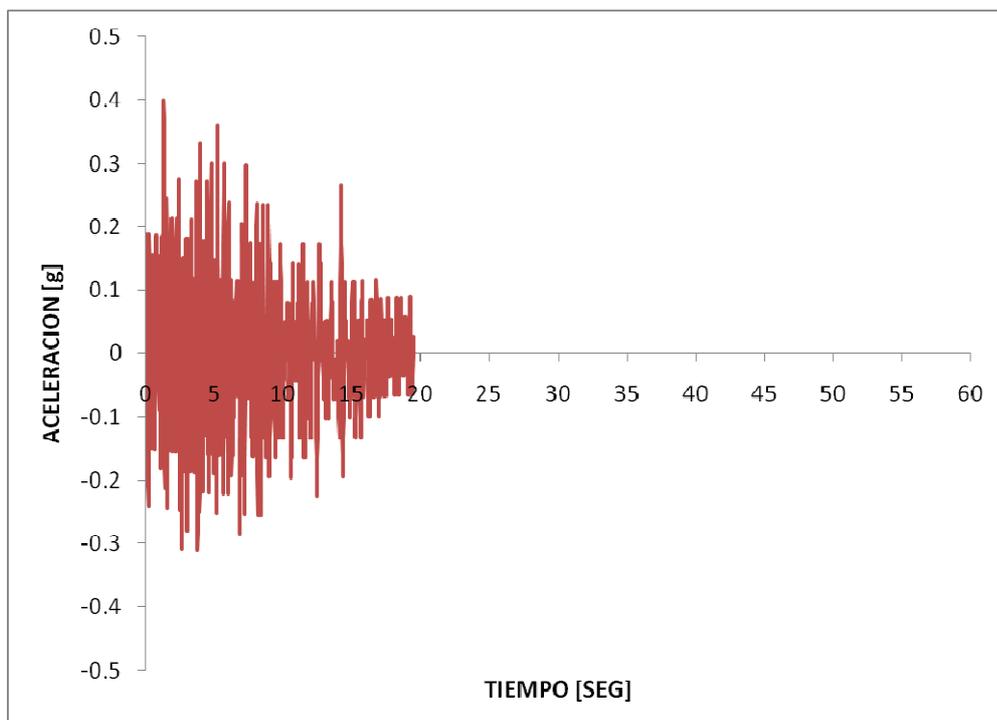
ACELERACIONES CORREGIDAS

8. EVENTO 4: 17 enero 96. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

AE60C003. COMPONENTE S 21 22' E.



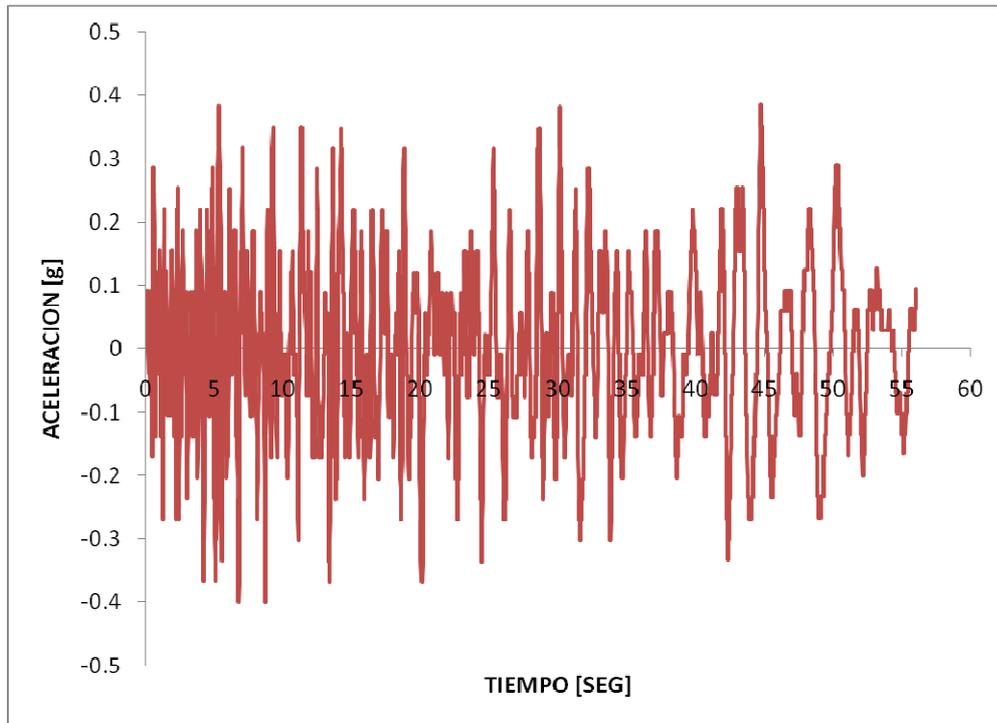
AE60C003. COMPONENTE N 21 22' W.



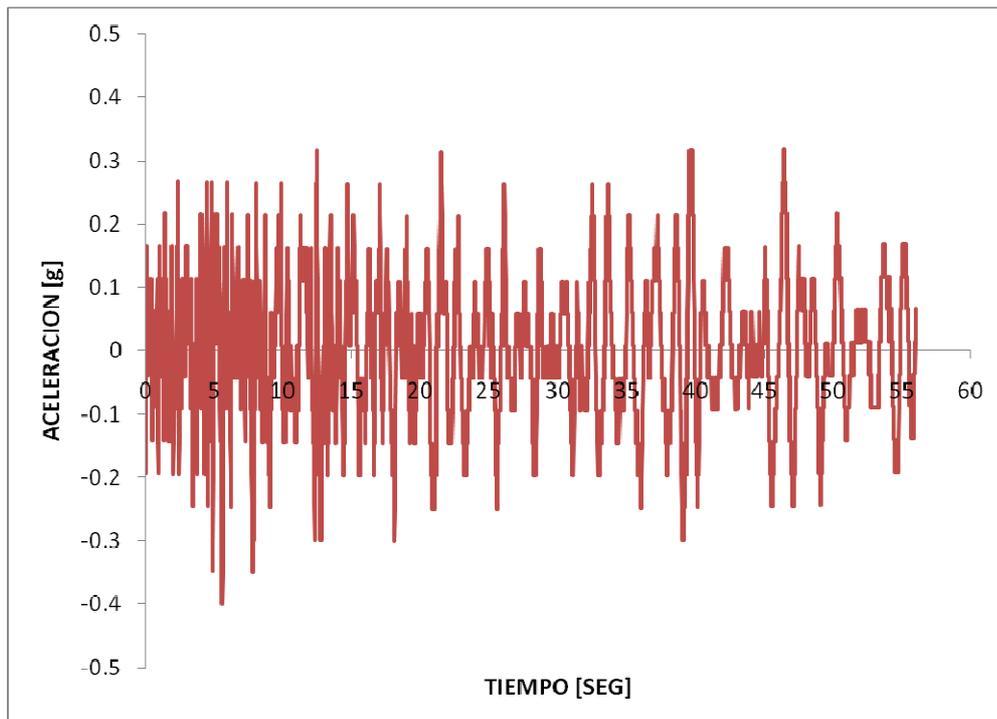
ACELERACIONES CORREGIDAS

9. EVENTO 5: 28 marzo 96. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C006. COMPONENTE S 15 45' W.

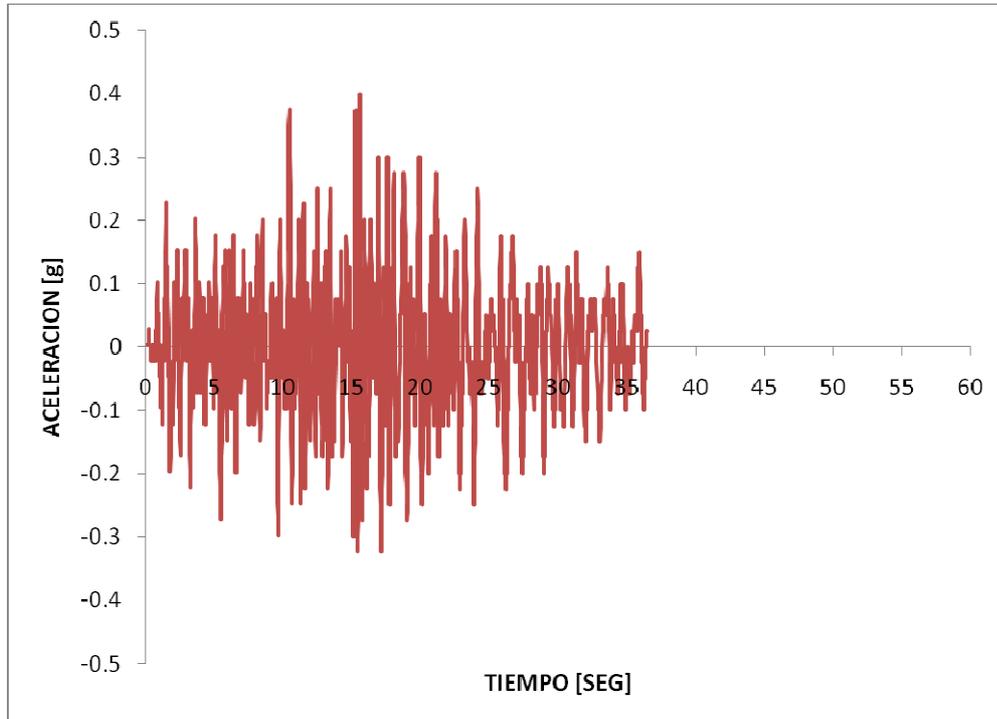


SB55C006. COMPONENTE N 15 45' E.

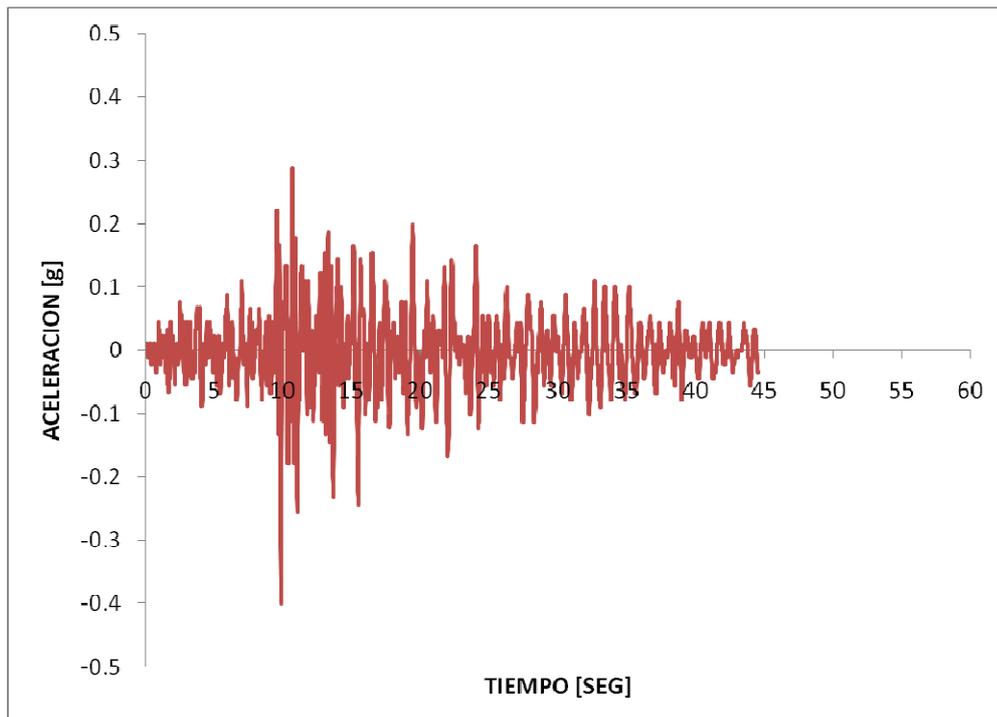


ACELERACIONES CORREGIDAS

1. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 1: SAN BARTOLO
SB55C001. COMPONENTE VERTICAL.

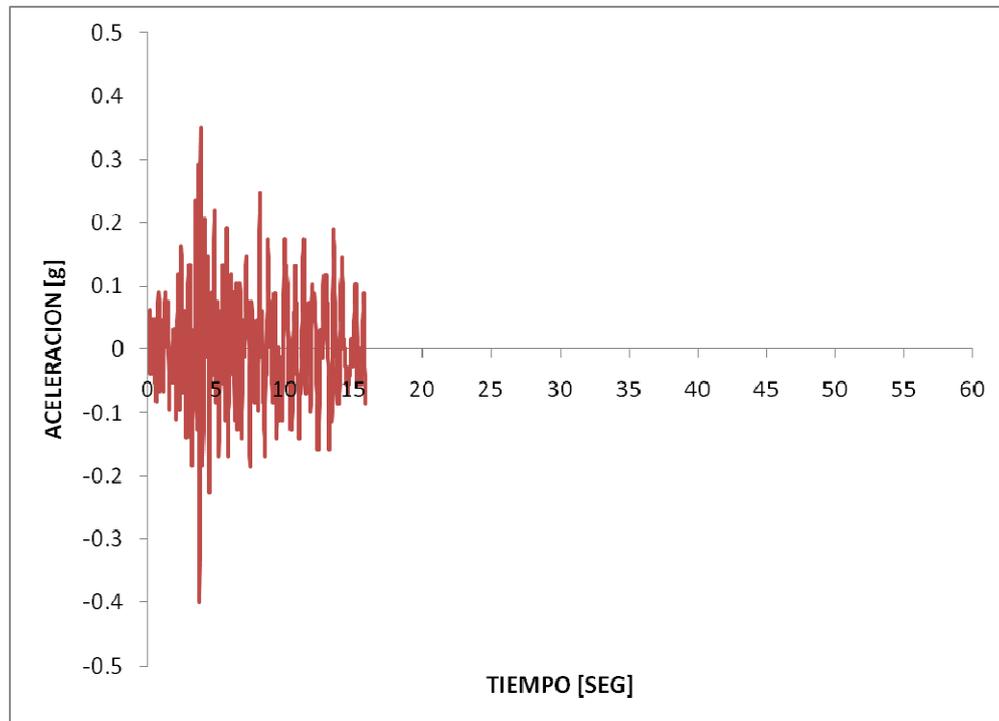


2. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 2: COLEGIO BORJA
CB56C001. COMPONENTE VERTICAL

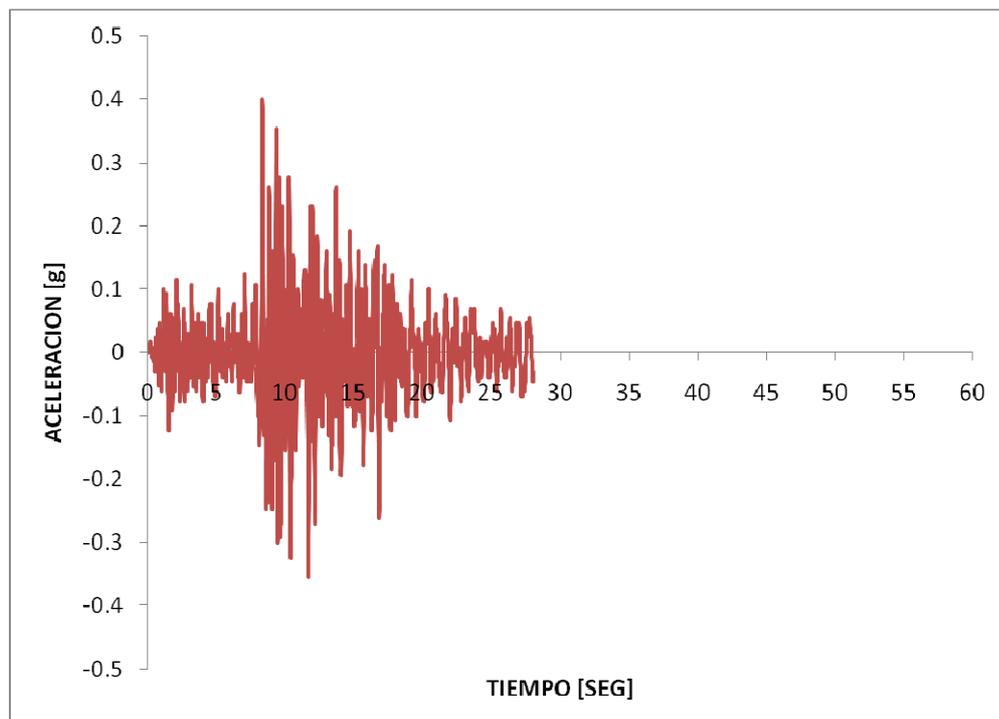


ACELERACIONES CORREGIDAS

3. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 3: HOSPITAL METROPOLITANO
HM57C001. COMPONENTE VERTICAL.

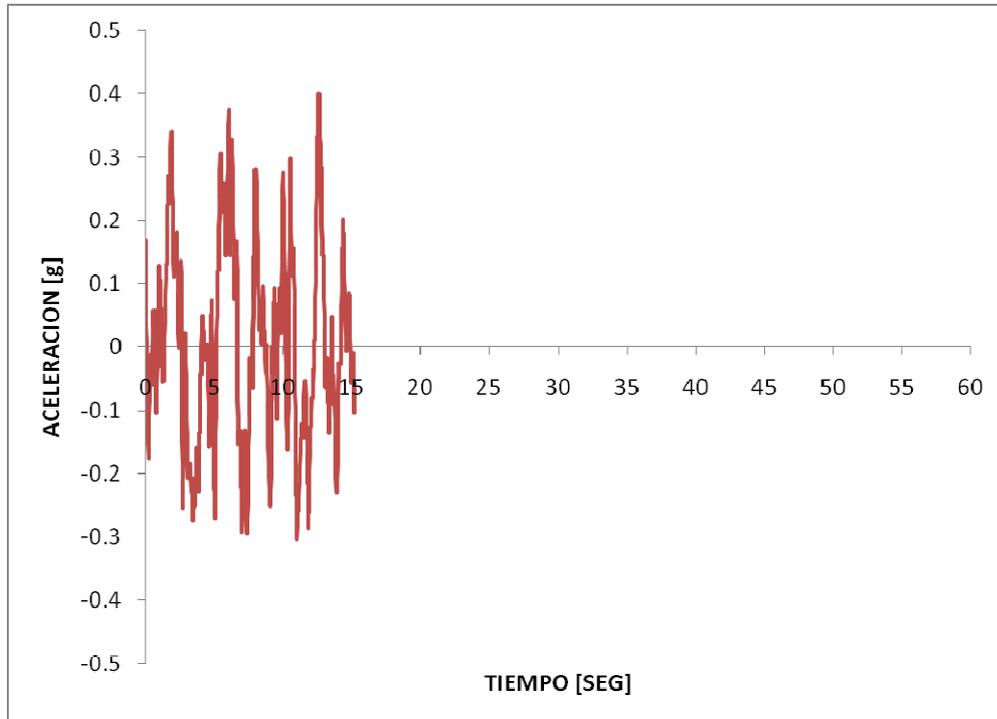


4. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 4: MUSEO AURELIO ESPINOSA
AE60C001. COMPONENTE VERTICAL

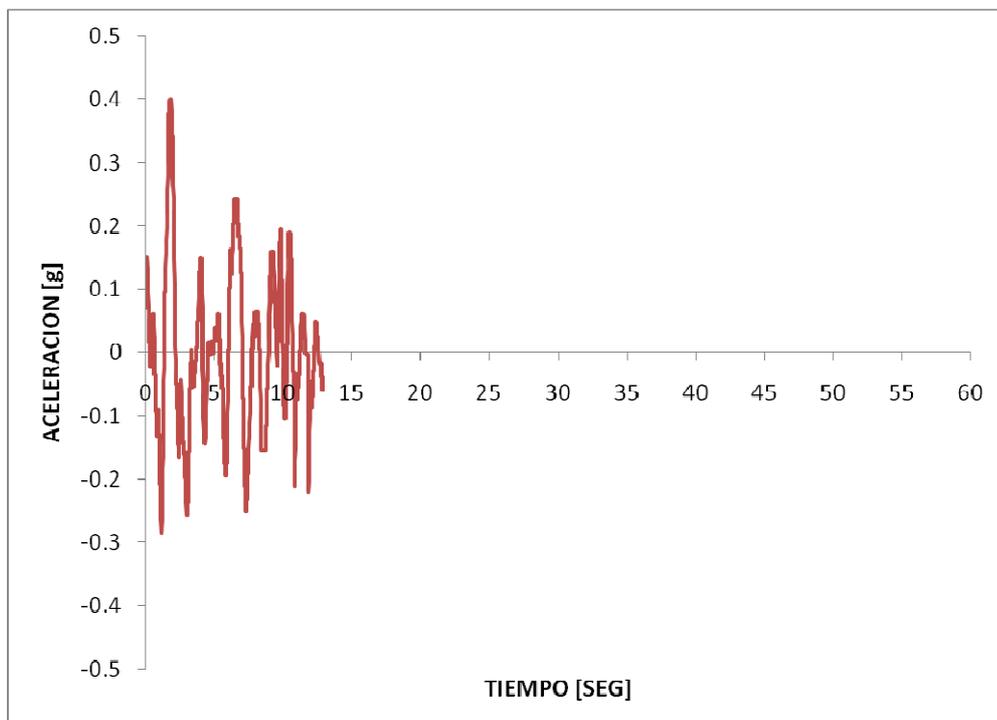


ACELERACIONES CORREGIDAS

5. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA
AE60C002. COMPONENTE VERTICAL

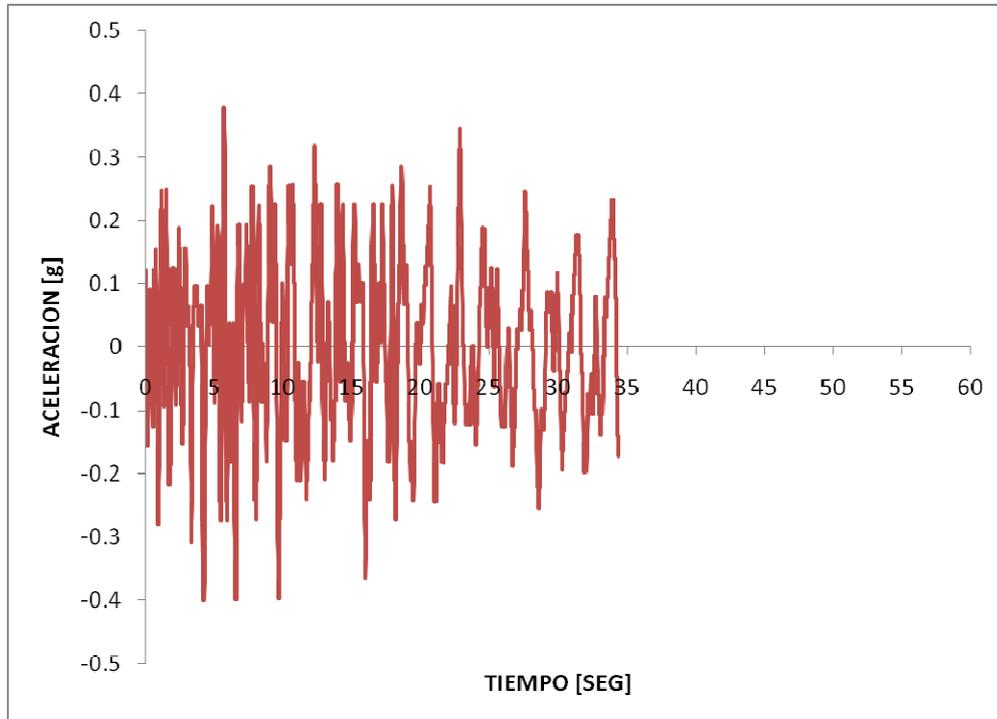


6. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 2: HOSPITAL METROPOLITANO
HM57C003. COMPONENTE VERTICAL

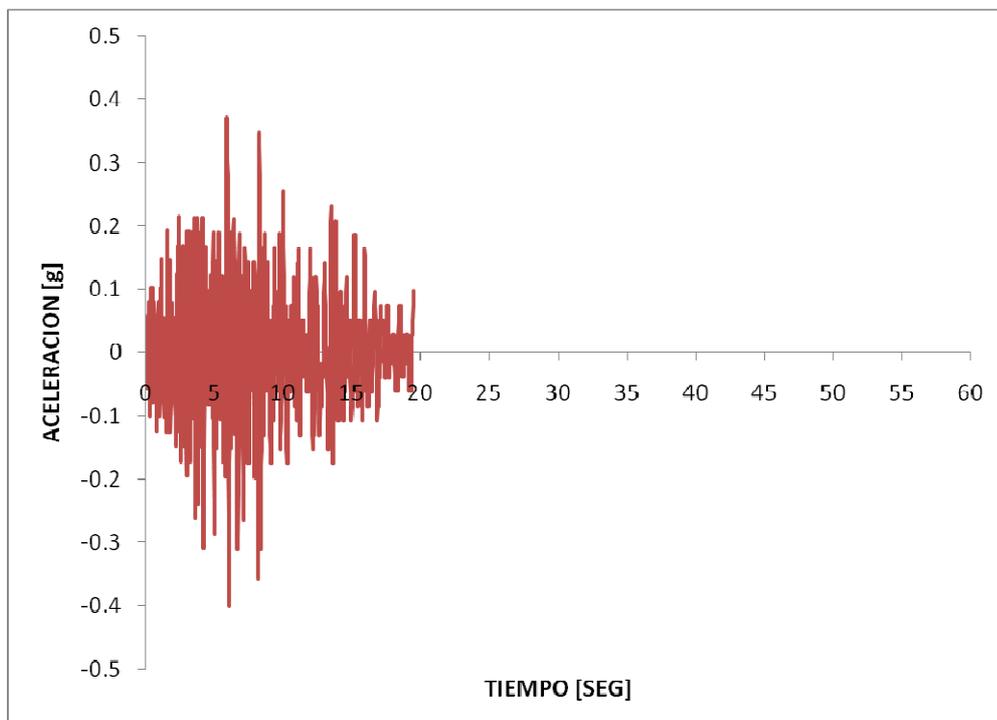


ACELERACIONES CORREGIDAS

7. EVENTO 3: 3 octubre 95. ESTACION 1: SAN BARTOLO
SB55C002. COMPONENTE VERTICAL

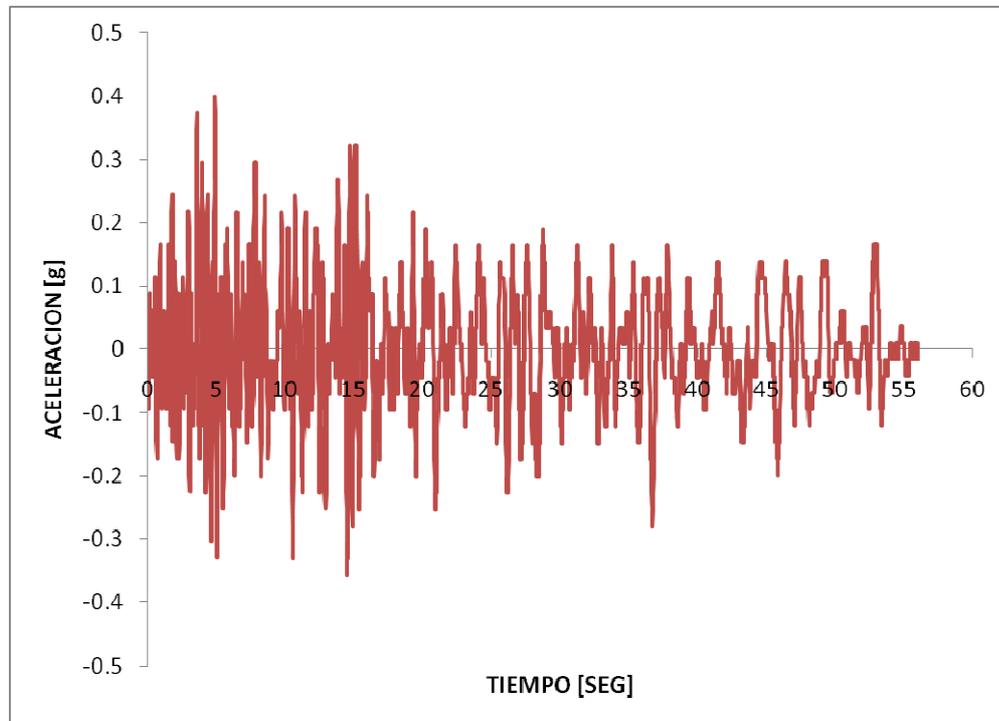


8. EVENTO 4: 17 enero 96. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA
AE60C003. COMPONENTE VERTICAL



ACELERACIONES CORREGIDAS

9. EVENTO 5: 28 marzo 96. ESTACION 1: SAN BARTOLO
SB55C006. COMPONENTE VERTICAL



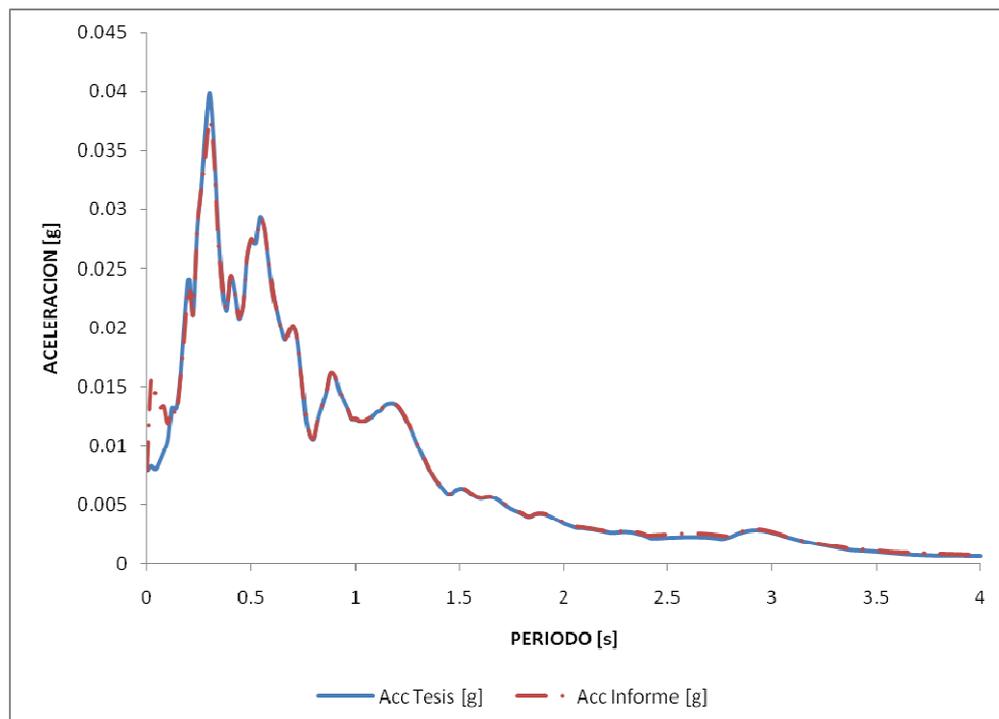
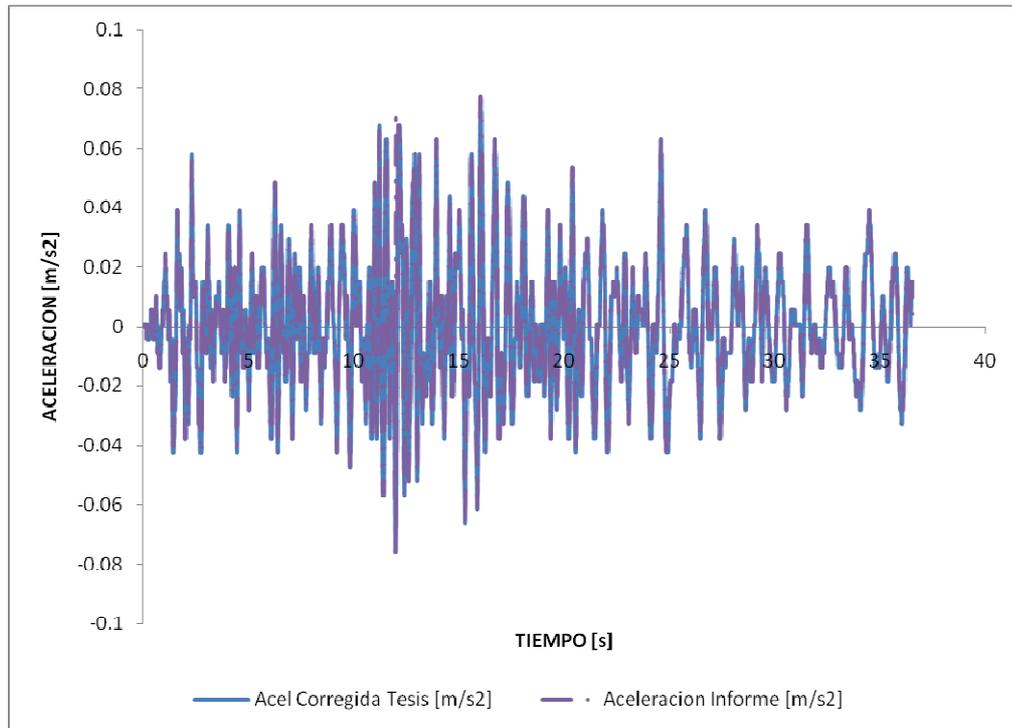
ANEXO No. 4

COMPARACION ENTRE ESPECTROS ELASTICOS

COMPARACION ENTRE ESPECTROS ELASTICOS

1. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 1: SAN BARTOLO

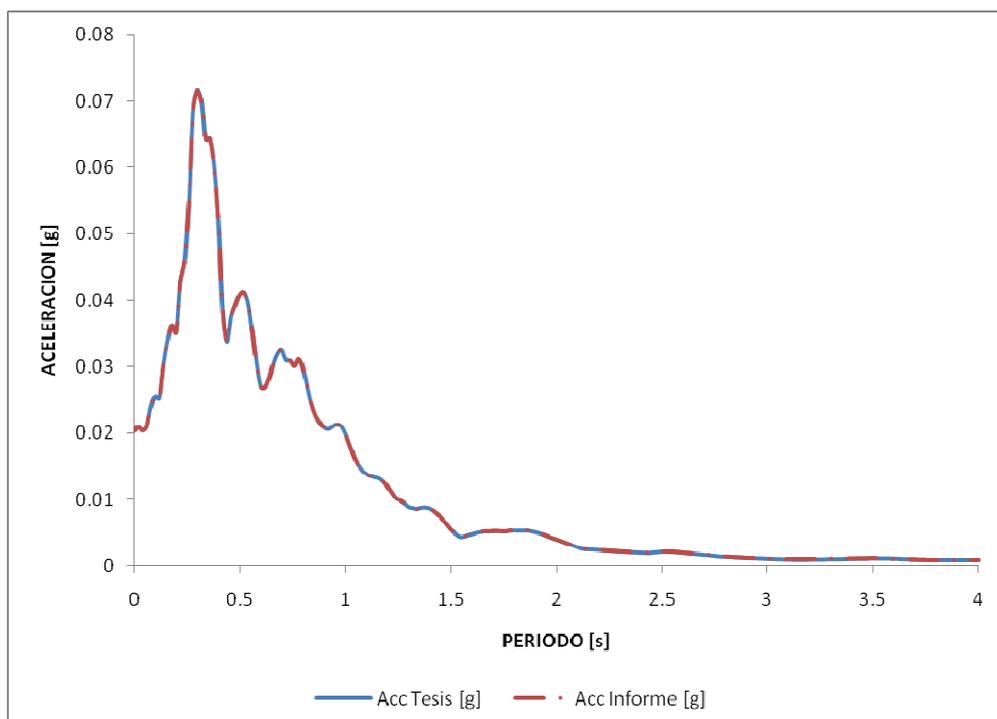
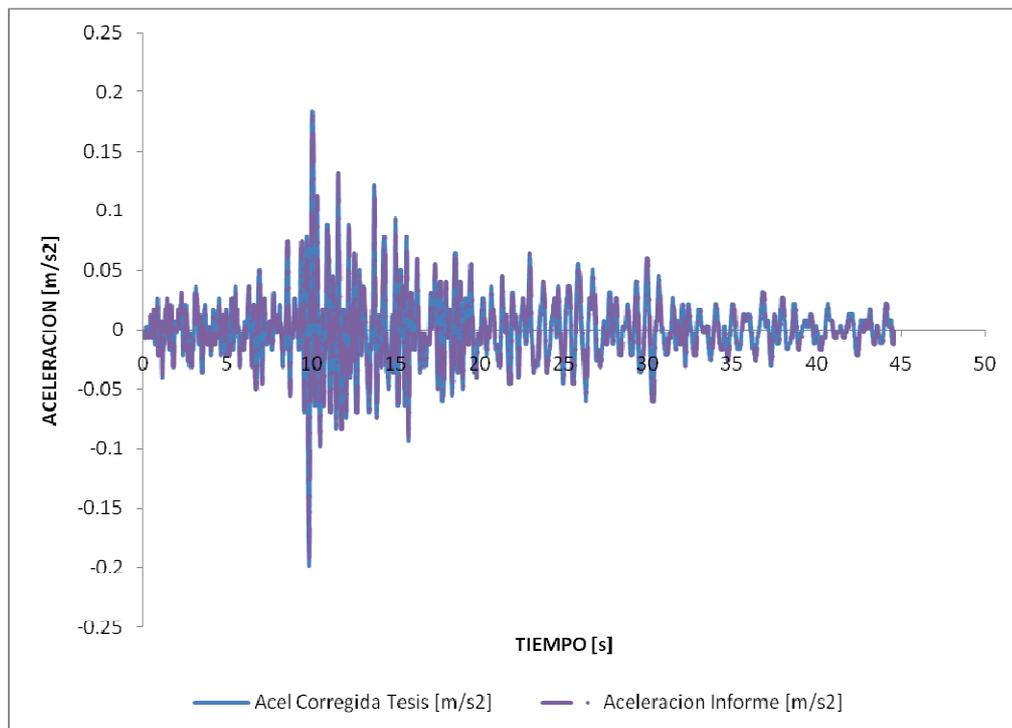
SB55C001. COMPONENTE S 15 45' W.



COMPARACION ENTRE ESPECTROS ELASTICOS

2. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 2: COLEGIO BORJA

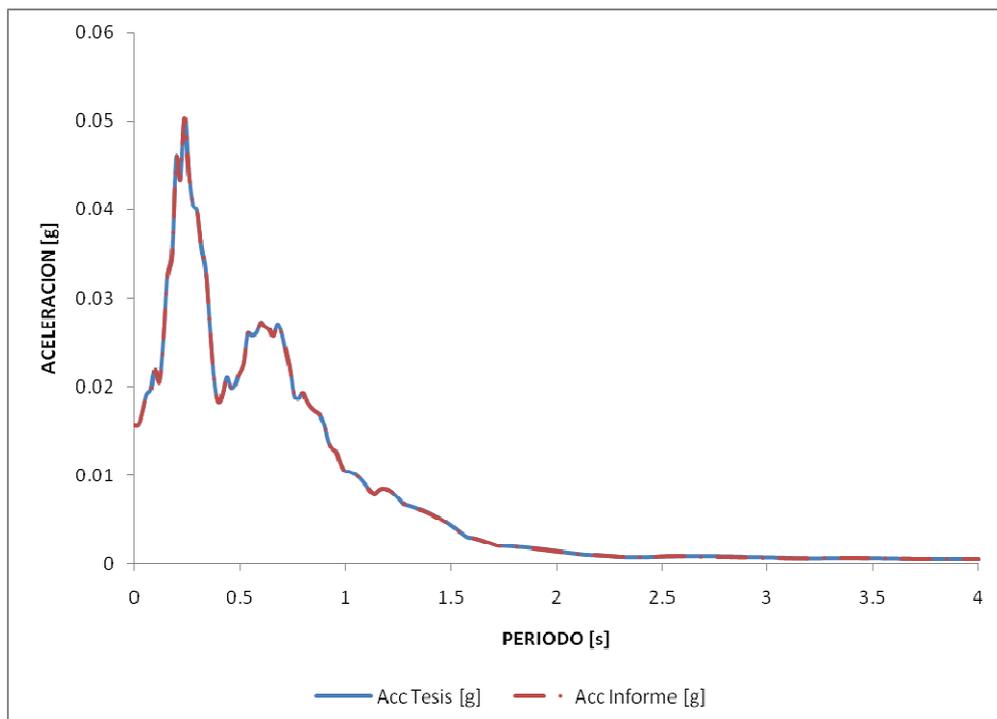
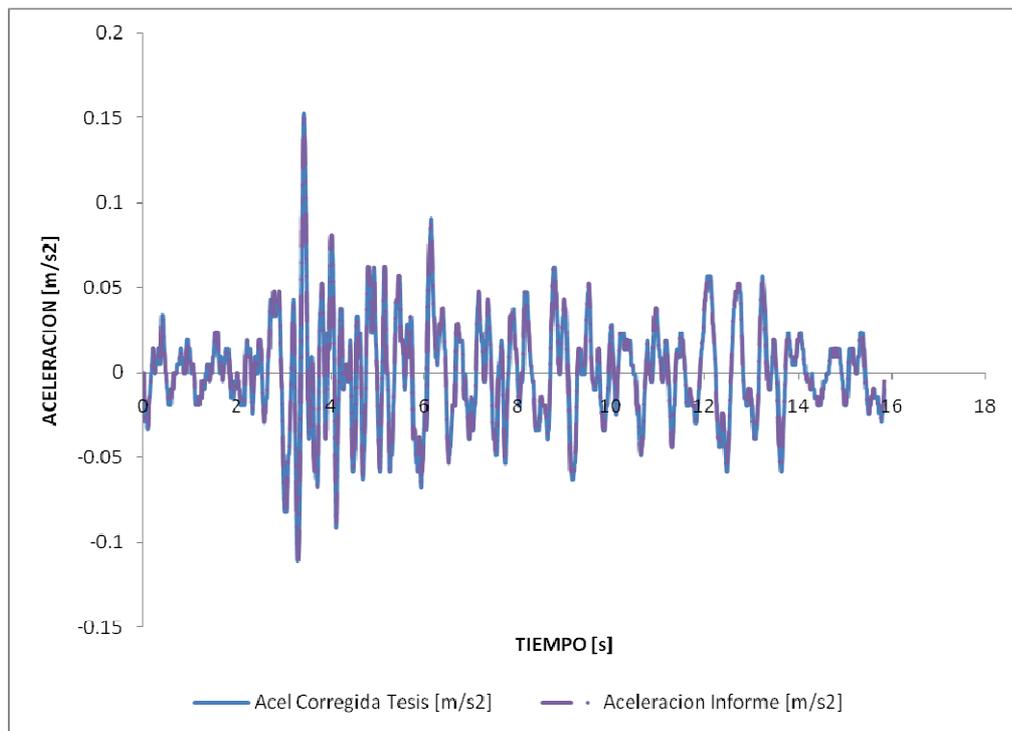
CB56C001. COMPONENTE S 11 15' W.



COMPARACION ENTRE ESPECTROS ELASTICOS

3. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 3: HOSPITAL METROPOLITANO

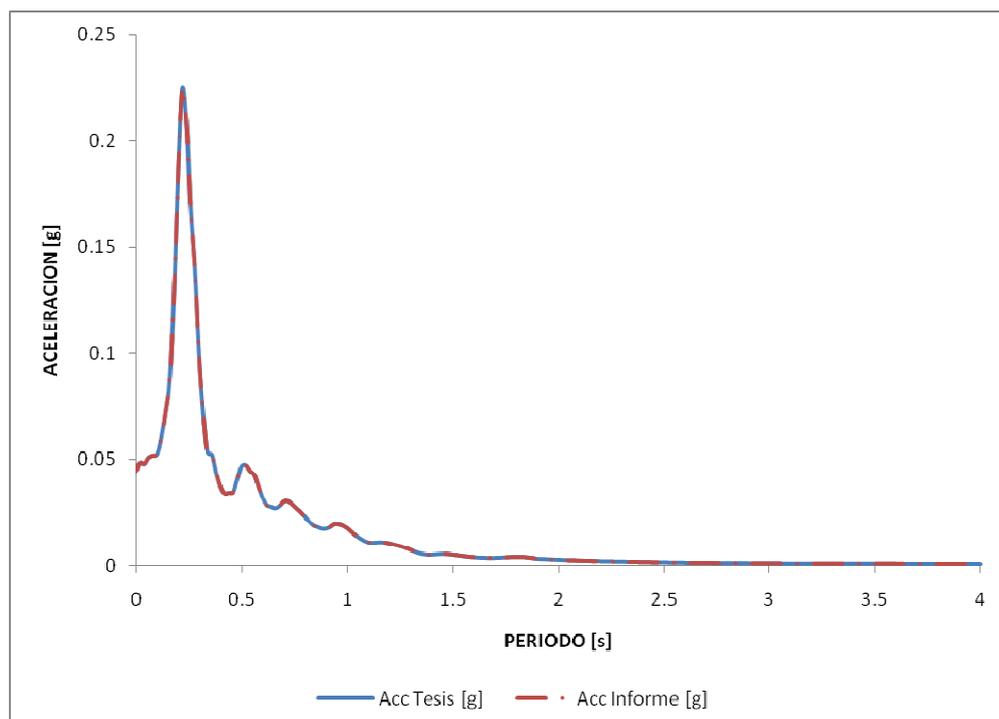
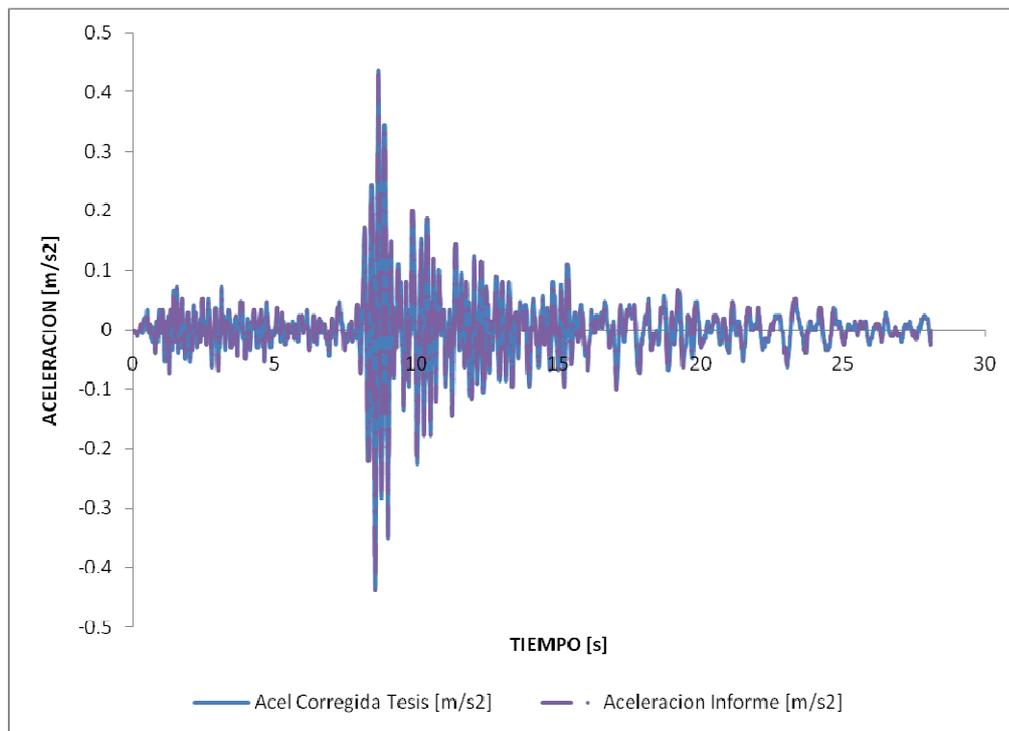
HM57C001. COMPONENTE E - W.



COMPARACION ENTRE ESPECTROS ELASTICOS

4. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 4: MUSEO AURELIO ESPINOSA

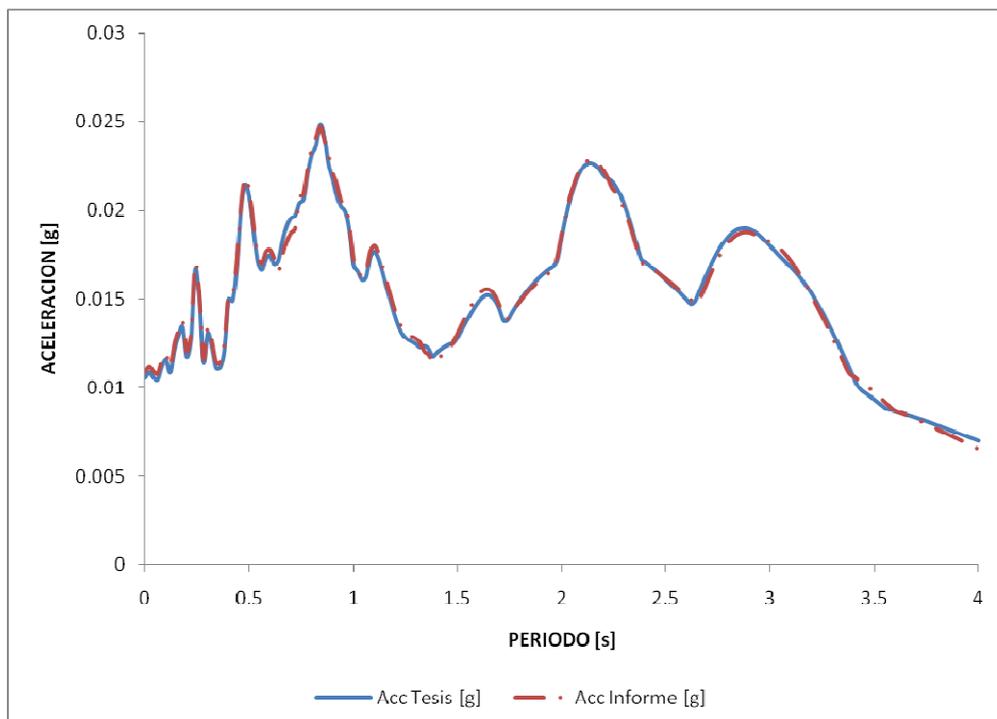
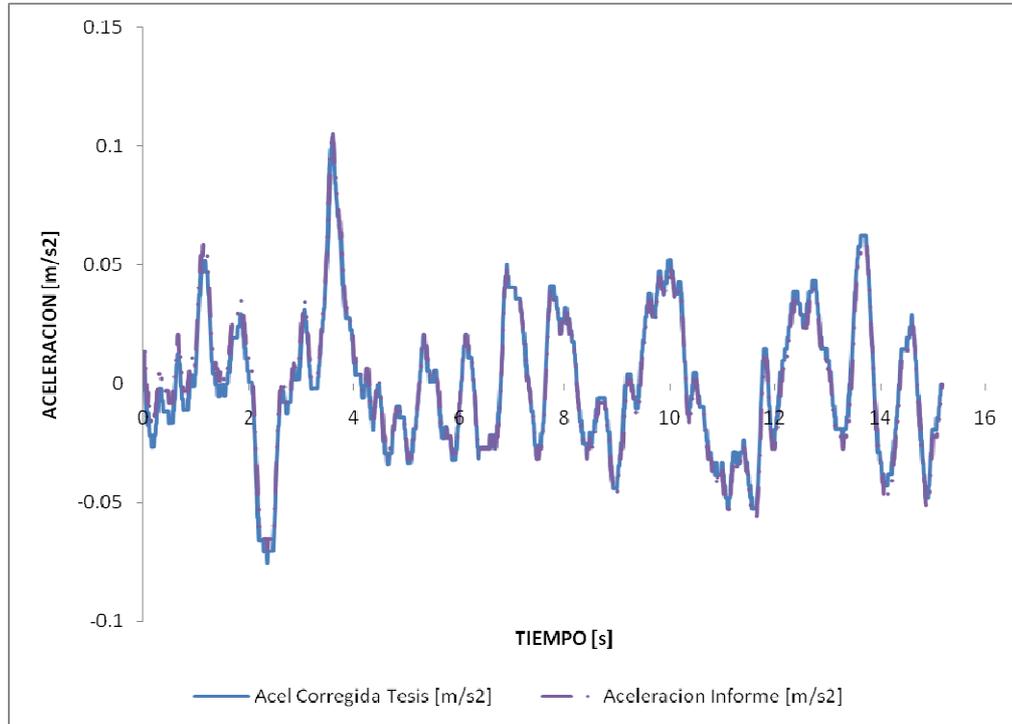
AE60C001. COMPONENTE S 21 22' E.



COMPARACION ENTRE ESPECTROS ELASTICOS

5. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

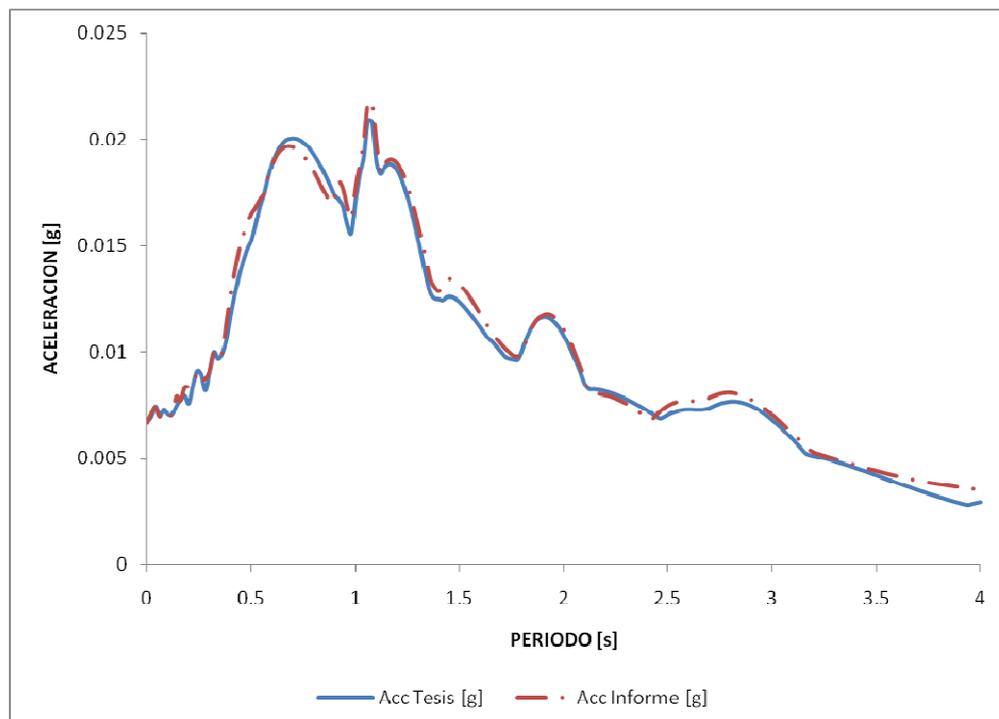
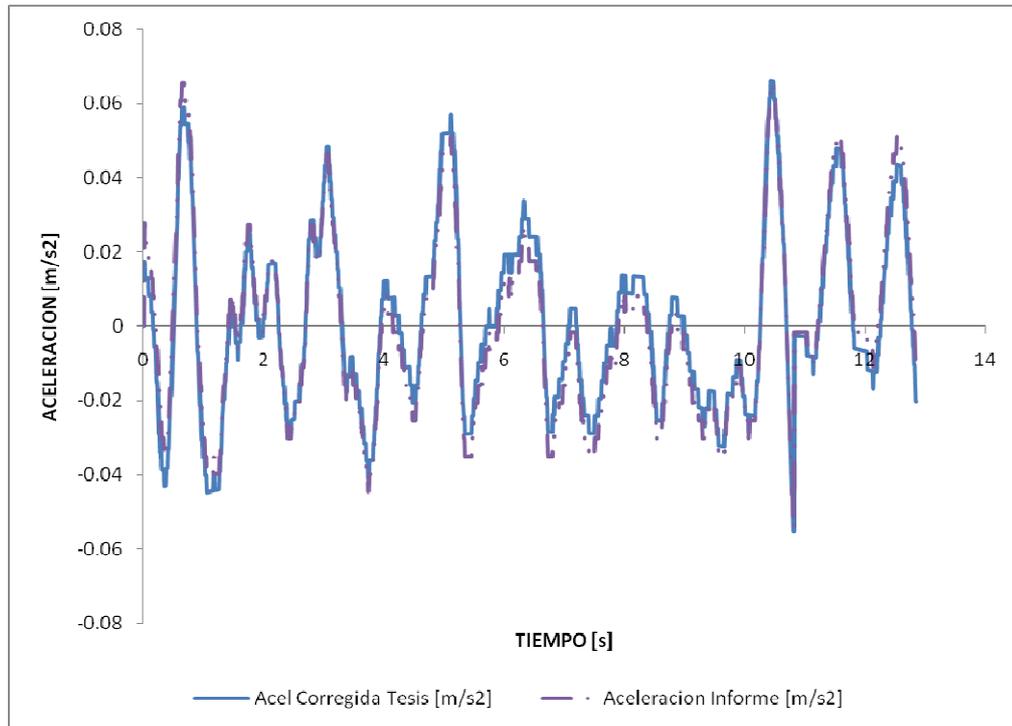
AE60C002. COMPONENTE S 21 22' E.



COMPARACION ENTRE ESPECTROS ELASTICOS

6. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 2: HOSPITAL METROPOLITANO

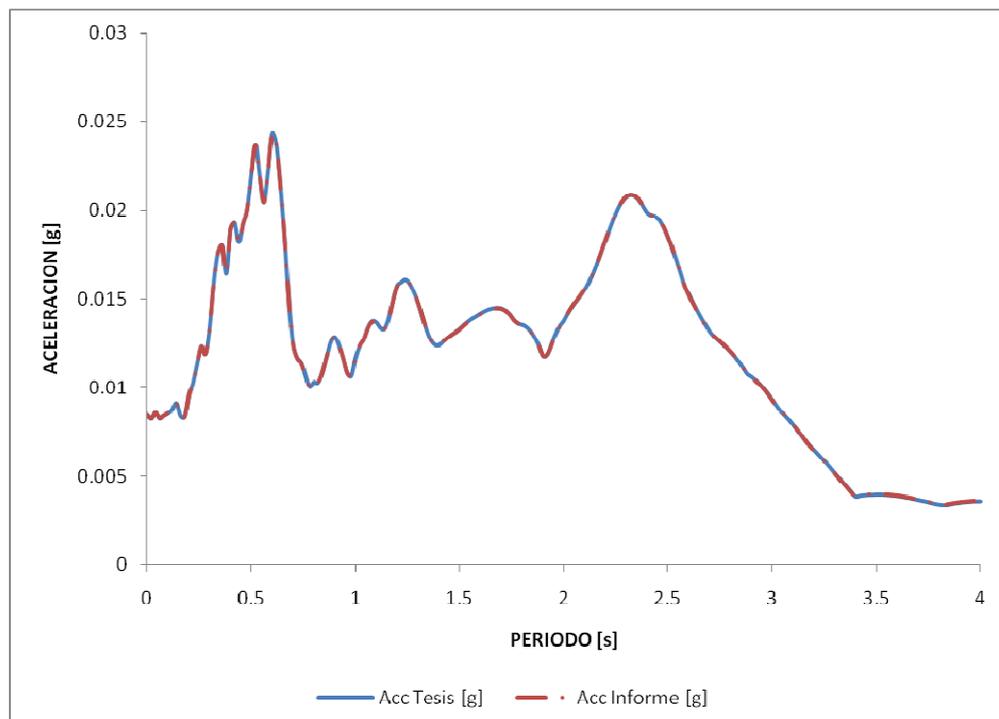
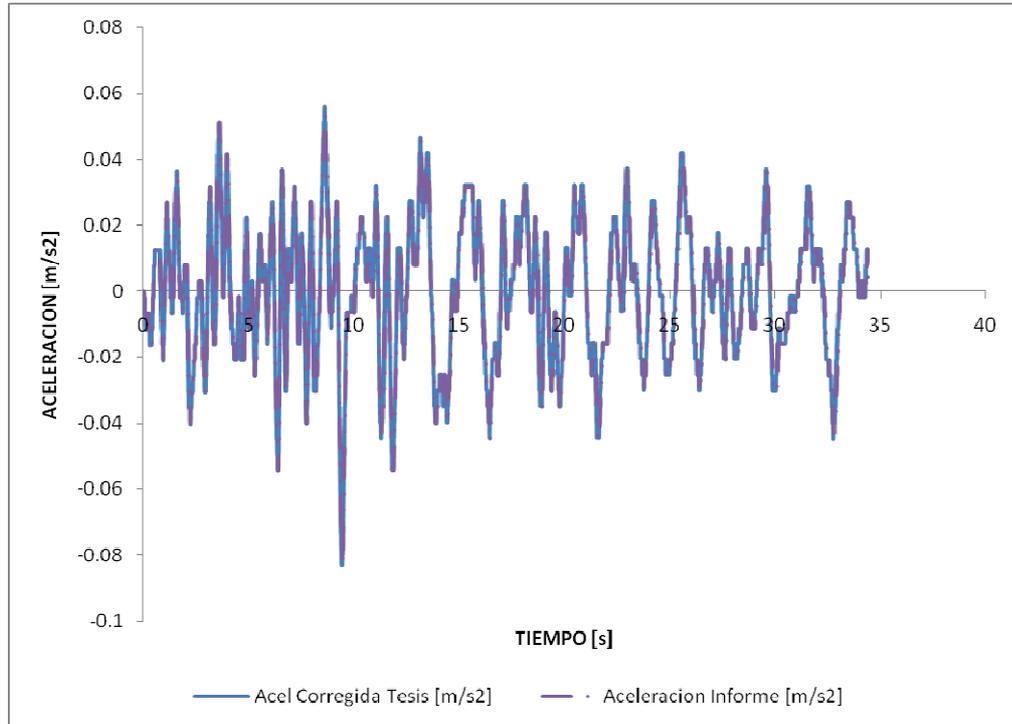
HM57C003. COMPONENTE E - W.



COMPARACION ENTRE ESPECTROS ELASTICOS

7. EVENTO 3: 3 octubre 95. ESTACION 1: SAN BARTOLO

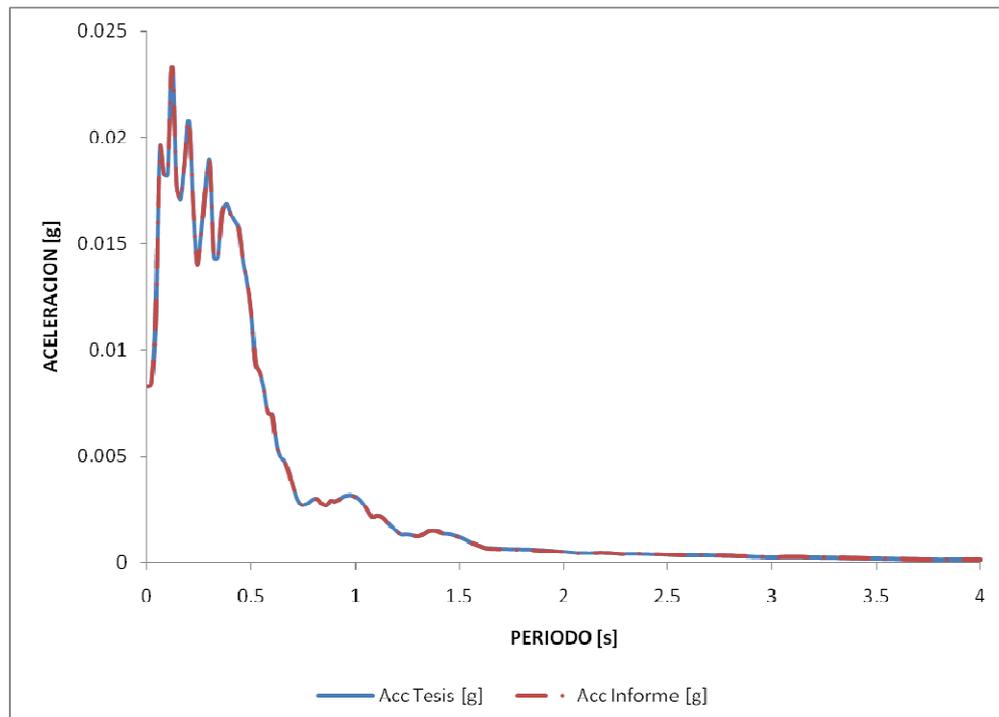
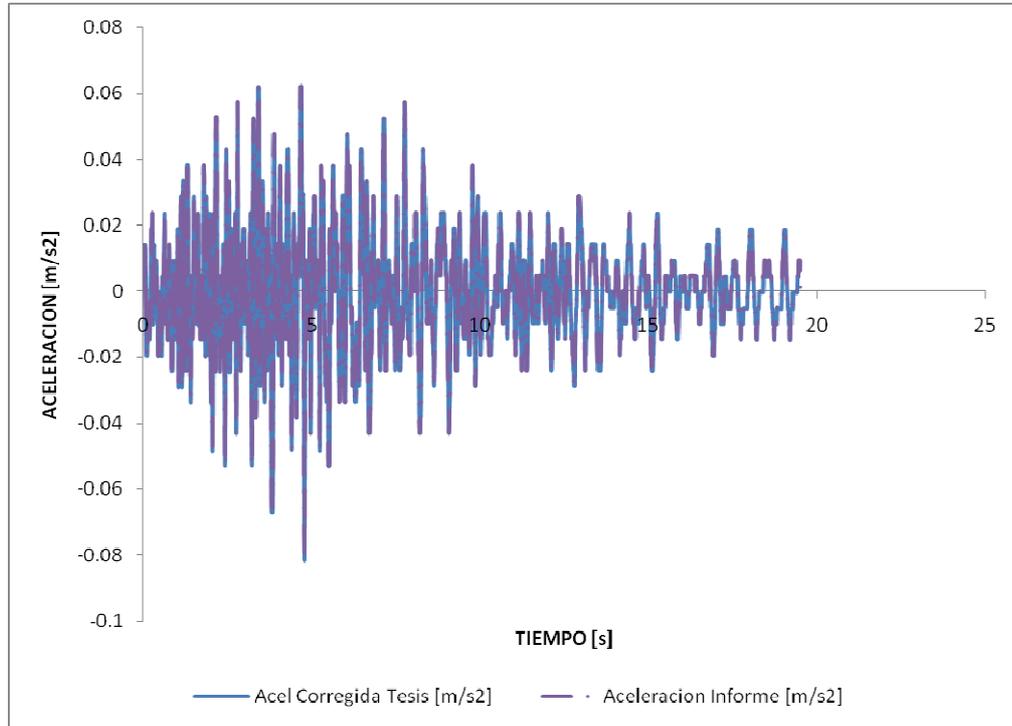
SB55C002. COMPONENTE S 15 45' W.



COMPARACION ENTRE ESPECTROS ELASTICOS

8. EVENTO 4: 17 enero 96. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

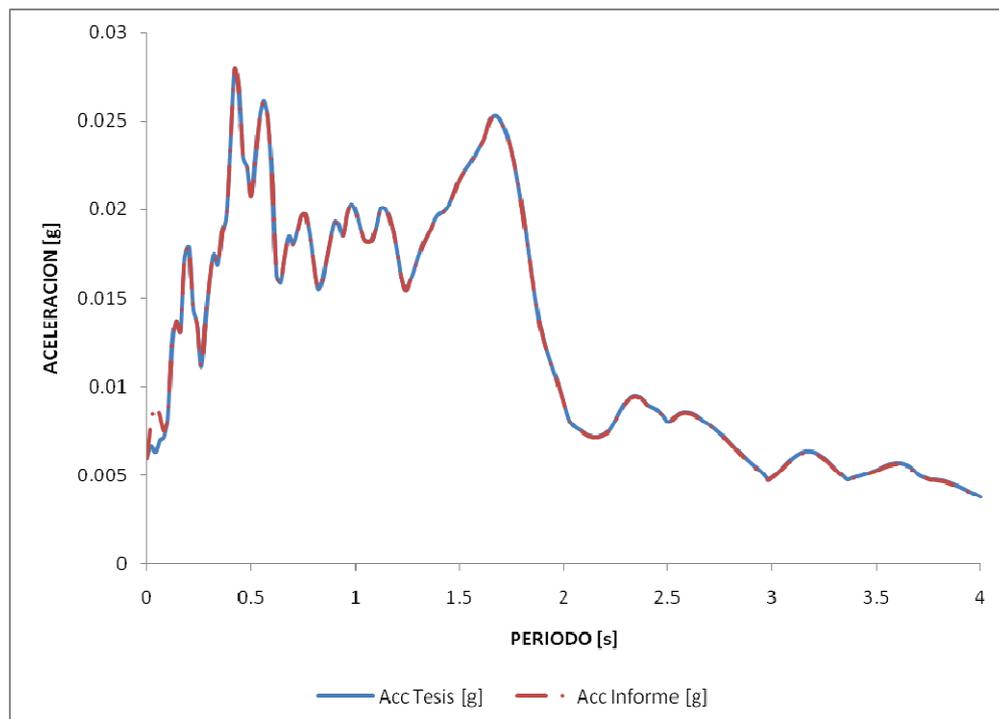
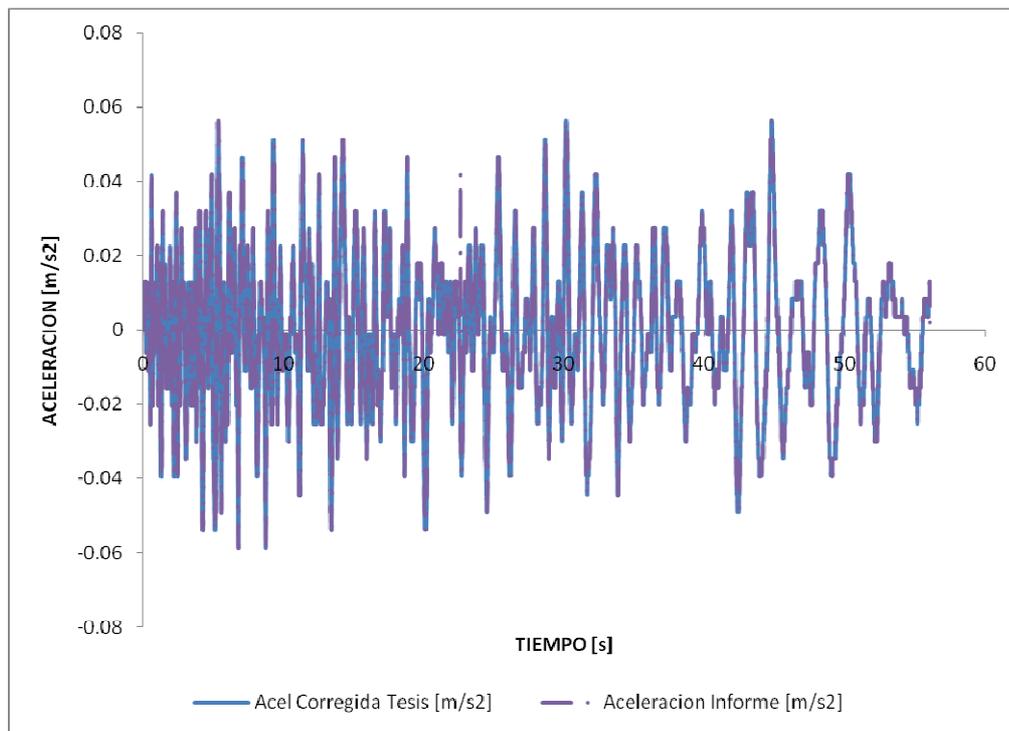
AE60C003. COMPONENTE S 21 22' E.



COMPARACION ENTRE ESPECTROS ELASTICOS

9. EVENTO 5: 28 marzo 96. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C006. COMPONENTE S 15 45' W.



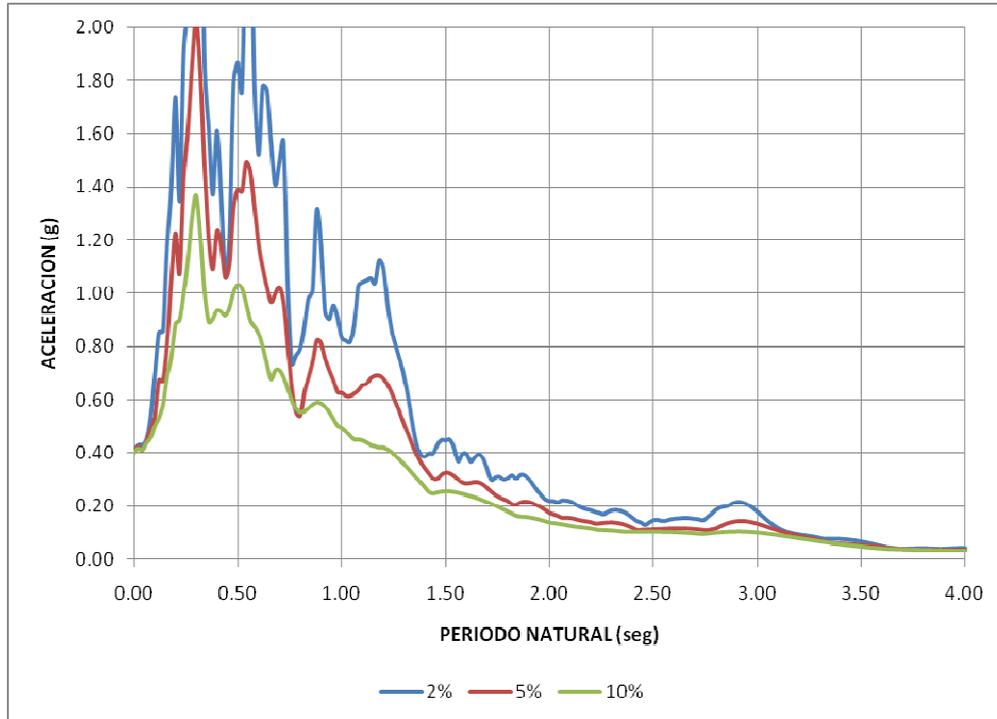
ANEXO No. 5

ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

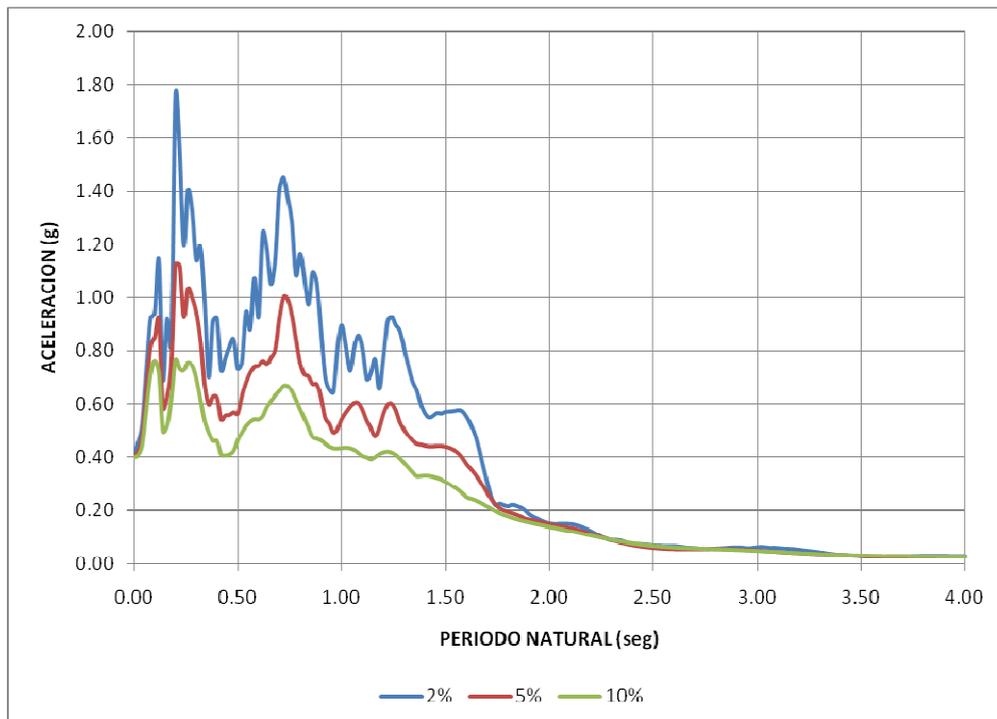
ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

1. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C001. COMPONENTE S 15 45' W.



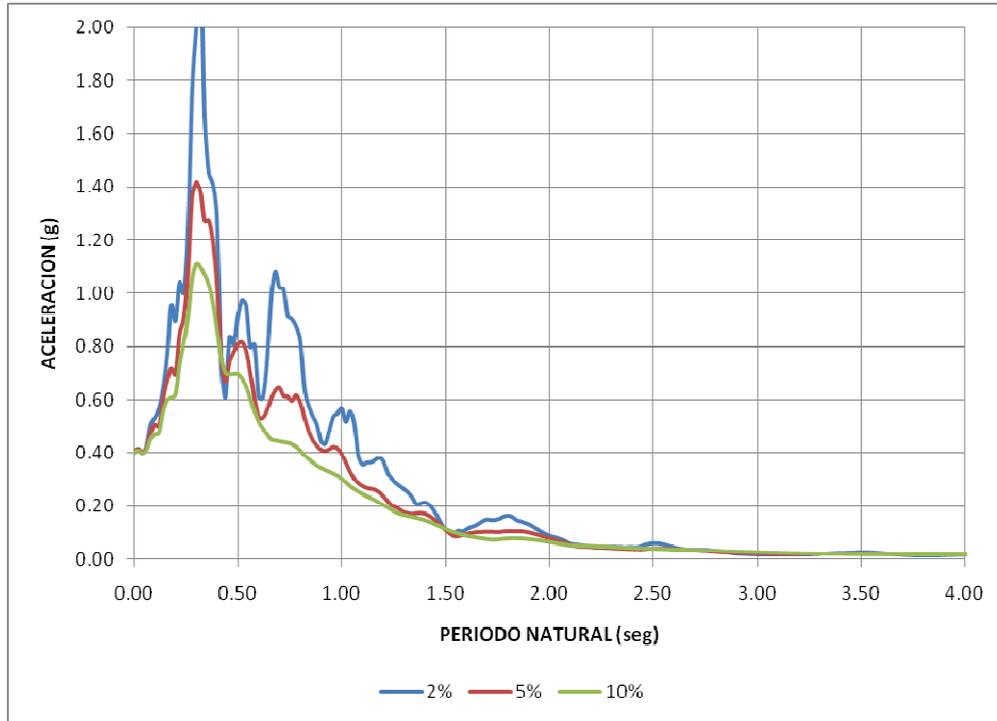
SB55C001. COMPONENTE N 15 45' E.



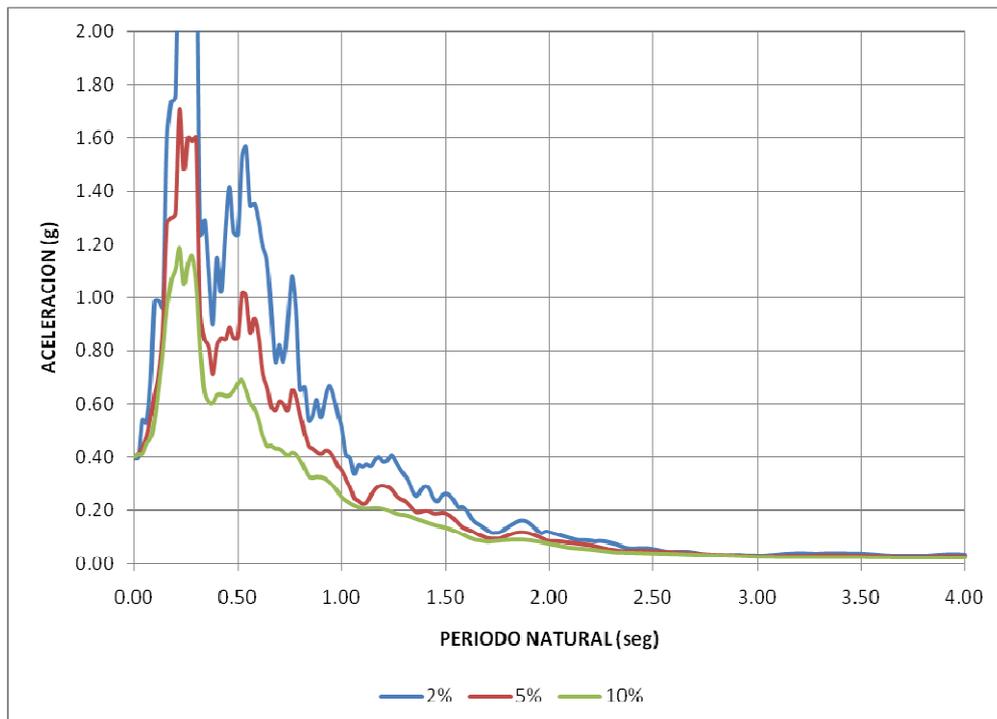
ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

2. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 2: COLEGIO BORJA

CB56C001. COMPONENTE S 11 15' W.



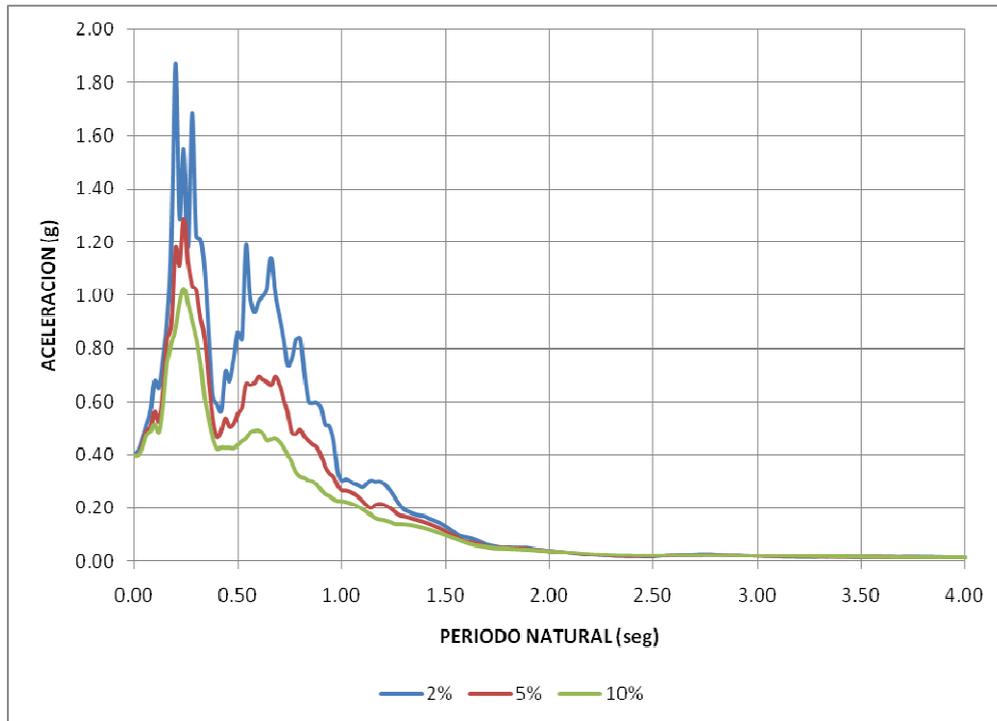
CB56C001. COMPONENTE N 11 15' E.



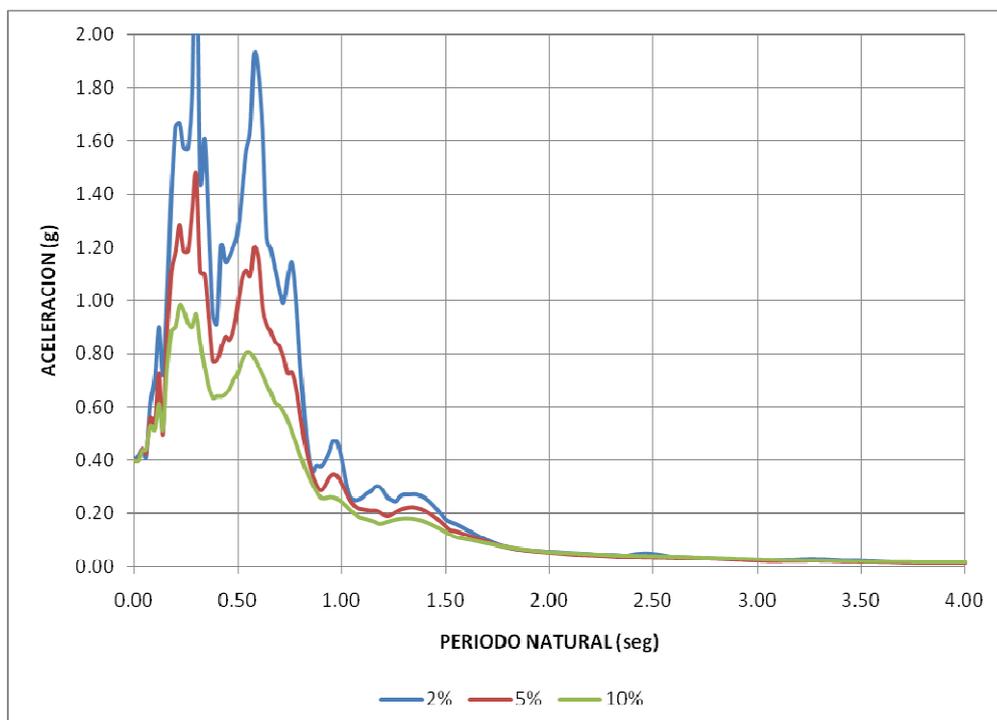
ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

3. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 3: HOSPITAL METROPOLITANO

HM57C001. COMPONENTE E - W.



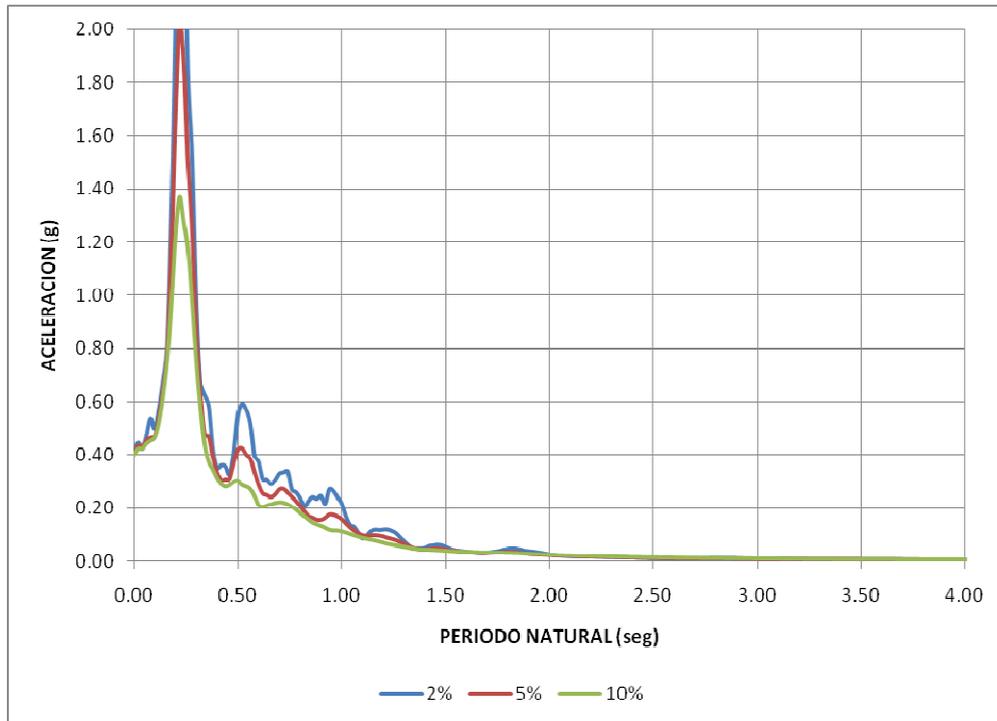
HM57C001. COMPONENTE N - S.



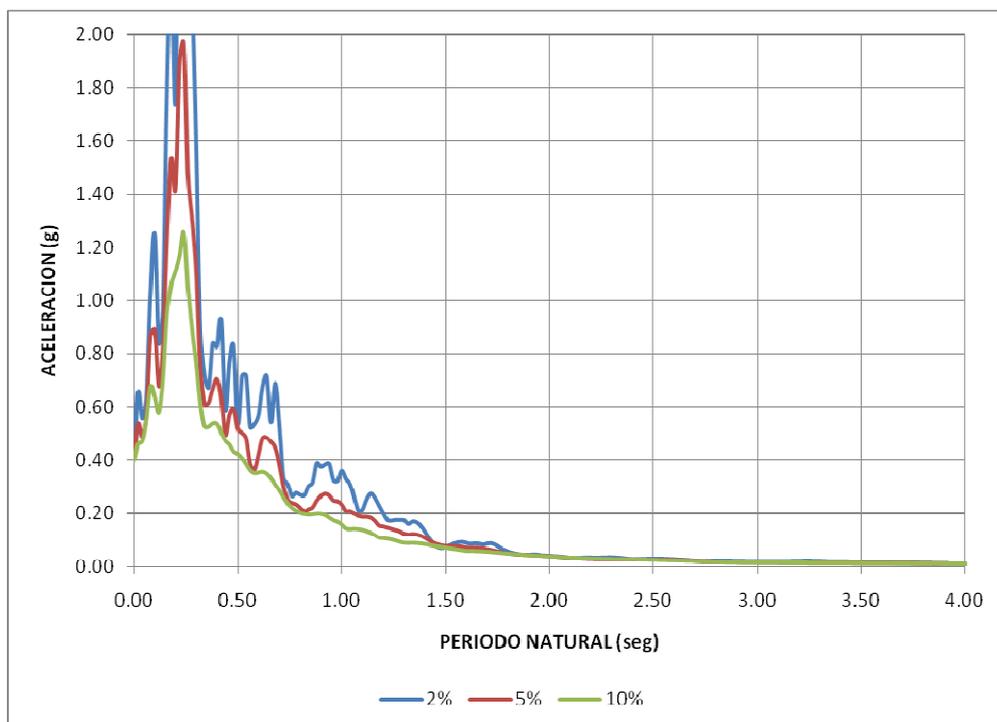
ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

4. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 4: MUSEO AURELIO ESPINOSA

AE60C001. COMPONENTE S 21 22' E.



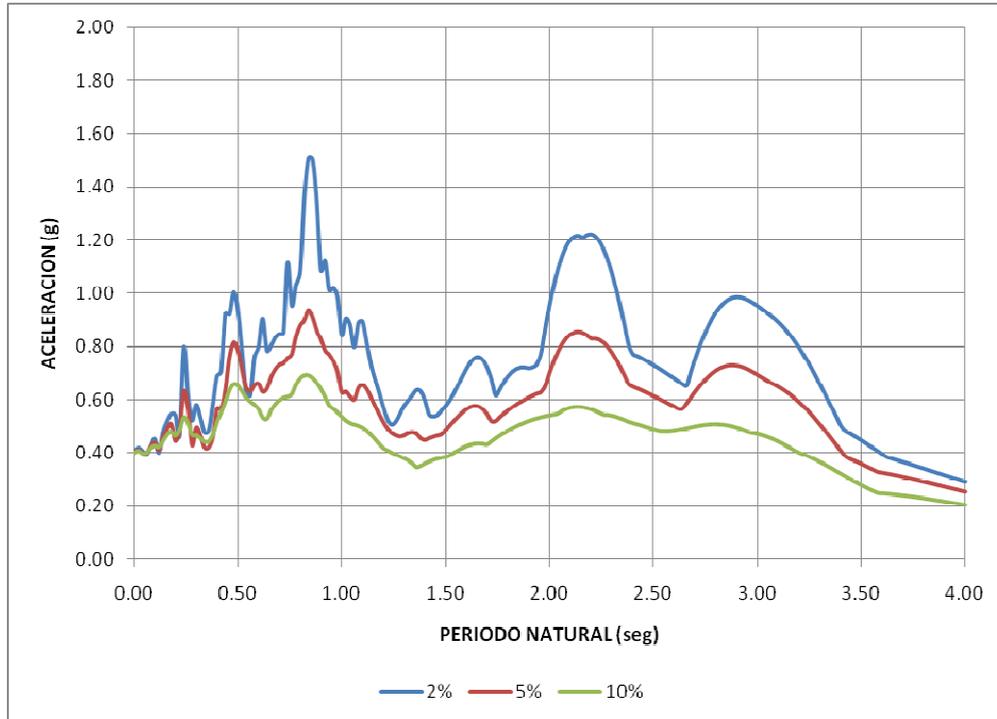
AE60C001. COMPONENTE N 21 22' W.



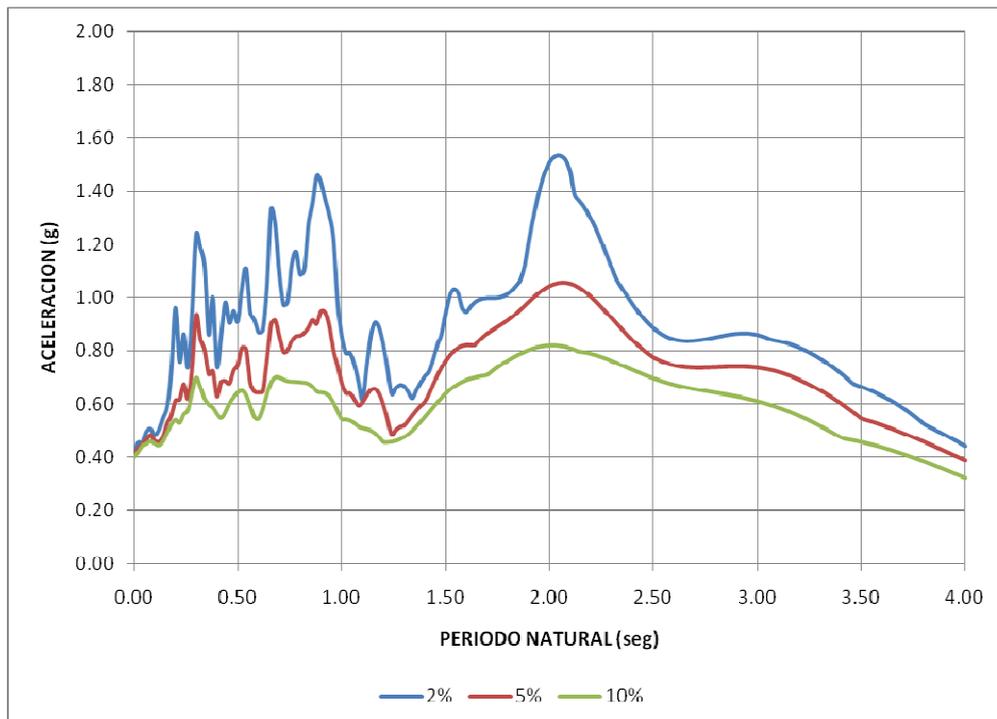
ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

5. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

AE60C002. COMPONENTE S 21 22' E.



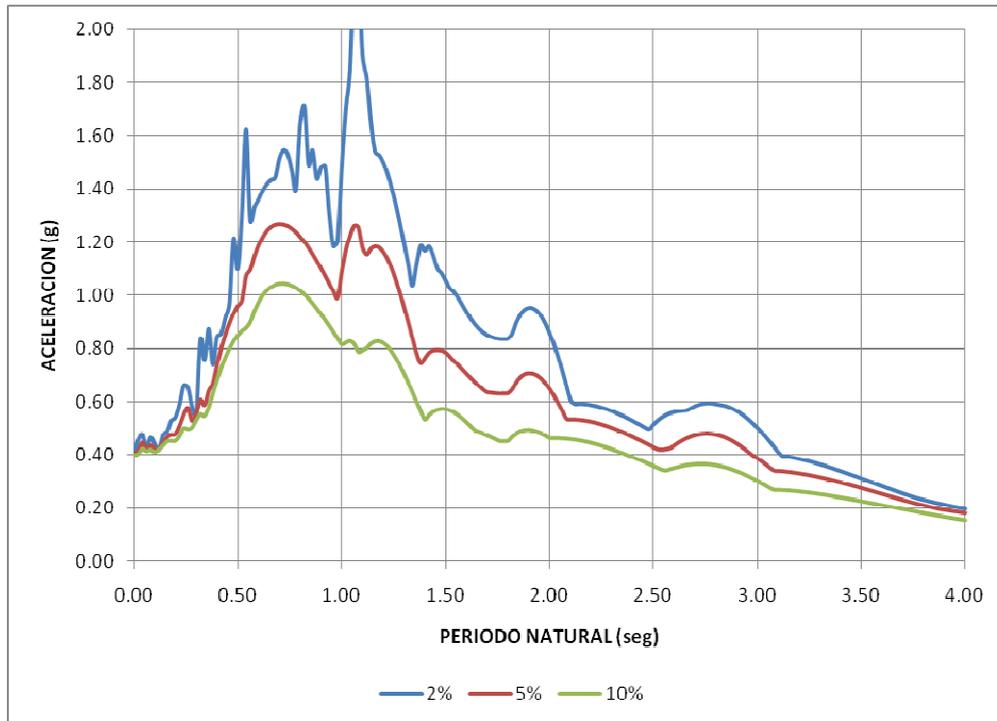
AE60C002. COMPONENTE N 21 22' W.



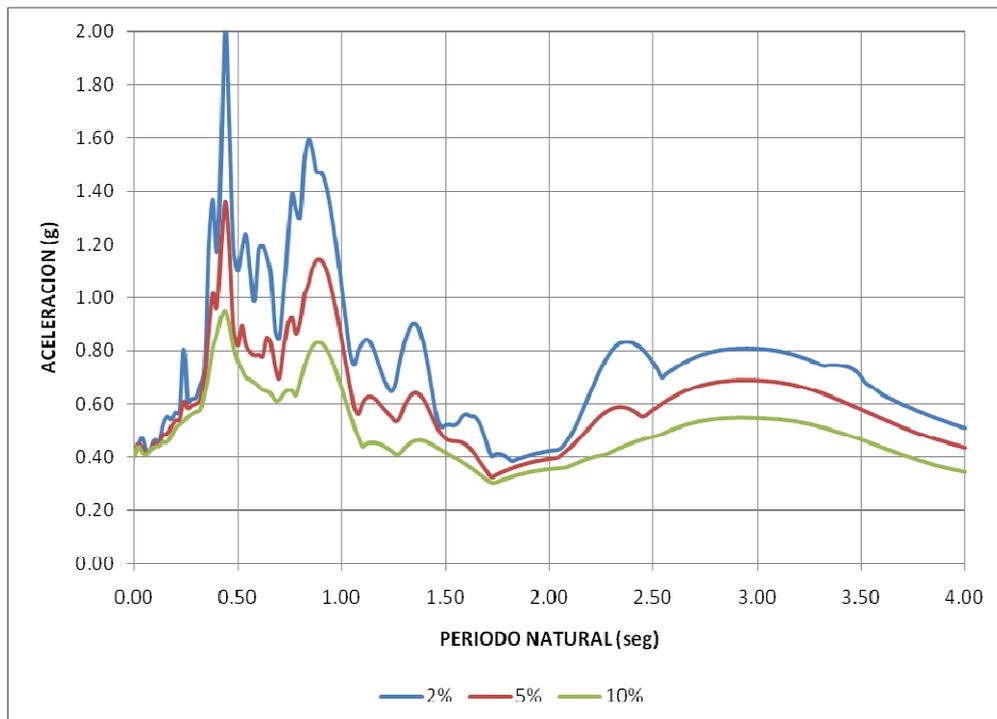
ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

6. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 2: HOSPITAL METROPOLITANO

HM57C003. COMPONENTE E - W.



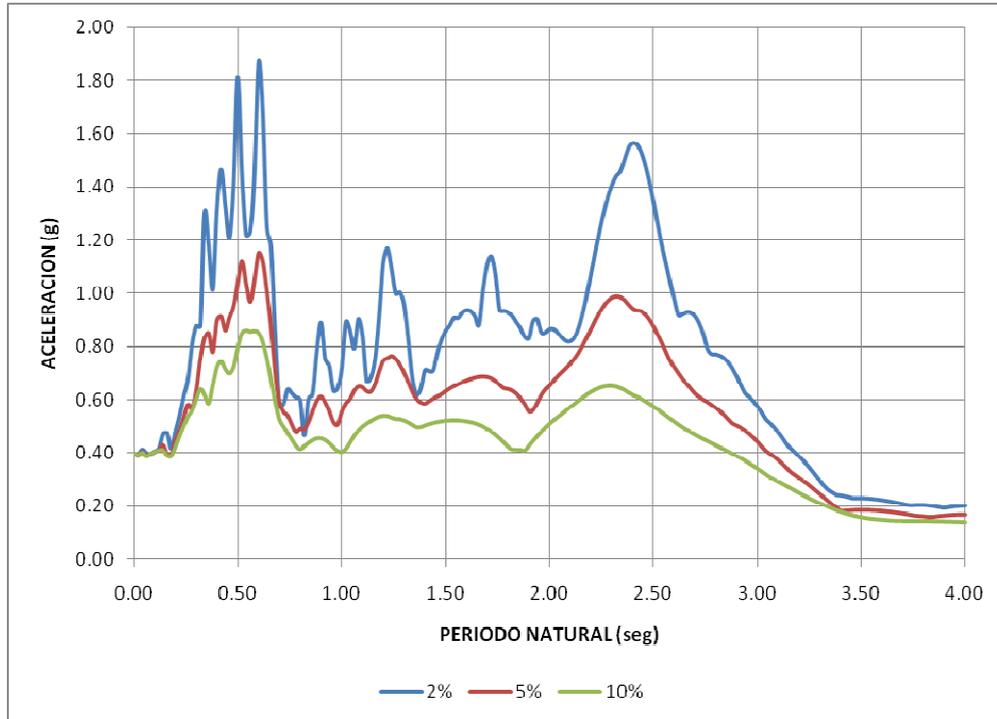
HM57C003. COMPONENTE N - S.



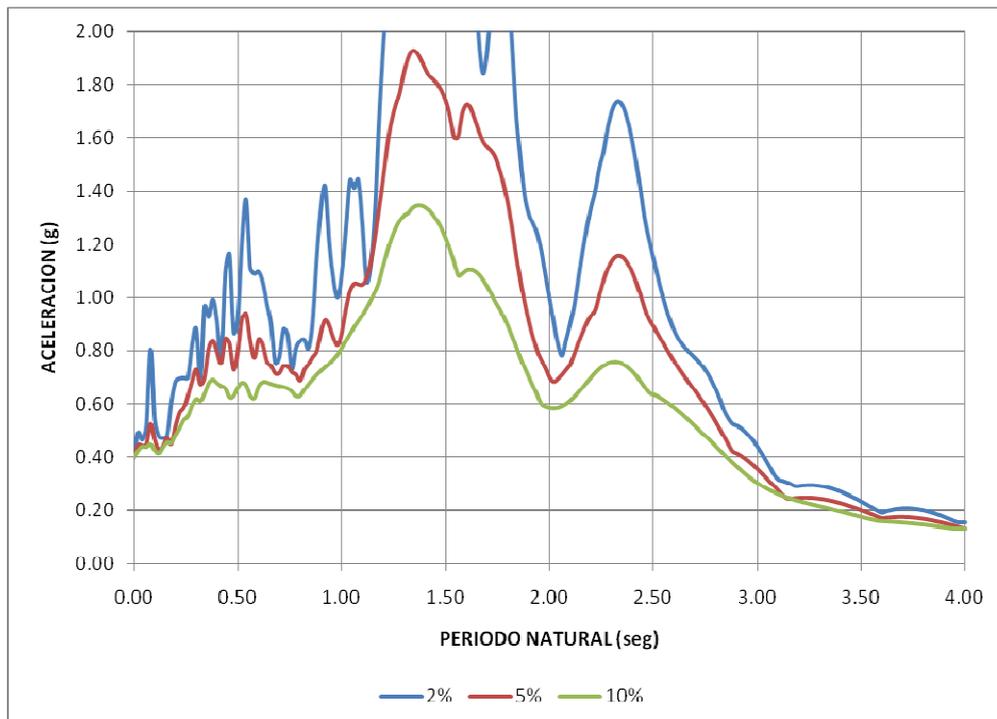
ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

7. EVENTO 3: 3 octubre 95. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C002. COMPONENTE S 15 45' W.



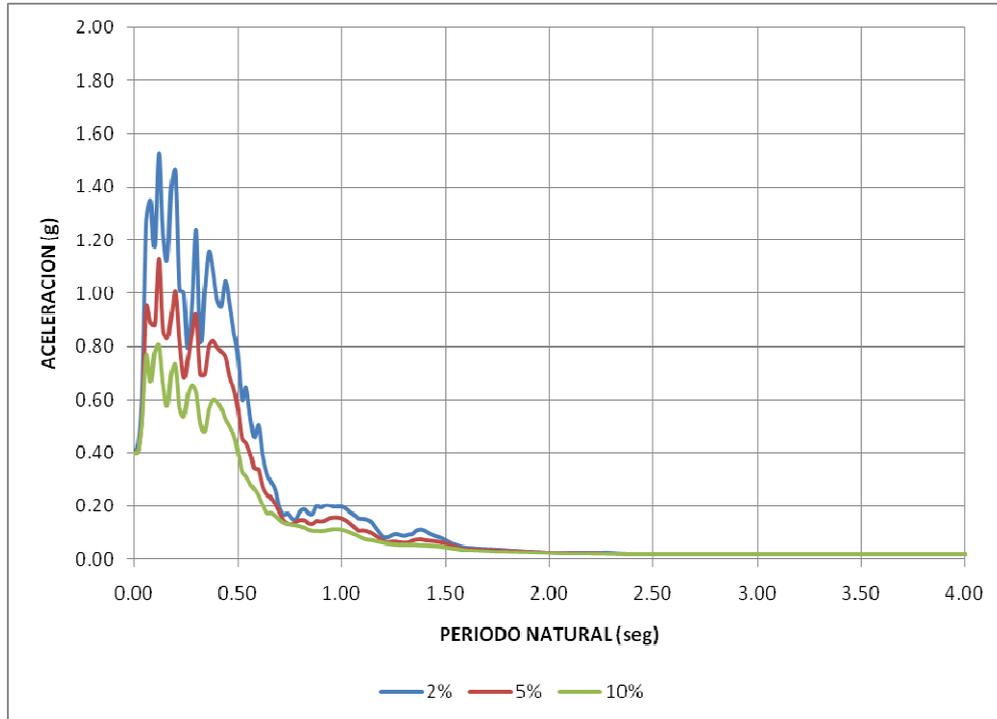
SB55C002. COMPONENTE N 15 45' E.



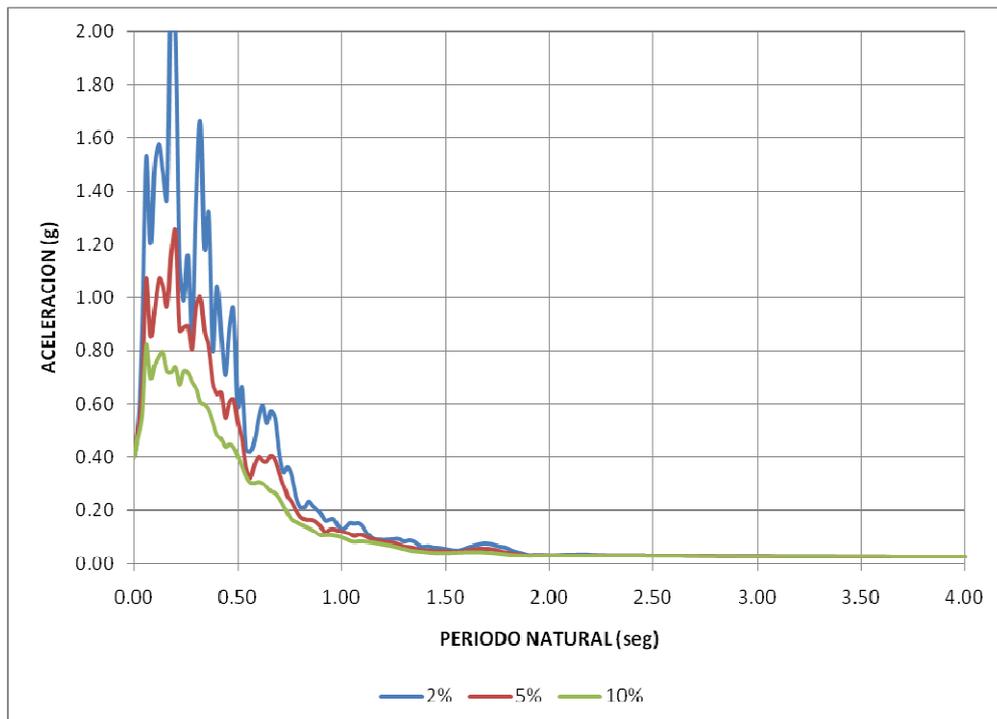
ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

8. EVENTO 4: 17 enero 96. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

AE60C003. COMPONENTE S 21 22' E.



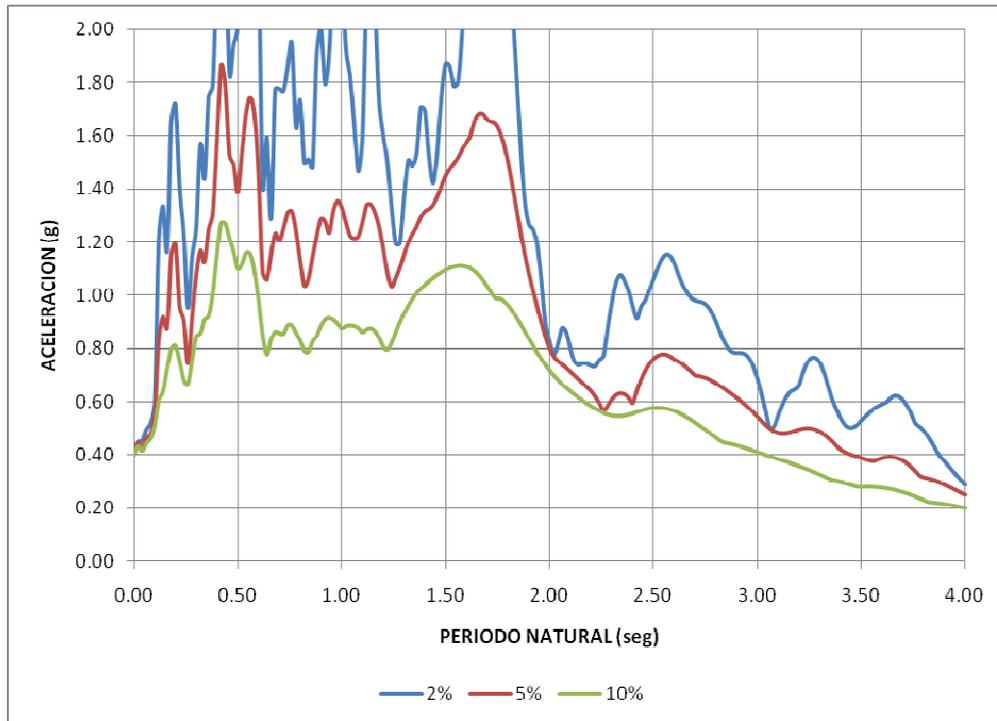
AE60C003. COMPONENTE N 21 22' W.



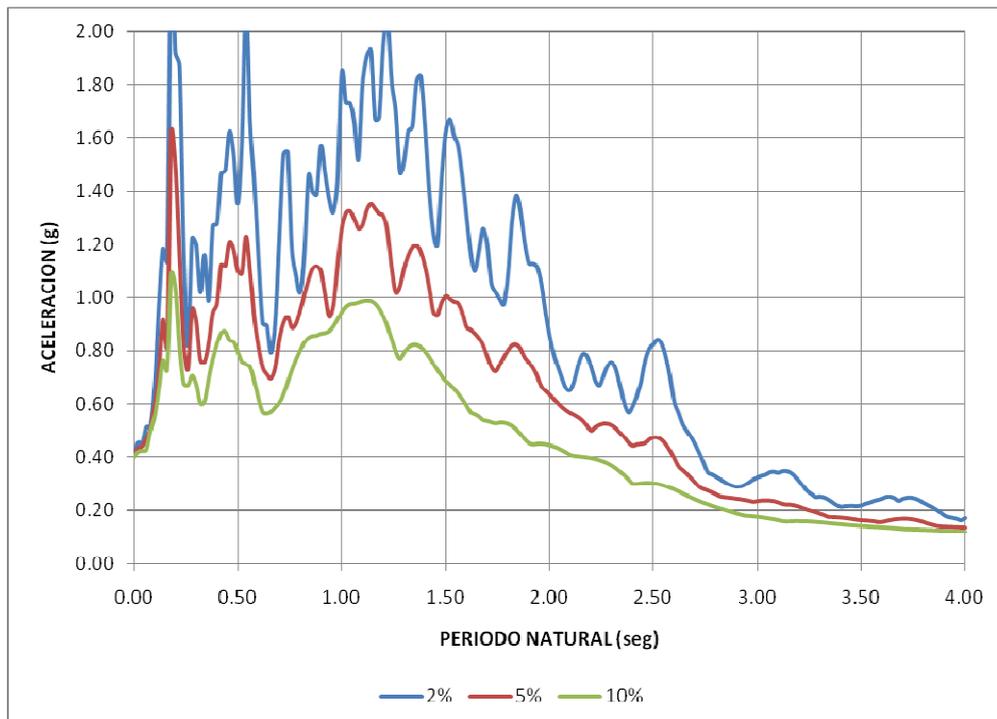
ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

9. EVENTO 5: 28 marzo 96. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C006. COMPONENTE S 15 45' W.

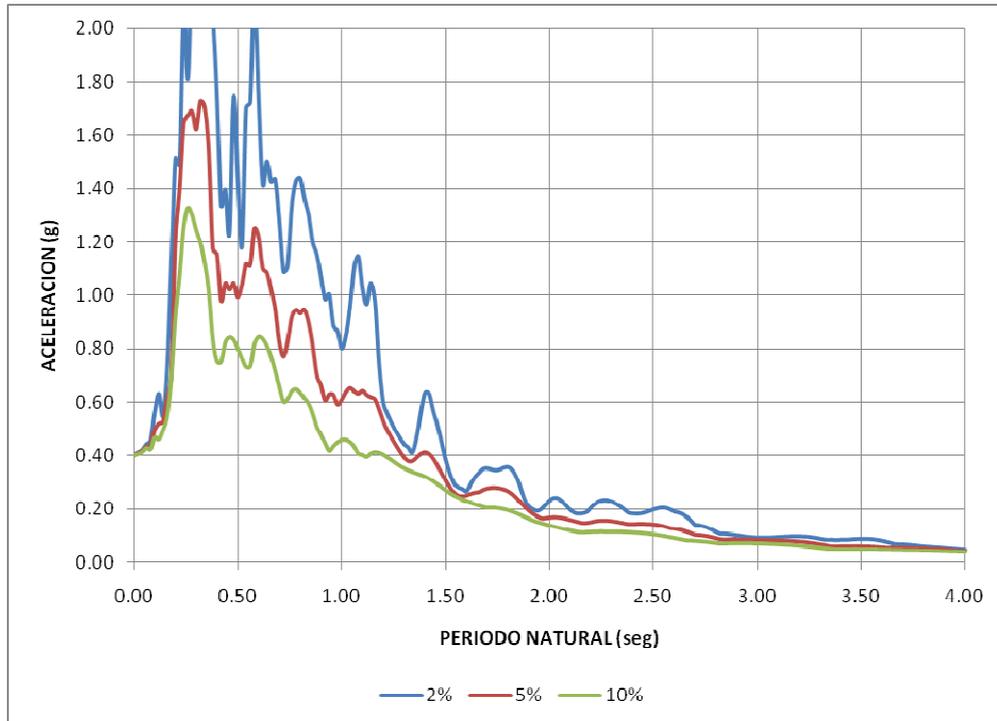


SB55C006. COMPONENTE N 15 45' E.

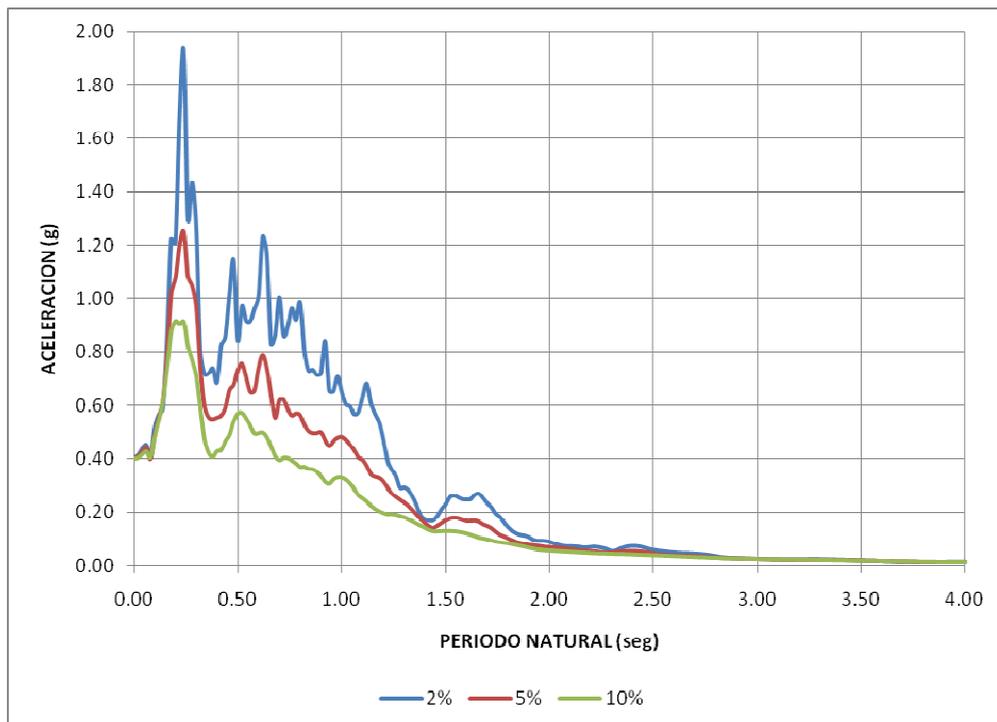


ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

1. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 1: SAN BARTOLO
SB55C001. COMPONENTE VERTICAL.

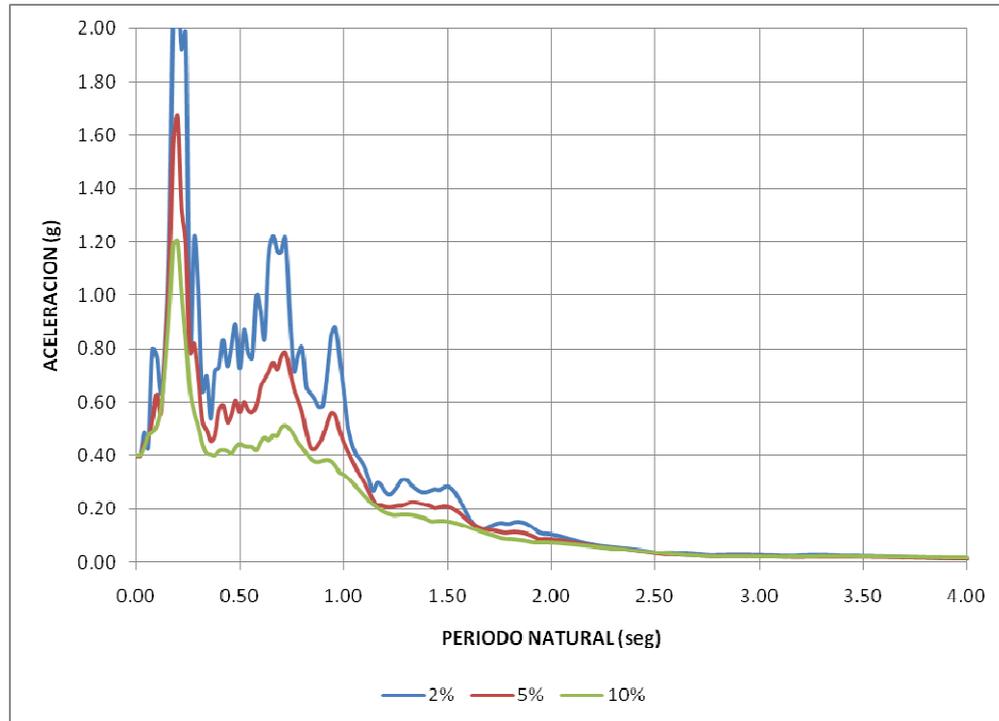


2. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 2: COLEGIO BORJA
CB56C001. COMPONENTE VERTICAL

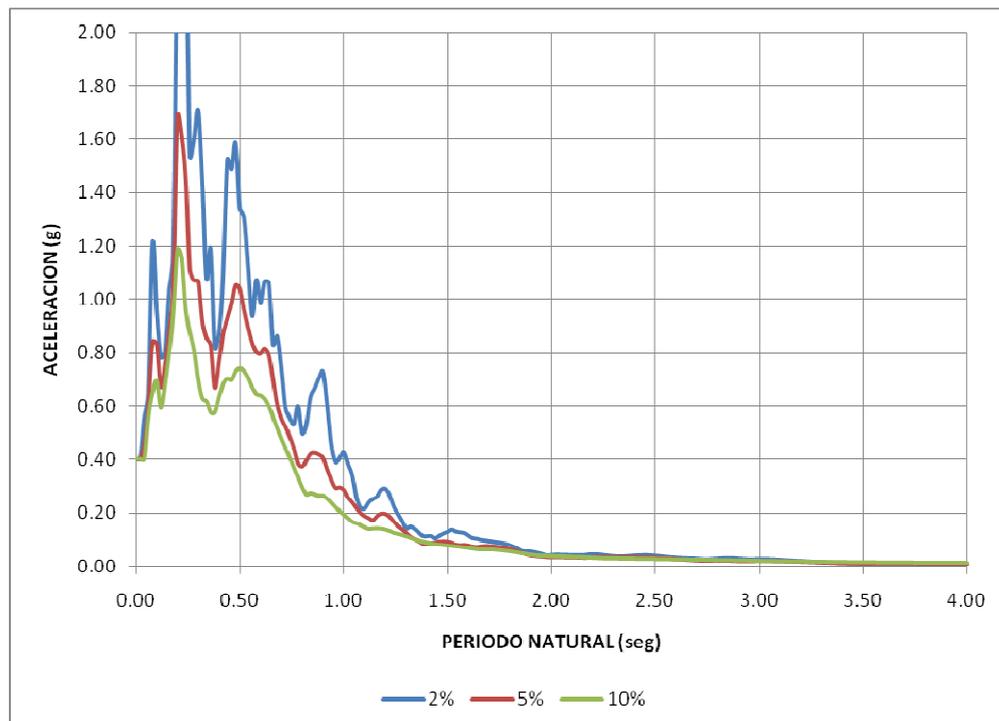


ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

3. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 3: HOSPITAL METROPOLITANO HM57C001. COMPONENTE VERTICAL.

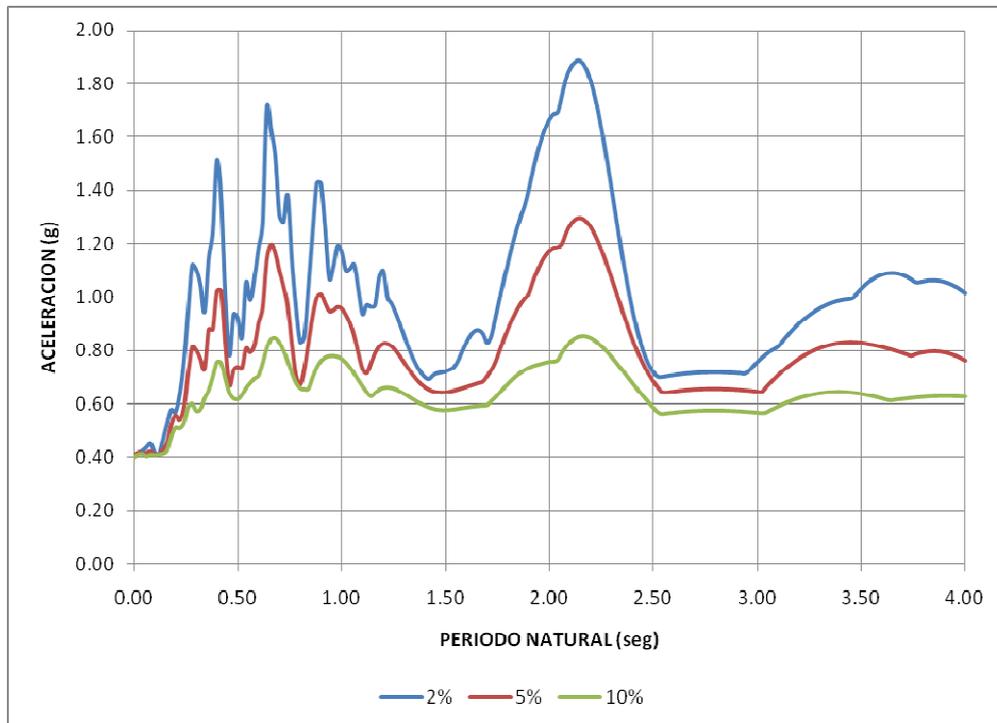


4. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 4: MUSEO AURELIO ESPINOSA AE60C001. COMPONENTE VERTICAL

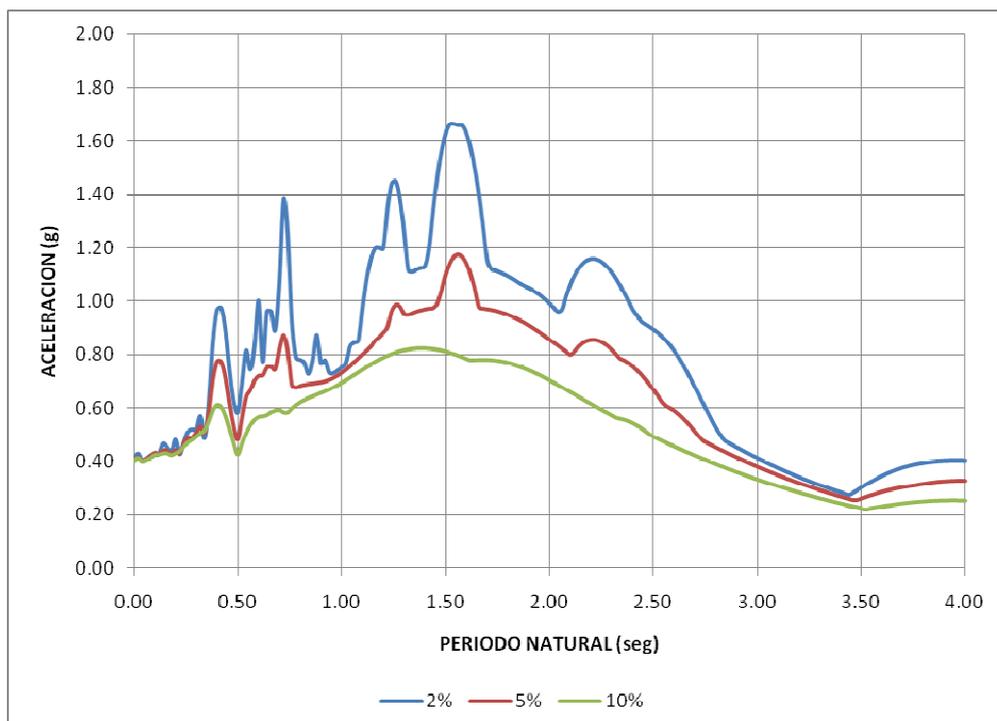


ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

5. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA AE60C002. COMPONENTE VERTICAL

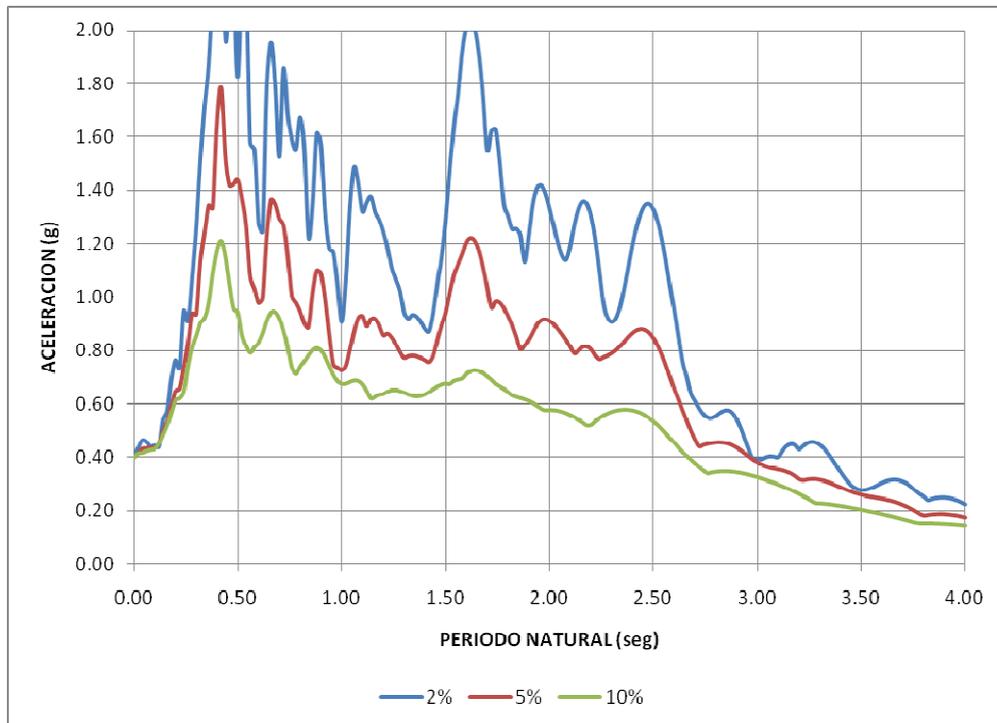


6. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 2: HOSPITAL METROPOLITANO HM57C003. COMPONENTE VERTICAL

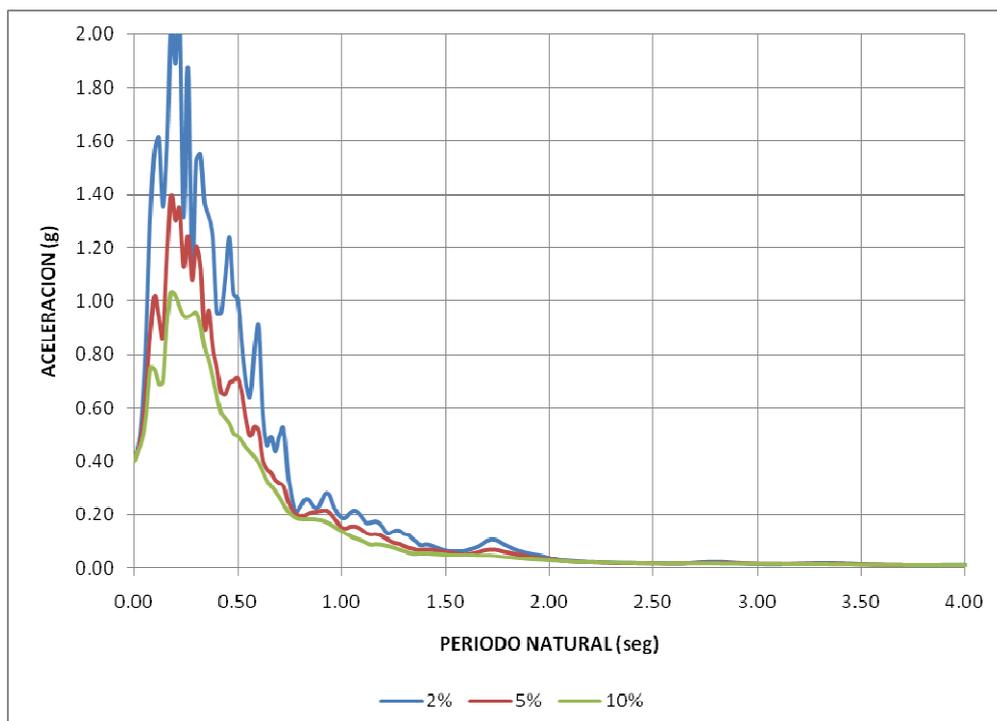


ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

7. EVENTO 3: 3 octubre 95. ESTACION 1: SAN BARTOLO SB55C002. COMPONENTE VERTICAL



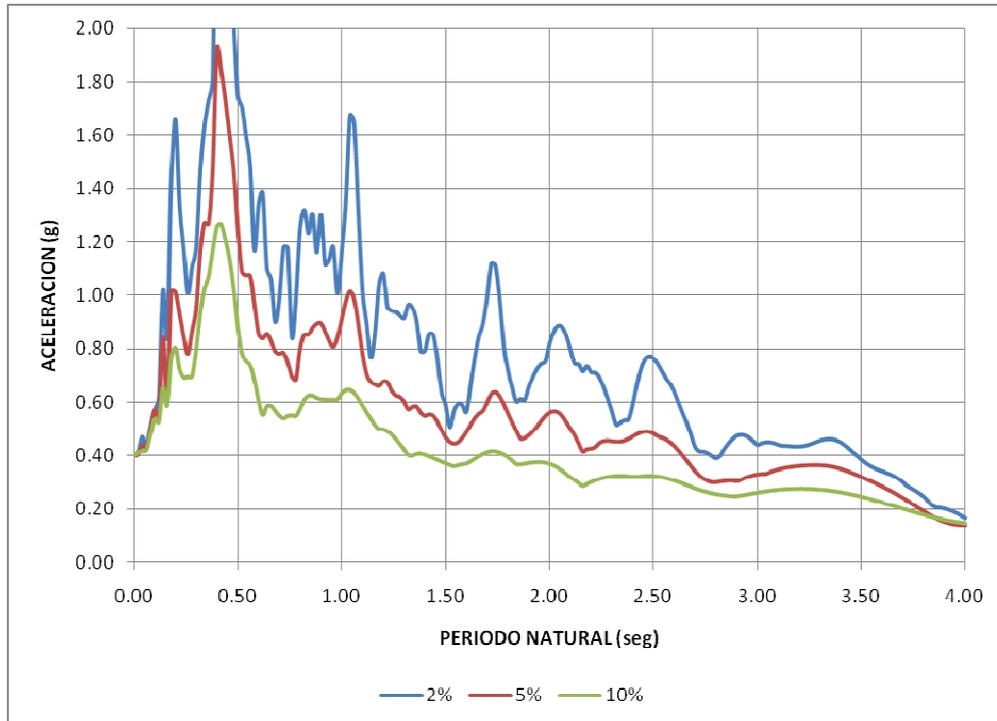
8. EVENTO 4: 17 enero 96. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA AE60C003. COMPONENTE VERTICAL



ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS

9. EVENTO 5: 28 marzo 96. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C006. COMPONENTE VERTICAL



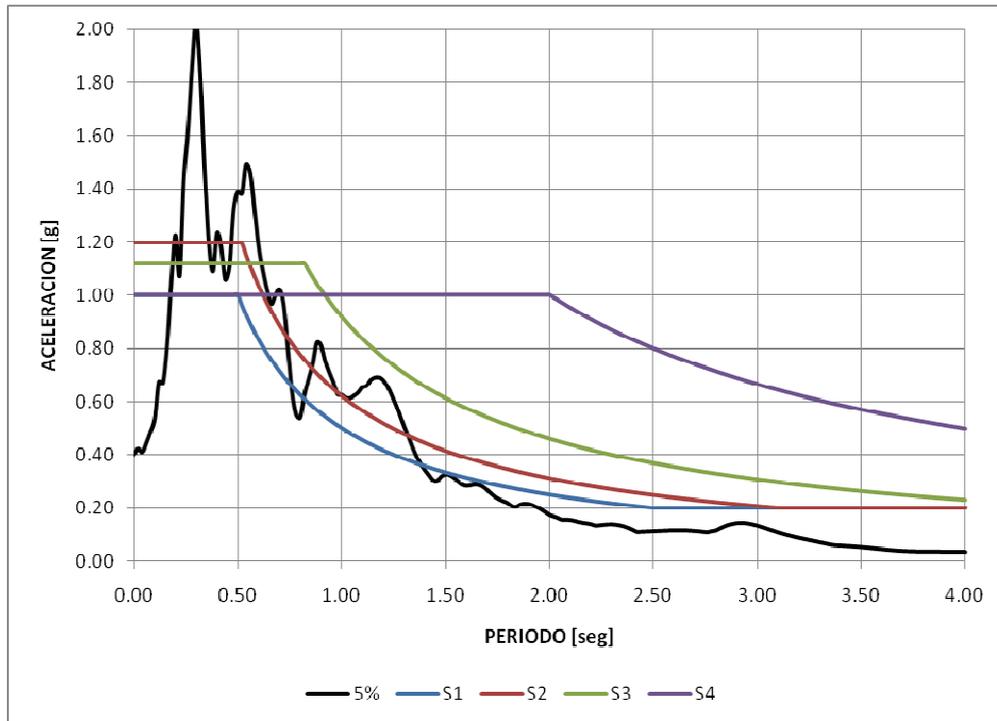
ANEXO No. 6

**ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL
C.E.C.**

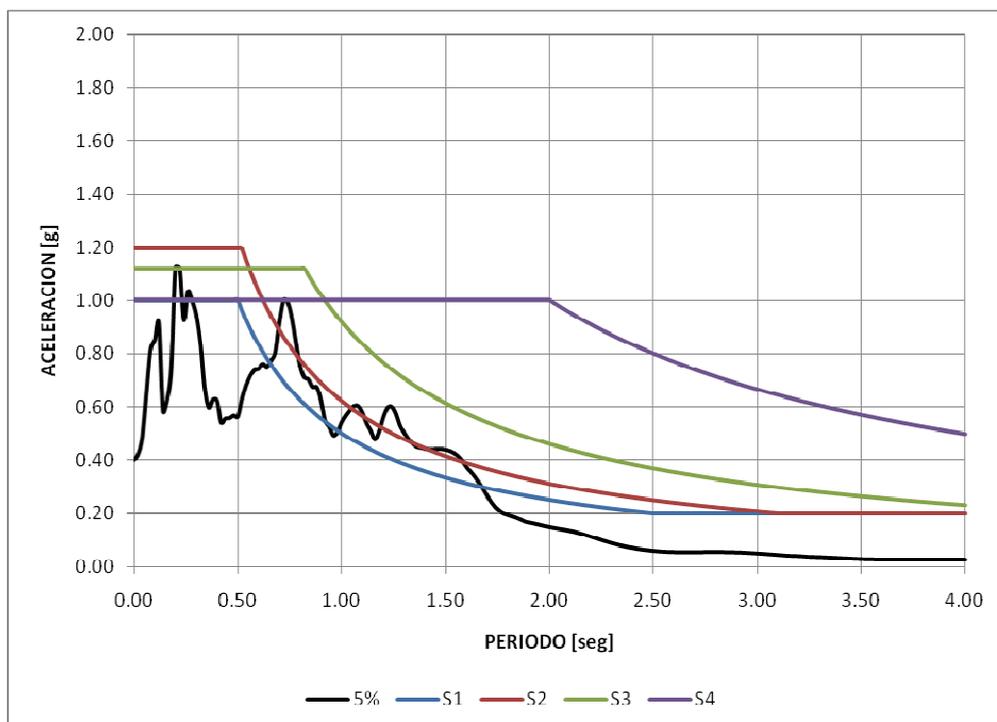
ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C.

1. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C001. COMPONENTE S 15 45' W.



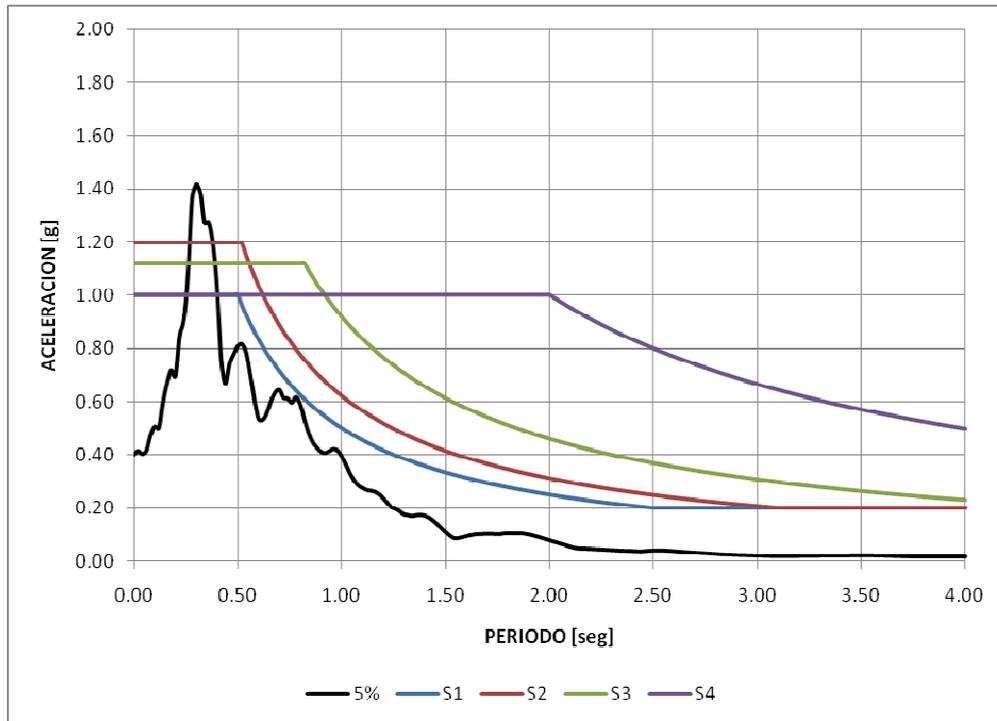
SB55C001. COMPONENTE N 15 45' E.



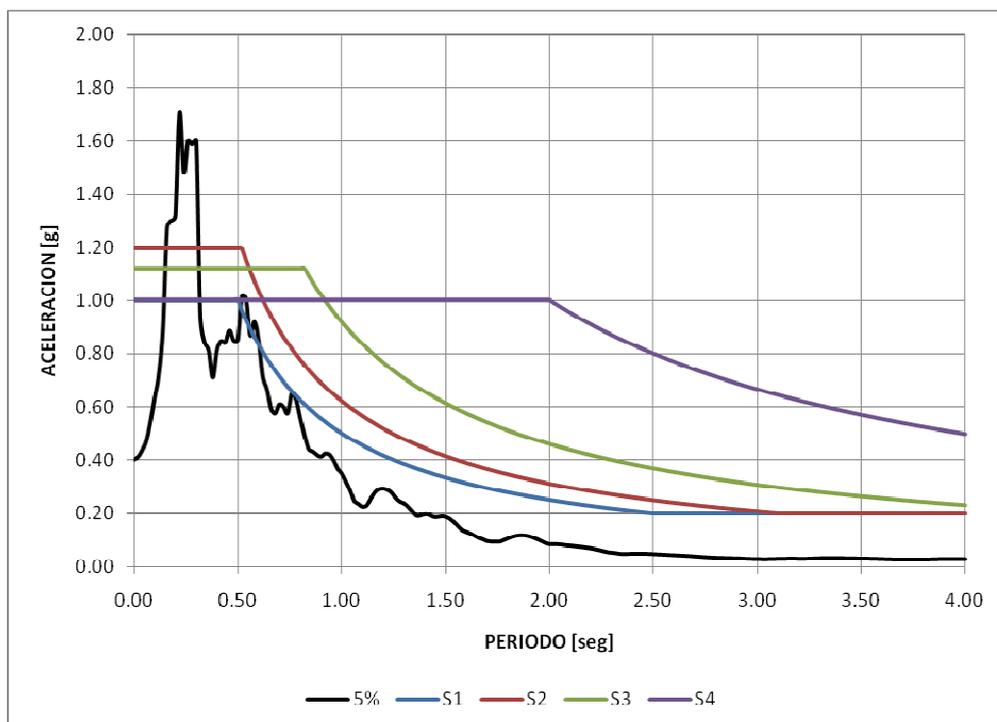
ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C.

2. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 2: COLEGIO BORJA

CB56C001. COMPONENTE S 11 15' W.



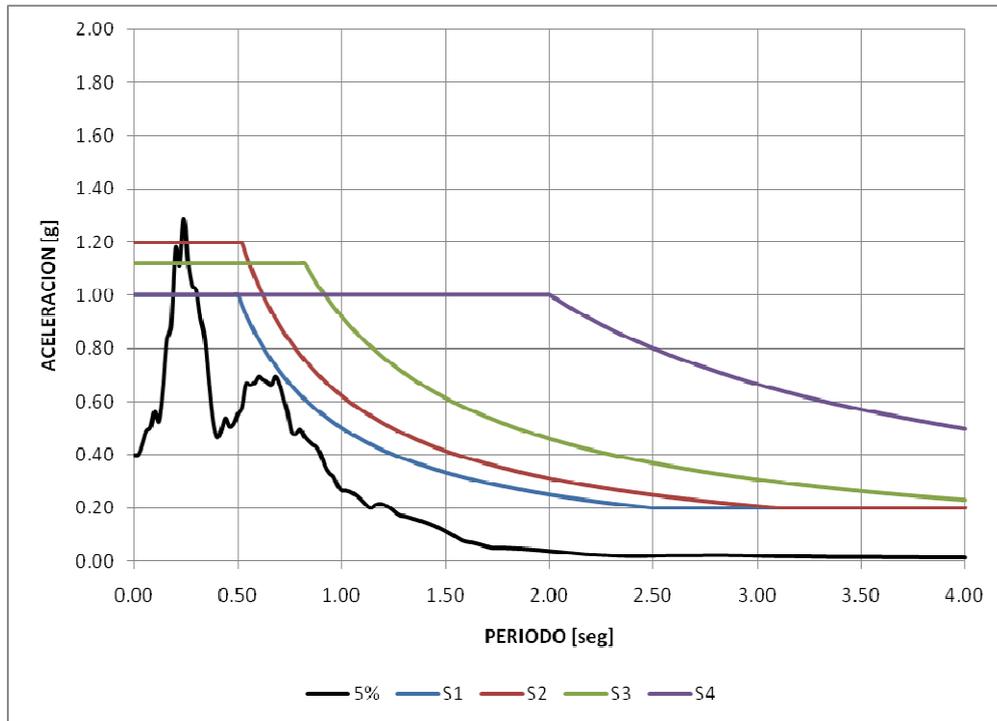
CB56C001. COMPONENTE N 11 15' E.



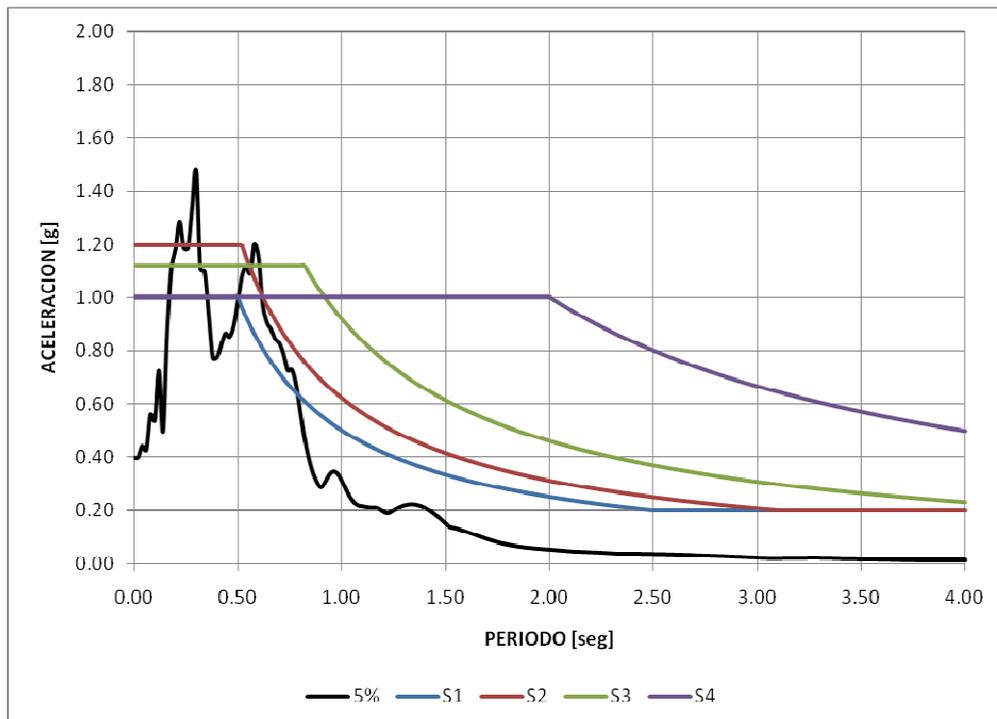
ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C.

3. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 3: HOSPITAL METROPOLITANO

HM57C001. COMPONENTE E - W.



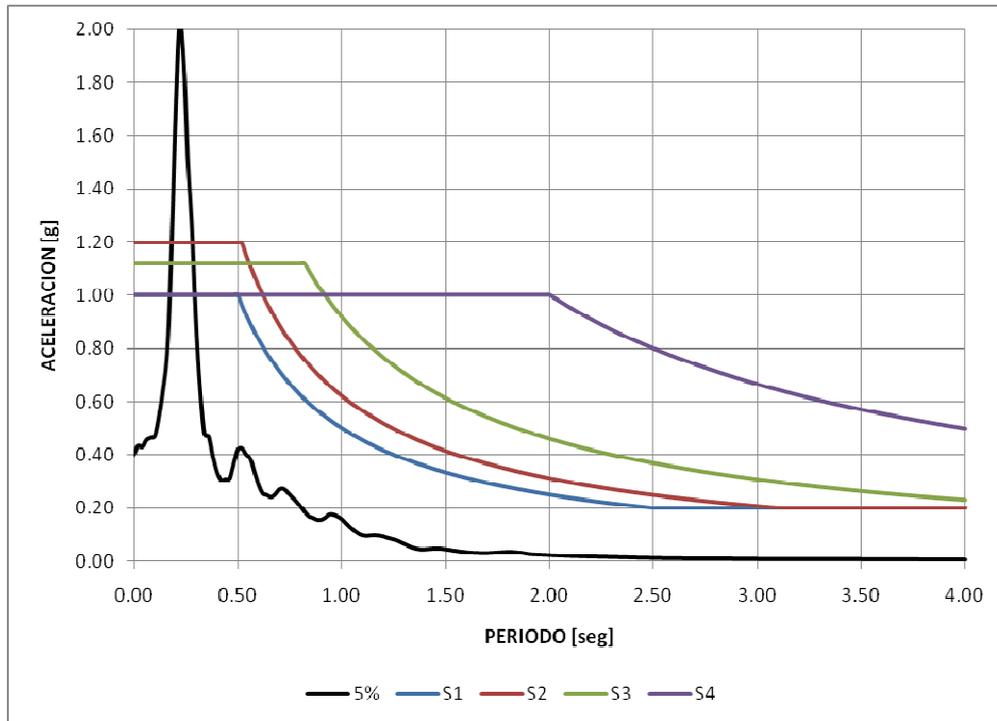
HM57C001. COMPONENTE N - S.



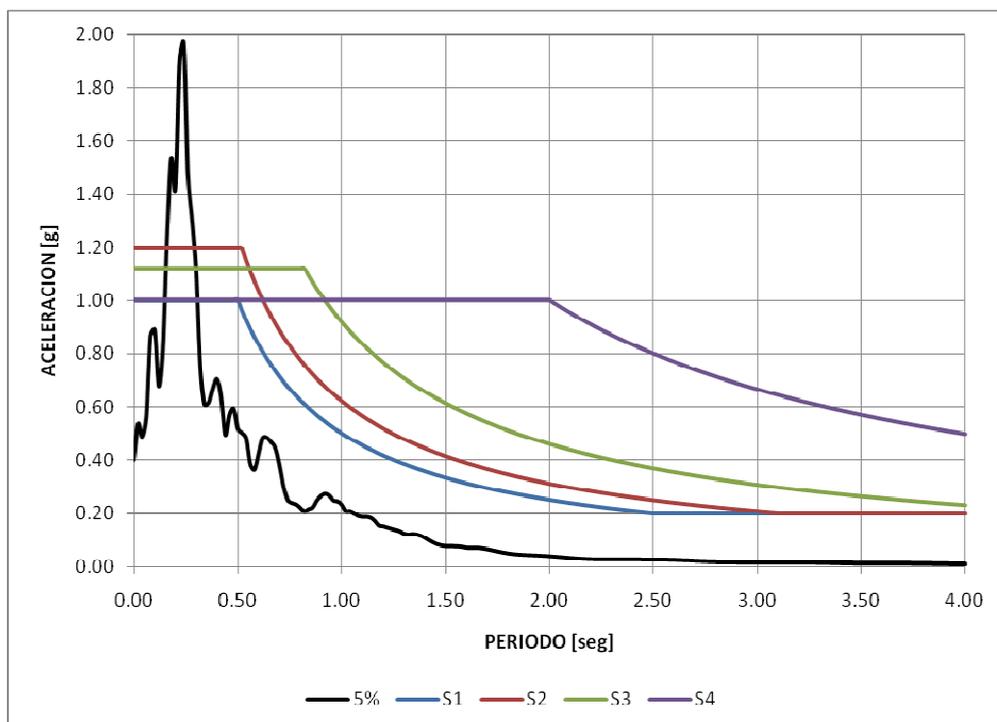
ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C.

4. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 4: MUSEO AURELIO ESPINOSA

AE60C001. COMPONENTE S 21 22' E.



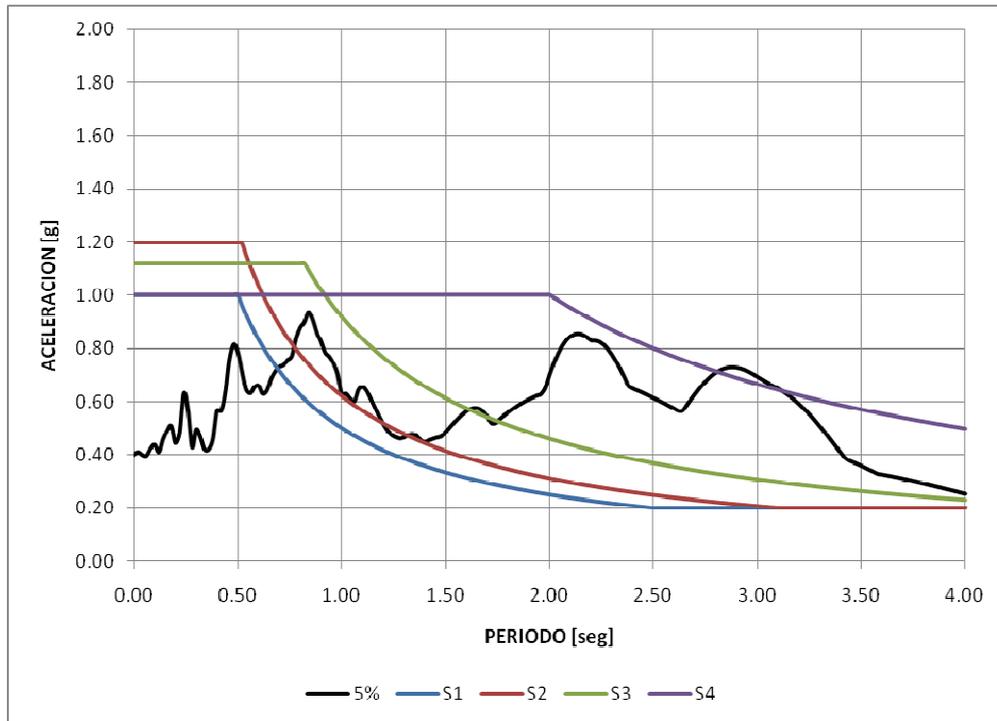
AE60C001. COMPONENTE N 21 22' W.



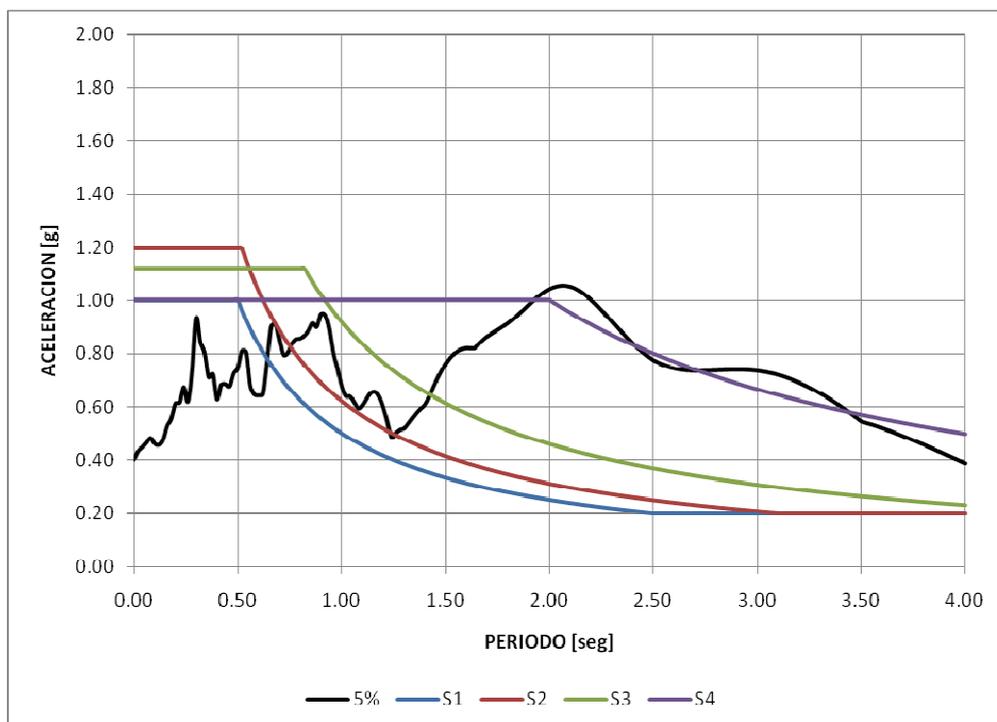
ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C.

5. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

AE60C002. COMPONENTE S 21 22' E.



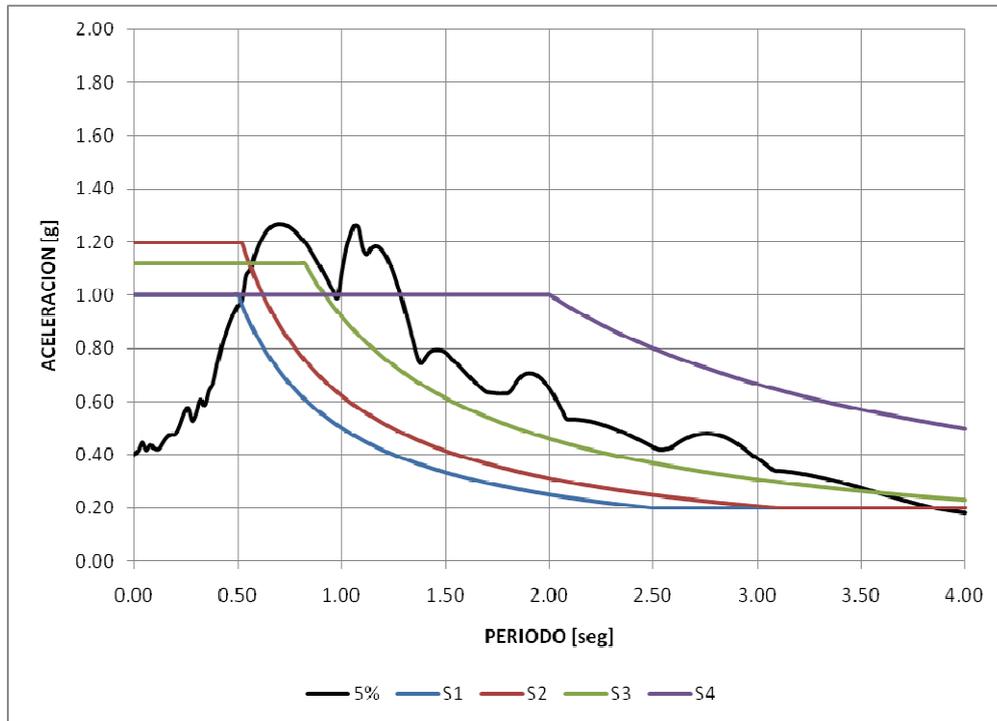
AE60C002. COMPONENTE N 21 22' W.



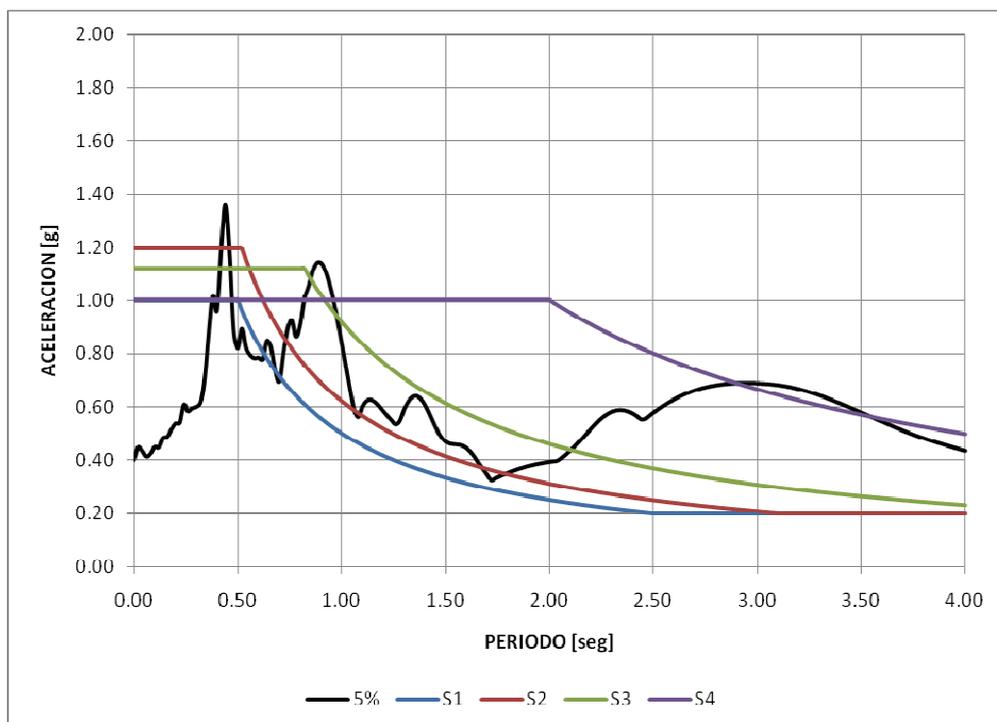
ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C.

6. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 2: HOSPITAL METROPOLITANO

HM57C003. COMPONENTE E - W.



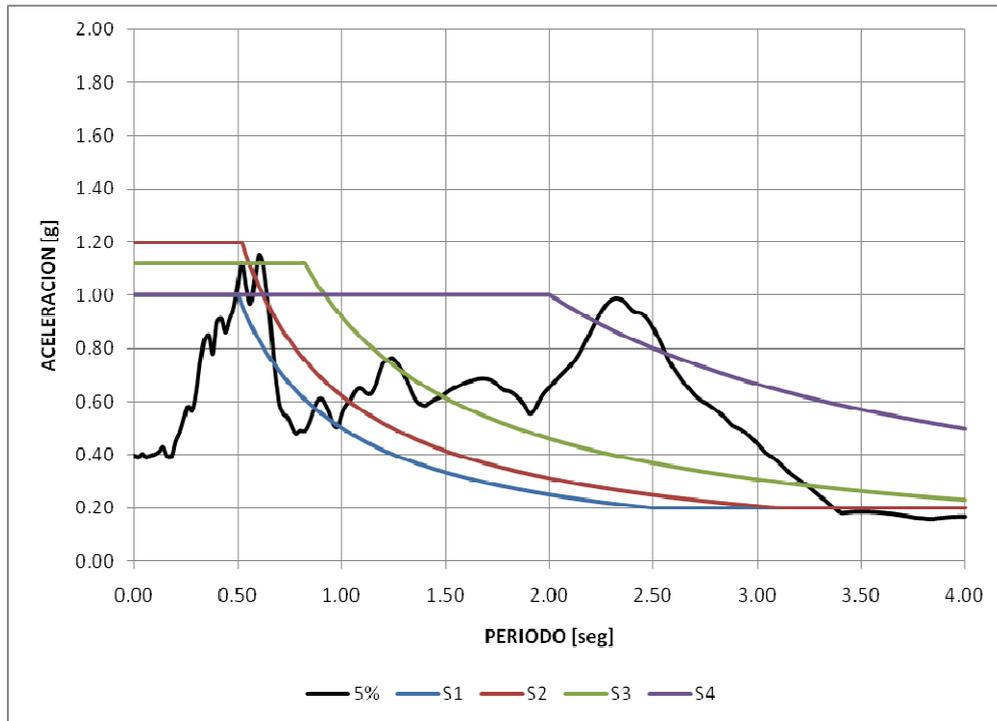
HM57C003. COMPONENTE N - S.



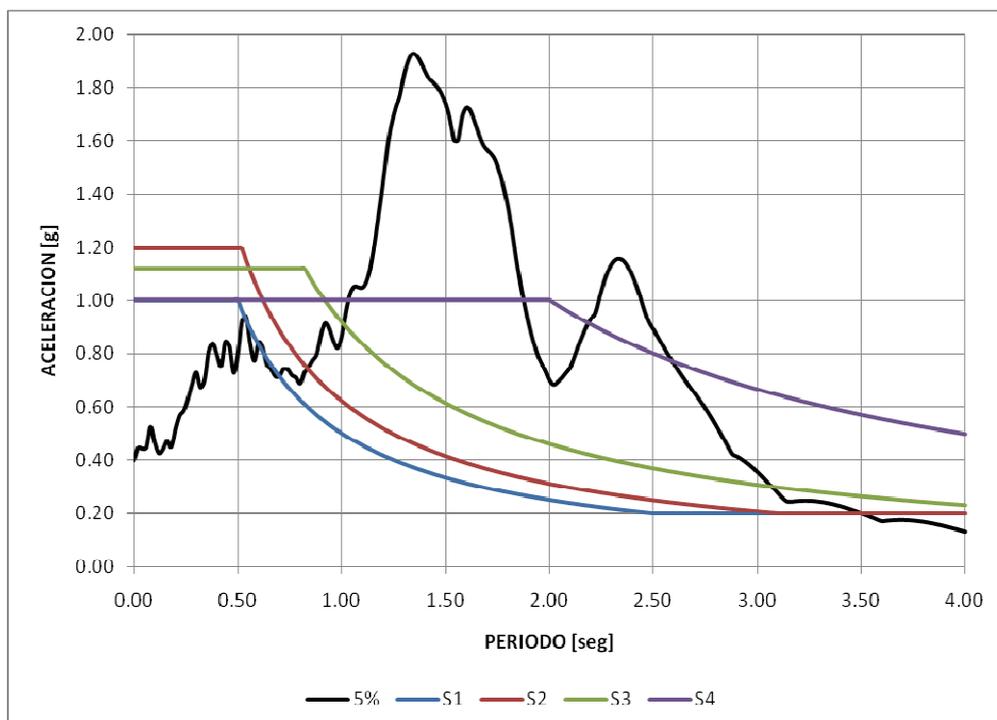
ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C.

7. EVENTO 3: 3 octubre 95. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C002. COMPONENTE S 15 45' W.



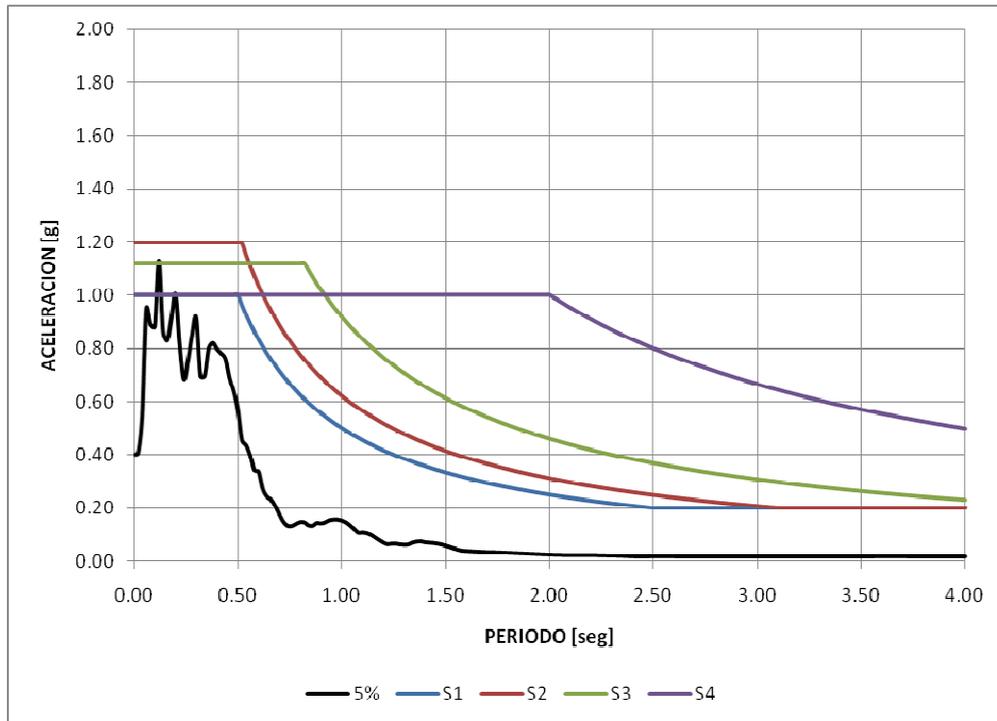
SB55C002. COMPONENTE N 15 45' E.



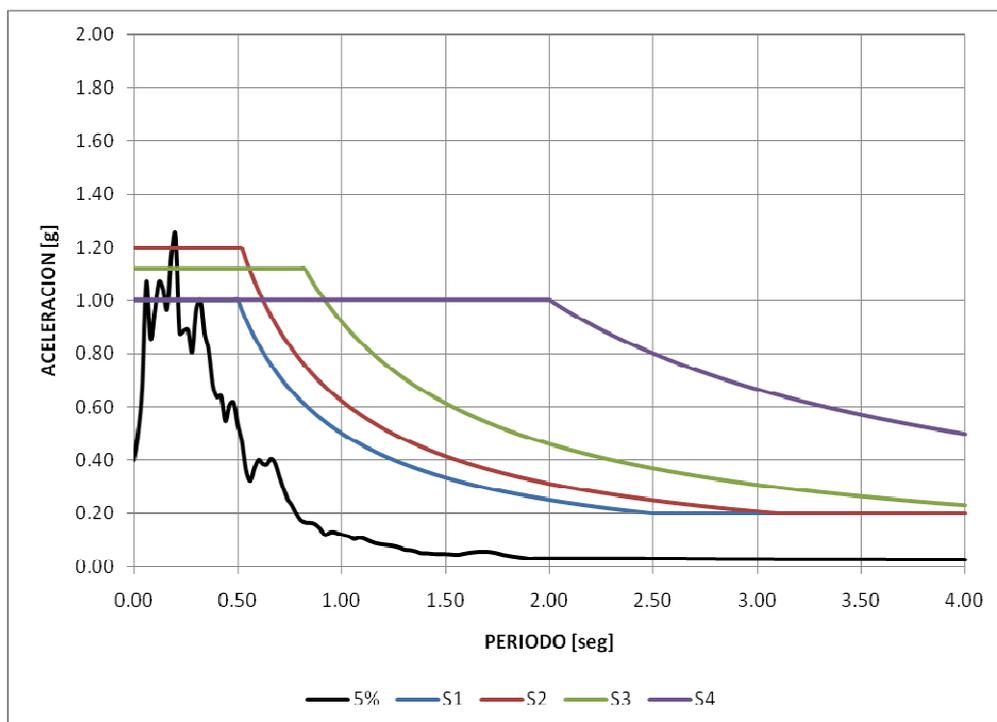
ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C.

8. EVENTO 4: 17 enero 96. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

AE60C003. COMPONENTE S 21 22' E.



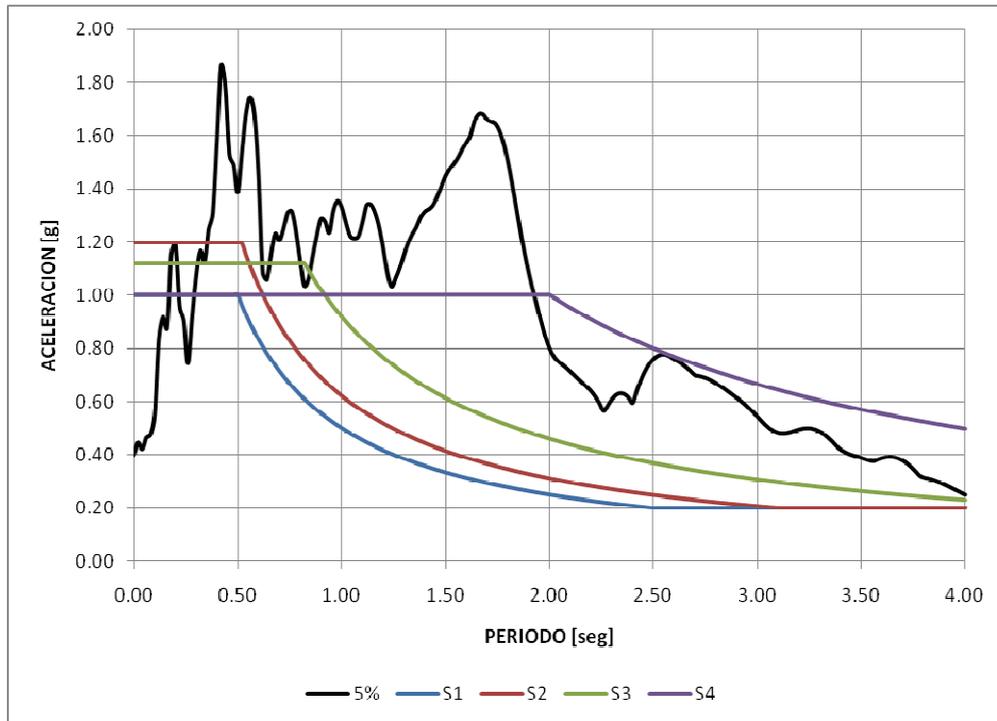
AE60C003. COMPONENTE N 21 22' W.



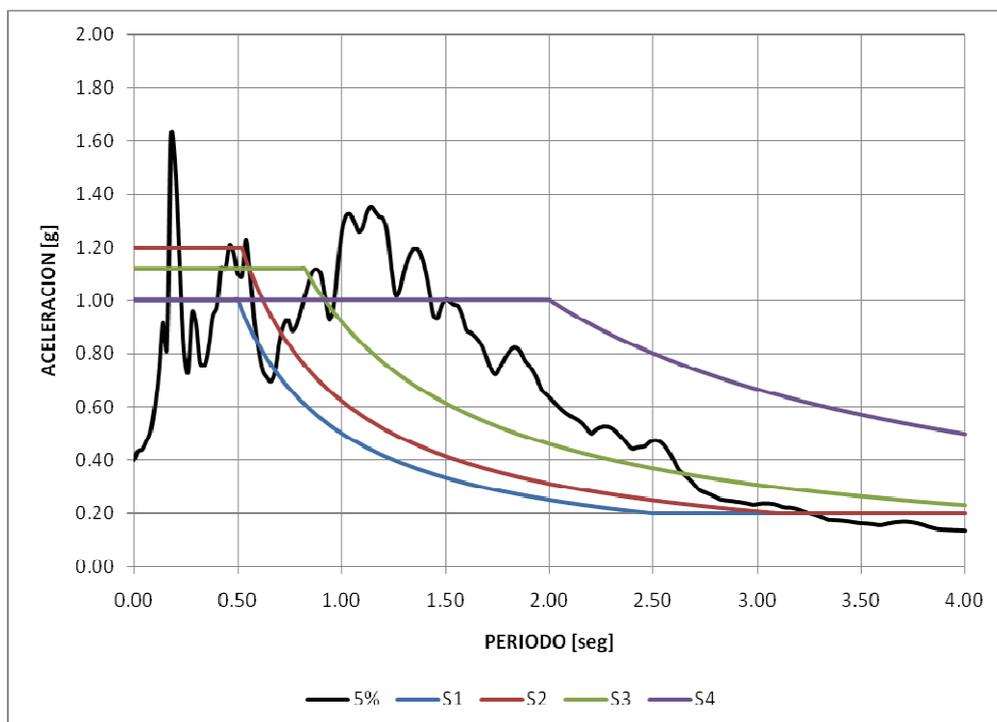
ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C

9. EVENTO 5: 28 marzo 96. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C006. COMPONENTE S 15 45' W.



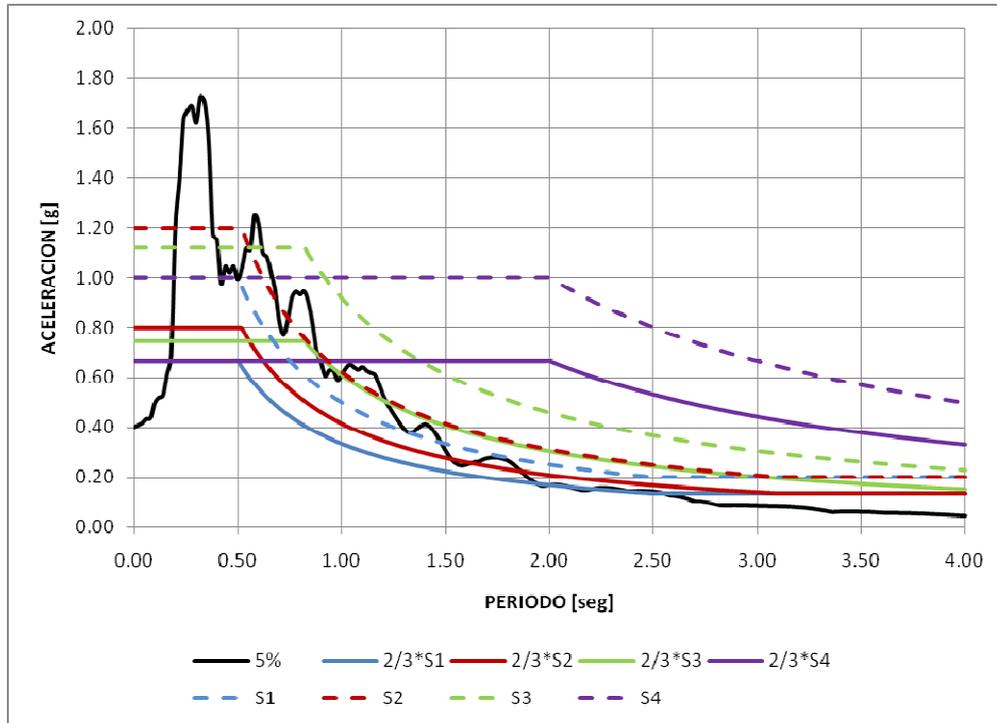
SB55C006. COMPONENTE N 15 45' E.



ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C

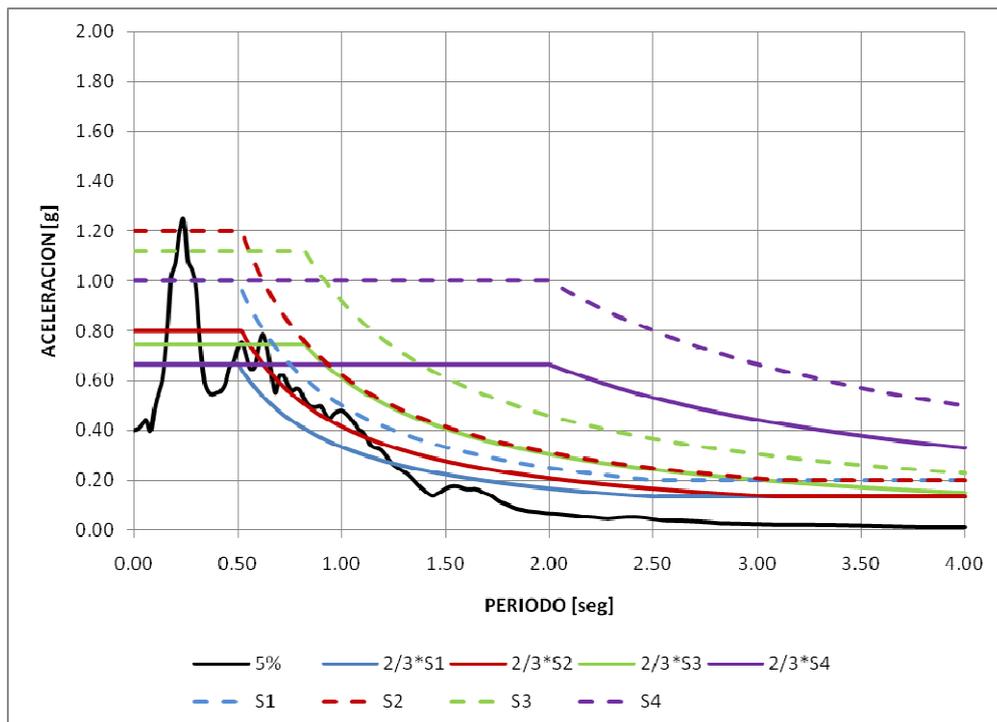
1. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C001. COMPONENTE VERTICAL.



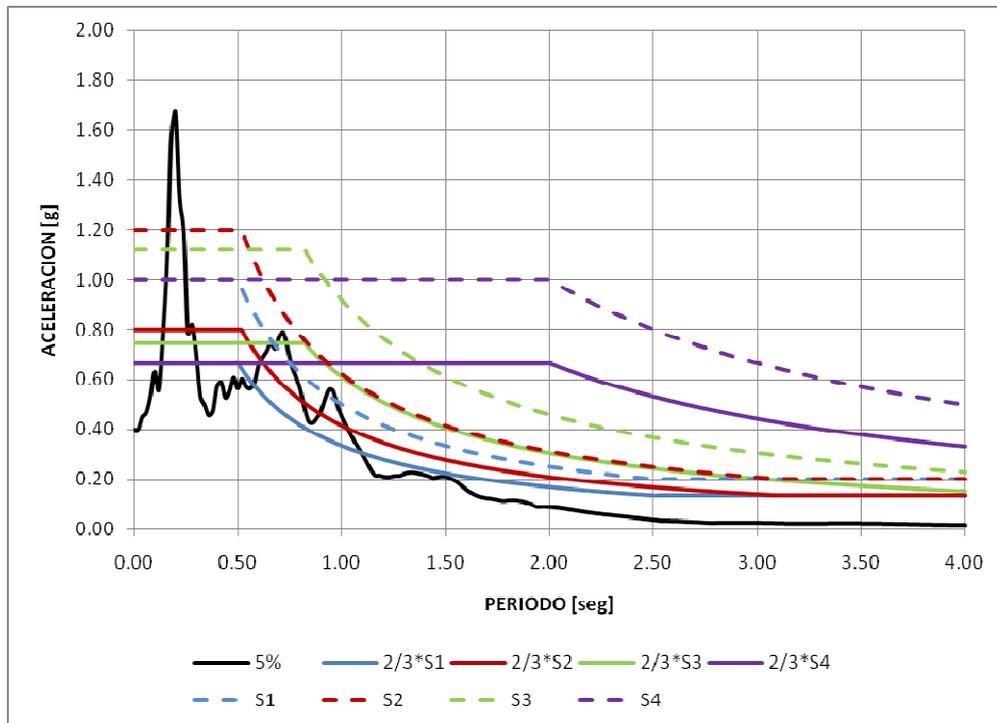
2. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 2: COLEGIO BORJA

CB56C001. COMPONENTE VERTICAL

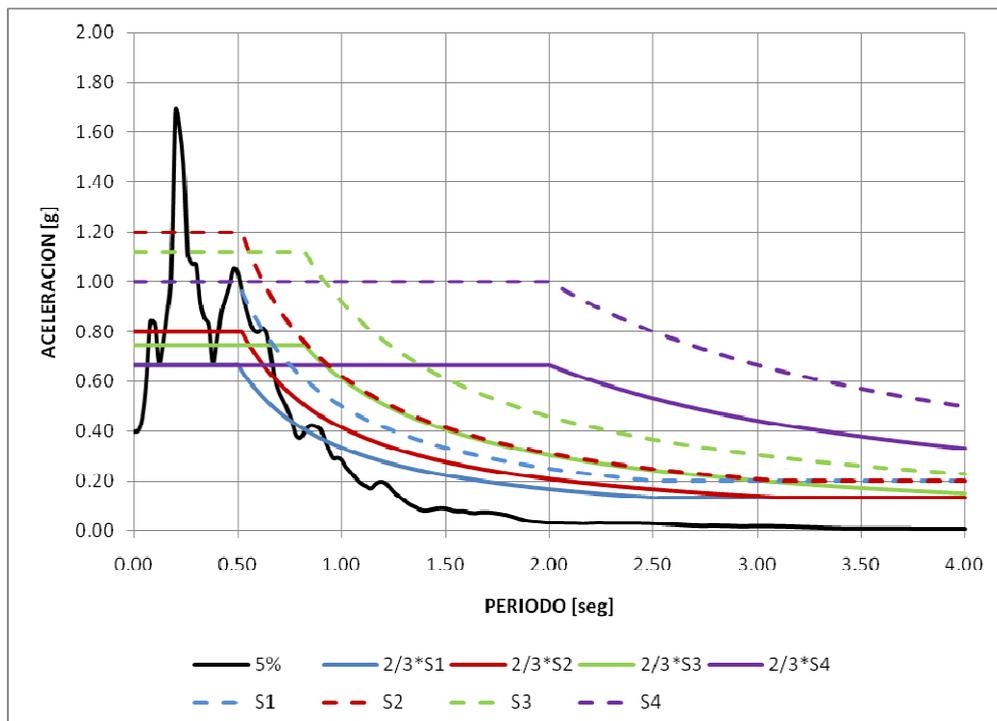


ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C

3. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 3: HOSPITAL METROPOLITANO HM57C001. COMPONENTE VERTICAL.

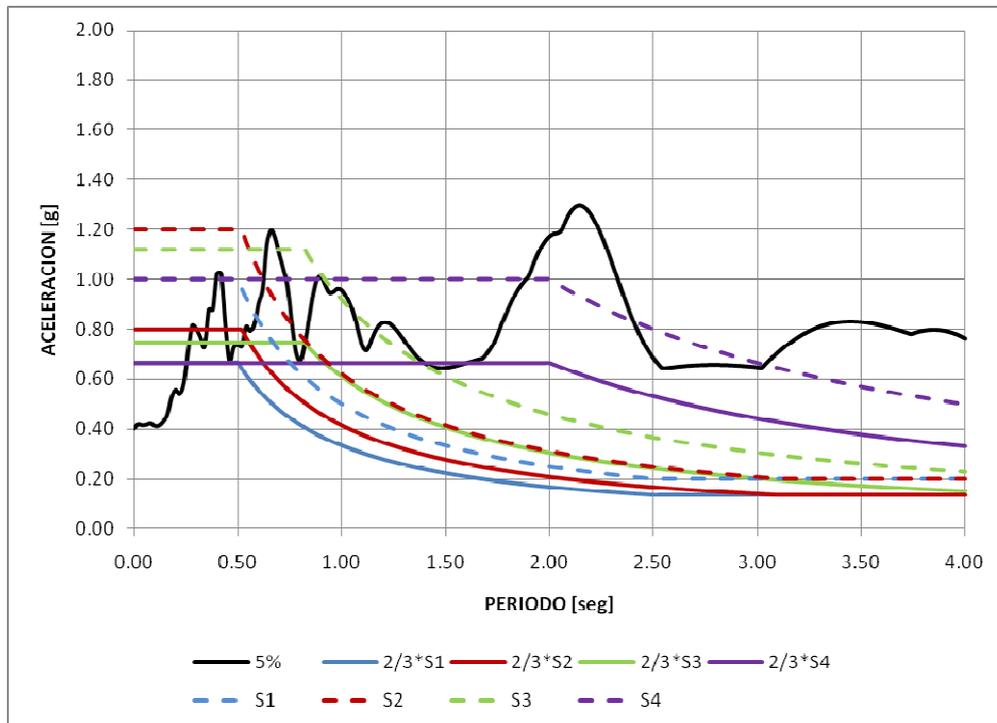


4. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 4: MUSEO AURELIO ESPINOSA AE60C001. COMPONENTE VERTICAL

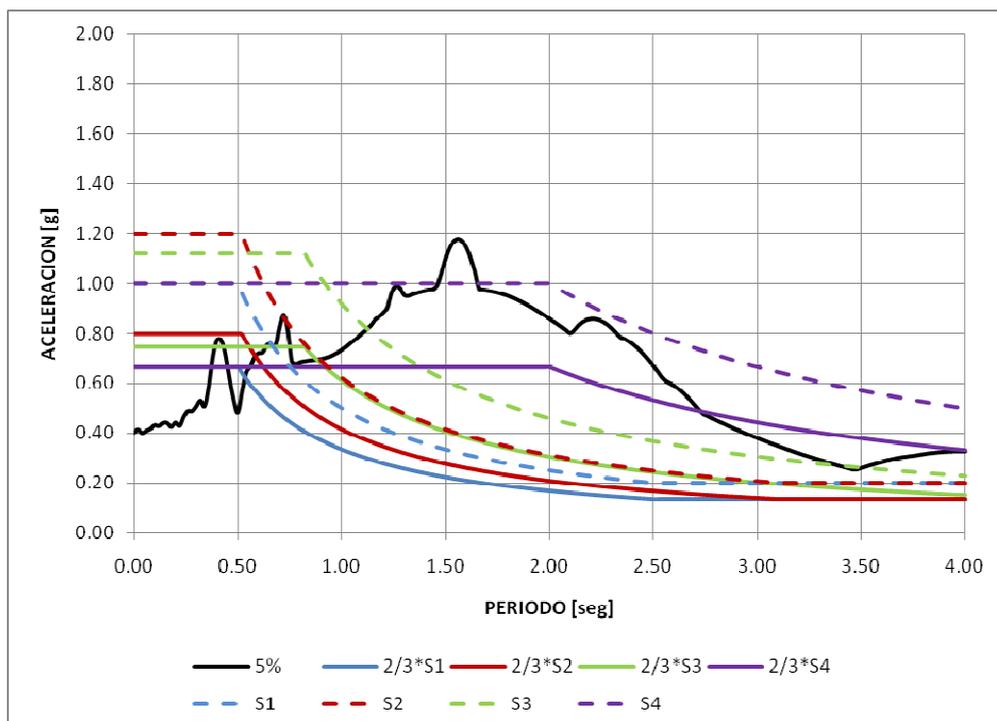


ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C

5. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA AE60C002. COMPONENTE VERTICAL



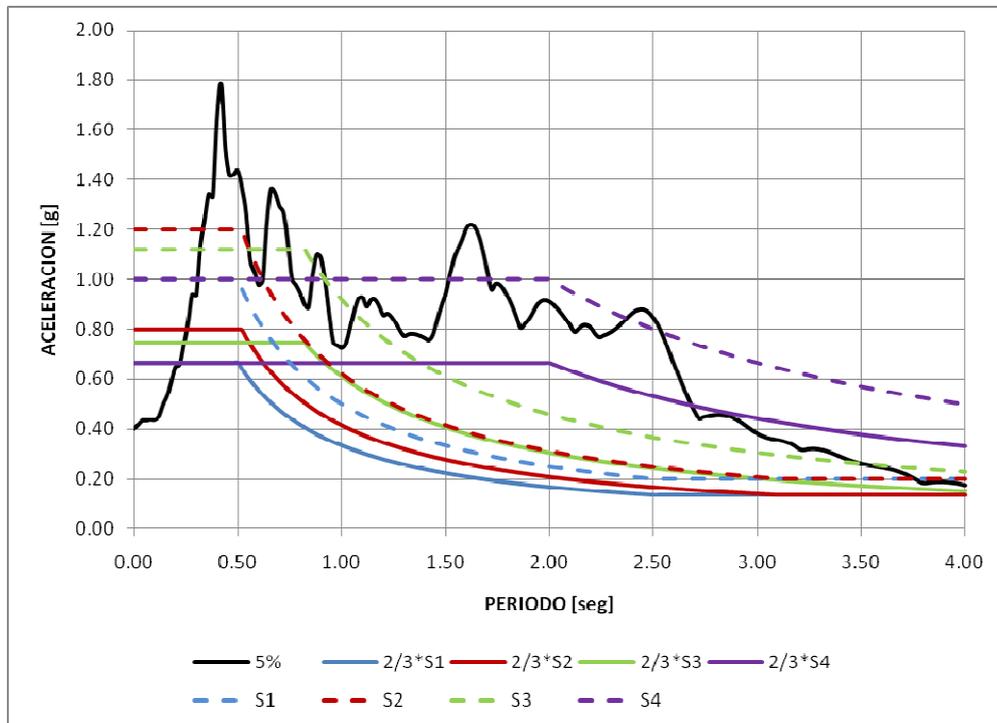
6. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 2: HOSPITAL METROPOLITANO HM57C003. COMPONENTE VERTICAL



ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C

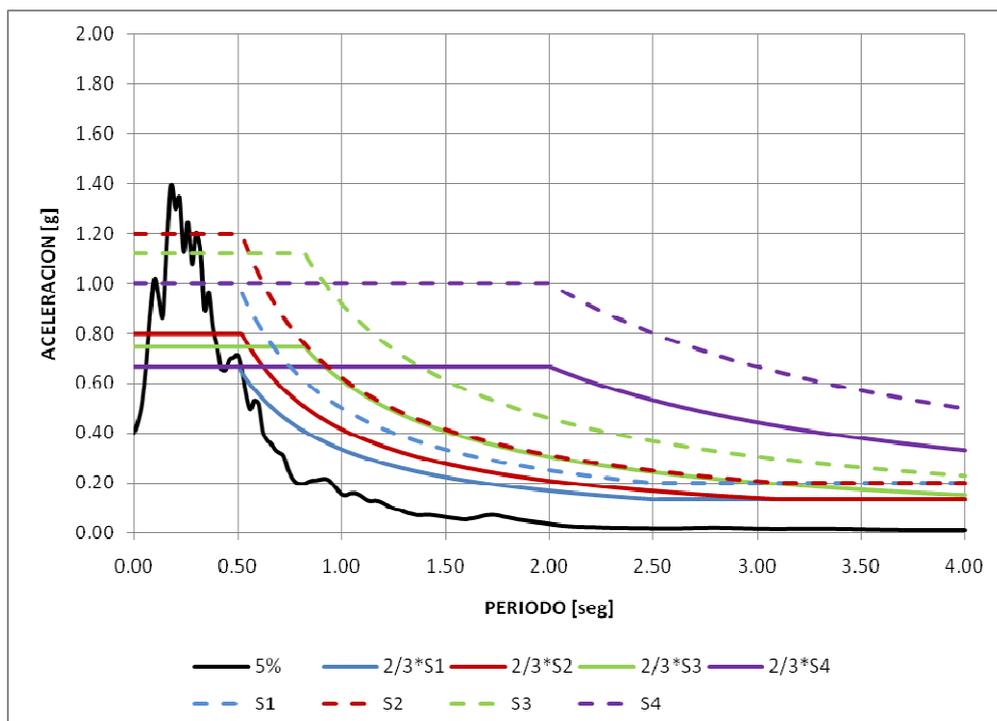
7. EVENTO 3: 3 octubre 95. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C002. COMPONENTE VERTICAL



8. EVENTO 4: 17 enero 96. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

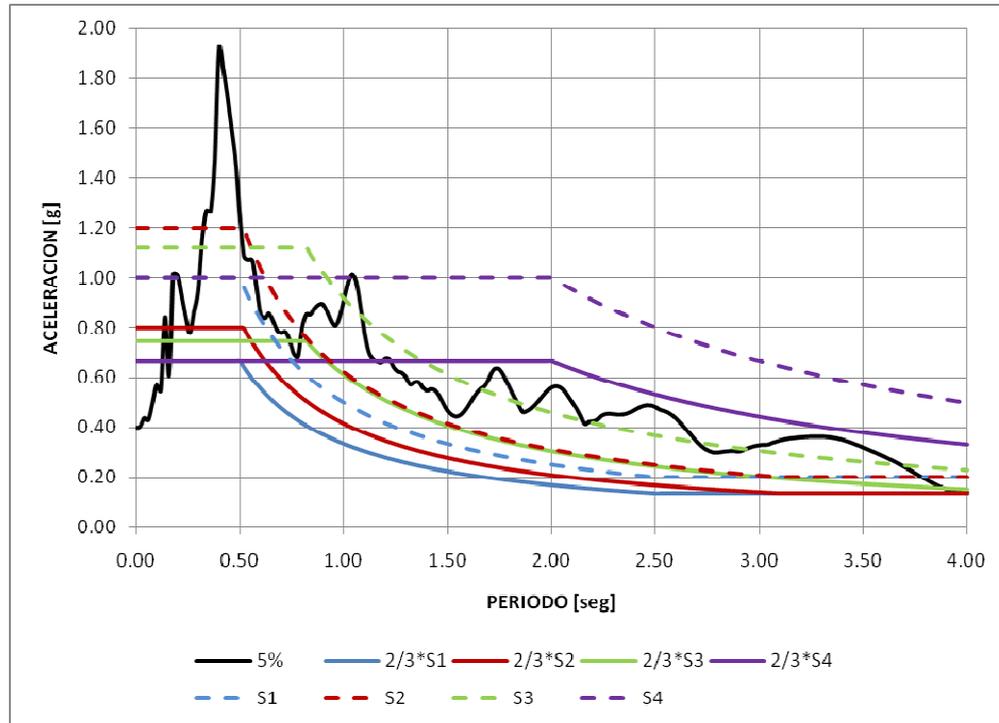
AE60C003. COMPONENTE VERTICAL



ESPECTROS NORMALIZADOS Y ESPECTRO DE DISEÑO DEL C.E.C

9. EVENTO 5: 28 marzo 96. ESTACION 1: SAN BARTOLO

SB55C006. COMPONENTE VERTICAL

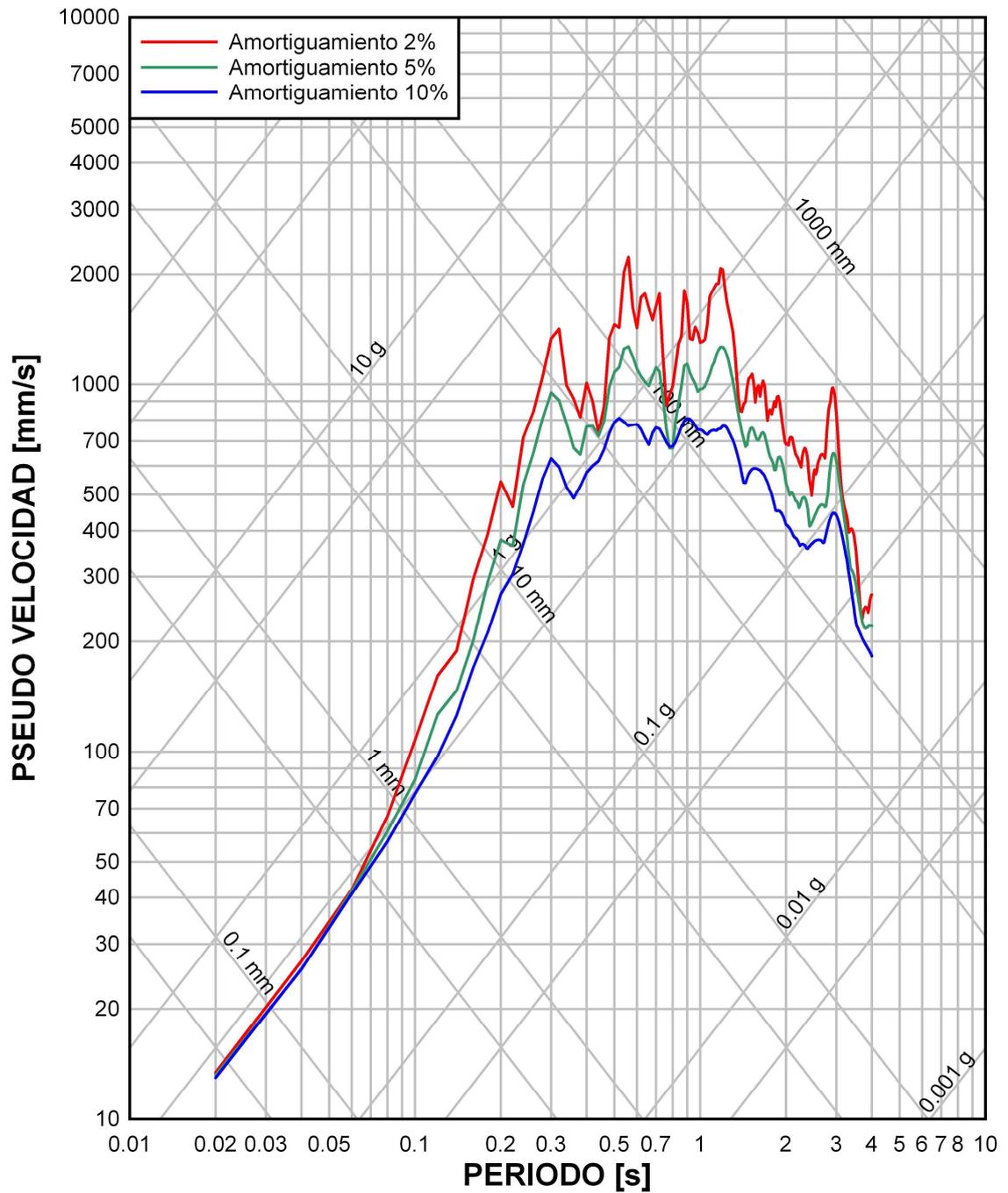


ANEXO No. 7**ESPECTROS TRIPARTITOS**

ESPECTROS TRIPARTITOS

1. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 1: SAN BARTOLO

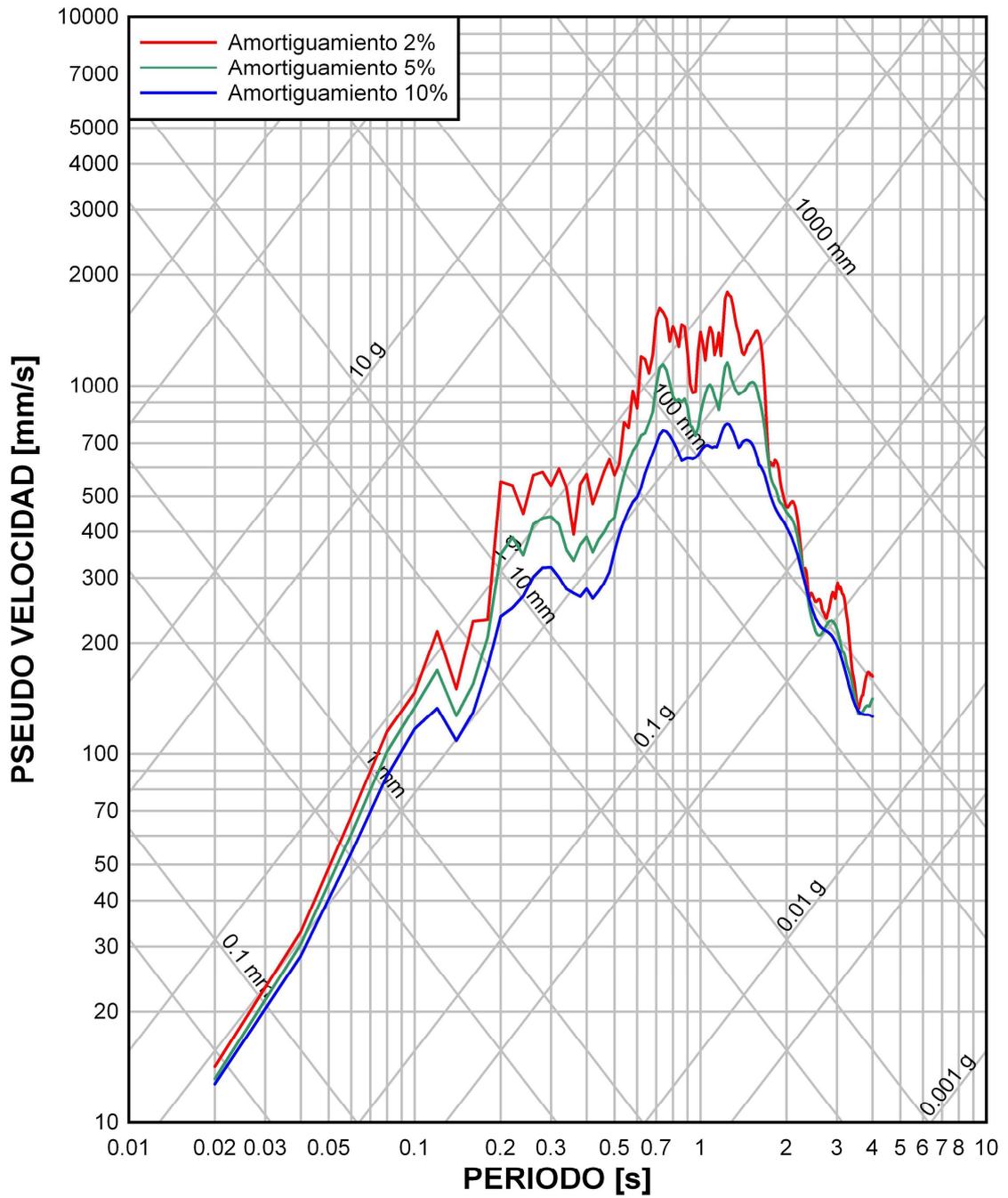
SB55C001. COMPONENTE S 15 45' W.



ESPECTROS TRIPARTITOS

EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 1: SAN BARTOLO

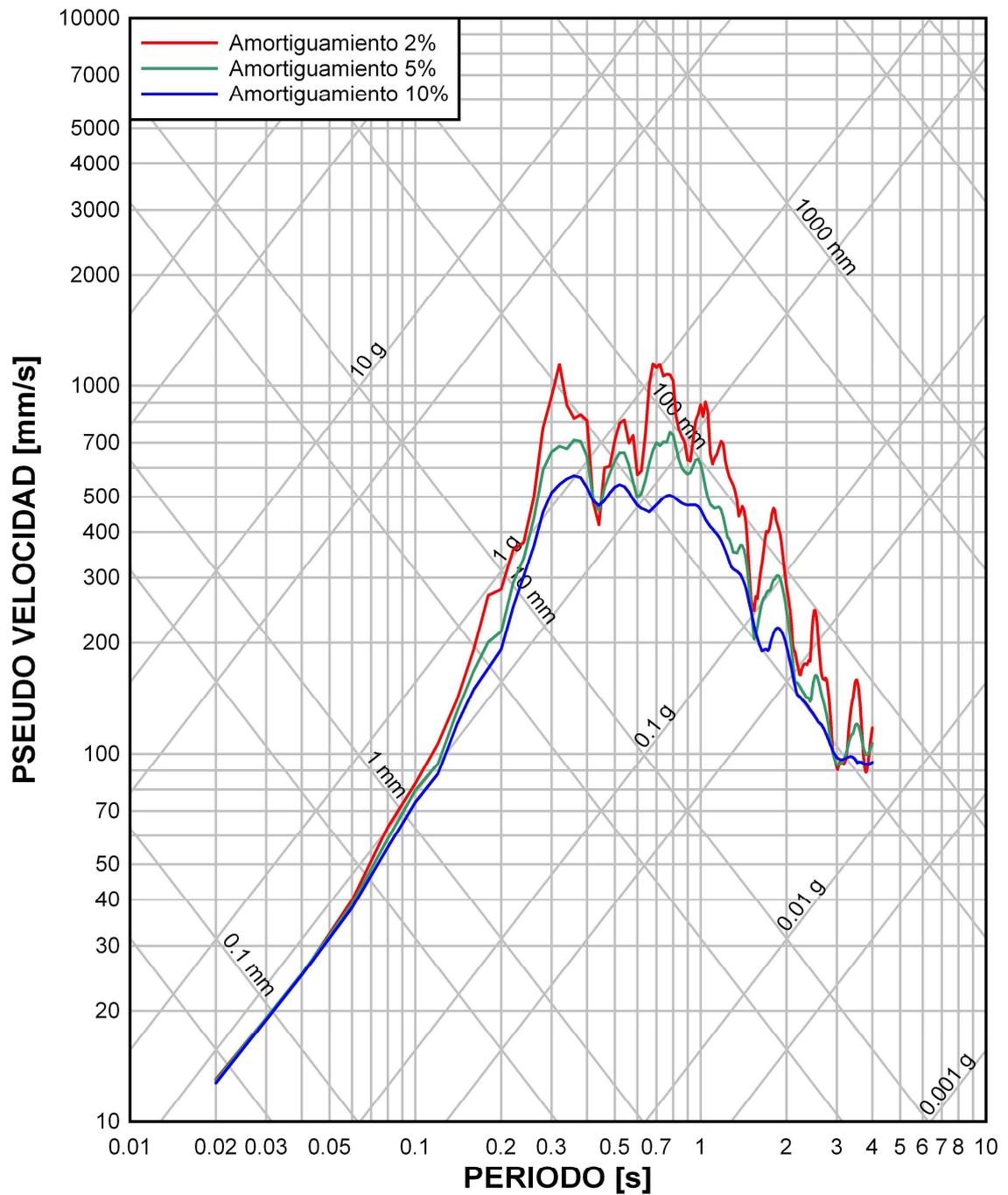
SB55C001. COMPONENTE N 15 45' E.



ESPECTROS TRIPARTITOS

2. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 2: COLEGIO BORJA

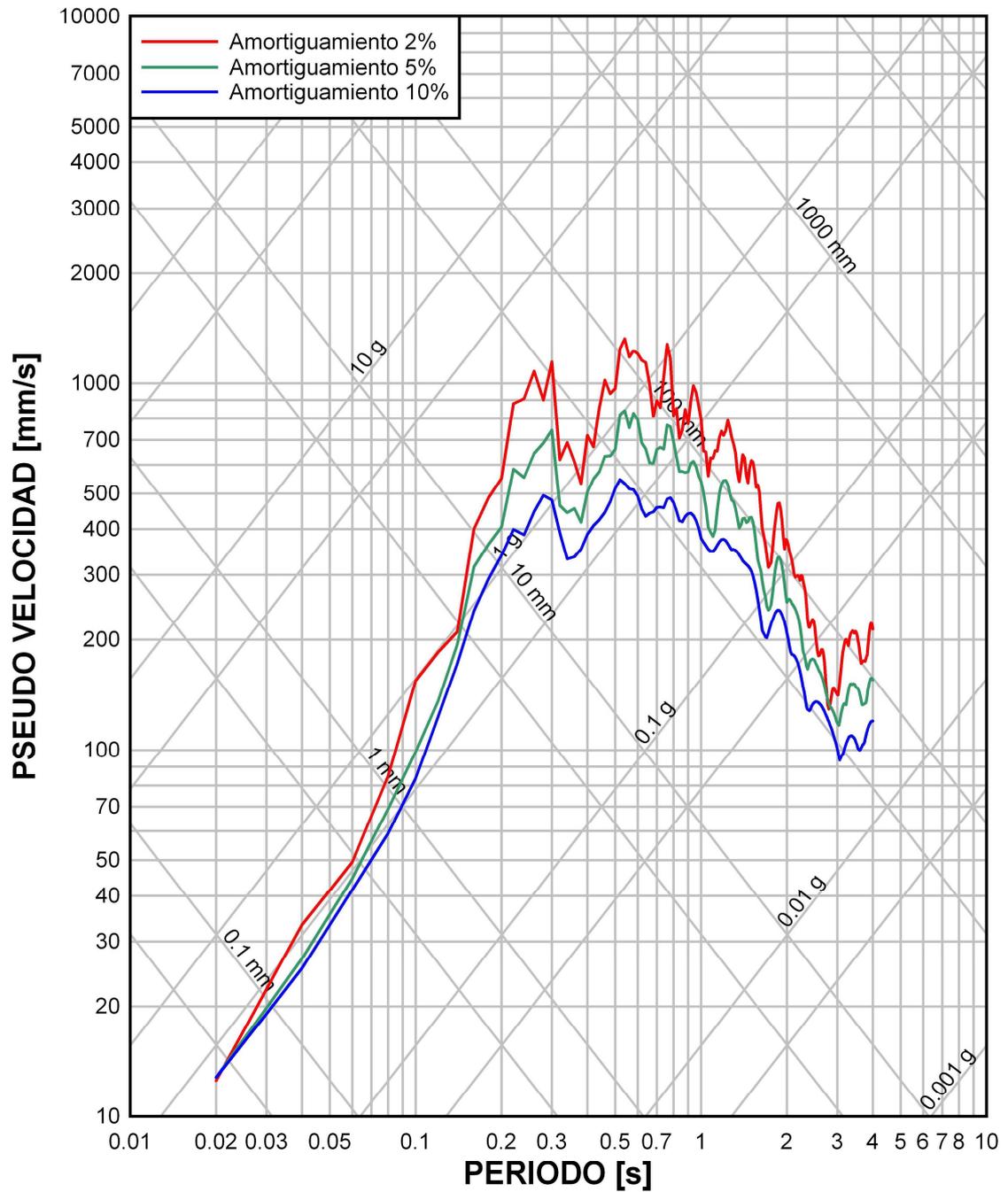
CB56C001. COMPONENTE S 11 15' W.



ESPECTROS TRIPARTITOS

EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 2: COLEGIO BORJA

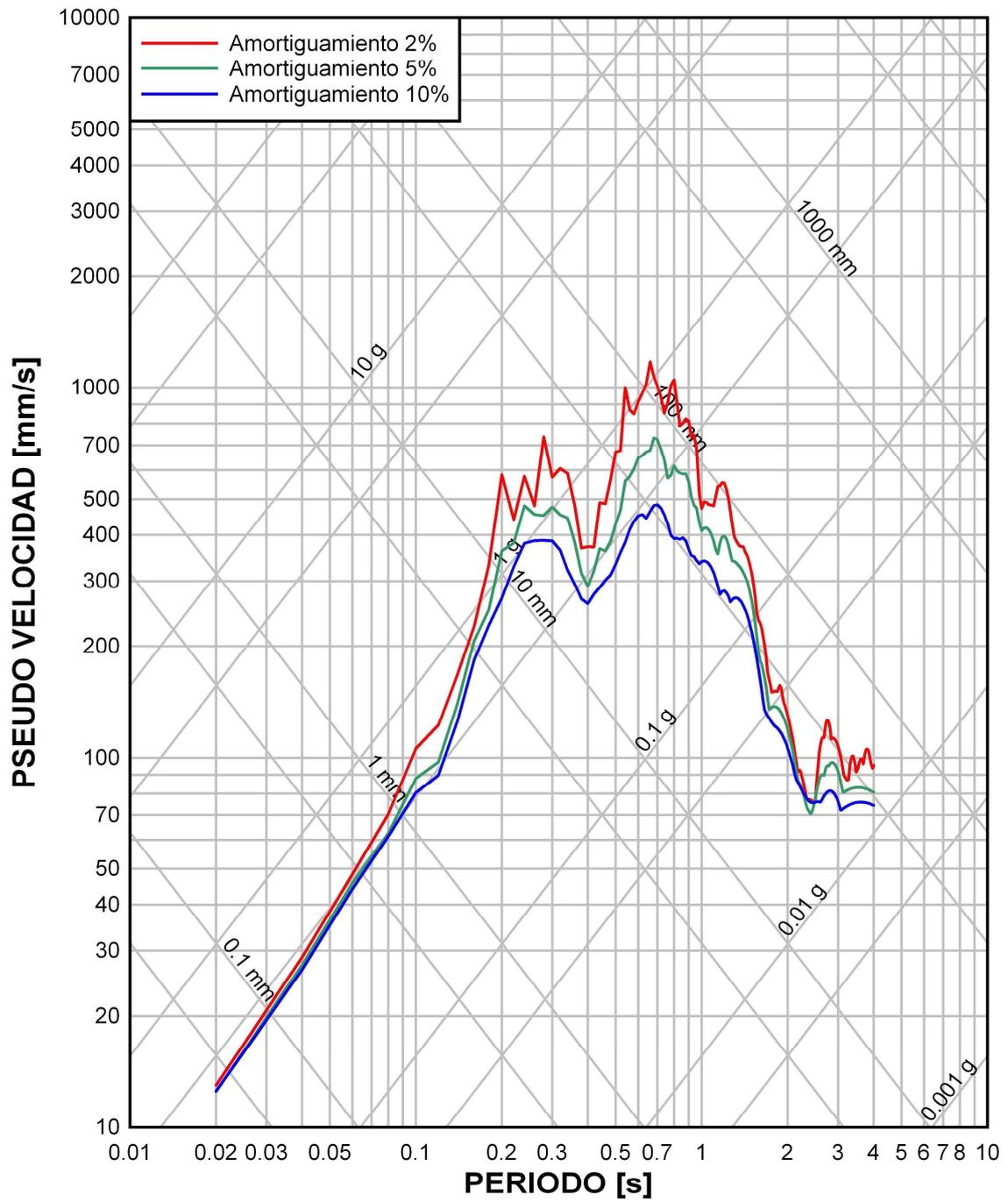
CB56C001. COMPONENTE N 11 15' E.



ESPECTROS TRIPARTITOS

3. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 3: HOSPITAL METROPOLITANO

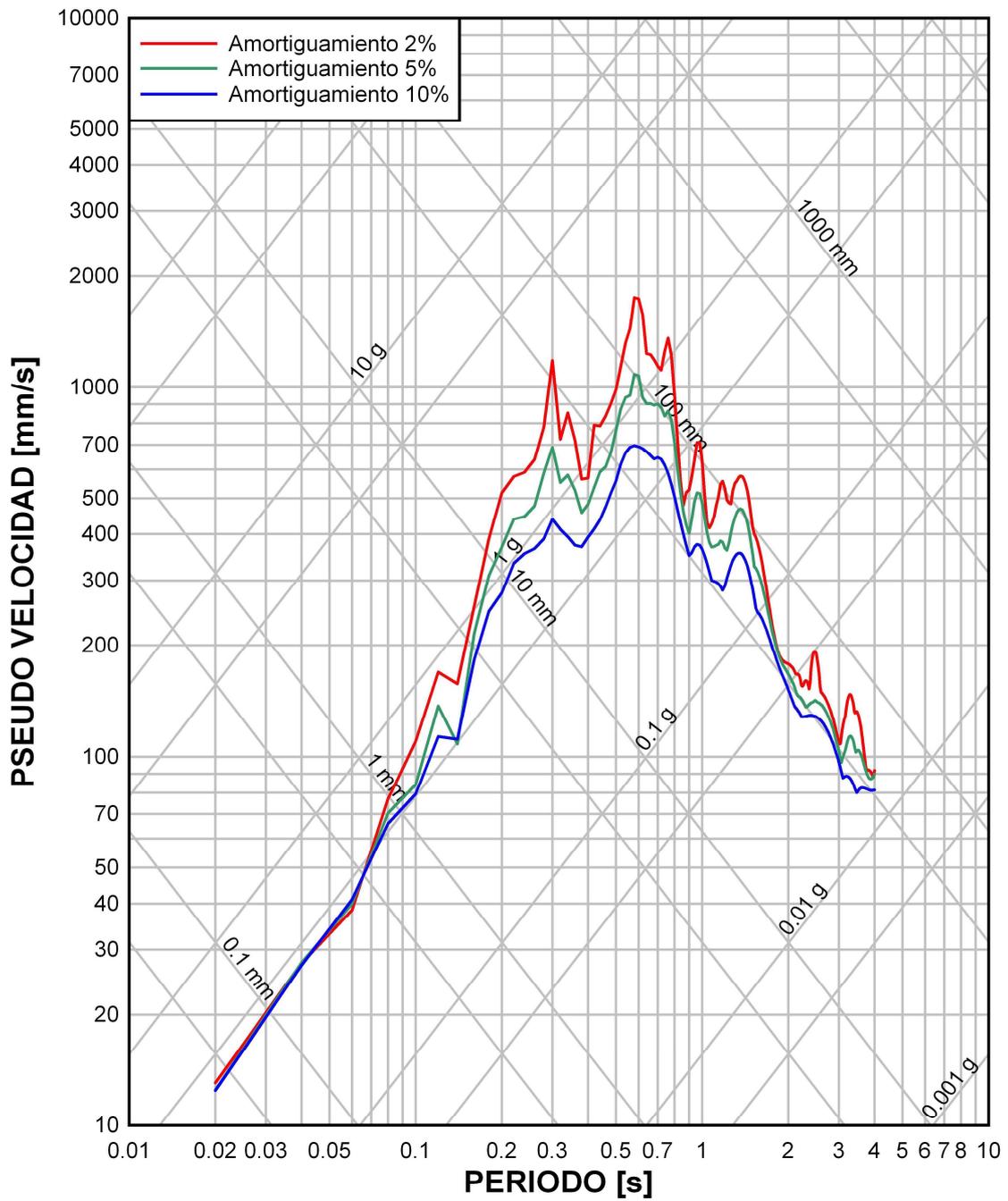
HM57C001. COMPONENTE E - W.



ESPECTROS TRIPARTITOS

EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 3: HOSPITAL METROPOLITANO

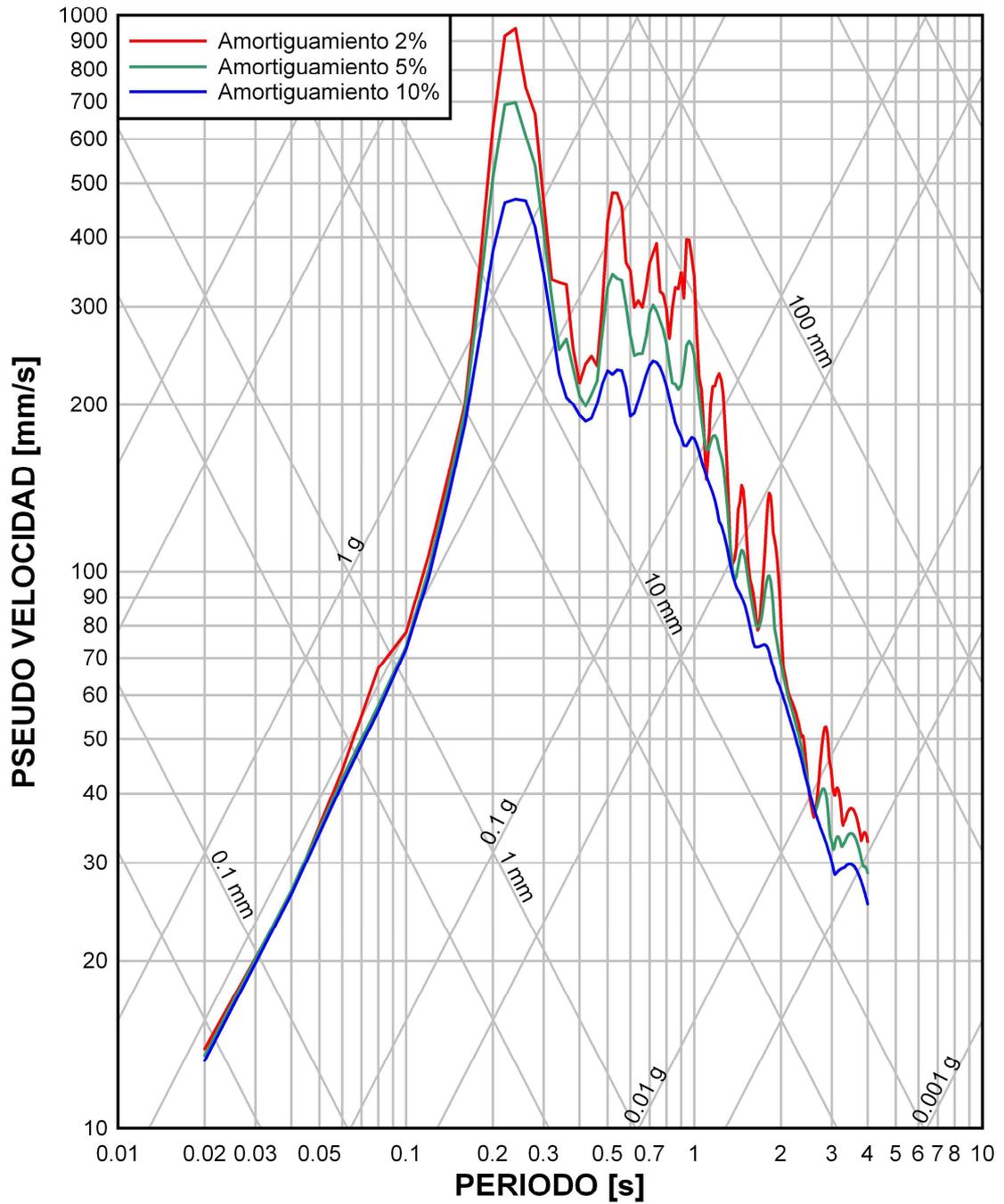
HM57C001. COMPONENTE N - S.



ESPECTROS TRIPARTITOS

4. EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 4: MUSEO AURELIO ESPINOSA

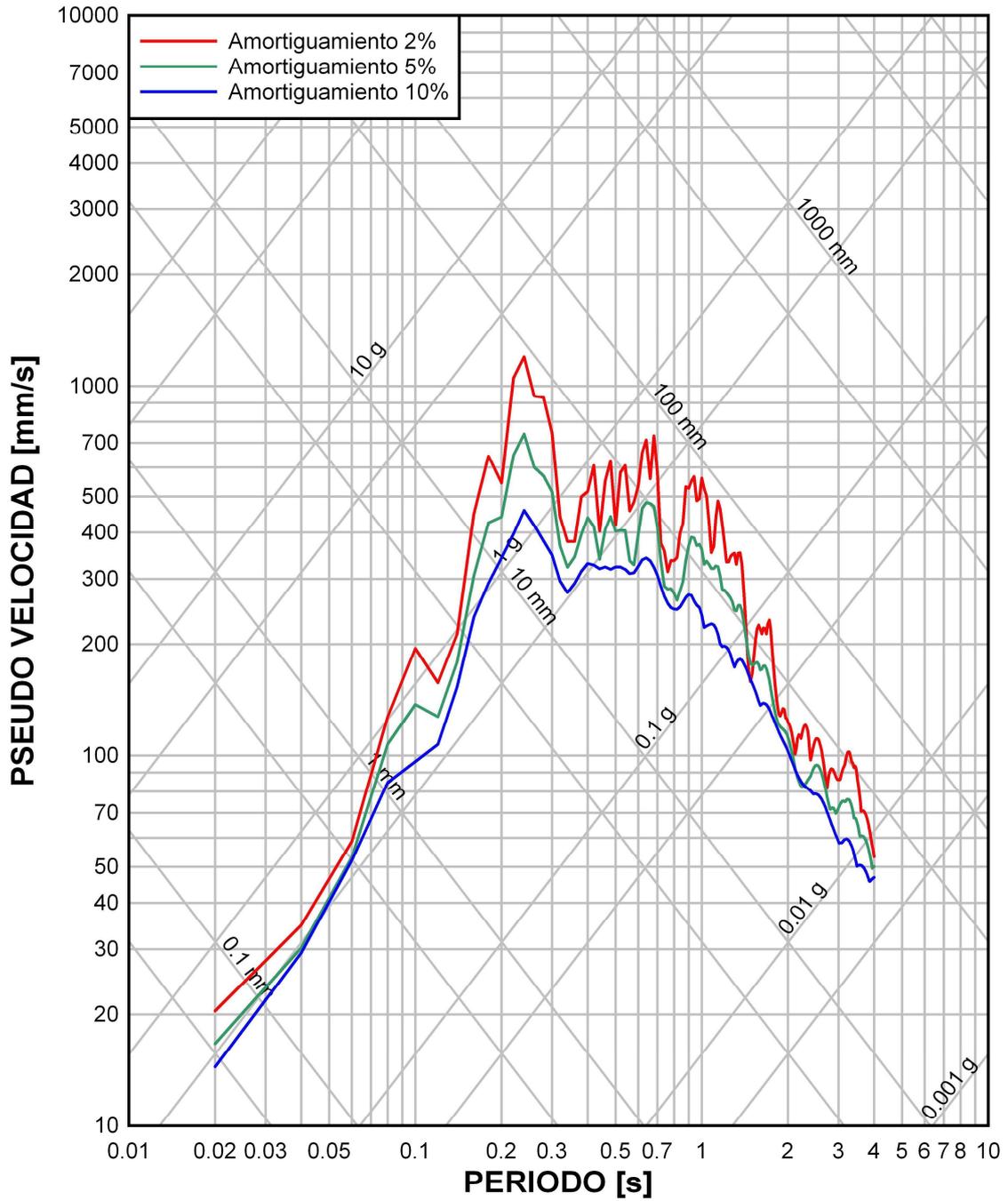
AE60C001. COMPONENTE S 21 22' E.



ESPECTROS TRIPARTITOS

EVENTO 1: 11 mayo 94. ESTACION 4: MUSEO AURELIO ESPINOSA

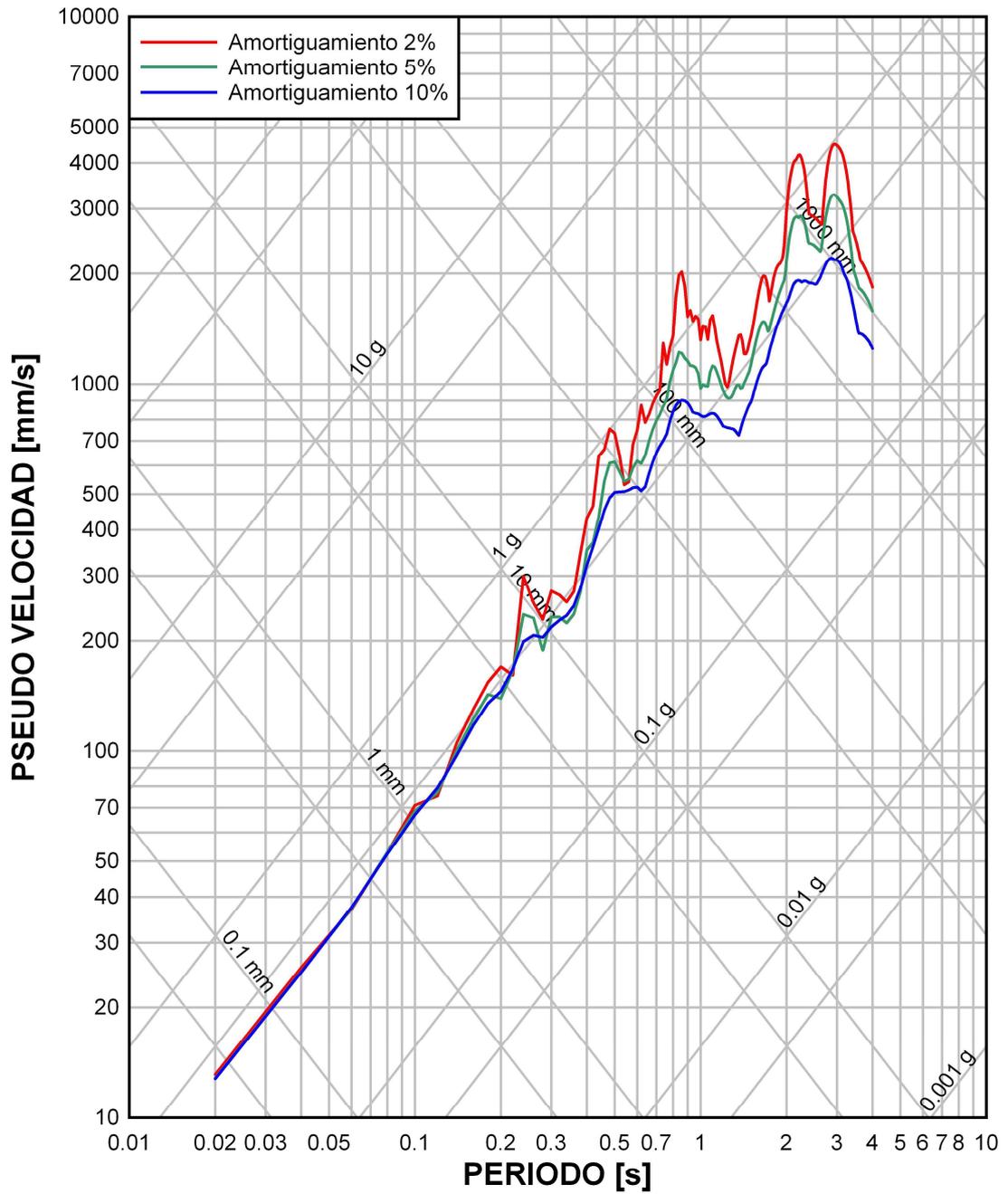
AE60C001. COMPONENTE N 21 22' W.



ESPECTROS TRIPARTITOS

5. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

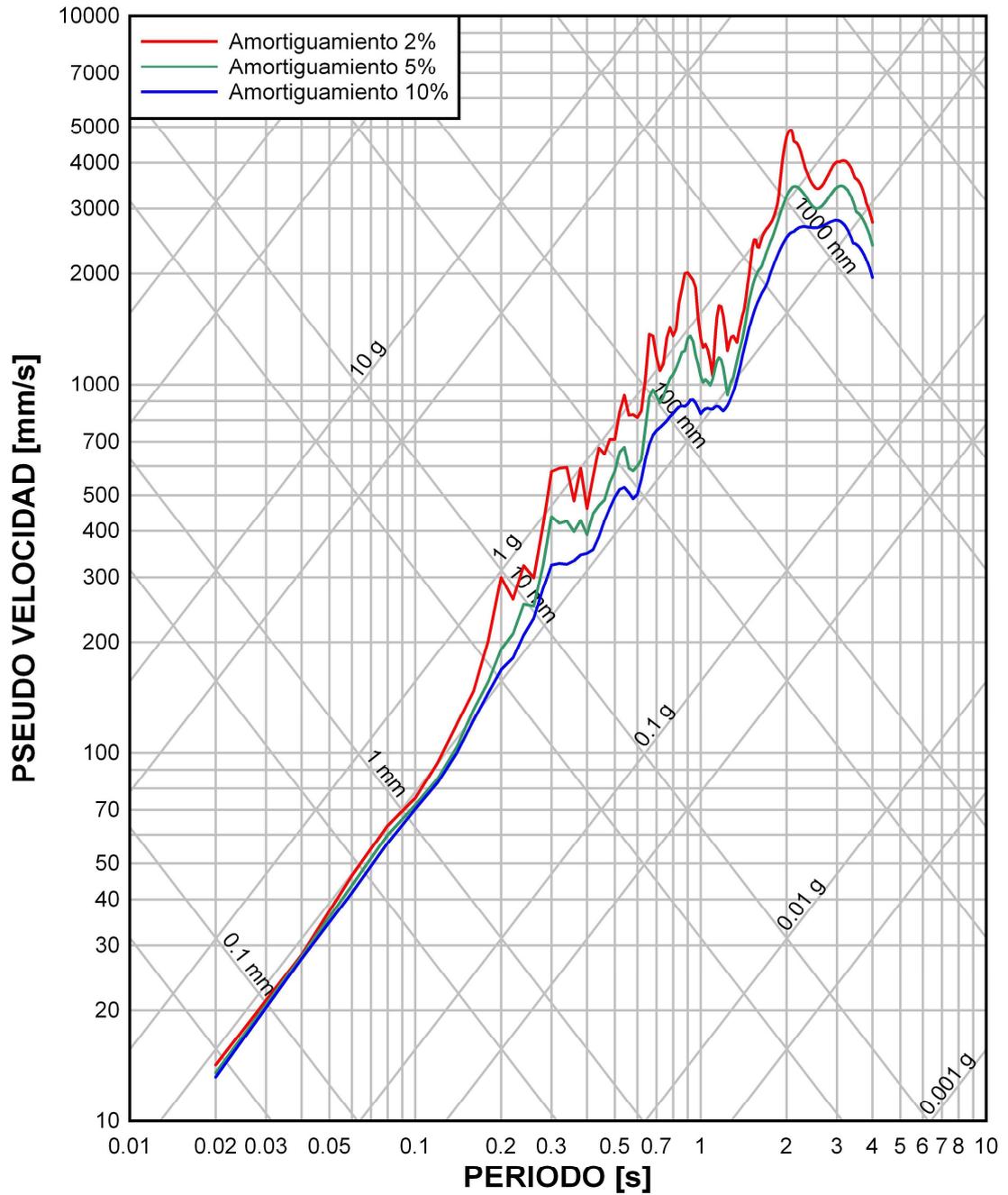
AE60C002. COMPONENTE S 21 22' E.



ESPECTROS TRIPARTITOS

EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 1: MUSEO AURELIO ESPINOSA

AE60C002. COMPONENTE N 21 22' W.



ESPECTROS TRIPARTITOS

6. EVENTO 2: 2 octubre 95. ESTACION 2: HOSPITAL METROPOLITANO

HM57C003. COMPONENTE E - W.

10000 

ERROR: ioerror
OFFENDING COMMAND: image

STACK: