

TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PASANTÍA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL



VERIFICACIÓN DEL ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN
SISMOGEO TÉCNICA DE LA CIUDAD DE POPAYÁN MEDIANTE REGISTROS
DE MOVIMIENTOS FUERTES

ROSA LILIANA ALPALA AGUILAR

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
POPAYÁN

2011

TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PASANTÍA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL



VERIFICACIÓN DEL ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN
SISMOGEO TÉCNICA DE LA CIUDAD DE POPAYÁN MEDIANTE REGISTROS
DE MOVIMIENTOS FUERTES

ROSA LILIANA ALPALA AGUILAR

DIRECTORES:

ING. JULIA EUGENIA RUIZ DE MURGUEITIO
Profesor Dpto. de Geotecnia FIC
ING. CARLOS ARIEL HURTADO ASTAIZA
Profesor Dpto. Estructuras FIC

ASESORES:

I.C. MSc. MARIA LUISA BERMUDEZ ANGULO
INGEOMINAS - Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia
I.C. Esp. CARLOS E. ALVARADO FLOREZ
INGEOMINAS - Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
POPAYÁN

2011

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Popayán, de Junio de 2011

A mis padres Leovigildo Alpala y Rosario Aguilar quienes creyeron en mí, me impulsaron y apoyaron durante todo el tiempo de estudio, a mis hermanos Jorge y Vanessa quienes siempre me han respaldado y han estado conmigo en los momentos más difíciles, a mis amigos y a todas las personas que compartieron sus conocimientos conmigo.

AGRADECIMIENTOS

A la ingeniera MARIA LUISA BERMUDEZ ANGULO y al Ingeniero CARLOS ENRIQUE ALVARADO FLOREZ, por haber hecho posible que realizara este trabajo de investigación, por haberme formado en el campo de los movimientos fuertes del suelo, por su dirección y apoyo durante el desarrollo del presente trabajo. Les debo esta gran experiencia que me ha enriquecido intelectualmente, de igual manera les guardo un sentimiento de admiración y profundo agradecimiento.

A la ingeniera JULIA EUGENIA RUIZ DE MURGUEITIO y al ingeniero CARLOS ARIEL HURTADO ASTAIZA, quienes han seguido con gran interés el desarrollo del estudio, me han apoyado y aportado durante el tiempo de investigación.

Al INGEOMINAS, por el apoyo y por la disponibilidad de la RNAC (Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia) con la información y recursos necesarios en el desarrollo del presente trabajo.

Al personal del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán, por la total disponibilidad, por la colaboración prestada y por haber permitido que me formara en el área de la sismología.

Al ingeniero CARLOS FERNANDO LOZANO, por su colaboración y enseñanza en el procesamiento de todos los datos empleados en el presente estudio.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
GLOSARIO	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPITULO I.....	15
GENERALIDADES	15
1.1. ANTECEDENTES	15
1.2. OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo general del estudio	17
1.2.2 Objetivos específicos del estudio.....	17
1.3. ÁREA DE TRABAJO	17
1.4. ALCANCES.....	18
1.5. PROCESO METODOLÓGICO.....	18
CAPITULO II.....	21
DOCUMENTACIÓN BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. AMENAZA SÍSMICA EN EL MARCO REGIONAL.....	21
2.1.1. Fuentes Asociadas a la Actividad de Subducción.	21
2.1.2. Fuentes Asociadas a la Actividad Cortical.	24
2.1.3. Fallas Activas Regionales.....	24
2.1.3.1. Sistema de Fallas de Romeral.....	24
2.1.3.2. Sistema de Fallas Cali-Patía.	25
2.2. NORMATIVIDAD SISMO RESISTENTE DE COLOMBIA.....	25
2.3. MICROZONIFICACIÓN SISMOGEOTÉCNICA DE POPAYÁN DE 1992	26
2.4. CONCEPTOS GENERALES EN MOVIMIENTOS FUERTES	29
2.4.1. Movimiento Fuerte	29
2.4.2. Magnitud Local (ML)..	29
2.4.3. Campo Cercano.....	29
2.4.4. Amenaza Sísmica.....	29
2.4.5. Acelerógrafo.	30
2.4.6. Aceleración	30
2.4.7. Acelerograma.	31
2.5. CATALOGO DE MOVIMIENTOS FUERTES	31
CAPITULO III.....	36
PROCESAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE REGISTROS DE LAS CINCO ESTACIONES DE POPAYÁN	36

3.1.	GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS	36
3.1.1.	Corrección sobre los Acelerogramas.....	36
3.1.1.1.	Corrección Instrumental.....	37
3.1.1.2.	Corrección Línea Base.....	37
3.1.1.3.	Filtrado de la señal.....	38
3.1.1.4.	Corrección Mediante el programa Seismo Signal.....	38
3.2.	CARACTERIZACIÓN DE LOS REGISTROS.....	42
3.2.1.	Aceleración Máxima.....	43
3.2.2.	Espectro de Respuesta de aceleración.....	45
3.2.3.	Espectro de Diseño.....	47
CAPITULO IV		49
ESCENARIOS SÍSMICOS.....		49
4.1.	CLASIFICACIÓN DE ESCENARIOS SÍSMICOS.....	49
4.2.	Selección de Registros por escenarios sísmicos	49
CAPITULO V		51
VERIFICACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA LOCAL		51
5.1.	ESPECTROS DE RESPUESTA AGRUPADOS POR ZONA.....	52
5.1.1.	Zona A	52
5.1.2.	Zona B	53
5.1.3.	Zona C.....	54
5.1.4.	Zona D.....	55
5.2.	ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS AGRUPADOS POR ESCENARIO SÍSMICO.....	56
5.2.1.	Zona A	56
5.2.1.1.	Escenario Cortical	56
5.2.1.2.	Escenario de Subducción.....	58
5.2.2.	Zona B	60
5.2.2.1.	Escenario Cortical	60
5.2.2.2.	Escenario de Subducción.....	61
5.2.3.	Zona D.....	62
5.2.3.1.	Escenario Cortical	62
5.2.3.2.	Escenario de Subducción.....	63
5.3.	COMPARACIÓN CON LA NORMATIVIDAD SISMO RESISTENTE COLOMBIANA.....	64
5.3.1.	Zona A	64
5.3.1.1.	Espectro de Diseño del CCCSR84 para la Zona A	64
5.3.1.2.	Espectro de Diseño de la NSR 10 para la Zona A.....	65
5.3.2.	Zona B	69
5.3.2.1.	Espectro de Diseño del CCCSR84 para la Zona B	69
5.3.2.2.	Espectro de Diseño de la NSR 10 para la Zona B.....	69
5.3.3.	Zona D.....	71

5.3.3.1. Espectro de Diseño del CCCSR84 para la Zona D	71
5.3.3.2. Espectro de Diseño de la NSR 10 para la Zona D	71
CAPITULO VI	73
COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE ACELERACIÓN PROPUESTOS POR LA NSR-10 CON LOS REGISTROS DE LAS ZONAS DE POPAYAN	73
6.1. ESTRUCTURAS BAJAS.....	73
6.1.1. Zona A.....	73
6.2. ESTRUCTURAS ALTAS.....	79
CAPITULO VII.....	85
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	85
ANEXOS.....	89
BIBLIOGRAFÍA.....	117

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de las estaciones de acelerógrafos localizadas en la ciudad de Popayán.....	33
Tabla 2. Sismos registrados por la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia entre entre el año 1994 y 2010.	34
Tabla 3. Aceleraciones Máximas en las componentes EW, V y NS, de los sismos registrados por la Red de acelerógrafos de Popayán en un periodo de observación entre 1994 a 2010.....	44
Tabla 4. Descripción de los parámetros Aa, Av y del coeficiente S. para cada zona propuesta por la MZSP-92.	48
Tabla 5. Clasificación de las fuentes asociadas a la actividad de subducción	49
Tabla 6. Clasificación de las fuentes asociadas a la actividad cortical.....	49
Tabla 7. Registros de sismos registrados por la RNAC entre 1994 y 2010 clasificados por escenario sísmico.....	50
Tabla 8. Estación y zona de la ciudad de Popayán en la que está ubicada.	52
Tabla 9. Cubrimiento Espectro de diseño NSR-10 en los sectores de la zona A.	73
Tabla 10. Cubrimiento Espectro de diseño NSR-10 en sectores de la zona B.....	76
Tabla 11. Cubrimiento Espectro de diseño NSR-10 en sectores de la zona D.	78
Tabla 12. Cubrimiento Espectro de diseño NSR-10 en sectores de la zona A.....	79
Tabla 13. Cubrimiento Espectro de diseño NSR-10 en sectores de la zona B.....	82
Tabla 14. Cubrimiento Espectro de diseño NSR-10 en sectores de la zona D.	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de la Red Nacional de Acelerógrafos localizados en Popayán. ...	16
Figura 2. Mapa de Microzonificación de Popayán. MZSP-92.	18
Figura 3. Flujograma del proceso metodológico, Alvarado C. 2010.....	20
Figura 4. Esquema de subducción.....	22
Figura 5. Área marcada por la convergencia de las placas Caribe, Cocos, Nazca y Suramérica.....	23
Figura 6. Acelerograma del sismo de Génova (Quindío)	31
Figura 7. Distribución de las estaciones de la RNAC.....	32
Figura 8. Mapa de la distribución de la Red de Acelerógrafos de Popayán (Adaptado de la MZSP 92).	33
Figura 9. Mapa de la sismicidad registrada por la Red de Acelerógrafos de Popayán.....	35
Figura 10. Ilustración de la generación de acelerogramas.....	36
Figura 11. Señal original del registro de un sismo sin corrección.	37
Figura 12. Curva de respuesta de los sensores del instrumento que registró el sismo	37
Figura 13. Acelerograma antes (abajo) y después (arriba) de la corrección de línea de base.	38
Figura 14. Filtros de Butterworth de distintos órdenes, con la misma frecuencia de corte y distinta pendiente	41
Figura 15. Acelerogramas de las tres componentes a) NS, b) EW y c) V, generados del sismo del 06 de junio de 2010 ocurrido en Sotará (Cauca).....	42
Figura 16. Acelerogramas y Amax de las tres componentes generadas del sismo del 06 de junio de 2010 de Sotará (Cauca).	43
Figura 17. Modelo del Espectro de Respuesta de aceleración, tomado de Cisafulli y Villafañe, 2002.	45
Figura 18. Espectro de Respuesta del sismo de Sotará (Cauca) del 06 de junio del 2010	46
Figura 19. Espectros de Respuesta Normalizados con respecto a la Amax del sismo de Sotará (Cauca) del 06 de junio del 2010 registrado por la estación CPOP5 con amortiguamiento del 5%.	46
Figura 20. Espectro de Diseño suavizado.....	47
Figura 21. Espectros Propuestos por la Microzonificación Sismogeotécnica de Popayán.....	48
Figura 22. Mapa de la sismicidad registrada por la RNAC entre 1994 y 2010. Vista en perspectiva desde el Océano Pacífico	51
Figura 23. Espectros de Respuesta registrados por la RNAC en la Zona A	52
Figura 24. Espectros de Respuesta registrados por la RNAC en la Zona B	53
Figura 25. Espectro de Respuesta registrado por la RNAC en la Zona C	54
Figura 26. Espectros de Respuesta registrados por la RNAC en la Zona D.....	55

Figura 26. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondientes al escenario de fuente Cercana, registrados en la zona A.....	56
Figura 27. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondientes al escenario de fuente Regional, registrados en la zona A	57
Figura 28. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondientes al escenario de fuente interplaca, registrados en la zona A.....	58
Figura 29. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondientes a los escenarios de fuente Intraplaca-Benioff Profunda (rojo) y Benioff Intermedia (verde), registrados en la zona A.....	59
Figura 30. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondiente a los sismos de escenario de fuente Cercana, registrados en la Zona B.	60
Figura 31. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondientes a los sismos de los escenarios de fuente Intraplaca:Benioff Profunda (rojo) y Benioff Intermedia (verde), registrados en la zona B.....	61
Figura 32. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondiente a los sismos de escenario de fuente Cercana, registrados en la Zona D	62
Figura 33. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondientes a los sismos de los escenarios de fuente Intraplaca-Benioff Profunda (rojo) y Benioff Intermedia (verde), registrados en la zona D.....	63
Figura 34. Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño propuesto por la NSR 10. Figura tomada de la NSR 10.....	66
Figura 35. Espectros de respuestas de los sismos registrados por la RNAC calculados para un 5% de amortiguamiento, espectros de diseño de las normas Sismo resistentes colombianas CCCSR84 y NSR10, y Espectro de diseño propuesto por la MZSP-92 para la zona A.....	68
Figura 36. Espectros de respuestas de los sismos registrados por la RNAC calculados para un 5% de amortiguamiento, espectros de diseño de las normas Sismo resistentes colombianas CCCSR84 y NSR10, y Espectro de diseño propuesto por la MZSP-92 para la zona B.....	70
Figura 37. Espectros de respuestas de los sismos registrados por la RNAC calculados para un 5% de amortiguamiento, espectros de diseño de las normas Sismo resistentes colombianas CCCSR84 y NSR10, y Espectro de diseño propuesto por la MZSP-92 para la zona D.....	72

GLOSARIO

Aa: coeficiente que representa la aceleración pico esperada.

AIS: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Amax: representa la aceleración máxima del registro.

Av: coeficiente de aceleración correspondiente a la velocidad pico esperada.

BRGM: Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

CCCSR-84: Código de Construcciones Sismo Resistentes de 1984.

DAGMA: Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente.

Emplazamiento: ubicación en un lugar determinado.

Fa: coeficiente de amplificación del suelo para la zona de períodos cortos del espectro.

Fv: coeficiente de amplificación del suelo para la zona con períodos bajos.

GPS: Global Positioning System que significa Sistema de Posicionamiento Global

Hipocentro: corresponde al punto en el cual se produce la fractura de la corteza terrestre, que genera un terremoto.

I: coeficiente de importancia de las edificaciones.

INGEOMINAS: Instituto Colombiano de Geología y Minería.

Isotermas: es una curva que une los puntos, en un plano cartográfico, que presentan las mismas temperaturas en la unidad de tiempo considerada

MZSP-92: Microzonificación Sismogeotécnica de Popayán de 1992.

NSR-98: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente de 1998.

NSR-10: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente de 2010.

PCMCIA: es un dispositivo de almacenamiento que conserva la información que le ha sido almacenada de forma correcta aun con la pérdida de energía

RNAC: Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia.

S: coeficiente que corresponde al tipo de perfil de suelo.

T: período de la estructura.

INTRODUCCIÓN

El 31 de marzo de 1983 la ciudad de Popayán fue afectada por un intenso sismo que causó muchas muertes y grandes pérdidas económicas y sociales. Este sismo produjo gran preocupación al gremio ingenieril del país y como resultado, el gobierno nacional encargó a la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, la preparación de un Código de Construcciones Sismo Resistentes que tuviera en cuenta los aspectos propios del país. Gracias a estudios previos adelantados durante varios años, en cuatro meses fue posible tener un Código de Construcción Sismo resistente denominado Decreto 1400 de 1984. A finales de 1984 el BRGM de Francia (*Bureau de Recherches Géologiques et Minières*) realizó el primer estudio del sismo y en 1988 decidió continuarlo en conjunto con INGEOMINAS, concluyendo que debían dar validez a la aplicación del Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes bajo las condiciones geotécnicas de Popayán. El trabajo desarrollado consistió en realizar una microzonificación sísmogeotécnica del área urbana, la cual demostró que había particularidades geotécnicas locales, que no podían ser generalizadas. De esta manera en la MZSP-92 se identificaron cuatro zonas con respuestas sísmicas diferentes, cada una con un espectro de diseño específico.

El estudio recomendó colocar en campo libre al menos cinco acelerógrafos digitales en las zonas identificadas, con el fin de estudiar sus características de respuesta sísmica. La Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia de INGEOMINAS entre 1994 y 1997 instaló cinco acelerógrafos, desde entonces se ha encargado de la vigilancia y conservación de estos equipos y lleva el registro de los movimientos fuertes que ocurren a nivel local y nacional.

La MZSP tuvo una importancia trascendental en cuanto a la identificación geológica y geotécnica de los sectores de Popayán; sin embargo para la caracterización de las zonas solamente se utilizaron datos geotécnicos y modelos de sismos que se presentaron en condiciones de suelo similares a las de la ciudad. En este estudio se busca encontrar la respuesta del suelo frente a movimientos fuertes, mediante los datos espectrales que se generen del procesamiento de las señales registradas por los cinco acelerógrafos y compararlas con los espectros de diseño que la MZSP-92 propuso.

Este documento es el informe final del estudio, se organizó en siete capítulos.

Capítulo 1. Generalidades: contiene los objetivos y alcances que se plantearon, se describe la organización y estructura del proyecto además de la metodología utilizada en el desarrollo de las actividades involucradas en este estudio.

Capítulo 2. Documentación Bibliográfica: trata de la amenaza sísmica que enfrenta la ciudad de Popayán desde el punto de vista de la MZSP-92 y de las normas

sismo resistentes colombianas por épocas, este capítulo también contiene el catálogo de movimientos fuertes suministrado por la Red Nacional de Acelerógrafos.

Capítulo 3. Procesamiento y Caracterización de Registros: se describe y muestra el procesamiento que se le dio a cada registro captado por los acelerógrafos entre 1994 y 2010, hasta convertirlas en respuestas espectrales a las que se caracterizó y analizó.

Capítulo 4. Escenarios Sísmicos: contiene la clasificación de escenarios sísmicos que se hicieron basados en la MZSP-92 y otras fuentes Bibliográficas.

Capítulo 5. Verificación de la Respuesta Espectral: se muestran y analizan todos los espectros de respuesta organizados en las zonas propuestas por la MZSP-92 y por los escenarios sísmicos encontrados como responsables en la tectónica de la ciudad de Popayán.

Capítulo 6. Comparación de los Espectros de Aceleración Propuestos por la NSR-10 con los Registros de las Zonas de Popayán. Se muestra de una forma general el manejo que el espectro de diseño de la NSR-10 le da a los sectores de la ciudad.

Capítulo 7. Corresponde a las conclusiones y recomendaciones después de observar las respuestas espectrales de cada zona propuesta por la MZSP-92.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

La ciudad de Popayán tiene una importante actividad sísmica debido a fuentes sismogénicas regionales que se encuentran algunas distantes y otras cercanas a la ciudad. Además, el área de influencia está afectada por la presencia de fallas activas que hacen que la actividad sea bastante elevada.

El estudio de MZSP-92 determinó que existen seis zonas sismogénicas que influyen en la sismicidad regional. Entre las que más afectan a la región de estudio, está la Zona de Romeral con alta actividad y sismos de intensidad media a alta, que han sido los más destructores de Popayán, la Zona Frontal de la Cordillera Oriental aunque esta distante de Popayán está asociada a dos de los sismos más destructores de Colombia, el de 1827 en el Huila y 1834 en Nariño, además se encuentra la Zona de Subducción con sismos que han causado daños graves, pero no destrucción de la ciudad, igualmente la Zona de Cali- Patía que controla la morfología del flanco oriental de la cordillera occidental, pero que no ha registrado sismos importantes durante los últimos 400 años.

Considerando la amenaza sísmica local se reconoce que existen fallamientos activos que pasan por la ciudad y se ha determinado como fuentes locales: Las Estrellas, El Crucero, Popayán Este, Popayán, Cauca-Almaguer, Rosas-Julumito, Julumito Oeste, Río Robles, Río Hondo, Río Cauca, Río Molino. Estas fuentes locales conforman la máxima amenaza sísmica para la ciudad.

El estudio de MZSP-92 y el CCCSR-84 califican a Popayán como una ciudad con amenaza sísmica alta, por esta razón, el registro y análisis adecuado de los movimientos fuertes en la ciudad debe considerarse obligatorio. Desde el año 1993, INGEOMINAS es la entidad que opera la Red Nacional de Acelerógrafos y a su vez, es quien lleva a cabo el registro de los sismos intensos que ocurran en el territorio Colombiano y también, quien suministra la información cruda de la amenaza sísmica en el territorio nacional, como soporte básico de la actualización de los parámetros de diseño sísmico del Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistente.

Actualmente la Red Nacional de Acelerógrafos tiene cinco equipos en la ciudad de Popayán, registrando desde 1994 los movimientos fuertes ocurridos en la localidad o cerca a ella. La primera estación CPOP2 se instaló el 22 de junio de 1994 en la oficina de Invías sobre suelo, la segunda estación CPOP1 fue colocada el 7 de Septiembre de 1996 en los Robles sobre roca, la tercera estación CPOP5

fue puesta en funcionamiento el 3 de Noviembre de 1997 en el instituto de educación secundaria Gabriela Mistral sobre suelo, la tercera estación CPOP3 fue instalada el 5 de Noviembre de 1997 en el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) sobre suelo y finalmente el 7 de Noviembre de 1997 se ubico la estación CPOP4 en el Instituto de Seguro Social sobre suelo .

En la siguiente figura 1 se localizan las cinco estaciones de acelerógrafos mencionadas anteriormente.

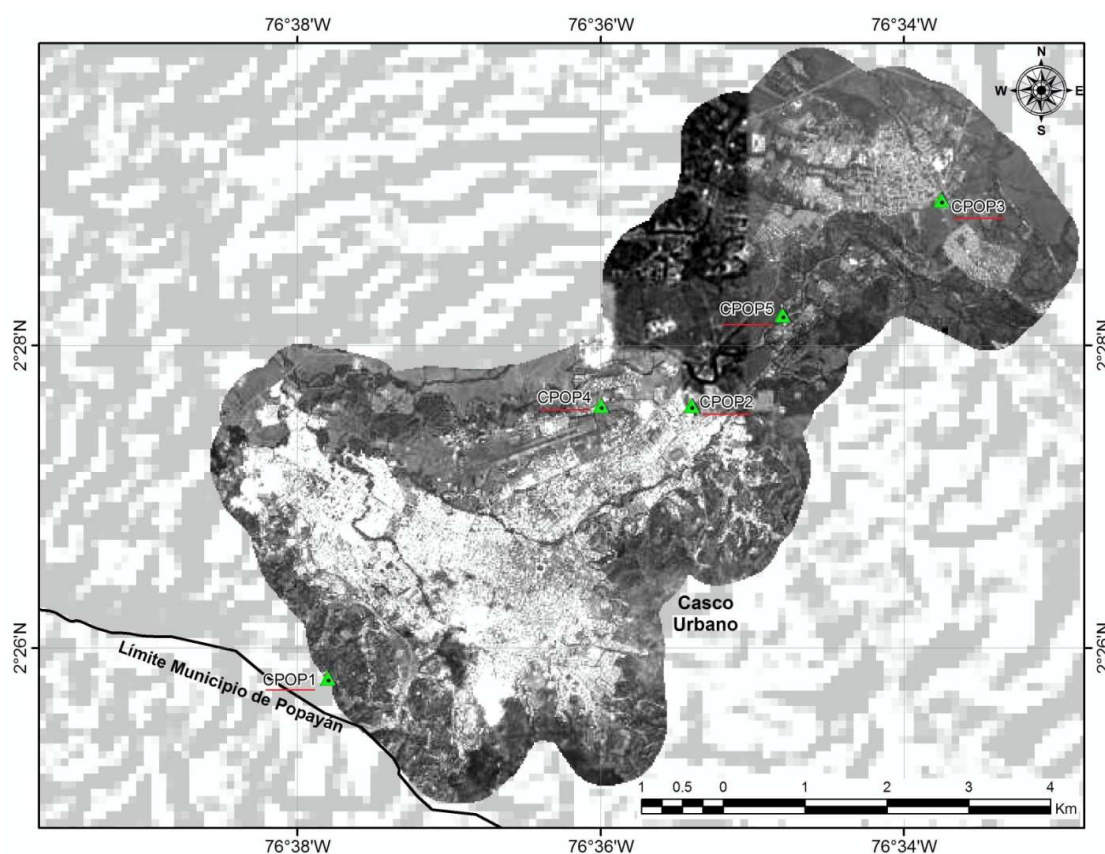


Figura 1. Mapa de la Red Nacional de Acelerógrafos localizados en Popayán. Imagen realizada con el software ArcGis versión 9.3, bajo el programa ArcScene. Con licencia legal adquirida por INGEOMINAS

Cada estación cuenta con un acelerógrafo digital marca KINEMATRICS modelo ETNA o SSA, con sensores de aceleración triaxiales, con GPS, con escala máxima de 2g o 1g y con rango de frecuencia desde DC hasta 50 Hz, esto permite registrar los movimientos fuertes en el denominado campo cercano y también garantiza obtener un catalogo amplio de sismos fuertes y débiles. En el presente estudio se dispondrá de información exclusiva obtenida de estos equipos, con la que se puede determinar la respuesta sísmica local o efecto de sitio que es uno de los parámetros más importantes en estudios de este tipo, pues

permite establecer el grado de respuesta sísmica de las edificaciones ya que el comportamiento del subsuelo no es homogéneo en toda una ciudad ante un evento sísmico.

Finalmente la información recolectada durante 16 años permitirá contar con los datos primarios para analizar y verificar el Estudio de Microzonificación, para que así, éste pueda ser actualizado y pueda ser considerado norma de construcción local que tenga en cuenta las particularidades geotécnicas de Popayán.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general del estudio

Comparar los espectros de diseño propuestos en la microzonificación sísmica de Popayán de 1992 con las respuestas espectrales de los registros de movimientos fuertes en las estaciones acelerográficas localizadas en cinco sitios de la ciudad de Popayán.

1.2.2 Objetivos específicos del estudio

- Seleccionar los registros sísmicos registrados por la RNAC de acuerdo con los escenarios sísmicos planteados en el estudio de MZSP-92.
- Analizar la respuesta espectral obtenida con los registros en las estaciones de acelerógrafos que INGEOMINAS tiene instalados en Popayán y Compararlas con las respuestas alcanzadas por la MZSP-92.
- Identificar sectores de la ciudad en los cuales las edificaciones existentes o futuras puedan ser afectadas en su desempeño sísmico al ser diseñadas con parámetros inferiores a los reales, bajo la supervisión de los ingenieros directores del proyecto.

1.3. ÁREA DE TRABAJO

El presente trabajo se plantea desarrollar en el área urbana de la ciudad de Popayán, que se encuentra dentro de las zonas A, B, C, D, definidas por el estudio de MZSP-92 (Figura 2, Anexo 1).

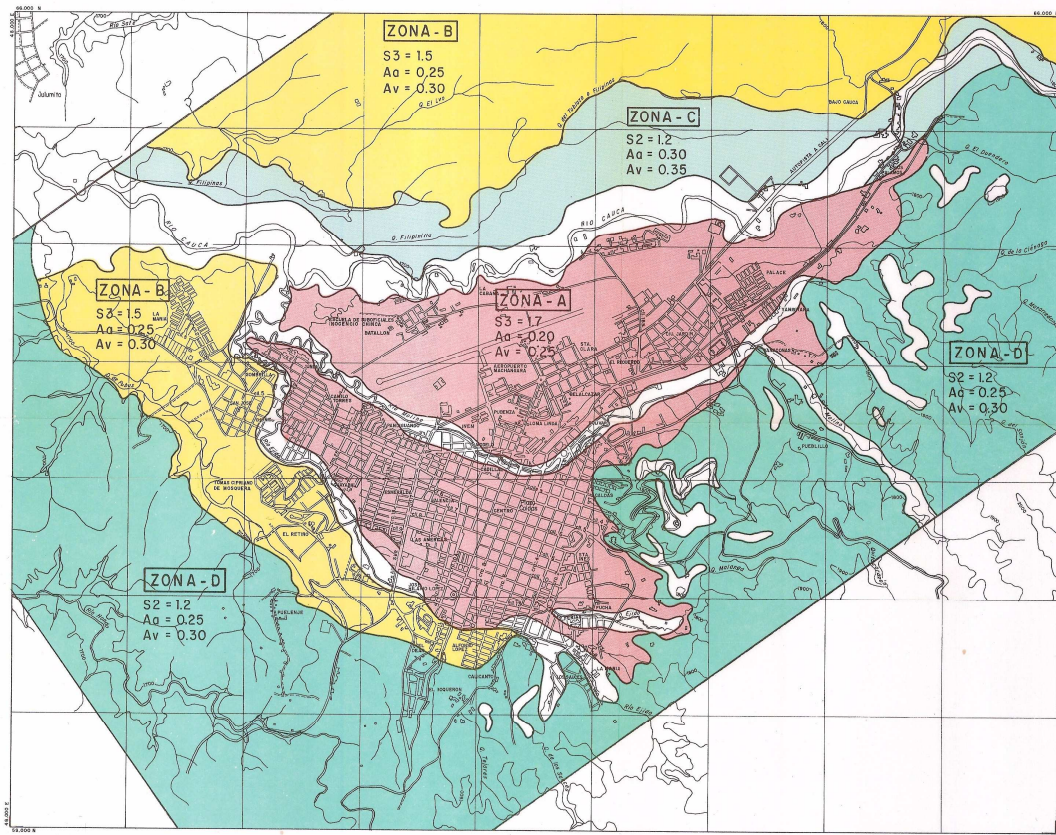


Figura 2. Mapa de Microzonificación de Popayán. MZSP-92.

1.4. ALCANCES

El presente estudio pretende comparar las respuestas espectrales obtenidas de registros de los cinco acelerógrafos localizados en la ciudad de Popayán con los resultados de la MZSP-92 y las Normas Sismo Resistentes de Colombia, para el caso en Particular se analizara a partir de la primera norma expedida en el país CCCSR 84 y la actual NSR 10.

1.5. PROCESO METODOLÓGICO

La RNAC de INGEOMINAS, es la entidad en Colombia que registra los sismos intensos ocurridos en el territorio nacional. Mantiene un catálogo de movimientos fuertes de los registros obtenidos en la ciudad de Popayán, el cual se utilizó para llevar a cabo el presente trabajo.

A los registros en bruto obtenidos de los acelerógrafos ubicados en la ciudad de Popayán desde el año 1994 hasta 2010, se les realizó un estricto procesamiento hasta obtener acelerogramas correspondientes a cada sismo registrado. Después de esto se pasó a la fase de caracterización, en la que se determinó la aceleración máxima y el espectro de respuesta para cada acelerograma. Gracias a que el estudio de MZSP contiene información detallada en cuanto a geología, amenaza sísmica regional y respuesta sísmica del subsuelo, se realizó una selección de las señales procesadas de acuerdo a las zonas definidas geotécnicamente por la MZSP.

Una vez organizadas las respuestas espectrales de acuerdo a las zonas propuestas por la microzonificación, dentro de cada zona se realizó una organización por Escenarios Sísmicos, para lo que se tuvo que identificar las fuentes sísmicas que afectaban el área en estudio, se manejaron para efectos del estudio dos fuentes, una asociada a la actividad cortical y otra a la actividad de subducción. De esta manera se realizó la organización de los espectros de respuesta por zona y por escenario sísmico.

El análisis espectral se realizó tomando como referencia los espectros de diseño propuestos por la MZSP y los presentados por las Normas Colombianas de Construcción Sismo Resistentes de 1984 y 2010. Finalmente para verificar la MZSP se compararon los parámetros espectrales obtenidos en el presente estudio utilizando la información de las cinco estaciones de acelerógrafos.

PROCESO METODOLOGICO

(Alvarado et. al., 2010)

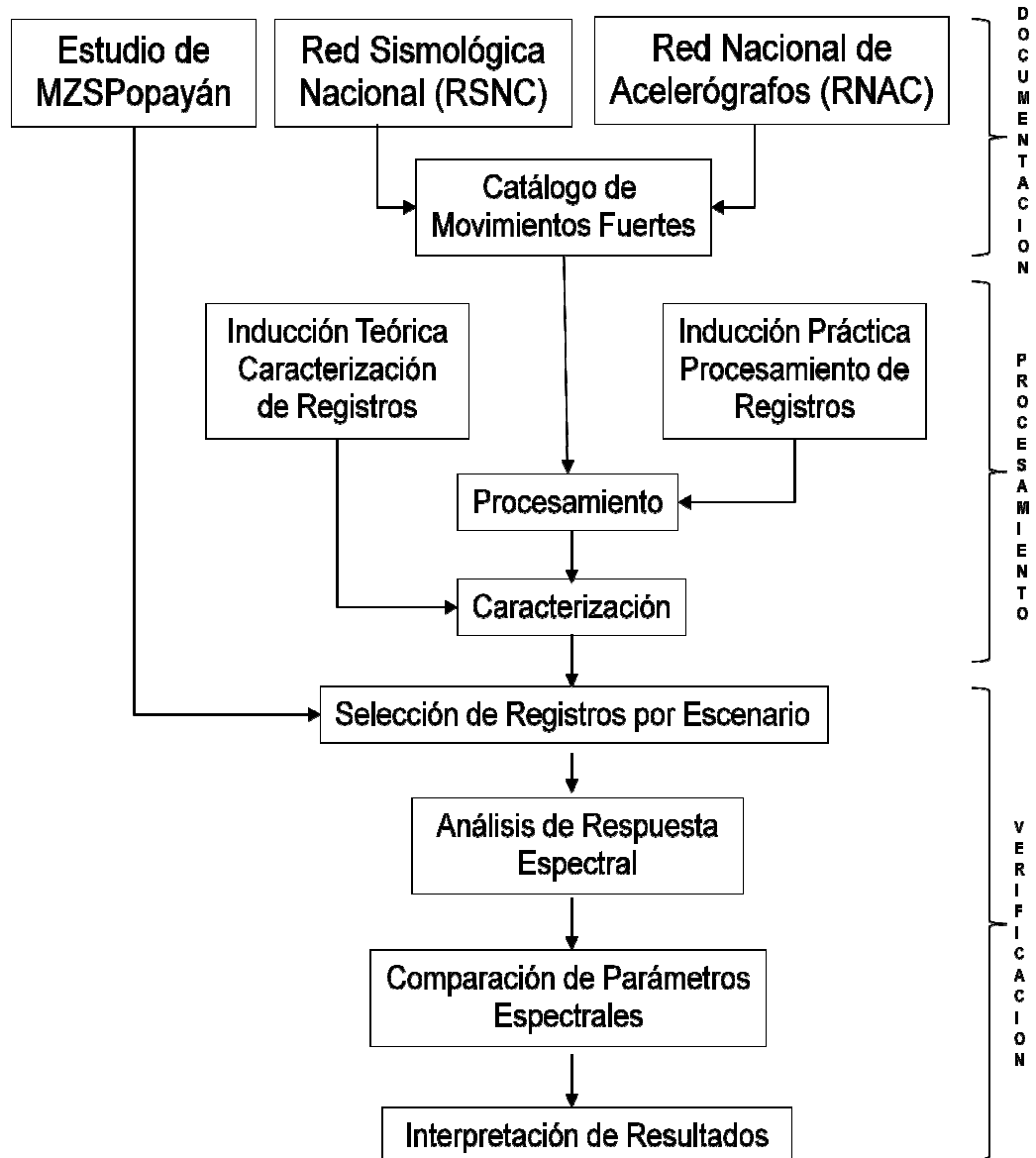


Figura 3. Flujograma del proceso metodológico, Alvarado C. 2010.

CAPITULO II

DOCUMENTACIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. AMENAZA SÍSMICA EN EL MARCO REGIONAL

Colombia está localizada dentro de una de las zonas sísmicamente más activas de la tierra, la cual se denomina Anillo Circunpacífico y corresponde a los bordes del Océano Pacífico. El emplazamiento tectónico de Colombia es complejo pues en este territorio convergen la Placa de Nazca, la Placa Suramericana y la Placa Caribe. La interacción de las placas conforma una unión triple y según el estudio de MZSP, ésta confluencia de placas trae como consecuencia un complejo estado de esfuerzos, que varía según la posición dentro del territorio nacional de Colombia.

El sur occidente del país está enmarcado dentro de una tectónica convergente entre la placa Nazca y el Bloque Andino, con una subducción cuyo plano de Benioff segmentado, de sur a norte, buza con diferentes ángulos hacia el oriente, Pennington (1981). La subducción es una fuente sismogénica notablemente activa, cuya tasa de desplazamiento y esfuerzos resultantes, se reflejan en los movimientos de las fallas corticales del cinturón comprendido por los Sistemas de Romeral y Cali-Patía.

2.1.1. Fuentes Asociadas a la Actividad de Subducción. La teoría de la Tectónica de Placas, relaciona las zonas de máxima ocurrencia de terremotos con las zonas de subducción, en donde una placa tectónica, formada por material litosférico, se dobla y se hunde en el manto por el efecto combinado de su propio peso y convección del manto (Figura 4). Puesto que la velocidad a la que una placa litosférica se sumerge, es grande comparada con el tiempo necesario para que el manto que la envuelve se caliente por conducción. El bloque de litosfera arrastra las isotermas según se va introduciendo en el manto y permanece más frío, más denso y mecánicamente más fuerte que el manto que le rodea. Es decir el bloque que subduce está sometido a esfuerzos más intensos frente a los que puede responder con fracturas que dan lugar a terremotos.



Figura 4. Esquema de subducción. Figura tomada del estudio Geología en las zonas de Subducción, Valera (2003).

El borde occidental de Suramérica es una de las regiones de mayor actividad sísmica del planeta debido al proceso de subducción de la placa Nazca (corteza oceánica) bajo la de Suramérica (corteza continental). La región Andina, desde Colombia hasta la Tierra del Fuego en el sur de Argentina, regularmente es sacudida por grandes terremotos que aportan aproximadamente un 15% del total de la energía sísmica disipada en todo el mundo cada siglo.

Según el estudio de Caracterización de Fuentes Sísmicas de Subducción realizado por INGEOMINAS y el DAGMA para la microzonificación sísmica de Santiago de Cali de 2005, se tiene que la subducción incluye la parte oriental de la cuenca de Panamá, parte del pacífico ecuatorial del Este entre las cordilleras de Cocos y Carnegie y los márgenes continentales de Panamá y Colombia, y el occidente de Colombia, y está definida por las coordenadas -83° - 74° de longitud y 0° a 9° de latitud, con una extensión aproximada de un millón de km^2 (Figura 5).

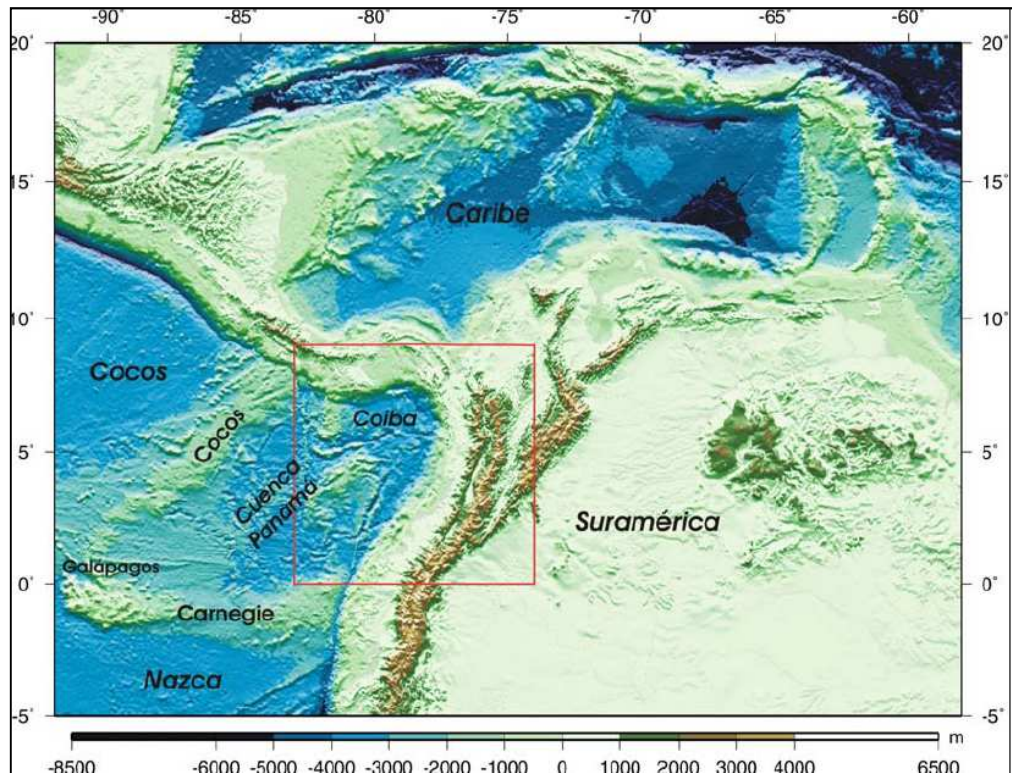


Figura 5. Área marcada por la convergencia de las placas Caribe, Cocos, Nazca y Suramérica.

El recuadro en la Figura 5 indica la zona que se analiza en los estudios sísmotectónicos regionales del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Cali que además comprende el área de la ciudad de Popayán que es la región de interés en este proyecto, referidos a la subducción. Figura tomada del estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali de 2005.

Las zonas de subducción no son sólo las fuentes de los terremotos más frecuentes y grandes, sino las más regulares en su comportamiento. Normalmente se reconocen dos tipos de subducción: Chile o Andino y Marianas o Back-Arc, cada uno con sus características particulares.

De acuerdo con esto el proceso de subducción que tiene lugar bajo el occidente de Colombia es del tipo Chile, con sus características asociadas, y tiene la posibilidad de generar terremotos de gran magnitud.

Finalmente resulta importante saber que los terremotos no se distribuyen de manera homogénea por toda la superficie terrestre, sino que suceden en líneas curvas que parecen dividir la tierra en regiones aproximadamente estables y que coinciden generalmente con grandes fosas o trincheras oceánicas y con las dorsales oceánicas, estas grandes regiones son las placas tectónicas. Los

terremotos que ocurren en los bordes de estas placas se denominan “terremotos INTERPLACA”. También se pueden producir terremotos en el interior de una placa tectónica y se denominan “terremotos INTRAPLACA”.

A su vez, los terremotos no se originan a la misma profundidad. De modo que se puede clasificar los terremotos en función de su profundidad y para efectos de este estudio en tres grupos:

- **Terremotos Interplaca**, que son sismos superficiales asociados a la subducción del Océano Pacífico y generalmente ocurren a profundidades menores de 50 km.
- **Terremotos Intraplaca-Benioff Intermedia**, son sismos cuyo hipocentro se sitúa entre los 50 y 200 km.
- **Terremotos Intraplaca-Benioff Profundos**, cuyo origen está dado a profundidades superiores a los 200 km.

2.1.2. Fuentes Asociadas a la Actividad Cortical. Este tipo de clasificación se ha dispuesto para caracterizar los terremotos que se han generado en la corteza terrestre, cuyas profundidades son generalmente superficiales menores a los 40 km. La agrupación para efectos del estudio se da a partir de dos parámetros que son la profundidad y la distancia epicentral del sismo:

- **Cercana o local**, son sismos que han tenido lugar en profundidades menores a los 40 km y su distancia epicentral es menor a 50 km.
- **Regional**, corresponde a los sismos que se han dado en profundidades inferiores a los 40 km y la distancia epicentral mayor a los 50 km.

2.1.3. Fallas Activas Regionales. Las fallas alrededor de la ciudad de Popayán presentan rasgos estructurales y morfológicos que permitieron, de acuerdo al estudio de MZSP, hacer una clasificación tentativa de su actividad, en función del grado de desarrollo, conservación y persistencia.

Las fallas a nivel local potencialmente activas que bajo el campo de esfuerzos tectónicos se han presentado en la zona adyacente a la ciudad de Popayán son:

2.1.3.1. Sistema de Fallas de Romeral. El nombre de Romeral fue dado por Grosse (1926), posteriormente fue empleado en sentido diferente al de la definición original, pues Grosse se refirió a una falla que solo afectaba las rocas del Complejo de Quebrada grande. Algunos autores como Barrero (1979), Irving (1971), y Duque-Caro (1980), se refieren a Romeral como una zona de contacto entre dominios oceánico y continental, sin hacer precisión en la falla límite. Dentro del área en consideración tiene dirección predominante Norte-Sur y está compuesta por un conjunto de fallas paralelas que se entrelazan en algunos

sitios. Mosquera y Orrego (1990) consideran que al Sistema de Fallas de Romeral pertenecen las estructuras localizadas en el flanco occidental de la Cordillera Central.

El Sistema de Fallas de Romeral se compone de tres grandes fallas, que tienen una longitud, a lo largo de la Cordillera Central, de varios centenares de kilómetros y a cada una de estas megafallas están asociadas unas estructuras muy importantes. Estas megafallas son: San Jerónimo, Silvia-Pijao y Cauca-Almaguer. Se considera actualmente que al occidente de la Falla Cauca-Almaguer no existen rocas de ámbito continental, y que al oriente de la Falla San Jerónimo tampoco existen rocas oceánicas tipo Pacífico. El sistema está localizado en el flanco occidental de la Cordillera Central; se descompone de fallas inversas de alto ángulo, con desplazamientos horizontales importantes, cuya inclinación es al este y dirección noreste. Los bloques occidentales de cada falla se levantan con respecto a los bloques orientales.

2.1.3.2. Sistema de Fallas Cali-Patía. Constituye el límite oriental de la Cordillera Occidental y es de naturaleza tensional. Su actividad tectónica comenzó hacia finales del Cretácico Superior-Paleógeno. Se considera que este sistema de fallas ha sido originado como una serie de fracturas tensionales en la zona de flexión de la corteza oceánica, adyacente a la zona de subducción. En la actualidad puede presentar características de fallamiento inverso esencialmente por reorganización estructural local o por rotación tectónica dentro de un área caracterizada por acción compresiva. Las fallas de este sistema son inversas, de ángulo alto con dirección noreste. Este sistema es sensiblemente paralelo al del Romeral y como él está constituido por un conjunto de fallas subparalelas que se entrelazan en forma elipsoidal indicando movimientos horizontales. Al occidente del Río Cauca, se observan silletas, valles lineales simétricos y asimétricos, corrientes lineales, flexión del terreno y un cabalgamiento hacia el este de las unidades geológicas pre-cuaternarias.

2.2. NORMATIVIDAD SISMO RESISTENTE DE COLOMBIA

Colombia es un país que históricamente se ha visto sometido a la acción de una serie de movimientos sísmicos que han producido lamentables víctimas humanas y daños en edificaciones. Uno de los sismos que marco en el sector de la construcción un cambio importante fue el sismo del 31 de marzo de 1983 en Popayán, el cual consiguió como respuesta el Decreto 1400 de 1984 expedido el 7 de junio de 1984, que fue la primera norma colombiana de construcciones sismo resistentes. Desde ese entonces las normas sismo resistentes presentan

requisitos mínimos, que buscan garantizar que se cumpla el fin primordial de salvaguardar las vidas humanas ante la ocurrencia de un sismo fuerte.

El primer Código de Construcción Colombiano Sismo Resistente de 1984 CCCSR-84 define a Popayán como una Zona de Riesgo Sísmico Alto y en Artículo A.2.6. Precisa la forma del espectro elástico de aceleraciones para diseño de las ciudades Colombianas. El espectro elástico de aceleraciones esta dado por medio de valores de A_a (Coeficiente de aceleración pico esperada), A_v (Coeficiente de Velocidad pico esperada), S (Coeficiente de sitio), I (Coeficiente de Importancia) y T (Período del Sistema en segundos), y según el mismo artículo, Popayán tiene valores de A_a igual 0.20 y A_v igual a 0.25.

Dado que la Ley 1400 de 1997 permitía hacer actualizaciones de las normas sismo resistentes colombianas por medio de Decretos Reglamentarios, en 1998 se expidió una nueva versión de Norma Sismo Resistente Colombiana denominada NSR-98. En esta norma también se clasifica a Popayán como una Zona de Amenaza Sísmica Alta y se trabaja con valores de A_a igual a 0.25 y no se trabaja sobre el parámetro A_v . La forma del espectro elástico de aceleraciones para diseño en el Artículo A.2.6 está dada bajo los mismos parámetros del CCCSR-84, salvo que no utilizan el parámetro A_v y limitan la forma del espectro dependiendo del periodo de vibración.

En la actual Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente de 2010 (NSR-10), Popayán sigue siendo considerada una ciudad con Amenaza Sísmica Alta y la forma del espectro de diseño es prácticamente el mismo considerado por el método alternativo de la NSR-98. Para utilizar este procedimiento se hace necesario conocer el F_a (Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos, debido a los efectos de sitio) y el F_v (Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios, debido al efecto de sitio). Para cada ciudad los valores cambian de acuerdo al tipo de perfil de suelo. Los valores que son fijos para Popayán son el A_a igual a 0.25 y A_v igual a 0.20.

2.3. MICROZONIFICACIÓN SISMOGEOTÉCNICA DE POPAYÁN DE 1992

El estudio de MZSP-92 fue el primero realizado en el país y se basó en trabajos de sismicidad neotectónica, amenaza sísmica, geología y geotecnia, lamentablemente no contó con registros de aceleración en Popayán, por lo que en 1988 cuando se adelantaban los estudios para el análisis de la respuesta sísmica del subsuelo en la ciudad, se formuló un modelo de suelo apoyado en estudios geotécnicos y en la respuesta dinámica del mismo.

En detalle se analizaron 17 modelos sometidos cada uno a la propagación de cuatro acelerogramas por un medio continuo, en el dominio del tiempo, para ello

se empleó el programa SHAKE, (Schnabel, 1972). Los modelos de suelos fueron sometidos a la acción de cuatro sismos:

1. Con corta distancia epicentral, como la que correspondería a las rupturas de las fallas locales de Popayán; estos eventos se asimilan al evento de Loma Prieta con registro en Corralitos y aceleración máxima igual a 0.6g
2. Sismo de Corralitos reducido, con aceleración máxima igual a 0.3g, pero con el mismo sentido frecuencial.
3. Sismo sintético más o menos equivalente al que causaría una gran ruptura en una fuente regional como la Falla de la Cordillera Oriental con aceleración máxima en Popayán igual a 0.24g.
4. Sismo de México del 19 de noviembre de 1985, registrado en la roca en ciudad de México con aceleración máxima de 0.028g.

Resultaron diez y siete modelos de suelos analizados frente a la acción de cuatro sismos diferentes. Por lo que en definitiva se consideraron sesenta y ocho situaciones de subsuelo en las que pudo observarse que los modelos de suelo “blando” deamplifican la aceleración máxima, los modelos de suelo “rígido” amplifican dicho valor y los de suelo medio mantienen valores similares.

Para generar la respuesta espectral a cada acelerograma se evaluó el espectro de respuesta tanto a nivel de roca como a nivel de superficie en el terreno. Las aceleraciones espectrales de interés son las de la superficie ya que sobre la misma se implantaran las construcciones. El suelo se modela como un sistema amortiguado con rigidez al cortante y amortiguamiento variable en términos de la deformación que le imprime cada acelerograma en cada punto del modelo. Se observó que la aceleración en superficie produjo valores espectrales diferentes para cada periodo estructural y por esto afecta de manera diferente a cada construcción puesto que cada una posee un particular período de vibración natural fundamental.

Las respuestas espectrales de los modelos mencionados mostraron ciertas características comunes, con particularidades debidas a la heterogeneidad de los suelos y como resultado de la investigación realizada se concluyó:

Primero: el CCCSR-84 reproduce inadecuadamente la zona en la cual cae casi el ciento por ciento de las edificaciones actuales y futuras de la ciudad la cual corresponde al sector del espectro con periodos iguales o inferiores a 0.5 s. Las aceleraciones espectrales obtenidas en el estudio mostraron valores inferiores a las especificadas por el Código en períodos inferiores a dos o tres décimas de segundo, es decir las que corresponderían a construcciones de tres o menos pisos.

Segundo: las aceleraciones espectrales correspondientes a periodos entre aproximadamente 0.3s y 0.5s, asociadas a edificios de tres a cinco pisos que podrían construirse en Popayán, fueron inadecuadamente estimados por el

CCCSR-84, pues de los sesenta y ocho casos analizados los resultados del estudio las superaron.

Tercero: las aceleraciones espectrales en periodos intermedios y altos, es decir entre uno y dos segundos, tienden a resultar subestimadas por las recomendaciones del Código con $A_a=0.2$ aún empleando un factor $S=1.5$. Aunque la construcción de edificios entre diez y veinte pisos en la zona urbana actual sea algo casi imposible.

Los Espectros de Diseño propuestos por la MZSP-92 fueron derivados del análisis colectivo de la respuesta local en términos geotécnicos y de la respuesta dinámica como se explicó anteriormente y se concluyó que los espectros debían tener en cuenta las respuestas particulares tanto frente a los sismos muy cercanos como a los intensos de distancia intermedia, un poco más de 100 km. Además debían de tener en cuenta la disminución respecto a las reglas del decreto 1400 con respecto a la intensidad de la aceleración espectral en periodos cortos, propios en edificios de cinco o menos pisos.

Finalmente identificaron cuatro tipos de espectros de diseño para el área urbana de la ciudad de Popayán (Figura 21).

PRIMER TIPO-ZONA A

Cubre el centro histórico y la parte nororiente de la ciudad, el espectro corresponde al proveniente del análisis de respuesta de suelos blandos y medios. El espectro de diseño para esta zona se definió con $A_a=0.2$, $A_v=0.25$ y $S=1.7$. Por tanto la zona A, correspondiente a suelos blandos, se identifica con el espectro dado por el Código con un coeficiente de suelo dado por $S_3'=1.7$

SEGUNDO TIPO-ZONA B

Corresponde a los barrios localizados al extremo occidental de la ciudad actual y a todo el área al norte del río Cauca, en este tipo de suelos intermedios el Código resulta inapropiado si se considera $A_a=0.2$ y $A_v=0.25$, puesto que analizando los espectros y los factores de amplificación, se logró una mayor aceleración en el terreno y en los espectros de respuesta para períodos cortos que la obtenida en los modelos de la zona A. Una solución aceptable para representar los resultados se obtuvo con: $A_a=0.25$, $A_v=0.30$ y $S=1.5$.

TERCER TIPO-ZONA C

Corresponde a suelos blandos de poco espesor sobre estratos duros formados por aluviones cercanos al río Cauca. En este caso se hizo más evidente la amplificación del suelo para períodos cortos. Se advirtió que hay un predominio de respuesta de las señales correspondientes a sismos locales. Un aceptable cubrimiento se logró con: $A_a=0.30$, $A_v=0.33$ y $S=1.2$.

CUARTO TIPO-ZONA D

Corresponde a las zonas de las colinas que rodean a la ciudad por el sur y el sur oriente, las cuales tienen depósitos de suelo sobre terreno firme. Aunque por falta de información no se pudo tener la certeza en la determinación de la respuesta dinámica de esta zona, con base en la información recolectada se planteó un espectro basado en valores de $A_a=0.25$, $A_v=0.30$ y $S_2=1.2$; es decir valores equivalentes a los de la zona B. Teniendo en cuenta que en esta zona debe darse especial cuidado a efectos colaterales del sismo tales como deslizamientos y amplificaciones locales por efectos topográficos.

2.4. CONCEPTOS GENERALES EN MOVIMIENTOS FUERTES

A continuación se describirán los conceptos más usados e importantes en presente estudio:

2.4.1. Movimiento Fuerte

- Es aquel movimiento producido por un sismo, caracterizado por ser claramente percibido por las personas y potencialmente destructivo en la zona cercana a la región epicentral.
- Movimiento fuerte se refiere a sismos con magnitudes $ML > 4.0$

2.4.2. Magnitud Local (ML). Cuantifica la cantidad de energía sísmica generada por terremoto. Se calcula con base en la amplitud de la dislocación (onda) más grande.

2.4.3. Campo Cercano

Área alrededor de la región epicentral en la que los movimientos en superficie al paso de las ondas sísmicas son más intensos, produciendo desplazamientos, velocidades y aceleraciones mayores.

2.4.4. Amenaza Sísmica. La Amenaza Sísmica de un emplazamiento se define como la probabilidad de excedencia de un determinado nivel de movimiento del terreno, como resultado de la acción de terremotos en el área de influencia, durante un período de tiempo especificado (Schenk, 1989). Lo que equivale a decir que la amenaza es la probabilidad en la que se debe especificar qué nivel de movimiento del suelo se considera constitutivo de peligro potencial y durante qué período de tiempo se espera que ocurra un sismo que produzca tal movimiento. Para caracterizar el sismo se consideran generalmente parámetros como

aceleración, velocidad y desplazamiento, bien sean los valores máximos durante el tiempo que dure el movimiento o los valores espectrales.

2.4.5. Acelerógrafo. Es el instrumento que se utiliza para registrar los movimientos fuertes del suelo, en el denominado campo cercano. Este equipo, permite obtener la aceleración del suelo durante un terremoto, en función del tiempo.

Es un equipo que posee además una baja amplificación, para evitar la saturación. Como el movimiento sísmico en la proximidad de la fuente tiene un elevado contenido en altas frecuencias, el periodo natural del acelerógrafo puede estar comprendido entre, prácticamente 0 s y 0.1 s. y el amortiguamiento oscila entre el 50 y el 100% del amortiguamiento crítico.

El movimiento del suelo registrado por los acelerógrafos es transformado en impulsos eléctricos los cuales son amplificados y por un valor de conversión se transforma en unidades de aceleración generando un acelerograma digital.

Este equipo está constituido por los siguientes dispositivos:

a. Sensores:

Convierten la energía del movimiento del suelo en otro tipo de energía: mecánica, electromagnética o electrónica.

b. Sistema de disparo:

Permite que se active el sensor cuando supera un umbral de aceleración y de frecuencia, luego se procede a grabar.

c. Sistema de registro:

Almacena los eventos que se producen: papel fotográfico, cinta magnética, memoria de estado sólido ó tarjetas PCMCIA.

d. Sistema de tiempo:

Permite hacer un registro simultáneo del tiempo, a través de un GPS

2.4.6. Aceleración

- Es el parámetro más frecuente empleado para designar la intensidad de la sacudida sísmica y cuando se trata de la aceleración se le denomina GAL.
- La unidad comúnmente utilizada es el GAL (en honor a Galileo Galilei), el cual se expresa en unidades de aceleración o porcentaje de la gravedad.
 $1 \text{ GAL} = 1 \text{ cm/seg}^2 = g \text{ local} / 1000$

2.4.7. Acelerograma. El acelerograma es el registro de la aceleración en función del tiempo, en un sitio determinado. Este patrón es registrado por los acelerógrafos. Comúnmente, las aceleraciones se registran en tres componentes: dos en el plano horizontal y otra en el sentido vertical. La figura 6 muestra el acelerograma de un sismo registrado por la RNAC, en el que se aprecian sus componentes básicos: escala de tiempo, escala de aceleración, aceleración pico del terreno y la fase fuerte.

Debido a que los sismos son eventos aleatorios en el tiempo y en el espacio, los acelerogramas resultan ser una superposición de ondas sumamente compleja que depende del proceso de ruptura en el hipocentro, de su propagación y atenuación, así como de los efectos de sitio debidos a la geología y a las condiciones geotécnicas que existan en el lugar donde se ubique el instrumento de registro. Considerando lo anterior, la forma de los acelerogramas es siempre distinta, por lo que cada registro es único e irrepetible.

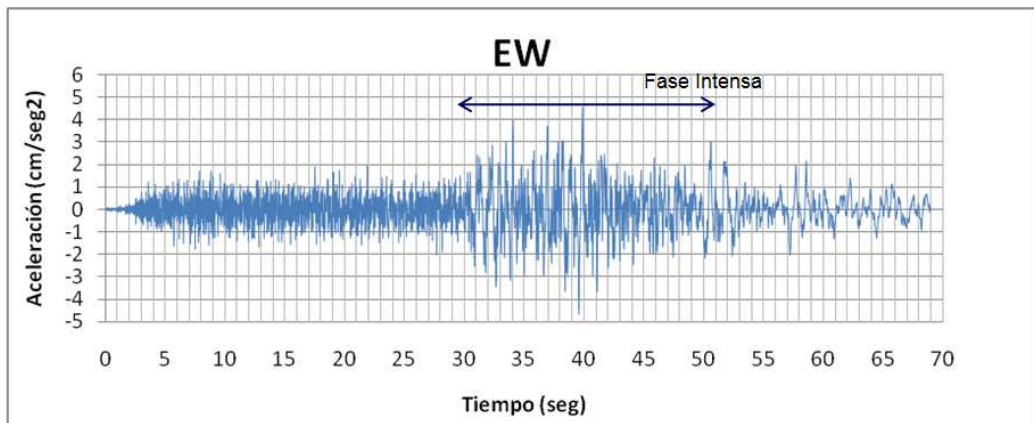


Figura 6. Acelerograma del sismo de Génova (Quindío) registrado por la estación CPOP1 de Magnitud 6.8, profundidad 102 Km y Distancia hipocentral 298 Km.

En todo acelerograma se reconocen tres zonas:

- Crecimiento: Aumento de amplitud
- Movimiento Fuerte: Sección intermedia, amplitudes fluctuantes
- Decrecimiento: Final de amortiguamiento, ondas superficiales

2.5. CATALOGO DE MOVIMIENTOS FUERTES

El Instituto Colombiano de Geología y Minería, Ingeominas, a través de la RNAC, lleva a cabo el registro de los sismos intensos que ocurren en el territorio nacional, a través de una red de 78 estaciones de acelerógrafos (Figura 7).



Figura 7. Distribución de las estaciones de la RNAC. Tomado de la página web de Ingeominas: http://seisan.ingegominas.gov.co/RNAC/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=63

La RNAC de INGEOMINAS mantiene un catálogo de movimientos fuertes de los registros obtenidos de las cinco estaciones ubicadas en la ciudad de Popayán (Figura 8), el cual fue utilizado para la realización del presente trabajo.

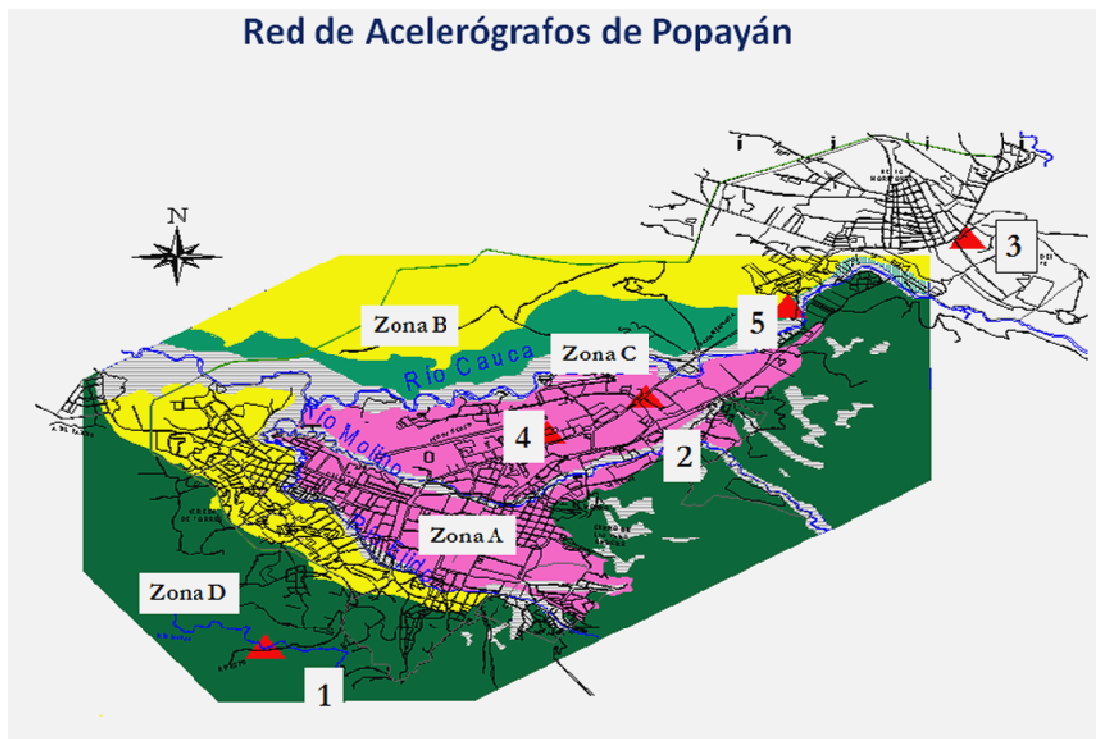


Figura 8. Mapa de la distribución de la Red de Acelerógrafos de Popayán (Adaptado de la MZSP 92).

No	Estación	UBIC.	GEOL.	INSTAL.	MODELO	LAT. (°)	LON. (°)	TOP.
1	CPOP1	Robles	Roca	07/09/1996	ETNA	2.43	-76.63	ONDULADA
2	CPOP2	Invías	Suelo	22/06/1994	SSA-2MC	2.46	-76.59	PLANA
3	CPOP3	Sena	Suelo	05/11/1997	ETNA	2.48	-76.56	PLANA
4	CPOP4	ISS	Suelo	07/11/1997	SSA-2	2.46	-76.6	PLANA
5	CPOP5	Gabriela M	Suelo	03/11/1997	SSA-2	2.47	-76.58	PLANA

Tabla 1. Descripción de las estaciones de acelerógrafos localizadas en la ciudad de Popayán.

2.3.1 Eventos Sísmicos Registrados por las Estaciones Ubicadas en la Ciudad de Popayán entre 1994 y 2010 con ML>4.0.

En la siguiente tabla se muestran las características de los sismos empleados en el presente estudio.

FECHA Día/Mes/Año	EPICENTRO	ML	PROF (Km)	LAT (°)	LON(°)	CODIGO ESTACIÓN
08/02/1995	Calima (Valle)	6.6	102	4.13	76.74	CPOP2
08/02/1995	Calima (Valle)	6.6	102	4.13	76.74	CPOP1
19/02/1997	Sipí (Chocó)	6.1	120	4.54	-76.52	CPOP2
02/09/1997	Genova (Quindío)	6.8	230	3.96	-75.87	CPOP1
02/09/1997	Genova (Quindío)	6.8	230	3.96	-75.87	CPOP2
19/11/1997	Jamundí (Valle)	4.9	100	3.28	-76.49	CPOP3
11/12/1997	Génova (Quindío)	6.6	220	4	-75.95	CPOP1
11/12/1997	Génova (Quindío)	6.6	220	4	-75.95	CPOP2
11/12/1997	Génova (Quindío)	6.6	220	4	-75.95	CPOP3
11/12/1997	Génova (Quindío)	6.6	220	4	-75.95	CPOP4
25/01/1999	Córdoba (Quindío)	6.2	0	4.41	75.71	CPOP2
25/01/1999	Córdoba (Quindío)	6.2	0	4.41	75.71	CPOP4
07/01/2003	Sotará (Cauca)	4.1	Superficial	2.17	-76.55	CPOP3
07/01/2003	Sotará (Cauca)	4.1	Superficial	2.17	-76.55	CPOP4
18/08/2004	Sotará (Cauca)	5.2	Superficial	2.14	-76.6	CPOP1
18/08/2004	Sotará (Cauca)	5.2	Superficial	2.14	-76.6	CPOP2
18/08/2004	Sotará (Cauca)	5.2	Superficial	2.14	-76.6	CPOP3
18/08/2004	Sotará (Cauca)	5.2	Superficial	2.14	-76.6	CPOP4
15/11/2004	Oceano Pacífico	6.7	24	4.8	-77.77	CPOP2
06/03/2007	Puracé (Cauca)	5	4	2.21	-76.48	CPOP2
06/03/2007	Puracé (Cauca)	5	4	2.21	-76.48	CPOP3
06/03/2007	Puracé (Cauca)	5	4	2.21	-76.48	CPOP4
10/09/2007	Oceano Pacífico	6.2	Superficial	2.93	-78.21	CPOP2
10/09/2007	Oceano Pacífico	6.2	Superficial	2.93	-78.21	CPOP4
18/12/2009	Caloto (Cauca)	5.3	151	3.05	-76.38	CPOP3
18/12/2009	Caloto (Cauca)	5.3	151	3.05	-76.38	CPOP4
06/06/2010	Sotará (Cauca)	4.2	2	2.26	-76.55	CPOP3
06/06/2010	Sotará (Cauca)	4.2	2	2.26	-76.55	CPOP5

Tabla 2. Sismos registrados por la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia entre entre el año 1994 y 2010.

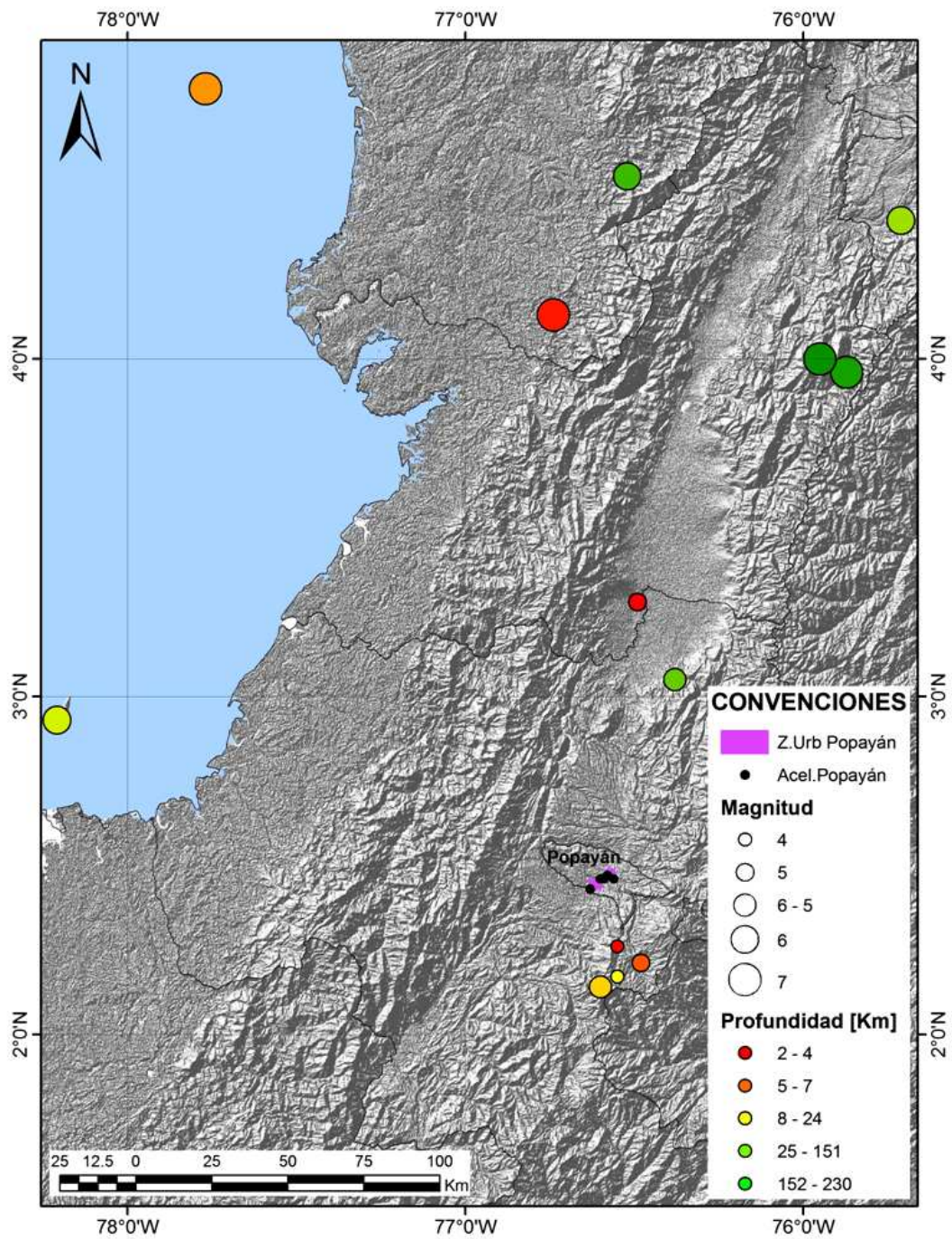


Figura 9. Mapa de la sismicidad registrada por la Red de Acelerógrafos de Popayán, para eventos con Magnitud Local > 4.0 entre 1994 y 2010. El tamaño de las esferas indica la magnitud y el color depende de la profundidad del evento. Imagen lograda con el software ArcGis versión 9.3 con licencia legal adquirida por INGEOMINAS, bajo el programa ArcMap.

CAPITULO III

PROCESAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE REGISTROS DE LAS CINCO ESTACIONES DE POPAYÁN

3.1. GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS

Los movimientos fuertes del suelo son transformados en impulsos eléctricos (unidades de voltaje) por el acelerógrafo mediante los sistemas transductores que posee. El instrumento amplifica los registros y si estos cumplen unas condiciones determinadas se genera un acelerograma (Figura 9).

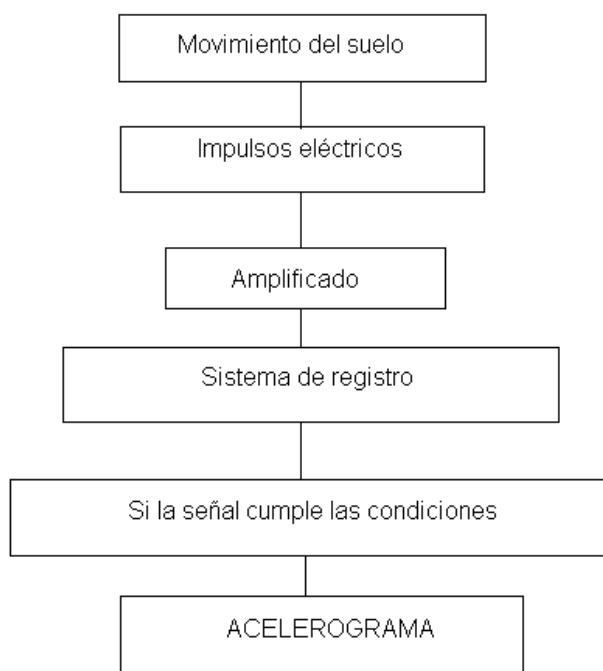


Figura 10. Ilustración de la generación de acelerogramas.

3.1.1. Corrección sobre los Acelerogramas. El acelerograma obtenido presenta una serie de distractores que deberán ser corregidos ya que durante el proceso de amplificación y de conversión se ha perturbado la señal original. Es necesario realizar dos tipos de correcciones: Instrumental y de línea base.

3.1.1.1. Corrección Instrumental. La corrección instrumental, se realiza a través de la convolución (multiplicación) de la señal original (Figura 11) por la curva de respuesta de los sensores (Figura 12).

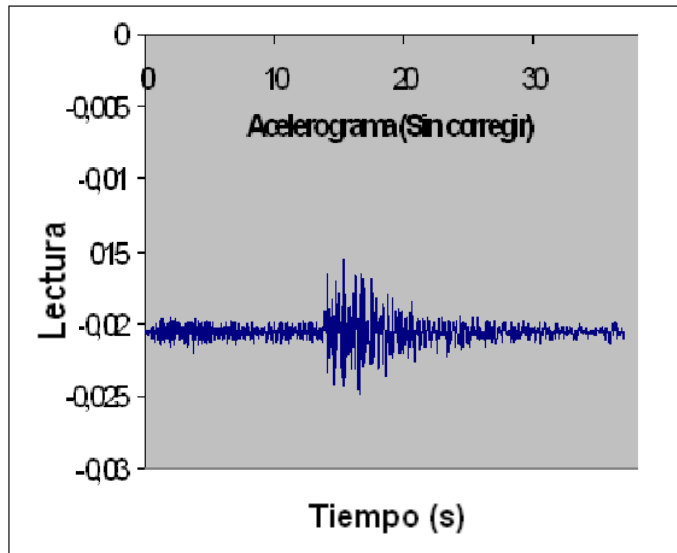


Figura 11. Señal original del registro de un sismo sin corrección.

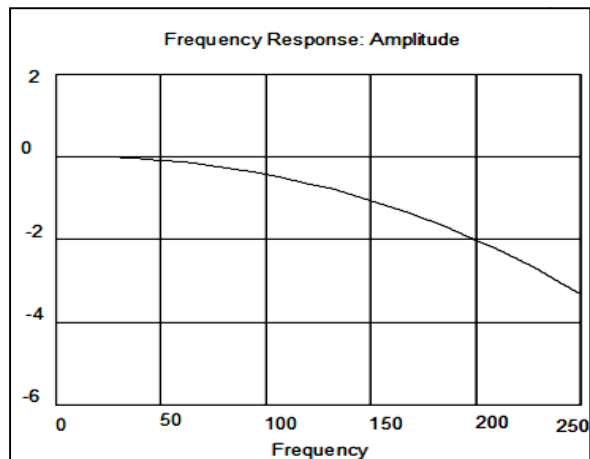


Figura 12. Curva de respuesta de los sensores del instrumento que registró el sismo.

3.1.1.2. Corrección Línea Base. Todos los registros sísmicos presentan un desplazamiento respecto a un nivel de referencia o cero (valor a_0 en la Figura 13.) provocado por los circuitos electrónicos de acondicionamiento de la señal y de

amplificación. La corrección para este problema puede realizarse mediante el Método de los Mínimos Cuadrados que consiste en determinar la cantidad en que se debe correr cada ordenada para encontrar la línea real de cero.

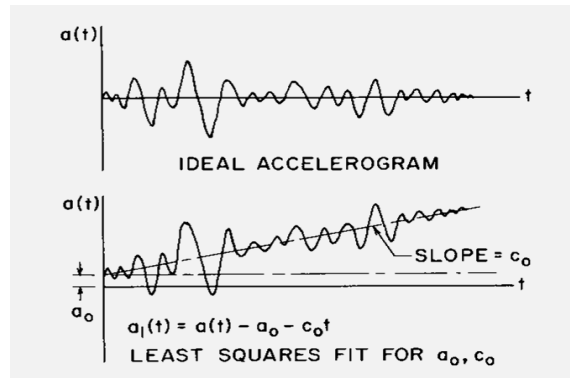


Figura 13. Acelerograma antes (abajo) y después (arriba) de la corrección de línea de base. Figura tomada de la presentación Conceptos Fundamentales de Movimientos Fuertes, MSc. María Luisa Bermúdez.

3.1.1.3. Filtrado de la señal. Los registros originales también pueden incluir errores de ruido de fondo procedentes de diferentes fuentes como: el tráfico, la actividad de construcción, viento (trasmitido al suelo por las vibraciones de los arboles, edificios, etc.) y en algunos casos por los cambios de presión atmosférica. Los eventos mencionados no producen señales sísmicas; sino ruido tanto de bajas como de altas frecuencias. Para suprimir el ruido que se enmascara dentro la señal sísmica se utilizan filtros que eliminan las frecuencias indeseadas. Lo más importante al aplicar los filtros, es elegir la frecuencia de corte adecuada, ya que un error en la elección puede eliminar parte de la señal que interesa, o por el contrario, no eliminar el ruido que se presente en la señal.

En la RNAC se acostumbra aplicar filtros suaves a los registros. El tipo de filtro utilizado es pasa banda entre 0.1 y 50 Hz, es decir, elimina frecuencias por debajo de 0.1 Hz y por encima de 50 Hz. Este valor se toma al considerar que los sensores de los acelerógrafos tienen un ancho de banda entre DC y 200Hz, acoplados a un digitalizador a un muestreo de 200 muestras por segundo, obteniéndose un ancho de banda efectivo entre 0 y 80 Hz.

3.1.1.4. Corrección Mediante el programa Seismo Signal. El programa utilizado para el procesamiento básico de las señales como corrección de línea base y filtrado de la señal fue el Seismo Signal (2004). Este programa fue desarrollado por Seismosoft, una compañía que se encarga de crear software que brindan soluciones en las tareas de la ingeniería de sismos. Este programa

contiene módulos para procesar acelerogramas, generar espectros inelásticos, respuestas elásticas, constantes de ductilidad, espectros de Fourier y energía, características de intensidad, velocidad absoluta acumulada y densidad de energía, aceleración máxima y velocidad máxima, entre otras aplicaciones.

Mediante el programa Seismo Signal se hizo la corrección por línea base y el filtrado de la señal. La corrección instrumental se realiza automáticamente al correr las rutinas SSA2ASC ó EVT2ASC32.

Se empleó el programa Sesimo Signal, porque es de acceso libre. El mismo se puede descargar del siguiente enlace:

http://translate.google.com.co/translate?hl=es&sl=en&u=http://www.seismosoft.com/en/SeismoSignal.aspx&ei=PzGStar5JZCitgenr_VP&sa=X&oi=translate&ct=result&resnum=1&ved=0CBgQ7gEwAA&prev=/search%3Fq%3Dseismo%2Bsignal%26hl%3Des%26prmd%3Divns

Para convertir la señal de unidades de voltaje a aceleración, es necesario aplicar a la señal un factor de escala el cual depende de la escala máxima de registro del equipo.

- Factor de escala: Para calcular este factor se necesita conocer la escala máxima del equipo.

Escala máxima del equipo = 1g

$$1g = 1000 \frac{cm}{seg^2}$$

$$1000 \frac{cm}{seg^2} \rightarrow 2.5voltios$$

x ← número de voltios

$$x = \text{número de voltios} * \left(\frac{1000gales}{2.5voltios} \right)$$

$$x = \text{número de voltios} * (400gales)$$

Factor de corrección para 1g = 400

Escala máxima del equipo = 2g

$$2g = 2000 \frac{cm}{seg^2}$$

$$2000 \frac{cm}{seg^2} \rightarrow 2.5 \text{ voltios}$$

x ← número de voltios

$$x = \text{número de voltios} * \left(\frac{2000 \text{ gales}}{2.5 \text{ voltios}} \right)$$

$$x = \text{número de voltios} * (800 \text{ gales})$$

Factor de corrección para 2g = 800

Otros parámetros importantes que se tuvieron en cuenta para procesamiento de los registros fue:

- Tasa de muestreo ΔT : 1/muestreo. Por configuración, los equipos están a 200 muestras por segundo.

$$\Delta T = \frac{1}{200} = 0.005$$

Por lo tanto, la tasa de muestreo es del 0.005.

- Corrección línea de base: Se aplicó del tipo lineal
- Filtro: Tipo Butterworth (Figura 14)

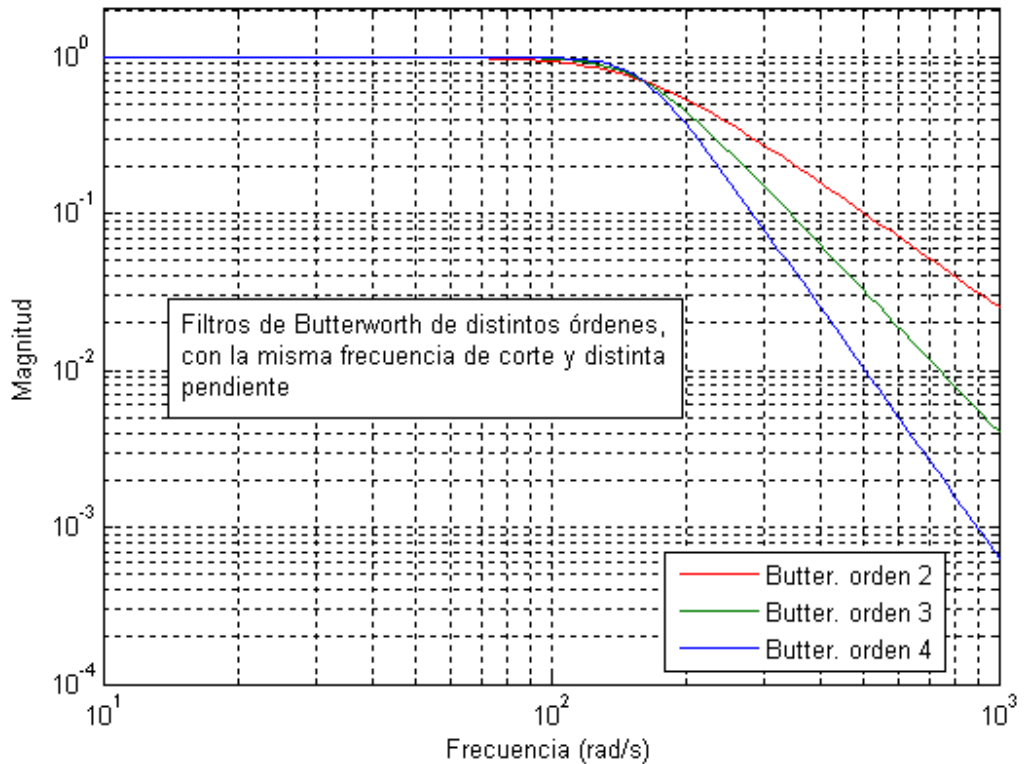


Figura 14. Filtros de Butterworth de distintos órdenes, con la misma frecuencia de corte y distinta pendiente. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/10/Filt_elect_pend.PNG

El filtro utilizado en la RNAC va desde 0.1 hasta 50 Hz, ya que la banda ancha de sus equipos es desde 0 hasta 200 Hz. Figura tomada del encale:

- Configuración del filtro: Pasa banda de Orden 4 con frecuencias de corte $Frec1=0.1$ Hz y , $Frec2= 50$ Hz.

La Figura 15 muestra el acelerograma del registro del sismo de Sotará (Cauca) del 6 de Junio de 2010, obtenido en la estación Gabriela Mistral (CPOP5) Fecha: 06-Jun-10.

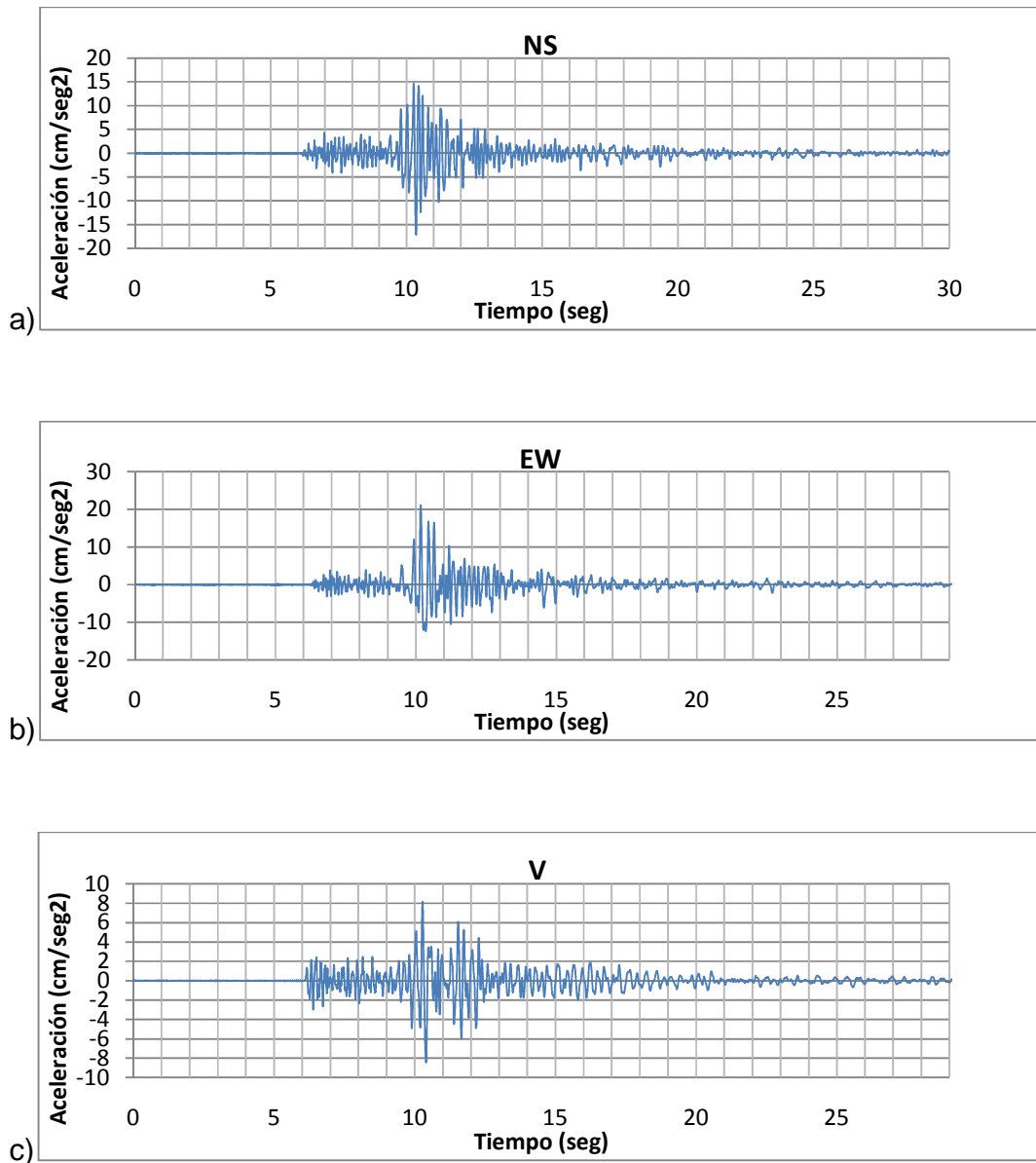


Figura 15. Acelerogramas de las tres componentes a) NS, b) EW y c) V, generados del sismo del 06 de junio de 2010 ocurrido en Sotará (Cauca), y registrado en la estación de acelerógrafo CPOP5.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS REGISTROS

A los acelerogramas obtenidos del procesamiento de los sismos se les ha realizado un cuidadoso tratamiento, para obtener valores reales y no dar lugar a error en los resultados. Después de tener los acelerogramas corregidos de cada

sismo comprendido entre 1994 y 2010 en el programa Seismo Signal se le determino:

- Aceleración máxima para cada registro (Amax)
- Espectro de Respuesta

3.2.1. Aceleración Máxima. La Amax es el parámetro mas empleado para designar la intensidad de la sacudida sísmica, además de esta aplicación, en el estudio se calculó para normalizar los registros, de modo que entre muchos datos se obtuviera un valor promedio relativo. La Amax de cada sismo procesado se muestra en la Tabla 3 y en la figura 16. A manera de ejemplo se presenta la Amax del sismo de Sotará del 06 de junio de 2010.

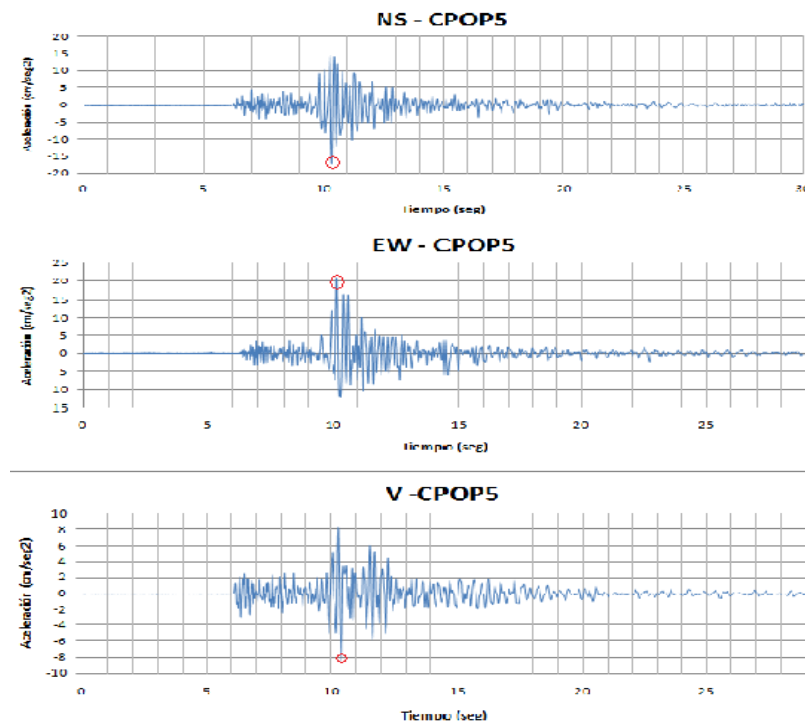


Figura 16. Acelerogramas y Amax de las tres componentes generadas del sismo del 06 de junio de 2010 de Sotará (Cauca). a) NS Amax= 16.334 gales, b) EW Amax 20.639 gales y c) V Amax= 8.006 gales.

Tabla 3. Aceleraciones Máximas en las componentes EW, V y NS, de los sismos registrados por la Red de acelerógrafos de Popayán en un periodo de observación entre 1994 a 2010.

FECHA Día/Mes/Año	EPICENTRO	ML	PROF (Km)	LAT (°)	LON(°)	CODIGO ESTACIÓN	ACELERACIÓN MÁXIMA(GALES)		
							A max EW	A max Ver	A max NS
08/02/1995	Calima (Valle)	6.6	102	4.13	76.74	CPOP2	12.013	5.974	16.119
08/02/1995	Calima (Valle)	6.6	102	4.13	76.74	CPOP1	3.964	3.181	5.414
19/02/1997	Sipí (Chocó)	6.1	120	4.54	-76.52	CPOP2	4.442	2.586	4.042
02/09/1997	Genova (Quindío)	6.8	230	3.96	-75.87	CPOP1	4.861	4.094	6.008
02/09/1997	Genova (Quindío)	6.8	230	3.96	-75.87	CPOP2	12.897	5.308	12.588
19/11/1997	Jamundí (Valle)	4.9	100	3.28	-76.49	CPOP3	3.32	0	3.631
11/12/1997	Génova (Quindío)	6.6	220	4	-75.95	CPOP1	4.366	3.289	3.777
11/12/1997	Génova (Quindío)	6.6	220	4	-75.95	CPOP2	17.343	6.024	14.418
11/12/1997	Génova (Quindío)	6.6	220	4	-75.95	CPOP3	11.356	0	15.679
11/12/1997	Génova (Quindío)	6.6	220	4	-75.95	CPOP4	14.05	0	13.394
25/01/1999	Córdoba (Quindío)	6.2	0	4.41	75.71	CPOP2	6.515	2.62	4.701
25/01/1999	Córdoba (Quindío)	6.2	0	4.41	75.71	CPOP4	5.993	0	4.919
07/01/2003	Sotará (Cauca)	4.1	Superficial	2.17	-76.55	CPOP3	11.278	0	13.283
07/01/2003	Sotará (Cauca)	4.1	Superficial	2.17	-76.55	CPOP4	11.193	0	10.227
18/08/2004	Sotará (Cauca)	5.2	Superficial	2.14	-76.6	CPOP1	12.229	8.91	15.829
18/08/2004	Sotará (Cauca)	5.2	Superficial	2.14	-76.6	CPOP2	17.896	8.427	20.282
18/08/2004	Sotará (Cauca)	5.2	Superficial	2.14	-76.6	CPOP3	21.87	0	28.373
18/08/2004	Sotará (Cauca)	5.2	Superficial	2.14	-76.6	CPOP4	34.493	0	26.035
15/11/2004	Oceano Pacífico	6.7	24	4.8	-77.77	CPOP2	26.499	7.28	20.231
06/03/2007	Puracé (Cauca)	5	4	2.21	-76.48	CPOP2	12.217	7.433	13.789
06/03/2007	Puracé (Cauca)	5	4	2.21	-76.48	CPOP3	32.739	15.222	36.056
06/03/2007	Puracé (Cauca)	5	4	2.21	-76.48	CPOP4	22.794	8.615	28.24
10/09/2007	Oceano Pacífico	6.2	Superficial	2.93	-78.21	CPOP2	8.433	4.678	6.121
10/09/2007	Oceano Pacífico	6.2	Superficial	2.93	-78.21	CPOP4	10.207	4.821	10.627
18/12/2009	Caloto (Cauca)	5.3	151	3.05	-76.38	CPOP3	6.479	3.235	8.307
18/12/2009	Caloto (Cauca)	5.3	151	3.05	-76.38	CPOP4	10.003	5.513	6.802
06/06/2010	Sotará (Cauca)	4.2	2	2.26	-76.55	CPOP3	11.247	7.585	27.409
06/06/2010	Sotará (Cauca)	4.2	2	2.26	-76.55	CPOP5	21.483	5.548	17.184

3.2.2. Espectro de Respuesta de aceleración. Es la representación gráfica de la respuesta máxima en cuanto a desplazamiento, velocidad, o aceleración, que produce una acción dinámica determinada en una estructura a un oscilador de un grado de libertad, (Figura 17).

En las abscisas se presenta el período ó frecuencia de la estructura y en las ordenadas la respuesta máxima calculada a diferentes amortiguamientos.

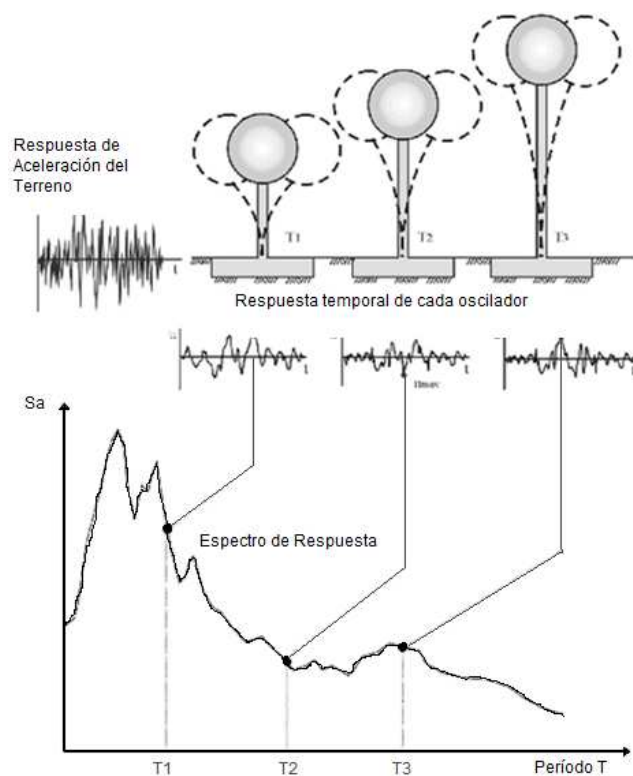


Figura 17. Modelo del Espectro de Respuesta de aceleración, tomado de Cisafulli y Villafañe, 2002.

En el programa Seismo Signal se generaron los espectros de respuesta de cada componente horizontal y vertical, con un valor de amortiguamiento del 5%, para diferentes períodos de vibración, desde 0 a 4 seg. (Figura 17).

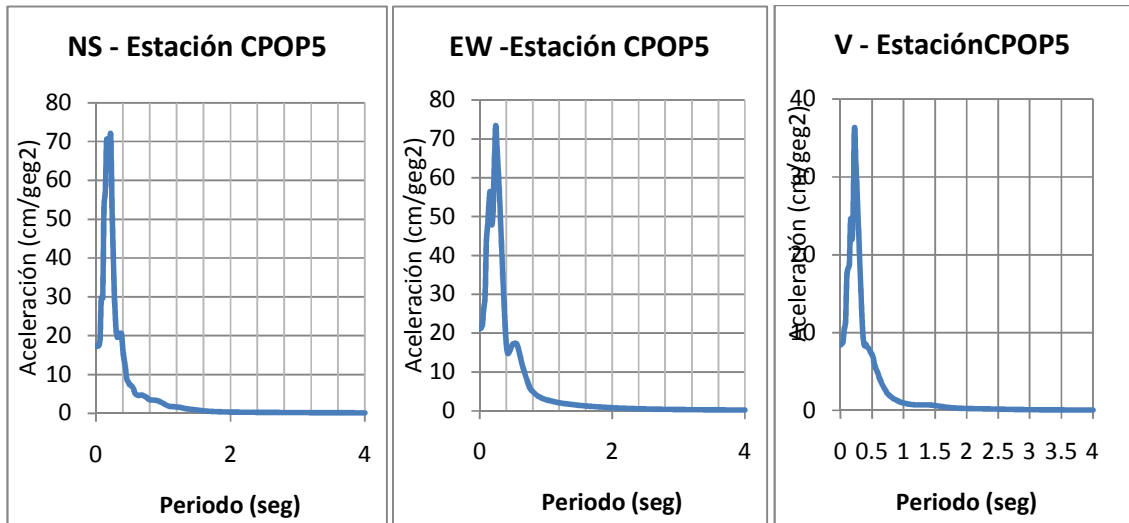


Figura 18. Espectro de Respuesta del sismo de Sotará (Cauca) del 06 de junio del 2010 registrado por la estación CPOP5 con amortiguamiento del 5%.

Para comparar los espectros de respuesta con los espectros de diseño de la MZSP-92 se normalizaron todos los espectros. Esta normalización se realizó dividiendo cada una de las ordenadas espectrales sobre la Amax. (Figura 19).

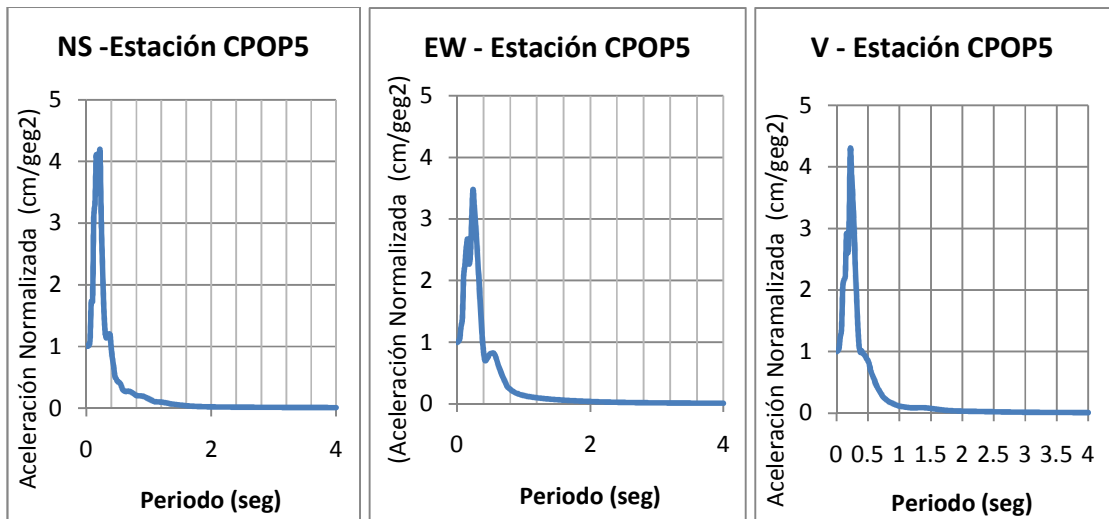


Figura 19. Espectros de Respuesta Normalizados con respecto a la Amax del sismo de Sotará (Cauca) del 06 de junio del 2010 registrado por la estación CPOP5 con amortiguamiento del 5%.

3.2.3. Espectro de Diseño. Es la representación gráfica que resume la respuesta dinámica del suelo en un parámetro clave, el valor de respuesta máxima, que usualmente es el requerido por el diseñador para el cálculo de estructuras. Sin embargo las construcciones no pueden diseñarse para resistir un sismo en particular en una zona dada, ya que próximos terremotos presentarán características diferentes. El diseño o verificación de las construcciones sismo resistentes se realiza a partir de espectros de diseño suavizados considerando una desviación estándar (Figura 20).

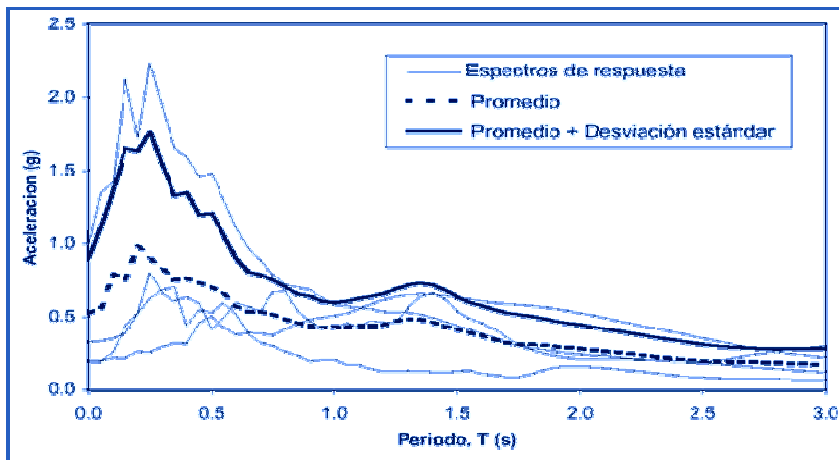


Figura 20. Espectro de Diseño suavizado.

En el presente estudio se utilizará los espectros de diseño propuestos por la microzonificación del 1992 (Tabla 4 y Figura 20) como indicador comparativo frente a las respuestas espectrales obtenidas de cada una de las zonas analizadas.

Los espectros propuestos están dados por los parámetros

$$\begin{aligned}
 a) \text{ Para } T < 0.3 \text{ Seg} \quad Sa &= (5T + I)AaI \\
 b) \text{ Para } T > 0.3 \text{ Seg} \quad Sa &= \frac{1.2Av SI}{T^{2/3}} \leq 2.5AaI
 \end{aligned}$$

Donde Sa=Aceleración Espectral en g

T =Período del edificio

I =Coeficiente de Importancia

S =Coeficiente Sísmico para Perfil de Suelo

Aa=Coeficiente de Aceleración Pico Esperada

Av=Coeficiente de Velocidad Pico Esperada

Tabla 4. Descripción de los parámetros Aa, Av y del coeficiente S. para cada zona propuesta por la MZSP-92.

ZONA	DESCRIPCIÓN	S	Aa	Av
A	BIANDA	$S3'=1.7$	0.20	0.25
B	MEDIA	$S3=1.5$	0.25	0.30
C	RIGIDA*	$S2=1.2$	0.30	0.33
D	COLINAS	$S2=1.2$	0.25	0.30

* Se refiere a zonas con suelos blandos superficiales de poco espesor

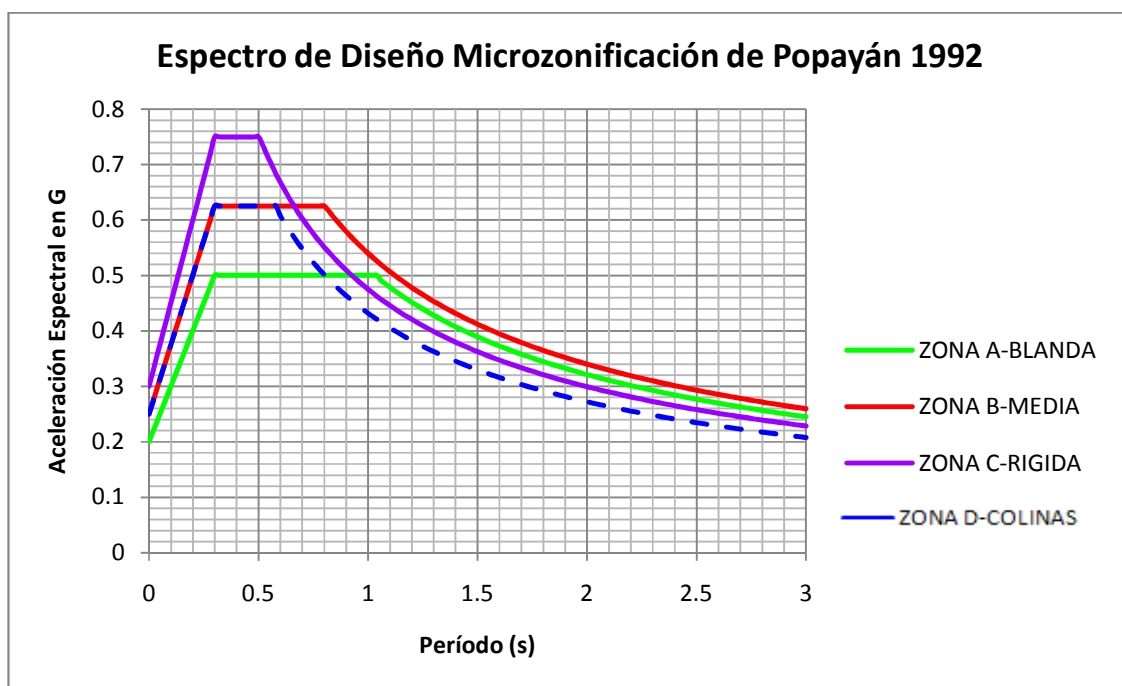


Figura 21. Espectros Propuestos por la Microzonificación Sismogeotécnica de Popayán.

CAPITULO IV

ESCENARIOS SÍSMICOS

4.1. CLASIFICACIÓN DE ESCENARIOS SÍSMICOS

Basados en los estudios de la Microzonificación de Popayán, se propone la clasificación de fuentes sísmicas entorno a la ciudad de Popayán en función de la cercanía y profundidad de los sismos registrados en los acelerógrafos y de acuerdo a lo mencionado en el capítulo dos (Tabla 6. y Tabla 7.)

Tabla 5. Clasificación de las fuentes asociadas a la actividad de subducción.

Fuente Asociadas a la Actividad de Subducción.	
Clasificación	Profundidad
Interplaca (Subducción del Océano Pacífico)	Menor a 50 km
Intraplaca- Benioff Intermedia	Entre 50 a 200 km
Intraplaca-Benioff Profunda	Mayores a 200 km

Tabla 6. Clasificación de las fuentes asociadas a la actividad cortical.

Fuente Asociadas a la Actividad de Cortical.	
Clasificación	Distancia epicentral
Cercana o Local	menor a 50 km
Regional	mayores a 50 km

4.2. Selección de Registros por escenarios sísmicos

Se analizó cuidadosamente cada evento sísmico y de acuerdo a la distancia epicentral y profundidad del mismo, se lo clasificó dentro del escenario sísmico correspondiente.

Tabla 7. Registros de sismos registrados por la RNAC entre 1994 y 2010 clasificados por escenario sísmico.

FECHA	EPICENTRO	MAGNITUD	PROF (Km)	CODIGO ESTACIÓN	Escenario sísmico
08/02/1995	Calima (Valle)	6.6	102	CPOP2	Intraplaca
08/02/1995	Calima (Valle)	6.6	102	CPOP1	Intraplaca
19/02/1997	Sipí (Chocó)	6.1	120	CPOP2	Intraplaca B I
02/09/1997	Genova (Quindío)	6.8	230	CPOP1	Intraplaca B P
02/09/1997	Genova (Quindío)	6.8	230	CPOP2	Intraplaca B P
19/11/1997	Jamundí (Valle)	4.9	100	CPOP3	Intraplaca B I
11/12/1997	Génova (Quindío)	6.6	220	CPOP1	Intraplaca B P
11/12/1997	Génova (Quindío)	6.6	220	CPOP2	Intraplaca B P
11/12/1997	Génova (Quindío)	6.6	220	CPOP3	Intraplaca B P
11/12/1997	Génova (Quindío)	6.6	220	CPOP4	Intraplaca B P
25/01/1999	Córdoba (Quindío)	6.2	0	CPOP2	Regional
25/01/1999	Córdoba (Quindío)	6.2	0	CPOP4	Regional
07/01/2003	Sotará (Cauca)	4.1	Superficial	CPOP3	cercano
07/01/2003	Sotará (Cauca)	4.1	Superficial	CPOP4	cercano
18/08/2004	Sotará (Cauca)	5.2	Superficial	CPOP1	cercano
18/08/2004	Sotará (Cauca)	5.2	Superficial	CPOP2	cercano
18/08/2004	Sotará (Cauca)	5.2	Superficial	CPOP3	cercano
18/08/2004	Sotará (Cauca)	5.2	Superficial	CPOP4	cercano
15/11/2004	Oceano Pacífico	6.7	24	CPOP2	Interplaca
06/03/2007	Puracé (Cauca)	5	4	CPOP2	cercano
06/03/2007	Puracé (Cauca)	5	4	CPOP3	cercano
06/03/2007	Puracé (Cauca)	5	4	CPOP4	cercano
10/09/2007	Oceano Pacífico	6.2	Superficial	CPOP2	Interplaca
10/09/2007	Oceano Pacífico	6.2	Superficial	CPOP4	Interplaca
18/12/2009	Caloto (Cauca)	5.3	151	CPOP3	cercano
18/12/2009	Caloto (Cauca)	5.3	151	CPOP4	cercano
06/06/2010	Sotará (Cauca)	4.2	2	CPOP3	cercano
06/06/2010	Sotará (Cauca)	4.2	2	CPOP5	cercano

Para poder apreciar la profundidad a la que ocurrió cada sismo registrado por la Red de acelerógrafos de Popayán, se graficó en el océano pacifico y en parte de la zona sur del país la sismicidad comprendida entre 1994 y 2010. (Figura 22)

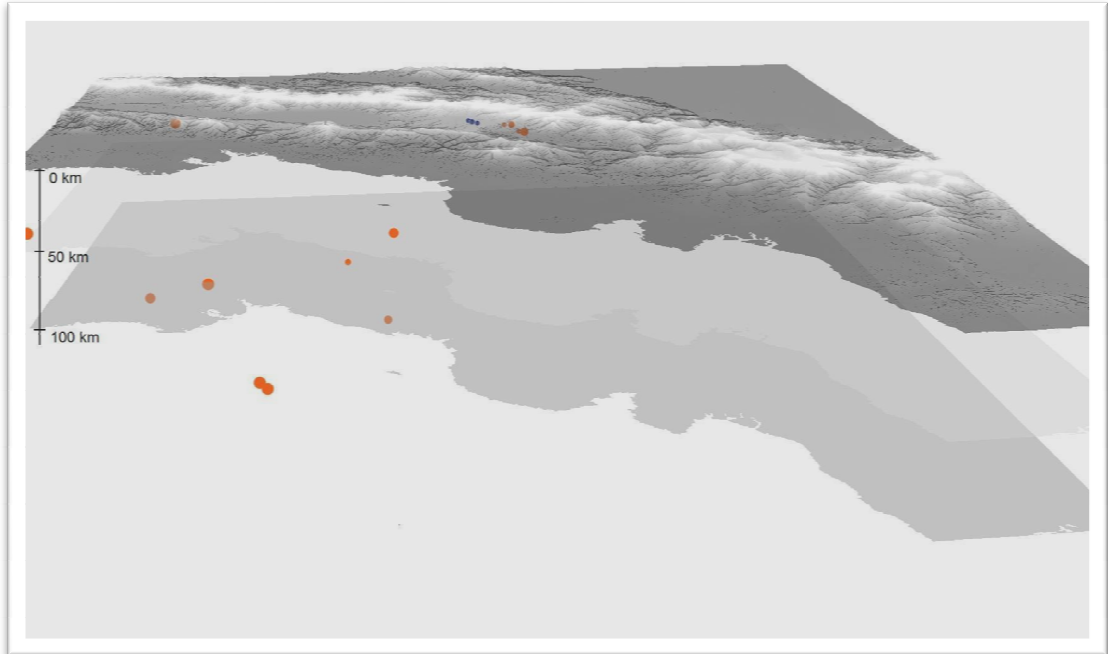


Figura 22. Mapa de la sismicidad registrada por la RNAC entre 1994 y 2010. Vista en perspectiva desde el Océano Pacífico con dos planos ubicados a diferentes profundidades. Superficie 0 km, primer plano 50 km, segundo plano 100 km. Imagen realizada con el software ArcGis versión 9.3. bajo el programa Arcmap.

CAPITULO V

VERIFICACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA LOCAL

Para comparar los espectros de diseño propuestos por la MZSP-92 con los espectros obtenidos del procesamiento de los acelerogramas que se presentan en el anexo 2. (Espectros de respuesta generados para las componentes horizontales y verticales de cada sismo), se han organizado en los numerales siguientes de acuerdo a la Tabla 9 y figura 8, las cuales relacionan las estaciones de acelerógrafos con las zonas sobre las que están ubicadas.

Tabla 8. Estación y zona de la ciudad de Popayán en la que está ubicada.

ESTACIÓN	ZONA
CPOP1	D
CPOP2	A
CPOP4	A
CPOP3	B
CPOP5	C

5.1. ESPECTROS DE RESPUESTA AGRUPADOS POR ZONA

5.1.1. Zona A

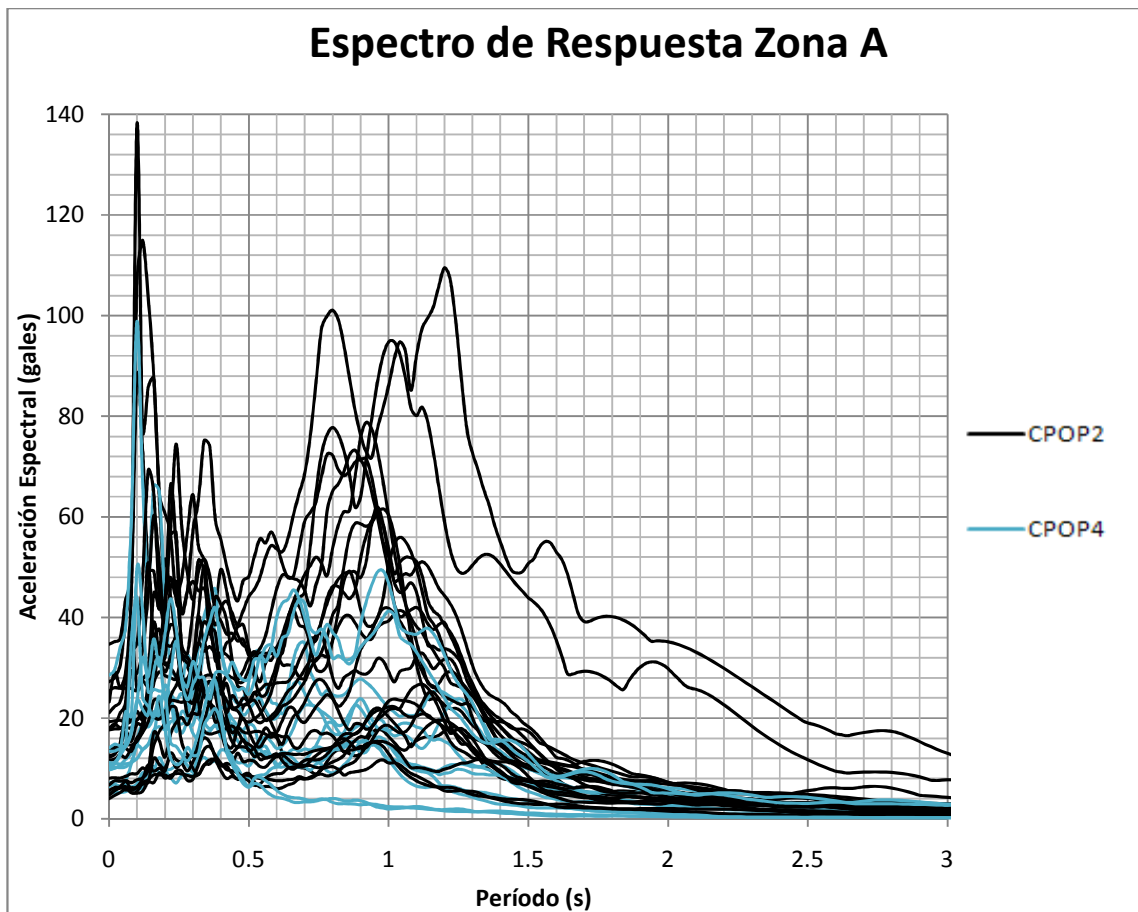


Figura 23. Espectros de Respuesta registrados por la RNAC en la Zona A, por las estaciones CPOP2 Y CPOP4, correspondientes al periodo 1994 -2010, calculados para una relación de amortiguamiento del 5%.

En esta zona se encuentran ubicadas las estaciones CPOP2 y CPOP4, observándose que esta zona es donde se tiene la mayor densidad de información sísmica registrada. La figura 23 muestra que los períodos predominantes de los registros están alrededor de (0.1 a 0.3)s y de (0.7 a 1.3)s.

5.1.2. Zona B

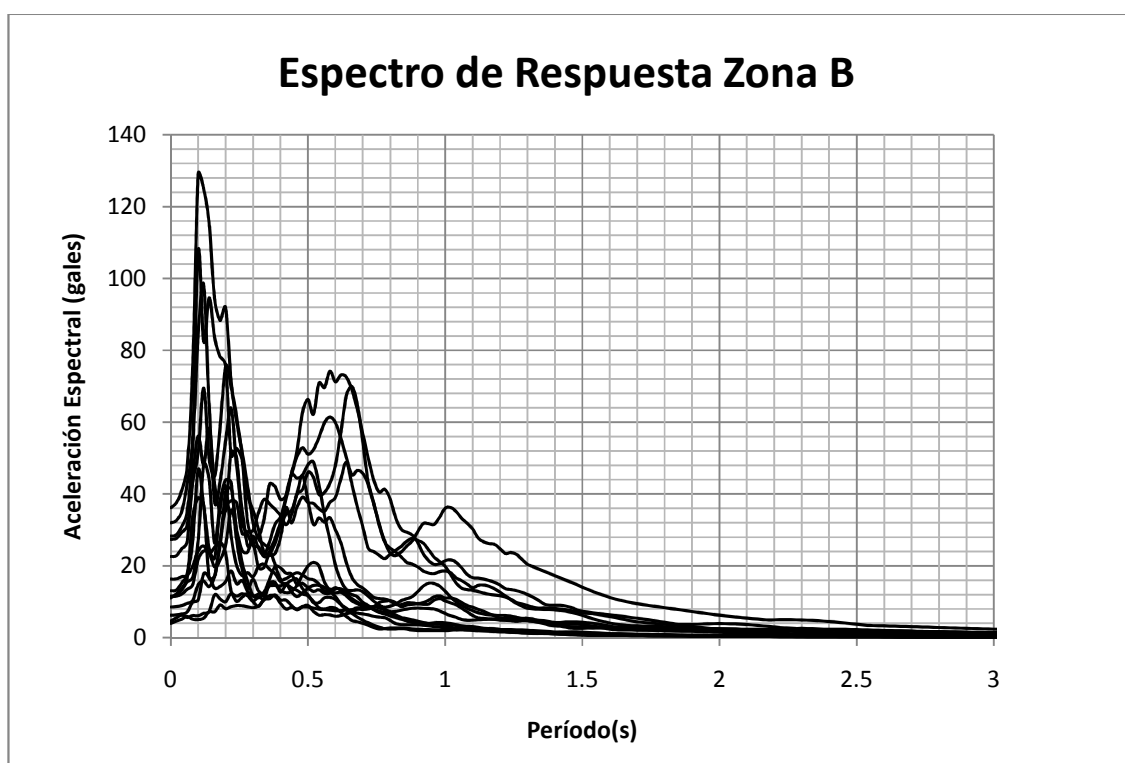


Figura 24. Espectros de Respuesta registrados por la RNAC en la Zona B, por la estación CPOP3, correspondientes al periodo 1997 -2010, calculados para una relación de amortiguamiento del 5%.

En esta zona se encuentra ubicada la estación CPOP3, observándose una buena cantidad de información sísmica registrada. La figura 24 muestra que los períodos predominantes de los registros están alrededor de (0.1 a 0.25)s y de (0.5 a 0.7)s.

5.1.3. Zona C

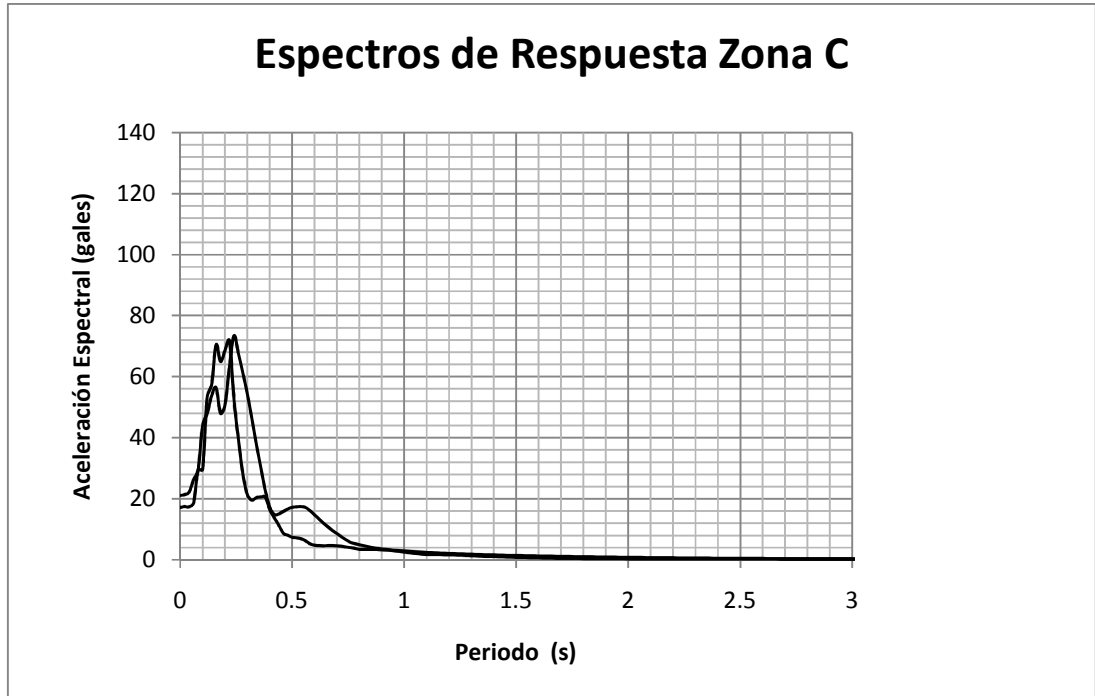


Figura 25. Espectro de Respuesta registrado por la RNAC en la Zona C, por la estación CPOP5, correspondiente al periodo 1997 -2010, calculados para una relación de amortiguamiento del 5%.

En esta zona se encuentra ubicada la estación CPOP5, observándose a la fecha una muy baja cantidad de información sísmica registrada, sin embargo en la figura 25 se aprecia un período predominante del orden de 0.2s. Es importante decir que este registro no es representativo por tratarse solamente de un sismo y por lo tanto no se pueden realizar hipótesis al respecto, para lo cual se esperara en un futuro disponer de un mayor volumen de información registrada.

5.1.4. Zona D

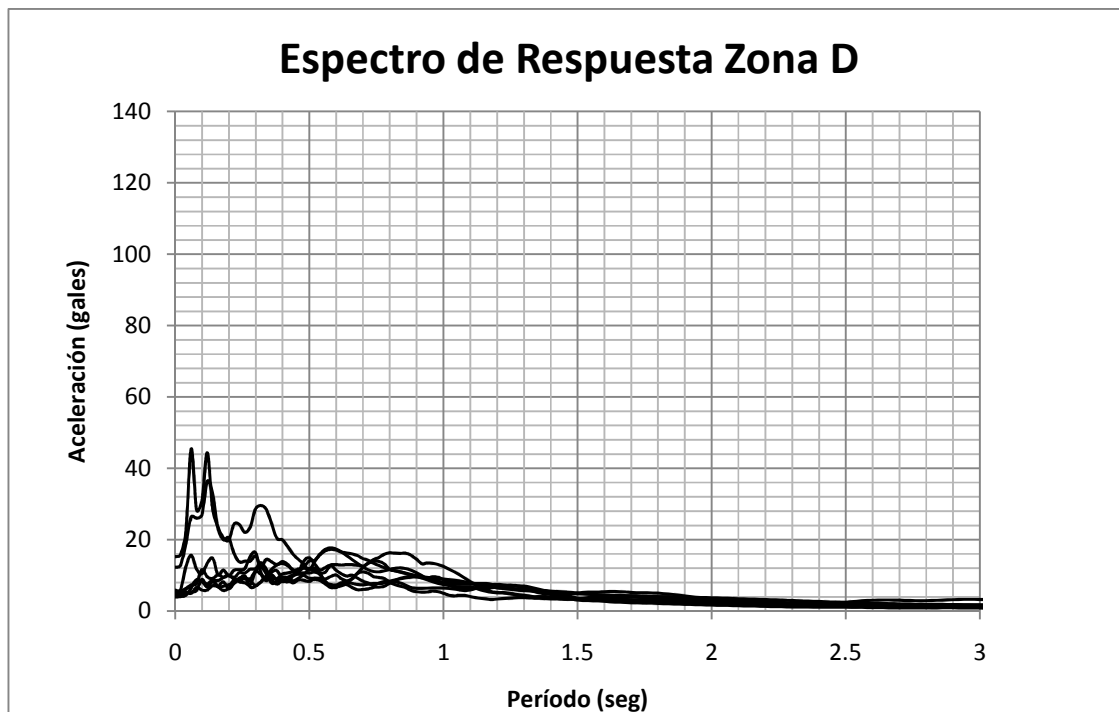


Figura 26. Espectros de Respuesta registrados por la RNAC en la Zona D, por la estación CPOP1, correspondientes al periodo 1996 -2010, calculados para una relación de amortiguamiento del 5%.

En esta zona se encuentra ubicada la estación CPOP1, observándose una aceptable cantidad de información sísmica registrada. La figura 26 muestra que los períodos predominantes de los registros, al igual que en los casos anteriores, están alrededor de (0.1 y 0.3)s.

5.2. ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS AGRUPADOS POR ESCENARIO SÍSMICO

Debido a los bajos niveles de aceleración de los sismos registrados, los espectros de respuesta obtenidos anteriormente y los espectros de diseño propuestos por la MZSP-92 fueron normalizados con respecto a la aceleración máxima del registro (A_{max}) y al coeficiente de aceleración pico esperado (A_a) respectivamente, con el fin de hacerlos comparables en forma y contenido frecuencial. Este ejercicio se realizó organizando la información en función de los escenarios sísmicos planteados en el Capítulo 4. Se analizó bajo la dirección de los asesores de la RNAC.

5.2.1. Zona A

5.2.1.1. Escenario Cortical

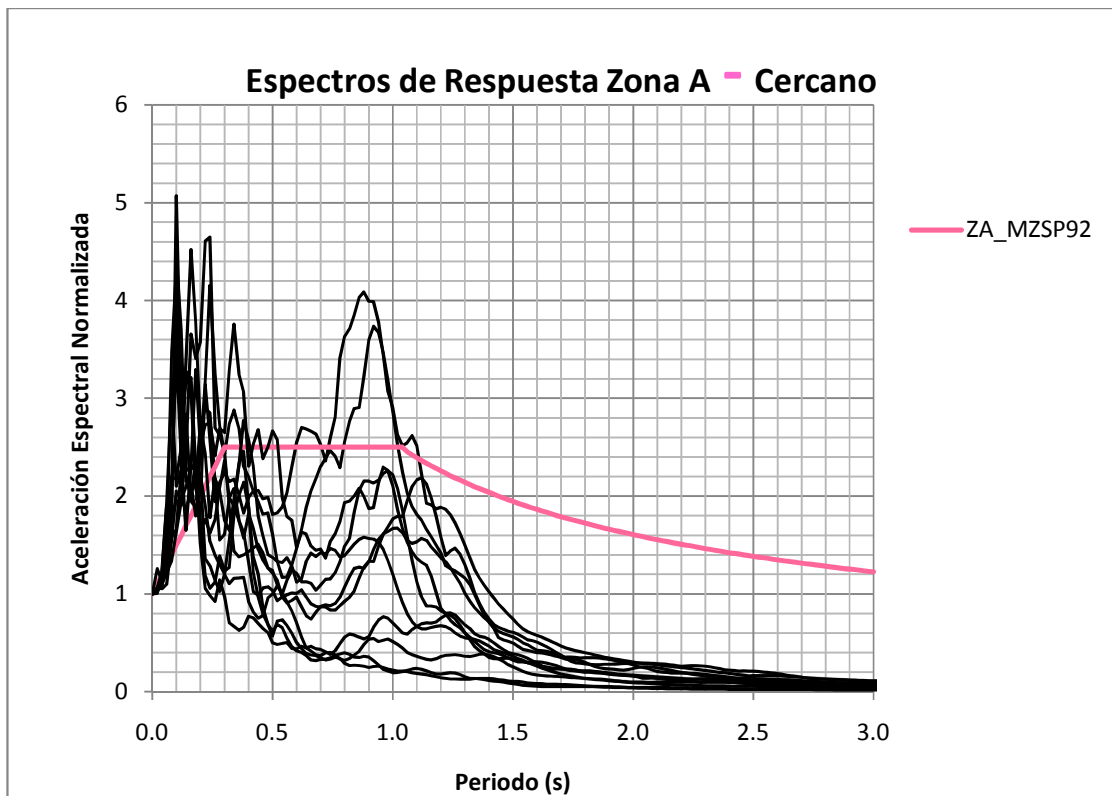


Figura 26. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondientes al escenario de fuente Cercana, registrados en la zona A. Calculados con una relación de amortiguamiento del 5 %.

Para el escenario sísmico cortical cercano se observan factores hasta de cuatro veces, concentradas por lo general hacia períodos cortos inferiores a 0.3s, las cuales no están cubiertas por el espectro de diseño propuesto por la MZSP-92 para esta zona, esta situación es de cuidado ya que coincide con los períodos de vibración de edificaciones hasta de 3 pisos de altura aproximadamente, que conforman la mayoría de construcciones asentadas en esta zona altamente poblada de la ciudad. El anterior comportamiento es típico de sismicidad asociada a fuentes cercanas. Por otro lado, se observa un buen cubrimiento del espectro de diseño hasta periodos de 1.2s.

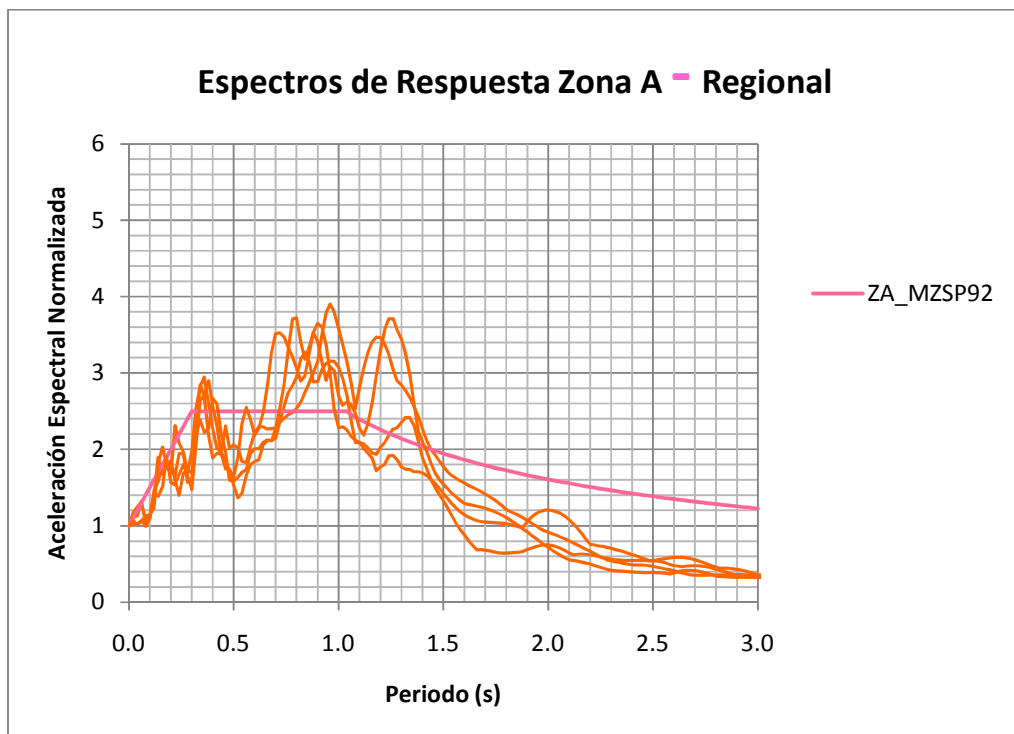


Figura 27. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondientes al escenario de fuente Regional, registrados en la zona A. Calculados con una relación de amortiguamiento del 5 %.

Para el escenario sísmico cortical regional se observan factores hasta de tres veces y media hacia períodos comprendidos entre (0.7 y 1.4)s, las cuales están aceptablemente cubiertas por el espectro de diseño propuesto por la MZSP-92 para esta zona. Además se observan menores factores en los períodos bajos, comportamiento típico de sismicidad asociada a fuentes regionales. Por último se observa un buen cubrimiento del espectro de diseño para periodos mayores a 1.5 s.

5.2.1.2. Escenario de Subducción

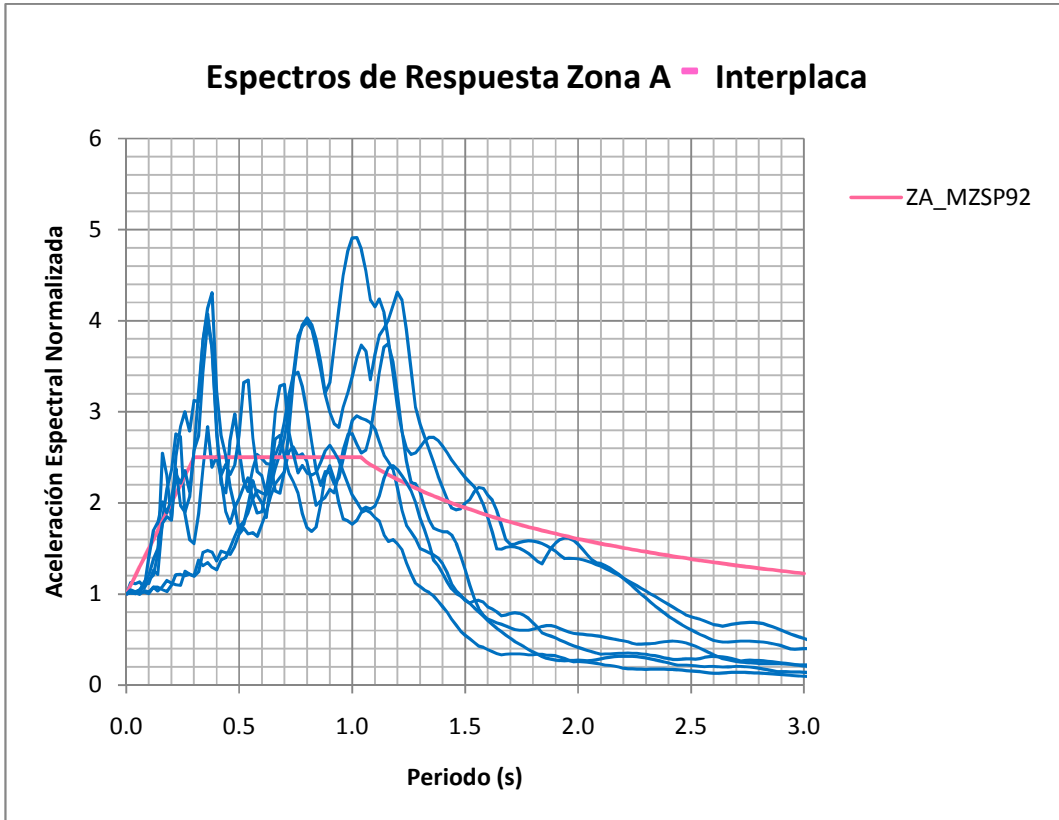


Figura 28. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondientes al escenario de fuente interplaca, registrados en la zona A. Calculados con una relación de amortiguamiento del 5 %.

Para el escenario sísmico de subducción interplaca se observan factores hasta de cuatro veces para períodos alrededor de 0.4s y entre (0.8 y 1.2)s, las cuales no son bien representadas por el espectro de diseño propuesto por la MZSP-92 para esta zona. Además, se observan menores factores en los períodos bajos y en períodos mayores a 1.5s, como era de esperarse para este tipo de sismicidad, observándose un buen cubrimiento del espectro de diseño.

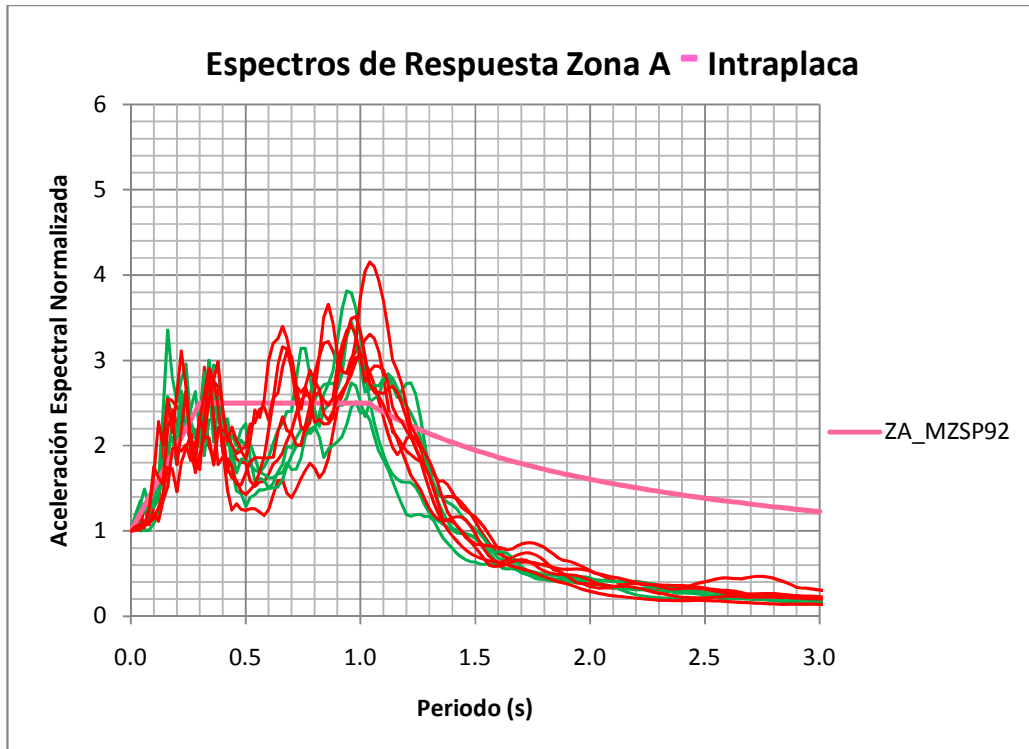


Figura 29. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondientes a los escenarios de fuente Intraplaca-Benioff Profunda (rojo) y Benioff Intermedia (verde), registrados en la zona A. Calculados con una relación de amortiguamiento del 5 %.

Para el escenario sísmico de subducción intraplaca se observan factores de hasta tres veces y media para periodos entre (0.6 y 1.2)s, así como amplificaciones del orden de dos veces y media para periodos entre (0.2 a 0.4)s, las cuales son aceptablemente representadas por el espectro de diseño propuesto por la MZSP-92 para esta zona. Por otro lado se observan menores factores para periodos mayores a 1.5s, como era de esperarse para este tipo de sismicidad.

5.2.2. Zona B

5.2.2.1. Escenario Cortical

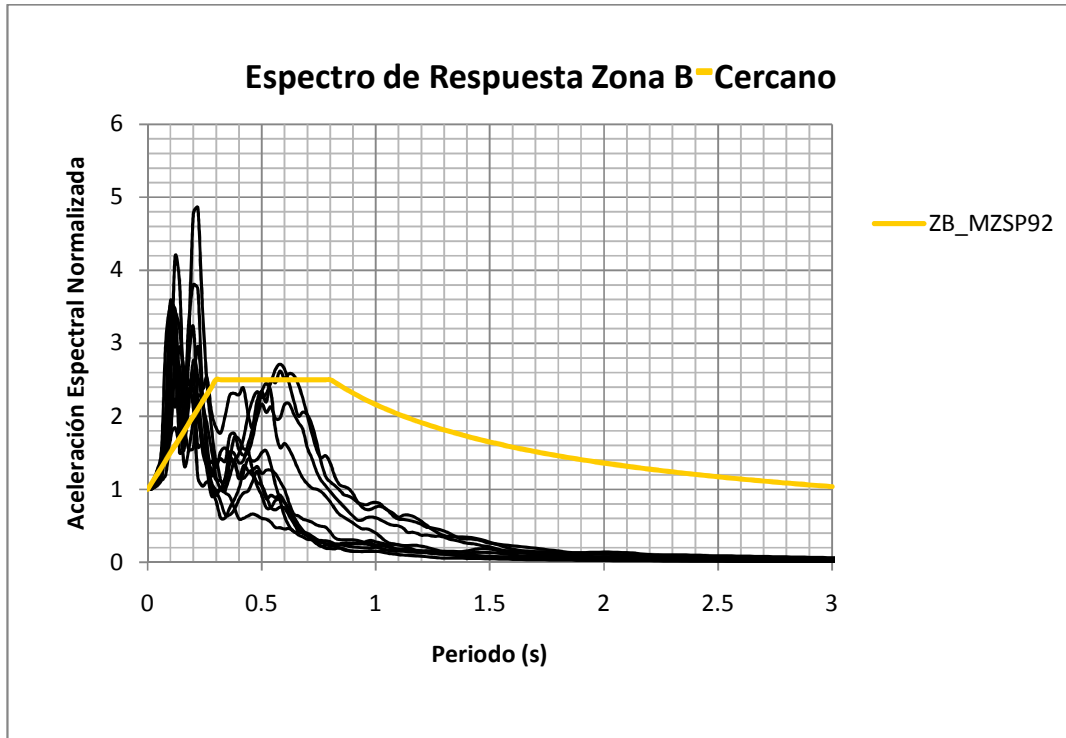


Figura 30. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondiente a los sismos de escenario de fuente Cercana, registrados en la Zona B. Calculados con una relación de amortiguamiento del 5 %.

Para el escenario sísmico cortical cercano se observan factores hasta de tres veces y media, concentradas por lo general hacia periodos cortos inferiores a 0.2s, los cuales no están cubiertos por el espectro de diseño propuesto por la MZSP-92 para esta zona, esta situación es de cuidado ya que coincide con los periodos de vibración de edificaciones hasta de 2 pisos de altura aproximadamente y por ser esta zona hacia donde se ha expandido la ciudad en la última década. Por otro lado, se observa otro período dominante hacia 0.6s con un factor de dos veces y media, el cual está bien cubierto por el espectro de diseño.

5.2.2.2. Escenario de Subducción

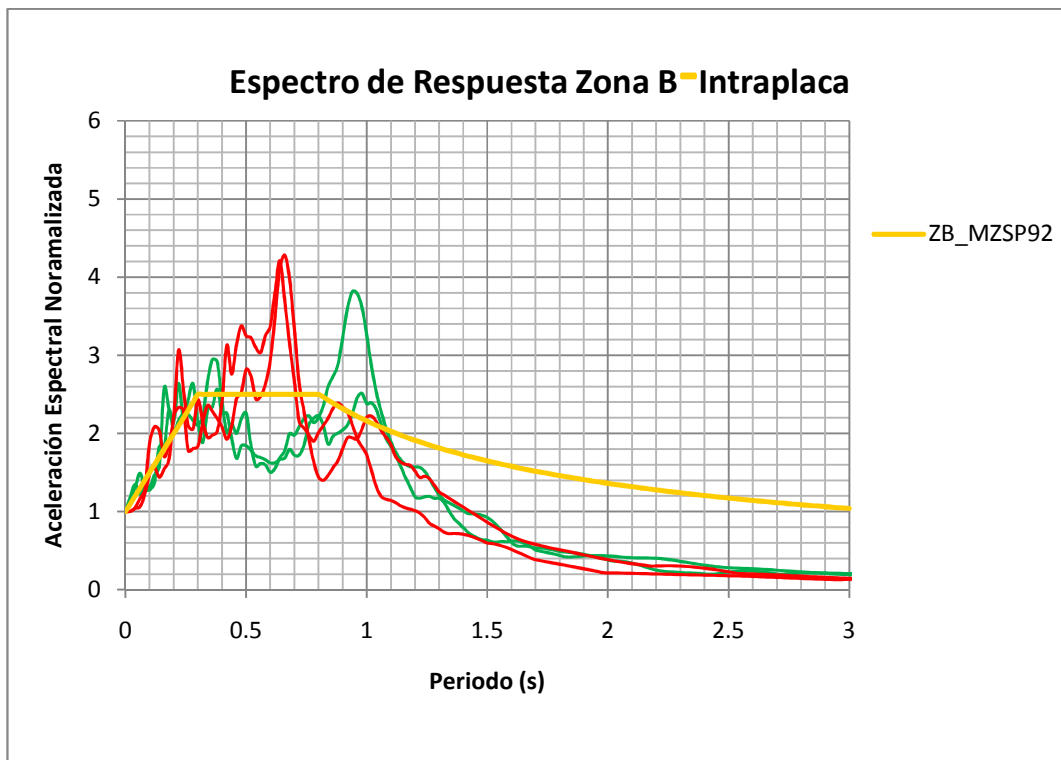


Figura 31. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondientes a los sismos de los escenarios de fuente Intraplaca: Benioff Profunda (rojo) y Benioff Intermedia (verde), registrados en la zona B. Calculados con una relación de amortiguamiento del 5 %.

Para el escenario sísmico de subducción intraplaca se observan factores hasta de tres veces para períodos entre (0.5 y 1.0)s, los cuales son bien representados por el espectro de diseño propuesto por la MZSP-92. También se observan factores del orden de 2.25 veces para períodos inferiores a 0.4 s, las cuales son aceptablemente representadas por el espectro de diseño para esta zona. Cabe anotar que se aprecian factores menores a 1 para períodos mayores a 1.5s, como era de esperarse para este tipo de sismicidad.

5.2.3. Zona D

5.2.3.1. Escenario Cortical

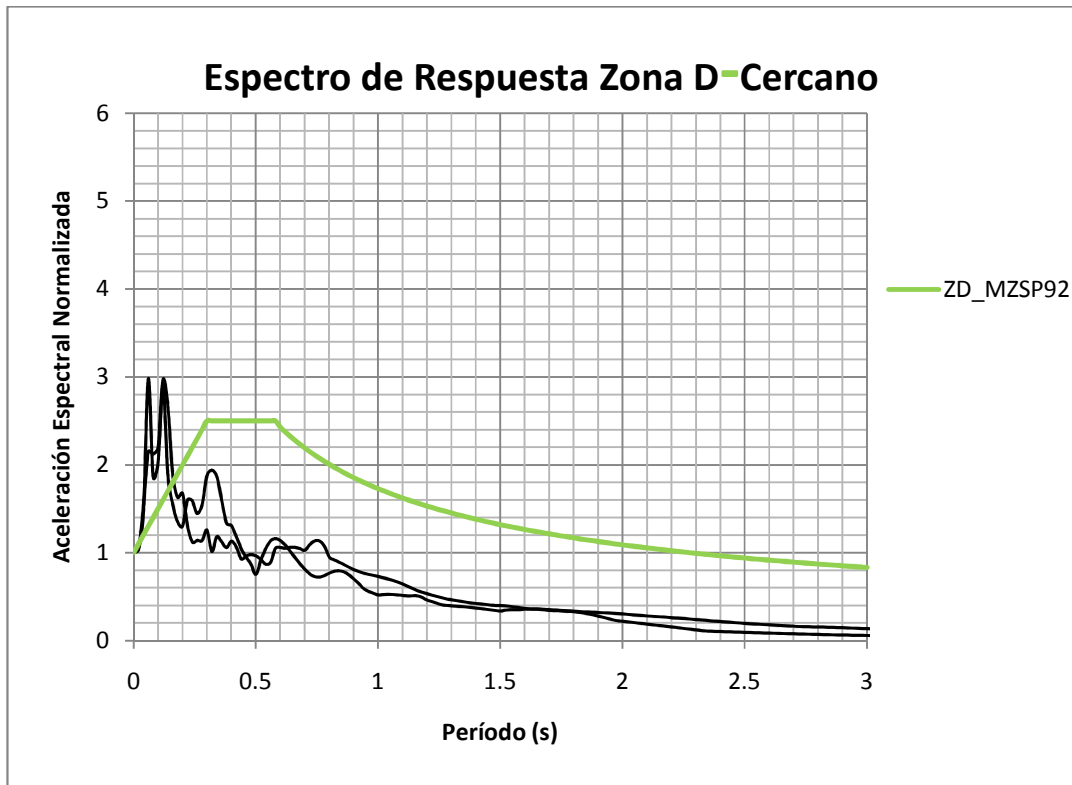


Figura 32. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondiente a los sismos de escenario de fuente Cercana, registrados en la Zona D. Calculados con una relación de amortiguamiento del 5 %.

Para el escenario sísmico cortical cercano se observan factores hasta de tres veces, concentradas hacia períodos cortos de 0.1s, las cuales no están cubiertas por el espectro de diseño propuesto por la MZSP-92 para esta zona, esta situación es de cuidado ya que en esta zona pueden presentarse efectos locales por accidentes topográficos. Para períodos mayores a 0.4s se observan factores considerablemente inferiores a las del espectro de diseño propuesto para esta zona, lo cual habrá de corroborarse cuando se disponga de mayor información sísmica.

5.2.3.2. Escenario de Subducción

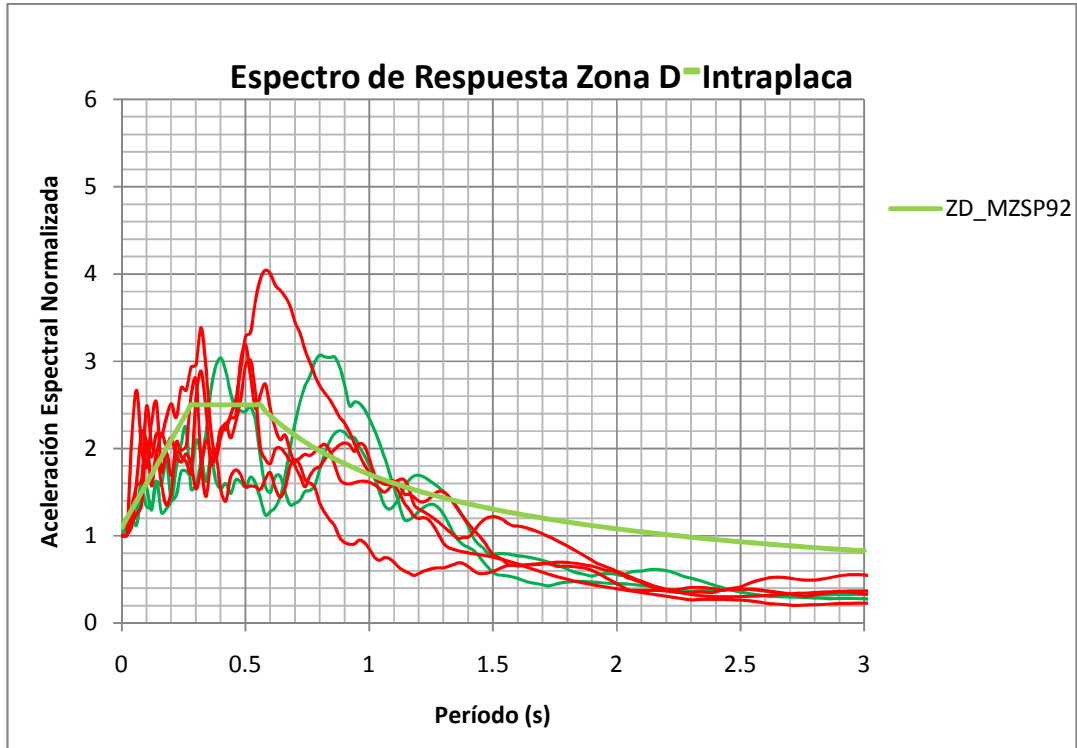


Figura 33. Espectro de Diseño Normalizado propuesto por la MZSP-92 y Espectros de Respuesta Normalizados correspondientes a los sismos de los escenarios de fuente Intraplaca-Benioff Profunda (rojo) y Benioff Intermedia (verde), registrados en la zona D. Calculados con una relación de amortiguamiento del 5 %.

Para el escenario sísmico de subducción intraplaca se observan factores hasta de tres veces para períodos entre (0.3 y 0.9)s, los cuales son aceptablemente cubiertos por el espectro de diseño propuesto por la MZSP-92. También se observan factores del orden de dos veces para períodos inferiores a 0.2s, las cuales son aceptablemente representadas por el espectro de diseño para esta zona. Igualmente se aprecian factores del orden de 1.5 para períodos comprendidos entre (1.0 y 1.5)s, bien representadas por el espectro de diseño. Cabe anotar que se aprecian factores menores a 1 para períodos mayores a 1.5s, como era de esperarse para este tipo de sismicidad.

5.3. COMPARACIÓN CON LA NORMATIVIDAD SISMO RESISTENTE COLOMBIANA

Para comparar la amenaza propuesta por la normatividad sismo resistente colombiana con los resultados obtenidos en el presente estudio, se propone agrupar los espectros de diseño del CCCSR-84 que fue el primer código de Colombia y de la NSR-10 que es la actual norma, junto con el espectro de diseño propuesto por la MZSP-92, y las respuestas espectrales correspondientes a la zona A, B y C. No se realizó espectro de diseño para la NSR-98, porque la envolvente de aceleraciones tenía comportamientos similares a las de la NSR-10.

Se construyó los espectros de diseño propuestos en CCCSR-84 y en la NSR-10, utilizando parámetros del suelo que reproduzcan las características propias de las zonas de la MZSP-92.

Para efectos de este estudio se considerara edificaciones normales con coeficiente de importancia igual a 1.

5.3.1. Zona A

5.3.1.1. Espectro de Diseño del CCCSR84 para la Zona A

En el Artículo A.2.6.1 se define la forma del espectro de diseño por medio de la siguiente fórmula:

$$S_a = \frac{1.2A_v S I}{T^{2/3}}$$

Dónde:

S_a= Máxima aceleración horizontal, expresada como un porcentaje de la gravedad, a que se ve sometido un sistema de un grado de libertad con un periodo de vibración T.

A_v= Coeficiente de aceleración correspondiente a la velocidad pico esperada.

S= Coeficiente de sitio.

I= Coeficiente de importancia.

T= Período de vibración del sistema en segundos.

El Artículo A.2.6.2. Permite limitar el valor de S_a al obtenido de la formula.

$$S_a = 2.5A_a I$$

Dónde:

A_a =Coeficiente que representa la aceleración pico esperada.

Datos:

- $A_a=0.20$
- $A_v=0.25$
- S
- Perfil tipo S3: es un perfil en donde entre la roca y la superficie hay más de 10 metros de depósitos de arcilla cuya dureza varía entre mediana y blanda, con o sin estratos intercalados de arenas u otros suelos no cohesivos.

En las perforaciones que se hicieron para el desarrollo de la MZSP, se encontró que a profundidades mayores de 30 y 50 m. había suelos de mediana dureza y que los suelos entre estas capas y la superficie eran arcillas y limos de muy baja dureza, además la zona A es considerada por la MZSP como una de las áreas más blandas, lo que lleva a pensar que el tipo de perfil de suelo es un S3.

$$S=1.5$$

Con base en los datos relacionados anteriormente, en la figura 36 se presenta el espectro de diseño para esta zona de acuerdo al CCCSR 84.

5.3.1.2. Espectro de Diseño de la NSR 10 para la Zona A. En el artículo A.2.6.1 se establece la forma del espectro elástico de aceleraciones, S_a expresada como función de la gravedad, para un coeficiente de cinco por ciento (5%) del amortiguamiento crítico, que se debe utilizar en el diseño, bajo las siguientes ecuaciones y limitaciones:

$$S_a = \frac{1.2A_v F_v I}{T}$$

Para períodos de vibración menores de T_c , el valor de S_a puede limitarse al obtenido en la siguiente ecuación.

$$T_c = 0.48 \frac{A_v F_v}{A_a F_a}$$

$$S_a = 2.5A_a F_a I$$

Para períodos de vibración menores que T_I , el valor de S_a no puede ser menor al obtenido en la siguiente ecuación:

$$T_I = 2.4 F_V$$

$$S_a = \frac{1.2 A_V F_V T_I I}{T^2}$$

Para períodos de vibración diferentes al fundamental, menores de T_0 , el valor de S_a se puede obtener con la siguiente ecuación.

$$T_0 = 0.1 \frac{A_V F_V}{A_a F_a}$$

$$S_a = 2.5 A_a F_a I \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right)$$

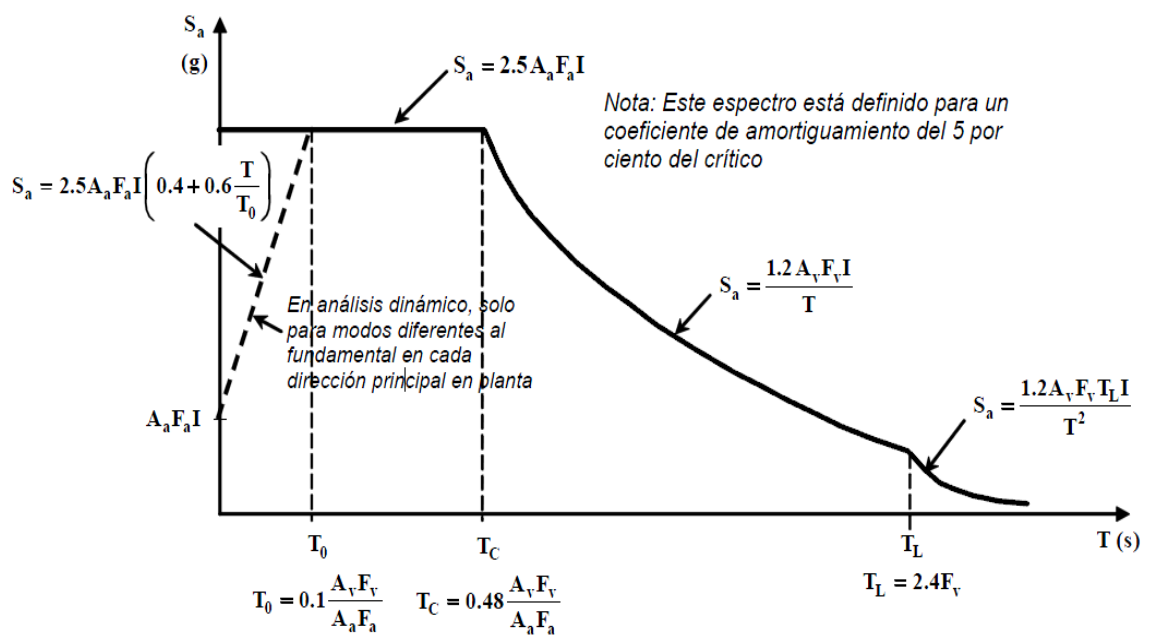


Figura A.2.6-1 — Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño como fracción de g

Figura 34. Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño propuesto por la NSR 10. Figura tomada de la NSR 10.

Datos:

- $Aa=0.25$
- $Av=0.20$
- Tipo de perfil= E
Perfil E: es un perfil cuya velocidad media de onda al cortante (\tilde{v}_s) ≤ 180 m/s y el Índice de Plasticidad (IP) > 20 .

Se escogió este tipo de perfil ya que los estudios para la realización de la MZSP, demostraron que en las perforaciones (PN2, PN3, PPN1, PPN2, PPN3, PPN-1, PN6) pertenecientes a la zona A, para profundidades inferiores a los 36 m de la superficie las velocidades medias de onda al cortante (\tilde{v}_s) son inferiores a 180m/s y los índices de plasticidad (IP) en todos los casos son mayores a 20.

- $Fa=1.45$
- $Fv=3.2$
- $To=0.177s$
- $Tc=0.847s$
- $Tl=7.68s$

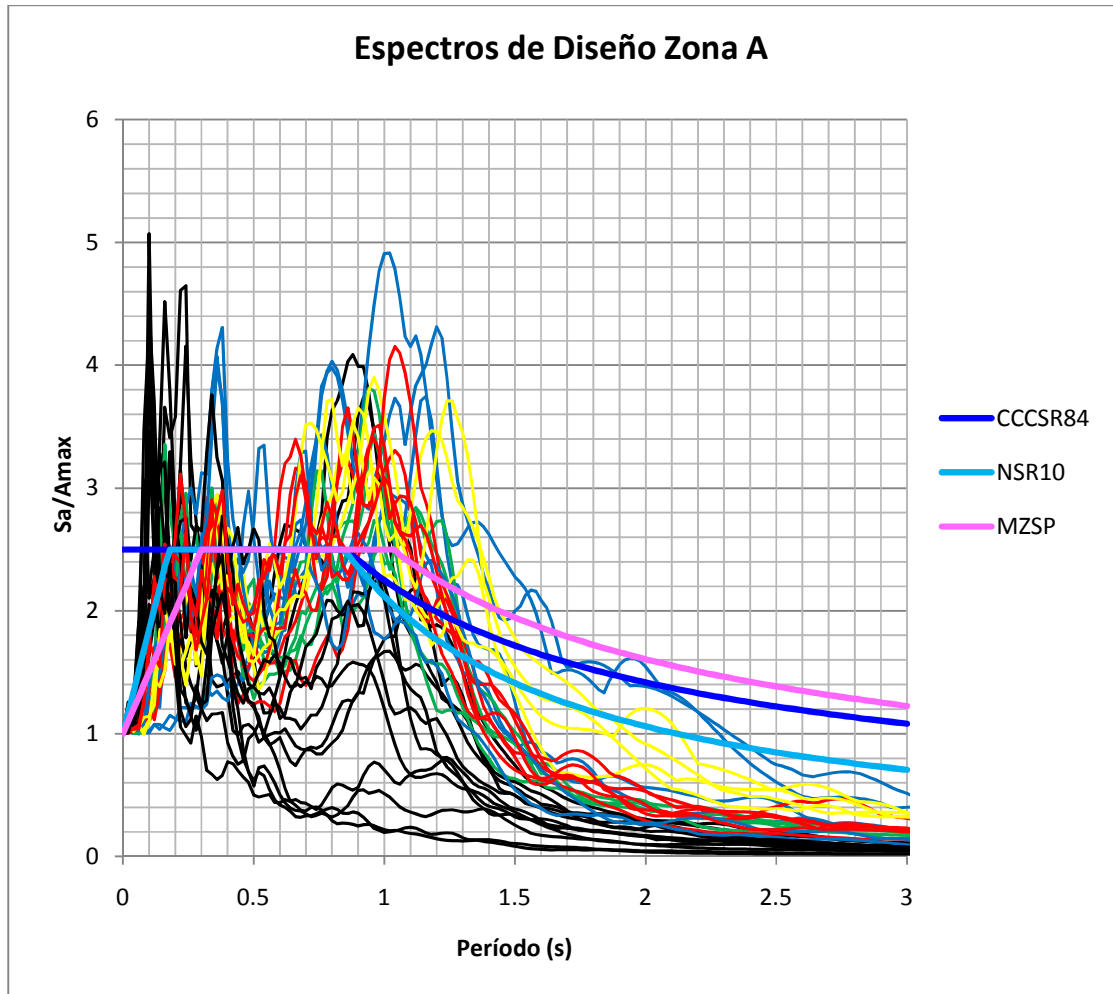


Figura 35. Espectros de respuestas de los sismos registrados por la RNAC calculados para un 5% de amortiguamiento, espectros de diseño de las normas Sismo resistentes colombianas CCCSR84 y NSR10, y Espectro de diseño propuesto por la MZSP-92 para la zona A.

En la figura 25 se observa que el Espectro de Diseño propuesto por la MZSP-92 para la zona A cubre los periodos dominantes de las respuestas espectrales entre (0.3 y 1.1)s, mientras que no abarca periodos fuera de este rango correspondientes a sismicidad asociada a fuentes cercanas con periodos predominantemente cortos menores a 0.3s, los cuales simulan aproximadamente edificaciones hasta de tres pisos, siendo estas las más comunes en esta zona de la ciudad, como tampoco cubre sismicidad asociada a fuentes corticales de tipo regional y fuentes interplaca con periodos predominantemente largos entre (1.1 y 1.3)s (edificaciones de gran altura de por lo menos 10 pisos). Por otro lado, los espectros de diseño propuestos por el CCCSR84 y la NSR10 construidos para

esta zona, cubren bien el rango de periodos cortos, mas no aquellos por encima de 0.9 seg.

5.3.2. Zona B

5.3.2.1. Espectro de Diseño del CCCSR84 para la Zona B. Similar al caso anterior, para la zona B se tienen los siguientes datos:

- $A_a=0.20$
- $A_v=0.25$
- S

En las perforaciones (PPN4, PPN6 y PN1) que se hicieron en esta zona, se encontró que a profundidades mayores de 30 y 50 m. había suelos de mediana dureza y que los suelos entre estas capas y la superficie eran arcillas y limos de muy baja dureza, lo que lleva a pensar que el tipo de perfil de suelo es un S3.

$$S_3=1.5$$

El espectro de diseño correspondiente se encuentra graficado en la figura 37.

5.3.2.2. Espectro de Diseño de la NSR 10 para la Zona B

Datos:

- $A_a=0.25$
- $A_v=0.20$
- Tipo de perfil=D

Perfil D: es un tipo de perfil de suelos rígidos en los cuales la $360 \text{ m/s} > \tilde{v}_s \geq 180 \text{ m/s}$ y la resistencia al corte no drenado (\dot{s}_u) $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \dot{s}_u \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$.

Se escogió este tipo de perfil ya que los sondeos (PPN6) realizados para la MZSP, muestran que el suelo perteneciente a esta zona es de mejor calidad que el de la zona A, con velocidades medias de onda al cortante (\tilde{v}_s) entre 247 m/s y la resistencia al corte no drenado (\dot{s}_u) en $\text{kPa} (\text{kgf/cm}^2)$ de los primeros 35 metros hacia la superficie está entre 0.94 a 1.22 kgf/cm^2

- $F_a=1.3$
- $F_v=2$
- $T_o=0.123\text{s}$
- $T_c=0.591\text{s}$
- $T_l=4.8\text{s}$

El espectro de diseño correspondiente se encuentra graficado en la figura 36.

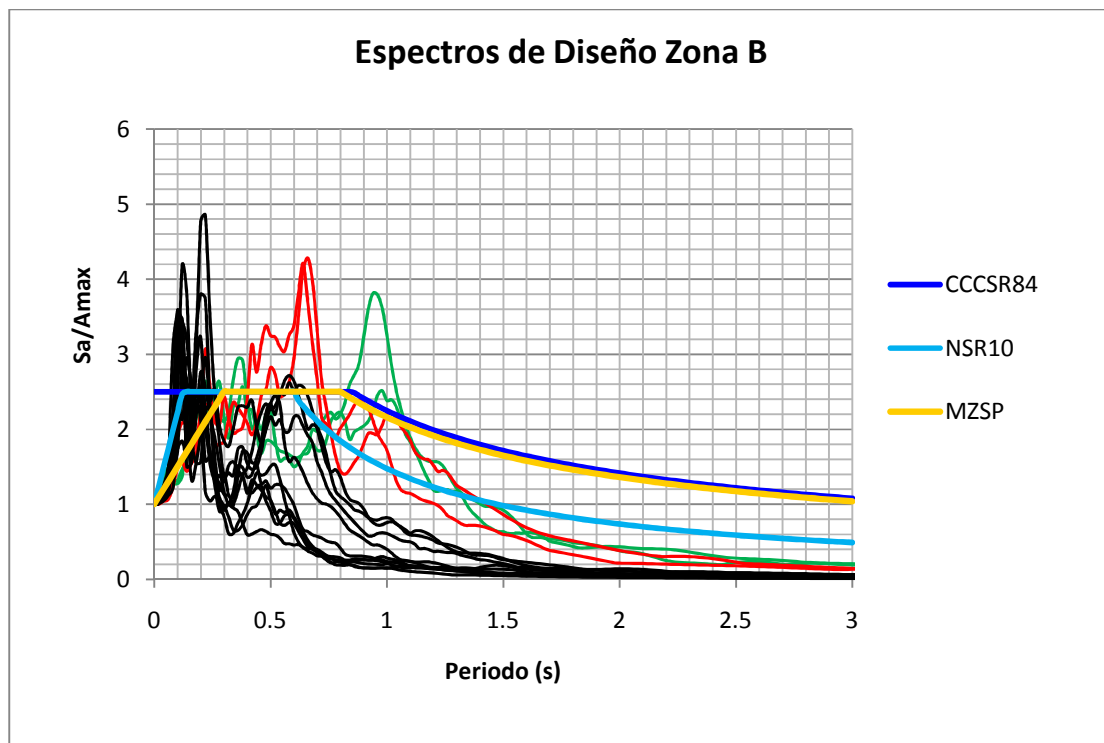


Figura 36. Espectros de respuestas de los sismos registrados por la RNAC calculados para un 5% de amortiguamiento, espectros de diseño de las normas Sismo resistentes colombianas CCCSR84 y NSR10, y Espectro de diseño propuesto por la MZSP-92 para la zona B.

Se observa que el Espectro de Diseño propuesto por la MZSP-92 para la zona B cubre los periodos dominantes de las respuestas espectrales entre (0.3 y 0.8)s, mientras que no abarca periodos fuera de este rango correspondientes a sismicidad asociada a fuentes cercanas con periodos predominantemente cortos menores a 0.3s, los cuales simulan aproximadamente edificaciones hasta de tres pisos, como tampoco sismicidad asociada a la actividad de subducción de tipo intraplaca-Benioff intermedia con periodos predominantemente largos entre (0.8 y 1.1)s (edificaciones de gran altura de por lo menos 10 pisos). En cambio, los espectros de diseño propuestos por el CCCSR-84 y la NSR-10 construidos para esta zona, se adaptan correctamente en el rango de periodos cortos, mas no lo hace así la NSR-10 para sismos de fuente de subducción de tipo intraplaca-Benioff intermedia y profunda con periodos por encima de 0.6s.

Considerando que la mayor parte de las edificaciones en la ciudad están entre 1 y 4 pisos la NSR-10, satisface aceptablemente las condiciones de diseño para estas construcciones.

5.3.3. Zona D

5.3.3.1. Espectro de Diseño del CCCSR84 para la Zona D

Datos:

- $A_a=0.20$
- $A_v=0.25$
- Perfil de Suelo: S1
 $S=1.0$
S1: perfil conformado por suelos duros con un espesor menor de 60 metros compuesto por depósitos estables de arenas, gravas o arcillas duras.

La MZSP dice que a esta zona le pertenecen las colinas y la parte sur oriental de la ciudad y que se puede encontrar suelo duro después de unas pequeñas capas de cenizas volcánicas. Para efectos del estudio proponemos que esta zona sea considerada como zona de Roca.

5.3.3.2. Espectro de Diseño de la NSR 10 para la Zona D

Datos:

Para el estudio se propone que esta zona sea considerada como zona de Roca.

- $A_a=0.25$
- $A_v=0.20$
- Tipo de perfil: B
Perfil B: es un perfil de roca de rigidez media.
- $F_a=1.0$
- $F_v=1.0$
- $T_o=0.08s$
- $T_c=0.384s$
- $T_l=2.4s$

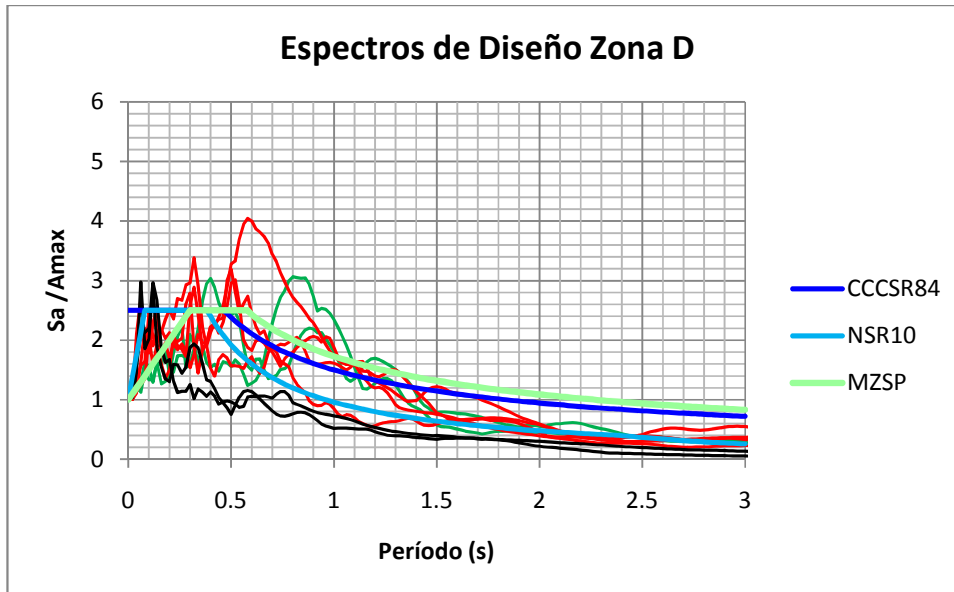


Figura 37. Espectros de respuestas de los sismos registrados por la RNAC calculados para un 5% de amortiguamiento, espectros de diseño de las normas Sismo resistentes colombianas CCCSR84 y NSR10, y Espectro de diseño propuesto por la MZSP-92 para la zona D.

Se observa que el Espectro de Diseño propuesto por la MZSP-92 para la zona D cubre los períodos dominantes de las respuestas espectrales entre (0.3 y 0.6)s, siendo este un rango muy corto que no alcanza a cubrir períodos cortos de fuentes cercanas menores a 0.3s, los cuales corresponden a edificaciones de hasta de tres pisos aproximadamente, como tampoco sismicidad asociada a la actividad de subducción de tipo intraplaca - Benioff profunda con períodos cortos entre 0.1 y 0.3seg y períodos largos entre 0.6 y 1.1 seg (edificaciones de seis hasta de once pisos aproximadamente), en los que también aporta la sismicidad de tipo Benioff - intermedia. En cambio, los espectros de diseño propuestos por el CCCSR-84 y la NSR-10 construidos para esta zona abarcan muy bien el rango de períodos cortos, más no los períodos por encima de 0.4seg.

CAPITULO VI

COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE ACELERACIÓN PROPUESTOS POR LA NSR-10 CON LOS REGISTROS DE LAS ZONAS DE POPAYAN

Teniendo los espectros de diseño de la NSR-10 y las respuestas espectrales correspondientes a cada una de las zonas de la ciudad de Popayán. Se ha realizado una evaluación por sectores para verificar el nivel de cubrimiento en el diseño de las estructuras bajas y altas. No se han tenido en cuenta las estructuras intermedias, ya que el espectro de aceleración de la NSR-10 hace un buen manejo de los períodos de vibración que corresponden a este tipo de edificaciones.

6.1. ESTRUCTURAS BAJAS

Para efectos de la comparación se consideraran edificaciones de unos y dos pisos de altura, ya que el espectro de aceleraciones propuesto por la NSR-10 para cada zona de Popayán presenta inconvenientes en la zona A y B al no cubrir aceptablemente los períodos de 0.1 y 0.2 seg que corresponden a períodos de vibración de este tipo de estructuras. Anexo 3.

6.1.1. Zona A. En la zona A el espectro de diseño de la NSR-10 no cubre los períodos menores a 0.2 seg, que corresponden con períodos de vibración de edificaciones de uno y dos pisos de altura aproximadamente. En la Tabla 9 se muestran los barrios que están en la zona A.

Tabla 9. Cubrimiento Espectro de diseño NSR-10 en los sectores de la zona A.

ESTRUCTURAS DE UNO Y DOS PISOS DE ALTURA-ZONA A	
BARRIO	ESPECTRO DE DISEÑO NSR-10
Modelo	NO CUBRE
Loma Linda	NO CUBRE
La cabaña	NO CUBRE
Santa Clara	NO CUBRE
Casas fiscales	NO CUBRE
Nueva granada (Champagnat)	NO CUBRE
La playa	NO CUBRE
Puerta del Hierro	NO CUBRE

ESTRUCTURAS DE UNO Y DOS PISOS DE ALTURA-ZONA A	
BARRIO	ESPECTRO DE DISEÑO NSR-10
Batallón José Ilario López	NO CUBRE
Belalcazar	NO CUBRE
Bloques de Pubenza	NO CUBRE
Cuartel de policía	NO CUBRE
Monte rosales	NO CUBRE
Terminal de transpotte	NO CUBRE
Aeropuerto guillermo leon valencia	NO CUBRE
Prados del norte	NO CUBRE
Bolivar	NO CUBRE
Villa olimpica	NO CUBRE
Laureles	NO CUBRE
Campamento	NO CUBRE
Antonio Nariño	NO CUBRE
Catay	NO CUBRE
Ciudad Jardín	NO CUBRE
Moravia	NO CUBRE
Torres del río	NO CUBRE
Altos del jardín	NO CUBRE
Recuerdo	NO CUBRE
Los periodistas	NO CUBRE
Rincón de la estancia	NO CUBRE
Bosques de Pomona	NO CUBRE
Rincón del rio	NO CUBRE
Pomona	NO CUBRE
Tulcán	NO CUBRE
cerro el morro	NO CUBRE
U. del Cauca-Ingeniería	NO CUBRE
H. San José	NO CUBRE
La floresta	NO CUBRE
Portón de Palacé	NO CUBRE
Portales del norte	NO CUBRE
Puracé	NO CUBRE
Sotara	NO CUBRE
Yambitara	NO CUBRE
La Virginia	NO CUBRE
Galicia	NO CUBRE
Alicante	NO CUBRE
Hacienda la Virginia	NO CUBRE

ESTRUCTURAS DE UNO Y DOS PISOS DE ALTURA-ZONA A	
BARRIO	ESPECTRO DE DISEÑO NSR-10
Urb. Guayacones	NO CUBRE
Lácteos Puracé	NO CUBRE
Vegas de prieto	NO CUBRE
Las margaritas	NO CUBRE
Aida lucia	NO CUBRE
La Ximena	NO CUBRE
Urb. Las acacias	NO CUBRE
José Antonio Galán	NO CUBRE
Urb. Ucrania	NO CUBRE
Yanaconas	NO CUBRE
Lomas de Cartagena	NO CUBRE
La pamba	NO CUBRE
Vásquez cobo	NO CUBRE
El centro	NO CUBRE
Monasterio	NO CUBRE
Parque caldas	NO CUBRE
San Camilo	NO CUBRE
El Empedrado	NO CUBRE
Sta. Inés	NO CUBRE
El Prado	NO CUBRE
Moscopan	NO CUBRE
Hernando Lola	NO CUBRE
Obrero	NO CUBRE
Bloques moscopan	NO CUBRE
Fucha	NO CUBRE
Urb. Los Portales	NO CUBRE
Urb. Villa Helena	NO CUBRE
Suizo	NO CUBRE
Berlín	NO CUBRE
Urb. Los Andes	NO CUBRE
los Sauces	NO CUBRE
Alfonzo López	NO CUBRE
Valparaíso	NO CUBRE
El limonar	NO CUBRE
los álamos	NO CUBRE
Argentina	NO CUBRE
Valencia	NO CUBRE
Achiral	NO CUBRE

ESTRUCTURAS DE UNO Y DOS PISOS DE ALTURA-ZONA A	
BARRIO	ESPECTRO DE DISEÑO NSR-10
Las americas	NO CUBRE
Colombia I etapa	NO CUBRE
San rafael	NO CUBRE
Rafael I etapa	NO CUBRE
La nueva esperanza	NO CUBRE
El pajonal	NO CUBRE
la esmeralda	NO CUBRE
Santa Teresita	NO CUBRE
Cadillal	NO CUBRE
Pandiguando	NO CUBRE
José María Obando	NO CUBRE
Libertador	NO CUBRE
Llano Largo	NO CUBRE
Santa Helena	NO CUBRE
Popular	NO CUBRE
Camilo Torres	NO CUBRE
Canadá	NO CUBRE
Junín	NO CUBRE
Ucrania	NO CUBRE

6.1.2. Zona B. El espectro de diseño de la NSR-10 para la zona B no hace un buen cubrimiento para períodos menores a 0.2 seg, correspondientes con períodos de vibración de estructuras de uno y dos pisos aproximadamente, en la Tabla 10 se muestran los barrios que están en la zona B.

Tabla 10. Cubrimiento Espectro de diseño NSR-10 en los sectores de la zona B.

ESTRUCTURAS DE UNO Y DOS PISOS DE ALTURA-ZONA B	
ZONA B	ESPECTRO DE DISEÑO NSR-10
Los Comuneros	NO CUBRE
Sindical	NO CUBRE
La Gran victoria	NO CUBRE
Nuevo País	NO CUBRE
I de mayo	NO CUBRE
Gabriel García Marques	NO CUBRE
La colina	NO CUBRE

ESTRUCTURAS DE UNO Y DOS PISOS DE ALTURA-ZONA B	
ZONA B	ESPECTRO DE DISEÑO NSR-10
El deán	NO CUBRE
La aldea	NO CUBRE
Urb. Nueva Granada	NO CUBRE
La ladera	NO CUBRE
Urb. Versailles	NO CUBRE
El retiro	NO CUBRE
Santa fe	NO CUBRE
El retiro bajo	NO CUBRE
Retiro alto	NO CUBRE
La campiña	NO CUBRE
Solidaridad	NO CUBRE
Las vegas	NO CUBRE
El mirador	NO CUBRE
31 de marzo	NO CUBRE
La libertad	NO CUBRE
Los campos	NO CUBRE
Mis barrio ranchitos	NO CUBRE
Kennedy	NO CUBRE
La sombrilla	NO CUBRE
Urb. Acueducto	NO CUBRE
Carlos I	NO CUBRE
nuevo hogar	NO CUBRE
La Isabela	NO CUBRE
San José	NO CUBRE
La Independencia	NO CUBRE
Colombia II Etapa	NO CUBRE
Nazaret	NO CUBRE
Sto. domingo sabio	NO CUBRE
Corsocial	NO CUBRE
los cedrillos	NO CUBRE
Santa Librada	NO CUBRE
San Antonio de Padua	NO CUBRE
La María	NO CUBRE
5 de abril	NO CUBRE
la capitana	NO CUBRE
Los Naranjos	NO CUBRE

6.1.3. Zona D. El espectro de diseño de la NSR-10 para la zona D hace un buen cubrimiento para períodos menores a 0.2 seg, correspondientes con períodos de vibración de estructuras de uno y dos pisos aproximadamente, en la Tabla 11 se muestran los barrios que están en la zona D.

Tabla 11. Cubrimiento Espectro de diseño NSR-10 en los sectores de la zona D.

ESTRUCTURAS DE UNO Y DOS PISOS DE ALTURA-ZONA D	
ZONA D	ESPECTRO DE ACELERACION NSR-10
Brizas de Pubenza	CUBRE
Vereda torres	CUBRE
Puelenje	CUBRE
Asentamiento Samuel Silverio	CUBRE
Los faroles	CUBRE
Vereda el salvador	CUBRE
Nuevo Japón	CUBRE
Los tejares	CUBRE
Manuela Beltrán	CUBRE
Loma de la virgen	CUBRE
Calicanto	CUBRE
Nueva Venecia	CUBRE
El Poblado	CUBRE
Plateado	CUBRE
María Oriente	CUBRE
Urb. Los Andes	CUBRE
El refugio	CUBRE
la pamba	CUBRE
Caldas	CUBRE
Cerro las tres cruces	CUBRE
Villa Alicia	CUBRE

6.2. ESTRUCTURAS ALTAS

Para realizar la comparación se consideran estructuras mayores a seis pisos de altura, puesto que a partir de períodos mayores a 0.6 seg, en la zona D el espectro de aceleración de la NSR-10, no cubre aceptablemente los períodos de vibración correspondiente a este tipo de estructuras altas. Anexo 4.

6.2.1. Zona A. En la zona A el espectro de diseño de la NSR-10 hace un buen manejo de los períodos comprendidos entre 0.6 a 0.9 seg, que corresponden con períodos de vibración de estructuras de seis a nueve pisos de altura aproximadamente. En la comparación no se han tenido en cuenta edificaciones mayores a nueve pisos por qué no son comunes en la ciudad de Popayán, en la Tabla 12 se muestran los barrios que están en la zona A.

Tabla 12. Cubrimiento Espectro de diseño NSR-10 en los sectores de la zona A.

ESTRUCTURAS MAYORES A SEIS PISOS DE ALTURA-ZONA A	
BARRIO	ESPECTRO DE DISEÑO NSR-10
Modelo	CUBRE
Loma Linda	CUBRE
La cabaña	CUBRE
Santa Clara	CUBRE
Casas fiscales	CUBRE
Nueva granada (Champagnat)	CUBRE
La playa	CUBRE
Puerta del Hierro	CUBRE
Batallón José Ilario López	CUBRE
Belalcazar	CUBRE
Bloques de Pubenza	CUBRE
Cuartel de policía	CUBRE
Monte rosales	CUBRE
Terminal de transpote	CUBRE
Aeropuerto guillermo leon valencia	CUBRE
Prados del norte	CUBRE
Bolivar	CUBRE
Villa olimpica	CUBRE
Laureles	CUBRE
Campamento	CUBRE

ESTRUCTURAS MAYORES A SEIS PISOS DE ALTURA-ZONA A	
BARRIO	ESPECTRO DE DISEÑO NSR-10
Antonio Nariño	CUBRE
Catay	CUBRE
Ciudad Jardín	CUBRE
Moravia	CUBRE
Torres del río	CUBRE
Altos del jardín	CUBRE
Recuerdo	CUBRE
Los periodistas	CUBRE
Rincón de la estancia	CUBRE
Bosques de Pomona	CUBRE
Rincón del río	CUBRE
Pomona	CUBRE
Tulcán	CUBRE
cerro el morro	CUBRE
U. del Cauca-Ingeniería	CUBRE
H. San José	CUBRE
La floresta	CUBRE
Portón de Palacé	CUBRE
Portales del norte	CUBRE
Puracé	CUBRE
Sotara	CUBRE
Yambitara	CUBRE
La Virginia	CUBRE
Galicia	CUBRE
Alicante	CUBRE
Hacienda la Virginia	CUBRE
Urb. Guayacanes	CUBRE
Lácteos Puracé	CUBRE
Vegas de prieto	CUBRE
Las margaritas	CUBRE
Aida lucia	CUBRE
La Ximena	CUBRE
Urb. Las acacias	CUBRE
José Antonio Galán	CUBRE
Urb. Ucrania	CUBRE

ESTRUCTURAS MAYORES A SEIS PISOS DE ALTURA-ZONA A	
BARRIO	ESPECTRO DE DISEÑO NSR-10
Yanaconas	CUBRE
Lomas de Cartagena	CUBRE
La pamba	CUBRE
Vásquez cobo	CUBRE
El centro	CUBRE
Monasterio	CUBRE
Parque caldas	CUBRE
San Camilo	CUBRE
El Empedrado	CUBRE
Sta. Inés	CUBRE
El Prado	CUBRE
Moscopan	CUBRE
Hernando Lola	CUBRE
Obrero	CUBRE
Bloques moscopan	CUBRE
Fucha	CUBRE
Urb. Los Portales	CUBRE
Urb. Villa Helena	CUBRE
Suizo	CUBRE
Berlín	CUBRE
Urb. Los Andes	CUBRE
los Sauces	CUBRE
Alfonzo López	CUBRE
Valparaíso	CUBRE
El limonar	CUBRE
los álamos	CUBRE
Argentina	CUBRE
Valencia	CUBRE
Achiral	CUBRE
Las americas	CUBRE
Colombia I etapa	CUBRE
San rafael	CUBRE
Rafael I etapa	CUBRE
La nueva esperanza	CUBRE
El pajonal	CUBRE

ESTRUCTURAS MAYORES A SEIS PISOS DE ALTURA-ZONA A	
BARRIO	ESPECTRO DE DISEÑO NSR-10
la esmeralda	CUBRE
Santa Teresita	CUBRE
Cadillal	CUBRE
Pandiguando	CUBRE
José María Obando	CUBRE
Libertador	CUBRE
Llano Largo	CUBRE
Santa Helena	CUBRE
Popular	CUBRE
Camilo Torres	CUBRE
Canadá	CUBRE
Junín	CUBRE
Ucrania	CUBRE

6.2.2. Zona B. En la zona B el espectro de diseño de la NSR-10 no hace un buen manejo de los períodos mayores 0.6 seg, que corresponden con períodos de vibración de estructuras de seis de altura aproximadamente, en la Tabla 13 se muestran los barrios que están en la zona B.

Tabla 13. Cubrimiento Espectro de diseño NSR-10 en los sectores de la zona B.

ESTRUCTURAS MAYORES A SEIS PISOS DE ALTURA-ZONA B	
ZONA B	ESPECTRO DE DISEÑO NSR-10
Los Comuneros	NO CUBRE
Sindical	NO CUBRE
La Gran victoria	NO CUBRE
Nuevo País	NO CUBRE
I de mayo	NO CUBRE
Gabriel García Marques	NO CUBRE
La colina	NO CUBRE
El deán	NO CUBRE
La aldea	NO CUBRE
Urb. Nueva Granada	NO CUBRE
La ladera	NO CUBRE
Urb. Versalles	NO CUBRE

ESTRUCTURAS MAYORES A SEIS PISOS DE ALTURA-ZONA B	
ZONA B	ESPECTRO DE DISEÑO NSR-10
El retiro	NO CUBRE
Santa fe	NO CUBRE
El retiro bajo	NO CUBRE
Retiro alto	NO CUBRE
La campiña	NO CUBRE
Solidaridad	NO CUBRE
Las vegas	NO CUBRE
El mirador	NO CUBRE
31 de marzo	NO CUBRE
La libertad	NO CUBRE
Los campos	NO CUBRE
Mis barrio ranchitos	NO CUBRE
Kennedy	NO CUBRE
La sombrilla	NO CUBRE
Urb. Acueducto	NO CUBRE
Carlos I	NO CUBRE
nuevo hogar	NO CUBRE
La Isabela	NO CUBRE
San José	NO CUBRE
La Independencia	NO CUBRE
Colombia II Etapa	NO CUBRE
Nazaret	NO CUBRE
Sto. domingo sabio	NO CUBRE
Corsocial	NO CUBRE
los cedrillos	NO CUBRE
Santa Librada	NO CUBRE
San Antonio de Padua	NO CUBRE
La María	NO CUBRE
5 de abril	NO CUBRE
la capitana	NO CUBRE
Los Naranjos	NO CUBRE

6.2.3. Zona D. En la zona D el espectro de diseño de la NSR-10 no hace un buen manejo de los períodos mayores 0.4 seg, que corresponden con períodos de vibración de estructuras de cuatro pisos de altura aproximadamente, en la Tabla 14 se muestran los barrios que están en la zona B.

Tabla 14. Cubrimiento Espectro de diseño NSR-10 en los sectores de la zona D.

ESTRUCTURAS MAYORES A CUATRO PISOS DE ALTURA-ZONA D	
ZONA D	ESPECTRO DE ACELERACION NSR-10
Brizas de Pubenza	NO CUBRE
Vereda torres	NO CUBRE
Puelenje	NO CUBRE
Asentamiento Samuel Silverio	NO CUBRE
Los faroles	NO CUBRE
Vereda el salvador	NO CUBRE
Nuevo Japón	NO CUBRE
Los tejares	NO CUBRE
Manuela Beltrán	NO CUBRE
Loma de la virgen	NO CUBRE
Calicanto	NO CUBRE
Nueva Venecia	NO CUBRE
El Poblado	NO CUBRE
Plateado	NO CUBRE
María Oriente	NO CUBRE
Urb. Los Andes	NO CUBRE
El refugio	NO CUBRE
la pamba	NO CUBRE
Caldas	NO CUBRE
Cerro las tres cruces	NO CUBRE
Villa Alicia	NO CUBRE

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Considerando el presente estudio, por zonas se puede concluir que:

Zona A

- Se registraron eventos en todos los escenarios sísmicos considerados, aunque con mayor periodicidad se evidenciaron sismos asociados a la actividad cortical de tipo cercano, los períodos predominantes en la zona A son los debidos a este tipo de fuente y van desde 0.1 a 0.3 seg, en cuanto a períodos cortos, los cuales no son bien cubiertos por el espectro de diseño propuesto por la MZSP y los altos períodos son los debidos a fuentes de tipo cortical-regional y de subducción-intraplaca e interplaca (Benioff profunda, Bebioff intermedia) que están alrededor de 1 seg, de los cuales el espectro de diseño de la MZSP-92 hace buen manejo.
- Del análisis de los eventos sísmicos correspondientes a la zona A, se pudo evidenciar que a esta zona la componen suelos geológicamente muy parecidos, puesto que las respuestas espectrales de los sismos registrados por las estaciones CPOP2 y CPOP4 tienen la misma forma espectral.

Zona B

- Se observó registro de eventos de fuentes asociadas a la actividad cortical-cercana y de subducción-intraplaca (Benioff profunda, Bebioff intermedia), nuevamente se evidenciaron sismos de tipo cercano predominantemente con bajos períodos comprendidos entre 0.1 y 0.2seg, que no son bien cubiertos por el espectro de diseño propuesto por la MZSP. Los sismos de subducción-intraplaca e interplaca, aportan los altos períodos menores a 1 seg, los cuales son abarcados por la forma del el espectro de diseño de la MZSP, estos sismos también generaron bajos periodos inferiores a 0.4 seg, de los cuales el espectro de diseño de la MZSP hace un cubrimiento parcial.

Zona C

- En esta zona se encuentra la estación CPOP5 ubicada en el instituto de educación secundaria Gabriela Mistral, observándose que durante 13 años de funcionamiento del equipo ha registrado un sismo, este registro no resulta representativo por tratarse de un solo evento por lo tanto no se

pueden realizar hipótesis al respecto, por lo cual se esperara disponer de un mayor volumen de información registrada.

Zona D

- Se observó el registro de eventos de fuentes asociadas a la actividad cortical-cercana y de subducción-intraplca (Benioff profunda, Bebioff intermedia), solamente se encontró un sismo asociado a la actividad cortical de tipo cercano, con periodos predominantes bajos que van desde 0.1 a 0.2seg que no son bien abarcados por el espectro propuesto por la MZSP. Por otro lado en esta zona en particular, los períodos altos de los sismos de subducción no son bien manejados por el espectro de diseño de la MZSP.

Del trabajo realizado en el presente estudio, por escenario sísmico se puede concluir que:

Fuentes asociadas a la actividad cortical.

- Cercana o local
Los eventos sísmicos de fuentes cercanas asociados a la actividad cortical, tuvieron dos respuestas dominantes en el comportamiento del suelo en la zona A y B, una para períodos cortos y otra para períodos largos, en la zona A los periodos cortos van de 0.1 a 0.3 seg y en la zona B van de 0.1 seg a 0.2 seg, los períodos largos en la zona A van de 0.6 a 1.1 seg, en la zona B van de 0.5 a 0.7 seg, en la zona D considerada de roca no es evidente este mismo comportamiento, ya que solo se notó una respuesta en los bajos períodos. En definitiva para ninguna de las zonas analizadas el espectro de diseño propuesto por la MZSP cubre el rango de los períodos cortos, lo que vuelve la situación de cuidado puesto que corresponden con los períodos de vibración de edificaciones de uno a tres pisos de altura aproximadamente, típicas en la zonas A y B, que es donde se ha concentrado y se está concentrando la mayor población de la ciudad de Popayán. Con los largos períodos el espectro de diseño propuesto por la MZSP no presenta problemas en ninguna zona de las estudiadas, aunque estos períodos corresponden a edificaciones altas mayores a seis pisos, que son poco comunes en la ciudad.
- Regional
Únicamente en la zona A se registraron eventos de este tipo de fuente, con factores de hasta tres veces y media hacia períodos comprendidos entre 0.7 y 1.4 seg, los cuales están aceptablemente cubiertos por el espectro de diseño propuesto por la MZSP para esta zona

Fuentes asociadas a la actividad de subducción.

- Interplaca
Solamente en la zona A se registraron sismos de este tipo de fuente, con factores de hasta de cuatro veces para períodos alrededor de 0.4 seg y entre 0.8 y 1.2 seg, el espectro de diseño propuesto por la MZSP para esta zona no alcanza a cubrir los períodos cortos y tampoco lo hace con los largos períodos.
- Intraplaca-Benioff intermedia y Benioff Profunda.
Los eventos de tipo Benioff intermedia y Benioff profunda se agruparon en la misma grafica porque mostraron comportamientos similares en la respuesta espectral, así mismo para las tres en las que se registró este tipo de sismicidad el espectro de diseño de la MZSP cubre de manera aceptable el rango de los cortos y largos períodos.

Recomendaciones

- En general los espectros de diseño propuestos en el estudio de MZSP, no cubren satisfactoriamente las respuestas espectrales de la mayor parte de sismos registrados en la ciudad de Popayán. Las construcciones que no están cubiertas por el espectro de diseño son las más comunes en la ciudad actual y una de las zonas (zona B) que no presenta un buen manejo es hacia donde la ciudad se está expandiendo de manera considerable. Por lo que se recomienda hacer una actualización de la MZSP.
- Se debe mejorar el sistema de registro en el Instituto Gabriela Mistral o considerar la posibilidad de reubicar la estación CPOP5, ya que a la fecha se ha registrado una muy baja cantidad de eventos sísmicos, de los cuales no se pueden realizar hipótesis. Según el estudio de MZSP esta zona corresponde al lecho del río Cauca y en ella se encontraron aceleraciones espectrales elevadas, por lo anterior esta zona es de especial cuidado en la que se espera disponer de un mayor volumen de información.
- El espectro de diseño de la NSR-10 no cubre de manera aceptable las aceleraciones espectrales de los bajos períodos en la zona A y B, y tampoco lo hace con los altos períodos en la zona B y D. El espectro de diseño del CCCSR-84 abarca todos los bajos períodos registrados en las cuatro zonas, pero tampoco cubre los períodos altos que corresponden a edificios seis pisos en adelante. Una buena opción para el diseño de construcciones bajas, sería utilizar la forma del espectro de diseño CCCSR-84 y para el manejo de las construcciones altas se debería utilizar la forma del espectro de diseño de la MZSP.

- La norma sismo resistente actual de Colombia NSR-10, no se adapta a las condiciones del suelo en mayoría de sectores de la ciudad de Popayán, por lo que el diseño de estas estructuras se ve afectado y la respuesta de éstas frente a la ocurrencia de un sismo no va a ser la esperada. Es indispensable considerar las particularidades de los suelos de la ciudad mediante la actualización de la MZSP.

ANEXOS

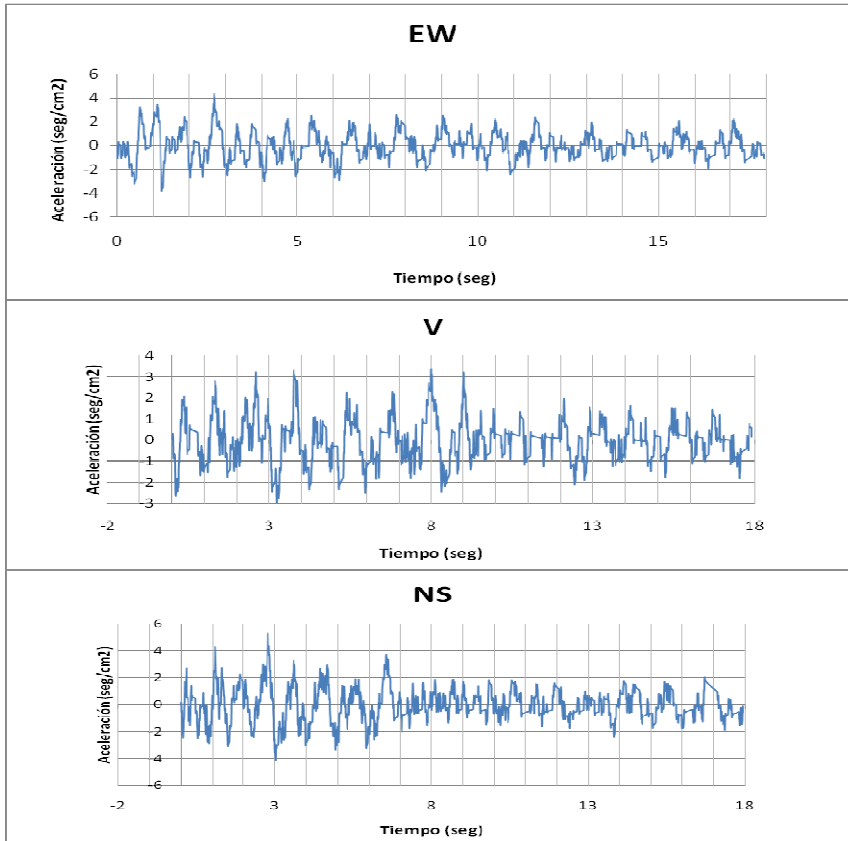
ANEXO 2.

INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS

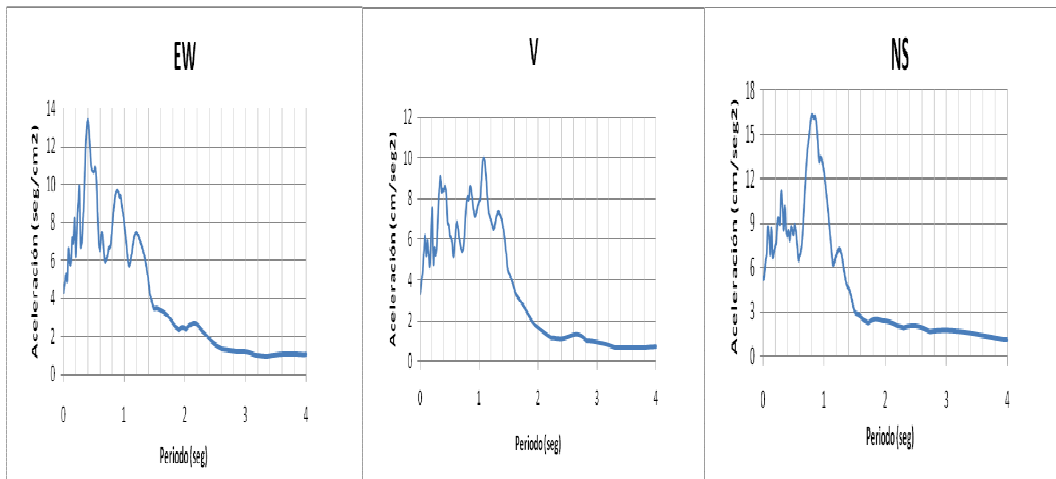
Estación de Popayán, ROBLES (CPOP1) Geología: Roca, Topografía: Ondulada

SISMO DE CALIMA (VALLE) 08/FEB/95 ML=6.6

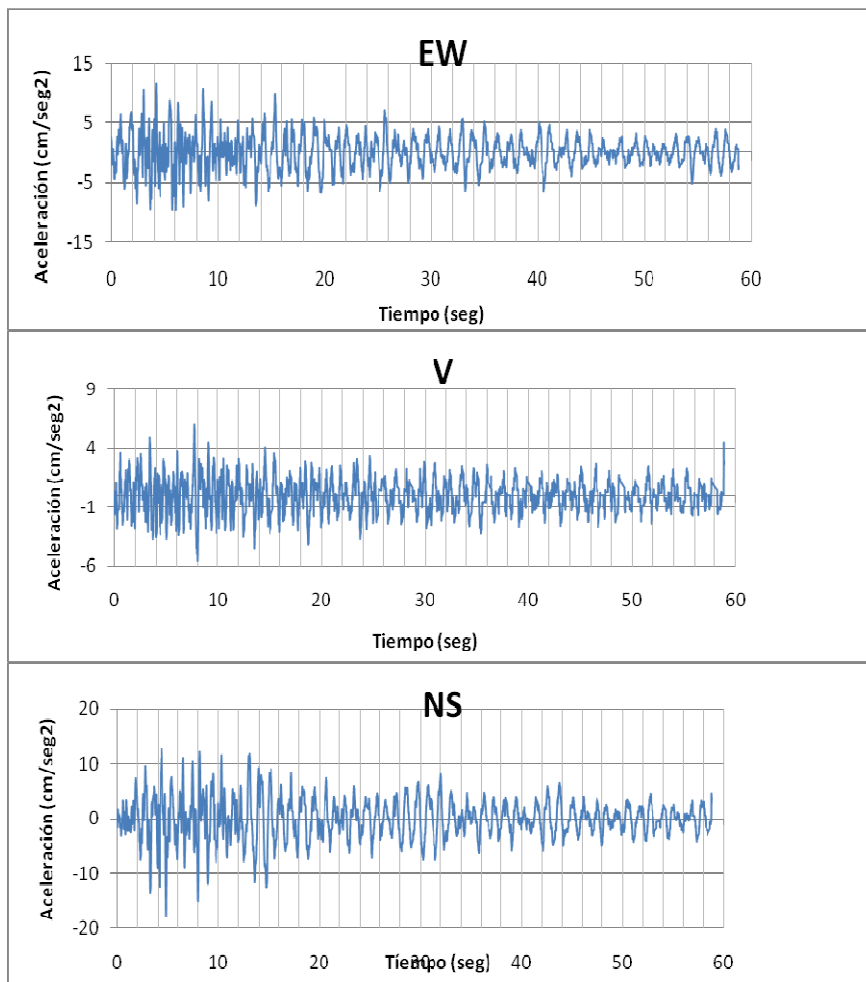
Epic. 4.13N -76.74W Prof. 102 Km. Dist. 214.08 Km



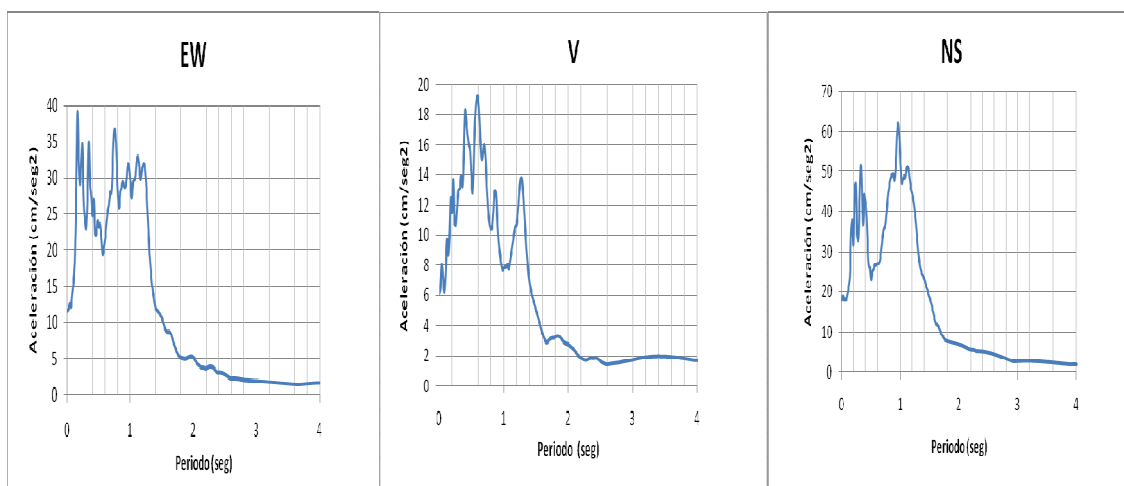
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



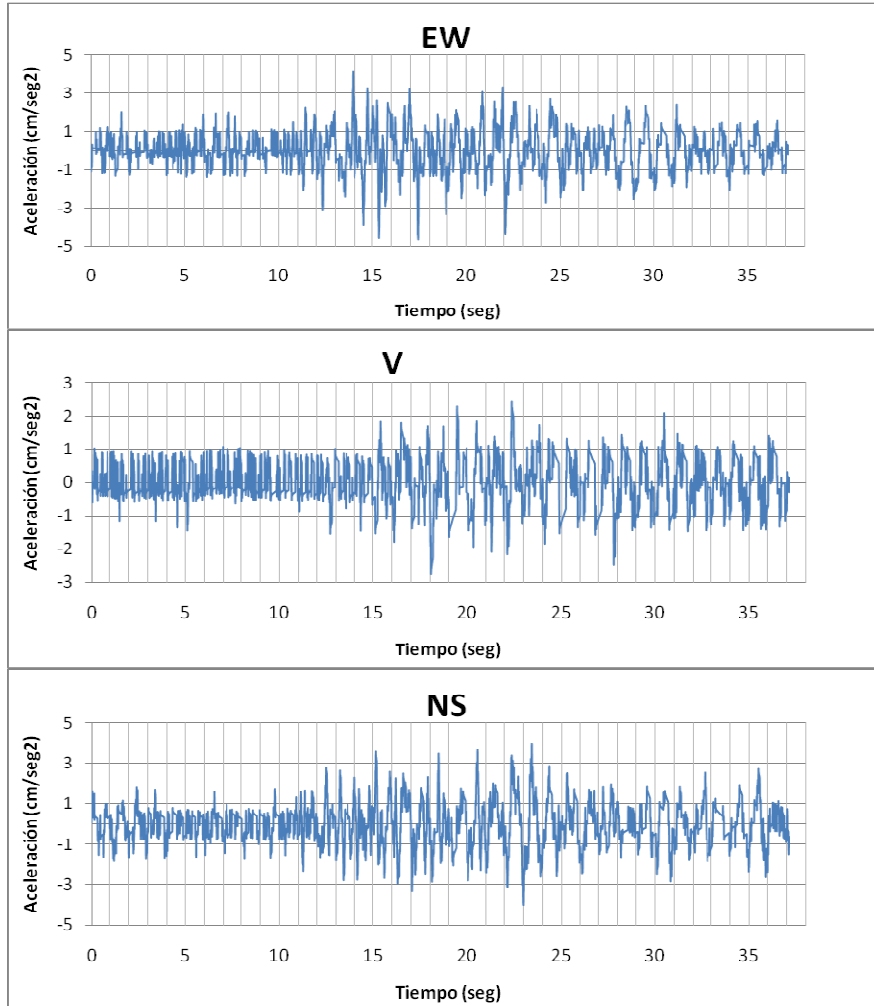
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, INVÍAS (CPOP2) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE CALIMA (VALLE) 08/FEB/95 ML=6.6
 Epic. 4.13N -76.74W Prof. 102 Km. Dist. 211.46 Km



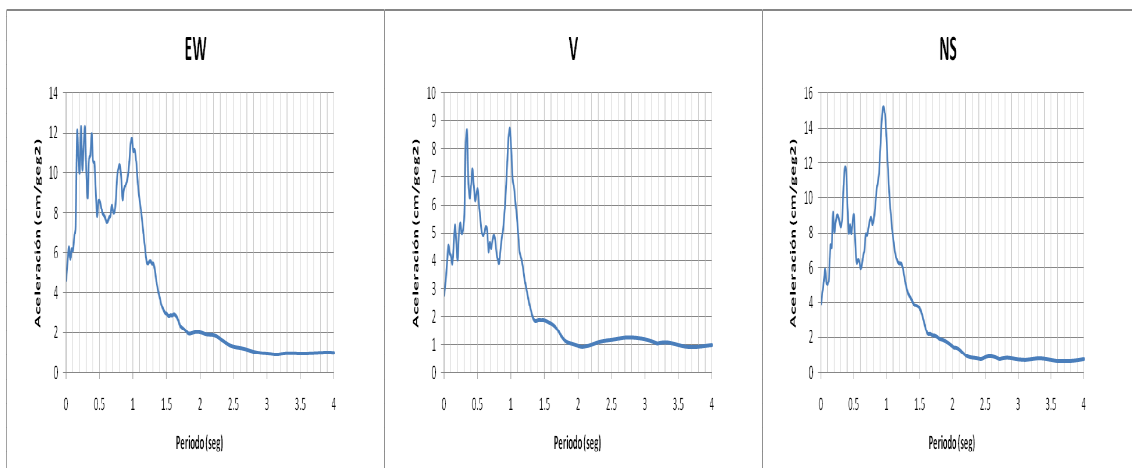
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



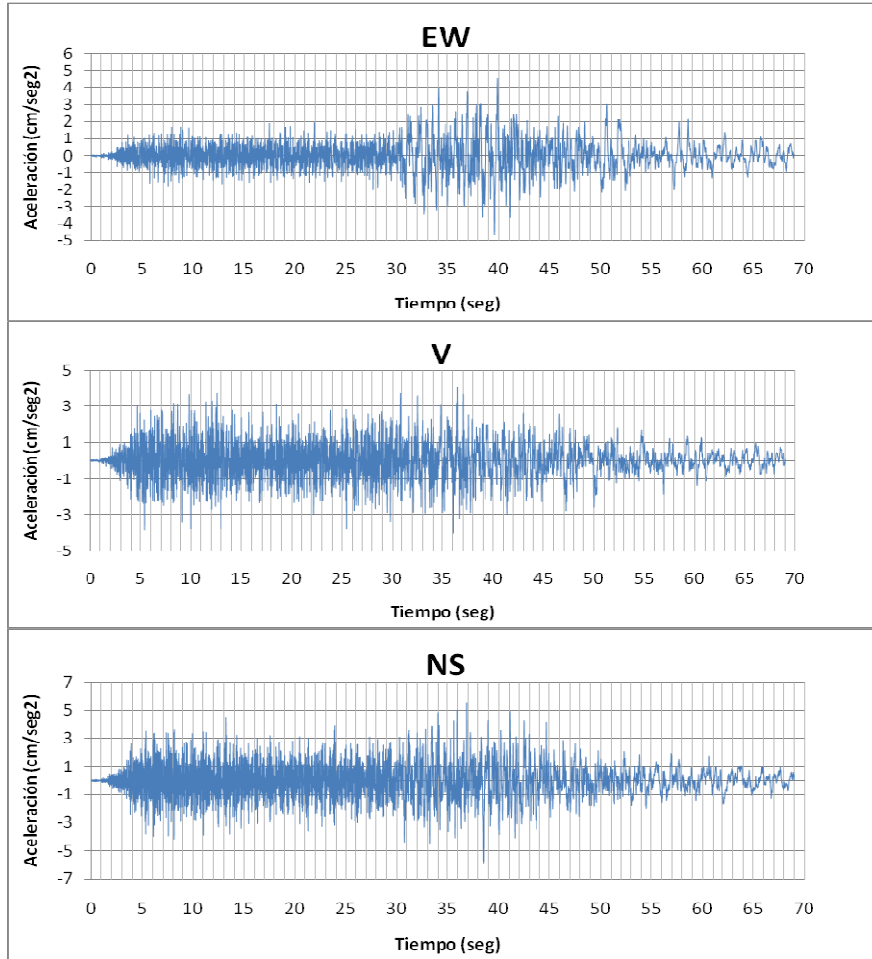
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, INVÍAS (CPOP2) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE SIPÍ (CHOCÓ) 19/FEB/97 ML=6.1
 Epic. 4.54N -76.52W Prof. 120 Km. Dist 264 Km



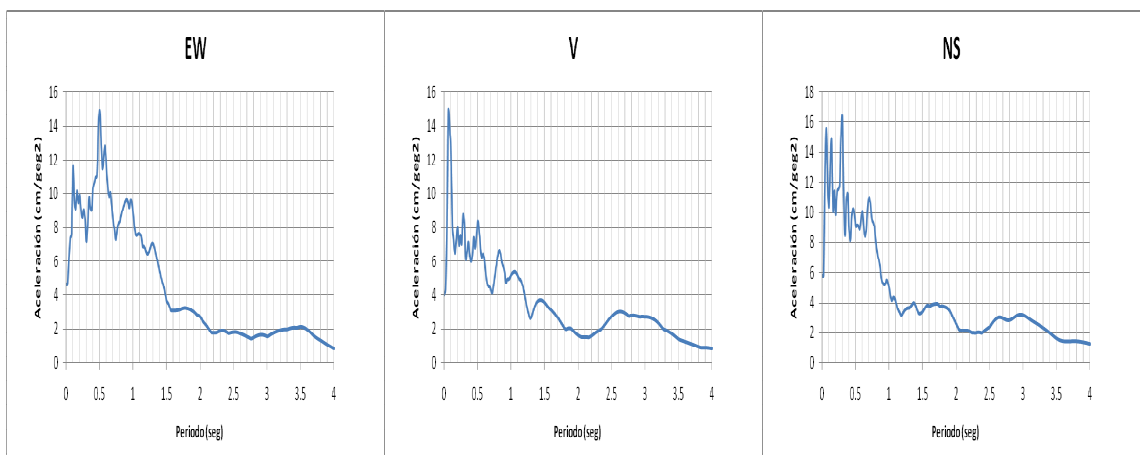
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



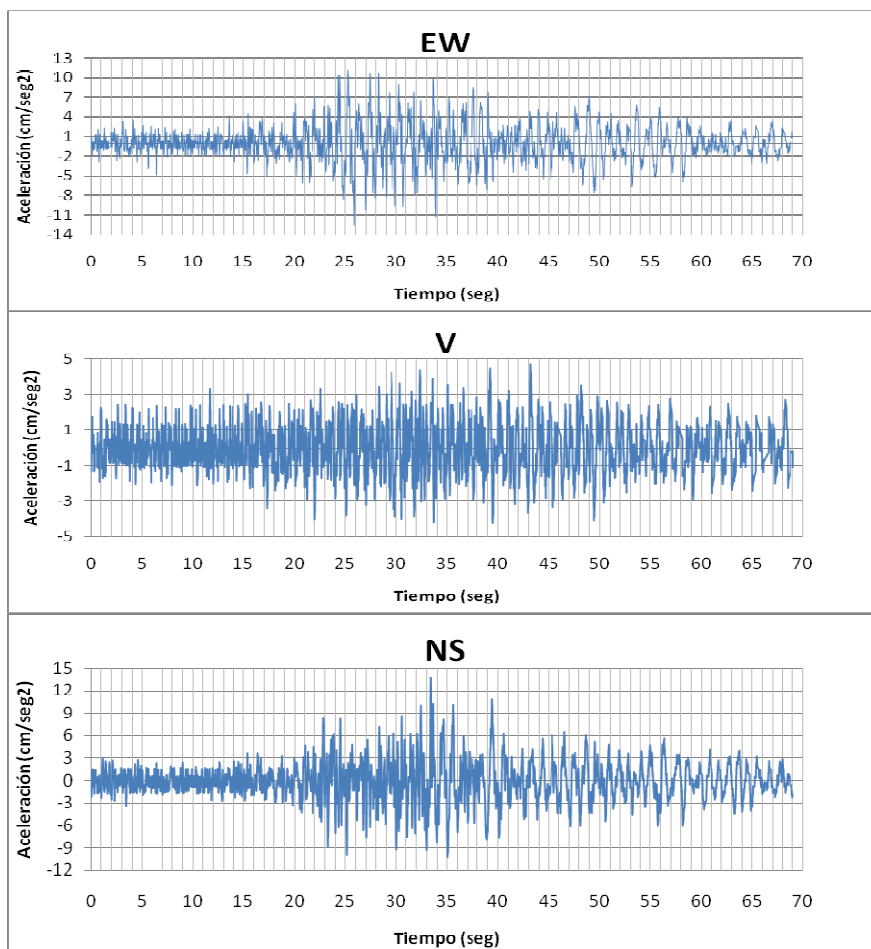
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, ROBLES (CPOP1) Geología: Roca, Topografía: Ondulada
 SISMO DE GÉNOVA (QUINDÍO) 02/SEP/97 ML=6.8
 Epic. 3.96N -75.87W Prof. 230 Km Dist. 298 Km



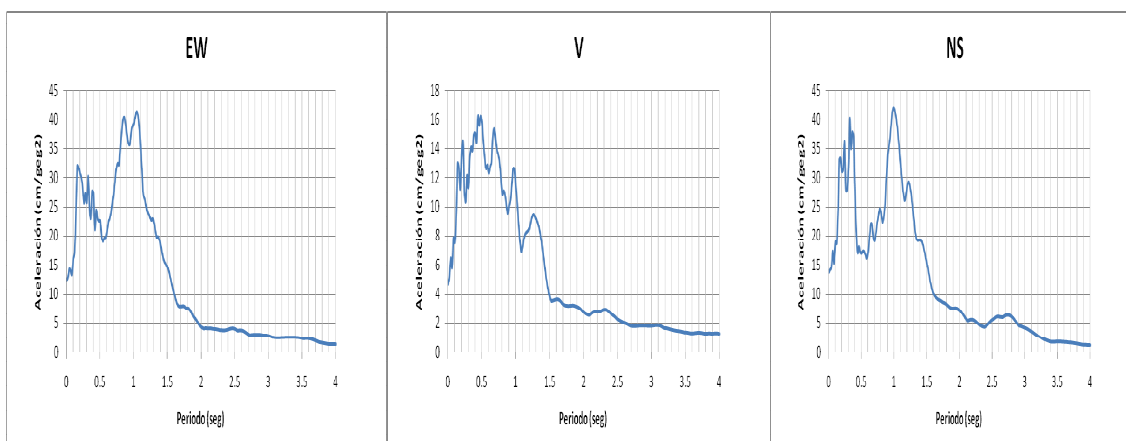
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



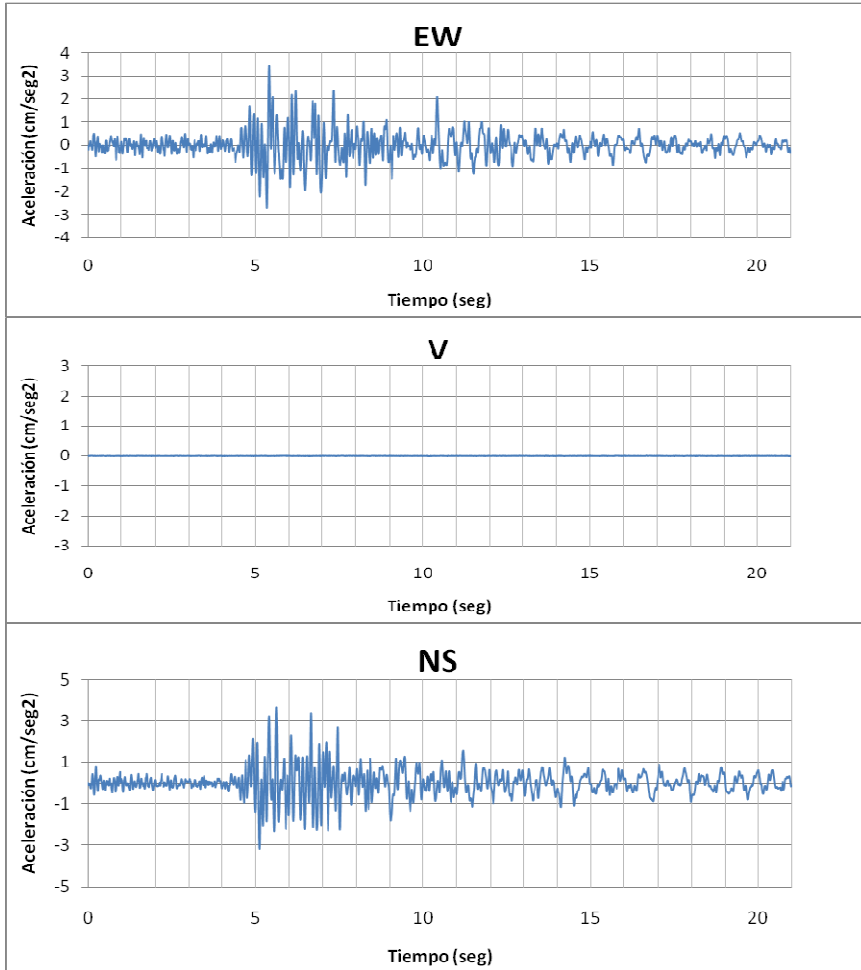
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, INVÍAS (CPOP2) Geología: Roca, Topografía: Plana
 SISMO DE GÉNOVA (QUINDÍO) 02/SEP/97 ML=6.8
 Epic. 3.96N -75.87W Prof. 230 Km



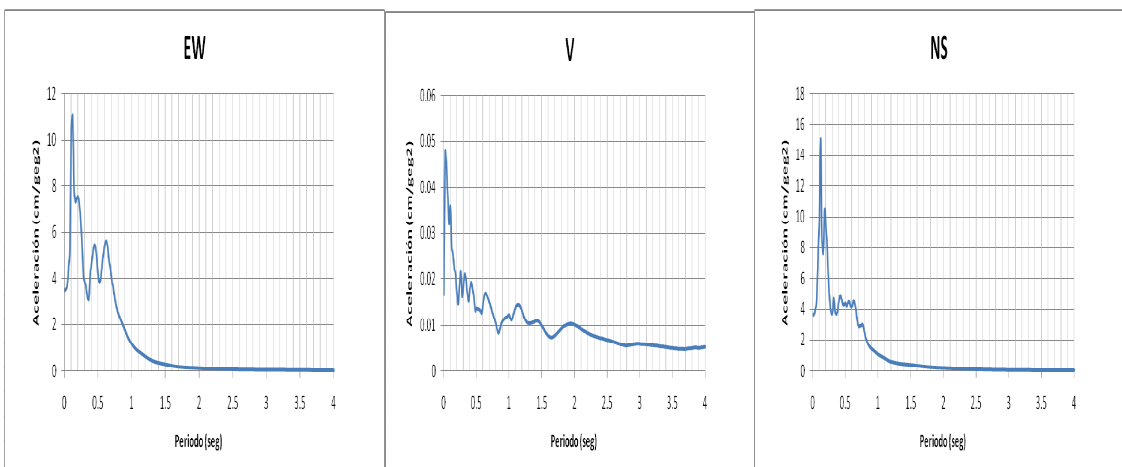
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



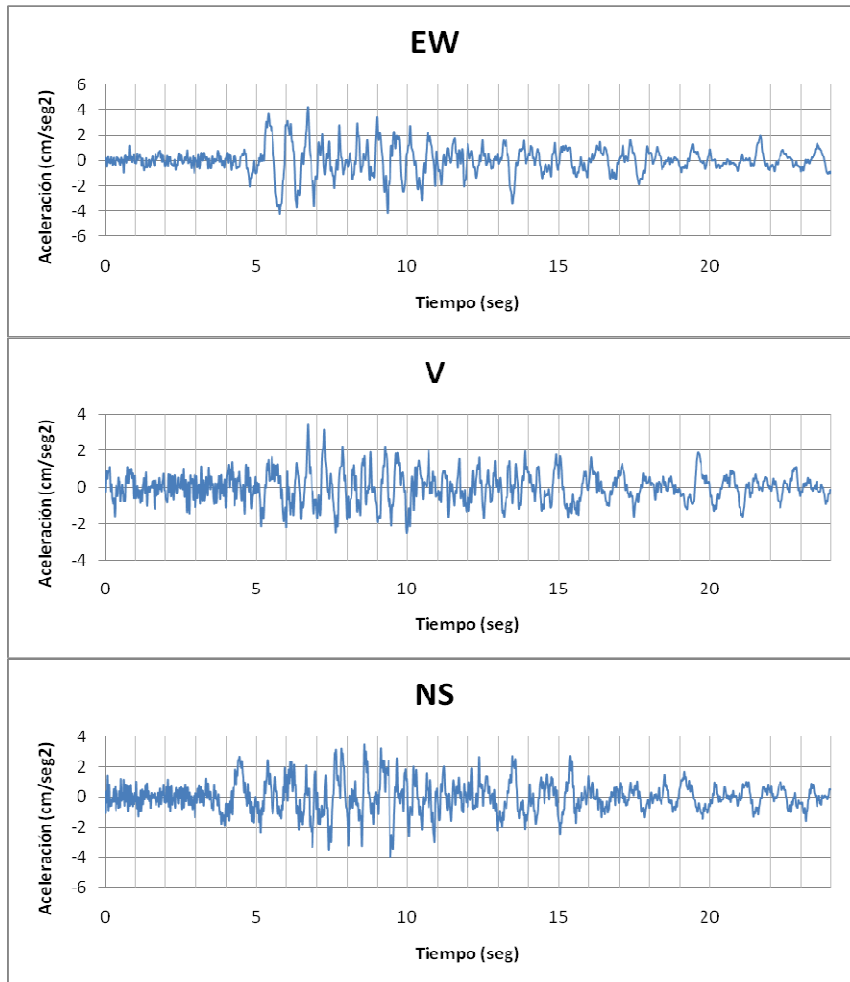
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, SENA (CPOP3) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE JAMUNDÍ (VALLE) 19/NOV/97 ML=4.9
 Epic. 3.28N -76.49W Prof. 100 Km Dist. 139 Km



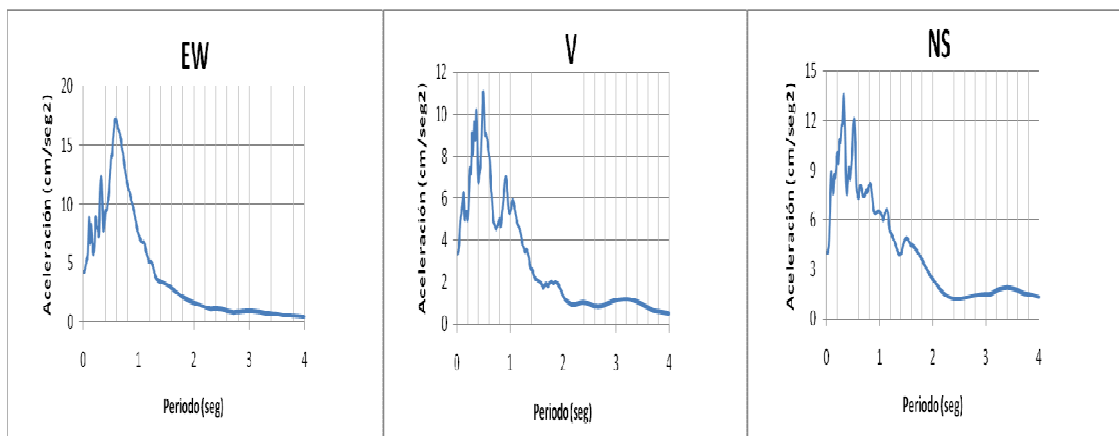
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



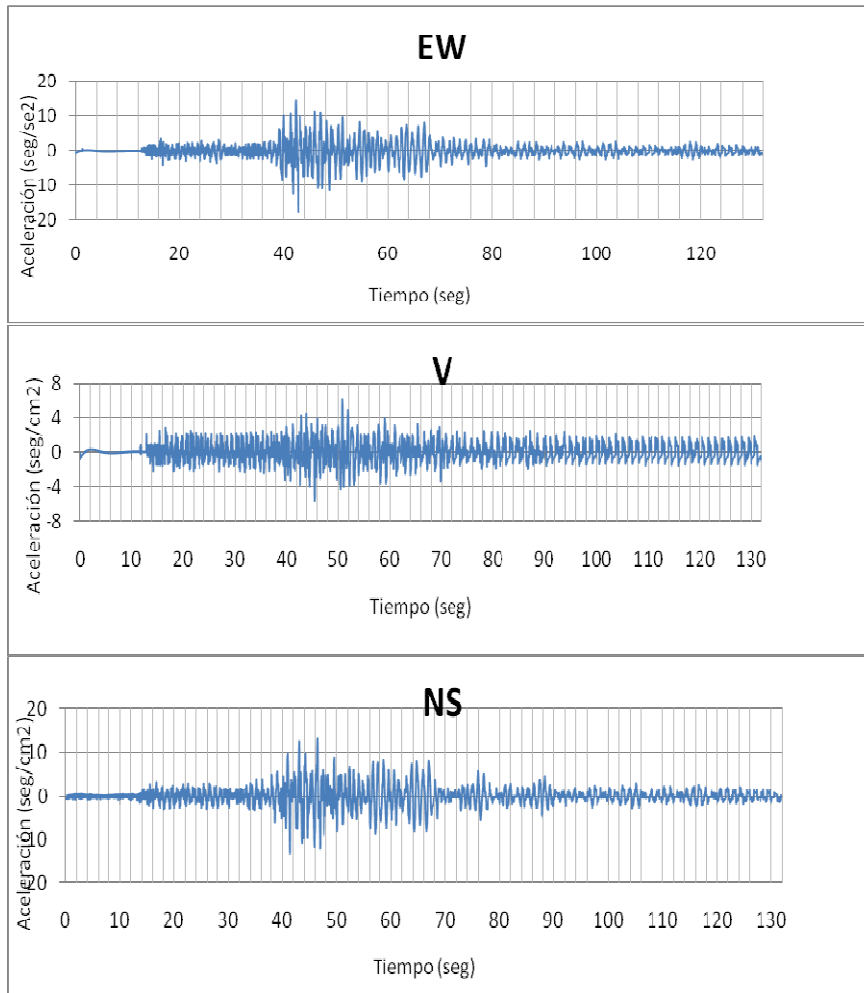
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, ROBLES (CPOP1) Geología: Roca, Topografía: Ondulada
 SISMO DE GÉNOVA (QUINDÍO) 11/DIC/97 ML=6.6
 Epic. 4.00N -75.95W Prof. 220 Km Dist. 291 Km



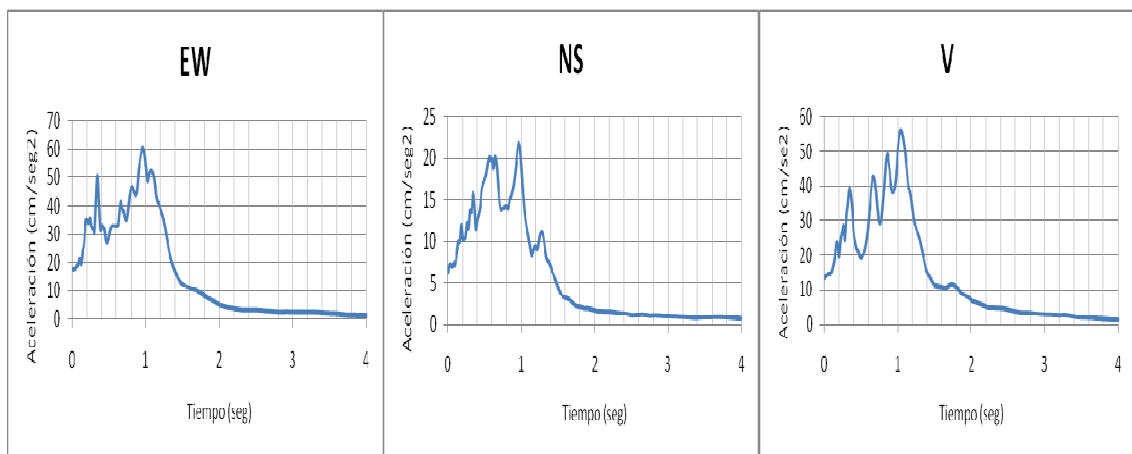
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



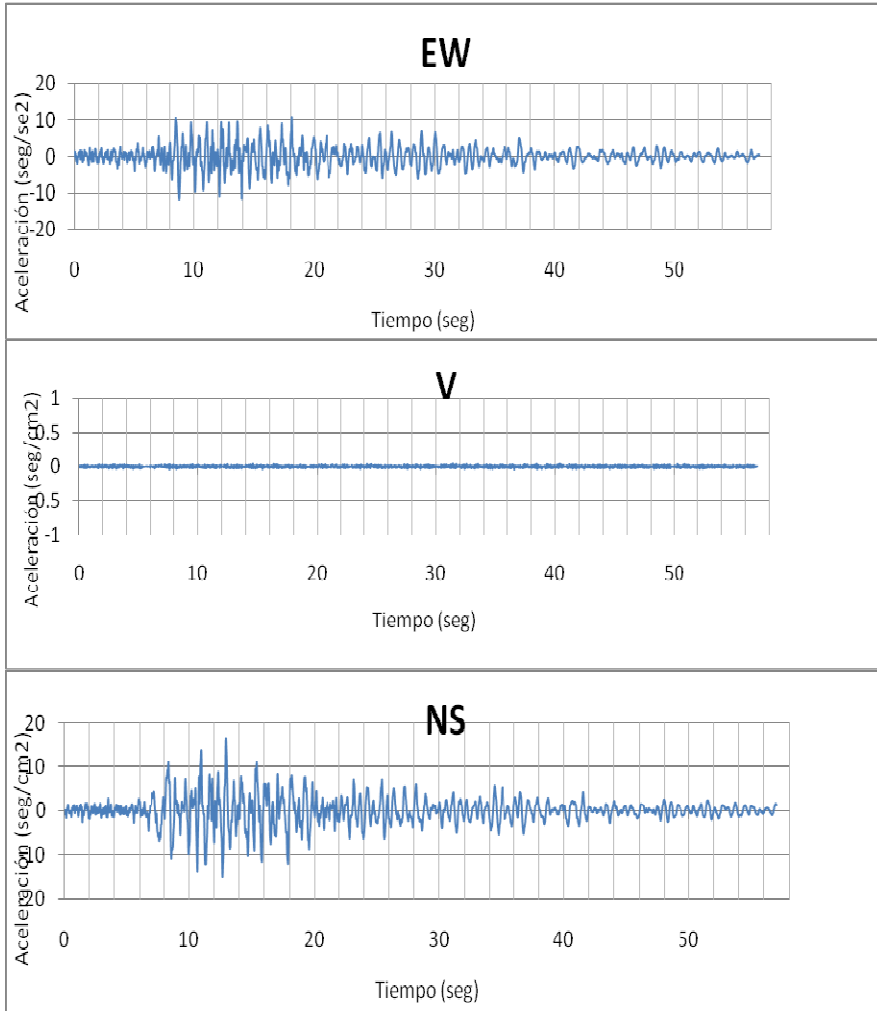
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, INVÍAS (CPOP2) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE GÉNOVA (QUINDÍO) 11/DIC/97 ML=6.6
 Epic. 4.00N -75.95W Prof. 220 Km Dist. 291 Km



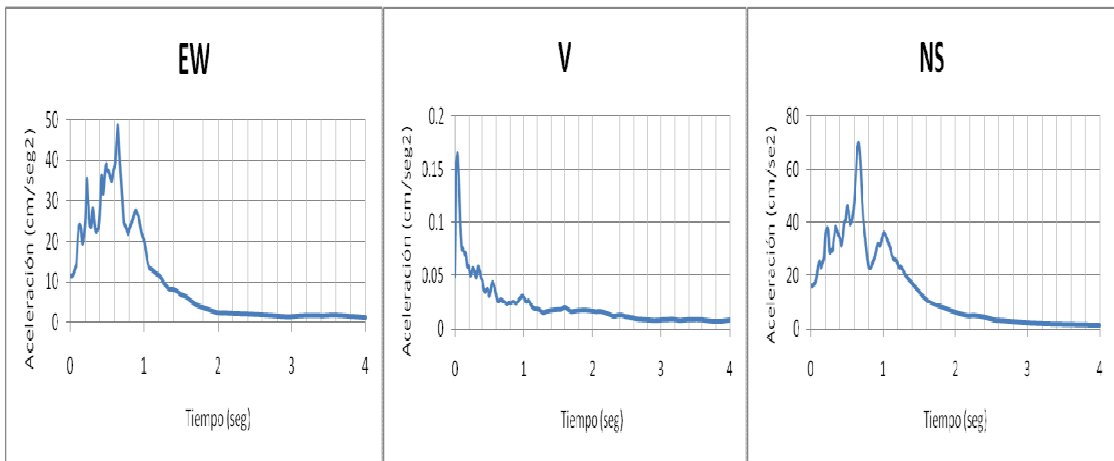
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



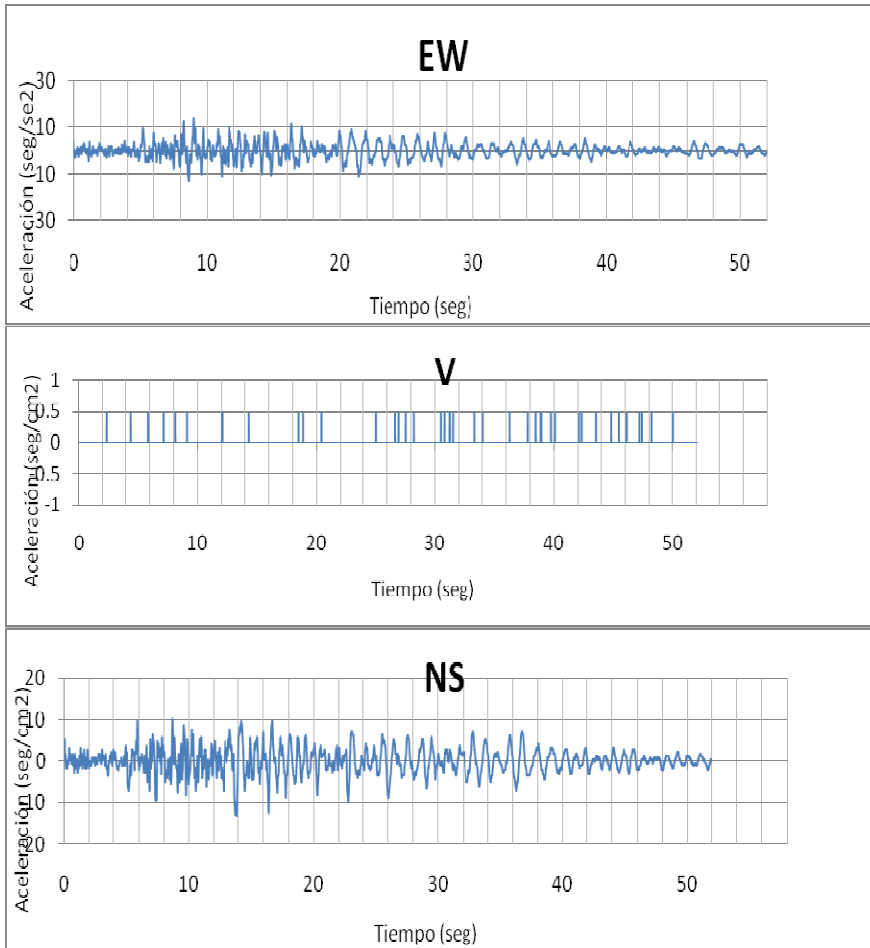
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, SENA (CPOP3) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE GÉNOVA (QUINDÍO) 11/DIC/97 ML=6.6
 Epic. 4.00N -75.95W Prof. 220 Km Dist. 291 Km



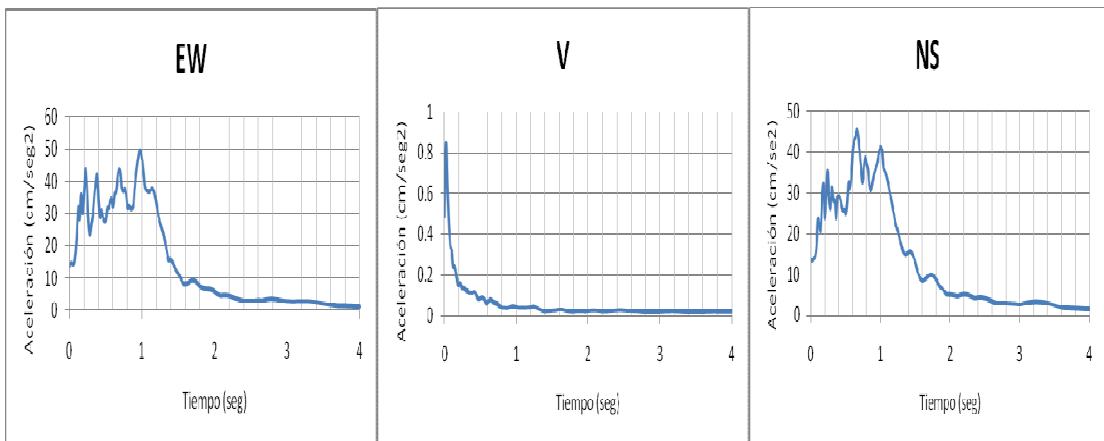
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



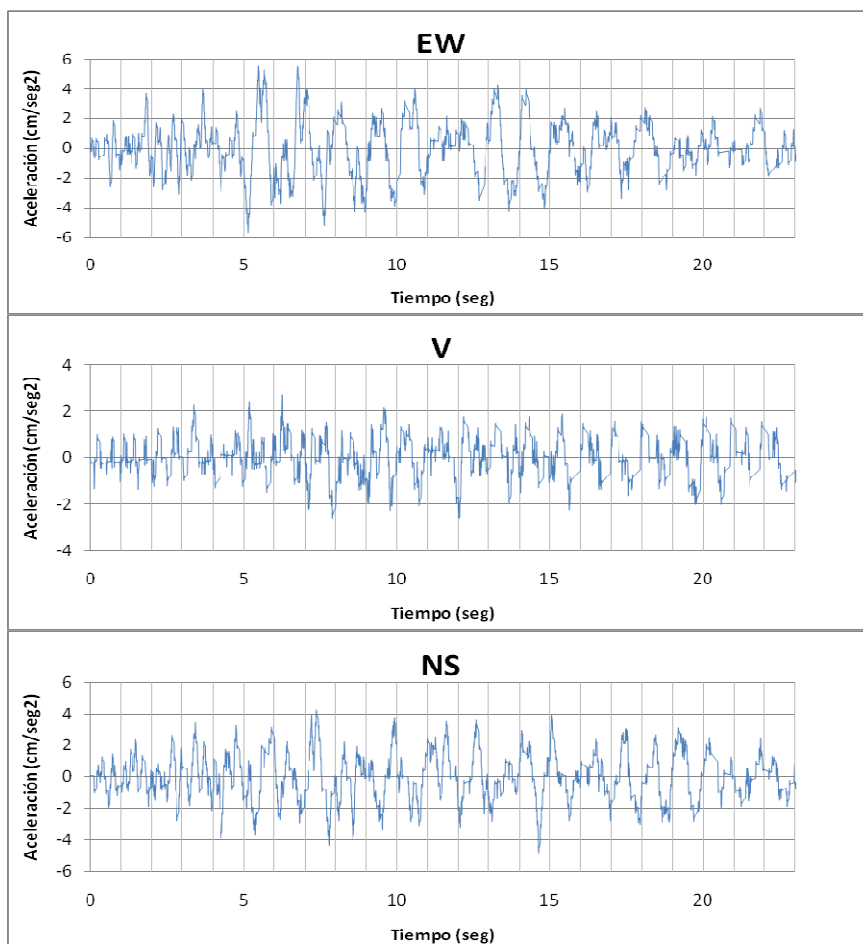
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, ISS (CPOP4) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE GÉNOVA (QUINDÍO) 11/DIC/97 ML=6.6
 Epic. 4.00N -75.95W Prof. 220 Km Dist. 291 Km



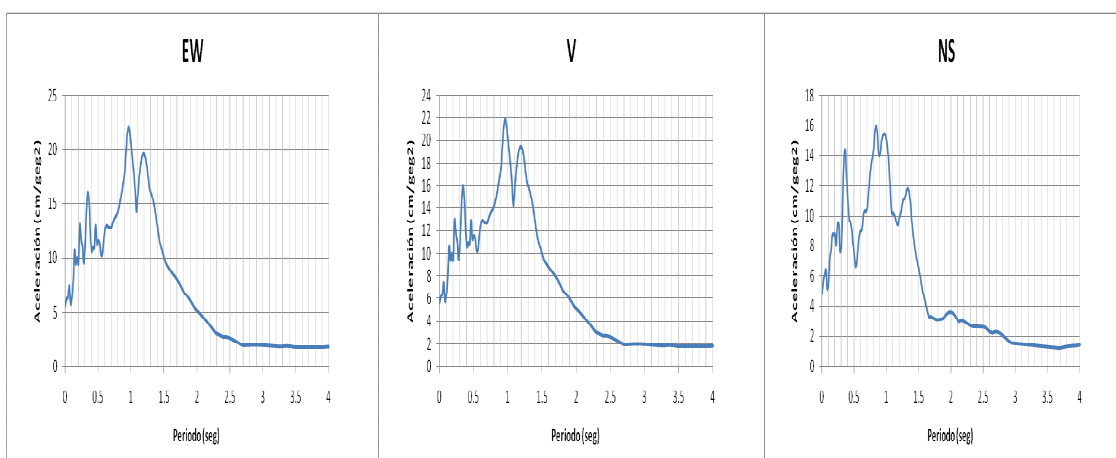
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



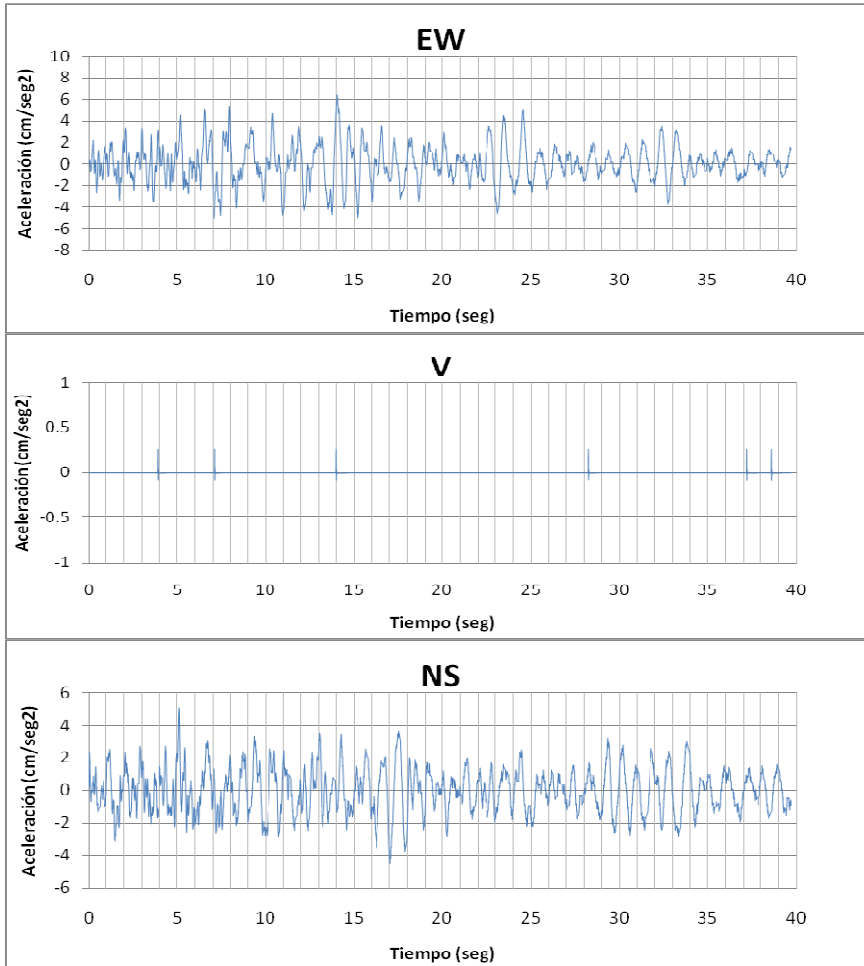
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, INVÍAS (CPOP2) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE CÓRDOBA (QUINDÍO) 25/ENE/99 ML=6.2
 Epic. 4.41N -75.71W Prof. 0 Km Dist. 236 Km



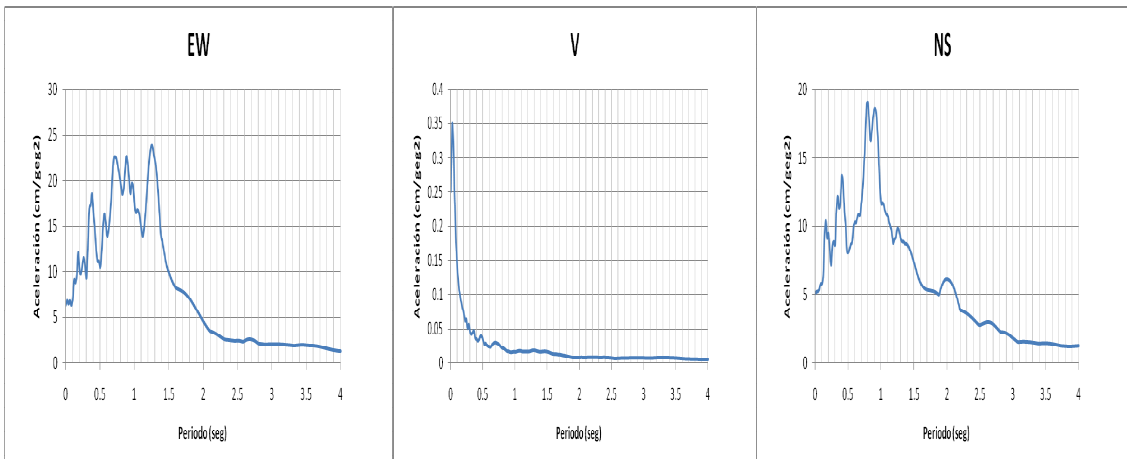
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



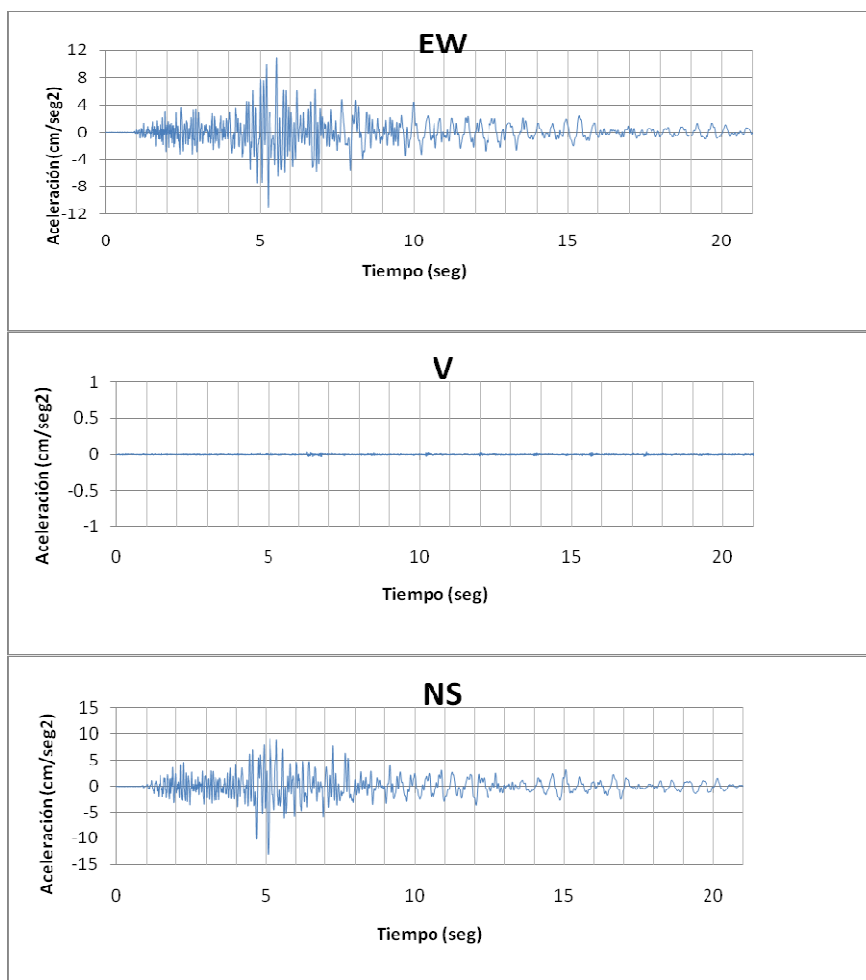
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, ISS (CPOP4) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE CÓRDOBA (QUINDÍO) 25/ENE/99 ML=6.2
 Epic. 4.41N -75.71W Prof. 0 Km Dist. 236 Km



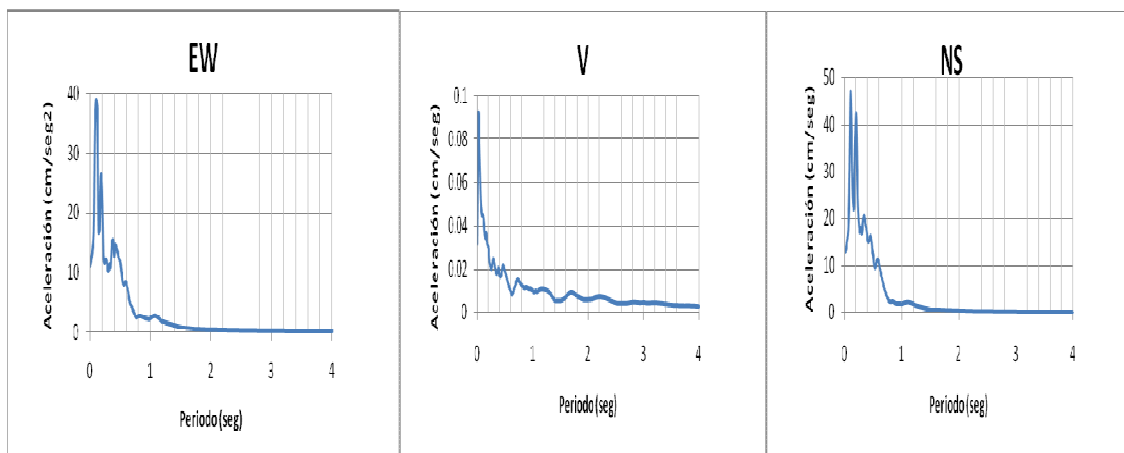
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



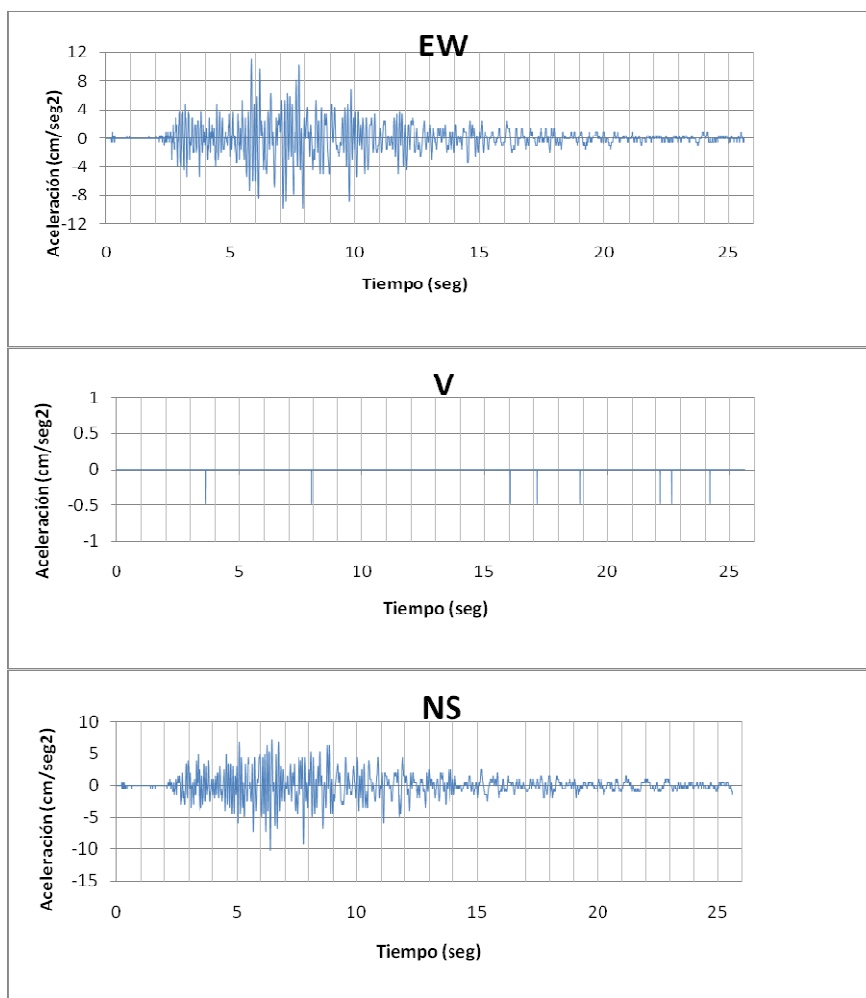
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, SENA (CPOP3) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE SOTARÁ (CAUCA) 07/ENE/03 ML=4.1
 Epic. 2.46N -76.60W Prof. Superficial Dist. 34 Km



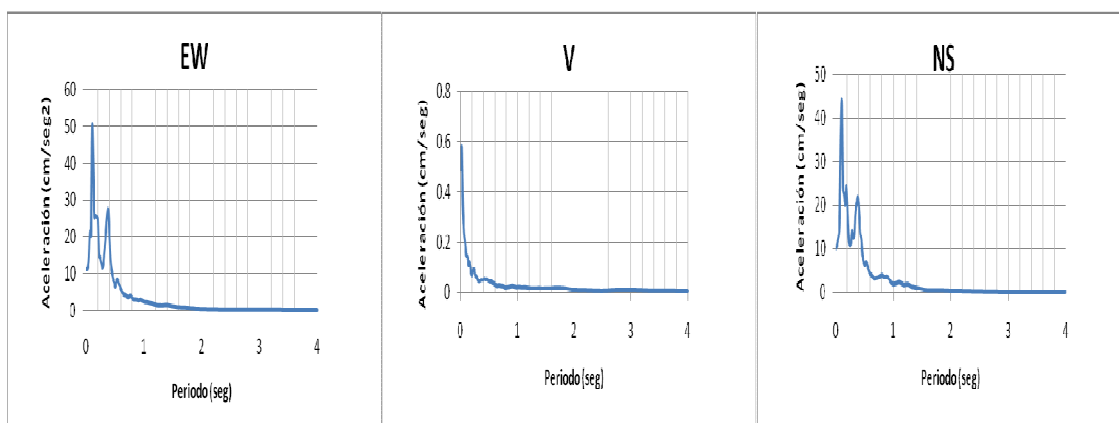
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



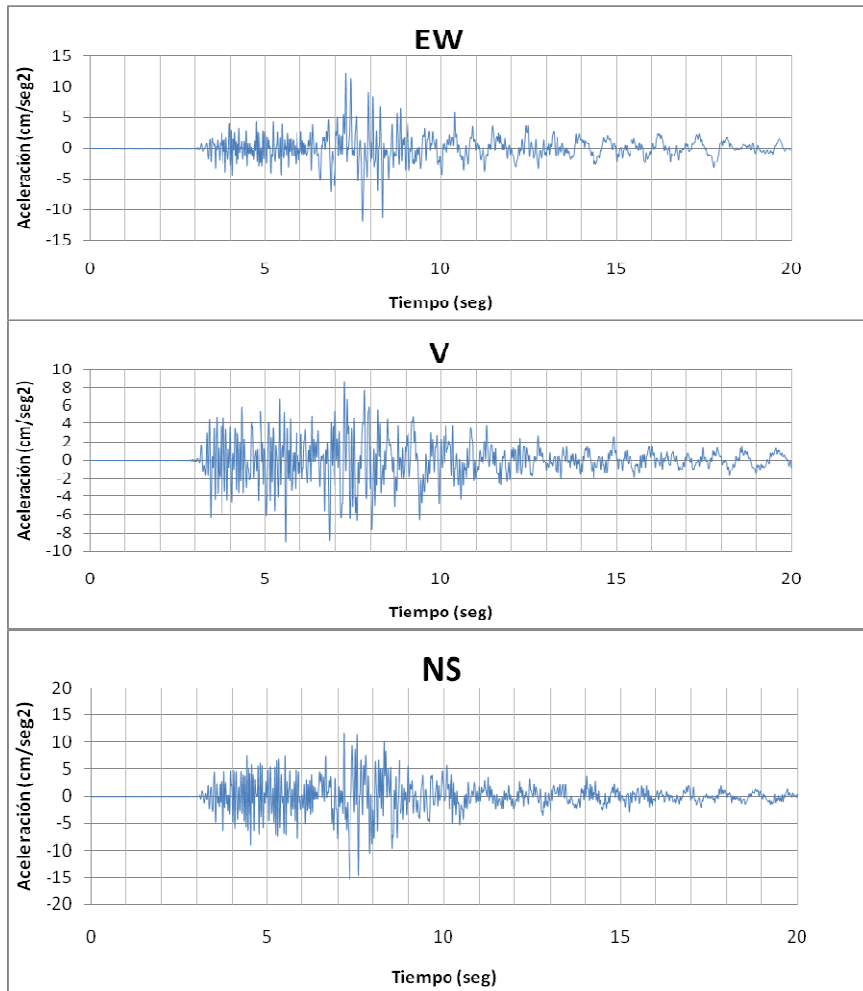
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, ISS (CPOP4) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE SOTARÁ (CAUCA) 07/ENE/03 ML=4.1
 Epic. 2.46N -76.60W Prof. Superficial Dist. 32 Km



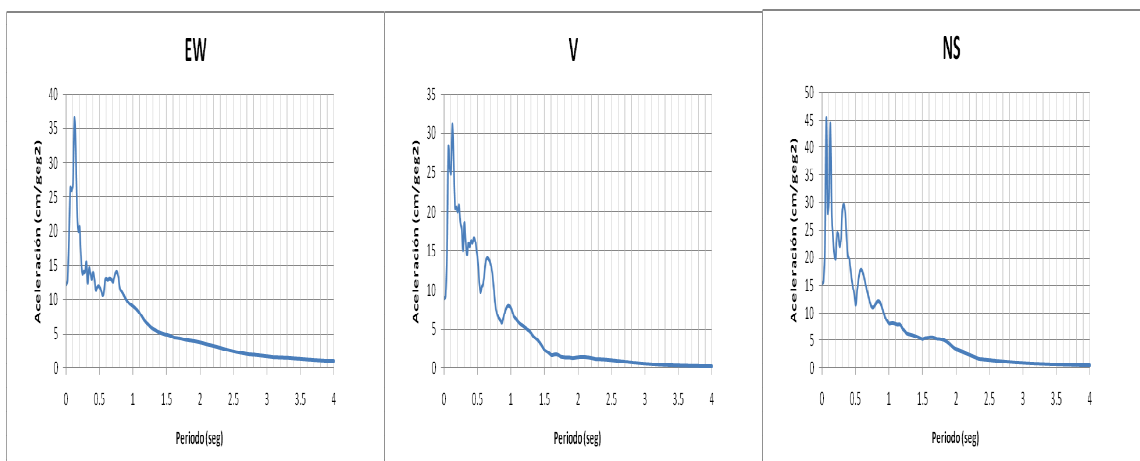
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



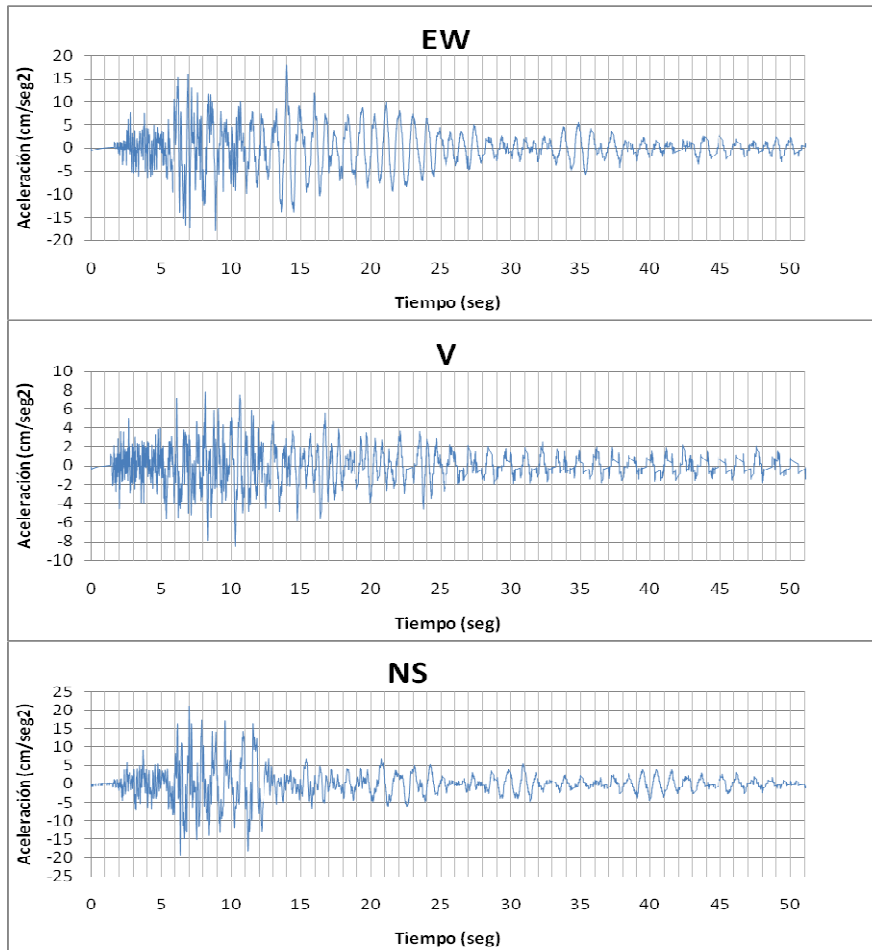
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, ROBLES (CPOP1) Geología: Roca, Topografía: Suelo
 SISMO DE SOTARÁ (CAUCA) 18/AGO/04 ML=5.2
 Epic. 2.14N -76.63W Prof. Superficial Dist. 31 Km



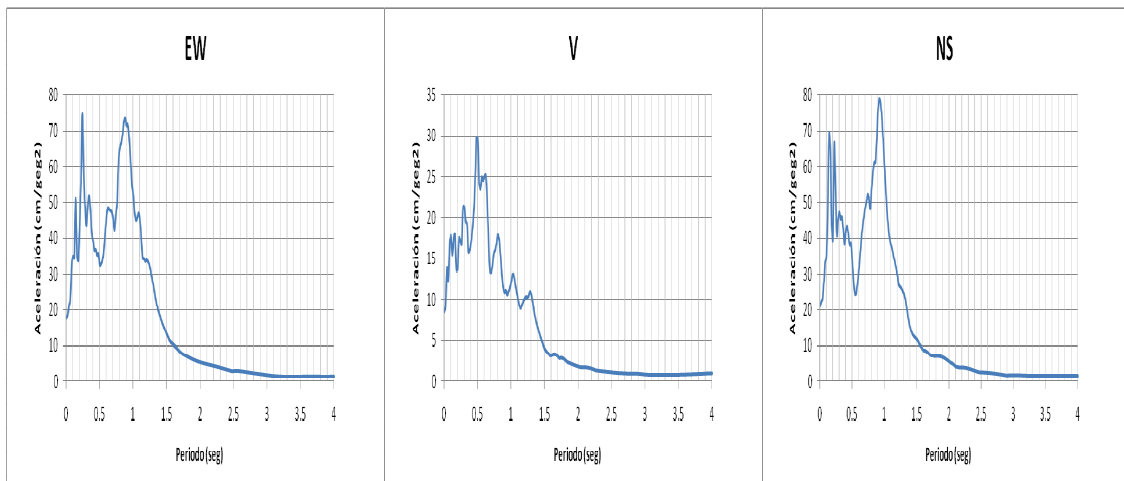
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



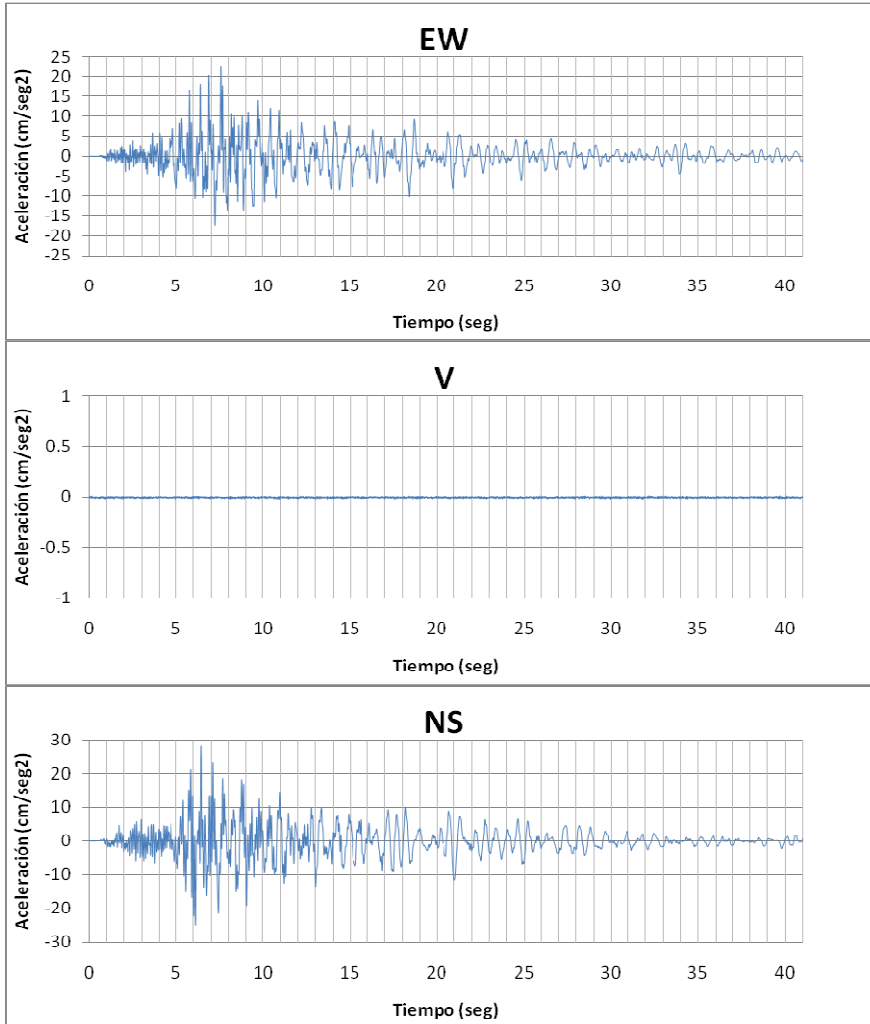
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, INVÍAS (CPOP2) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE SOTARÁ (CAUCA) 18/AGO/04 ML=5.2
 Epic. 2.14N -76.63W Prof. Superficial Dist. 35 Km



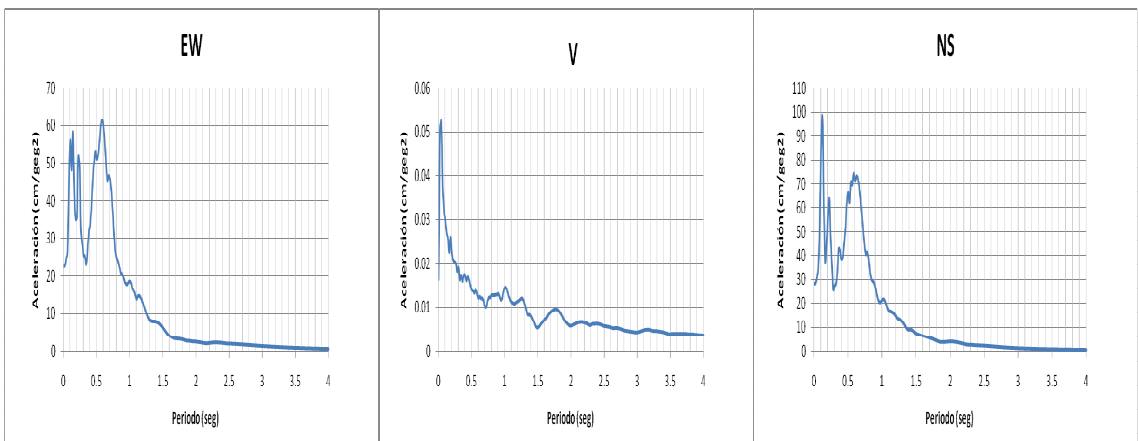
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



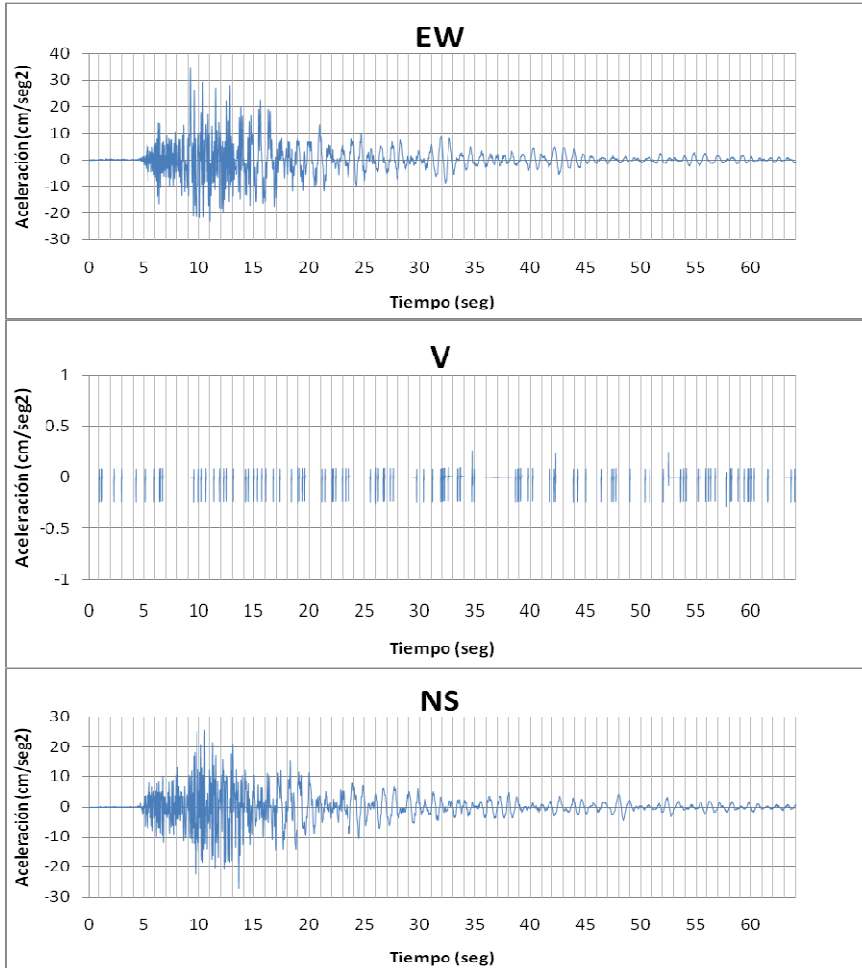
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, SENA (CPOP3) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE SOTARÁ (CAUCA) 18/AGO/04 ML=5.2
 Epic. 2.14N -76.63W Prof. Superficial Dist. 38 Km



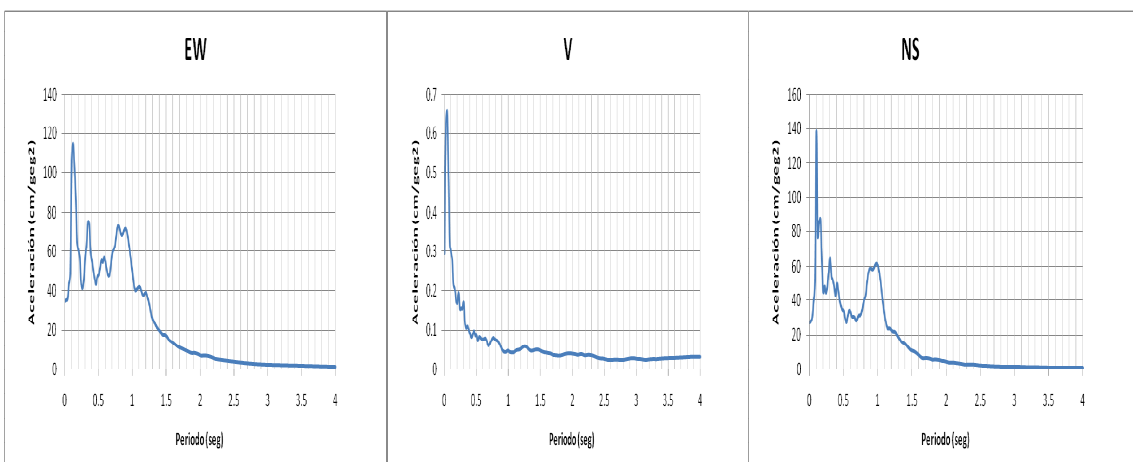
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



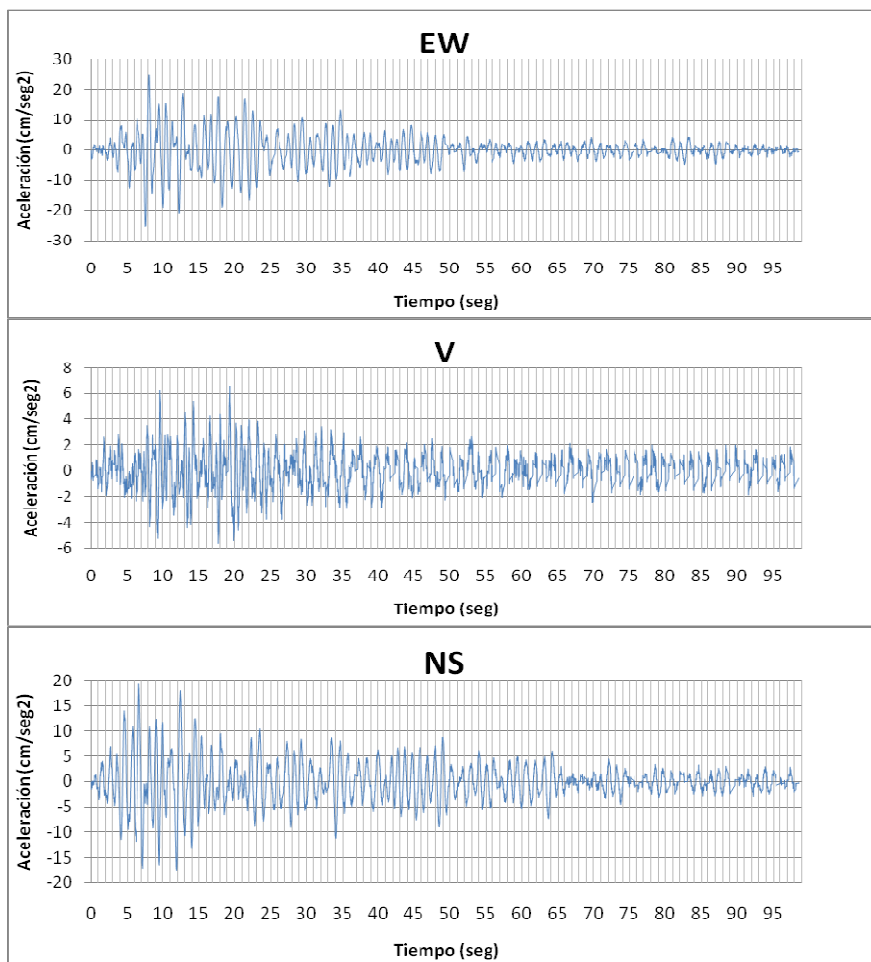
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, ISS (CPOP4) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE SOTARÁ (CAUCA) 18/AGO/04 ML=5.2
 Epic. 2.14N -76.63W Prof. Superficial Dist. 35 Km



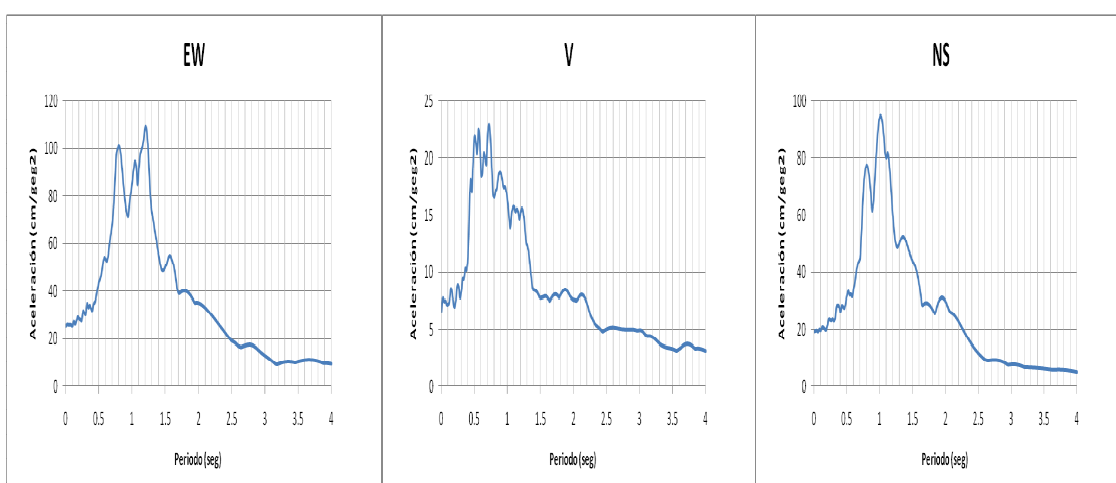
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



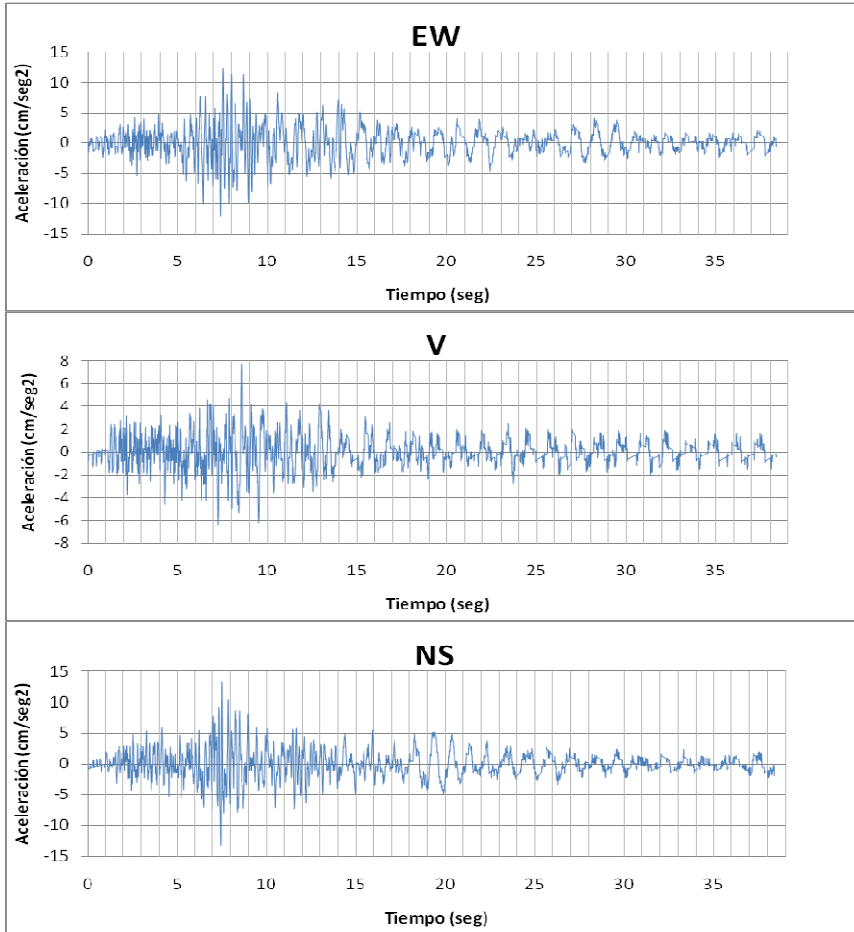
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, INVÍAS (CPOP2) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DEL OCEANO PACÍFICO 15/NOV/04 ML=6.7
 Epic. 4.80N -77.77W Prof. 24 Km Dist. 291 Km



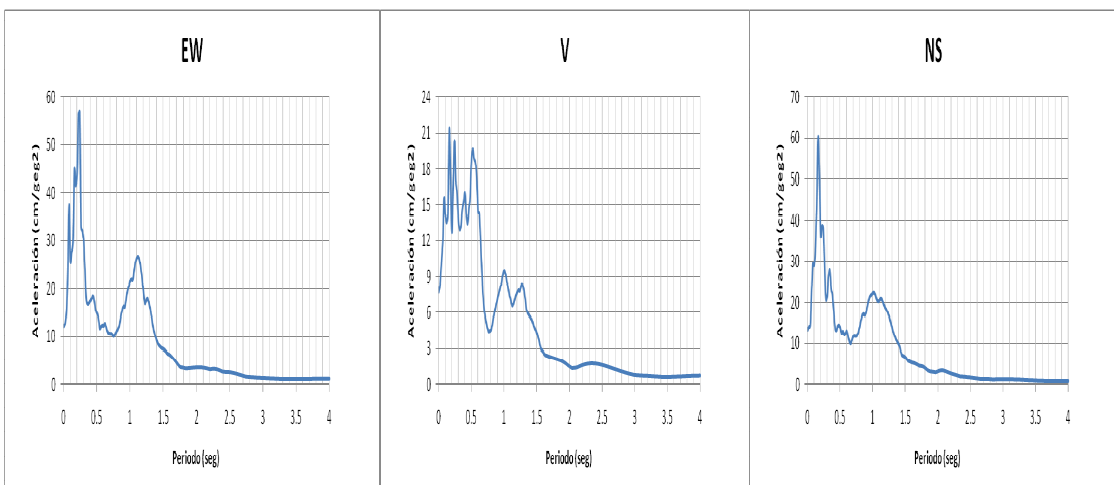
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



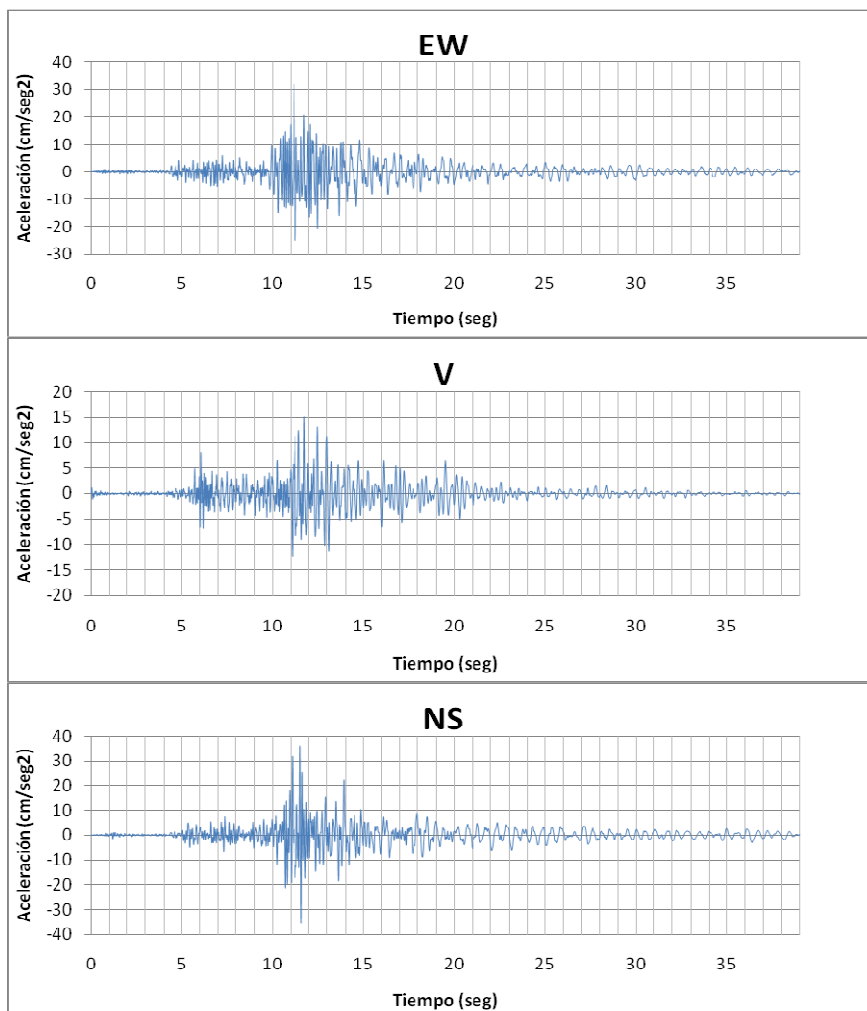
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, INVÍAS (CPOP2) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE PURACÉ (CAUCA) 06/MAR/07 ML=5.0
 Epic. 2.21N -76.48W Prof. 4 Km Dist. 30 Km



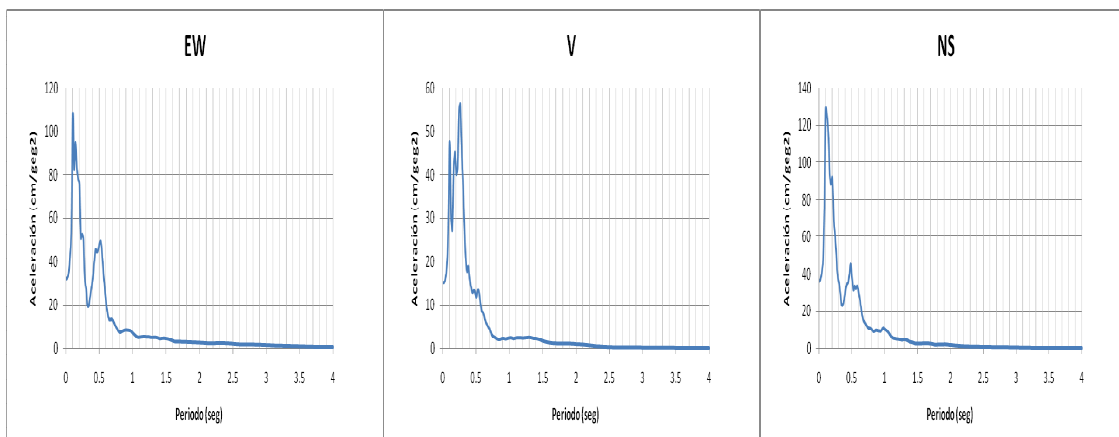
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



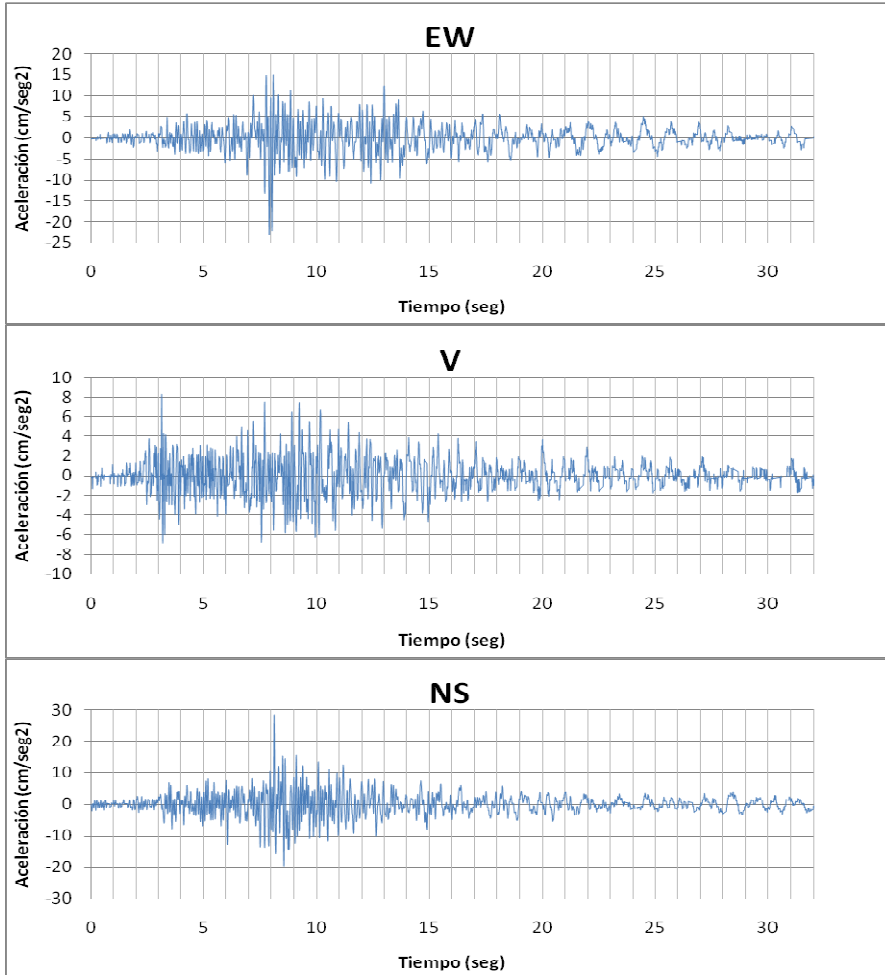
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, SENA (CPOP3) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE PURACÉ (CAUCA) 06/MAR/07 ML=5.0
 Epic. 2.21N -76.48W Prof. 4 Km Dist. 29 Km



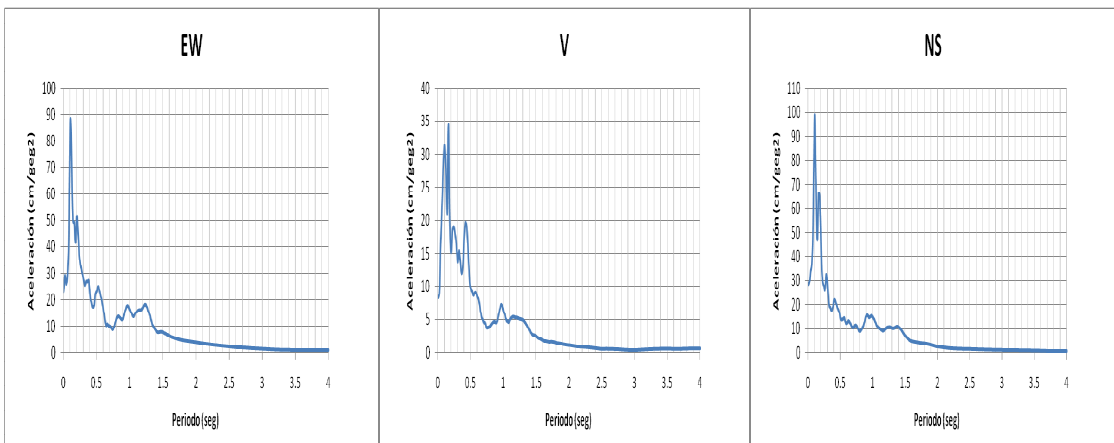
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



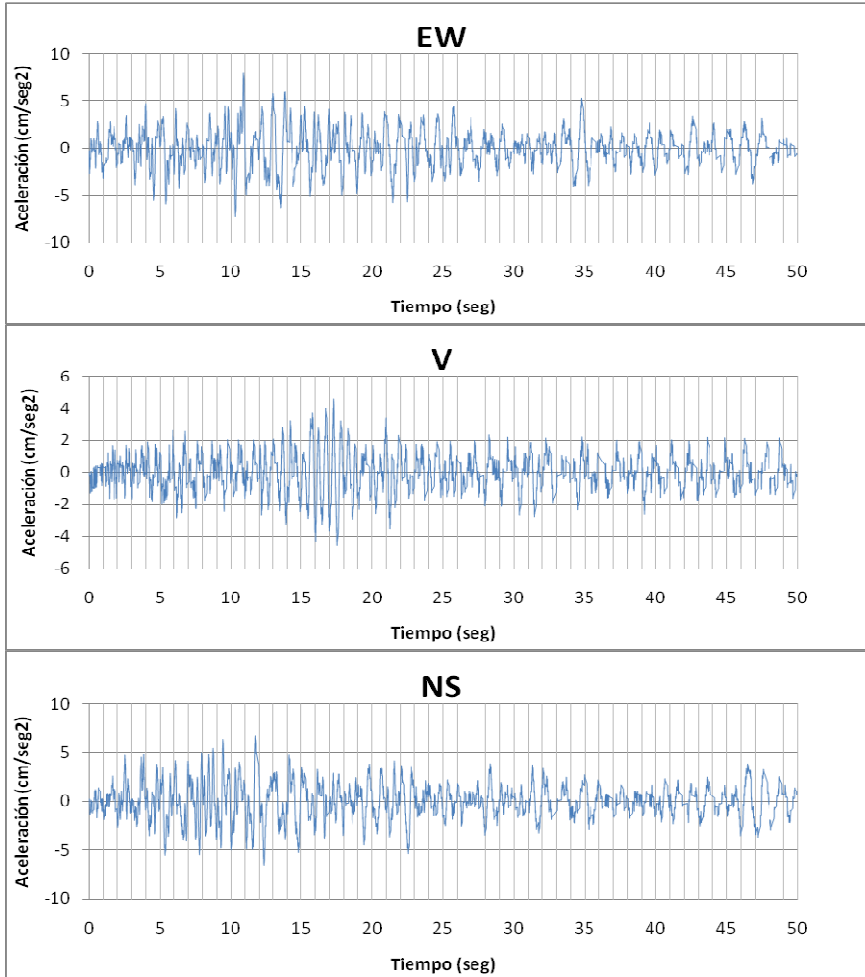
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, ISS (CPOP4) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE PURACÉ (CAUCA) 06/MAR/07 ML=5.0
 Epic. 2.21N -76.48W Prof. 4 Km Dist. 31 Km



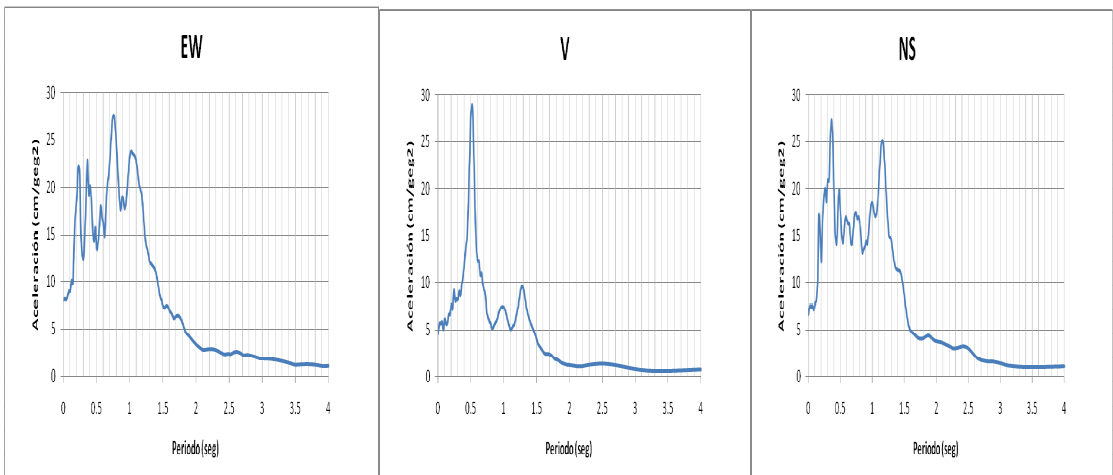
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



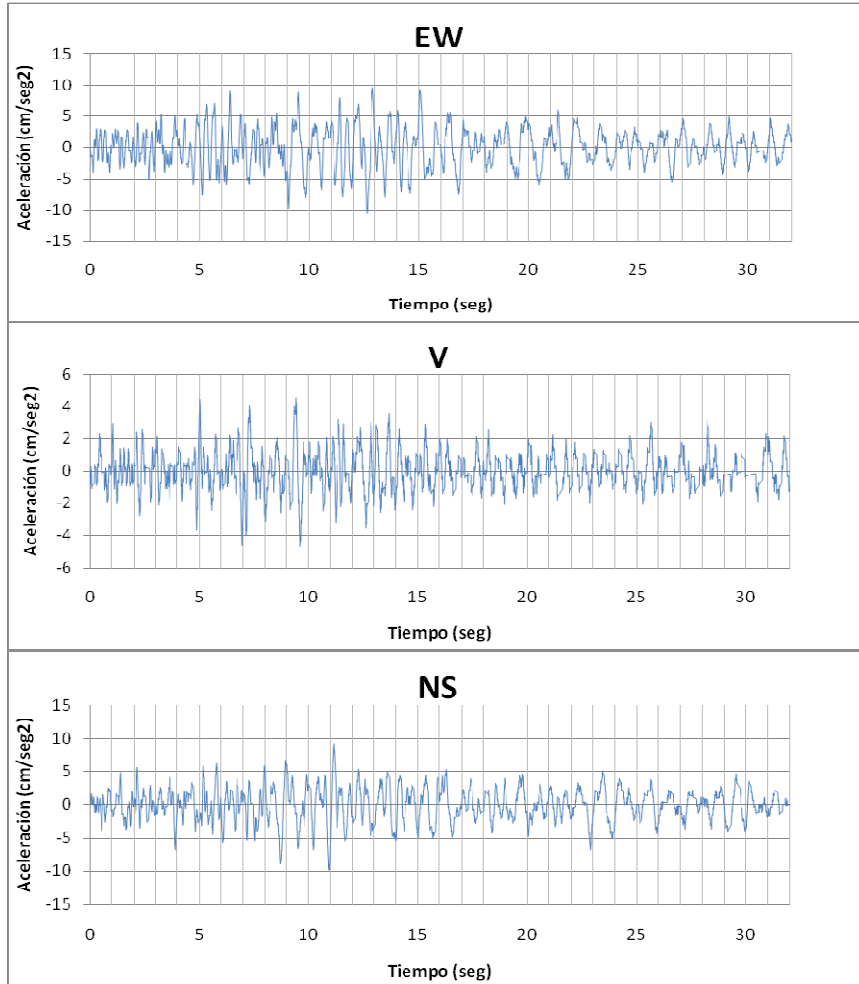
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, INVÍAS (CPOP2) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DEL OCEANO PACIFICO 10/SEP/07 ML=6.2
 Epic. 2.93N -78.21W Prof. Superficial Dist. 187 Km



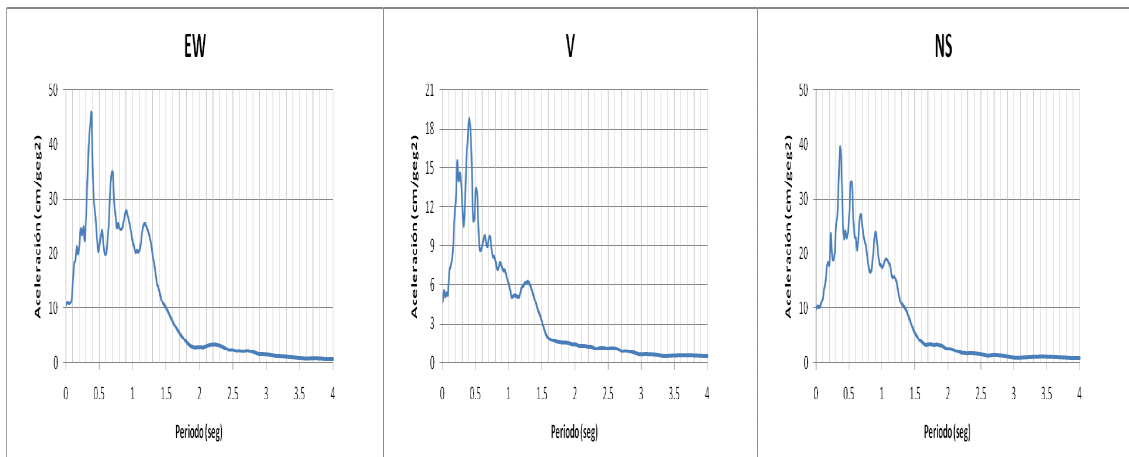
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



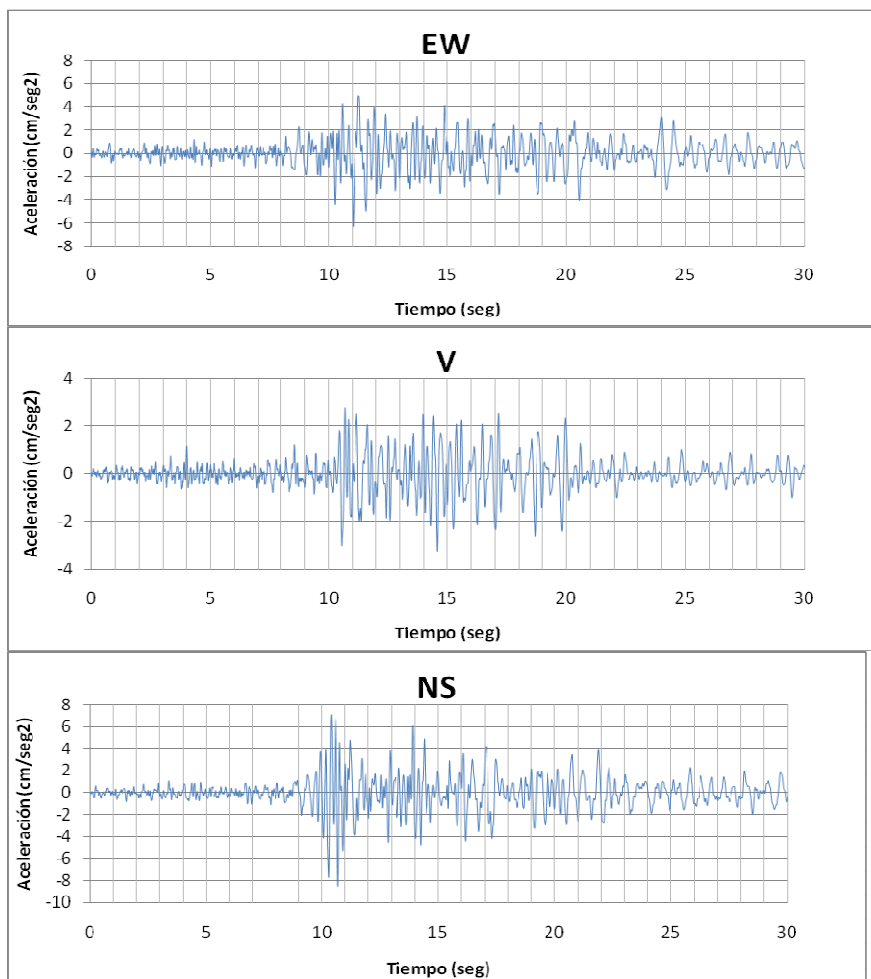
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, ISS (CPOP4) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DEL OCEANO PACIFICO 10/SEP/07 ML=6.2
 Epic. 2.93N -78.21W Prof. Superficial Dist. 185 Km



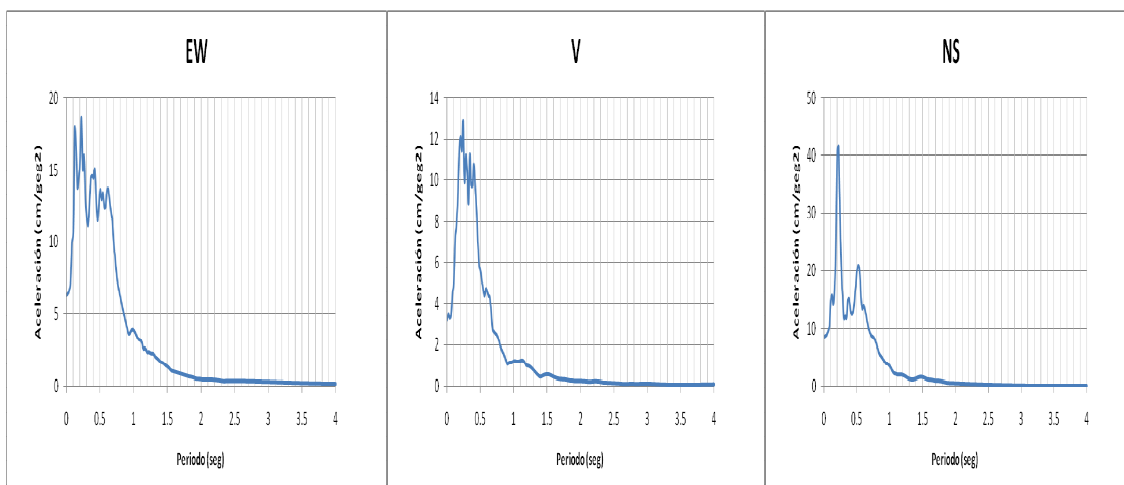
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



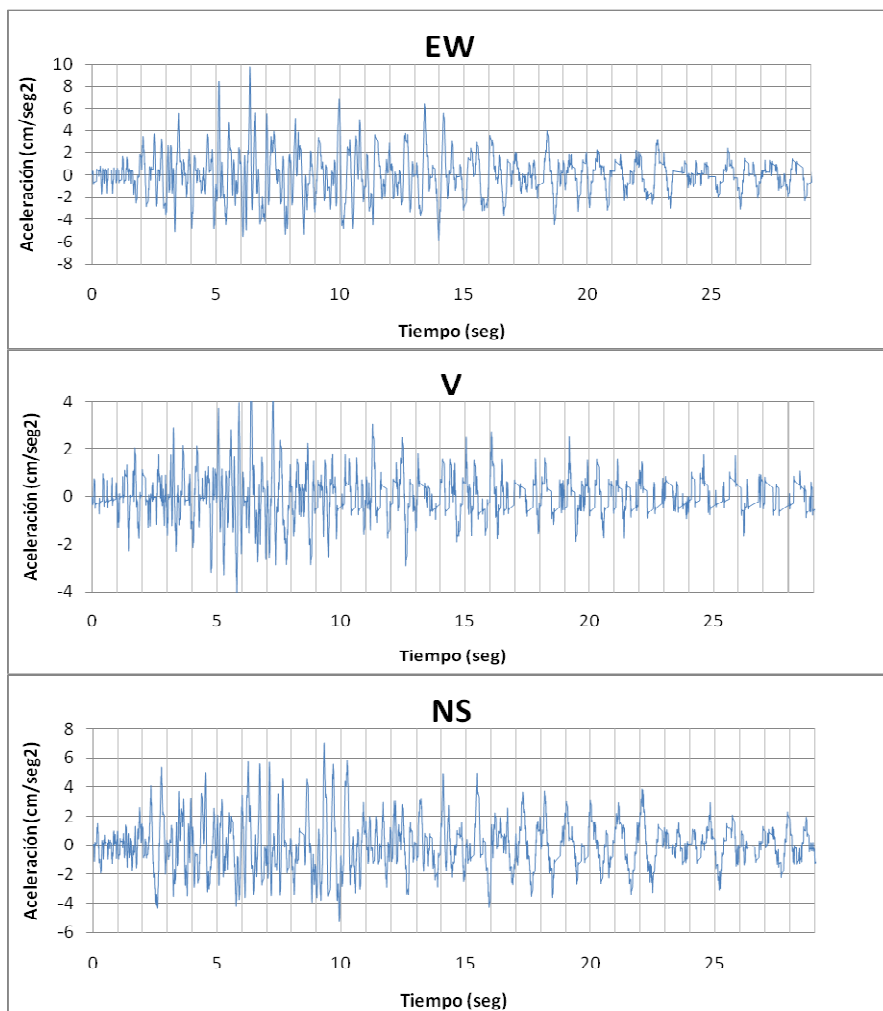
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, SENA (CPOP3) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE CALOTO (CAUCA) 18/DIC/09 ML=5.3
 Epic. 3.05N -76.38W Prof. 151 Km



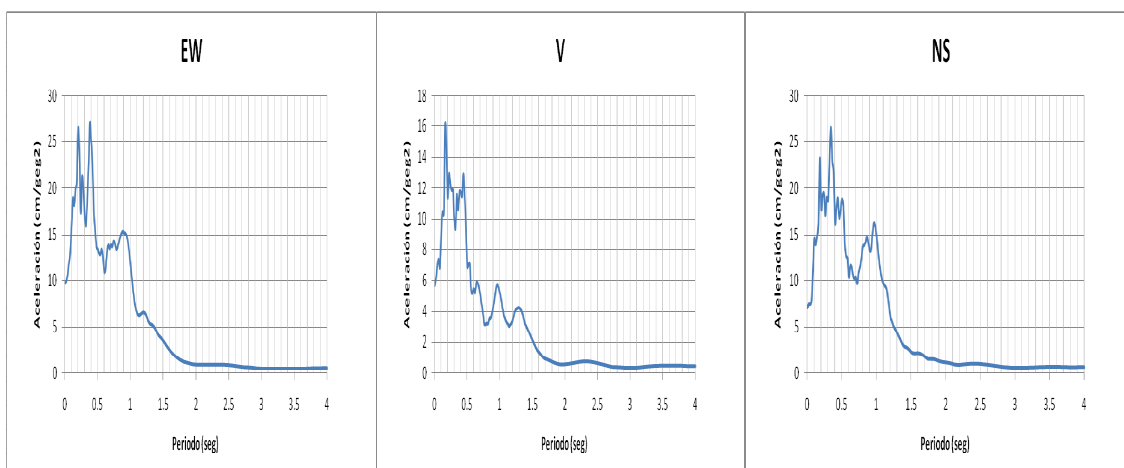
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



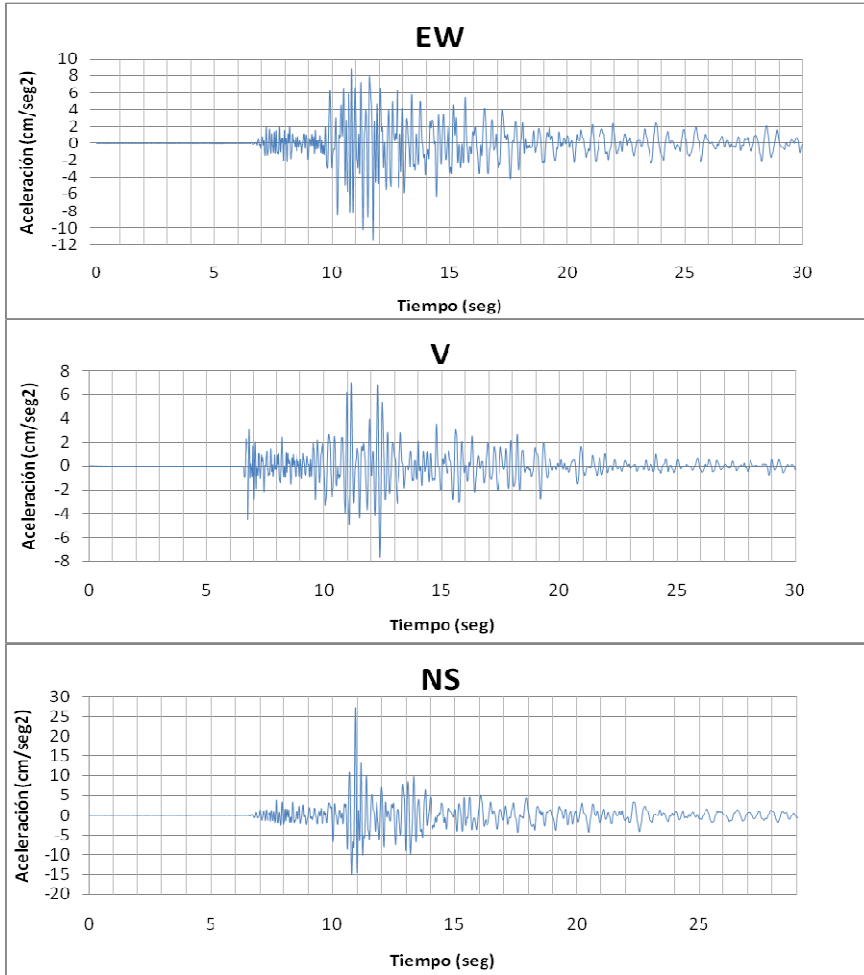
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, ISS (CPOP4) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE CALOTO (CAUCA) 18/DIC/09 ML=5.3
 Epic. 3.05N -76.38W Prof. 151 Km



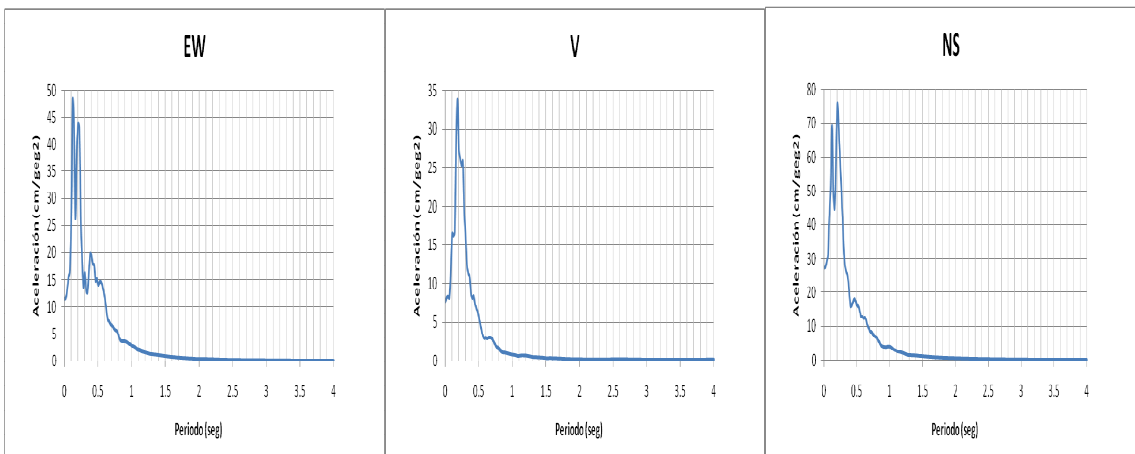
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



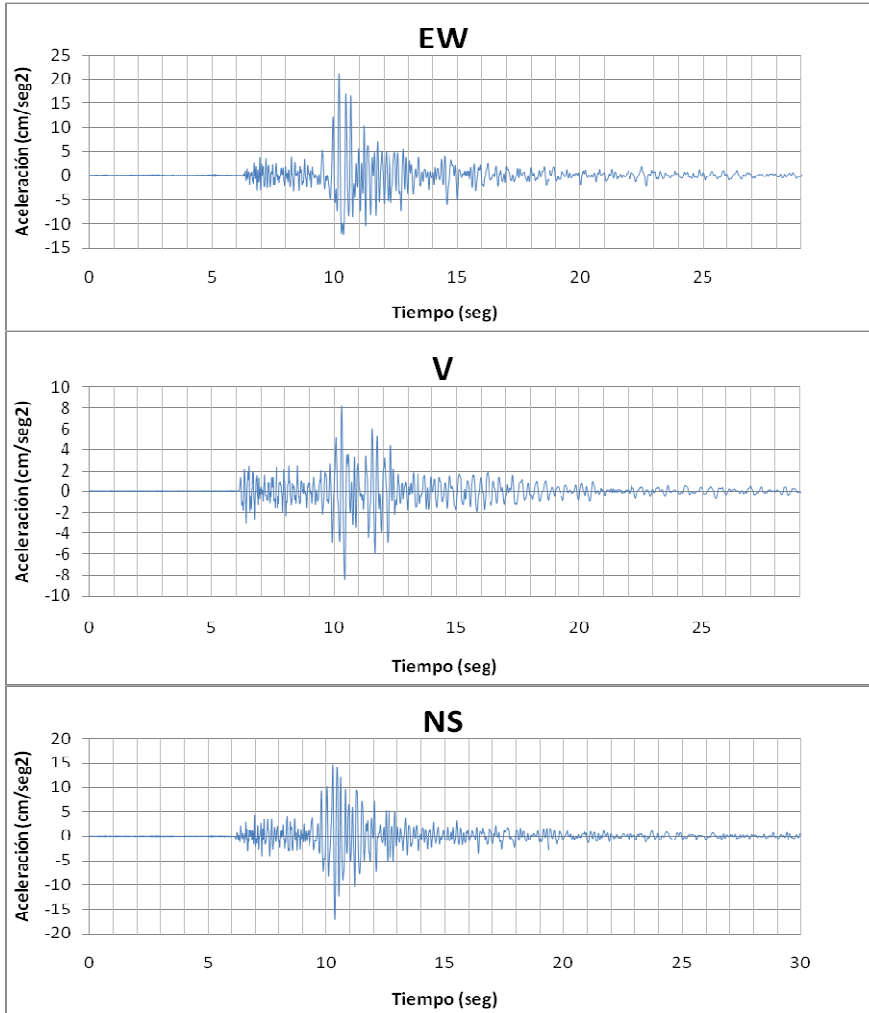
INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, SENA (CPOP3) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE SOTARÁ (CAUCA) 06/JUN/10 ML=4.2
 Epic. 2.26N -76.55W Prof. 2.0 Km



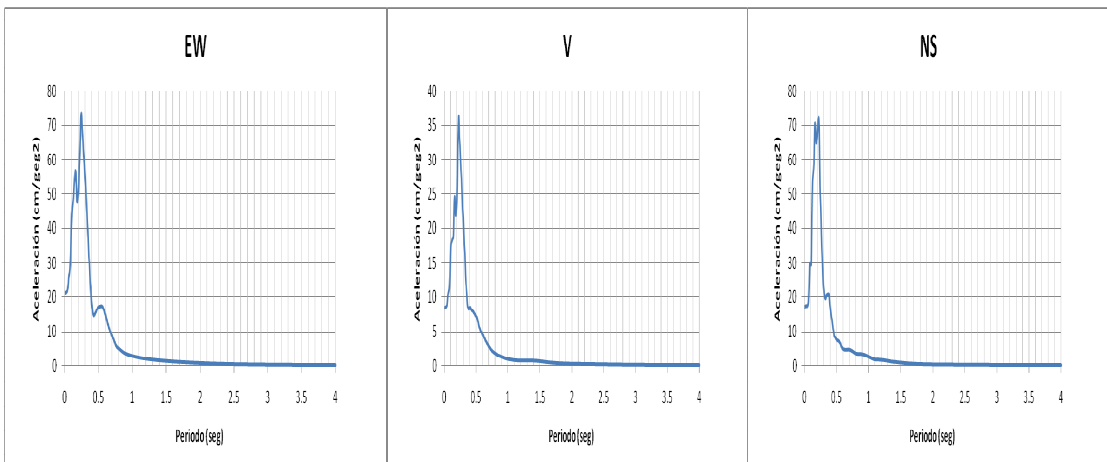
Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



INGEOMINAS-RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
 Estación de Popayán, GABRIELA M. (CPOP5) Geología: Suelo, Topografía: Plana
 SISMO DE SOTARÁ (CAUCA) 06/JUN/10 ML=4.2
 Epic. 2.26N -76.55W Prof. 2.0 Km



Espectro de Respuesta de Aceleración, Amortiguamiento=5%



BIBLIOGRAFIA

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes 1984, Título A- Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Bogotá. 1984.

D. BARRERO. Geology of the central Western Cordillera, west of Buga and Roldanillo, Colombia, Publicaciones Geologicas Especiales del INGEOMINAS. (1979), p. 75

DUQUE-CARO. Major structural elements and evolution of northwestern Colombia. Geological and geophysical investigations of continental margins. 1979, p 359.

CARLOS A. VARGAS. Tesis Doctoral, Propagación de Ondas Sísmicas y Atenuación de Ondas de Coda en el territorio Colombiano, Barcelona. 2003. P19- 24

COMISIÓN ASESORA PERMANENTE DEL RÉGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente 2010, Título A –Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Bogotá. 2010. p14-30

E. CARREÑO, B. BRAVO, A. SUAREZ y J.M. TORDESILLAS. Física de la Tierra, Registro y Tratamiento de acelerogramas, 1999, p81-111.

INGEOMINAS, Armando Murcia Leal y Abigail Orrego López, ECOPETROL, Gildardo Perez Tellez, 1981, p34-38.

INGEOMINAS y COMUNIDAD EUROPEA, Microzonificación Sismogeotécnica de Popayán. 1ed, Bogotá, 1992. 208 p.

INGEOMINAS Y SUBDIRECCIÓN DE AMENAZAS GEOLOGICAS Y ENTORNO AMBIENTAL. Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali. Bogotá. 2005.

INGEOMINAS, Geología, Geoquímica y Ocurrencias Minerales Cuadrángulo N-6, Popayán. Bogotá, 1999, No 22, p6-39.

INGEOMINAS, HUMBERTO GONZÁLES I. Conceptos de Metamorfismo Dinámico y su Aplicación a la Zona de Falla de Romeral. 1977, p10-23.

INGEOMINAS. Implicaciones de la Información Registrada en la Red de Acelerógrafos de Bogotá y la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia, Sobre la Microzonificación Sísmica de Bogotá. Bogotá. 2008.

INGEOMINAS. Red de Estaciones activas en Colombia (en línea) <http://seisan.ingeo Minas.gov.co/RNAC/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=63>

RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS DE COLOMBIA (en línea) <<http://seisan.ingeo Minas.gov.co/RNAC/>>

SEISMO SIGNAL SOFTWARE (en línea) <http://translate.google.com.co/translate?hl=es&sl=en&u=http://www.seismosoft.com/en/SeismoSignal.aspx&ei=PzGStar5JZCitgenr_VP&sa=X&oi=translate&ct=result&resnum=1&ved=0CBgQ7gEwAA&prev=/search%3Fq%3Dseismo%2Bsignal%26hl%3Des%26prmd%3Ddivns>

STEVEN L. KRAMER. Geotechnical Earthquake Engineering, Strong Ground Motion, 1996, p54-105

SUB DIRECCIÓN DE AMENAZAS GEOLÓGICAS Y ENTORNO AMBIENTAL. Monitoreo y Evaluación de la Amenaza Sísmica en Colombia. Bogotá. 2010.

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID. Pdf. Física de la Tierra, 2000(en línea) <<http://revistas.ucm.es/fis/02144557/articulos/FITE9999110081A.PDF>> (citado 18 de mayo de 2011).

USGS. U.S. Geological Survey. Earthquake Data Base (en línea) <<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/>>