



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**REGISTRO SINTÉTICO EN LA REFINERÍA MIGUEL  
HIDALGO, DE UN ESCENARIO SÍSMICO  
ORIGINADO EN EL GRABEN DE ACAMBAY**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO GEOFÍSICO**

**PRESENTA:**

**SERGIO VALDERRAMA MEMBRILLO**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. JORGE AGUIRRE GONZÁLEZ**



**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**NOVIEMBRE 2015**

---

**"La vida no es sino una continua sucesión de  
oportunidades para sobrevivir."  
(Gabriel García Márquez)**

**In tllili, in tlapilli**

## **DEDICATORIAS:**

***A mis padres Dolores Membrillo y Sergio Valderrama:***

*Por su apoyo incondicional, por ser mi ejemplo a seguir, por su paciencia, por sus consejos, por su esfuerzo y por estar conmigo en todo momento, en especial a ti mamá.  
¡Muchas gracias papás porque sin ustedes todo esto no sería posible!*

***A mi hermana Anita Valderrama:***

*Por ser una excelente hermana mayor y una amiga, por tus consejos, por estar a mi lado y siempre apoyarme. Te quiero hermana.*

***A mi tía Leticia Membrillo:***

*Por todo el apoyo y cariño brindado, muchas gracias tía.*

***A mis amigos de la carrera Luz Elva, Rosy, Lupita, Rey, Dionicio, Rene, Iván y Toño:***

*Por tantos buenos momentos y por su grandiosa amistad.*

***A mis amigos de la vida Eliza, Raymundo, Jonathan, Nestor, Ana Cristina, Montserrat, Oscar, Roberto, David, Cesar y Cristina:***

*Por todas las experiencias y por su incondicional amistad.*

***A mis amigos de AFG Paty, Jessica, Andrea, Ana, Mónica, Jorge y Silverio:***

*Por compartir el gusto a correr.*

## **AGRADECIMIENTOS:**

***A mi tutor Dr. Jorge Aguirre González:***

*Por todas las enseñanzas, los comentarios, el tiempo brindado y por creer en mí.*

***A mis sinodales Dra. Vala Hjörleifsdóttir, Dr. Francisco José Sánchez Sesma, Dr. Jorge Aguirre González, Dr. Leonardo Ramírez Guzmán y Dr. Martín Cárdenas Soto:***

*Por las revisiones, correcciones y comentarios en la presente tesis.*

***A la UNAM:***

*Por brindarme una excelente educación. Por mi raza hablará el espíritu.*

***Al Instituto de Ingeniería:***

*Por todo el apoyo brindado y en especial por el financiamiento al proyecto “Análisis de riesgo debido a un escenario sísmico en instalaciones industriales en Tula”.*

***A Alejandra Robles, Iván Granados, Rene Solano y Jonathan Carrillo:***

*Por ayudar en la instalación y revisión de los equipos sísmicos.*

**Al Dr. Ricardo Vázquez Rosas y al Ing. Horacio Mijares Arellano:**  
*Por sus enseñanzas y apoyo en el manejo de los equipos de sismología.*

**A mis compañeros del Instituto de Ingeniería Alejandra Robles, Mariana Heredia,  
Evelyn Ramos, Iván Granados, Rene Solano y Eduardo Prado:**  
*Por su apoyo en la tesis y por hacer amena la estancia en el Instituto.*

**Al Ing. J. Refugio Ortega Gutiérrez, Gerente de la Refinería “Miguel Hidalgo”:**  
*Por todas las facilidades y la amable cooperación para la instalación de un sismógrafo.*

**Al Lic. José Ramón Reyes Rivera, Presidente Municipal Constitucional de  
Temascalcingo, Edo. México, a Filemón E. Argueta Correa, Coordinador con Centro  
Cultural Regional y a Jaime Gabino Calixto, Coordinador de Protección Civil y  
Bomberos:**  
*Por el gran apoyo, información y gestión sobre su hermoso municipio Temascalcingo,  
Edo. México.*

**A Aidé Bello Ortega, Directora de Telesecundaria “Ignacio Comonfort”:**  
*Por su apoyo y por abrirnos las puertas de la Telesecundaria para la instalación de un  
equipo sísmico.*

**Al Sr. Juan Manuel Lugo, Intendente de la Telesecundaria “Ignacio Comonfort”:**  
*Por toda la ayuda y cuidado en el equipo sísmico.*

**A José Pérez Atenogenes, Director de la Escuela Primaria “Artículo 123, Miguel  
Hidalgo”:**  
*Por facilitarnos y abrirnos las puertas de la Primaria para la instalación de un equipo  
sísmico.*

**A José Juan García Cortes., Jefe de la Estación de Bomberos Actopan, Hgo.:**  
*Por apoyarnos y brindarnos su amable cooperación para instalación de un equipo  
sísmico.*

## ÍNDICE

ÍNDICE.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABLAS.....	XI
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIV

### **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....1**

### **CAPÍTULO II.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....3**

II.1. Ondas Superficiales.....	3
II.2. Campo difuso.....	4
II.3. Correlaciones cruzadas y tensor de Green.....	6
II.4. Función de Green Empírica.....	7
II.4.1 Función de Green.....	7
II.4.2. Método de la Función de Green Empírica.....	8
II.5. Atenuación y factor de calidad, Q.....	9
II.6. Espectro de respuesta.....	10

### **CAPÍTULO III.- ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....11**

III.1. Geología regional.....	11
III.1.1 Geología del Estado de Hidalgo.....	11
III.1.2 Geología del Estado de México.....	12
III.1.2.1. Graben de Acambay.....	13
III.1.2.2. Falla Acambay-Tixmadejé.....	14
III.1.2.3. Falla Pastores.....	14
III.1.2.4. Sistema Temascalcingo-Tepuxtepec-Acámbaro.....	14
III.2. Paleosismología en el graben de Acambay.....	15
III.2.1 Sismo de 1912.....	16
III.3. Refinería Miguel Hidalgo.....	17

<b>CAPÍTULO IV.- DESCRIPCIÓN Y APLICACIONES DE LOS MÉTODOS EMPLEADOS.....</b>	<b>18</b>
IV.1. Adquisición de los datos.....	18
IV.2. Obtención de las correlaciones cruzadas de ruido sísmico, CCR.....	20
IV.2.1. Procesado de los datos de ruido (Etapa 1).....	22
IV.2.2. Obtención del tensor de Green (Etapa 2).....	23
IV.2.3. Calibración de las amplitudes y verificación de las CCR.....	25
IV.3. Simulación Estocástica.....	30
IV.4. <i>Matched filter</i> .....	36
IV.5. Construcción del escenario sísmico.....	39
IV.6. Espectros de respuesta y parámetros sísmicos calculados.....	47
<b>CAPÍTULO V.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
V.1. Sismograma sintético en bajas frecuencias por medio de las CCR.....	52
V.2. Sismograma sintético en altas frecuencias.....	56
V.3. Escenario sísmico y parámetros sísmicos.....	57
<b>CAPÍTULO VI.- CONCLUSIONES.....</b>	<b>62</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>70</b>
Anexo 1. Análisis para diferentes anchos de banda para el día 28 de junio de 2013 del elemento del tensor de Green (RR), la frecuencia con un ancho de 0.2 a 0.4 Hz muestra un comportamiento similar a lo que podría ser la recuperación de la función de Green.....	71
Anexo 2. Sismicidad reportada por el SSN para el estado de Hidalgo 2013.....	72
Anexo 3. Sismicidad registrada por la red Temporal de velocidad instalada por el Instituto de Ingeniería.....	73
Anexo 4. Correlaciones por día de cada uno de los elementos del tensor de Green.....	74
Anexo 5. Comprobación de los sismogramas sintéticos por medio de las correlaciones cruzadas para los siguientes sismos registrados en la red temporal del Instituto de Ingeniería.....	78
Anexo 6. Pasos para obtener el sismo elemento a partir del <i>matched filter</i> .....	80
Anexo 7. Efectos provocados por explosiones en refinerías y componentes vulnerables de plantas.....	84

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO II.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

<b>Figura II.1a.</b> Movimiento de la onda de Rayleigh: movimiento de partícula definido en el plano de la componente vertical y la componente radial (Modificado de Lay y Wallace, 1995).....	3
<b>Figura II.1b.</b> Movimiento de la onda de Rayleigh: polarización de la onda Rayleigh (Modificado de Lay y Wallace, 1995).....	3
<b>Figura II.2.</b> Movimiento de la onda Love (Modificado de Lay y Wallace, 1995).....	4
<b>Figura II.3.</b> Difracciones múltiples de la fuente.....	4
<b>Figura II.4.</b> Campo difuso (Modificado de Lobkis y Weaver, 2001).....	5
<b>Figura II.5.</b> Representación esquemática del método de la Función de Green Empírica (Modificada de Irikura, 1986).....	9
<b>Figura II.6.</b> Representación para la determinación del espectro de respuesta (Modificada de Kramer, 1996).....	10

### CAPÍTULO III.- ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

<b>Figura III.1.</b> Provincias Fisiográficas de Hidalgo (INEGI, 2012).....	11
<b>Figura III.2.</b> Geología del Estado de México (INEGI, 2009).....	12
<b>Figura III.3.</b> Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (Tomado de Langridge et al., 2000).....	13
<b>Figura III.4.</b> Graben de Acambay (Modificado de Langridge et al., 2000).....	13
<b>Figura III.5.</b> Periodo de Recurrencia para la falla Acambay-Tixmadejé, el evento I corresponde al sismo de 1912 (Modificado de Langridge et al., 2000).....	15
<b>Figura III.6.</b> Mapa de isosistas de Mercalli Modificada para el sismo del 19 de noviembre, 1912, Refinería Miguel Hidalgo (triángulo rojo), (Modificado de Suter et al. 1996).....	16

### CAPÍTULO IV.- DESCRIPCIÓN Y APLICACIONES DE LOS MÉTODOS EMPLEADOS

<b>Figura IV.1.</b> Localización geográfica de las cuatro estaciones temporales.....	19
<b>Figura IV.2.</b> Cronograma de grabación de las cuatro estaciones temporales por semana.....	19
<b>Figura IV.3.</b> Estaciones temporales: refinería y Temascalcingo.....	20
<b>Figura IV.4.</b> Procesado de los datos de ruido de manera individual. 1) Lectura de datos. 2) Rotación de las componentes. 3) Eliminación de la media. 4) Eliminación de la línea de tendencia. 5) Filtro pasa bandas Butterworth de 0.2 a 0.4 Hz. 6) Normalización temporal (1-bit). La imagen	

corresponde al registro de las 10:00 horas del día 10 de Octubre del 2013 de la componente Radial de la estación Temascalcingo.....	23
<b>Figura IV.5.</b> Apilado de los elementos del tensor de Green para 60 días de grabación, correspondientes a la ecuación 4.5 con un filtro pasa bandas Butterworth de 0.2 a 0.4 Hz.....	24
<b>Figura IV.6a.</b> Sismo utilizado para la verificación de las correlaciones cruzadas: Sismo del 19 de septiembre de 2013 componente transversal.....	27
<b>Figura IV.6b.</b> Sismo utilizado para la verificación de las correlaciones cruzadas: Sismo del 23 septiembre de 2013 componente radial.....	28
<b>Figura IV.7.</b> Sismogramas sintéticos en bajas frecuencias de 0.2 a 0.4 Hz obtenidos por medio de las relaciones de la ecuación (4.6).....	29
<b>Figura IV.8a.</b> Verificación de la onda Rayleigh: Desfasamiento de $90^\circ$ entre ambas componentes (radial y vertical).....	29
<b>Figura IV.8b.</b> Verificación de la onda Rayleigh: movimiento de la partícula, retrogrado elíptico.....	29
<b>Figura IV.9a.</b> Sismo del 23 de septiembre de 2013 registrado en la refinería (ver tabla IV.4): sismograma de velocidad rotado, en sus tres componentes (radial, transversal y vertical). La componente radial, transversal y vertical se representa en color negro, rojo y verde respectivamente.....	33
<b>Figura IV.9b.</b> Sismo del 23 de septiembre de 2013 registrado en la refinería (ver tabla IV.4): espectro de aceleración con una frecuencia de corte cercana a 1.1 Hz. La componente radial, transversal y vertical se representa en color negro, rojo y verde respectivamente.....	33
<b>Figura IV.9c.</b> Sismo del 23 de septiembre de 2013 registrado en la refinería (ver tabla IV.4): espectro de desplazamiento con una frecuencia de corte cercana a 1.1 Hz y corregido por dispersión geométrica. La componente radial, transversal y vertical se representa en color negro, rojo y verde respectivamente.....	33
<b>Figura IV.10a.</b> Sismo del 23 de septiembre de 2013 registrado en Temascalcingo (ver tabla IV.4): sismograma de velocidad rotado, en sus tres componentes (radial, transversal y vertical). La componente radial, transversal y vertical se representa en color negro, rojo y verde respectivamente.....	34
<b>Figura IV.10b.</b> Sismo del 23 de septiembre de 2013 registrado en Temascalcingo (ver tabla IV.4): espectro de aceleración con una frecuencia de corte cercana a 1.1 Hz. La componente radial, transversal y vertical se representa en color negro, rojo y verde respectivamente.....	34
<b>Figura IV.10c.</b> Sismo del 23 de septiembre de 2013 registrado en Temascalcingo (ver tabla IV.4): espectro de desplazamiento con una frecuencia de corte cercana a 1.1 Hz y corregido por dispersión geométrica. La componente radial, transversal y vertical se representa en color negro, rojo y verde respectivamente.....	34
<b>Figura IV.11a.</b> Comparación del sismo del 23 de septiembre de 2013 para la estación de la refinería, 1; componente radial, 2; componente transversal. En color negro se tiene la aceleración	



estocástica y en color verde la aceleración observada.....	35
<b>Figura IV.11b.</b> Comparación del sismo del 23 de septiembre de 2013 para la estación de Temascalcingo, 1; componente radial, 2; componente transversal. En color negro se tiene la aceleración estocástica y en color verde la aceleración observada.....	35
<b>Figura IV.12.</b> Registro sintético en altas frecuencias en la refinería Miguel Hidalgo, de un sismo hipotético de M4.1 ocurrido en el graban de Acambay.....	36
<b>Figura IV.13.</b> Análisis de los espectros de aceleración para definir el <i>matched filter</i> . Las flechas rojas son los límites en frecuencia donde va operar el <i>matched filter</i> , la primera flecha encuentra a 0.4 Hz y la segunda a 0.6 Hz.....	37
<b>Figura IV.14.</b> <i>Matched filter</i> empleado.....	37
<b>Figura IV.15a.</b> Secuencia para la obtención del sismograma sintético: Lectura del sismo en bajas y alta frecuencia.....	38
<b>Figura IV.15b.</b> Secuencia para la obtención del sismograma sintético: aplicación del <i>matched filter</i> (espectro de amplitud).....	38
<b>Figura IV.15c.</b> Secuencia para la obtención del sismograma sintético: obtención de la parte real e imaginaria de la señal.....	38
<b>Figura IV.15d.</b> Secuencia para la obtención del sismograma sintético: Sismograma sintético....	38
<b>Figura IV.16.</b> Sismogramas sintéticos obtenidos después de aplicar el <i>matched filter</i> para las componentes horizontales; radial (color azul) y transversal (color rojo).....	39
<b>Figura IV.17.</b> Representación del modelo de falla propuesto, visto en un sistema de referencia (rumbo, echado).....	40
<b>Figura IV.18.</b> Atenuación de Intensidad con respecto a la distancia epicentral para los sismos estudiados por Suter <i>et al.</i> (1996), en color rojo se tiene la ley de atenuación de intensidad para el sismo de Acambay en 1912 (Modificado de Suter <i>et al.</i> , 1996).....	41
<b>Figura IV.19.</b> Registros sintéticos para el escenario sísmico con inicio de ruptura en (17,8) que corresponde con la localización del hipocentro del sismo de 1912, para las componentes horizontales (Radial y Transversal); aceleración, velocidad y desplazamiento. Se muestra con una estrella roja el máximo valor para cada registro.....	42
<b>Figura IV.20a.</b> Ajuste para parámetros de aceleración máxima con la IMM (Modificado de Sandoval <i>et al.</i> , 2013).....	44
<b>Figura IV.20b.</b> Ajuste para parámetros de velocidad máxima con la IMM (Modificado de Sandoval <i>et al.</i> , 2013).....	44
<b>Figura IV.21.</b> Mapa de isosistas para el temblor de 1912 en Acambay, triangulo rojo refinería de Miguel Hidalgo.....	45

**Figura IV.22.** Registros sintéticos para el escenario sísmico (1,25) para las componentes horizontales (Radial y Transversal); aceleración, velocidad y desplazamiento. Se muestra con una estrella roja el máximo valor para cada registro.....46

**Figura IV.23a.** Espectros de respuesta para las componentes horizontales: radial (color rojo) y transversal (color negro), para el escenario sísmico (17,8).....47

**Figura IV.23b.** Espectros de respuesta para las componentes horizontales: radial (color rojo) y transversal (color negro), para el escenario sísmico (1,25).....47

**Figura IV.24.** Gráfico de Husid y duración significativa (DS), del 5% al 95% de la duración del registro sintético del escenario (17,8) para la componente radial.....48

**Figura IV.25.** Representación propuesta para la geometría de la falla de Acambay-Tixmadejé, y epicentros de los siguientes escenarios: (1,25) escenario que presentó las mayores aceleraciones y (17,8) donde se originó el sismo de 1912.....51

## CAPÍTULO V.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

**Figura V.1a.** Comparación de los distintos días promedios de las correlaciones cruzadas; 15 días (color negro), 30 días (color rojo) y 60 días (color verde), para el elemento *RR*.....52

**Figura V.1b.** Comparación de los distintos días promedios de las correlaciones cruzadas; 15 días (color negro), 30 días (color rojo) y 60 días (color verde), para el elemento *RV*.....52

**Figura V.1c.** Comparación de los distintos días promedios de las correlaciones cruzadas; 15 días (color negro), 30 días (color rojo) y 60 días (color verde), para el elemento *TT*.....53

**Figura V.1d.** Comparación de los distintos días promedios de las correlaciones cruzadas; 15 días (color negro), 30 días (color rojo) y 60 días (color verde), para el elemento *VR*.....53

**Figura V.1e.** Comparación de los distintos días promedios de las correlaciones cruzadas; 15 días (color negro), 30 días (color rojo) y 60 días (color verde), para el elemento *VV*.....53

**Figura V.2.** Comparación entre los elementos del tensor de Green: *RV* con contribución en la parte no causal (color negro) y *VR* con contribución hacia la parte causal (color rojo).....55

**Figura V.3a.** Comparación entre procesamientos para el elemento *RR* del tensor de Green: proceso empleado en la tesis (ver IV.2.1).....55

**Figura V.3b.** Comparación entre procesamientos para el elemento *RR* del tensor de Green: procesamiento modificado, empleado primero la normalización temporal y después el filtro pasa bandas.....55

**Figura V.4.** Función de transferencia considerando un periodo igual a  $T=1.6s$ .....59

**Figura V.5.** Espectros de amplitud de aceleración para los escenarios sísmicos (17,8) y (1,25)....60

**Figura V.6.** Radios de afectación para el compresor 8 (Modificado de Sandoval, 2014).....61

## LISTA DE TABLAS

### CAPÍTULO III.- ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

**Tabla III.1.** Zonas vulnerables de la refinería Miguel Hidalgo (Sandoval, 2014).....17

### CAPÍTULO IV.- DESCRIPCIÓN Y APLICACIONES DE LOS MÉTODOS EMPLEADOS

**Tabla IV.1.** Características de los sismógrafos Güralp ® CMG-40T.....18

**Tabla IV.2.** Coordenadas de las cuatro estaciones temporales.....19

**Tabla IV.3.** Período de grabación coincidente en tiempo entre la estación de Temascalcingo Edo. de México y la estación de la Refinería, Tula de Allende, Hidalgo.....21

**Tabla IV.4.** Sismos utilizados para la verificación de las correlaciones cruzadas (SSN).....27

**Tabla IV.5.** Relación de intensidades, aceleraciones máximas y velocidades máximas, donde  $g$  es la gravedad ( $g=981$  cm/s), (Modificada de Wald *et al.*, 2005).....44

**Tabla IV.6.** Relaciones de IMM para el sismo (17,8) lugar donde se presentó el terremoto de 1912.....45

**Tabla IV.7.** Relaciones de IMM para el sismo ubicado en (1,25).....47

**Tabla IV.8.** Características del escenario y parámetros de interés para la evaluación de estructuras estimadas para el escenario (17,8).....49

**Tabla IV.9.** Características del escenario y parámetros de interés para la evaluación de estructuras estimadas para el escenario (1,25).....50

## RESUMEN

El 19 de noviembre de 1912 ocurrió un sismo de gran magnitud (M6.9) en el graben de Acambay, Estado de México, el cual provocó grandes daños a su paso y alcanzó desplazamientos en superficie de hasta 50 cm. De acuerdo con reportes contemporáneos, el terremoto provocó 164 muertes y derrumbes de numerosas casas. Sin embargo, al paso de los años se construyeron importantes edificaciones, tal es el caso de la refinería Miguel Hidalgo que se encuentra a una distancia relativamente cercana al graben de Acambay (~ 70 km). Por tal razón, en la presente tesis se obtuvieron parámetros que son de utilidad en ingeniería sísmica para estimar las posibles afectaciones que tendría la refinería Miguel Hidalgo, ubicada en el estado de Hidalgo tras el paso de un sismo originado en el graben de Acambay de M6.9 tal como el ocurrido en 1912.

El uso de la función de Green empírica, propuesta por Hartzell (1978) se utilizó para simular un evento de M6.9 empleando el método propuesto por Irikura (1986). Debido a la poca actividad sísmica no se contó con un sismo pequeño o un sismo elemento, por lo que se generó un sismograma sintético de M4.1. El sismograma sintético fue construido en dos etapas: para bajas frecuencias se realizaron correlaciones cruzadas de ruido sísmico mientras que para altas frecuencias se llevó a cabo una simulación estocástica, posteriormente se mezclaron las señales mediante una técnica conocida como *matched filter* para recuperar toda la banda de frecuencias del sismo, este paso forma parte de la función Híbrida de Green método propuesto por Kamae *et al.* (1998).

Para bajas frecuencias se efectuaron correlaciones cruzadas durante 60 días de grabación entre las estaciones temporales de velocidad de Temascalcingo, Estado de México y la estación de la refinería Miguel Hidalgo, ambas pertenecientes al arreglo temporal instalado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. El periodo de grabación fue del 25 de junio al 30 de octubre del 2013. El procesamiento para la recuperación de la función de Green tomó como base la metodología propuesta por Bensen *et al.* (2007), es decir, lectura de la señal, rotación al sistema coordinado Radial-Transversal-Vertical, corrección por línea base, filtro pasa bandas, suavizado de bordes, normalización temporal *1-bit*, correlación cruzada y promedio de todos los días de correlación.

Para la recuperación de la amplitud tras perderla en la normalización temporal *1-bit* en la parte del procesamiento, se utilizó el factor de calidad propuesto por Ortega *et al.* (2003),  $Q(f) = 180f^{0.66}$  para la región del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) y se ajustó para un sismo de M4.1. Una vez obtenidos los elementos del tensor de Green con las relaciones de Denolle *et al.* (2013) se calcularon los registros en sus tres componentes (radial, transversal y vertical).

Para altas frecuencias se construyó la función de Green estocástica siguiendo la metodología de Boore (1983). Los parámetros empleados para la simulación fueron los siguientes: velocidad de onda de corte de  $V_s = 3.4$  km/s, un factor de calidad de  $Q(f) = 180f^{0.66}$ , un promedio del patrón de radiación de 0.55, una amplificación en superficie libre de  $F = 2.0$ , una densidad de  $\rho = 2.98$  g/cm<sup>3</sup> y una dispersión geométrica de  $1/R$ .

Teniendo ambos registros en bajas y altas frecuencias, se aplicó la técnica de *matched filter* para completar la banda de frecuencias (*i.e.* de 0 a 50 Hz) y así obtener el sismo elemento de M4.1. Para la construcción del escenario sísmico se empleó la técnica de Irikura (1986), en la que se consideró una falla cuadrada de 47.75 km de largo, una propagación de ruptura radial, una velocidad de ruptura de 3.06 km/s, y mecanismo focal con rumbo de 100°, echado de 66° y un ángulo de desplazamiento de -138°.

Con estos parámetros se obtuvieron los registros sintéticos. Debido a que no se contó con algún sismo observado para validar el modelo, se simuló el evento de 1912 y a partir de relaciones de intensidad (Wald *et al.*, 2005; Sandoval *et al.*, 2013; y Arias, 1969) se estimó la Intensidad de Mercalli Modificada (IMM) para la refinera. Comparamos nuestro resultado con el mapa de isosistas obtenido por Suter *et al.* (1996) para el sismo de 1912. En acuerdo con Suter, nuestros resultados también muestran una IMM de V para la refinera Miguel Hidalgo.

Con esta validación del sismograma sintético a través del IMM, se buscó el escenario que presentará las mayores aceleraciones, el cuál se encontró a una localización epicentral de 19.86°N, 100.14°W y a una profundidad de 42.7494 km, para este escenario se estimó una IMM de VI. A partir de este registro se obtuvieron parámetros que son de interés para estimar posibles daños a la refinera Miguel Hidalgo como son: aceleración pico (PGA), velocidad pico (PGV), espectros de respuesta, periodo dominante y duración significativa del evento.

## ABSTRACT

On November 19, 1912, an earthquake of magnitude M6.9 occurred in the graben of Acambay, State of Mexico, which caused extensive damage and reached displacements of up to 50 cm on the surface. According to contemporary reports, the earthquake caused 164 deaths and collapse of numerous houses. However, as time passed by important buildings, such as the Miguel Hidalgo refinery, have been built relatively close to the Acambay graben (~70 km). For this reason, in this thesis we obtain parameters that are useful in earthquake engineering to estimate the possible effects that the Miguel Hidalgo refinery, located in State of Hidalgo, would have if an earthquake of M6.9 such as occurred in 1912 will occur in the Acambay graben.

The empirical Green's function, given by Hartzell (1978), was used to simulate the event of M6.9 using the methodology proposed by Irikura (1986). Due to the low seismic activity a no small earthquake or element earthquake was recorded and for this reason we generated a synthetic seismogram for a hypothetical earthquake of M4.1. The synthetic seismogram was constructed in two stages: for low frequencies a cross correlations of noise was made, while for high frequencies a stochastic simulation was carried out. Subsequently the signals were mixed by a technique known as *matched filter* to recover the entire frequency band of the earthquake, this step is part of the Hybrid Green's function method proposed by Kamae *et al.* (1998).

For low frequencies we made cross correlations for 60 days of recordings between the temporal seismic stations in Temascalcingo and at the Miguel Hidalgo refinery, both belonging to a temporary array of the Institute of Engineering of UNAM. The recording period was from 25 June to 30 October 2013. The procedure for recovering the Green function was based on the methodology proposed by Bensen *et al.* (2007), *i.e.*, reading the raw data, rotate to the coordinate system Radial-Transverse-Vertical, then apply: a baseline correction, a band-pass filter, a taper, and a temporal normalization (*I-bit*), then cross-correlate the records and finally average the cross-correlations for all the days of recording.

To recover the amplitude after losing it in the temporal *I-bit* normalization part of the processing, we used the quality factor proposed by Ortega *et al.* (2003),  $Q(f) = 180f^{0.66}$  for the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB), calibrated to an earthquake of M4.1. After obtaining the elements of the Green's tensor we obtained three components records (radial, transverse and vertical), using the relations of Denolle *et al.* (2013).

For high frequencies we built the stochastic Green function, using the method proposed by Boore (1983). The parameters used for the simulation were: shear wave velocity  $V_s = 3.4$  km/s, quality factor of  $Q(f) = 180f^{0.66}$ , average radiation pattern of  $R = 0.55$ , free surface amplification of  $F = 2.0$ , density of  $\rho = 2.98$  g / cm<sup>3</sup> and geometrical spreading of  $1 / R$ .

Having records of both low and high frequencies, a *matched filter* technique was applied to complete the frequency band (*i.e.* of 0 a 50 Hz) and to obtain an element earthquake of M4.1. For the construction of a seismic scenario we used the technique Irikura (1986),

considering a square fault of 47.75 km long, a radial rupture propagation, rupture velocity of 3.06 m/s, and focal mechanism with strike of  $280^\circ$ , dip of  $66^\circ$  and rake of  $-138^\circ$ .

With these parameters we obtained synthetic seismograms. As there is no observed earthquake to validate the model, the 1912 event was simulated and then with relationships of intensity (Wald *et al.*, 2005; Sandoval *et al.*, 2013; and Arias, 1969), we estimated the Modified Mercalli Intensity (MMI) for the refinery. We compare our results with isoseismal map obtained by Suter *et al.* (1996) for the earthquake of 1912. In agreement with Suter, our results showed a MMI V for the Miguel Hidalgo refinery.

With this validation of synthetic seismogram through of MMI, we search the seismic scenario with the highest accelerations. The scenario was found at epicenter location of  $19.86^\circ\text{N}$ ,  $100.14^\circ\text{W}$  at a depth of 42.7494 km. This scenario has an estimated MMI of VI. From this record, we obtained parameters that are of interest to estimate possible seismic hazard to the Miguel Hidalgo refinery, such as: the peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV), response spectra, dominant period and significant event duration.

# I. INTRODUCCIÓN

Los sismos en México son frecuentes debido a la zona geográfica en que se ubica. De acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional aproximadamente el 70% de la actividad sísmica se originan frente a las costas de Guerrero y Oaxaca. Estos estados junto con Jalisco, Colima, Michoacán, y Chiapas se encuentran a lo largo de la costa del Pacífico origen de los sismos de gran magnitud. Aunque en menor cantidad, se han presentado sismos considerables en el centro del país en los estados de Veracruz, Puebla y Estado de México.

Un ejemplo de los sismos originados en el centro del país fue el sismo ocurrido en la ciudad de Orizaba Veracruz el 28 de Agosto de 1973, cuya magnitud se estimó de 7.3. Otro sismo considerable y objeto de la presente tesis, fue el que ocurrió en el graben de Acambay en el Estado de México, el 19 de Noviembre de 1912 cuya magnitud estimada fue de 6.9. Los sismos antes mencionados se encuentran entre los más representativos de la historia sísmica de México debido a los grandes daños que ocasionaron.

Eventos de magnitudes grandes generalmente producen pérdidas humanas y económicas. De acuerdo con reportes contemporáneos el sismo de Acambay dejó más de 700 víctimas entre muertos y heridos en el Estado de México y el Distrito Federal, y una pérdida económica de casi 29 millones de pesos mexicanos (Lugo *et al.*, 2012). En el transcurso de los años la región de Acambay y zonas aledañas han crecido en población y en sus alrededores se han construido edificaciones, destacando la refinería Miguel Hidalgo, ubicada en el municipio de Tula de Allende, Hidalgo aproximadamente a 70 kilómetros del graben de Acambay.

La refinería Miguel Hidalgo es considerada como una de las más importantes en el país por su capacidad instalada y por la porción del mercado que controla. La refinería procesa el 24% de crudo total que se refina en México; además cuenta con una capacidad de refinación de 325,000 barriles por día. En ella se manejan productos altamente inflamables a muy diversas condiciones de presión y temperatura. Aunque en la refinería se protege al personal en todos los niveles, poco se sabe de las afectaciones que tendría la refinería si ocurriera un evento de gran magnitud. Las zonas más vulnerables de la refinería Miguel Hidalgo ante un sismo se localizan en los compresores (Sandoval, 2014), debido a que trabajan a presiones muy altas.

Al igual que las construcciones importantes las refinerías petroleras deben de prever cualquier desastre natural en su construcción como después de su edificación. Sin embargo, no se han escapado de las devastaciones provocadas por sismos. Entre los principales siniestros se encuentran los incendios como el que presentó la refinería de la ciudad costera de Tomakomai, Japón en 2003. Por tal razón las refinerías deben de contar con un estudio de peligro sísmico para minimizar posibles daños.



El estudio de peligro sísmico toma en consideración la geología del lugar, la sismicidad de las fuentes, el efecto de sitio, para hacer una estimación de movimientos fuertes y poder calcular la amenaza ante un sismo. Un método para estimar movimientos fuertes es por medio de la Función de Green Empírica método propuesto por Hartzell (1978). La metodología tiene por objeto simular movimientos fuertes a partir de una réplica o premonitor, este sismo con magnitud menor presenta características geométricas y dinámicas similares a un evento de mayor magnitud, así que el sismo simulado también estará afectado por el trayecto y la respuesta instrumental de la misma manera. La simulación genera sismogramas sintéticos.

En sismología, la generación de sismogramas sintéticos se pueden distinguir tres factores principales: el tipo de fuente donde se origina el sismo, la respuesta del medio por el que se transmiten las ondas elásticas y su registro mediante un sismógrafo, evaluando estos tres factores podemos generar sismogramas sintéticos que son validados a través de una comparación con sismos observados. Los sismogramas sintéticos contribuyen significativamente a la interpretación de datos ya que un buen ajuste, ayuda a conocer mejor el medio en que se producen los sismos además de poder estimar posibles daños con base en los registros sintéticos.

Por tal motivo, la presente tesis tiene como objetivos principales:

1. Generar un registro sintético en la refinería Miguel Hidalgo de un sismo hipotético originado en el graben de Acambay de M6.9.
2. Calcular el peligro sísmico a partir del registro sintético con el fin de conocer la respuesta de la refinería ante un escenario sísmico de magnitud M6.9 originado en el graben de Acambay.

La tesis está organizada en 5 capítulos. En el capítulo II se explican los conceptos básicos en los cuales está sustentada la tesis. El capítulo III muestra la geología del lugar así como las características de la refinería Miguel Hidalgo, posteriormente se presentan los métodos empleados en el capítulo IV, el capítulo V se hace un análisis de nuestros resultados y finalmente en el capítulo VI se presentan las conclusiones y observaciones de la tesis.

## II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se describen los conceptos teóricos que se requieren para la obtención del tensor de Green a través de las correlaciones cruzadas de ruido, así como la construcción de un escenario sísmico por medio de la función de Green empírica.

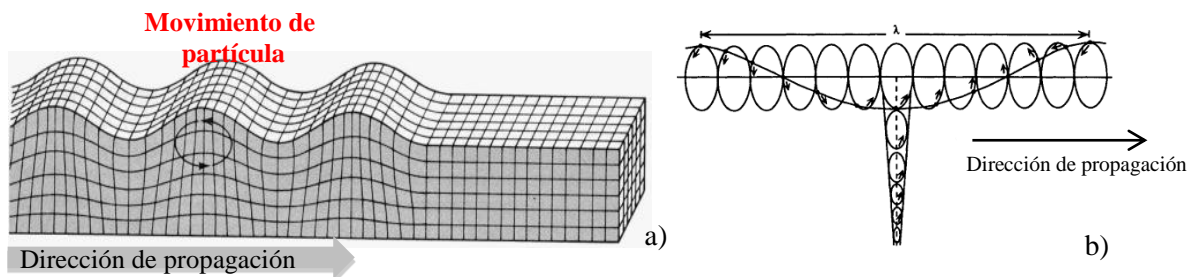
### II.1. Ondas Superficiales

Las ondas superficiales se propagan en dirección paralela a la superficie de la tierra. Estas ondas alcanzan su amplitud máxima en la superficie libre y disminuyen exponencialmente con la profundidad, por lo que la amplitud sobre la profundidad es estacionaria con la posición horizontal. Usualmente las ondas superficiales se encuentran en un rango de periodo de 10-200 segundos en los sismogramas, por lo que mucha información sobre largos periodos de espectros de fuente sísmica es obtenida de ondas superficiales (Aki y Richards, 2002).

La energía de las ondas superficiales es concentrada cerca de la superficie de la tierra, como resultado de la dispersión geométrica. Su energía de dispersión es en dos dimensiones y decae con la distancia de la fuente ( $r$ ) aproximadamente en un factor de  $1/r$ , mientras la energía de dispersión de las ondas de cuerpo es en tres dimensiones y decae aproximadamente como  $1/r^2$  (Stein y Wysession, 2003).

La velocidad de fase, de grupo y atenuación son características de las ondas superficiales han sido útiles para delimitar la estructura de la corteza, y manto superior en varias regiones de la Tierra.

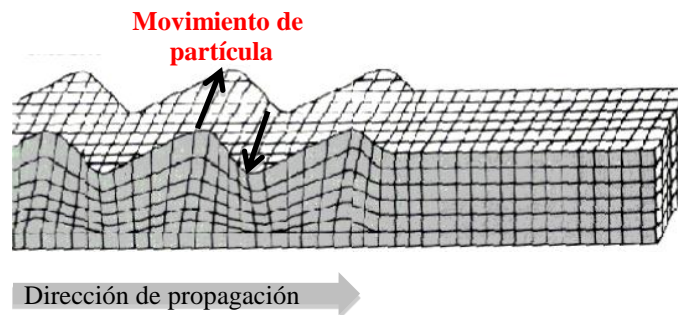
Existen dos tipos de ondas superficiales: la onda Rayleigh y la onda Love. La onda Rayleigh se produce al interactuar las ondas P y SV en una superficie libre, la cual se propaga en un plano definido por el eje radial y eje vertical. La velocidad de onda Rayleigh es menor que la onda S. Su polarización es retrógrada hacia una profundidad dada a partir de la cual la polarización se vuelve prograda, en función del de la longitud de onda  $\lambda$  (figura II.1).



**Figura II.1. Movimiento de la onda de Rayleigh. En a) se tiene el movimiento de partícula definido en el plano de la componente vertical y la componente radial y en b) polarización de la onda Rayleigh (Modificada de Lay y Wallace, 1995).**

El movimiento de la partícula es una elipse cuyo eje mayor se encuentra en la dirección vertical, la razón entre ambos ejes; mayor y menor es de 1.5. La longitud de onda Rayleigh  $\lambda$  es la distancia entre el movimiento de partícula superficial al mismo punto en un ciclo elíptico (Figura II.1b).

La onda Love resulta de las ondas SH atrapadas cerca de la superficie (Stein y Wysession, 2003), la onda se propaga en un plano horizontal y provoca deformaciones tangenciales. La solución de la onda Love depende de la frecuencia. Las ondas a muy alta frecuencia tienen desplazamientos cercanos a la superficie, mientras que ondas de baja frecuencia tienen desplazamientos más profundos (figura II.2).

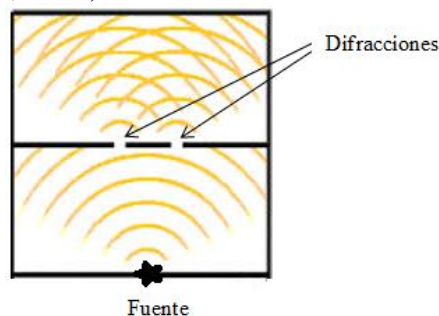


**Figura II.2. Movimiento de la onda Love (Modificada de Lay y Wallace, 1995).**

Las ondas Love son siempre dispersivas porque requieren al menos de una capa de baja velocidad sobre un semiespacio para existir. Su movimiento de la partícula es perpendicular a la dirección de propagación (figura II.2), por lo que en un registro las ondas Love llegan en la componente transversal mientras que las ondas Rayleigh llegan a las componentes: vertical y radial.

## II.2. Campo Difuso

En estudios de acústica se define el campo difuso como un campo con amplitudes modales aleatorias no correlacionadas y con varianzas iguales (Lobkis *et al.*, 2001). Para la sismología un campo difuso puede entenderse como aquel originado por difracciones múltiples debidas, tanto a la heterogeneidad del medio y/o por un conjunto de fuentes no relacionadas entre sí (figura II.3). En un campo difuso el flujo neto de energía es nulo y en condiciones ideales la proporción en la que se reparte la energía entre las ondas P y S se equilibra de una manera universal, independiente de los detalles específicos de la difracción de las ondas (Sánchez-Sesma, 2007).



**Figura II.3. Difracciones múltiples de la fuente.**

El ruido sísmico sobre largos periodos de tiempo así como la coda de un sismo, se consideran como campos difusos. Shapiro y Campillo (2004) y Shapiro *et al.* (2005) suponen que la distribución aleatoria de las fuentes ambientales se promedia al emplear datos de ruido sísmico durante largos periodos de tiempo. Esta información es procesada por medio de correlaciones cruzadas entre pares de estaciones con lo cual se obtiene una señal coherente (figura II.4).

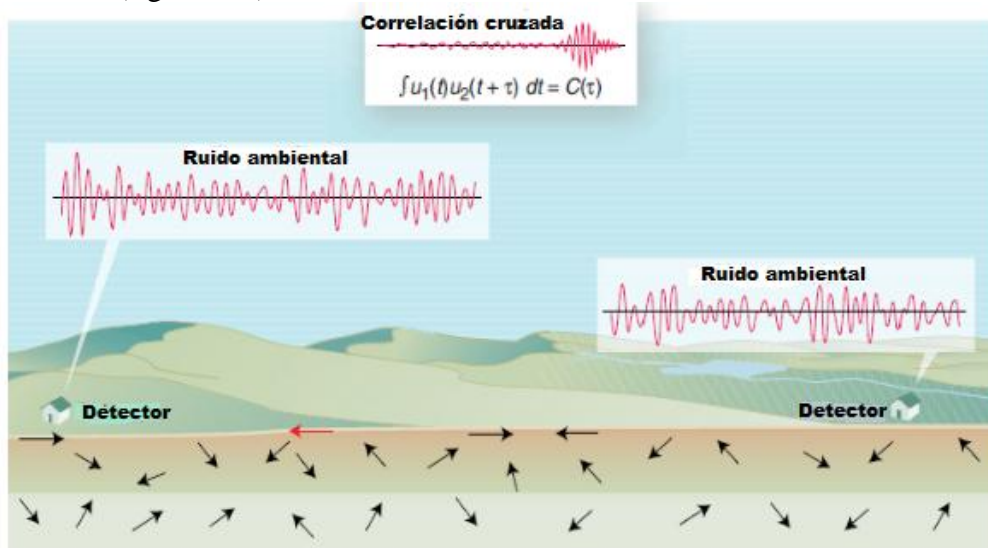


Figura II.4. Campo difuso (Modificado de Lobkis y Weaver, 2001).

Un campo difuso en un cuerpo finito elástico (por ejemplo la Tierra), se puede expresar en su forma modal como (Lobkis y Weaver, 2001):

$$\phi(x, t) = \Re \sum_{n=1}^{\infty} a_n u_n(x) e^{i\omega_n t}. \quad (2.1)$$

Donde  $x$  es la posición,  $t$  es el tiempo,  $u_n$  son funciones propias,  $\omega_n$  son frecuencias propias de una Tierra real,  $a_n$  son funciones de excitación modal; representa la parte real de la suma del producto de las amplitudes complejas modales ( $a_n$ ) por los modos ortogonales reales ( $u_n$ ).

Si el campo es elastodinámico,  $u_n$  y  $\phi$  son vectores: el modo  $u_n$  es real y ortogonal por lo que tenemos que:

$$\int \rho u_n u_m d^3 x = \delta_{nm}. \quad (2.2)$$

Si el campo  $\phi$  es difuso y con una densidad espectral de potencia real, las amplitudes modales son variables aleatorias no correlacionadas, como se muestra:

$$\langle a_n a_m^* \rangle = \delta_{nm} F(\omega_n). \quad (2.3)$$

Donde  $F$  es una función suave relacionada con la densidad de energía espectral, equivalente a  $1/2F\langle u^2 \rangle$  veces la densidad modal.

### II.3. Correlaciones cruzadas y tensor de Green

Las correlaciones de coda de eventos y de ruido sísmico son de interés, debido a que es posible la recuperación de la Función de Green mediante el promedio de la correlación cruzada de registros de movimiento (Sánchez-Sesma, 2007).

La correlación cruzada mide el grado de similitud entre dos señales con el objetivo de extraer información que dependa de las correlaciones cruzadas, en nuestro caso recuperar la función de Green. Si se tienen dos secuencias de señales reales  $x(n)$  y  $y(n)$  donde cada una tiene energía finita, la correlación cruzada  $x(n)$  e  $y(n)$  es una secuencia  $C_{xy}(l)$  la cual está definida como:

$$C_{xy}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n-l), l = 0, \pm 1, 2\pm, \dots \quad (2.4)$$

es equivalente a

$$C_{xy}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n+l)y(n), l = 0, \pm 1, 2\pm, \dots \quad (2.5)$$

Donde  $l$  es el parámetro de desplazamiento en tiempo (o retraso), los subíndices  $xy$  de la secuencia de correlación cruzada  $C_{xy}(l)$  indican que las secuencias o señales han sido correlacionadas. El orden de los subíndices, indica la dirección en la cual una secuencia es desplazada, con respecto a la otra. En la ecuación (2.4) la secuencia  $x(n)$  está sin desplazamiento a la izquierda y  $y(n)$  se desplaza cada  $l$  unidades, a la derecha para  $l$  positivo y a la izquierda para  $l$  negativo (Proakis y Manolakis, 1996).

Para la correlación de ruido sísmico Lobkis y Weaner (2001) proponen una manera simple de construir la correlación cruzada de los campos  $\phi(x)$  y  $\phi(y)$ , a partir de la definición de campo difuso vista en la ecuación (2.1), los símbolos ' $\langle \rangle$ ' indican la operación correlación cruzada entre los campos  $\phi(x)$  y  $\phi(y)$ :

$$\langle \phi(x, t), \phi(y, t + \tau) \rangle = \frac{1}{2} \Re \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(\omega_n) u_n(x) u_n(y) e^{-i\omega_n \tau}. \quad (2.6)$$

Donde  $F$ , es una función suave relacionada con la densidad de energía espectral (ecuación 2.3), y está multiplicado por la parte real  $\Re$  de la suma del producto de los modos ortogonales reales ( $u_n$ ) y el producto de senos y cosenos cuyo argumento tiene una parte imaginaria, las frecuencias propias ( $\omega_n$ ) y el desfase ( $\tau$ ). Los términos cruzados desaparecen en el promedio, de acuerdo a Shapiro y Campillo (2004).

El promedio azimutal de la correlación cruzada en 2 puntos, sujetos a un campo difuso de ondas elásticas, permite la Recuperación de la Función de Green. Si este concepto lo llevamos a correlacionar las tres componentes de cada estación (Este (E), Norte (N) y Vertical (Z)), obtendremos 9 correlaciones cruzadas, consiguiendo así el tensor de Green, de manera similar a la ecuación (2.6) tenemos:

$$\text{Tensor de Green} = \begin{pmatrix} E_1E_2 & E_1N_2 & E_1Z_2 \\ N_1E_2 & N_1N_2 & N_1Z_2 \\ Z_1E_2 & Z_1N_2 & Z_1Z_2 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

donde:

$$\begin{aligned} \langle \phi(E_1, t), \phi(E_2, t+\tau) \rangle &= E_1E_2 & \langle \phi(E_1, t), \phi(N_2, t+\tau) \rangle &= E_1N_2 & \langle \phi(E_1, t), \phi(Z_2, t+\tau) \rangle &= E_1Z_2 \\ \langle \phi(N_1, t), \phi(E_2, t+\tau) \rangle &= N_1E_2 & \langle \phi(N_1, t), \phi(N_2, t+\tau) \rangle &= N_1N_2 & \langle \phi(N_1, t), \phi(Z_2, t+\tau) \rangle &= N_1Z_2 \\ \langle \phi(Z_1, t), \phi(E_2, t+\tau) \rangle &= Z_1E_2 & \langle \phi(Z_1, t), \phi(N_2, t+\tau) \rangle &= Z_1N_2 & \langle \phi(Z_1, t), \phi(Z_2, t+\tau) \rangle &= Z_1Z_2 \end{aligned}$$

Los subíndices 1 y 2 indican las estaciones que se están correlacionadas.

## II.4. Función de Green Empírica

### II.4.1. Función de Green

La función de Green caracteriza a la estructura, es decir es la respuesta de la estructura ante un impulso. Las representaciones de las funciones de Green empíricas se expresan por cantidades de desplazamiento en el espacio y tiempo. Para encontrar el desplazamiento, se define la función elastodinámica de Green  $G_{ij}(x, t)$ , que describe la  $i$ -ésima componente del desplazamiento en un punto  $x$ , resultado de la fuerza  $F$  aplicada en el punto  $x_0$ , y en dirección  $j$ . La cual se expresa como:

$$u_i(x, t) = G_{ij}(x, t; x_0, t_0) F_j(x_0, t_0), \quad (2.9)$$

donde  $u$  es el desplazamiento,  $F$  es el vector de las fuerzas de cuerpo, y  $G$  es la función de Green elastodinámica.  $F$  representa a la función de la fuente sísmica. La ecuación (2.9) explica cómo se obtienen los desplazamientos en cualquier punto del espacio a partir de una perturbación  $F$ , que se desplaza a través del medio representado por la función de Green.

Si se considera que  $F$  es una constante y se toma la integral  $\int_0^\tau [\ ] d\tau$  de la ecuación (2.3), siguiendo el procedimiento de Sánchez-Sesma y Campillo (2006), es muy similar a la función de Green  $G_{xy}$  por lo que:

$$G_{xy}(\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) u_n(y) \frac{\text{sen} \omega_n \tau}{\omega_n} \quad \text{para } \tau > 0; \text{ para cualquier otro caso, } 0. \quad (2.10)$$

La ecuación (2.10) indica la propagación de  $x$  a  $y$ , de la actual función de Green, en comparación con la expresión 2.9 ahora se contemplan dos desplazamientos, además de que la fuerza  $F$  es una función suave que se obtiene de correlacionar dos amplitudes modales, también mantiene un retraso negativo  $\tau$ , por lo que el valor del retraso deber ser mayor a cero, ya que si presenta un valor distinto la función de Green es cero.

La Función de Green elastodinámica puede ser recuperada de manera experimental mediante el promedio de la correlación cruzada de un campo elástico difuso e isótropo, ya

sea por medio de difracciones múltiples o por un gran número de fuentes, tales como microsismos (Campillo y Paul, 2003; Shapiro y Campillo, 2004 y Shapiro *et al.*, 2005).

#### II.4.2. Método de la Función de Green Empírica

El método de la Función de Green Empírica fue propuesto por Hartzell (1978), y es aplicado para modelar movimientos fuertes de la Tierra, a partir de un registro de un premonitor o réplica como función de Green que está asociado con el sismo de mayor magnitud. Al sismo que funge como premonitor o réplica se le denomina sismo elemento, mientras que al sismo de mayor magnitud es conocido como sismo objetivo, estos sismos se modelan con una serie de puntos que se encuentran distribuidos en el plano de falla propuesto. La respuesta de cada uno de estos puntos de fuente se aproxima a los movimientos de la tierra con un premonitor o réplica que está cercano a la fuente en el plano de falla del sismo principal. Ambos sismos presentan características geométricas y dinámicas similares, por lo que el sismo modelado también estará afectado por el trayecto y la respuesta instrumental de la misma manera.

El sismo elemento y el sismo objetivo siguen el modelo espectral  $\omega^{-2}$  propuesto por Irikura (1986), por lo que de leyes de escalonamiento espectral  $\omega^{-2}$  se obtiene el número de subeventos necesarios  $N^3$  a partir de la relación entre los momentos sísmicos del sismo principal y de la réplica o premonitor que se usa como función de Green, donde  $N^3$  es igual al número de subfallas en la dirección del rumbo ( $N_x$ ), echado ( $N_w$ ) y del tiempo ( $N_t$ ):

$$N^3 = N_x \times N_w \times N_t. \quad (2.11)$$

El factor  $N_t$  se asocia a la relación de desplazamientos permanentes de ambos sismos como,  $D_{principal} = (N_t) \cdot d_{elemento}$  (Aki, 1967). Como se observa en la ecuación (2.11) el parámetro  $N$  está en función del área de la falla del sismo principal, ya que divide en  $N \times N$  subfallas y se puede determinar de la siguiente manera:

$$\frac{\bar{U}_0}{\bar{u}_0} = \frac{M_0}{m_0} = N^3, \quad (2.12)$$

$$\frac{\bar{A}_0}{\bar{a}_0} = \left( \frac{M_0}{m_0} \right)^{1/3} = N, \quad (2.13)$$

Donde para la ecuación (2.12),  $\bar{U}_0$  y  $\bar{u}_0$  son los niveles planos del espectro de desplazamiento en bajas frecuencias, para la ecuación (2.13),  $\bar{A}_0$  y  $\bar{a}_0$  indican los niveles planos de los espectros de Fourier de los registros de aceleración. En ambas ecuaciones  $M_0$  y  $m_0$  son los momentos sísmicos. Las letras mayúsculas indican que se trata del sismo objetivo y las letras minúsculas que se trata del sismo elemento.

Podemos expresar el movimiento sintético del sismo principal  $A(t)$ , utilizando la aceleración del sismo elemento  $a(t)$  como:

$$A(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left( \frac{r}{r_{ij}} \right) F_{ij}(t-t_{ij}) * a(t), \quad (2.14)$$

donde

$$F_{ij}(t-t_{ij}) = \delta(t-t_{ij}) + \frac{1}{n'} \sum_{k=1}^{(N_t-1)n'} \delta \left[ t-t_{ij} - \frac{(k-1)\tau}{(N_t-1)n'} \right], \quad (2.15)$$

$r$  : es la distancia de la estación al hipocentro de la réplica.

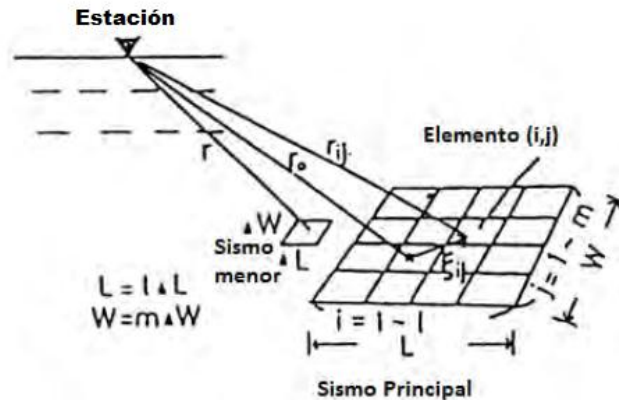
$r_{ij}$  : es la distancia de estación al elemento  $(i, j)$ .

$t_{ij}$  : es la suma del tiempo de retraso para para la ruptura del punto de salida del elemento  $(i,j)$  al sitio observado.

$\tau$  : es el tiempo de ascenso del evento (*rise time*).

$n'$  : es un número entero apropiado para eliminar periodicidad espuria.

En la figura II.5 se tiene la representación geométrica de la Función de Green Empírica, propuesta por Irikura, (1986).



**Figura II.5. Representación esquemática del método de la Función de Green Empírica (Modificada de Irikura, 1986).**

## II.5. Atenuación y factor de calidad, Q

Debido que la Tierra no es perfectamente elástica, la propagación de las ondas se va atenuando con el tiempo y distancia, debido a varios mecanismos de pérdidas de energía, como son la atenuación intrínseca, la atenuación extrínseca y la dispersión geométrica.

La atenuación intrínseca ocurre cuando el movimiento de la onda activa procesos que convierten la energía de la onda en otras formas de energía (calor). La atenuación extrínseca o scattering es causado por el campo de ondas interactuando con las heterogeneidades del medio. La dispersión geométrica es la energía que al alejarse de la fuente se distribuye en un área que se va acrecentando.



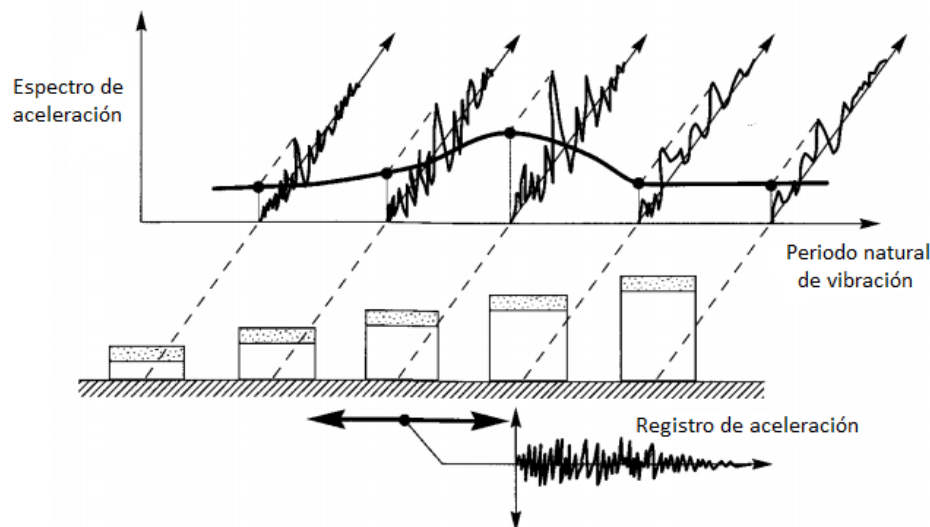
El factor de calidad  $Q$ , es utilizado para describir las propiedades físicas de un sistema que causa una perturbación para atenuar. El valor  $Q$  no es una medida de pérdida de energía por ciclo como usualmente se le asocia, sino más bien es una medida de la redistribución de la energía, el factor de calidad  $Q$  depende en gran medida de la frecuencia y es dependiente de la trayectoria. Aunque en un rango de 0.001 a 0.1 Hz es independiente de la frecuencia.

Se usa  $Q$  para describir el decaimiento de las ondas por atenuación intrínseca,  $Q^{-1}$  describe la relación entre el parte imaginaria y la parte real de la frecuencias ( $Q^{-1}=2\omega^*/\omega$ ). Grandes valores de  $Q$  implica poca atenuación, mientras  $Q$  se aproxima a cero, la atenuación es muy fuerte. El valor de  $Q$  para la onda P siempre será mayor que  $Q$  de la onda S.

## II.6. Espectro de respuesta

El espectro de respuesta es un parámetro de los más utilizados en ingeniería sísmica, ya que describe la máxima respuesta que produce una acción dinámica determinada en una estructura u oscilador de un grado de libertad (figura II.6), volviendo al espectro de respuesta de gran utilidad en el área de diseño sismorresistente. El espectro de respuesta puede ser expresado en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración y se utiliza fundamentalmente para estudiar las características de los sismos y sus efectos sobre las estructuras.

El espectro de respuesta describe la máxima respuesta de un sistema de un grado de libertad para un movimiento particular como función del periodo natural y de un amortiguamiento. La respuesta del sistema es obtenido de graficar el espectro de aceleración contra los periodos de vibración del sistema de un grado de libertad (Kramer, 1996). Aunque es una simplificación hacer estas suposiciones ha demostrado funcionar en el comportamiento de estructuras civiles ante una excitación proveniente del suelo, se debe de tener en cuenta que la forma en la que vibrará el sistema depende también; de la rigidez de la estructura, de su altura y de su masa.



**Figura II.6. Representación para la determinación del espectro de respuesta (Modificada de Kramer, 1996).**

# III. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

## III.1. Geología Regional

La geología que a continuación se describirá abarca el área de estudio, es decir los estados de Hidalgo y Estado de México, haciendo énfasis en los municipios de Tula de Allende, Hidalgo y Temascalcingo, Estado de México.

### III.1.1. Geología Regional del Estado de Hidalgo

Geológicamente el Estado de Hidalgo está constituido por un basamento de rocas metamórficas precámbricas, en discordancia con una potente secuencia de rocas sedimentarias paleozoicas. Mientras que rocas sedimentarias mesozoicas del Triásico-Jurásico y Cretácico, sobreyacen, en discordancia angular, a las rocas anteriores son cubiertas por rocas del cenozoico, que en su base son marinas, y en la cima presentan rocas volcánicas; de composición andesítica y basáltica. El estado de Hidalgo está limitado por dos provincias fisiográficas: La Sierra Madre Oriental y El Eje Neovolcánico (Figura III.1).



**Figura III.1. Provincias Fisiográficas de Hidalgo (INEGI, 2012).**

Tula de Allende se ubica en la provincia del Eje Neovolcánico. De acuerdo a la carta Geológico-minera de Tula de Allende F14-C88 (INEGI, 1999), la columna estratigráfica involucra rocas con edades que van del Cretácico tardío al Holoceno. Las más antiguas corresponden a la formación Soyatal, la cual consiste de una alternancia de lutita-laminar y arenisca en estratos delgados.

En Tula de Allende se encuentra expuesto un considerable volumen de rocas volcánicas. Las más antiguas son producto de la actividad de los volcanes: La Joya y Xithí, conformados por una sucesión de derrames de andesita.

Las rocas del Plioceno corresponden a tobas riolíticas en mayor cantidad, además de brechas volcánicas y algunos niveles de flujos piroclásticos. La unidad sobreyace discordantemente a lutitas y areniscas, está cubierta por depósitos lacustres, tobas pumicíticas, tobas riolíticas y basaltos. Para la edad del Holoceno, se diferencia por derrames de basalto distribuidos ampliamente por Tula de Allende. La columna estratigráfica se completa con el aluvión, desarrollado en lechos y márgenes de arroyos.

### III.1.2. Geología Regional del Estado de México

En el Estado de México se encuentran los tres tipos de rocas: ígneas, metamórficas y sedimentarias, así como una amplia cantidad de variantes por su composición química, mineral y escala temporal. De acuerdo con su edad, las rocas más antiguas son las de la era Paleozoica y corresponden a filitas y esquistos ubicados al sur del Estado, en la cuenca del Balsas, en no más del 5% de la superficie estatal. Las rocas correspondientes a la era Mesozoica son las andesitas metamorfizadas y rocas calizas, con lutitas y areniscas, cuyos representantes se ubican también entremezcladas con las anteriores, en la parte sur del Estado, con un 10% de la superficie territorial. Las rocas de la era Cenozoica ocupan alrededor del 85% de la superficie estatal, subdividida en un 30% para las rocas volcánicas del periodo terciario y un 55% para las rocas del periodo cuaternario (Figura III.2). Todos los tipos de roca generan importantes recursos minerales para la explotación minera y materiales de construcción.

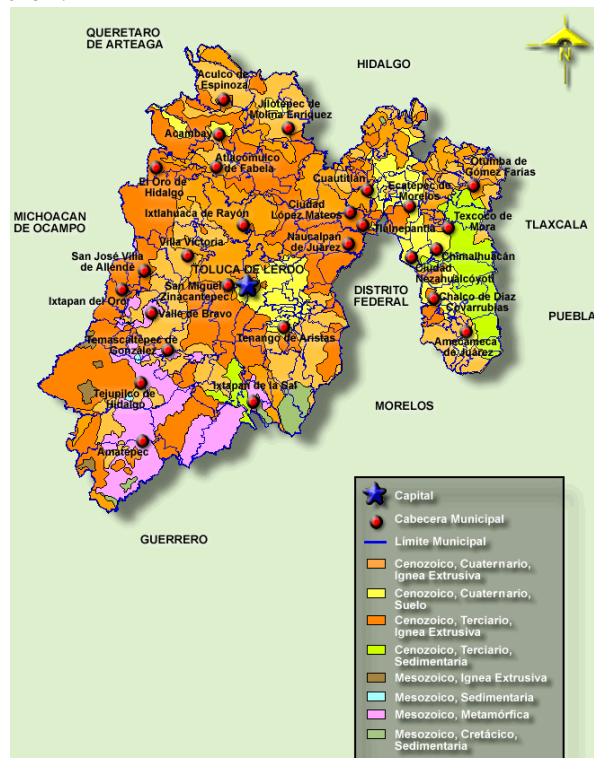
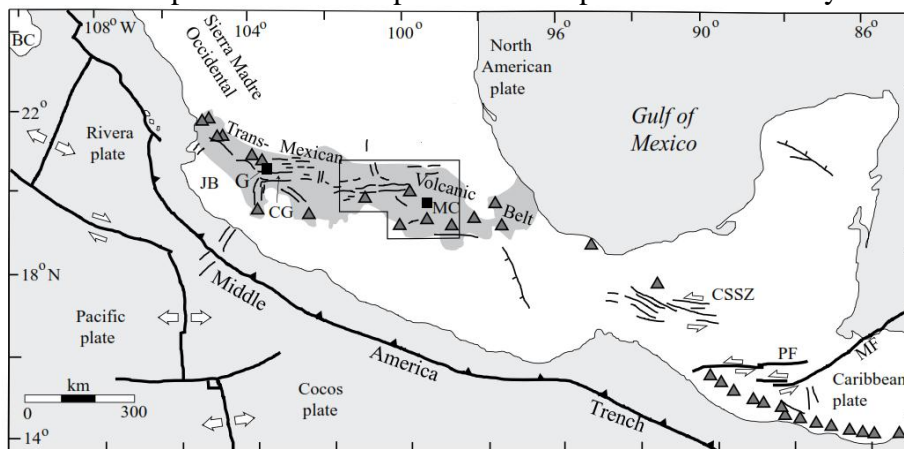


Figura III.2. Geología del Estado de México (INEGI, 2009).

**III.1.2.1. Graben de Acambay**

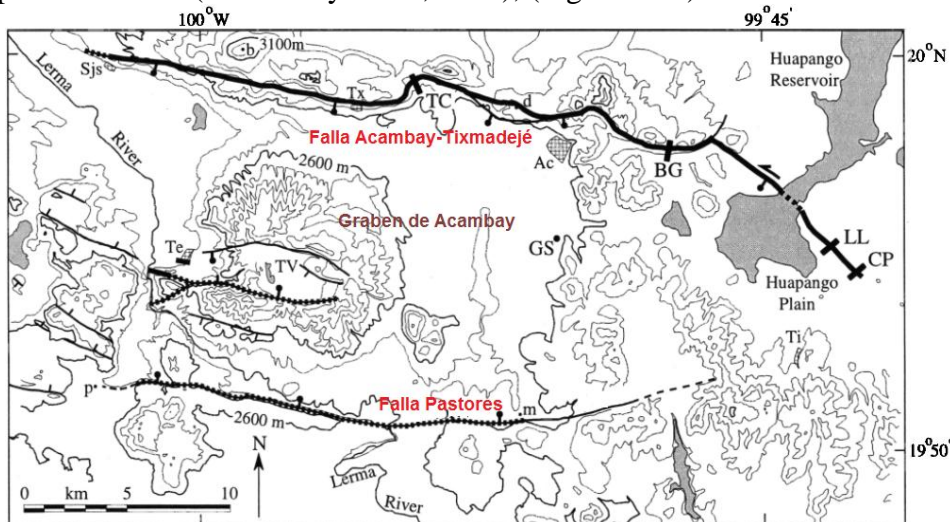
El graben de Acambay pertenece al Cinturón de Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), el cual tiene una extensión de aproximadamente de 1200 kilómetros y su anchura varía entre 20 a 70kilómetros (Figura III.3). El CVTM tiene una edad terciaria-cuaternaria y comprende una litología diversa. Sin embargo, son las rocas alcalinas sódicas, las alcalinas potásicas y las subalcalinas con alto contenido de MgO, las que predominan.

El graben de Acambay es la mayor cuenca intra-arco del CVTM y forma parte del gran sistema de fallas con rumbo aproximadamente de E-W. El graben tiene una longitud de hasta 80 km y de varía entre 15 a 38 km de ancho (Langridge *et al.*, 2013). El Graben es una estructura compuesta de rocas volcánicas parcialmente rellena por sedimento lacustre que contienen material piroclástico en especial de composición basáltica y andesítica.



**Figura III.3. Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (Tomado de Langridge *et al.*, 2000).**

El graben se encuentra delimitado por las siguientes fallas: en la parte norte se encuentra la falla de Acambay-Tixmadejé. La frontera sur la delimita la falla Pastores. En la parte central del graben se tienen fallas intra-graben pertenecientes al sistema Temascalcingo-Tepuxtepec-Acámbaro (Martínez y Nieto, 1990), (Figura III.4).



**Figura III.4. Graben de Acambay (Modificado de Langridge *et al.*, 2000).**

A través del CVTM existen nueve graben con dimensiones similares al graben de Acambay. Se estima que un sismo de magnitud considerable puede ocurrir en los próximos 400 años en ésta región intra-arco para aliviar esfuerzos que ahora están siendo acumulados (Langridge *et al.*, 2000).

### III.1.2.2. Falla Acambay-Tixmadejé

La falla Acambay-Tixmadejé tiene aproximadamente 42 kilómetros de largo, tiene un desplazamiento mayor hacia el ESE en donde forma un escarpe mayor a 500 metros en las rocas volcánicas del Neógeno. Su desplazamiento se ha documentado como normal con dirección S80°E, echado ( $\delta$ ) de 66° y deslizamiento ( $\lambda$ ) de -38° (Astiz, 1980; Suter *et al.*, 1995). Se ha estimado que tiene una tasa de deslizamiento alrededor de 0.04-0.17 mm/año (Suter *et al.*, 1992; 1995a; 2001; Langridge *et al.*, 2000). Esta falla, según Langridge *et al.* (2000), fue la causante del sismo de 1912. Estudios de paleosismos del Pleistoceno y Holoceno estiman una recurrencia de fallamiento de 3600 años.

### III.1.2.3. Falla Pastores

La falla Pastores recibió el nombre de Sánchez Rubio en 1984, utilizo este término para definir el rasgo estructural que forma la pared meridional de la fosa tectónica de Acambay. La falla se extiende unos 25 kilómetros; sin embargo este accidente geológico puede seguirse por una longitud de más de 100 kilómetros, desde de la región de Maravatío, Michoacán al poniente, hasta la zona de Santa María Ilucan, Hidalgo al nororiente.

La falla de Pastores puede considerarse como una sola falla. Sin embargo, hacia la parte occidental aparece un sistema de fallas escalonadas que mira siempre hacia el norte. La falla Pastores es una falla normal cuyo plano se inclina 65° al norte. Su orientación es EW en su porción occidental y, a partir de Atlacomulco, se flexiona paulatinamente hasta establecerse NE-SW hacia el oriental.

### III.1.2.4. Sistema Temascalcingo-Tepuxtepec-Acámbaro

Se nombró así al grupo de fallas que se extiende desde la región de Temascalcingo, al oriente, hasta las inmediaciones de Acámbaro, al poniente. Se trata de fallas normales de rumbo N60°W, entre Temascalcingo y Cerro Altamirano, que cambian después a EW, en la población de Acámbaro. Las fallas de este sistema poseen planos que alcanzan hasta 80° de inclinación, formando algunas pequeñas fosas tectónicas, como las de Temascalcingo-San Pedro el Alto, Tepuxtepec y Tarandacuao.

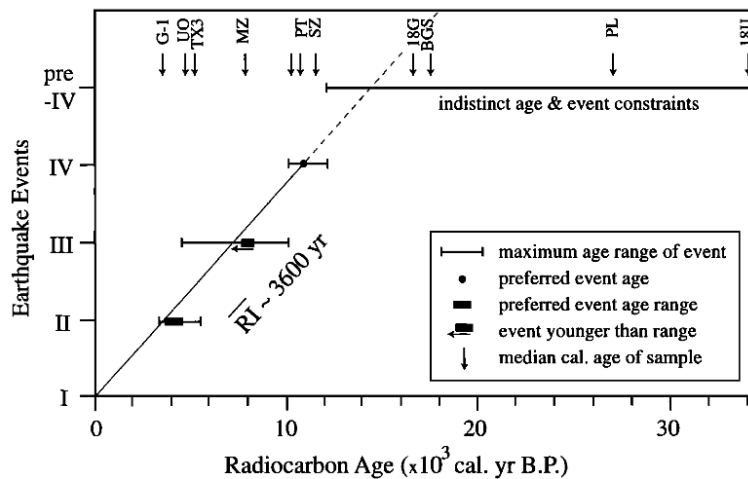
### III.2. Paleosismología en el Graben de Acambay

En el graben se han realizado estudios paleosismológicos y paleomagnéticos que revelan la existencia de sismos antiguos significativos, similares al sismo ocurrido en 1912 (Langridge *et al.*, 2000). Por esta razón el graben de Acambay es considerado, una zona sísmicamente activa.

Por ello se han realizado trincheras principalmente en la falla Acambay-Tixmadejé que involucran; datos estructurales, estratigráficos, datación por carbono. Todo esto para determinar la cantidad, el tipo de deslizamiento de la falla, la tasa de deslizamiento, y el intervalo de recurrencia (Langridge *et al.*, 2000). Langridge *et al.*, 2000, data cuatro eventos paleosismológicos incluyendo el originado el 19 de Noviembre en 1912.

Se estima que uno de los cuatro paleosismos ocurrió ~5 500 años atrás y que presentó un desplazamiento de 48 a 65 centímetros con una magnitud similar al del sismo de 1912. Otro paleoevento fue datado en el Holoceno ocurrido entre el ~5 230 a ~10 250 años atrás, y tuvo un desplazamiento estimado entre 62 a 74 centímetros. El paleosismo más antiguo fue datado con una calibración media de ~11 570 años atrás, con desplazamiento similar a los otros paleoeventos.

Los resultados de las trincheras muestran que los paleosismos tienen un deslizamiento por evento promedio de 60 cm. Aunque no están bien limitados temporalmente, estos resultados implican que los paleosismos son semejantes en desplazamiento y estilo al ocurrido por el Terremoto de Acambay en 1912. La paleosismicidad en la falla Acambay-Tixmadejé muestran un periodo de recurrencia de ~ 3 600 años de acuerdo con los cuatro eventos antes mencionados (Figura III.5).



**Figura III.5. Periodo de Recurrencia para la falla Acambay-Tixmadejé, el evento I corresponde al sismo de 1912 (Modificado de Langridge *et al.*, 2000).**

Después del temblor de 1912, se registró un nuevo evento en el graben de Acambay, el día 22 de febrero de 1979 cuya magnitud se estimó de  $M_c=5.1$  a una profundidad de aproximadamente de 8 km, con una caída de esfuerzo de  $\Delta\sigma=136$  bares y un mecanismo focal de rumbo  $N 80^\circ W$ , un echado de  $66^\circ$  y un deslizamiento de  $-138^\circ$  (Astiz, 1980).



### III.3. Refinería Miguel Hidalgo

La refinería Miguel Hidalgo se encuentra localizada en el Estado de Hidalgo, en el municipio de Tula de Allende, y ocupa un área total de 749 hectáreas. De acuerdo a Sandoval (2014), existen 13 posibles zonas de accidentes en toda la refinería. Ya que son los equipos más susceptibles ante un evento catastrófico, en nuestro estudio estas zonas podrían ser las más vulnerables a daños.

Los equipos que se encuentran en estos lugares son compresores, debido a lo mencionado los equipos tienen un cuidado especial y son monitoreados continuamente. En la tabla III.1 se muestran los equipos críticos (compresores). De igual forma se presentan las condiciones en la que trabajan los mismos equipos críticos.

Equipo	Planta	Sustancia que transporta	Temperatura (°C)	Presión (atm)	Flujo de material (Kg/s)
Compresor 1	Planta reductora de Viscosidad	Gasóleo	41	5.32	2.37
Compresor 2	Planta HDD 1	Hidrógeno	51.6	49.80	30.84
Compresor 3	Planta Reformadora de Naftas	Hidrógeno	121	14.26	0.71
Compresor 4	Planta HDD 2	Hidrógeno	93.6	35.60	7.80
Compresor 5	Planta Reformadora de Naftas 2	Hidrógeno	74.5	14.50	36.57
Compresor 6	Planta Hidros Destilados Intermedios	Hidrógeno	76	59.36	29.90
Compresor 7	Planta Hidros de Diésel	Hidrógeno	120	68.50	0.59
Compresor 8	Planta H-OIL	Hidrógeno	71	176.25	75.39
Compresor 9	Planta H-OIL	Hidrógeno	102.7	19.70	29.80
Compresor 10	Planta H-OIL	Hidrógeno	102.7	19.70	29.80
Compresor 11	Planta H-OIL	Hidrógeno	102.7	19.70	29.80
Compresor 12	Planta Hidros de gasóleo	Hidrógeno	120	152.00	7.10
Compresor 13	Planta Hidros de gasóleo	Hidrógeno	120	119.00	0.24

**Tabla III.1. Zonas vulnerables de la refinería Miguel Hidalgo ante un evento sísmico (Sandoval, 2014).**

Los compresores trabajan bajo presiones muy altas y estos equipos suelen fallar con mayor facilidad que otros. Es por ello que los accidentes más comunes con compresores son las explosiones. Las explosiones de hidrógeno son muy peligrosas y pueden poner no solo la integridad mecánica del equipo en cuestión, sino también de los equipos que estén a sus alrededores así mismo como al personal de la refinería.



# IV. DESCRIPCIÓN Y APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS EMPLEADOS

## IV.1. Adquisición de datos

Los registros sísmicos de ruido que se emplearon en la presente tesis corresponden a las grabaciones obtenidas en la red temporal de la Refinería Miguel Hidalgo, Tula de Allende, Hidalgo y Temascalcingo, Edo. México, a cargo del Instituto de Ingeniería. Los registros fueron grabados del 25 de Junio al 30 de Octubre de 2013.

El arreglo empleado constó de cuatro estaciones temporales de velocidad de banda ancha de la marca Güralp®, modelo CMG-40T. En la tabla IV.1 se muestran las características del instrumento utilizado, todos los instrumentos grabaron a 100 y a 200 muestras por segundo.

Instrumento	Güralp CMG-40T
Amortiguamiento del sensor	0.707
Frecuencia natural del instrumento	50 [Hz]
Sensitividad	80 v/m/s
Constante de normalización	-0.314 [Hz]
Número de canales	3

**Tabla IV.1. Características de los sismógrafos Güralp® CMG-40T.**

Las instalaciones donde se encontraron las cuatro estaciones temporales fueron las siguientes:

- Escuela Primaria Art. 123 Miguel Hidalgo, Tula, Hidalgo (AMANAL).
- Estación de bomberos Actopan, Actopan, Hidalgo (ACTOP).
- Refinería Miguel Hidalgo, Tula de Allende, Hidalgo (REFINE).
- Telesecundaria Ignacio Comonfort, San Pedro el Alto, Temascalcingo, Estado de México (CAMBA).

En la tabla IV.2 se muestran las coordenadas de las cuatro estaciones temporales mientras que en la figura IV.1 se presenta la distribución de la red temporal de acuerdo a estas coordenadas.

Estación	Nombre	Latitud °N	Longitud °W	Altura (msnm)
AMANAL	Primaria	20.045013	99.243508	2102
ACTOP	Actopan	20.268331	98.950750	2069
REFINE	Refinería	20.049334	99.273369	2095
CAMBA	Temascalcingo	19.897292	99.959593	2523

Tabla IV.2. Coordenadas de las cuatro estaciones temporales.

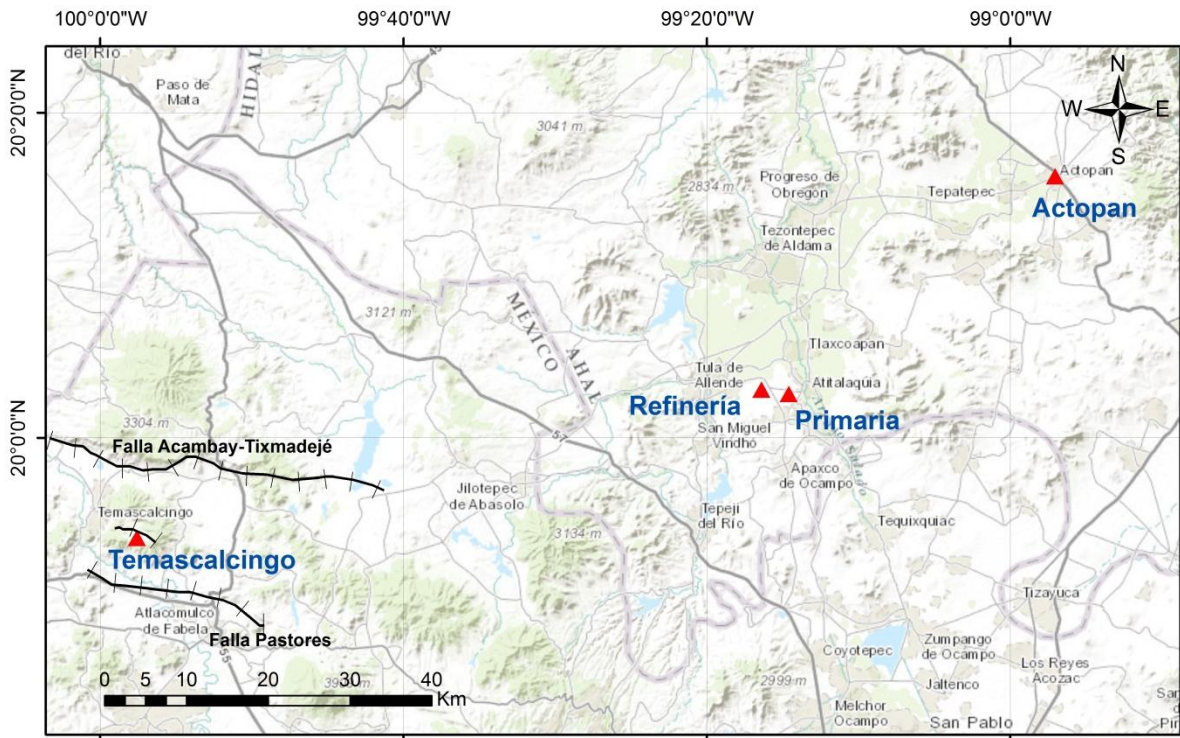


Figura IV.1. Localización geográfica de las cuatro estaciones temporales.

En la figura IV.2 se muestra el cronograma de grabación de las cuatro estaciones temporales, por el objetivo de la tesis solo se hizo uso de dos estaciones temporales; la de la Refinería y la de Temascalcingo. Sin embargo, también se ocupó la estación de Actopan para verificar algunos métodos empleados. En cuadro gris se muestran las semanas donde no se obtuvo registro y en cuadro naranja semanas de grabación.

Estación	Junio (semana)	Julio (semana)	Agosto (Semana)	Septiembre (semana)	Octubre (semana)
Temascalcingo	Gr	Gr	Gr	Gr	Gr
Refinería	Gr	Gr	Gr	Gr	Gr
Actopan	Gr	Gr	Gr	Gr	Gr
Primaria	Gr	Gr	Gr	Gr	Gr

- Periodo de grabación
- Sin registro

Figura IV.2. Cronograma de grabación de las cuatro estaciones temporales por semana.

## IV.2. Obtención de las correlaciones de ruido sísmico, CCR

Debido a la poca sismicidad en el graben de Acambay y dado que no se pudo registrar un sismo durante el periodo de grabación de la red temporal instalada por el Instituto de Ingeniería, se simularon eventos sísmicos en bajas y altas frecuencias, con la finalidad de obtener el sismo elemento que será usado como función de Green empírica. Por medio de las relaciones de Denolle et al. (2003) se obtuvo el sismo en bajas frecuencias, además se empleó la función de Green estocástica para simular el evento en altas frecuencias.

En los siguientes apartados se describe la metodología empleada para obtener el sismograma sintético en bajas frecuencias por medio de las relaciones de Denolle *et al.* (2013). Por el objetivo de la tesis se obtuvo el tensor de Green para las estaciones de Temascalcingo y de la refinería a través de correlaciones cruzadas para estimar los registros sintéticos. También se obtuvo el tensor de Green de las estaciones Actopan y refinería con el fin comparar los registros sintéticos con los sismos ocurridos en Actopan en 2013 registrados por la red temporal con el fin de validar la metodología empleada.

La distancia entre ambas estaciones (Temascalcingo y refinería) es de aproximadamente 74 kilómetros (Figura IV.3), el tiempo de traslape o coincidencia entre ambas estaciones fue de 73 días, que se detalla en la tabla IV.3, la discontinuidad que se observa se debió a la falta de suministro eléctrico en la estación de Temascalcingo, Edo. de México.

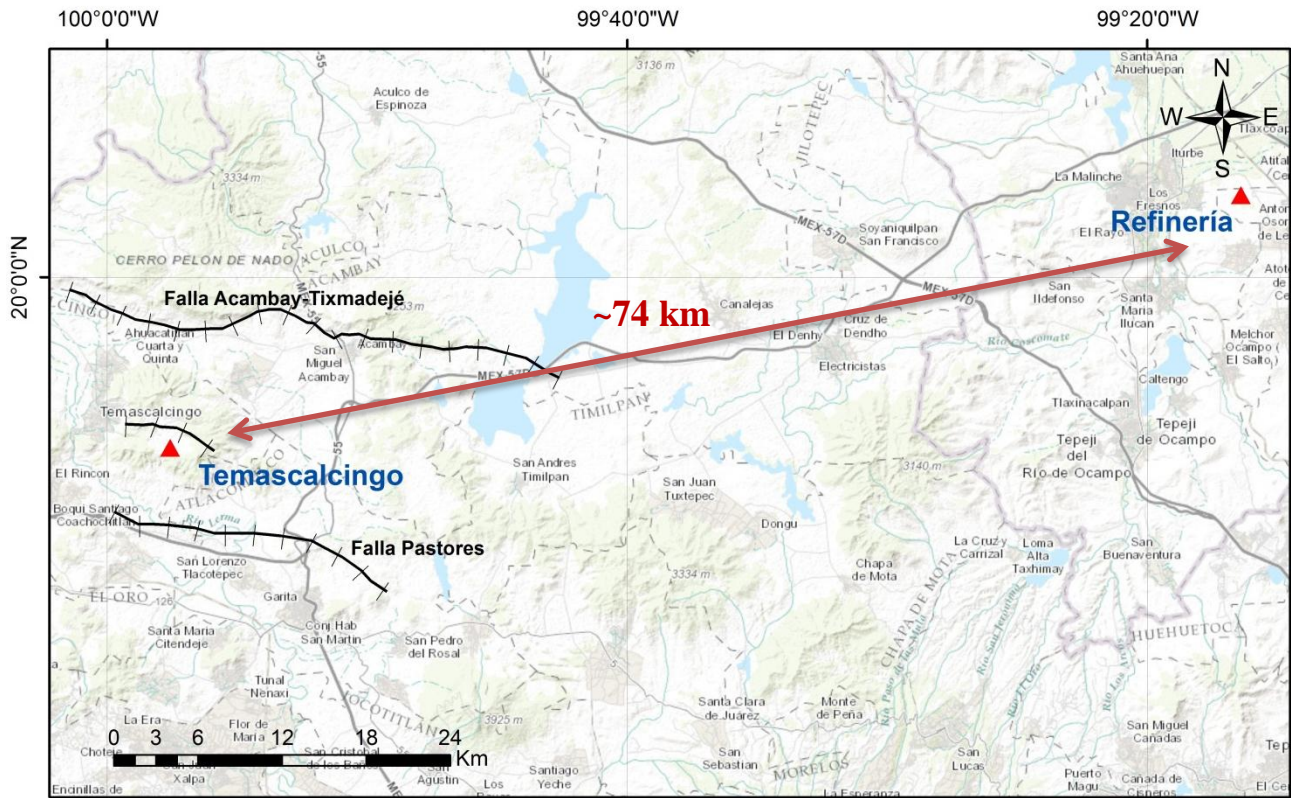


Figura IV.3. Estaciones temporales: refinería y Temascalcingo.

Mes	Días del mes	Días de grabación
Junio	27-30	4
Julio	1	1
Agosto	5-9 y 29-31	8
Septiembre	1-30	30
Octubre	1-30	30
	TOTAL	73

**Tabla IV.3. Período de grabación coincidente en tiempo entre la estación de Temascalcingo Edo. de México y la estación de la Refinería, Tula de Allende, Hidalgo.**

Con los datos en mano, primero se transformaron los archivos de formato GCF (Guralp Compressed Format) a formato SAC (Seismic Analysis Code). Después se cortaron las señales, se guardaron en archivos de media hora y se editó el nombre. En seguida se subieron los datos sísmicos a *ollin*, el servidor remoto Linux del Instituto de Ingeniería. En *ollin* fue donde se trabajó la parte de las correlaciones cruzadas a través del programa de SAC.

Posteriormente se craron macros en SAC para llevar a cabo el procesado. El objetivo del procesado fue obtener cada una de las componentes del tensor de Green a través de las correlaciones cruzadas. Para ello, se correlacionaron cada una de las componentes de la estación de Temascalcingo con cada una de las componentes de la estación refinería. Cada elemento del tensor de Green representa la recuperación de la función de Green a través de las correlaciones cruzadas en distintas direcciones. De manera independiente cada elemento del tensor de Green fue obtenido a partir de la siguiente metodología, la cual es una modificación de la propuesta por Bensen *et al.* (2007).

La secuencia para la obtención de cada elemento del tensor de Green constó de dos etapas: la primera etapa se encargó de preparar las señales de ruido de cada estación de manera individual. La segunda etapa consistió en calcular las correlaciones cruzadas y el apilamiento de las mismas:

- 1) Lectura de datos de ruido crudo
  - 2) Rotación de las componentes horizontales
  - 3) Eliminación de la media
  - 4) Eliminación de la línea de tendencia
  - 5) Filtro pasa bandas
  - 6) Normalización temporal 1-bit
  - 7) Estimación de la correlación cruzada
  - 8) Apilamiento de las correlaciones
- 

Cabe mencionar que no se realizó una corrección instrumental, ya que en ambas estaciones se ocupó el mismo tipo de instrumento. En los siguientes apartados se describe de manera detalla las etapas realizadas.

### IV.2.1. Procesado de los datos de ruido (Etapa 1)

El objetivo de esta etapa es la de resaltar el ruido ambiental sísmico, atenuando las señales de los sismos, las irregularidades de los instrumentos, así como las fuentes de ruido no estacionarias cercanas a las estaciones, con la finalidad de alcanzar la premisa de la técnica, es decir, la estacionariedad del ruido ambiental (Prieto *et al.*, 2011).

El procesado, como la secuencia lo indica, inició con la rotación de las componentes horizontales, ya que además de trabajar con las componentes verticales se hizo uso de las componentes horizontales para obtener el tensor de Green. La rotación de las componentes horizontales se realizó para definir de mejor manera el arribo de la onda entre ambas estaciones, además de obtener la influencia de las ondas Rayleigh y Love. El azimut entre las estaciones de Temascalcingo y la de la refinería es de  $\phi = 76^\circ$ , por lo que al hacer la rotación las componentes quedaron definidas en un sistema coordenado RTV (Radial, Transversal y Vertical).

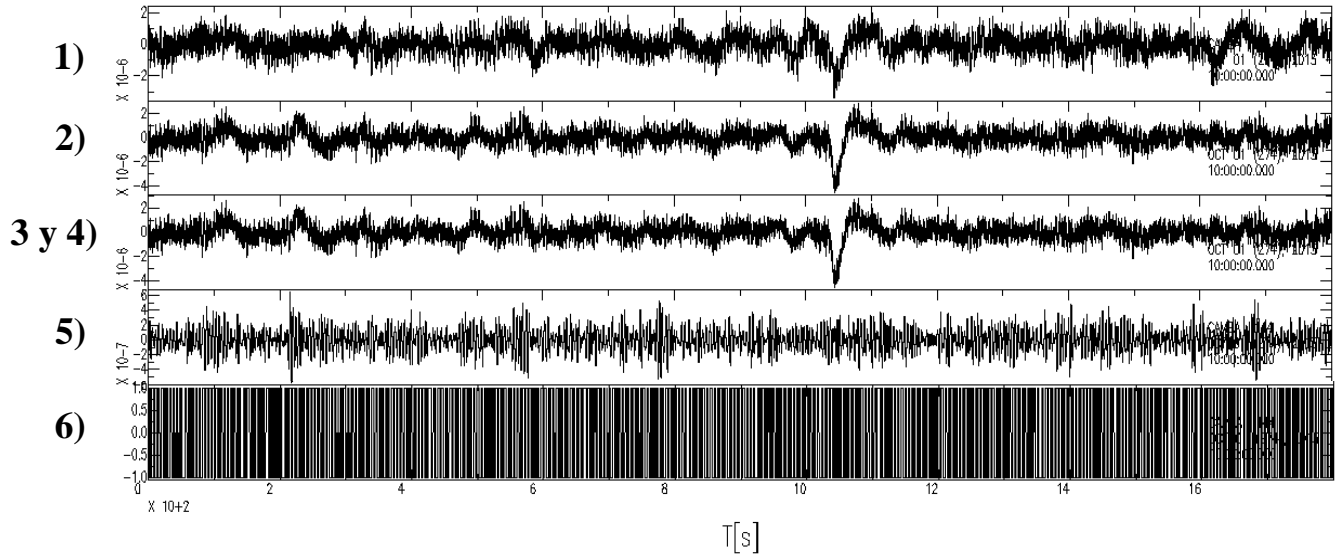
El procesado continuó eliminando la media y la tendencia de los registros con la finalidad de corregir y llevar los registros al eje cero de la amplitud de velocidad, lo que podría considerarse como una corrección por línea base. Para la elección del filtrado pasa bandas se realizó un análisis para seleccionar la banda de paso adecuada y poder recuperar la función de Green (ver Anexo 1). Para todos los elementos del tensor de Green se utilizó un filtro Butterworth con una frecuencia de 0.2 a 0.4 Hertz con 2 polos que fue el ancho de banda donde se define la función de Green.

Para finalizar la primera etapa se aplicó una normalización temporal. Este proceso es vital ya que reduce el efecto de las correlaciones cruzadas de los sismos, de las irregularidades instrumentales y fuentes de ruido no estacionarias cercanas a las estaciones (Vera, 2013). La normalización temporal aplicada fue la siguiente:

$$\bar{d}_n = d_n / |d_n|, \quad (4.1)$$

donde  $d_n$  es el dato n-ésimo,  $\bar{d}_n$  es el dato n-ésimo normalizado y los símbolos  $||$  indican valor absoluto del dato n-ésimo. Por lo que el método consiste en normalizar la señal conservando el signo de la señal original, así que las amplitudes son remplazadas por 1 para amplitudes positivas y -1 para amplitudes negativas.

En la figura IV.4, se muestran los procesos realizados para la primera etapa.



**Figura IV.4. Procesado de los datos de ruido de manera individual. 1) Lectura de datos. 2) Rotación de las componentes. 3) Eliminación de la media. 4) Eliminación de la línea de tendencia. 5) Filtro pasa bandas Butterworth de 0.2 a 0.4 Hz. 6) Normalización temporal (1-bit). La imagen corresponde al registro de las 10:00 horas del día 10 de Octubre del 2013 de la componente Radial de la estación Temascalcingo.**

### IV.2.2. Obtención del tensor de Green (Etapa 2)

Las correlaciones cruzadas de ruido ambiental sólo se hicieron para las estaciones de Temascalcingo y la estación de la refinería, entre sus tres componentes para obtener el tensor de Green. Esta etapa tomó los datos procesados de la etapa 1 para obtener un apilado de todos los días de grabación. Primero se correlacionaron los archivos de media hora, haciendo el apilado de las 48 correlaciones durante un día (ecuación 4.2) y después se realizó el apilado de todos los días de grabación, en el presente trabajó se apilaron 60 días (ecuación 4.3). Como se observa en las ecuaciones el apilado consiste en obtener un promediado aritmético de las trazas correlacionadas:

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^{n=48} \frac{d_i}{n}, \quad (4.2)$$

donde  $\bar{D}$  es el apilado de las correlaciones de un día ( $d_i$ ),  $d_i$  son registros de media hora por lo que  $n=48$  debido que en 1 día tiene 48 registros de 30 minutos.

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^{n=60} \frac{D_i}{n}. \quad (4.3)$$

En la ecuación,  $\bar{S}$  es el apilado de los días correlacionados ( $D_i$ ),  $n=60$  ya que fueron 60 días promediados.

Como se mencionó en el apartado III.2 periodos largos de correlaciones cruzadas permiten la recuperación de la función de Green, así que correlacionando las tres componentes de cada estación se obtendría el tensor de Green. En la etapa 1, se hizo la rotación de componentes por lo que el sistema ahora se expresa en RTV.

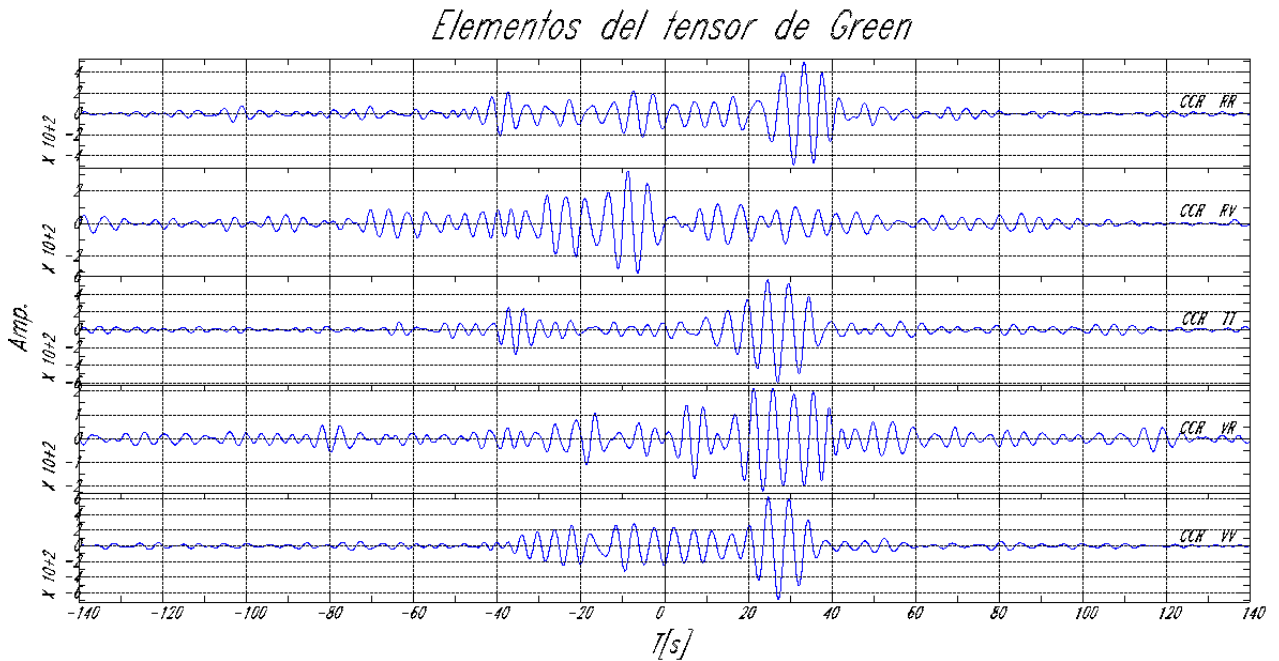
De acuerdo a Denolle *et al.* (2013) podemos aproximar el tensor de Green como la contribución de las ondas superficiales de la onda Rayleigh más la onda Love (ecuación 4.4), los subíndices indican las componentes que se están correlacionando.

$$G \approx G^L + G^R = \begin{pmatrix} G_{RR} & 0 & G_{RV} \\ 0 & G_{TT} & 0 \\ G_{VR} & 0 & G_{VV} \end{pmatrix}, \quad (4.4)$$

donde G es el tensor de Green,  $G^L$  es el tensor de onda Love y  $G^R$  es el tensor de la onda Rayleigh (ecuación 4.5).

$$G^R = \begin{pmatrix} G_{RR} & 0 & G_{RV} \\ 0 & 0 & 0 \\ G_{VR} & 0 & G_{VV} \end{pmatrix} \quad G^L = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{TT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4.5)$$

Con base a la ecuación (4.4), se calcularon los 5 elementos del tensor de Green. En la figura IV.5, se presentan los apilados de cada elemento del tensor una vez concluidas las dos etapas del procesamiento. Las correlaciones realizadas para cada día se muestran en el anexo 4.



**Figura IV.5. Apilado de los elementos del tensor de Green para 60 días de grabación, correspondientes a la ecuación 4.5 con un filtro pasa bandas Butterworth de 0.2 a 0.4 Hz.**

### IV.2.3. Calibración de las amplitudes y verificación de las CCR.

Para obtener los registros en sus tres componentes (Radial, Transversal y Vertical) a partir de los elementos del tensor de Green se emplearon las relaciones propuestas por Denolle *et al.* (2013), (ecuación 4.6). Las relaciones llevan a cabo dos correcciones; la corrección en profundidad que es donde se traslada la ubicación de la fuente a una profundidad  $h$ , obteniendo las derivadas espaciales de la función de Green. Y una corrección por patrón de radiación controlada por el tensor de momento, ambas correcciones permiten calcular los desplazamientos.

$$\begin{aligned}\hat{u}_T &\approx \frac{1}{l_h(0)} \left[ -ik_L \hat{M}_{TR} l_h(h) + \hat{M}_{TV} l_h'(h) \right] \hat{G}_{TT}^{AN} \\ \hat{u}_R &\approx \frac{1}{r_h(0)} \left[ -ik_R \hat{M}_{RR} r_h(h) + \hat{M}_{RV} r_h'(h) \right] \hat{G}_{RR}^{AN} + \frac{1}{r_v(0)} \left[ -ik_R \hat{M}_{VR} r_v(h) + \hat{M}_{VV} r_v'(h) \right] \hat{G}_{RV}^{AN} \\ \hat{u}_V &\approx \frac{1}{r_h(0)} \left[ -ik_R \hat{M}_{RR} r_h(h) + \hat{M}_{RV} r_h'(h) \right] \hat{G}_{VR}^{AN} + \frac{1}{r_v(0)} \left[ -ik_R \hat{M}_{VR} r_v(h) + \hat{M}_{VV} r_v'(h) \right] \hat{G}_{VV}^{AN}.\end{aligned}\quad (4.6)$$

Donde;  $u$  son los desplazamientos (los subíndices indican la componente involucrada: T= transversal, R= radial y V= vertical),  $i$  es el número imaginario ( $\sqrt{-1}$ ),  $k$  es el número de onda (L= onda Love y R= onda Rayleigh),  $\hat{M}$  son los elementos del tensor de momento sísmico,  $G$  son las componentes del tensor de Green vistas en la ecuación (4.4),  $l$  y  $r$  son las eigenfunciones de las ondas Love y Rayleigh respectivamente (el subíndice  $h$  indica desplazamientos horizontales mientras que  $v$  desplazamientos verticales).

Los elementos del tensor de momento sísmico fueron calculados empleados las expresiones (ver *e.g.* Lay y Wallace, 1995):

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_{RR} & M_{RT} & M_{RV} \\ M_{TR} & M_{TT} & M_{TV} \\ M_{VR} & M_{VT} & M_{VV} \end{pmatrix}, \quad \begin{aligned}\hat{M}_{RR} &= -M_0(\text{sen}\delta \cos \lambda \text{sen}2\phi_s + \text{sen}2\delta \text{sen}\lambda \text{sen}^2\phi_s) \\ \hat{M}_{RT} &= +M_0(\text{sen}\delta \cos \lambda \cos 2\phi_s + \frac{1}{2} \text{sen}2\delta \text{sen}\lambda \text{sen}2\phi_s) = \hat{M}_{TR} \\ \hat{M}_{RV} &= -M_0(\cos \delta \cos \lambda \cos \phi_s + \cos 2\delta \text{sen}\lambda \text{sen}\phi_s) = \hat{M}_{VR} \\ \hat{M}_{TT} &= +M_0(\text{sen}\delta \cos \lambda \text{sen}2\phi_s - \text{sen}2\delta \text{sen}\lambda \cos^2\phi_s) \\ \hat{M}_{TV} &= -M_0(\cos \delta \cos \lambda \text{sen}\phi_s - \cos 2\delta \text{sen}\lambda \cos \phi_s) = \hat{M}_{VT} \\ \hat{M}_{VV} &= +M_0 \text{sen}2\delta \text{sen}\lambda\end{aligned}\quad (4.7)$$

Donde,  $M_0$  es la magnitud de momento sísmico,  $\phi_s$  es el rumbo,  $\delta$  es el echado y  $\lambda$  es el deslizamiento de la falla. Los valores fueron tomados de acuerdo a la geología del lugar y a los estimados por Astiz, (1980). Por lo que:  $\phi_s=100^\circ$ ,  $\delta=66^\circ$  y  $\lambda=-138^\circ$ , estos valores también fueron empleados para la construcción del escenario sísmico y que se hablará en el subcapítulo IV.5. Para la determinación de las eigenfunciones se ocuparon las librerías de Herrmann, (1978) se tomaron las eigenfunciones a una profundidad de 8 km (profundidad del sismo) y para un modo 2.



Teniendo todos los elementos para calcular los desplazamientos, se obtuvieron los registros en aceleración. Con la finalidad de recuperar la amplitud tras perderla en la normalización temporal, en nuestro análisis asumimos que el campo lejano, la aproximación a un punto-fuente, es válido. Por lo tanto la amplitud de la aceleración espectral de Fourier de la parte más intensa de la componente horizontal del movimiento del suelo (onda de grupo S) de un evento a una estación se puede escribir como:

$$A(f, R) = Cf^2 \dot{M}_o(f) G(R) e^{-\pi f R / \beta Q(f)} \quad (4.8)$$

donde,

$$C = \frac{FPR_{\theta\phi} (2\pi)^2}{4\pi\rho\beta^3} \quad (4.9)$$

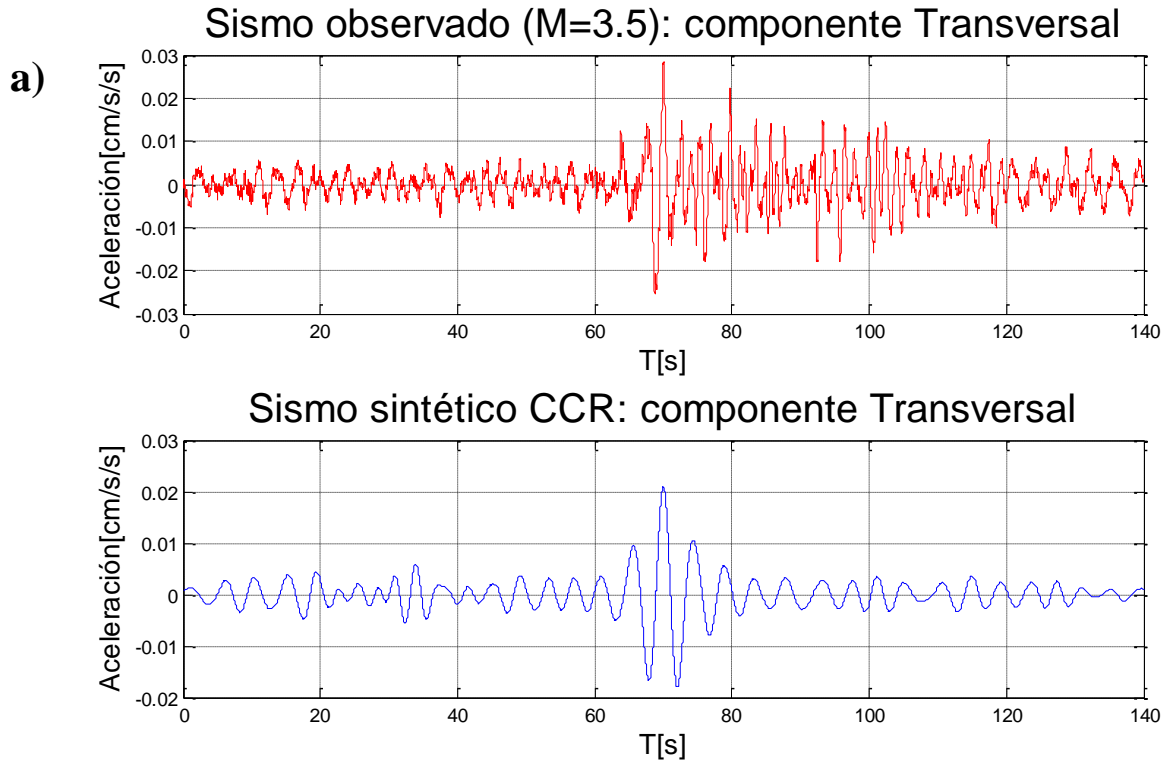
De las ecuaciones anteriores:  $R$  es la distancia hipocentral,  $f$  es la frecuencia de interés,  $\beta$  es la velocidad de ondas de corte (3.4 km/s para la región de Acambay [Astiz, 1980]),  $Q(f)$  es el factor de calidad, que incluye tanto la absorción inelástica como la dispersión. Se tomó ( $Q(f)=180f^{0.66}$ ) como factor propuesto el de Ortega *et al.* (2003) para la región del Cinturón Volcánico Mexicano,  $\dot{M}_o(f)$  es el espectro de desplazamiento de la fuente, donde  $\dot{M}_o(f) \rightarrow M_o$  como  $f \rightarrow 0$ , de acuerdo al modelo de  $\omega^2$  de la fuente del espectro de desplazamiento (Brune, 1970) está dado por  $\dot{M}_o(f) = M_o / [1 + (f^2 / f_c^2)]$ , donde  $f_c$  es la frecuencia de corte,  $R_{\theta\phi}=0.55$  es el promedio del patrón de radiación (Boore y Boatwright, 1994),  $F$  es la amplificación en superficie libre (2.0),  $P$  es el particionamiento de energía en las componentes horizontales ( $1/\sqrt{2}$ ),  $\rho$  es la densidad de la región ( $2.98 \text{ g/cm}^3$ ). En términos de la dispersión geométrica,  $G(R)$  es tomado como  $1/R$  para  $R < 100$  km y  $1/(100R)^{0.5}$  para  $R \geq 100$  km.

Se compararon las relaciones establecidas en la ecuación (4.6) con los sismos originados en Hidalgo, registrados en la red temporal que se instaló para verificar la metodología empleada. Como se mencionó en la adquisición de datos se instalaron 4 estaciones temporales. Aprovechando la cercanía de la estación de Actopan con algunos eventos sísmicos registrados en la red se hicieron correlaciones de ruido sísmico entre las estaciones Actopan y de la Refinería (ver Anexo 5), así que para este par de estaciones se llevaron a cabo los mismos pasos. Esto se realizó con el fin de simular en la refinería los movimientos debidos a los eventos ocurridos en Actopan, Hidalgo en bajas frecuencias. En la tabla IV.4, se muestran los detalles de los sismos reportados por Servicio Sismológico Nacional (SSN), que se emplearon para verificar las correlaciones cruzadas (CCR). En el anexo se presentan todos los sismos originados en el estado de Hidalgo que registró la red temporal de velocidad (Anexo 2 y 3).

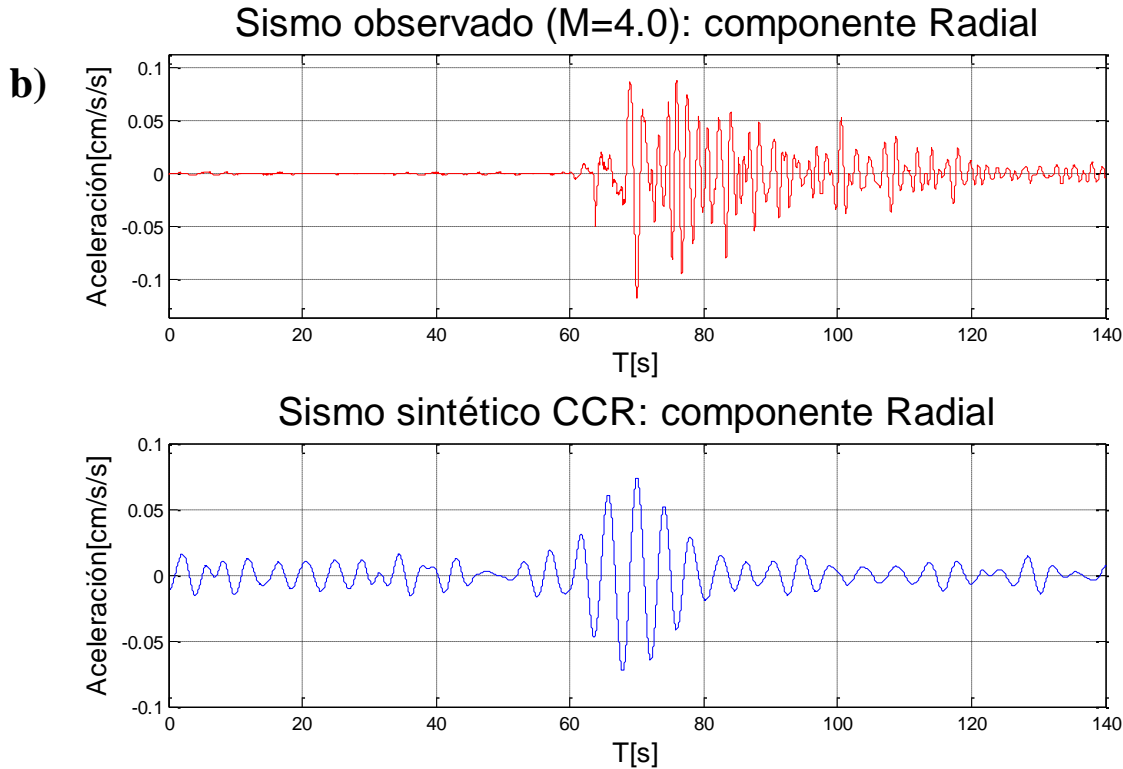
Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Prof.(km)	Mag.	Zona
2013-09-17	08:54:34	20.26	-98.9	5	3.5	4 km al Este de Actopan, Hgo
2013-09-23	06:45:54	20.34	-99.21	5	4	11 km al Norte de Progreso, Hgo

**Tabla IV.4. Sismos utilizados para la verificación de las correlaciones cruzadas (SSN).**

En la figura IV.6 se comparan algunas de las componentes de los registros reportados en la tabla IV.4 con los sismos sintéticos utilizando las relaciones de la ecuación (4.6), en ambos registros se les aplicó un filtro pasa bandas Butterworth de 0.2 a 0.4 Hz con 2 polos. En el anexo 5 se presentan las comparaciones de las tres componentes de estos dos sismos.



**Figura IV.6. Sismos utilizados para la verificación de los sismogramas sintéticos a través de las CCR: a) Sismo del 19 de septiembre de 2013 componente transversal y b) Sismo del 23 septiembre de 2013 componente radial.**



**Figura IV.6. Continuación.**

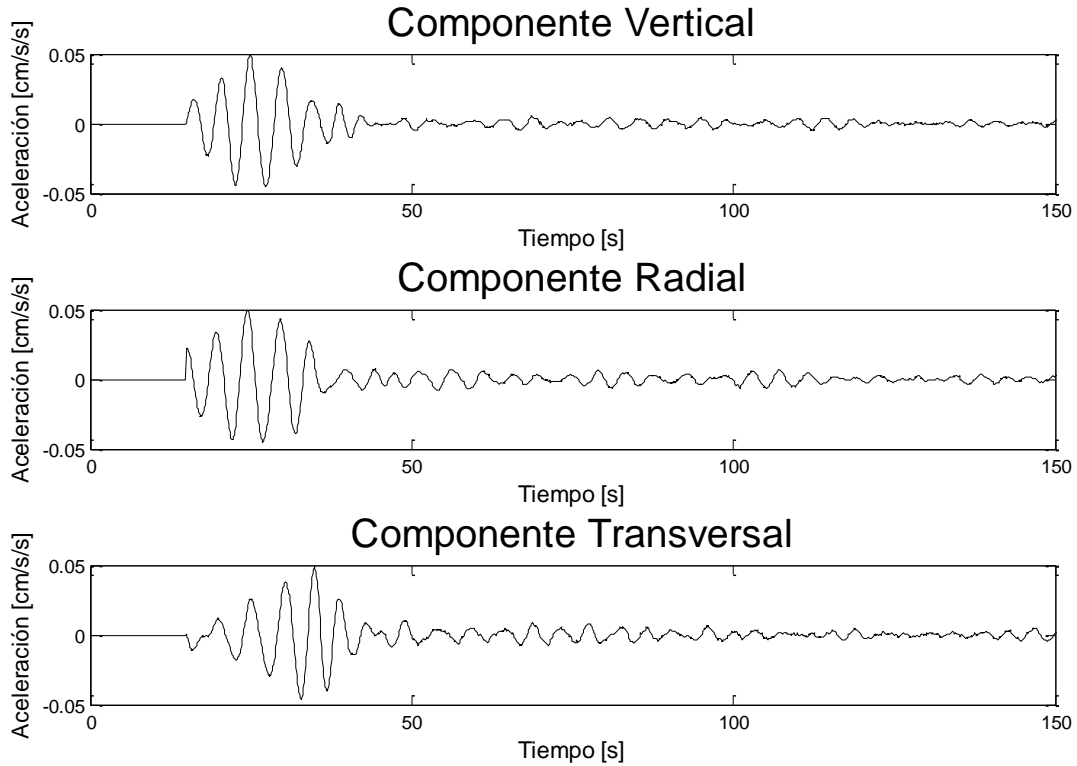
Como se observa en la figura IV.6 la forma de la onda de los registros sintéticos es similar a la forma de onda de los sismos observados, así mismo la amplitud por lo que podemos garantizar que el método para estimar los registros sintéticos a partir de las relaciones propuestas por Denolle *et al.* (2013) está funcionando adecuadamente. Con esta validación se prosiguió a calcular los registros sintéticos de aceleración esperados para la refinería.

Los valores mencionados anteriormente se reemplazaron en la ecuación (4.6), variando sólo la distancia. La distancia empleada fue de 73.8 Km que corresponde a separación entre las estaciones de Temascalcingo y la de la Refinería. De este modo se obtuvieron los registros sintéticos en bajas frecuencias en sus tres componentes (radial, transversal y vertical) como se muestra en la figura IV.7.

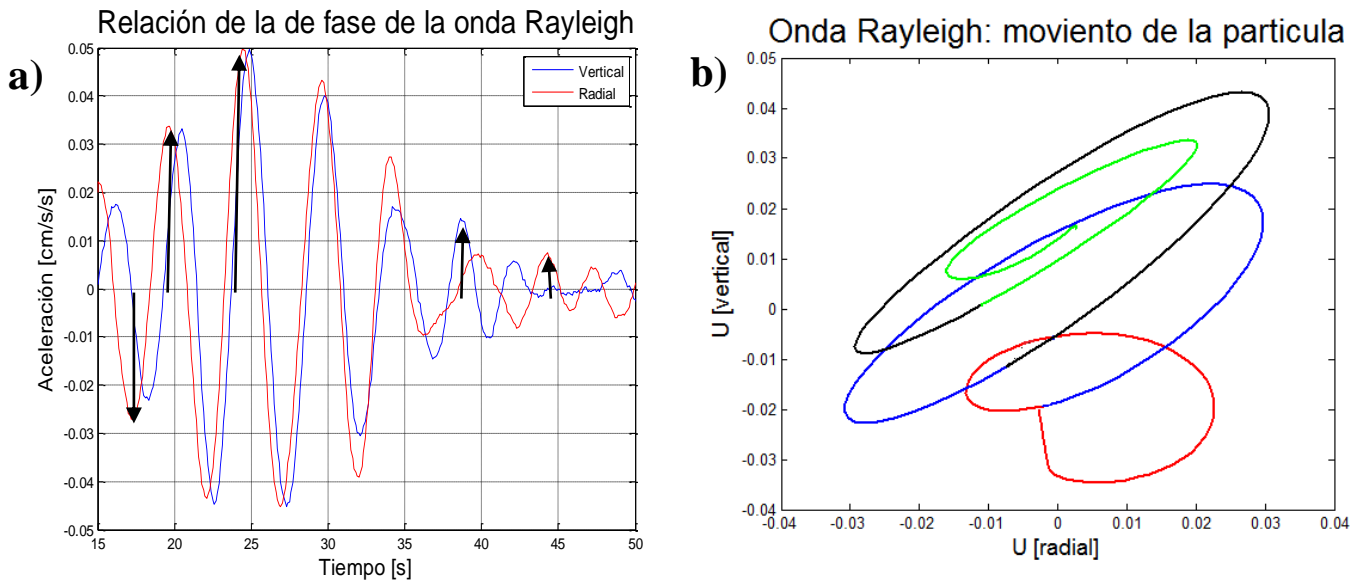
Como se presentó en la metodología los registros están influenciados por ondas superficiales, para comprobar que en los registros sintéticos calculados estén presentes estas ondas se obtuvo la relación en fase (figura IV.8a), así como el momento de partícula de la onda Rayleigh (figura IV.8b).

En la figura IV.7, se observa que la componente radial y vertical son similares, componentes en donde está presente la onda Rayleigh, para asegurarnos que esté presente la onda se graficaron ambas componentes, se observa un desfase en fase de  $90^\circ$ , como lo muestran las flechas negras (figura IV.8a), también se graficó el movimiento de partícula, los primeros tiempo del movimiento se tienen en color rojo, después en color

azul, negro y verde consecuentemente, (figura IV.8b) lo que muestra un desplazamiento retrogrado elíptico. Todas estas condiciones son propias de la onda Rayleigh lo que afirman que la ondas superficiales están presentes en los sismogramas sintéticos calculados.



**Figura IV.7. Sismogramas sintéticos en bajas frecuencias de 0.2 a 0.4 Hz, obtenidos por medio de las relaciones de la ecuación (4.6).**



**Figura IV.8. Verificación de la onda Rayleigh: a) Desfasamiento de 90° entre ambas componentes (radial y vertical) y b) movimiento de la partícula, retrogrado elíptico.**

### IV.3. Simulación estocástica

Como se mencionó anteriormente no se registraron eventos provenientes del graben de Acambay en la red temporal. Como se mostró en la sección anterior, el uso de correlaciones cruzadas permitió la obtención de la función de Green y posteriormente se obtuvieron los sismogramas sintéticos. Pero esa simulación se limitó a bajas frecuencias. Con el fin de considerar la simulación del movimiento en frecuencias más altas se empleó el método propuesto por Kamae *et al.* (1991). Así que se construyeron funciones de Green estocásticas para altas frecuencias siguiendo la metodología de Boore (1983).

Debido a la naturaleza estocástica de movimientos de tierra de alta frecuencia, se pueden estimar los movimientos de la tierra en diferentes modos fundamentales. Esto hace que se tome un enfoque empírico, haciendo que los movimientos se construyan a partir de parámetros esenciales (como son: la amplitud, el contenido de frecuencia, y la duración) con los datos existentes (Boore, 1983).

La idea del método es generar una serie temporal de ruido blanco Gaussiano filtrado en ventanas cuyo espectro de amplitud se aproxime al espectro de aceleración esperado por las consideraciones físicas propuestas. La forma del espectro está en función del tamaño de sismo (Boore, 1983). Cabe señalar que la metodología empleada sólo contempla la contribución de las ondas de corte, ya que en casi todos los casos, las componentes horizontales presentan el mayor movimiento.

La forma adaptada para el espectro de aceleración  $A(\omega)$  de las ondas de corte a una distancia  $R$  de una falla con momento sísmico  $M_0$  se expresa como (Boore, 1983):

$$A(\omega) = CM_0 S(\omega, \omega_c) P(\omega, \omega_m) \frac{e^{-\omega R/2Q\beta}}{R}, \quad (4.10)$$

donde,

$$C = \frac{PFR_{\theta\phi}}{4\pi\rho\beta^3}. \quad (4.11)$$

Como se observa las ecuaciones anteriores (4.10 y 4.11) tienen gran similitud con las ecuaciones (4.8 y 4.9) esto se debe a que en ambos casos se expresan en función de la frecuencia y la distancia. Los valores utilizados fueron los mismos;  $R_{\theta\phi}=0.55$ ,  $F=2.0$ ,  $P=1/\sqrt{2}$ ,  $\rho=2.98 \text{ g/cm}^3$  y  $\beta=3.4 \text{ km/s}$ . El espectro de la fuente  $S$  se puede expresar de la siguiente forma (Aki, 1967; y Brune, 1970):

$$S(\omega, \omega_c) = \frac{\omega^2}{1 + (\omega/\omega_c)^2}, \quad (4.12)$$

donde  $\omega_c$  es la frecuencia de esquina,  $P(\omega, \omega_m)$  en la ecuación (4.10) es un filtro de corte para altas frecuencias que usualmente disminuye al incrementar la frecuencia, por encima de la frecuencia de corte  $\omega_m$ , que se expresa como:

$$P(\omega, \omega_m) = [1 + (\omega / \omega_m)^{2s}]^{-1/2}, \quad (4.13)$$

donde  $s$  controla el decaimiento en razón de las altas frecuencias, el valor de  $s$  toma un valor de 4 de acuerdo a varias observaciones del espectro. El espectro del sismo es controlado por dos parámetros: el momento sísmico ( $M_0$ ) y la frecuencia de esquina ( $f_c = \omega_c / 2\pi$ ). Estos dos parámetros de fuente se relacionan con otra variable; la caída de esfuerzos expresada en bares ( $\Delta\sigma$ ) a través de la siguiente ecuación (Brune 1970, 1971):

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta\sigma / M_0)^{1/3}, \quad (4.14)$$

donde  $\beta$  es la velocidad de ondas S. La simulación estocástica depende de gran medida de los parámetros involucrados en la ecuación (4.14), para garantizar que fueran los valores adecuados se comprobaron con otras relaciones. En especial para calcular la caída de esfuerzos ( $\Delta\sigma$ ).

Se comprobó la simulación estocástica con el sismo del 23 de septiembre del 2013, cuya magnitud reportada por el SSN fue de 4 (ver tabla IV. 4) como se realizó anteriormente con la simulación en bajas frecuencias. Para definir el valor de la caída de esfuerzos ( $\Delta\sigma$ ) se emplearon las relaciones establecidas por Brune, 1971:

$$\Delta\sigma = ((ka_o^{1.5}) / (\sqrt{M_0})) \quad (4.15)$$

donde,

$$a_o = M_0 f_c^2 \quad (4.16a)$$

$$k = (1/0.49\beta)^3 \quad (4.16b)$$

Una relación más para el cálculo de la caída de esfuerzo establecida por el mismo Brune es la siguiente:

$$\Delta\sigma = (7M_0 / 16r_0^3) \quad (4.17)$$

donde,

$$r_0 = (2.34\beta / 2\pi f_c) \quad (4.18)$$

Como se observan en las ecuaciones 4.15 y 4.17, para determinar la caída de esfuerzos es necesario conocer el momento sísmico y la frecuencia de corte. El momento sísmico puede determinarse a través de la magnitud reportada por el SSN, para el sismo del pasado 23 de septiembre del 2013 reporta una magnitud de 4, empleando la relación de Kanamori, (1977) tenemos que:

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(M_0) - 10.73 \quad (4.19)$$

Por lo que despejando el momento sísmico de la ecuación (4.19) se tiene la siguiente expresión:

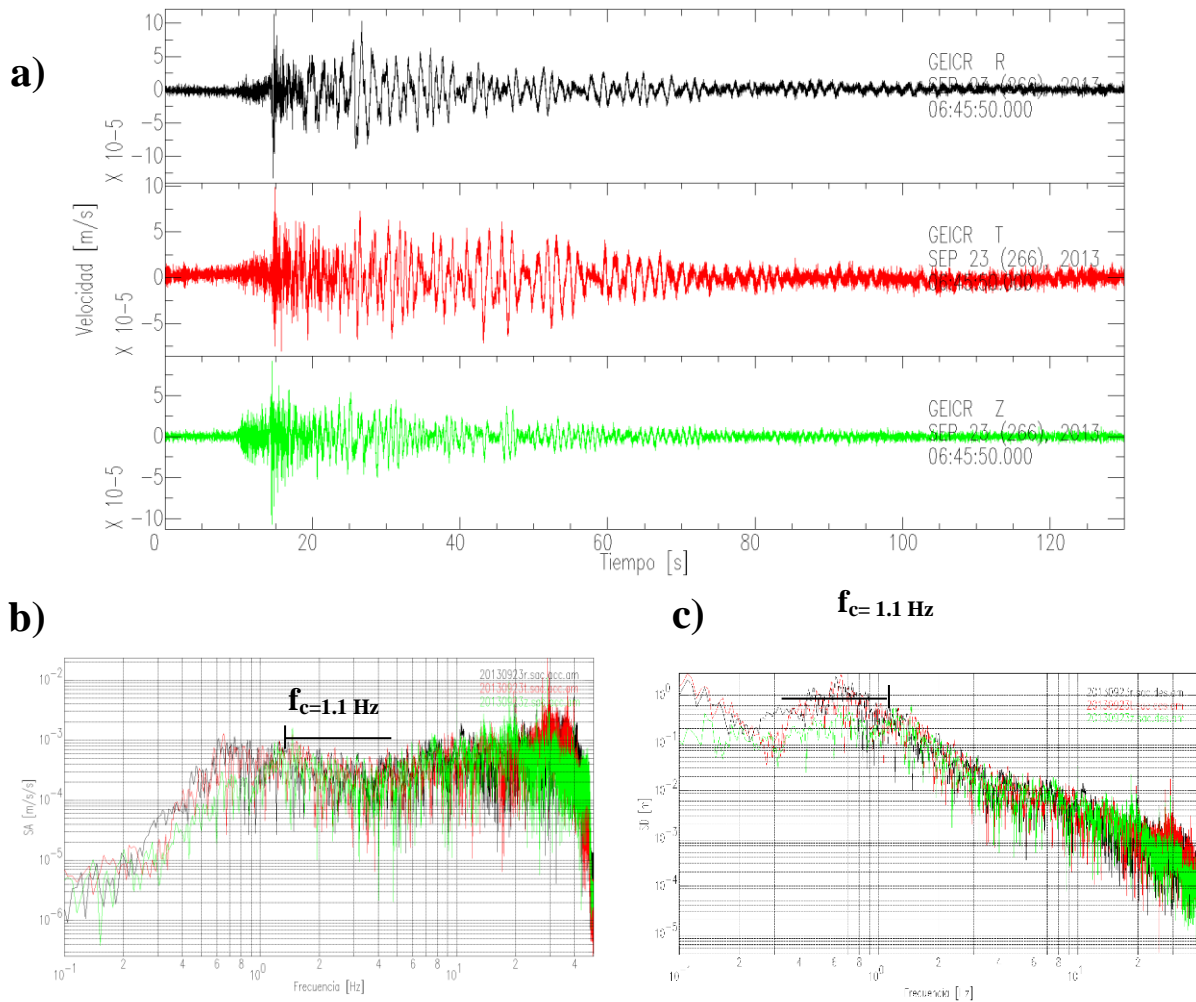
$$M_0 = 10^{[3/2(M_w + 10.73)]} \quad (4.20)$$

Reemplazando la magnitud de 4 reportada por el SSN en la ecuación (4.20), se tiene un momento sísmico de  $M_0 = 1.2445 \times 10^{22}$  [dyn-cm]. Andrews, (1986) estableció una relación para determinar el momento sísmico en función de ciertos parámetros; la densidad de la región ( $\rho$ ), velocidad de ondas de corte ( $\beta$ ), el nivel plano del espectro de desplazamiento ( $\Omega$ ) y un factor ( $R$ ) que de acuerdo a Andrews,  $R = \sqrt{2/5}$ . Como lo muestra la siguiente expresión:

$$M_0 = 4\pi\rho\beta^3\Omega / R \quad (4.21)$$

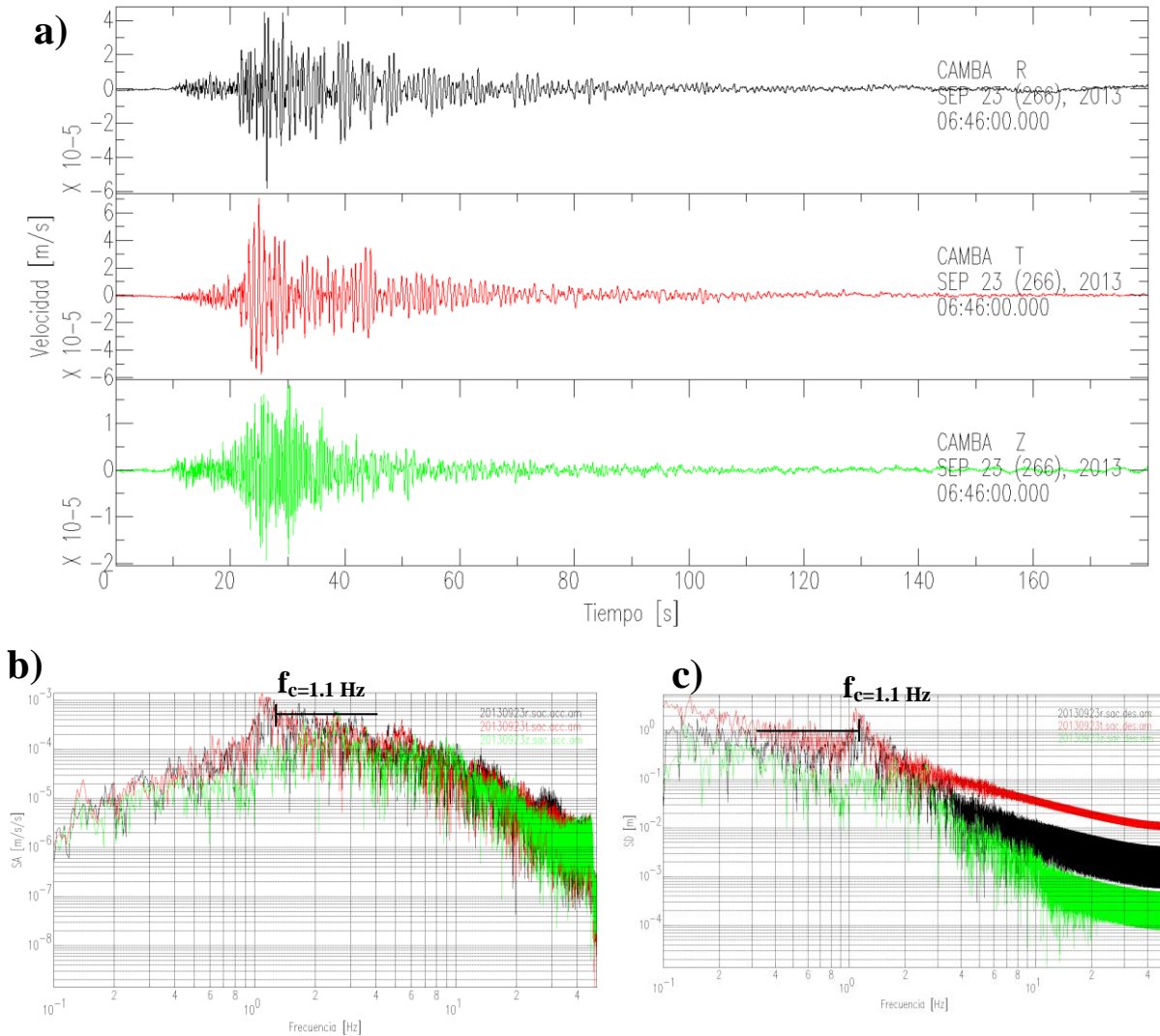
Reemplazando los valores antes empleados en la ecuación (4.21), con un espectro plano de desplazamiento de (0.8 m), después de corregirlo por dispersión geométrica. Así que el momento sísmico queda determinado por  $M_0 = 1.8618 \times 10^{22}$  [dyn-cm]. Ocupando este valor se utilizó la ecuación (4.19) para determinar la magnitud, la cual resultó ser de  $M_w = 4.1$ . Como se observa ambas magnitudes son muy similares, por ello para los siguientes cálculos se decidió trabajar con el momento sísmico calculado a partir de la ecuación (4.21), ya que involucra nuestros valores propuestos (densidad y velocidad de ondas de corte), además de que comprueba que nuestros valores empleados son los adecuados para la simulación.

El siguiente parámetro que se definió para obtener la caída de esfuerzos fue la frecuencia de corte para ello se obtuvieron los espectros de amplitud de aceleración y de desplazamiento para el sismo del 23 de septiembre de 2013 reportado en la tabla IV.4, para las estaciones de la refinera y de Temascalcingo que registraron el sismo (Figura IV.9 y Figura IV.10).



**Figura IV.9.** Sismo del 23 de septiembre de 2013 registrado en la refinería (ver tabla IV.4); a) sismograma de velocidad rotado, en sus tres componentes (radial, transversal y vertical) para cada componente se obtuvo: b) el espectro de aceleración con una frecuencia de corte cercana a 1.1 Hz y c) el espectro de desplazamiento con una frecuencia de corte cercana a 1.1 Hz y corregido por dispersión geométrica. La componente radial, transversal y vertical se representa en color negro, rojo y verde respectivamente.





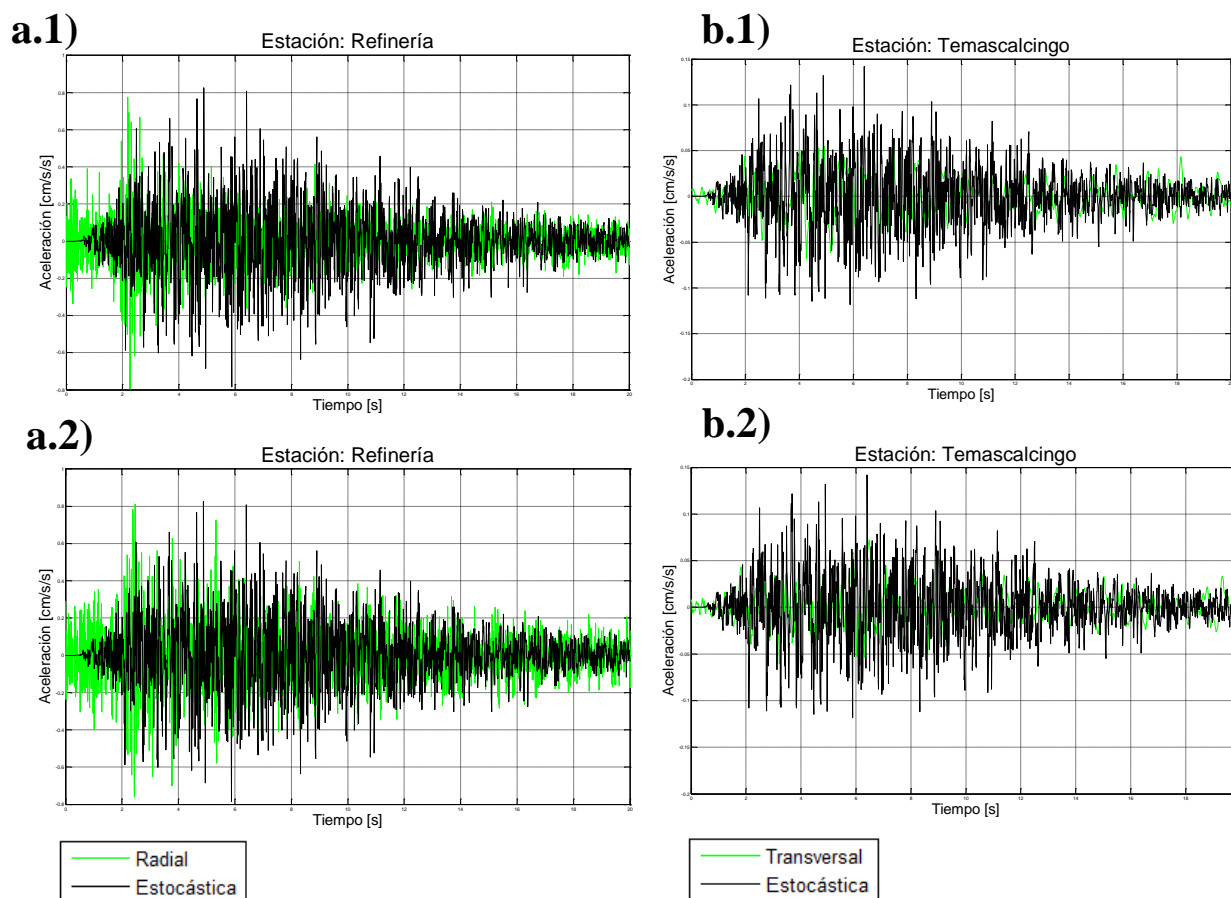
**Figura IV.10.** Sismo del 23 de septiembre de 2013 registrado en Temascalcingo (ver tabla IV.4); a) sismograma de velocidad rotado, en sus tres componentes (radial, transversal y vertical) para cada componente se obtuvo: b) el espectro de aceleración con una frecuencia de corte de 1.1 Hz y c) el espectro de desplazamiento con una frecuencia de corte de 1.1 Hz y corregido por dispersión geométrica. La componente radial, transversal y vertical se representa en color negro, rojo y verde respectivamente.

Como se observa en los anteriores espectros planos, en todos los casos definen una frecuencia de corte de aproximadamente a 1.1 Hz, por lo que para el cálculo de la caída de esfuerzos se ocupó este valor, así que reemplazando los valores ya definidos en las ecuaciones 4.15 y 4.17 dan por resultado:

$$\Delta\sigma = ((ka_o^{1.5}) / (\sqrt{M_0})) = 5.65 \text{ [bares]}$$

$$\Delta\sigma = (7M_0 / 16r_0^3) = 5.63 \text{ [bares]}$$

Las caídas de esfuerzos para las dos ecuaciones muestran un valor muy semejante. Ambos valores están en rango a las caídas de esfuerzo reportadas por Astiz, (1980) para las réplicas del sismo ocurrido el 22 de febrero de 1979 en el graben de Acambay. Se emplearon dos relaciones distintas ya que la caída de esfuerzos juega un papel importante en la simulación estocástica y hay que definirla de buena manera, el valor empleado para la caída de esfuerzos fue de  $\Delta\sigma = 5.64$  [bares], valor promedio de las dos ecuaciones. La simulación también involucra un factor de calidad de la región, que fue el mismo que se empleó para bajas frecuencias,  $Q(f) = 180f^{0.66}$ . Teniendo todas las variables definidas se realizó la simulación estocástica para el sismo del 23 de septiembre del 2013 para ambas estaciones: la refinería y la de Temascalcingo, modificando sólo el parámetro de la distancia (Figura IV.11.). Como se mencionó anteriormente la simulación estocástica sólo contempla la afectación de las ondas de corte, por ello solo se compara la simulación con las componentes horizontales del sismo.

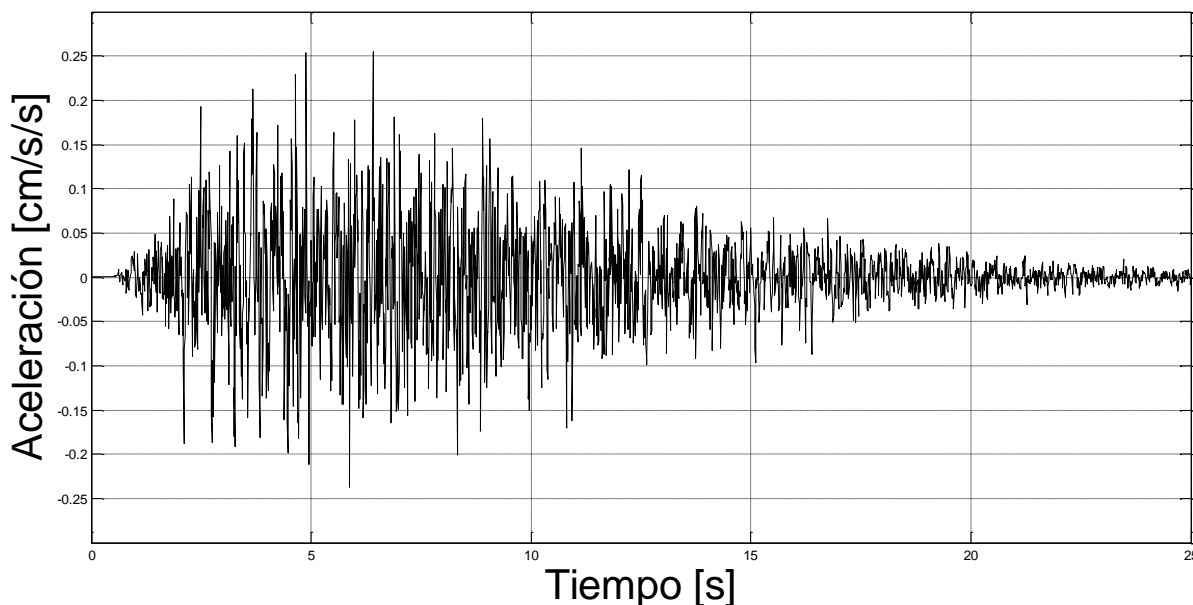


**Figura IV.11. Comparación del sismo del 23 de septiembre de 2013; a) estación refinería y b) estación Temascalcingo, 1; componente radial, 2; componente transversal. En color negro se tiene la aceleración estocástica y en color verde la aceleración observada.**

Después de verificar la semejanza de la forma de onda así como la amplitud, se realizó la simulación estocástica de un sismo hipotético en Acambay registrado en la estación de la refinería para altas frecuencias.

Para ello se utilizaron los mismos valores que en la ecuación (4.10), cambiando la distancia por la separación entre ambas estaciones (73.8 km, valor empleado para bajas frecuencias). Por lo que la simulación esperada para un sismo de magnitud M4.1 queda definida como (figura IV.12):

## Aceleración sintética



**Figura IV.12.** Registro sintético en altas frecuencias en la refinería Miguel Hidalgo, de un sismo hipotético de M4.1 ocurrido en el graben de Acambay.

### IV.4. *Matched filter*

El *matched filter* forma parte de la función Híbrida de Green método propuesto por Kamae *et al.* (1998) y tiene por propósito unir registros en bajas y altas frecuencias. Una vez obtenidos los registros sintéticos se realizó un *matched filter* para unir los sintéticos que contienen altas y bajas frecuencias con el fin de obtener toda la banda de frecuencias de la señal (*i.e.* 0 a 50 Hz.). Para ello se obtuvieron los espectros de amplitud y de fase en bajas y altas frecuencias sólo para las componentes horizontales, realizando un análisis para determinar el rango de frecuencias adecuado para la aplicación del *matched filter*.

El análisis en frecuencia se llevó a cabo con los espectros de amplitud de los registros sintéticos de aceleración para altas y bajas frecuencias (figura IV. 13). Consistió en observar las frecuencias en donde no se definía bien el espectro y en que frecuencias lo hacía de buena manera. Por lo que se establecieron rangos de frecuencias en donde se va a recuperar toda la amplitud (para bajas frecuencias: 0-0.4 Hz y para altas frecuencias: 0.6-50 Hz). Otros rangos de frecuencias de interés son donde la amplitud decaerá (para bajas frecuencias: 0.4-0.6 Hz y para altas frecuencias: 0.6-0.4 Hz), así como en donde la amplitud será nula (para bajas frecuencias: 0.6-50 Hz y para altas frecuencias: 0-0.4 Hz). Una vez definidos los rangos de frecuencia se obtuvo el *matched filter* (figura IV.14.) que va a operar en los espectros de las señales.

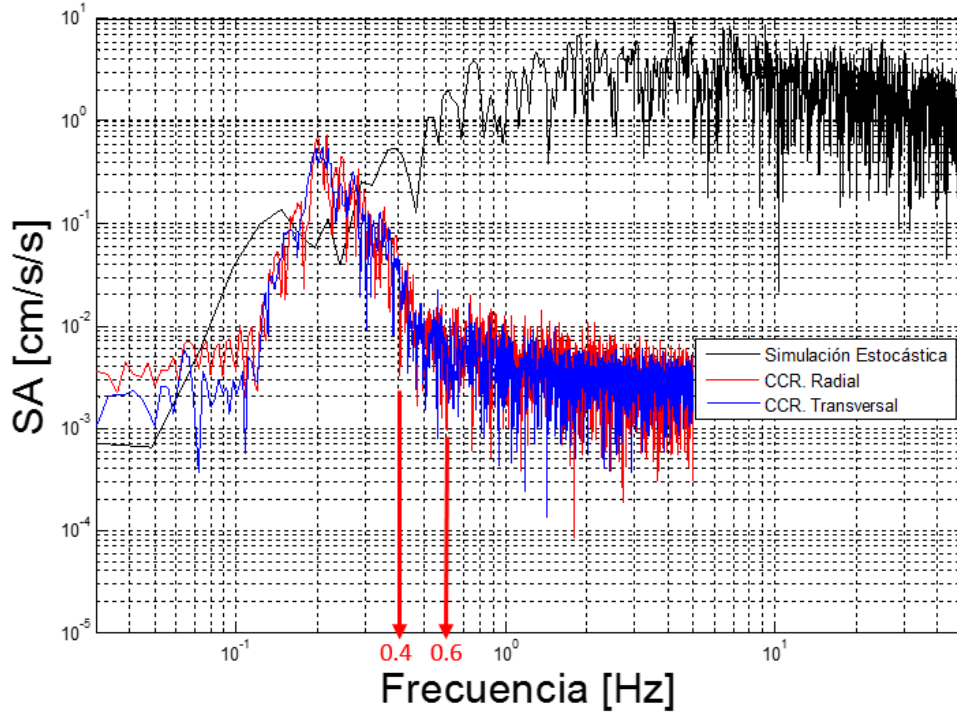


Figura IV.13. Análisis de los espectros de aceleración para definir el *matched filter*. Las flechas rojas son los límites en frecuencia donde va operar el *matched filter*, la primera flecha se encuentra a 0.4 Hz y la segunda a 0.6 Hz.

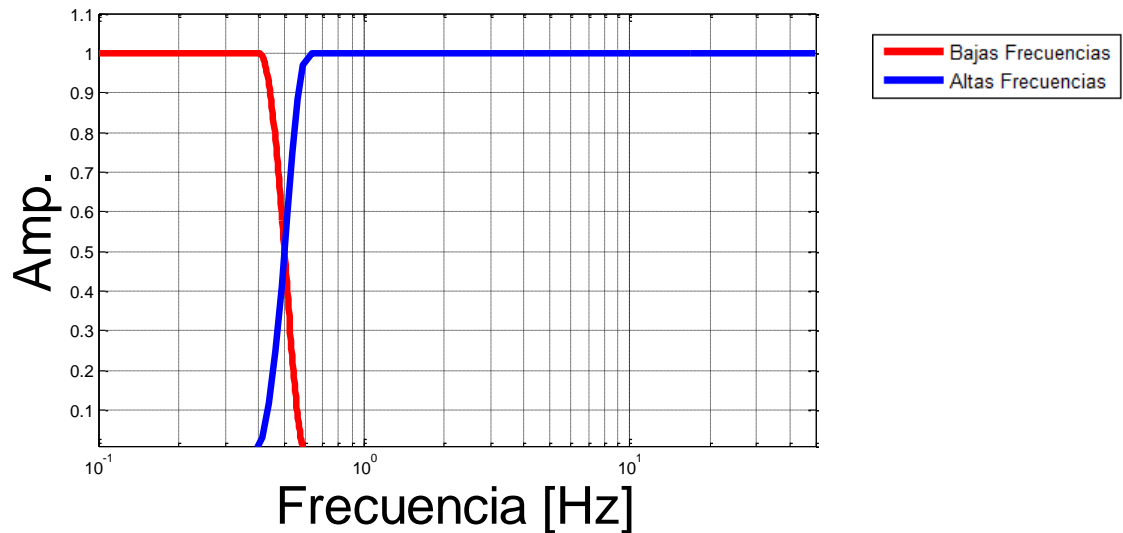


Figura IV.14. *Matched filter* empleado.

Después de haber definido el *matched filter* sólo se multiplicó por el espectro de amplitud de aceleración para bajas y altas frecuencias, y se sumó la aportación de ambas frecuencias como se representa en las siguientes ecuaciones:

$$A = A_{fb} + A_{fa} \tag{4.22}$$

$$Ph = Ph_{fb} + Ph_{fa} \tag{4.23}$$

Donde  $A$  es la suma de los espectros de amplitud,  $Ph$  es la suma de los espectros de fase,  $fb=[0$  a  $0.6$  Hz] y  $fa=[0.4$  a  $50$  Hz]. La suma de los espectros se hizo tanto para la componente radial como la transversal, después se obtuvo la parte real e imaginaria involucrando los espectros de amplitud y de fase, para finalmente hacer la antitransformada de Fourier y regresar al dominio del tiempo, los pasos se muestran a continuación:

$$\Re = A \cos(Ph) , \Im = A \sin(Ph) \rightarrow Z = \Re + i\Im \rightarrow S = \mathcal{F}^{-1}\{Z\} .$$

En la siguiente figura (figura IV.15) se ejemplifica la secuencia antes mencionada, solo para el caso de la componente radial. Los espectros de amplitud y de fase así como los pasos antes mencionados se encuentran en el anexo 6 para ambas componentes.

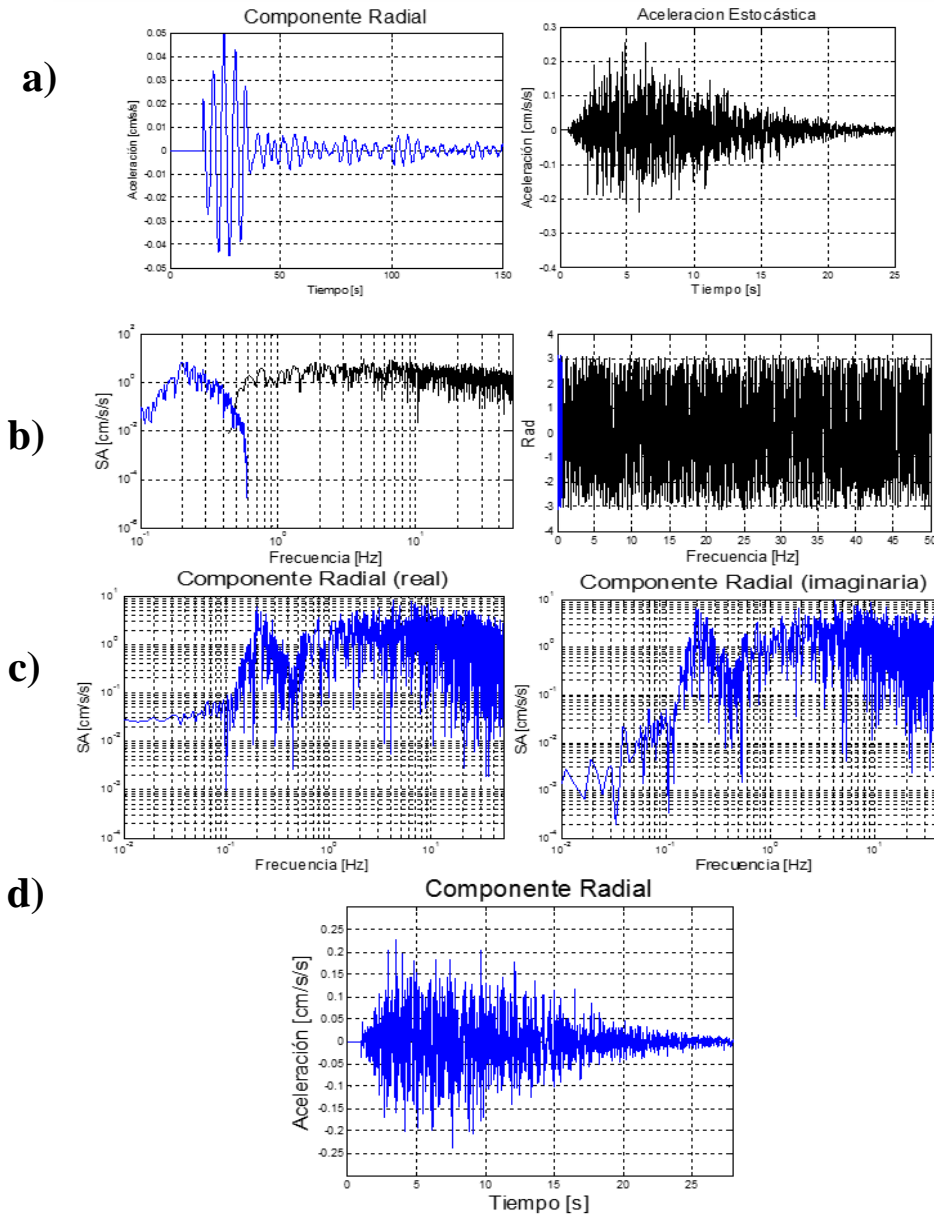
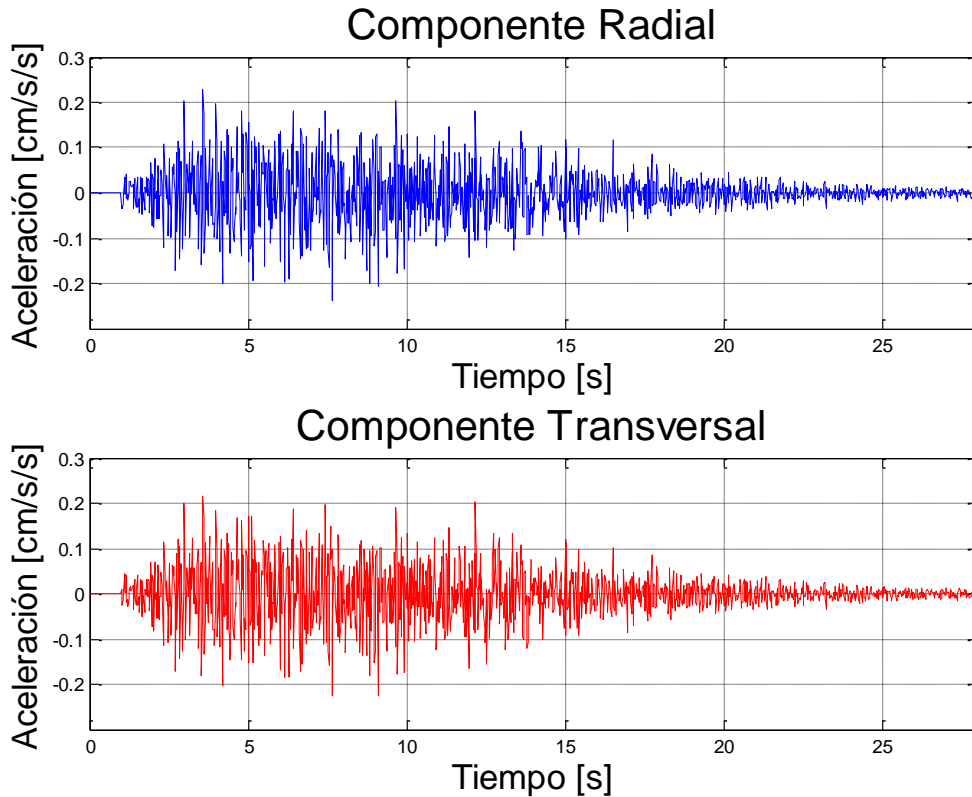


Figura IV.15. Secuencia para la obtención del sismograma sintético: a) Lectura del sismo en bajas y alta frecuencia, b) aplicación del *matched filter* (espectro de amplitud), c) obtención de la parte real e imaginaria de la señal y d) Sismograma sintético.

La misma secuencia se realizó para la obtención de la componente transversal (figura IV.16). Como se mencionó esto se hizo para obtener toda la banda de frecuencia, estos registros sintéticos están calibrados para un sismo de magnitud M4.1. Los presentes sismogramas sintéticos calculados fueron ocupados como sismogramas del sismo elemento que serán usados como la función de Green empírica. La construcción del escenario sísmico se define en el siguiente subtema.



**Figura IV.16.** Sismogramas sintéticos obtenidos después de aplicar el *matched filter* para las componentes horizontales; radial (color azul) y transversal (color rojo).

#### IV.5. Construcción del escenario sísmico

Como se mencionó en la sección II.3.2 el método de la Función de Green Empírica consiste en modelar un sismo fuerte, comúnmente llamado objetivo, a partir de un sismo pequeño o también conocido como sismo elemento. Los pasos anteriores se llevaron a cabo con la finalidad de obtener el sismo elemento y poder modelar un sismo de mayor magnitud (M6.9) como el que tuvo lugar en 1912.

Para obtener el momento sísmico del evento principal se ocupó la relación antes vista (ver ecuación 4.20) propuesta por Kanamori, (1977), por lo que el momento sísmico del sismo principal considerado es de  $M_0=2.786 \times 10^{26}$  [dyn-cm] para una M6.9. Con este momento sísmico se definió el área de ruptura de la falla, para ello se ocupó la relación establecida por Somerville *et al.* (2002), por lo que:

$$A = (5.20 \times 10^{-15}) M_0^{2/3} \approx 2218 \text{ km}^2. \quad (4.24a)$$

La falla se consideró cuadrada, de modo que la longitud de cada lado de la falla es de:

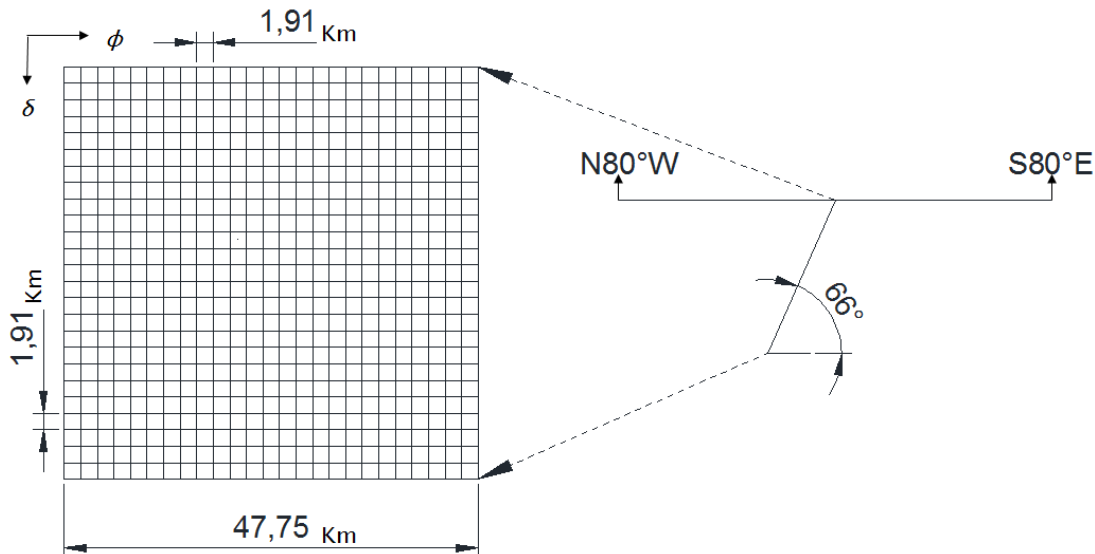
$$L = \sqrt{A} \approx 47km. \tag{4.24b}$$

El valor obtenido corresponde con la longitud de la falla Acambay-Tixmadejé, falla en donde tuvo lugar el sismo de 1912 y en donde se modelará el escenario sísmico. Teniendo las dimensiones de la falla principal, se calculó el número de subeventos o subdivisiones de la fuente en áreas más pequeñas que corresponden al área del sismo elemento, de acuerdo a la relación 2.12:

$$N = \left(\frac{M_0}{m_0}\right)^{1/3} \approx 25, \tag{4.25}$$

donde se involucran los momentos sísmicos del sismo objetivo y del sismo elemento. Para definir la longitud de cada subevento se realizaron los cálculos de manera similar a los hechos para definir las dimensiones de la falla principal por medio de las ecuaciones 4.24, pero ahora se consideró el momento sísmico del sismo elemento. Así que el área de cada subdivisión es de 3.65 km<sup>2</sup>, con una longitud de 1.91 km. Esto llevo a reajustar la longitud de la falla principal, a una longitud de 47.75 km.

Con las dimensiones de la falla definidas, se prosiguió a definir la orientación de la misma (rumbo, echado y deslizamiento). De acuerdo a Langridge *et al.* (2000) y a Astíz, (1980) definen la estructura geológica como una falla normal con un rumbo ( $\phi$ ) de aproximadamente S80°E, con un echado ( $\delta$ ) de 66° y un deslizamiento ( $\lambda$ ) de -138°, en la figura IV.17, se presenta el modelo propuesto con las características antes calculadas.



**Figura IV.17. Representación del modelo de falla propuesto, visto en un sistema de referencia (rumbo, echado).**

Para el cálculo de la velocidad de ruptura del sismo objetivo se utilizó la relación de Madariaga, (1976), ecuación empleada para predecir el espectro de  $\omega^2$  (Aki, 1967) de la onda P.

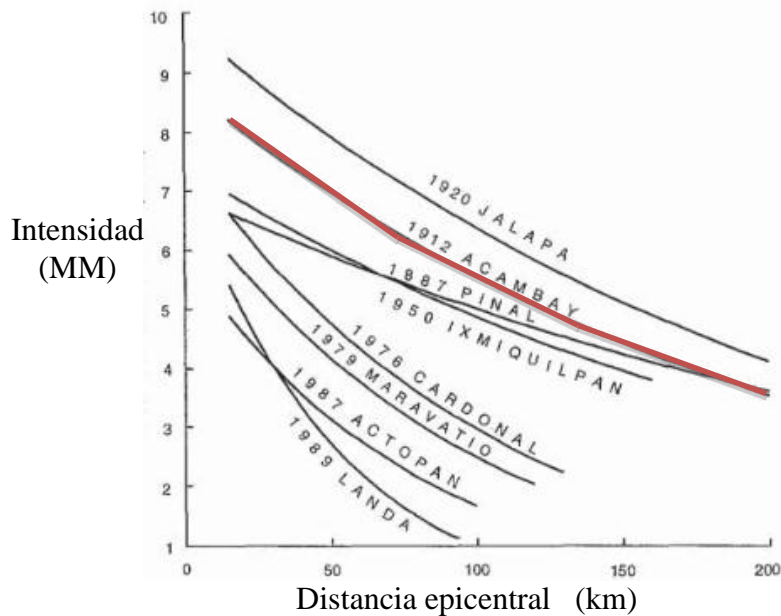
$$v_r = 0.9\beta = 0.9(3.4 \frac{km}{s}) = 3.06 \frac{km}{s}. \quad (4.26)$$

Para todos los modelos simulados se consideró una propagación de ruptura radial. El último parámetro que se definió para realizar las simulaciones fue el cálculo del *rise time* (tiempo de ascenso), se utilizó la fórmula propuesta por Somerville *et al.* (2002), ecuación (4.27).

$$T_R = 1.79 \times 10^{-9} M_0^{1/3}, \quad (4.27)$$

donde  $T_R$  es el *rise time* y  $M_0$  es el momento sísmico del sismo objetivo, para nuestro caso el  $M_0 = 2.786 \times 10^{26}$  [dyn-cm], y corresponde un *rise time* de  $T_R = 1.17$  s.

Dado que no existe un sismo observado para verificar los parámetros y la dinámica de la falla propuesta se simuló el sismo de 1912 y se obtuvo su Intensidad de Mercalli Modificada (IMM) para la refinería de Miguel Hidalgo, que de acuerdo a Suter *et al.* (1996), presentó una IMM de V a VI (ver figura III.7, triangulo rojo). Además de obtener un mapa de isosistas propone una ley de atenuación de intensidades en función de la distancia epicentral, para el sismo de Acambay así como para otros sismos del centro y este del CVTM (Figura IV.18).



**Figura IV.18.** Atenuación de Intensidad con respecto a la distancia epicentral para los sismos estudiados por Suter *et al.* (1996), en color rojo se tiene la ley de atenuación de intensidad para el sismo de Acambay en 1912 (Modificado de Suter *et al.*, 1996).

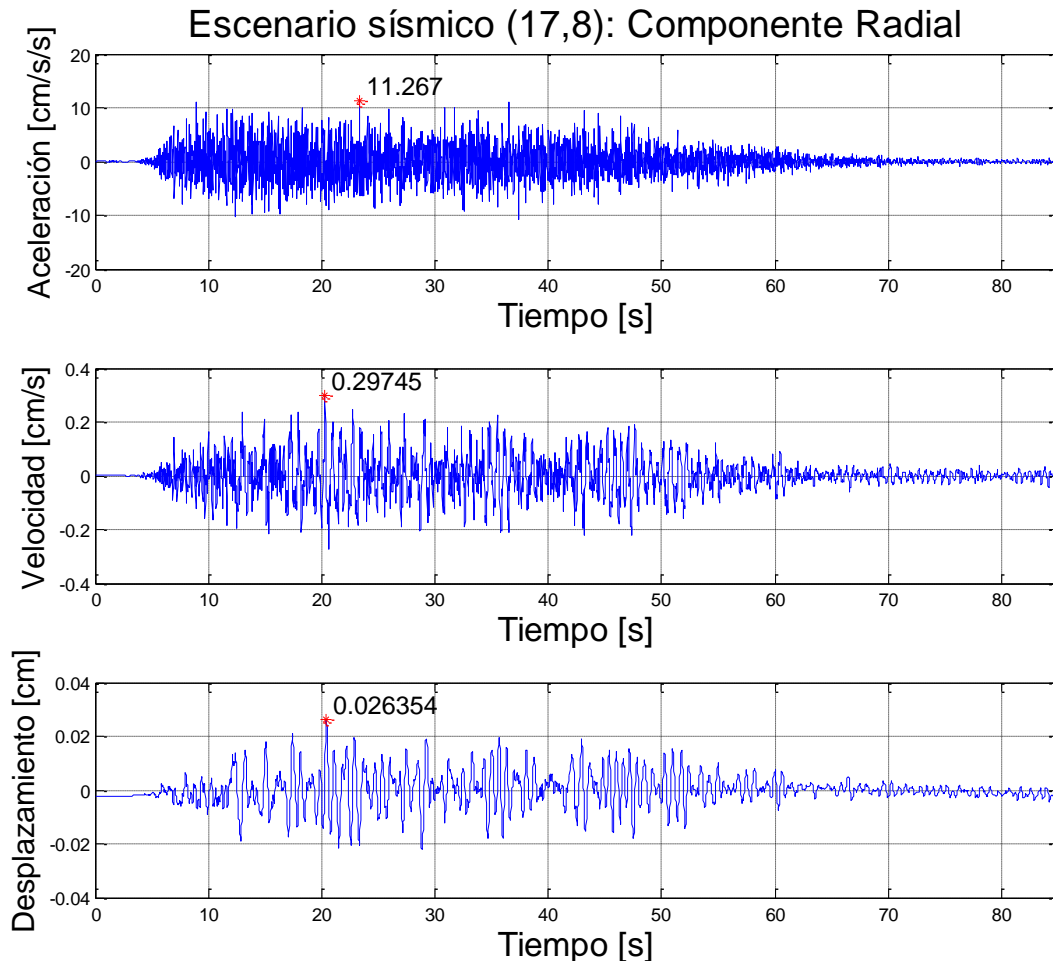


De acuerdo al modelo propuesto el sismo de 1912, el punto donde inicia la ruptura quedaría ubicado en la subdivisión en dirección de (rumbo, echado) en el escenario sísmico (17,8) del modelo propuesto. Así que se simuló el sismo, para una mejor estimación se consideró el efecto de sitio por lo que se agregó un estrato equivalente.

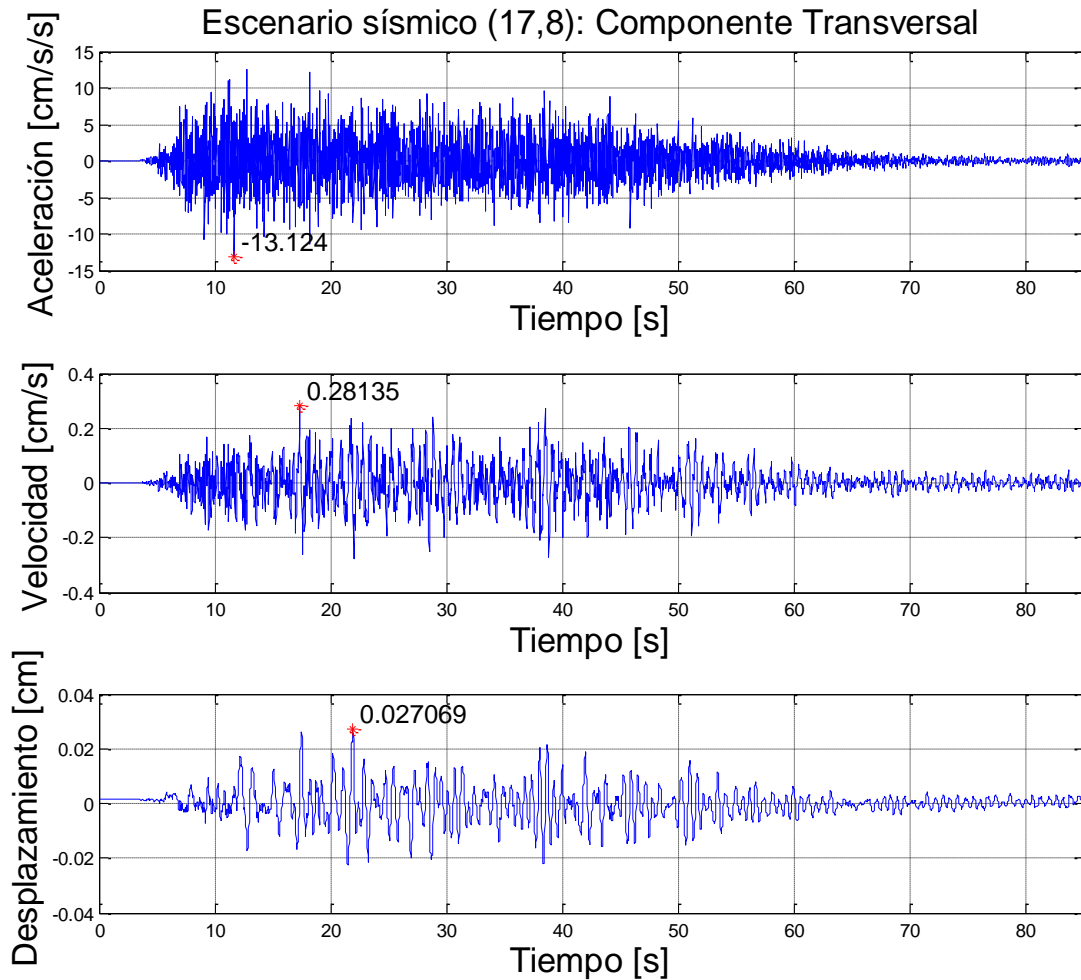
La zona de la refinería presenta un periodo de aproximadamente 1.6 s (Robles, 2014), y una velocidad de onda S promedio de 300 m/s. Con base a la siguiente relación:

$$T = 4H/V_s. \quad (4.28)$$

Se obtuvo el espesor de la capa, de la relación anterior  $T$  es el periodo de la zona de estudio,  $H$  el espesor y  $V_s$  la velocidad de ondas de corte. Por lo que para el espesor del estrato equivalente en base a la ecuación anterior (4.28) se calculó una profundidad de 120 metros. Por lo que los registros sintéticos de aceleración, velocidad y desplazamiento de las componentes horizontales radial y transversal considerando el efecto de sitio, son los siguientes (figura IV.19):



**Figura IV.19. Registros sintéticos para el escenario sísmico con inicio de ruptura en (17,8) que corresponde con la localización del hipocentro del sismo de 1912, para las componentes horizontales (Radial y Transversal); aceleración, velocidad y desplazamiento. Se muestra con una estrella roja el máximo valor para cada registro.**



**Figura IV.19. (Continuación).**

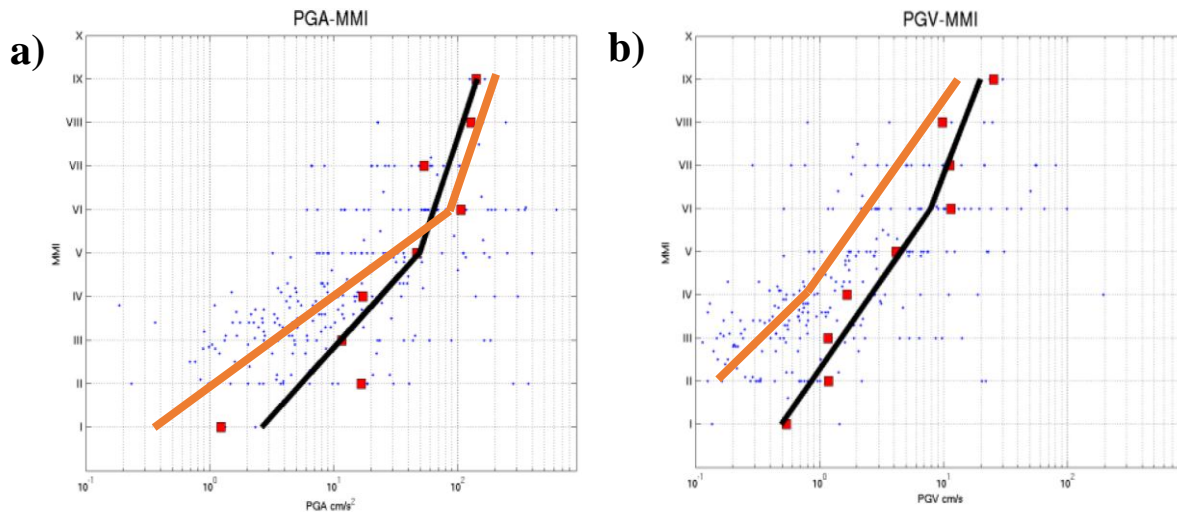
Una vez generados los registros sintéticos, se compararon los valores pico de aceleración (PGA) con relaciones de IMM, debido a que PGA suele ser el parámetro más usado para estimar la IMM. Este tipo de información es de gran importancia ya que es utilizado en la construcción de mapas de IMM basado en grabaciones instrumentales básicas de movimiento. Estas intensidades instrumentales se basan en una regresión combinada, de una aceleración máxima contra una intensidad observada (Wald *et al.*, 1999).

Las relaciones empleadas fueron tres; la propuesta por Wald *et al.* (2005), en donde de acuerdo a la aceleración y velocidad máxima divide de manera muy tajante la intensidad instrumental, así como el daño potencial asociado (tabla IV.5).

Movimiento percibido	No Sentido	Leve	Ligero	Moderado	Fuerte	Muy Fuerte	Severo	Violento	Extremo
Daño Potencial	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Muy ligero	Ligero	Moderado	Moderado /fuerte	Fuerte	Muy fuerte
PGA(%g)	<0.17	0.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PGV(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
Intensidad Instrumental	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

**Tabla IV.5. Relación de intensidades, aceleraciones máximas y velocidades máximas, donde g es la gravedad (g=981 cm/s), (Modificada de Wald *et al.*, 2005).**

Otra relación empleada es la que propone Sandoval *et al.* (2013), que para una serie de sismos registrados desde 1979 al 2012 con una magnitud mayor a M5 propone una relación de valores pico de aceleración (PGA) y de velocidad (PGV) con la IMM, como se observa no se presenta una tendencia clara, sin embargo Sandoval propone una relación de PGA y PGV contra IMM (línea naranja, Figura IV.20). Una ventaja es que, a diferencia de otras relaciones, esta usa exclusivamente datos de México.



**Figura IV.20. Ajuste para parámetros de aceleración máxima (a) y de velocidad máxima (b) con la IMM (Modificado de Sandoval *et al.*, 2013).**

La última relación utilizada para verificar la IMM esperada es la que involucra la Intensidad de Arias (1969), el cual es un parámetro usado para determinar el riesgo sísmico de un área, tomando como base un registro de aceleración. La expresión que involucra ambos parámetros es la siguiente (4.29):

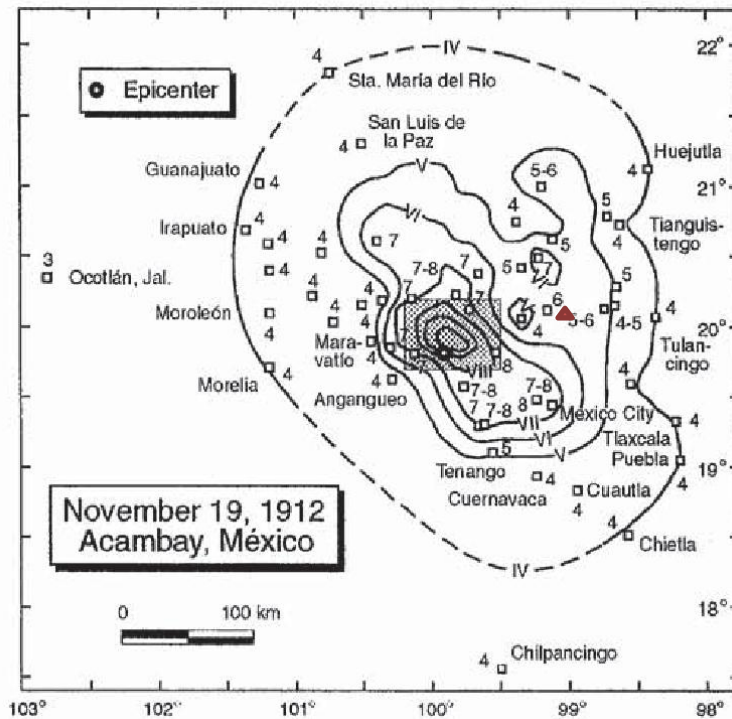
$$IMM = 1.03 \ln(IA) + 6.76 \tag{4.29}$$

Donde *IA*, es la Intensidad de Arias y la *IMM* es la Intensidad de Mercalli Modificada. Con estas tres relaciones se estimó la IMM para la zona de la refinería de Miguel Hidalgo. En la siguiente tabla (tabla IV.6.) se presenta la IMM correspondiente para el sismo generado que de acuerdo a reportes es donde tuvo lugar el sismo de 1912 y que en nuestro modelo se encontró en el escenario sísmico (17, 8).

Componente	Aceleración Máxima (cm/s/s)	IMM (de acuerdo al autor)			
		Wald	Sandoval	Arias	Promedio
Radial	<b>11.267</b>	III	IV	VII	V
Transversal	<b>13.124</b>	III	IV	VII	V

**Tabla IV.6. Relaciones de IMM para el sismo (17,8) lugar donde se presentó el terremoto de 1912.**

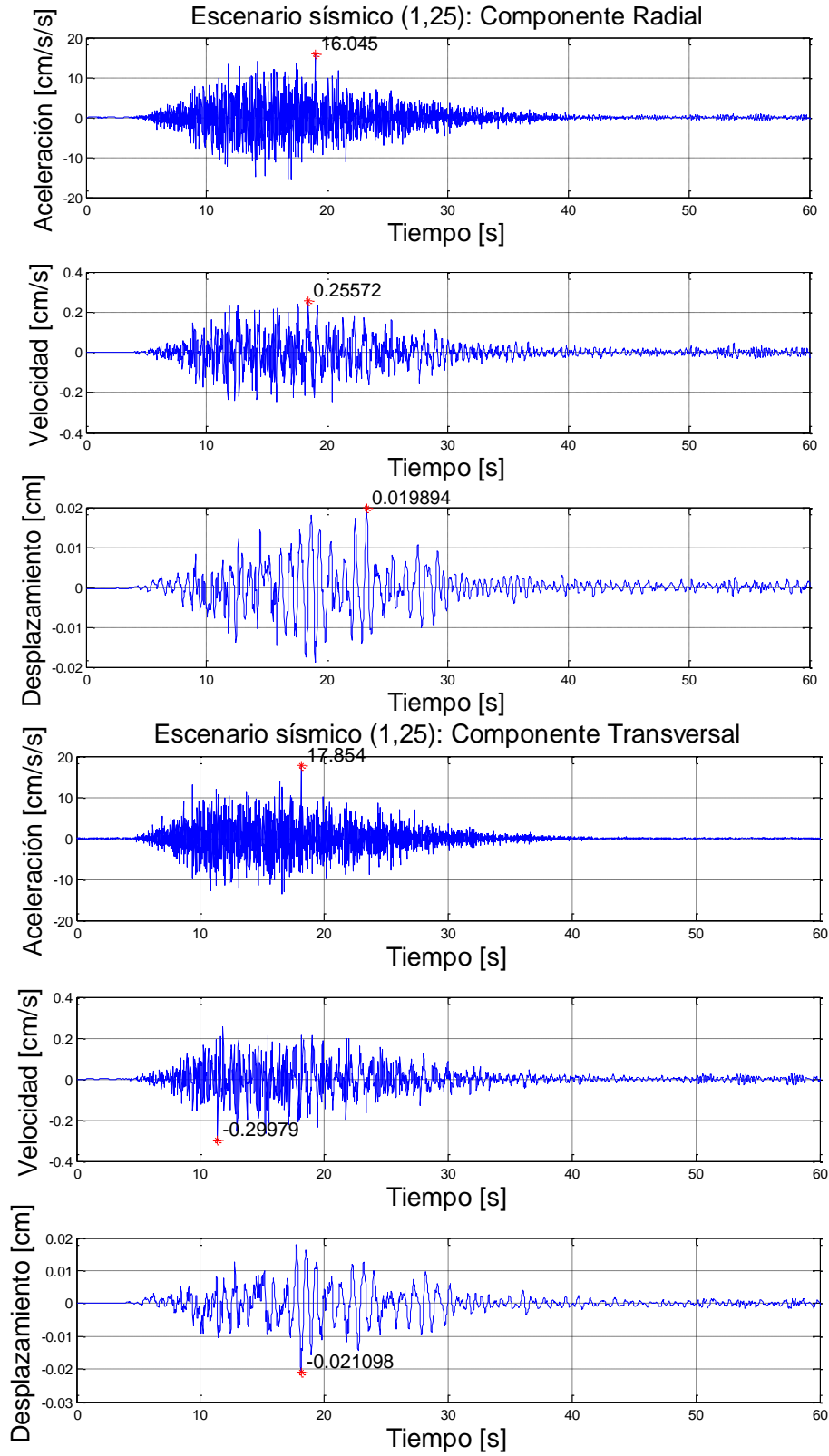
El valor promedio toma los tres valores de IMM y obtiene la media para considerar la IMM esperada. El valor promedio fue calculado de la siguiente forma; dado que Sandoval y Wald toman solamente los PGA para definir la IMM primero se obtuvo el promedio de ambos valores, posteriormente con este valor se promedió con la relación involucrada por la IA, para definir el promedio de la IMM. Como se observa las dos componentes definen una IMM de 5 valor que corresponde a lo que Suter *et al.* (1996) reporta para la región de la refinería Miguel Hidalgo (figura IV.21).



**Figura IV.21. Mapa de isosistas para el temblor de 1912 en Acambay, triangulo rojo refinería de Miguel Hidalgo.**

Después de verificar el escenario sísmico (17,8) con la intensidad reportada para el sismo de 1912, se generaron más escenarios con la finalidad de buscar el lugar donde se tendría la mayor aceleración de acuerdo a la falla propuesta, posteriormente se obtuvo la IMM esperada para ello se repitieron los pasos anteriores.

El escenario sísmico que presentó la aceleración máxima fue el escenario (1,25) en dirección (rumbo, echado), con los siguientes registros sintéticos (figura IV.22):



**Figura IV.22. Registros sintéticos para el escenario sísmico (1,25) para las componentes horizontales (Radial y Transversal); aceleración, velocidad y desplazamiento. Se muestra con una estrella roja el máximo valor para cada registro.**

Por lo que para estos valores máximos de aceleración corresponde una IMM de (tabla IV.7):

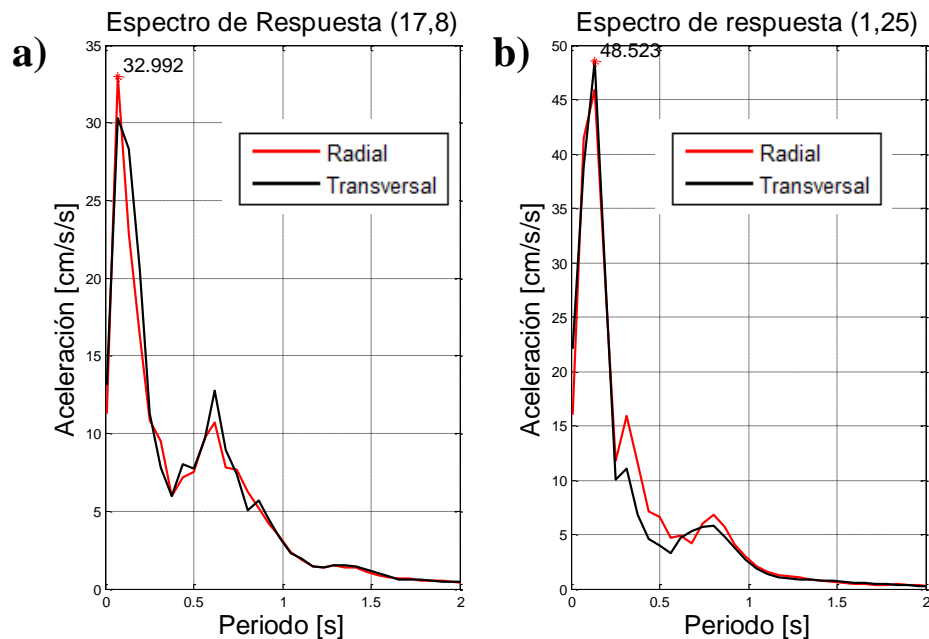
Componente	Aceleración Máxima (cm/s/s)	IMM (de acuerdo al autor)			
		Wald	Sandoval	Arias	Promedio
Radial	<b>16.045</b>	IV	IV	VII	VI
Transversal	<b>17.854</b>	IV	IV	VII	VI

**Tabla IV.7. Relaciones de IMM para el sismo ubicado en (1,25).**

Como se observa hay pocas variaciones de IMM con respecto al escenario (17,8) que se estimó, la IMM de Arias se mantuvo en VII y mientras que aumento una escala para Wald y Sandoval, por lo que la IMM promedio para este escenario fue de VI. Para continuar con el análisis del movimiento del terreno se obtuvieron los espectros de respuesta de los escenarios sísmicos antes vistos.

### IV.6. Espectros de respuesta y parámetros sísmicos calculados

Los espectros de respuesta se emplean frecuentemente para el diseño de estructuras así como también para la amplificación local debida al suelo originado por el efecto de sitio. Para el cálculo de los espectros de respuesta se supuso un comportamiento lineal en las estructuras, así un amortiguamiento del 5%, valores comunes en el análisis en ingeniería sísmica. Los espectros que a continuación se presentan fueron calculados para las componentes horizontales en respuesta de aceleración absoluta (figura IV.23).



**Figura IV.23. Espectros de respuesta para las componentes horizontales: radial (color rojo) y transversal (color negro), para los escenarios sísmicos (17,8) y (1,25), (a) y (b) respectivamente.**

Como se observa los espectros de los escenarios sísmicos (17,8) y (1,25) muestran una serie de picos; el pico máximo se encuentra cerca de 0.1s con una aceleración máxima de  $48.523 \text{ cm/s}^2$  (escenario (1,25) componente transversal), el segundo pico máximo se encuentra entre los 0.31s de periodo con una aceleración de  $15.91 \text{ cm/s}^2$  (escenario (1,25) componente radial), y un último pico en los 0.62s con una aceleración de  $12.75 \text{ cm/s}^2$  (escenario (17,8) componente transversal). Por lo que los espectros de respuesta hacen suponer que el terreno responde hacia periodos cortos.

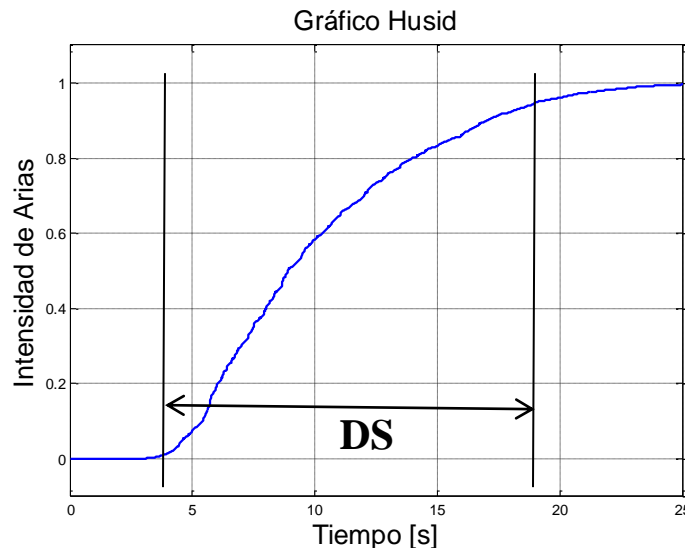
Scholl y Kustu (1981) proponen que de acuerdo al periodo de oscilación dominante que se presente en el terreno ( $T$ ), se verá afectado el número de pisos ( $N$ ) de concreto reforzado (ecuación 4.30):

$$T = \frac{N}{10} \quad (4.30)$$

Así que podemos deducir que para periodos cortos se asocian estructuras pequeñas, mientras que para periodos largos estructuras altas. En nuestro caso las estructuras más vulnerables serían; estructuras de 1 piso (para  $T=0.1s$ ) que presentan el mayor riesgo, también son vulnerables estructuras de 3 y 6 pisos (para  $T=0.31s$  y  $T=0.62s$ ) aunque en menor riesgo.

Para terminar con el efecto que tendría en la refinería Miguel Hidalgo al paso de un sismo de M6.9 proveniente de la falla de Acambay-Tixmadejé se obtuvo el parámetro de la duración significativa ( $DS$ ) de interés en ingeniería, ya que representa la duración intensa del sismo. La  $DS$  fue determinada a partir de los gráficos de Husid (1969).

La duración significativa relaciona la duración del sismo con la fase de máxima energía del movimiento, y queda representado por el tiempo transcurrido entre los instantes en los que alcanza el 5% y el 95% del valor de intensidad de Arias, así que la diferencia entre el 95% y 5% da como resultado la duración significativa (figura IV.24).



**Figura IV.24.** Gráfico de Husid y duración significativa ( $DS$ ), del 5% al 95% de la duración del registro sintético del escenario (17,8) para la componente radial.

La duración significativa (*DS*) se obtuvo para los registros sintéticos de los siguientes escenarios sísmicos: el escenario (17,8) que es donde tuvo lugar el sismo de 1912 y para el escenario (1,25) el cual presentó las aceleraciones máximas.

En las siguientes tablas (tabla IV.8. y tabla IV.9.) se muestra la *DS* así como parámetros que son importantes en ingeniería y que han sido calculados a lo largo de este capítulo. A manera de recordatorio también se presentan las características de la falla propuesta, así como las características de los escenarios sísmicos y su efecto en la refinería Miguel Hidalgo a través de una evaluación para las estructuras.

Escenario sísmico (17,8)		
Magnitud del sismo	M6.9	
Localización del epicentro	19.9°N, 99.82°W	
Profundidad del sismo	13.0865 km	
Escenario sísmico propuesto	(17,8)	
Geometría de la falla	Cuadrada	
Área de la falla	≈2280 km <sup>2</sup>	
Longitud de la falla	47.75 km	
Propagación de la ruptura	Radial	
Parámetros para la evaluación de estructuras	Componente	
	Radial	Transversal
Aceleración máxima (cm/s <sup>2</sup> )	11.267	13.124
DS de la aceleración (s)	42.6	42.4
Velocidad máxima (cm/s)	0.297	0.281
DS de la velocidad (s)	43.3	45.1
Desplazamiento máximo (cm)	0.0263	0.027
DS del desplazamiento (s)	44.3	43.4
Espectro de respuesta máximo (cm/s <sup>2</sup> )	32.992	30.265
Pico del periodo dominante (s)	0.1	0.1
Intensidad de Arias (cm/s)	0.849	0.845
IMM (promedio)	V	V

**Tabla IV.8. Características del escenario y parámetros de interés para la evaluación de estructuras estimadas para el escenario (17,8).**



Escenario sísmico (1,25)		
Magnitud del sismo	M6.9	
Localización del epicentro	19.86°N, 100.14°W	
Profundidad del sismo	42.7494 km	
Escenario sísmico propuesto	(1,25)	
Geometría de la falla	Cuadrada	
Área de la falla	≈2280 km <sup>2</sup>	
Longitud de la falla	47.75 km	
Propagación de la ruptura	Radial	
Parámetros para la evaluación de estructuras	Componente	
	Radial	Transversal
Aceleración máxima (cm/s <sup>2</sup> )	16.045	17.854
DS de la aceleración (s)	18.8	17.3
Velocidad máxima (cm/s)	0.255	0.299
DS de la velocidad (s)	30.7	23.4
Desplazamiento máximo (cm)	0.019	0.021
DS del desplazamiento (s)	22	20.5
Espectro de respuesta máximo (cm/s <sup>2</sup> )	45.944	48.523
Pico del periodo dominante (s)	0.1	0.1
Intensidad de Arias (cm/s)	0.679	0.814
IMM promedio	VI	VI

**Tabla IV.9. Características del escenario y parámetros de interés para la evaluación de estructuras estimadas para el escenario (1,25).**

En la siguiente figura (figura IV.25) se muestra la localización de ambos escenarios sísmicos, así como la geometría de la falla propuesta y la localización de la misma.

Después de terminar con la aplicación de los métodos empleados en el siguiente capítulo “Análisis y discusión de resultados”, se discutirá de manera pertinente los resultados obtenidos si bien se han comentado algunos resultados y justificado los parámetros utilizados, el siguiente capítulo tiene como objetivo dar una interpretación y un análisis a nuestros resultados.

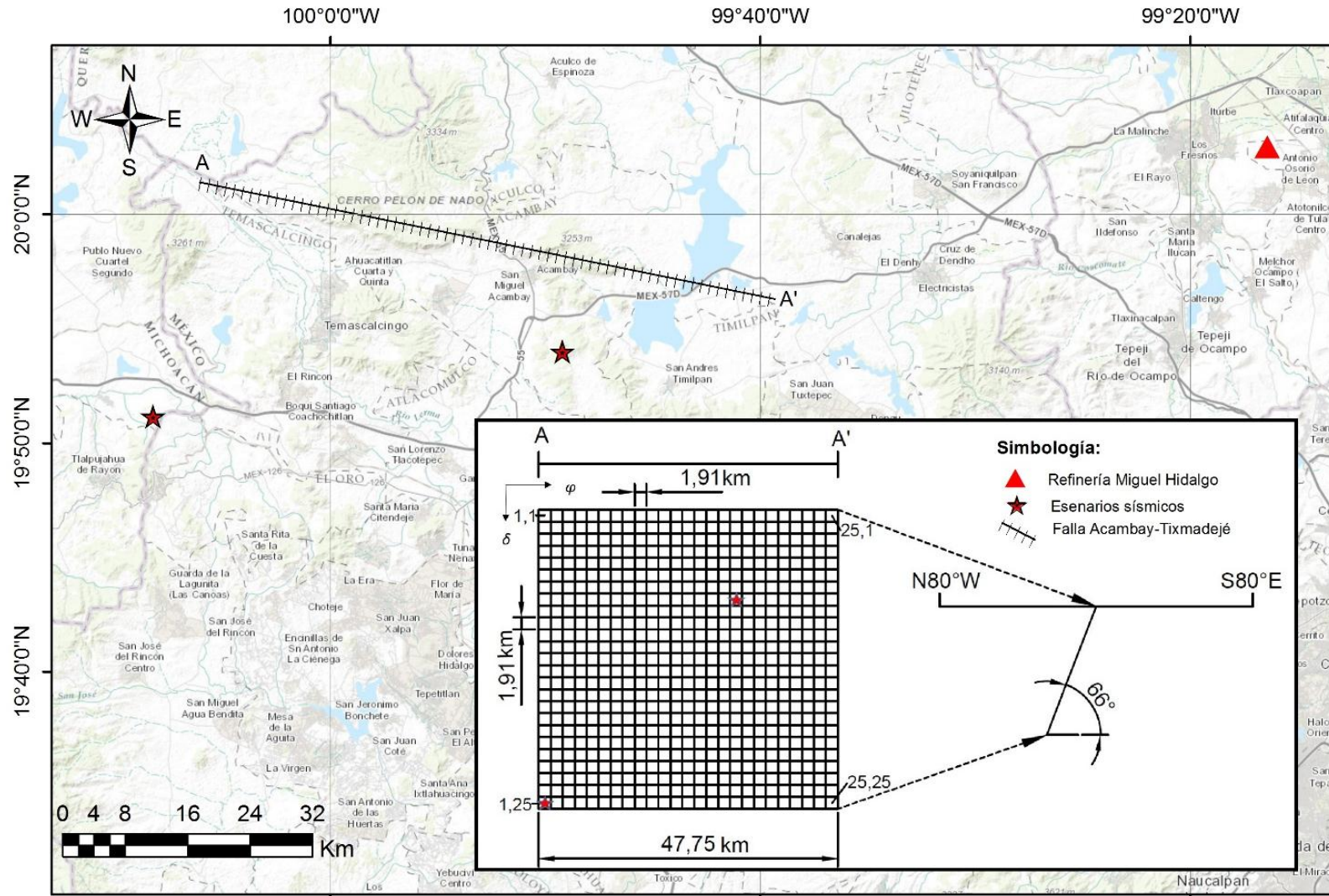


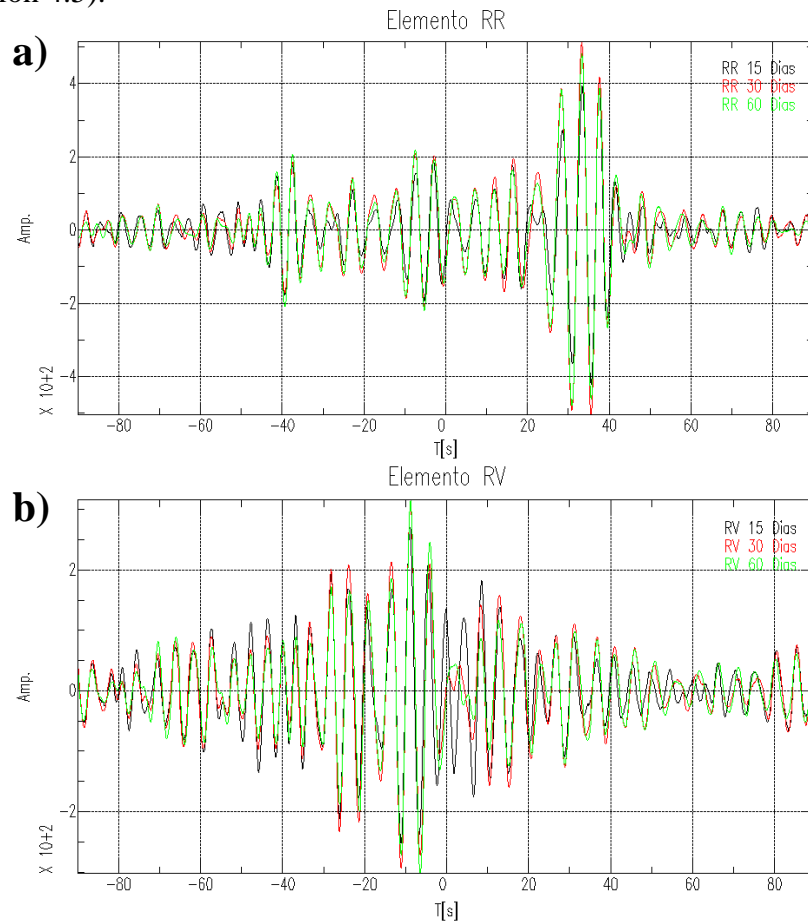
Figura IV.25. Representación propuesta para la geometría de la falla de Acambay-Tixmadejé, y epicentros de los siguientes escenarios: (1,25) escenario que presentó las mayores aceleraciones y (17,8) donde se originó el sismo de 1912.

# V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

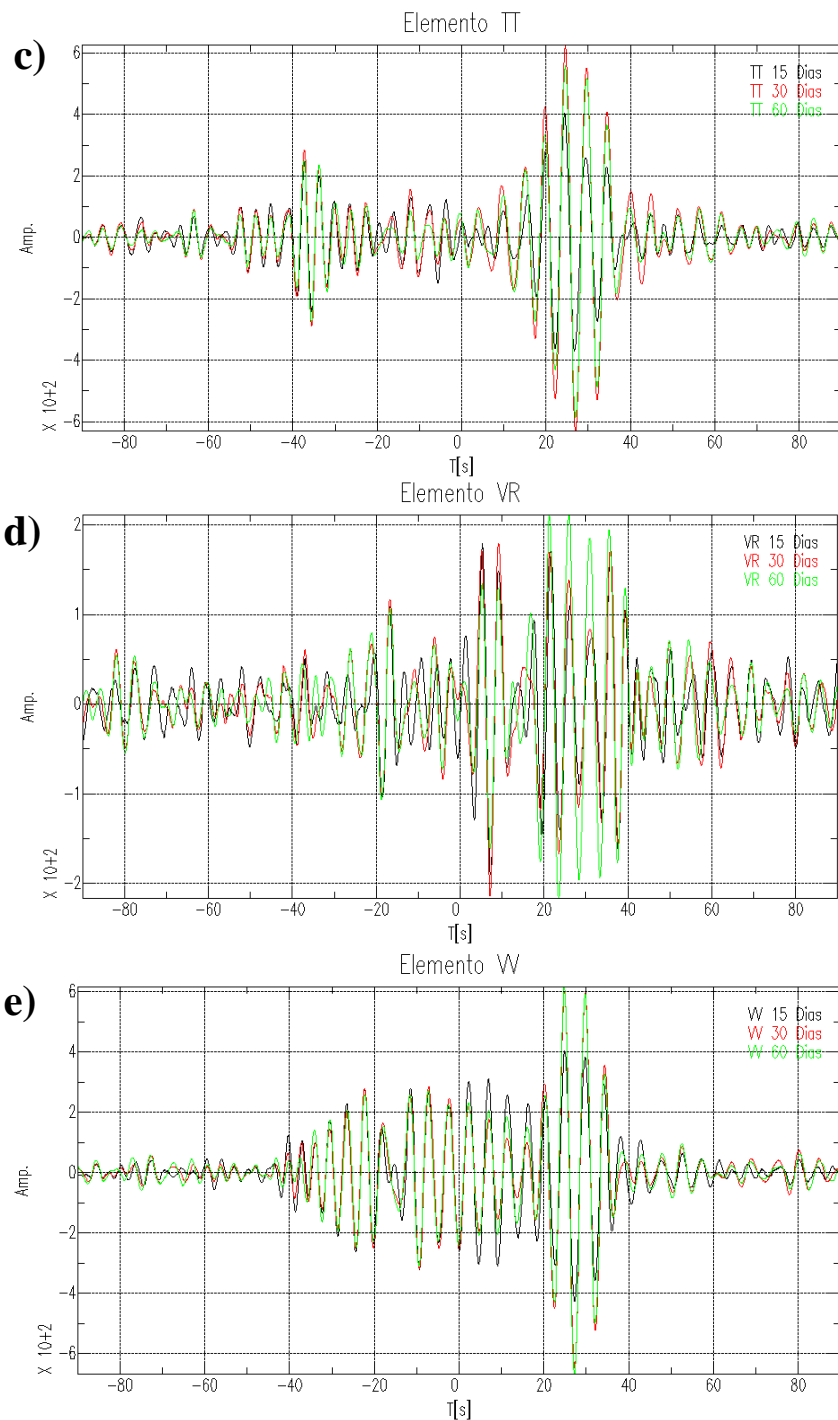
En el capítulo anterior se llevaron a cabo estudios experimentales con el objetivo de realizar, de la mejor manera, la simulación de movimientos fuertes en el graben de Acambay particularmente originados en la falla de Acambay-Tixmadejé y su posible afectación a la refinería Miguel Hidalgo a través de parámetros sísmicos.

## V.1. Sismograma sintético en bajas frecuencias por medio de las CCR

Como se vio en el apartado IV.2 se pudo determinar la función y el tensor de Green haciendo correlaciones cruzadas de señales de ruido sísmico tomando como base la metodología de Bensen *et al.* (2007). Para esta parte se correlacionaron 60 días de grabación y se realizó un promedio de todos los días. Se comprobó que mientras aumentan los días de correlación se mejora la señal coherente. En la figura V.1, se presenta el promedio de 15, 30 y 60 días de correlaciones cruzadas para los 5 elementos del tensor de Green (ecuación 4.5).



**Figura V.1.** Comparación de los distintos días promedios de las correlaciones cruzadas; 15 días (color negro), 30 días (color rojo) y 60 días (color verde), para cada uno de los elementos del tensor de Green: a) RR, b) RV, c) TT, d) VR y e) VV.



**Figura V.1. Continuación.**

Como se observa en cada elemento del tensor de Green la semejanza entre los 3 promedios realizados: 15 días, 30 días y 60 días es similar, aunque en todos los casos el promedio de 15 días presenta una menor amplitud y muestra una mayor discrepancia en cuanto a la forma de la onda con los promedios de 30 y 60 días.

Esto es debido a que a mayor cantidad de días de grabación, mejora la correlación y se recupera de mejor manera la función de Green. La “buena correlación” a partir de 15 días se debió en gran medida al procesamiento realizado, mejorando notablemente con la aplicación del filtro pasa bandas de 0.2 a 0.4 Hz, la normalización 1-bit y del gran número de correlaciones realizadas, para cada día se realizaron 48 correlaciones, ya que se trabajó con registros de media hora.

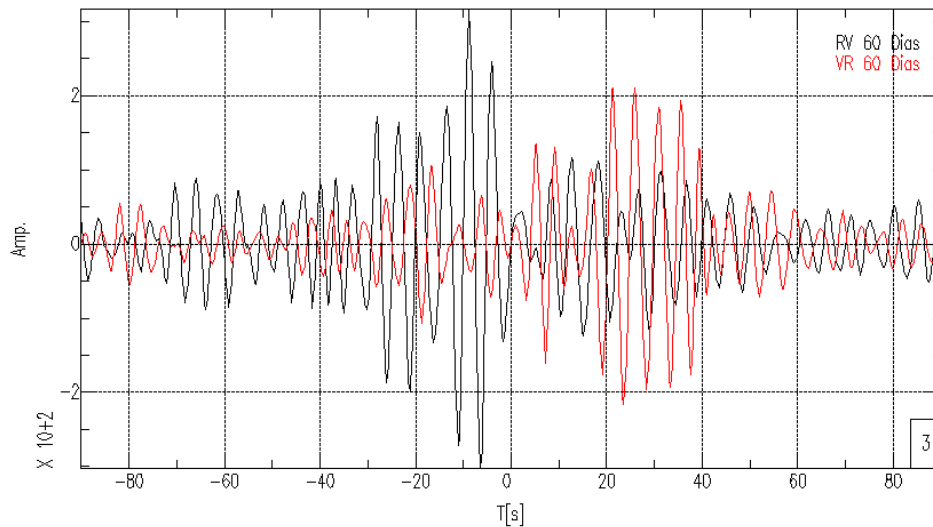
Para el caso de los promedios de 30 y 60 días son muy similares, la poca variación se tiene en amplitud ya que la forma de la onda es casi idéntica. Por lo que se puede deducir que se requiere de al menos 15 días de grabación para garantizar la recuperación de la función de Green en un rango de 0.2 a 0.4 Hz. Debido al proceso de la normalización se le aplicó un factor de calidad ( $Q(f) = 180f^{0.66}$ , Ortega *et al.*, 2003) para recuperar la amplitud por medio de la ecuación (4.9), por lo que esta metodología tiene la desventaja de perder la amplitud.

Analizando de manera independiente cada elemento del tensor de Green, se observa que la parte causal predomina, es decir hay mayor cantidad de fuentes de ruido hacia la parte de la refinería Miguel Hidalgo, en el anexo 4 se presentan las 60 correlaciones correspondientes a de cada día de correlación, se observa que cuando se correlacionan las mismas componentes ( $RR$ ,  $TT$  y  $VV$ ) es más claro observar la parte causal y no causal, esto es ocasionado a que las componentes de las dos estaciones presentan la misma orientación. La componente  $TT$  (figura V.1c), comparándola con los demás componentes esta muestra mayor simetría y una buena forma de onda por lo que el elemento  $TT$  del tensor de Green presentó la mejor correlación cruzada. Sin embargo la parte causal es la más predominante en todas las correlaciones, por lo que las fuentes no están distribuidas homogéneamente. Así que la posible fuente principal podría ser el oleaje proveniente del océano Pacífico, debido a que presenta una menor distancia hacia la estación de la refinería, además el filtro aplicado (0.2-0.4 Hz.) está en rango al oleaje.

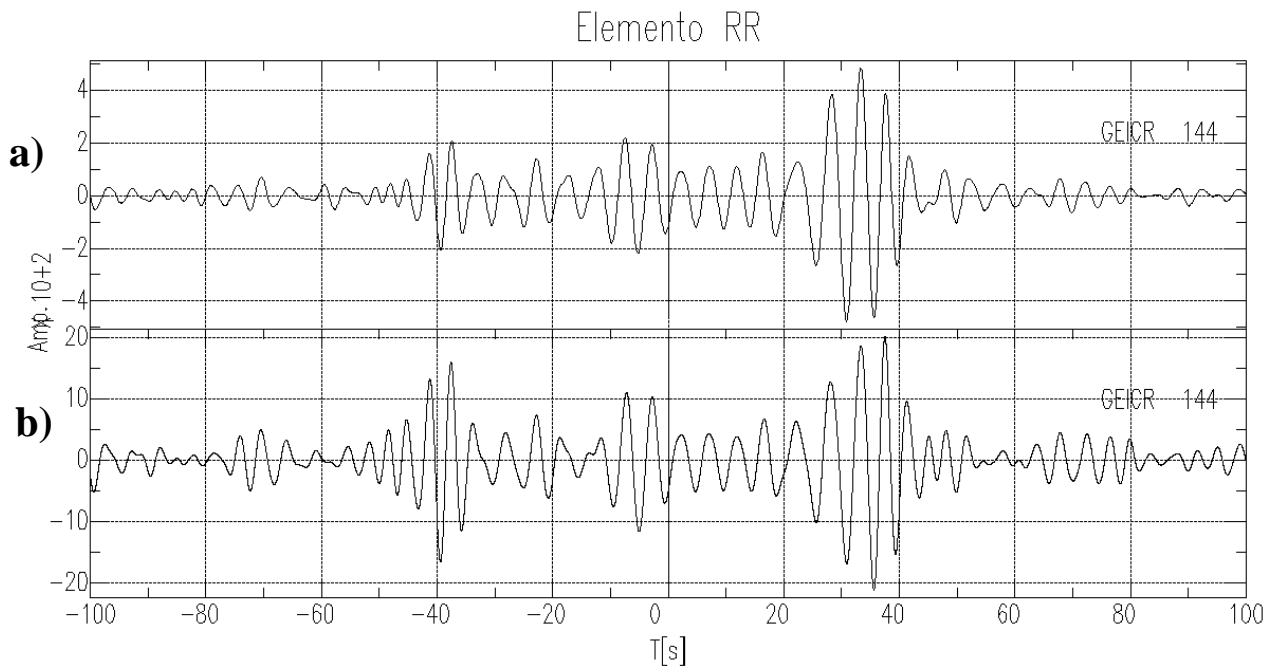
Como se mencionó anteriormente los elementos del tensor de Green que mostraron mejor correlación fueron donde se involucraban las mismas componentes ( $RR$ ,  $TT$  y  $VV$ ). Para el caso donde las correlaciones fueron con distintas componentes ( $RV$  y  $VR$ ) aunque se define la función de Green la forma de la onda no es tan clara como en las demás componentes, por lo que estas son las menos confiables. Como se observa en la componente  $RV$  (figura V.1b) ubica la función de Green hacia la parte no causal a diferencia de las restantes componentes, la forma para explicar este comportamiento es que si se considera un tensor de Green simétrico los elementos del tensor  $RV$  y  $VR$  tienen que ser simétricos, es decir uno debe tener predominio en la parte causal en nuestro caso sería la componente  $VR$  y otro dominará hacia la parte no causal como se observa en la componente  $RV$ , a modo que se vea claro esta suposición en la figura V.2 se presentan ambas correlaciones.

El procesado que se siguió para obtener cada elemento del tensor de Green fue una modificación a la metodología propuesta por Bensen *et al.* (2007). Para observar si cambiando el orden del procesado (ver IV.2.1) se modifica el promedio de las correlaciones cruzadas, se realizó primero la normalización temporal (paso 6) y después el filtrado pasa bandas (paso 5) para el elemento  $RR$  (radial-radial) del tensor de Green. En la figura V.3 se comparan ambos procesamientos. Como se observa los dos procesamientos

recuperan la función de Green, invirtiendo el procesamiento se define mejor la parte no causal (figura V.3b). Para el caso de la parte causal ambos procesamientos definen la misma forma de onda, en cuestión de duración y número de ciclos debido a que se trabajó con la parte causal el orden del procesamiento no modifica el resultado.



**Figura V.2. Comparación entre los elementos del tensor de Green: RV con contribución en la parte no causal (color negro) y VR con contribución hacia la parte causal (color rojo).**



**Figura V.3. Comparación entre procesamientos para el elemento RR del tensor de Green: a) proceso empleado en la tesis (ver IV.2.1) y b) procesamiento modificado, empleado primero la normalización temporal y después el filtro pasa bandas.**

Por medio de las correlaciones cruzadas se pudo verificar la velocidad de la onda cortante propuesta ( $\beta=3.4$  km/s), se puede considerar la afectación de la onda de superficie a partir de los 22.5 segundos (ver figura V.1) y dado que se conoce la distancia entre ambas estaciones (73.8 km), se puede determinar la velocidad de las ondas superficiales obteniendo un valor de  $V=3.28$  km/s, como se observa el valor es menor a la velocidad de la onda cortante, la diferencia se debe a que las ondas superficiales viajan a menor velocidad además de que a la correlación se le aplicó un filtro pasa bandas, este resultado es una manera más para comprobar que el procesamiento está funcionando adecuadamente.

Para obtener los registros sintéticos en sus tres componentes: radial, transversal y vertical a partir de las correlaciones cruzadas se emplearon las relaciones de Denolle *et al.* (2013). Como se observa en la figura IV.6 las relaciones funcionan adecuadamente, en los sismos utilizados (ver tabla IV.4). La componente transversal presentó la mejor forma de onda (figura IV.6a). Esto se debió a que el elemento  $TT$  del tensor de Green presentó la mejor correlación cruzada (ver anexo 4).

Para hacer esta comparación se realizaron las correlaciones cruzadas de la estación de Actopan, Hidalgo y la de la refinería, Hidalgo. Debido a que los sismos con los que se compara (ver tabla IV.4) se encontraban cerca de la estación Actopan. En el anexo 4 se tienen los elementos del tensor de Green para este par de estaciones, así como la comparación con los registros observados en la refinería con los registros sintéticos calculados para bajas frecuencias (anexo 5).

Después de comprobar que la metodología para estimar el sismograma en bajas frecuencias funciona adecuadamente, se calcularon los sismogramas sintéticos esperados para la refinería (figura IV.7). Dado que las relaciones de Denolle (ver ecuación 4.6) toman la influencia de las ondas superficiales se realizó un análisis para ver su presencia en los registros sintéticos (figura IV.8). El análisis consistió en observar el desfaseamiento en fase de las componentes radial y vertical, como se observa es de  $90^\circ$  desfaseamiento característico de las ondas Rayleigh, siguiendo con el análisis de estas ondas se obtuvo el movimiento de partícula, presentando un desplazamiento retrogrado elíptico (figura IV.8b), estas condiciones son propias de la onda Rayleigh, además la componente radial y vertical son similares lo que afirma la presencia de las ondas superficiales.

## V.2. Sismograma sintético en altas frecuencias

De acuerdo a nuestros valores propuestos se reajustó la magnitud reportada por el SSN para el evento del 23 de Septiembre del 2013 (ver tabla IV.4.) de M4 a M4.1, cambiando el momento sísmico a  $M_0=1.8618 \times 10^{22}$  [dyn-cm], con base en este resultado se calibraron los dos registros en bajas y altas frecuencias para un sismo de M4.1.

Se simuló de manera estocástica el evento del 23 de septiembre del 2013 (figura IV.11) para la estación de la refinería Miguel Hidalgo y para la estación de Temascalcingo. Con base en los sismogramas: observado y sintético se tiene que en ambos la forma de onda es la misma. En el caso de la estación de la refinería la amplitud es casi idéntica, mientras que para la estación de Temascalcingo la amplitud aumenta en el registro sintético. La amplitud

está controlada en gran medida por el factor de calidad se observa que al incrementar la distancia la amplitud se sobreestima. Esto da pie a considerar que la simulación estocástica (figura IV.12) esté siendo sobrestimada en amplitud. En busca de la simulación más conservadora se pretende encontrar la mayor aceleración por lo que no está mal sobreestimar la amplitud, además si analizamos la estación de la refinería se encontraría a una distancia intermedia entre las dos estaciones analizadas anteriormente (refinería y Temascalcingo) por lo que la sobrestimación de la amplitud no sería tan grande.

Otro parámetro importante en la simulación estocástica es la caída de esfuerzo, Singh *et al.* (2011) estiman una caída de esfuerzo de hasta  $\Delta\sigma=150$  bares para su sismo elemento, nuestro valor propuesto fue de  $\Delta\sigma=5.64$  bares. La diferencia es considerable, pero de acuerdo a la verificación de la simulación con los registros observados (ver figura IV.11) la caída de esfuerzos calculada es la indicada ya que un mayor valor sobreestimaría la amplitud del sismograma sintético, además el valor obtenido está en el rango de las caídas de esfuerzo calculadas por Astiz, (1980) para las réplicas del sismo del 22 de febrero de 1979 de  $M_c=5.1$  (1 a 10 bares para la mayoría de las réplicas).

La técnica *matched filter* nos permite unir sismogramas en altas y bajas frecuencias. Se observa en la figura IV.16, que el registro en bajas frecuencias aumentó el periodo del sismo elemento y disminuyó un poco la amplitud, esto ocasionado por la naturaleza del registro en bajas frecuencias. Para nuestro caso la disminución en amplitud no resultó ser tan mala ya que como se mencionó posiblemente la amplitud este siendo sobreestimada en la simulación estocástica.

Con base en los procesamientos y a los análisis realizados se puede deducir que el sismo elemento simulado está bien estimado con la desventaja de que no se conoce el mecanismo focal de la falla, es por ello que los valores fueron tomados de Langridge *et al.* (2000) y Astíz, (1980), con un rumbo de  $\phi=100^\circ$ , un echado de  $\delta=66^\circ$  y un deslizamiento de  $\lambda=-138^\circ$ , estos valores también se ocuparon para el sismo objetivo.

### V.3. Escenario sísmico y parámetros sísmicos

Para cubrir el área calculada en la ecuación (4.25b) se consideró una falla cuadrada. Por lo que la longitud de la falla propuesta es de 47.75 km, valor que coincide aproximadamente con la longitud de la falla Acambay-Tixmadejé. Al tener un echado de  $66^\circ$  la falla alcanza una corta longitud en dirección perpendicular a la falla y una buena profundidad por lo que lo que las dimensiones de la falla se adecuan al graben de Acambay.

Con casi todos los parámetros ajustados se buscó el mejor modelo probando varios valores de *rise time* (tiempo de ascenso) y de velocidad de ruptura. El *rise time* mostró poca sensibilidad al cambió de valores, mientras que la velocidad de ruptura presentó una alta sensibilidad, aumentando la amplitud cuando la velocidad de ruptura aumentaba. En busca del escenario sísmico más conservador, se buscó el modelo que presentará las mayores aceleraciones, por tal motivo se utilizó la relación de Madariaga, (1976) para definir la velocidad de ruptura (ecuación 4.27).



Con el modelo definido, se realizó primero la simulación considerando el punto de inicio de ruptura en donde tuvo lugar el hipocentro del sismo de 1912. En el modelo la posición del hipocentro se encontró en el punto (17, 8) en dirección (rumbo, echado) esto con la finalidad de comparar la simulación con el sismo. Debido a que no se tiene un registro en la zona cercana a la refinería Miguel Hidalgo del sismo de 1912 no se pudo comparar con un registro observado como suele hacerse para validar el escenario propuesto. Sin embargo se realizó una validación cualitativa con el mapa de isosistas propuesto por Suter *et al.* (1996) para el sismo de 1912 (figura IV.20.) estimando una IMM de V para la refinería.

Para el cálculo de nuestra IMM esperada se emplearon 3 diferentes relaciones de intensidad y se promediaron. Dos de ellas toman como base la aceleración máxima: Wald *et al.* (2005) y Sandoval *et al.* (2013). La relación propuesta por Wald como se observa en la tabla IV.5 es un tanto tajante y define en rangos específicos a las aceleraciones máximas, y toma como referencia sismos originados en EUA. La relación propuesta por Sandoval fue realizada a través de sismos originados en el país con una magnitud mayor a M5.1. Como se observa en la figura IV.19a, se tienen diferentes aceleraciones en una misma intensidad. Esto es influenciado por el efecto del trayecto y el efecto de sitio principalmente. No obstante Sandoval propone una tendencia de IMM-PGA (línea negra, ver figura IV.20a). La tercera relación toma como base la Intensidad de Arias (ecuación 4.29). Ésta, además de tomar la mayor aceleración, toma la duración significativa ( $DS$ ) del registro.

Con estas tres relaciones se obtuvo un promedio para estimar la IMM esperada, primero se promediaron las dos primeras relaciones, ya que solo consideran la PGA. El valor promedio de estas dos relaciones se promedió con la relación que involucra la intensidad de Arias, y finalmente se obtuvo la IMM esperada.

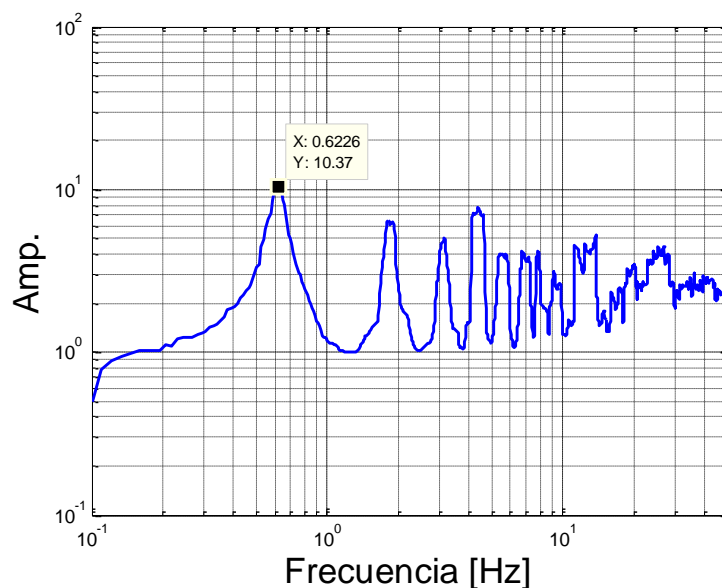
La aceleración máxima para cada componente fue de: radial  $11.267 \text{ cm/s}^2$  y transversal  $13.124 \text{ cm/s}^2$ , las aceleraciones máximas fueron menores a las estimadas, sin embargo esto se debe en parte a la atenuación que se tiene en el CVTM, por lo que con estas aceleraciones y con base en las dos primeras relaciones antes mencionadas (Wald *et al.*, 2005 y Sandoval *et al.*, 2013) se tendría una IMM de III y IV para la refinería. Ambas relaciones de IMM-PGA estiman una IMM menor a la reportada por Suter *et al.* (1996). Como se mencionó anteriormente estas relaciones se basan solamente en la máxima aceleración y a veces resulta un poco relativo definir la IMM a partir de aceleraciones máximas. Sandoval muestra aceleraciones máximas de entre 6 y  $600 \text{ cm/s}^2$  para una IMM de VI (figura IV.20a).

Mientras la relación con base en la intensidad de Arias, estima una IMM de VII. La relación, como se comentó, también considera la duración significativa. Por esta razón probablemente esta sea la relación más adecuada pero de acuerdo a los resultados parece estar sobreestimando la IMM mientras que las dos anteriores tal vez la estén subestimando. Por lo que, tomando la influencia de las tres relaciones para mitigar estos efectos y mejorar la estimación, se propone una IMM de V, valor que concuerda a lo reportado por Suter *et al.* (1996). Así que tomando las relaciones en conjunto se tiene una buena estimación y sobre todo se verifica que el modelo propuesto está funcionando adecuadamente.

Después de comprobar el modelo, se buscó el escenario sísmico que presentara las mayores aceleraciones. Éste se encontró en el punto de inicio de la ruptura en la subfalla (1,25) con localización epicentral en 19.86°N, 100.14°W a una profundidad de 42.7494 km. La simulación de este escenario presenta la mayor aceleración en la componente radial con  $17.854 \text{ cm/s}^2$ . Se repitió el mismo procedimiento y se estimó una IMM de VI. Por lo que para la refinería se estimaría una IMM entre V y VI que de acuerdo a la escala el daño potencial a las estructuras sería ligero, con posible rompimiento de ventanas y agrietamiento de estructuras débiles.

En los escenarios antes vistos se observa el efecto de la directividad (ver figura V.18. y figura V.20.), el efecto de directividad de la fuente sísmica es uno de los principales causantes de las grandes aceleraciones. El escenario sísmico (1,25) presentó la máxima directividad teniendo su hipocentro a mayor distancia a la refinería Miguel Hidalgo y generando las mayores PGA. De igual forma se ve reflejada la directividad en la duración significativa de los sismogramas sintéticos, ya que presentó un menor tiempo de duración ayudado por el azimut y la posición del escenario en la falla propuesta (ver tabla IV.18 y tabla IV.19), justificado por el modelo de falla de Haskell.

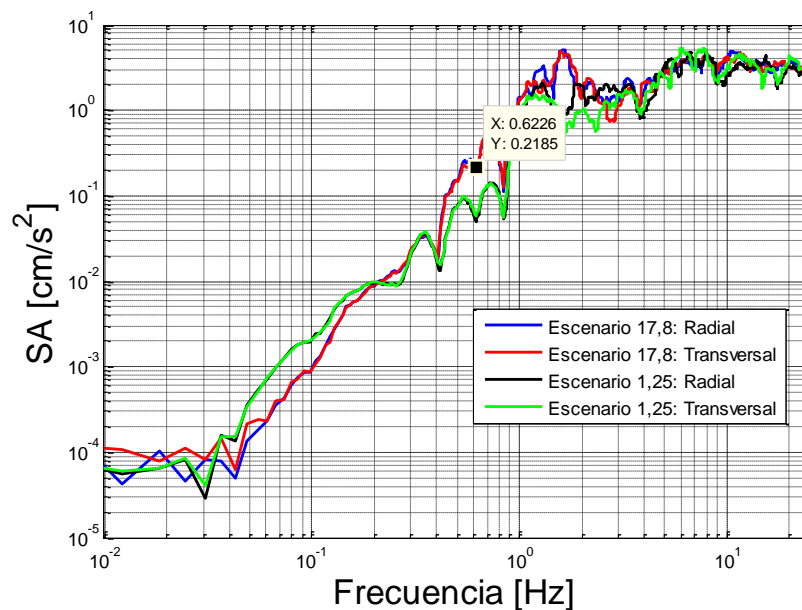
Analizando los espectros de respuesta de los registros simulados en la refinería (figura IV.22), se observó que aun agregando el estrato equivalente, la máxima aceleración se mantuvo hacia un periodo bajo ( $T \approx 0.1 \text{ s}$ ). En la figura V.4, se presenta la función de transferencia. Como se observa en la función la frecuencia donde se tiene la máxima amplificación es en 0.6226 Hz que corresponde al periodo considerado para la refinería ( $T=1/F= 1/0.6226 = 1.6\text{s}$ ), de igual forma se aprecia la mayor amplificación para este periodo.



**Figura V.4. Función de transferencia considerando un periodo igual a  $T=1.6\text{s}$ .**

Por lo que para observar el problema al no responder el espectro de respuesta al periodo de  $T= 1.6\text{s}$  se obtuvieron los espectros de amplitud de aceleración para los dos escenarios sísmicos en sus dos componentes horizontales; radial y transversal (figura V.5). En la frecuencia correspondiente (0.6226 Hz) se tiene un valle el cual afecta el espectro de

respuesta, presentando poca energía. También se observa que la frecuencia que pudiera considerarse la frecuencia de corte se encuentra cercana a los 3 Hz, esto aporta también a que el espectro de respuesta no responda al periodo de 1.6s.



**Figura V.5. Espectros de amplitud de aceleración para los escenarios sísmicos (17,8) y (1,25).**

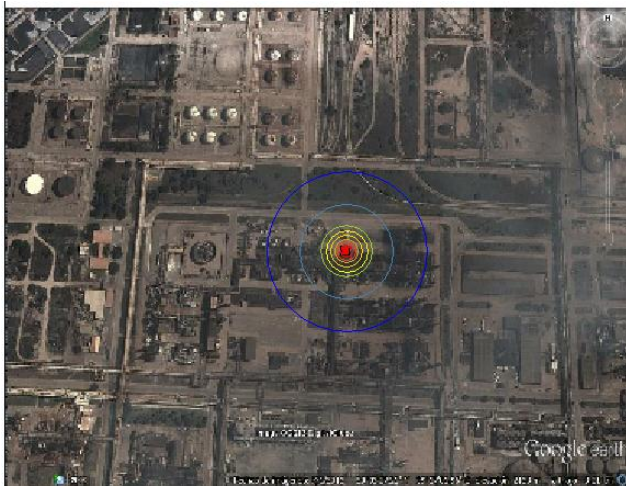
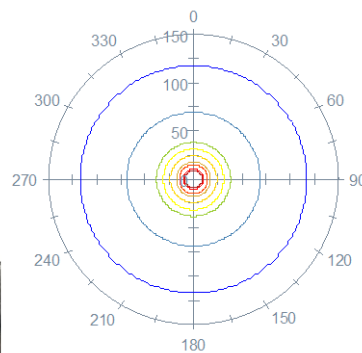
Para responder a esta frecuencia de 0.6226 Hz, la frecuencia de corte tendría que recorrerse hacia frecuencias más bajas, lo que implicaría un evento de mayor magnitud lo que se traduce a una mayor área de falla. La cuestión es cuál es la magnitud máxima que puede generar el graben de Acambay. Haciendo un análisis sin entrar a detalle y tomando las relaciones antes vistas, se puede calcular al área máxima del graben. En la tesis se propuso una falla cuadrada de longitud de 47.75 km que es acorde a la reportada por Langridge *et al.* (2000). Sin embargo en la simulación realizada por Singh *et al.* (2011) proponen una longitud de 55 km valor obtenido de las réplicas del sismo de 1912. Si consideramos una falla rectangular de 55 km de longitud y 47.75 km de ancho el área máxima de la falla sería de 2626.25 km<sup>2</sup> si obtenemos la magnitud de momento a través de la ecuación (4.25a.), a partir de esta área tenemos un  $M_0 = 3.59 \times 10^{26}$  [dyn-cm], por lo que sustituyendo en la ecuación (4.20) el área máxima generaría un sismo de magnitud M7.0, que sería la magnitud máxima que se generaría en el graben de Acambay, particularmente en la falla de Acambay-Tixmadejé. Por lo que el corrimiento de la frecuencia de corte hacia frecuencias bajas sería poco.

Analizando los daños que pudiera tener la refinería Miguel Hidalgo a través de nuestros resultados, se estimó una IMM de VI, por lo que el sismo sería sentido por todos, habría ventanas rotas, oscilamiento de objetos altos, daño a chimeneas y daño leve a las estructuras (CENAPRED, 2009). Sin embargo se debe de tener cierto recelo ya que la relación que involucra la intensidad de Arias prevé una IMM de VII que como se mencionó anteriormente esta pudiera ser la más certera, aumentando los daños a las estructuras ya que se tendrían: daños insignificantes en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras comunes bien construidas; considerables en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas (CENAPRED, 2009).

Como se describió en la tabla III.1 existen 13 puntos críticos que son vulnerables en la refinería, debido a que los compresores trabajan a grandes presiones y un cambio provocaría explosiones en los mismos y afectaciones a equipos cercanos. De acuerdo a Sandoval (2014) los daños a la refinería Miguel Hidalgo tras el paso de un sismo de M8.1 ponen en riesgo a la refinería Miguel Hidalgo, instalaciones circundantes, a los trabajadores, a la población civil y al ambiente. El daño varía de acuerdo a la capacidad del contenedor, variando entre un rango de 2 a 15 metros a la redonda del mismo. Presentando la mayor afectación en el contenedor 8 (figura V.6) y la mínima afectación en el contenedor 2 (ver tabla III.1). En el anexo 7 se presenta la relación de psig-efecto a la refinería (DOT, 1989). Un incendio en los 13 contenedores sería alarmante y podría salirse de control, además de que alguna estructura podría sufrir algún daño independientemente a los compresores. Cerca de la refinería hay industrias que de igual forma podría verse afectadas como son: la cerillera, empresa de embutidos, productora de agroquímicos, por lo que nuestros resultados pudieran ser aplicables a estas zonas industriales así como para construcciones de casas cercanas a la refinería.

**Compresor de recirculación perteneciente a la H-OIL  
(F.E.E. = 0.03)**

- 200.00 kPa (29.01 psig) a 9.03 m
- 150.00 kPa (21.76 psig) a 10.28 m
- 70.00 kPa (10.15 psig) a 14.88 m
- 50.00 kPa (7.25 psig) a 17.82 m
- 30.00 kPa (4.35 psig) a 24.05 m
- 20.00 kPa (2.90 psig) a 31.32 m
- 15.00 kPa (2.18 psig) a 38.34 m
- 7.00 kPa (1.02 psig) a 69.04 m
- 3.50 kPa (.51 psig) a 117.50 m



**Figura V.6. Radios de afectación para el compresor 8 (Modificado de Sandoval, 2014).**

## VI. CONCLUSIONES

Para la construcción de un escenario sísmico en el graben de Acambay y su estimación de los posibles daños a la refinería Miguel Hidalgo a través de parámetros sísmicos, se han aplicado diversas metodologías sísmicas que se han analizado y discutido en los anteriores capítulos. Por lo que la presente tesis concluye lo siguiente:

- 1) Se pudo recuperar la función de Green de buena forma en un rango de frecuencias de 0.2 a 0.4 Hz., por medio del método de las correlaciones cruzadas de ruido sísmico. Como muestran nuestros resultados se recupera la función de Green a partir de 15 días de correlaciones, esto se debió al gran número de correlaciones realizadas (48 correlaciones cruzadas por día) y al procesamiento empleado.
- 2) Mediante los datos de ruido sísmico utilizados se comprobó que las fuentes no se encuentran distribuidas homogéneamente, esto se reflejó en la falta de simetría en la parte no causal de las correlaciones cruzadas. De acuerdo a nuestras correlaciones la principal contribución de fuente se encuentra hacia la estación de la refinería Miguel Hidalgo, en base al rango de frecuencia aplicado (0.2-0.4 Hz.) y debido a que presenta una menor distancia al mar, la fuente principal de ruido pudiera tratarse del oleaje del mar proveniente del océano Pacífico.
- 3) Se determinó el tensor de Green, después de aplicar la correlación cruzada entre las tres componentes de cada estación, teniendo una mejor recuperación de la función de Green cuando se realizaron las correlaciones de la misma componente (*RR* (radial-radial); *TT* (transversal-transversal); *VV* (vertical-vertical)). En nuestro caso el elemento del tensor de Green *TT* presentó una mejor recuperación de la función de Green, ya que es el elemento en donde es más evidente la parte simétrica de las correlaciones cruzadas.
- 4) Se pudo generar el sismograma sintético en bajas frecuencias por medio de las relaciones de Denolle *et al.* (2013), conociendo las características geológicas del lugar (mecanismo focal) y haciendo correlaciones de ruido sísmico lo que permite una manera fácil de simular sismos en baja frecuencia a través de realizar correlaciones cruzadas. Con la metodología ocupada en la presente tesis se perdió la amplitud en la normalización temporal 1-bit y se tiene la desventaja de tener que usar una ley de atenuación.
- 5) Se comprobó la presencia de la onda Rayleigh en nuestro sismograma sintético en bajas frecuencias mediante el desfase de 90°, y el movimiento de partícula retrogrado elíptico para las componentes radial y vertical.
- 6) Para nuestra simulación en bajas y altas frecuencias (simulación estocástica) el factor de calidad propuesto por Ortega *et al.* (2003) resultó ser el más adecuado ( $Q(f)=180f^{0.66}$ ). Para la obtención de la estimación estocástica así como para las

correlaciones cruzadas se emplearon los mismos parámetros para el cálculo de la amplitud (ver ecuación 4.11), lo que permite concluir que la estimación realizada del sismo elemento este bien realizada.

- 7) El sismo elemento se calibró con el sismo ocurrido cerca de Progreso, Hidalgo el 23 de septiembre del 2015 reportado por el SSN (ver tabla IV.4.), cuya magnitud se modificó de M4 a M4.1 después de analizar los sismos registrados por la red temporal utilizada y aplicar la ecuación (4.22).
- 8) Para la generación de un escenario sísmico en el graben de Acambay, proveniente de la falla Acambay-Tixmadejé se propone una falla cuadrada con un área aproximada de  $2280 \text{ km}^2$  y una longitud de 47.75 km valor que cumple con la longitud de la falla. Se propone el siguiente mecanismo focal: rumbo de  $100^\circ$ , echado de  $66^\circ$  y deslizamiento de  $-138^\circ$ .
- 9) Se verificó la Intensidad de Mercalli Modificada estimada para la refinería Miguel Hidalgo (IMM=V), provocada por el sismo del 19 de noviembre de 1912, cuya magnitud reportada fue de M6.9. La simulación del sismo se encontró con el escenario sísmico (17,8) del modelo propuesto en dirección (rumbo, echado), con coordenadas epicentrales en  $19.9^\circ\text{N}$ ,  $99.82^\circ\text{W}$  a 13 km de profundidad. La máxima aceleración se encontró en la componente radial con  $13.124 \text{ cm/s}^2$  y con una duración significativa promedio del evento de 43 segundos.
- 10) El escenario más conservador que presentó las máximas aceleraciones se halló con el escenario sísmico (1, 25) y se propone como el epicentro que puede generar más daños. El cual se encontró en las siguientes coordenadas epicentrales  $19.86^\circ\text{N}$ ,  $100.14^\circ\text{W}$  a una profundidad de 42.7494 km. Las aceleraciones máximas fueron las siguientes: para la componente radial  $16.045 \text{ cm/s}^2$  y para la componente transversal  $17.854 \text{ cm/s}^2$ , estimando una IMM de VI con una duración significativa promedio de 30 segundos.
- 11) De acuerdo a los espectros de respuesta, la máxima aceleración se encuentra en el periodo cercano a 0.1s, mientras que el periodo del terreno en la refinería es de aproximadamente 1.6s, por lo cual no se tendría problemas de resonancia con base en nuestros resultados. La máxima aceleración estimada sería de  $48.523 \text{ cm/s}^2$  provocada por el escenario sísmico (1,25). Se tienen otros periodos dominantes entre 0.31s y 0.6s. Por lo que las construcciones de entre 1 y 3 pisos sería las más propensas a daños.
- 12) Tomando la máxima área de la falla de Acambay-Tixmadejé se propone que la magnitud máxima que puede generar es de M7.0 lo cual no representa un cambio significativo a nuestra estimación en todos los aspectos calculados.

---

La presente tesis muestra la importancia del ruido sísmico para la generación de sismogramas sintéticos en bajas frecuencias a través de las correlaciones cruzadas, al igual que la generación de la función de Green estocástica cuando no se tienen sismos o cuando la región no es sísmicamente activa. Por lo que ambos métodos brindan una solución efectiva para la obtención de sismogramas sintéticos.

Aunque se argumentaron de manera oportuna nuestros resultados, a continuación se mencionan algunas recomendaciones y observaciones las cuales tiene por objetivo que se obtengan mejores resultados lo que ayudaría a mejorar el trabajo:

- I) Se recomienda instalar una mayor cantidad de estaciones temporales con la finalidad de conseguir una mejor cobertura, y que esté en funcionamiento durante un periodo relativamente largo para registrar posibles sismos originados en el graben de Acambay. Así mismo poder observar fenómenos de atenuación y amplificación. El aumento de las estaciones ayudaría a extender el análisis de las amplitudes para otros rangos de frecuencia por lo que la recuperación de la función de Green en bajas frecuencias por medio de las correlaciones cruzadas cubriría un rango más amplio.
- II) De acuerdo a nuestro análisis se propuso un modelo de falla de 25x25 para la construcción del escenario sísmico, sin embargo al aumentar el número de subeventos se presentan caídas profundas hacia frecuencias intermedias ( $\sim 2$  a  $\sim 11$  Hz) en el espectro  $\omega^{-2}$  (Irikura y Kamae, 1994). Por ello se recomienda agregar fractales para corregir el espectro  $\omega^{-2}$ , por los alcances de la tesis no se pudo obtener.
- III) Se recomienda a la refinería Miguel Hidalgo que tome en cuenta los parámetros calculados y las consideraciones realizadas en la presente tesis con el objetivo de salvaguardar a los trabajadores de la refinería así como la población ya que un evento de las dimensiones propuestas (M6.9) podría ocasionar daños especialmente en los compresores. Por ello se recomienda hacer capacitaciones a los empleados al igual que incrementar las medidas de seguridad de las instalaciones especialmente en el lugar donde se encuentran los compresores. Los parámetros calculados también son aplicables a la mayoría de las casas ubicadas cerca de la refinería Miguel Hidalgo.

## REFERENCIAS

- Acosta P. M., 2012, “*Simulación de un escenario sísmico en la ciudad de Tapachula, Chiapas, usando el método de función de Green empírica*”, Tesis de Licenciatura, FI, UNAM.
- Aki K., 1967, “*Scaling law of seismic spectrum*”, Journal of Geophysical Research, Vol. 72, pp. 1217-1231.
- Aki K., y Richards P., 2002, “*Quantitative seismology*”, University Science Book, 2nd edition, USA.
- Andrews, D. J., 1986, “*Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size*”, Geophysical Monograph Series, Vol. 37, pp. 259-267.
- Arias A., 1969, “*A measure of Earthquake Intensity*”, Ed. R. J. Hansen Seismic Design for Nuclear Power Plants. MIT Press, pp. 438-483.
- Astíz D. L. M., 1980, “*Sismicidad en Acambay, Estado de México. El temblor del 22 de febrero de 1979*”, Tesis de Licenciatura, FI, UNAM.
- Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., y Levshin A.L., 2007, “*Processing seismic ambient data to reliable broad-band surface wave dispersion measurements*”, Geophysical Journal International., Vol.169, pp. 1239-1260.
- Boaga J., Vaccari F. y Panza G.F., 2010, “*Shear wave structural models of Venice Plain, Italy, from Time Cross Correlation of seismic noise*”, Engineering Geology, Vol. 116, pp. 189–195.
- Boore D. M., 1983, “*Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra*”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 73, No. 6, pp. 1865-1894.
- Boore D. M. y Boatwright J., 1984, “*Average body-wave radiation coefficient*”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 74, pp. 1615-1621.
- Brune, J. N., 1970, “*Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes*”, Journal of Geophysical Research, Vol. 75, pp. 4997–5009.
- Brune, J. N., 1971, “*Correction*”, Journal of Geophysical Research, Vol. 76, pp. 5002.
- Campillo M. y Paul A., 2003, “*Long-Range Correlations in the Diffuse Seismic Coda*”, Science, Vol. 299, pp. 547-549.



- Campillo M., 2006, "*Phase and correlation in random seismic fields and the reconstruction of the Green function*", Pure and Applied Geophysics 163, pp. 475-502.
- CENAPRED, 2009, "*Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México*", Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana. Secretaria de Gobernación. México D.F.
- Denolle M. A., Dunham E. M., Prieto G. A. y Beroza G. C., 2013, "*Ground motion prediction of realistic earthquake sources using the ambient seismic field*", Journal of Geophysical Research, Solid Earth, Vol. 118, pp. 2102-2118.
- FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (DOT), 1989, "*Handbook of Chemical Hazard Analysis Procedures*", 1st edition. United States.
- Garduño N., 2006, "*Procesos de la fuente del sismo del 15 de julio de 1996 usando el método de la función de Green empírica y algoritmos genéticos*", Tesis de Licenciatura, FI, UNAM.
- Garduño M. V. H., Pérez L. R., Israde A. I., y Rodríguez P. M. A., 2009, "*Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay faultsystem, central Mexico*", Geofísica Internacional, Vol. 48, No. 3, pp. 319-335.
- Gutenberg, B. y Richter C. F., 1954, "*Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*", Second Ed., Princeton University Press, Princeton, New Jersey, pp. 310.
- Hartzell, S. H., 1978. "*Earthquake aftershock as Green's function*". Geophysic Research Letter, Vol. 5, pp. 1-4.
- Herrmann R. B., 1978. "*Computer Programs in Earthquake Seismology*", Volume 2: General Programs, Technical Report, Saint Louis University.
- Husid L. R., 1969, "*Características de Terremotos, Análisis General*", Revista del IDIEM, Vol. 8, Santiago, Chile, pp. 21-42.
- Irikura K., 1986, "*Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function*", Proceedings 7<sup>th</sup>. Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 151-156.
- Irikura K. y Kamae K., 1994, "*Simulation of strong ground motion based on fractal composite faulting model and empirical Green's function*", Lesson from the 1995 Hyogo – ken Nanbu Earthquake, pp. 49 – 54.

- Kamae K., Bard P. Y. y Irikura K., 1998. “*Prediction of strong ground motion in a EURO-SEISTEST using the empirical Green's function method*”, Journal of Seismology, 2, 193-207.
- Kramer S. L., 1996, “*Geotechnical Earthquake Engineering*”, Prentice Hall, USA, pp. 571-572.
- Langridge, R. M., Weldon R. J., Moya J. C., y Suárez G., 2000, “*Paleoseismology of the 1912 Acambay earthquake and the Acambay-Tixmadejé fault, Trans-Mexican Volcanic Belt*”, Journal of Geophysical Research, 105, B2, pp. 3019-3037.
- Langridge, R. M., Persaud, M., Ramón, Z. F., Aguirre, D. G. J., Villamor, P. y Lacan, P., 2013, “*Preliminary paleoseismic results from the Pastores fault and its role in the seismic hazard of the Acambay graben, Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico*”, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 30, No. 3, pp. 463-481.
- Lay T., y Wallace T. C., 1995, “*Modern Global Seismology*”, Volume 58 (International Geophysics), Academic Press, USA.
- Lobkis O. I., y Weaver R. L., 2001, “*On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field*”, Acoustical Society of America.
- Lugo P. E., Ruiz P. A. y Serrano P. E., 2012, “*Acambay 100 años después 1912-2012*”, Primera edición, Secretaria de Educación del Gobierno del Estado de México.
- Madariaga R., 1976, “*Dynamic of an expanding circular fault*”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 66, pp. 639-666.
- Martínez Reyes J. y Nieto Samaniego A., 1990, “*Efectos Geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México*”, Inst. Geología, UNAM, Revista, Vol. 9, No. 1, pp. 33-50.
- Ortega R., Herrmann B. y Quintanar L., 2003, “*Earthquake Ground-Motion Sacaling in Central Mexico between 0.7 and 7 Hz*”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 1, pp. 397-413.
- Proakis J. y Manolakis D., 1996, “*Digital Signal Processing*”, 3ra. Ed., pp. 120.
- Robles M. A., 2014, “*Efecto de sitio de la ciudad Tula de Allende, Hidalgo y sus alrededores, por medio de los métodos H/V y SPAC*”, Tesis de Licenciatura, FI, UNAM.

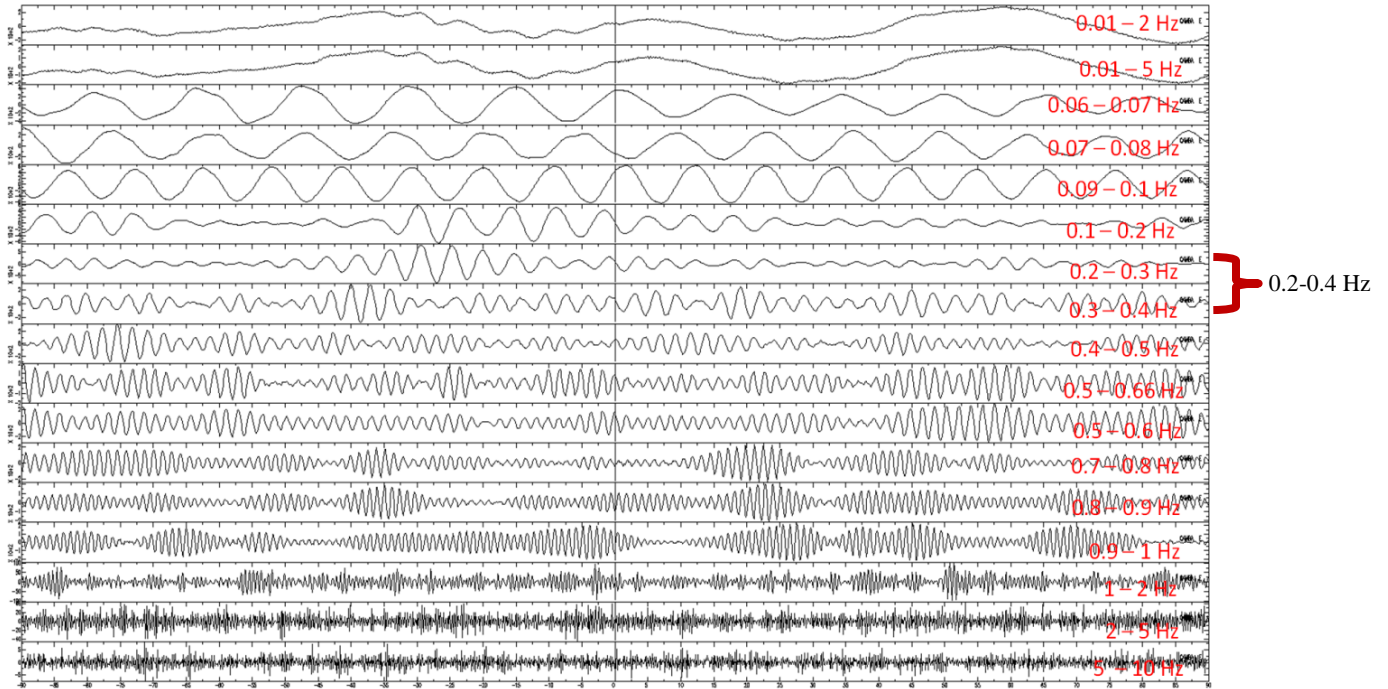
- Roldán Q. J., Aguirre D. G. de J., y Rodríguez C. J. L., 2011, “*Depósito de avalancha de escombros del volcán Temascalcingo en el graben de Acambay, Estado de México*”, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 28, No. 1, pp. 118-131.
- Sánchez-Sesma F. J. y Campillo M., 2006, “*Retrieval of the Green’s Function from Cross Correlation: The Canonical Elastic Problem*”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 3, pp. 1182-1191.
- Sánchez-Sesma F. J., Pérez R. J.A., y Campillo M. y Luzón F., 2006. “*The elastodynamic 2D Green function retrieval from cross-correlation: The canonical inclusion problem*”, Geophysical Research Letters, Vol. 33.
- Sánchez-Sesma F. J., Rodríguez Castellanos A., Suarez M. y Pérez Gavilán J.J., 2007, “*Recuperación de la función de Green Elastodinámica a partir de Correlaciones de Ruido*”, Boletín de la Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración, No.2.
- Sandoval G. H., Ramírez G. L. y Espíndola V. H., 2013, “*Correlación entre intensidad macrosísmica e instrumental para el centro de México*”, XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.
- Sandoval M. A. M., 2014, “*Análisis de riesgos tras un sismo sobre las instalaciones de la refinería de tula y la zona industrial aledaña*”, Tesis de Maestría, UNAM.
- Scholl R. E. y Kustu O., 1981, “*Proc. Coonference XIII, Evaluation of Regional Seismic Hazards and Risk*”, USGS Open-file report, 81-437.
- Shapiro N. y Campillo M., 2004, “*Emergence of broadband rayleighwaves from correlations of the ambient seismic noise*”, Geophysical Research Letters, Vol. 31, L07614.
- Shapiro N., Campillo M., Stehly L. y Ritzwoller M. H., 2005, “*High Resolution Surface Wave Tomography From Ambient Seismic Noise*”, Science, Vol. 307, pp. 1615-1618.
- Singh S. K., Iglesias A., Ordaz M., Pérez C. X. y Quintanar L., 2011, “*Estimation of Ground Motion in Mexico City from a Repeat of the  $M \approx 7.0$  Acambay Earthquake of 1912*”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No.5, pp. 2015-2028.
- Somerville P., Sato T., Toru I., Collins N., Dan K. y Hiroyuki F., 2002, “*Characterizing subduction earthquake slip models for the prediction of strong motion*”. Proc. Of the 11<sup>th</sup> Symposium of Earthquake Engineering, Vol. 1, pp. 163-166.

- Stein S., Wyssession M., 2003, "***An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure***", Blackwall Publish, Malden, EUA.
- Suter M., Carrillo M. M. y Quintero L. O., 1996, "***Macroseismic Study of Shallow Earthquakes in the Central and Eastern Parts of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico***", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 86, No. 6, pp. 1952-1963.
- Urbina F., y Camacho H., 1913, "***La zona megasísmica Acambay-Tixmadejé, Estado de México, conmovida el 19 de noviembre de 1912***", Boletín del Instituto Geológico de México, Vol. 32.
- Vázquez R. R., 2013, "***Estimación de escenario sísmicos en el Estado de Michoacán***", Tesis Doctoral, UNAM.
- Vera Padilla G. B., 2013, "***Análisis de amplitudes de correlaciones cruzadas de ruido obtenidas para pares de estaciones del arreglo MASE***", Tesis de Maestría, UNAM.
- Wald D.J., Worden B. C., Quitariano V., y Pankow K. L., 2005, "***ShakeMap manual: technical manual***", user's guide, and software guide, U.S. Geological Survey, Techniques and Methods 12-A1, pp 128.
- Wald D.J., Quitariano V., Heaton T. H., y Kanamori H., 1999, "***Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California***", Vol. 15, No. 3, pp. 557-564.
- Weaver R., 2010, "***Equiportion and Retrieval of the Green's function***" in a ***Special Issue on Ambient Noise Seismology***", Earthquake Science, Vol. 23, pp. 397-402.
- Yang Y., Ritzwoller M. H., Levshin A. L., y Shapiro N. M., 2007, "***Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe***", Geophysical Journal International, Vol. 168, pp. 259-274.

# ANEXOS

**Anexo 1.**

**Análisis para diferentes anchos de banda para el día 28 de junio de 2013 del elemento del tensor de Green (RR), la frecuencia con un ancho de 0.2 a 0.4 Hz muestra un comportamiento similar a lo que podría ser la recuperación de la función de Green.**



**Anexo 2.****Sismicidad reportada por el SSN para el estado de Hidalgo, 2013.**

Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Prof.(km)	Mag.	Zona
2013-09-17	05:31:08	20.29	-99.12	1	3.8	9 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
2013-09-17	07:35:08	20.22	-99.25	1	3.7	3 km al OESTE de MIXQUIAHUALA, HGO
2013-09-17	08:54:34	20.26	-98.9	5	3.5	4 km al ESTE de ACTOPAN, HGO
2013-09-17	10:09:48	20.31	-99.15	1	3.7	8 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
2013-09-17	15:37:48	20.27	-99.16	1	3.7	4 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
2013-09-17	16:24:45	20.29	-99.15	2	3.4	7 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
2013-09-17	16:41:38	20.29	-99.12	1	3.8	8 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
2013-09-17	19:37:14	20.32	-99.24	2	3.4	10 km al NOROESTE de PROGRESO, HGO
2013-09-18	00:34:46	20.31	-99.21	3	3.4	8 km al NOROESTE de PROGRESO, HGO
2013-09-18	08:48:19	20.4	-99.2	7	3.3	9 km al SUR de IXMIQUILPAN, HGO
2013-09-23	01:45:54	20.34	-99.21	5	4.0	11 km al NORTE de PROGRESO, HGO

**Anexo 3.**

**Sismicidad registrada por la red Temporal de velocidad instalada por el Instituto de Ingeniería.**

ESTACIÓN				REGISTRO				SISMO				
#	INSTITUCIÓN	CLAVE	ESTACIÓN	FECHA	HORA GMT	ARCHIVO *.GCF	CLAVE DE REGISTRO	LAT.	LONG.	PROF. [KM]	MAG.	EPICENTRO
89	IINGEN	HGOR	REFINERÍA	17/09/2013	10:31:08	2013260T0530Z	HGOR1309171	20.29	-99.12	1	3.8	9 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
90	IINGEN	EMSA	TEMASCALCINGO	17/09/2013	10:31:08	2013260T0530Z	EMSA1309172	20.29	-99.12	1	3.8	9 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
91	IINGEN	HGOP	PRIMARIA	17/09/2013	10:31:08	2013260T0530Z	HGOP1309171	20.29	-99.12	1	3.8	9 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
92	IINGEN	HGOR	REFINERÍA	17/09/2013	12:35:08	2013260T0730Z	HGOR1309172	20.22	-99.25	1	3.7	3 km al OESTE de MIXQUIAHUALA, HGO
93	IINGEN	EMSA	TEMASCALCINGO	17/09/2013	12:35:08	2013260T0730Z	EMSA1309173	20.22	-99.25	1	3.7	3 km al OESTE de MIXQUIAHUALA, HGO
94	IINGEN	HGOP	PRIMARIA	17/09/2013	12:35:08	2013260T0730Z	HGOP1309172	20.22	-99.25	1	3.7	3 km al OESTE de MIXQUIAHUALA, HGO
95	IINGEN	HGOR	REFINERÍA	17/09/2013	13:54:34	2013260T0830Z	HGOR1309173	20.26	-98.9	5	3.5	4 km al ESTE de ACTOPAN, HGO
96	IINGEN	EMSA	TEMASCALCINGO	17/09/2013	13:54:34	2013260T0845Z	EMSA1309174	20.26	-98.9	5	3.5	4 km al ESTE de ACTOPAN, HGO
97	IINGEN	HGOP	PRIMARIA	17/09/2013	13:54:34	2013260T0830Z	HGOP1309173	20.26	-98.9	5	3.5	4 km al ESTE de ACTOPAN, HGO
98	IINGEN	HGOR	REFINERÍA	17/09/2013	15:09:48	2013260T1000Z	HGOR1309174	20.31	-99.15	1	3.7	8 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
99	IINGEN	EMSA	TEMASCALCINGO	17/09/2013	15:09:48	2013260T1000Z	EMSA1309175	20.31	-99.15	1	3.7	8 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
100	IINGEN	HGOP	PRIMARIA	17/09/2013	15:09:48	2013260T1000Z	HGOP1309174	20.31	-99.15	1	3.7	8 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
101	IINGEN	HGOR	REFINERÍA	17/09/2013	20:37:48	2013260T1530Z	HGOR1309175	20.27	-99.16	1	3.7	4 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
102	IINGEN	EMSA	TEMASCALCINGO	17/09/2013	20:37:48	2013260T1530Z	EMSA1309176	20.27	-99.16	1	3.7	4 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
103	IINGEN	HGOP	PRIMARIA	17/09/2013	20:37:48	2013260T1530Z	HGOP1309175	20.27	-99.16	1	3.7	4 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
104	IINGEN	EMSA	TEMASCALCINGO	17/09/2013	21:24:45	2013260T1615Z	EMSA1309177	20.29	-99.15	2	3.4	7 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
105	IINGEN	HGOP	PRIMARIA	17/09/2013	21:24:45	2013260T1600Z	HGOP1309176	20.29	-99.15	2	3.4	7 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
106	IINGEN	HGOR	REFINERÍA	17/09/2013	21:41:38	2013260T1630Z	HGOR1309176	20.29	-99.12	1	3.8	8 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
107	IINGEN	EMSA	TEMASCALCINGO	17/09/2013	21:41:38	2013260T1630Z	EMSA1309178	20.29	-99.12	1	3.8	8 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
108	IINGEN	HGOP	PRIMARIA	17/09/2013	21:41:38	2013260T1630Z	HGOP1309177	20.29	-99.12	1	3.8	8 km al NORESTE de PROGRESO, HGO
109	IINGEN	HGOR	REFINERÍA	18/09/2013	0:37:14	2013260T1930Z	HGOR1309181	20.32	-99.24	2	3.4	10 km al NOROESTE de PROGRESO, HGO
110	IINGEN	EMSA	TEMASCALCINGO	18/09/2013	0:37:14	2013260T1930Z	EMSA1309181	20.32	-99.24	2	3.4	10 km al NOROESTE de PROGRESO, HGO
111	IINGEN	HGOP	PRIMARIA	18/09/2013	0:37:14	2013260T1930Z	HGOP1309181	20.32	-99.24	2	3.4	10 km al NOROESTE de PROGRESO, HGO
112	IINGEN	HGOR	REFINERÍA	18/09/2013	5:34:46	2013261T0030Z	HGOR1309182	20.31	-99.21	3	3.4	8 km al NOROESTE de PROGRESO, HGO
113	IINGEN	EMSA	TEMASCALCINGO	18/09/2013	5:34:46	2013261T0030Z	EMSA1309182	20.31	-99.21	3	3.4	8 km al NOROESTE de PROGRESO, HGO
114	IINGEN	HGOP	PRIMARIA	18/09/2013	5:34:46	2013261T0030Z	HGOP1309182	20.31	-99.21	3	3.4	8 km al NOROESTE de PROGRESO, HGO
128	IINGEN	HGOR	REFINERÍA	23/09/2013	6:45:54	2013266T0130Z	HGOR1309231	20.34	-99.21	5	4	11 km al NORTE de PROGRESO, HGO
129	IINGEN	EMSA	TEMASCALCINGO	23/09/2013	6:45:54	2013266T0145Z	EMSA1309231	20.34	-99.21	5	4	11 km al NORTE de PROGRESO, HGO
130	IINGEN	HGOP	PRIMARIA	23/09/2013	6:45:54	2013266T0130Z	HGOP1309231	20.34	-99.21	5	4	11 km al NORTE de PROGRESO, HGO

Los sismos reportados fueron registrados por la red temporal de velocidad instalada por el Instituto de Ingeniería. La tabla forma parte del *Catálogo de registros sísmicos red sísmica temporal Hidalgo-Estado de México*, IINGEN.

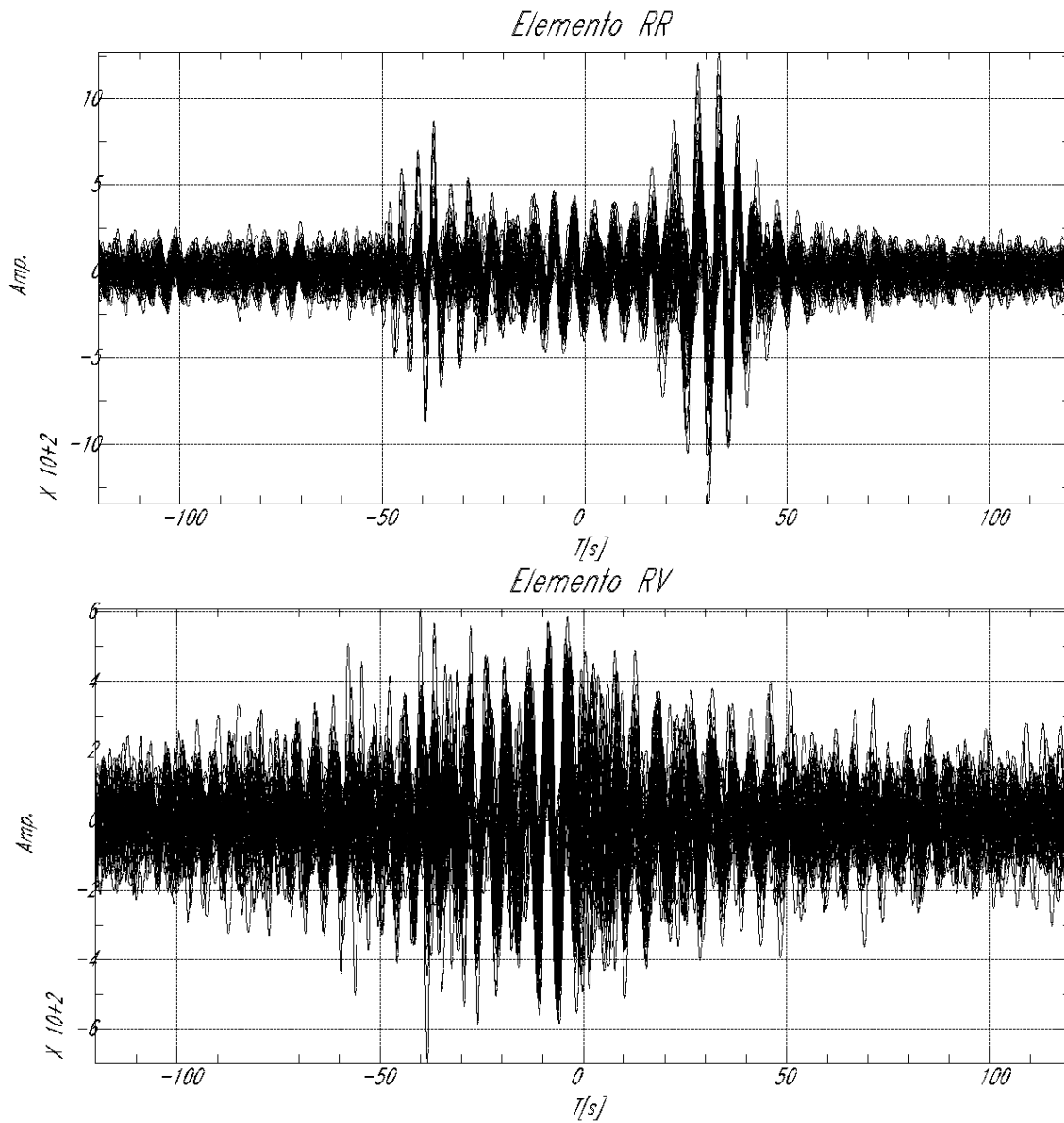


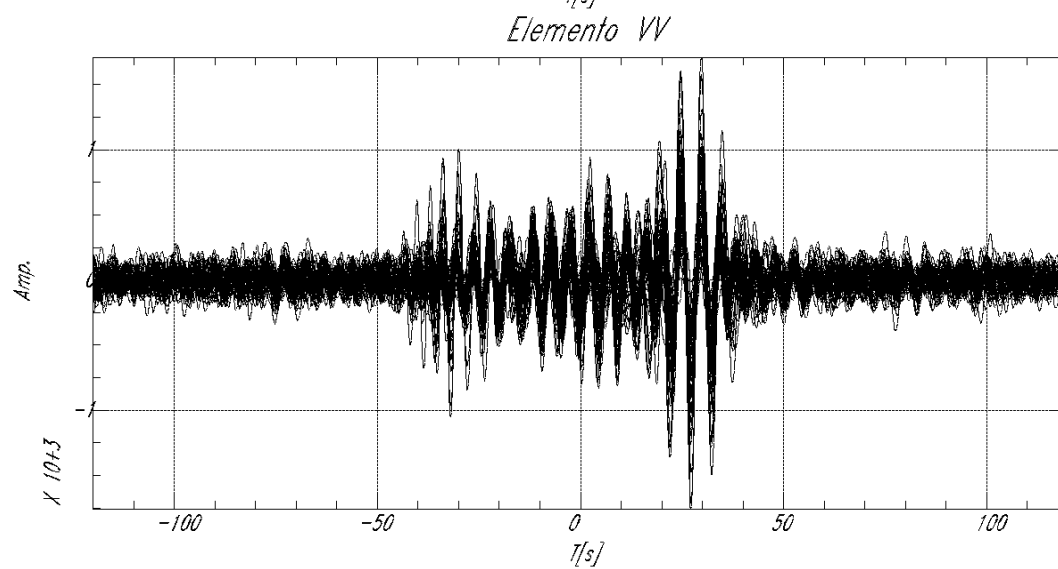
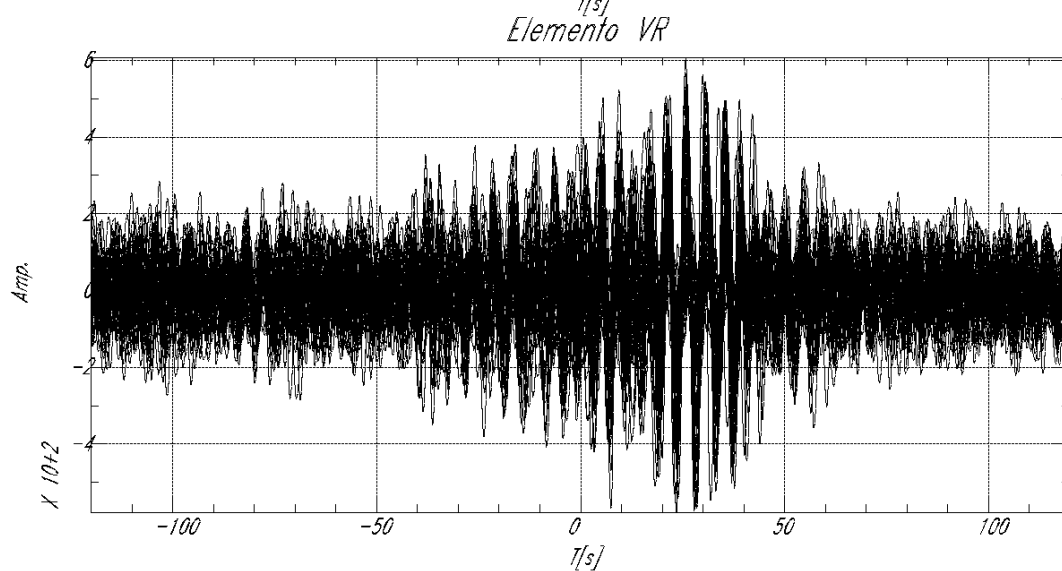
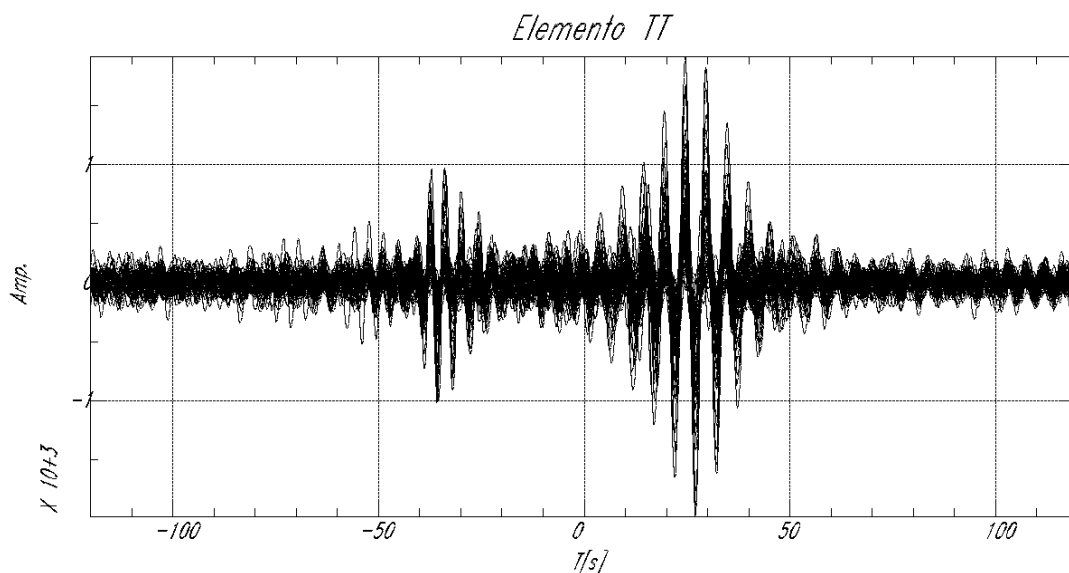
**Anexo 4.**

Correlaciones por día de cada uno de los elementos del tensor de Green.

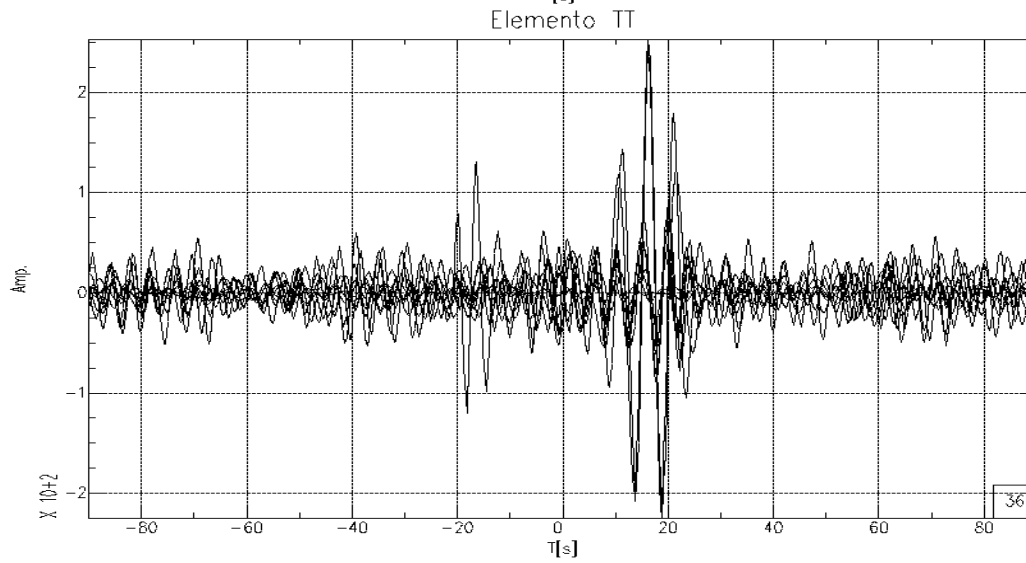
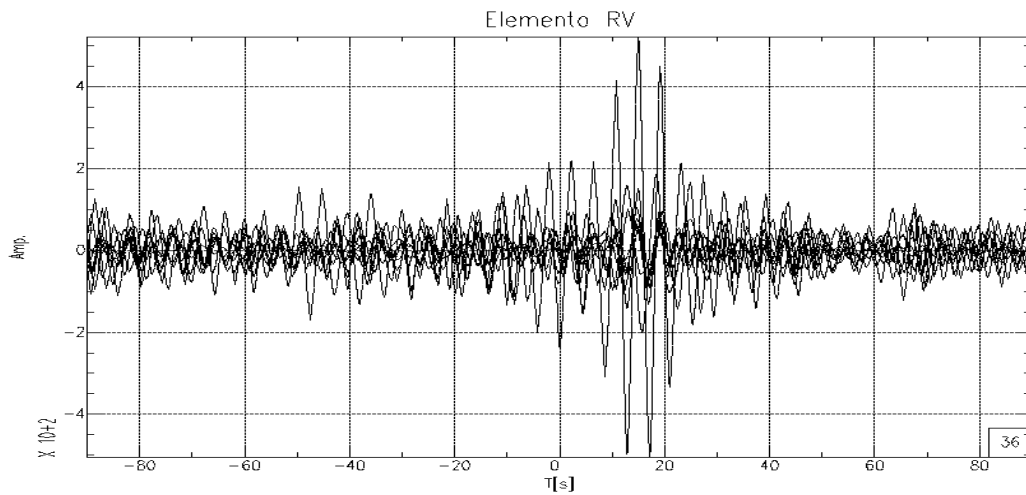
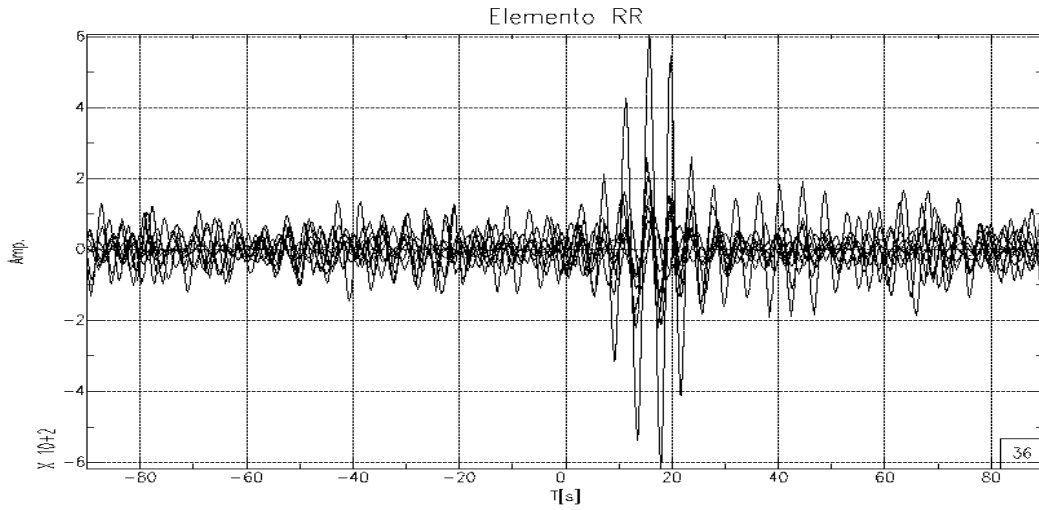
$$G \approx G^L + G^R = \begin{pmatrix} G_{RR} & 0 & G_{RV} \\ 0 & G_{TT} & 0 \\ G_{VR} & 0 & G_{VV} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

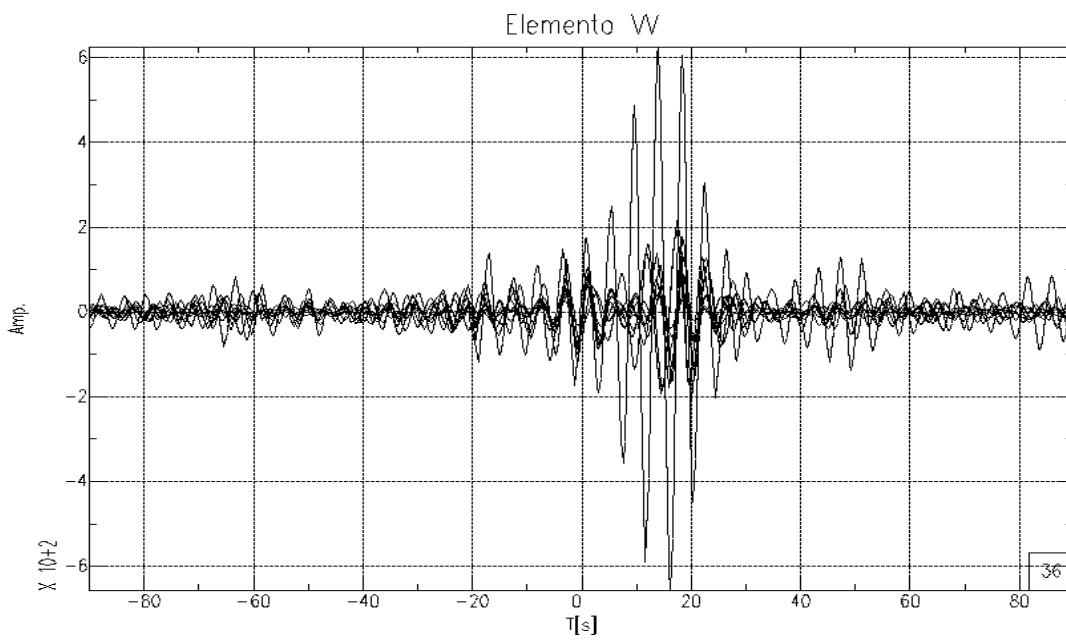
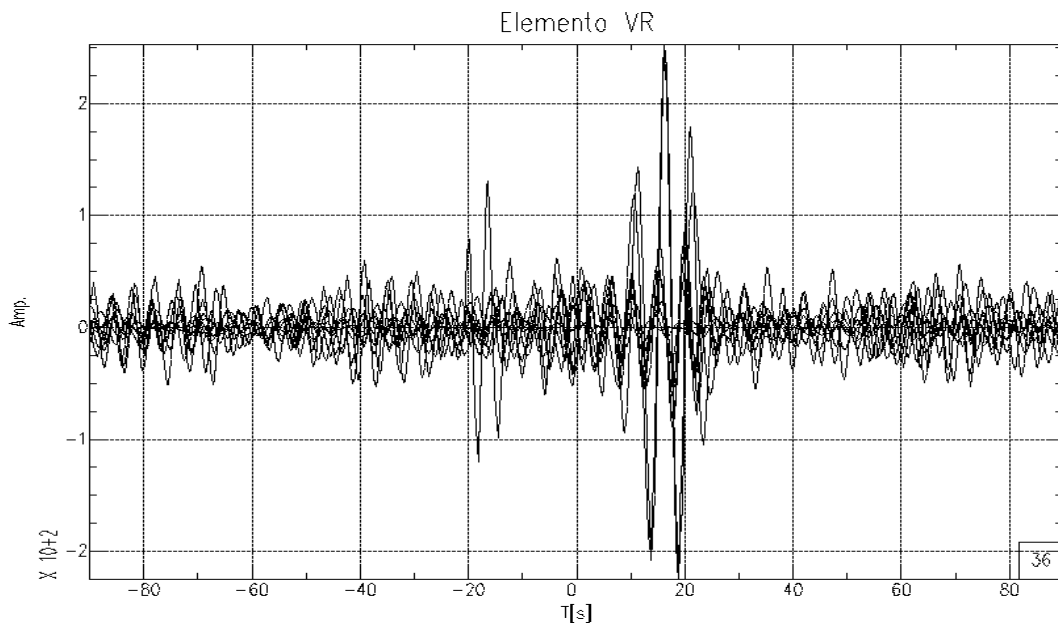
- **Correlaciones de las estaciones refinería y Temascalcingo.**





- **Correlaciones de las estaciones refinería y Actopan.**

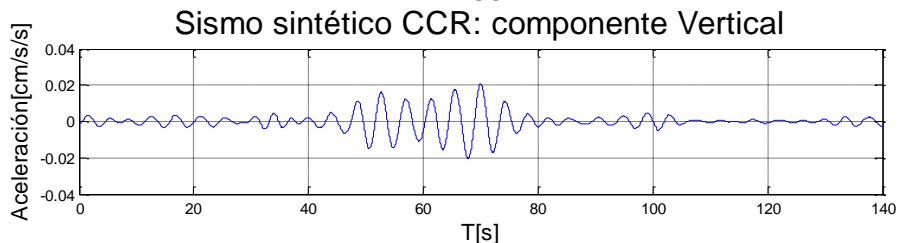
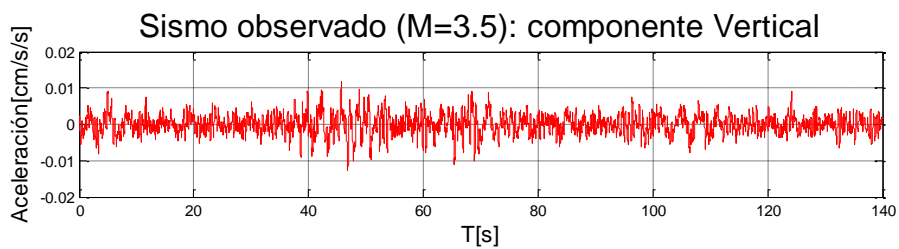
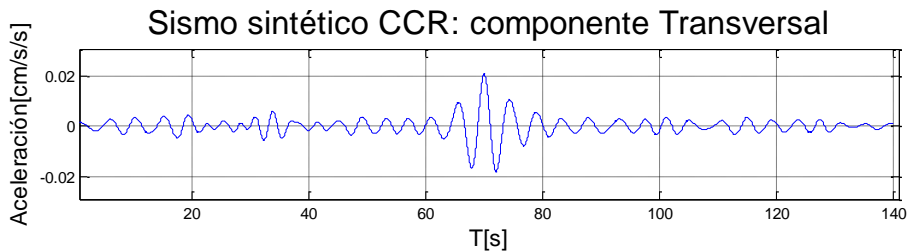
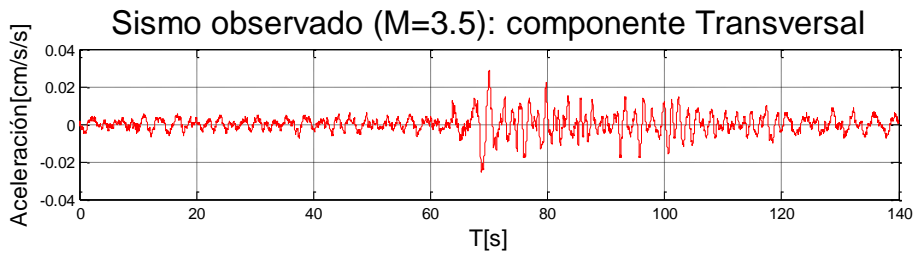
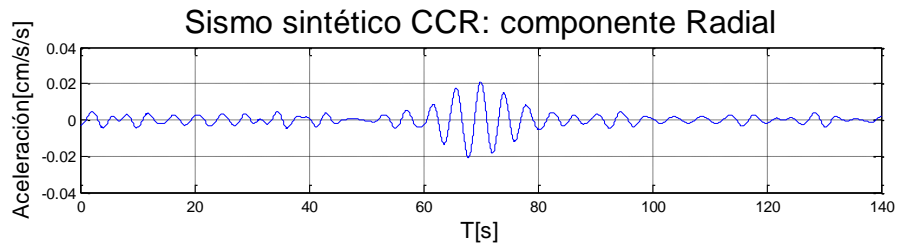
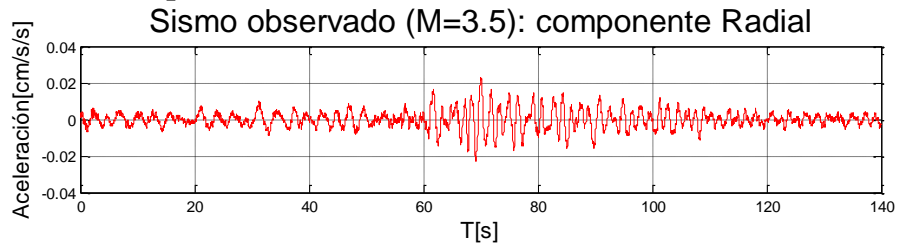




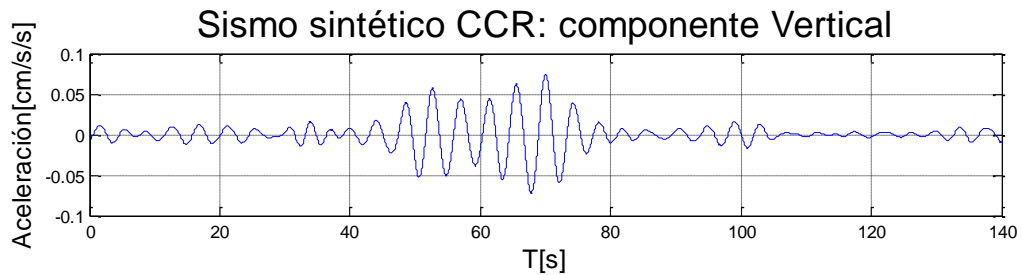
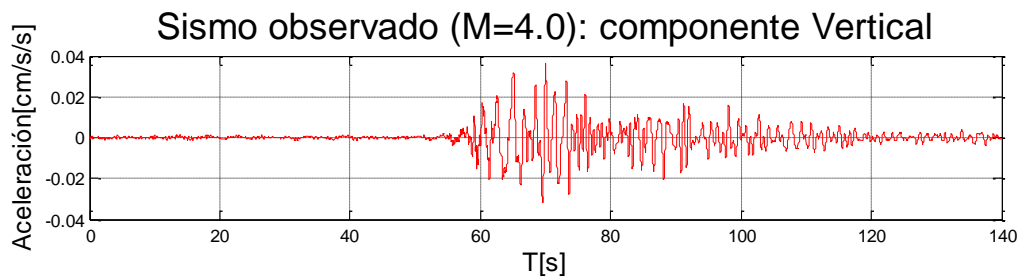
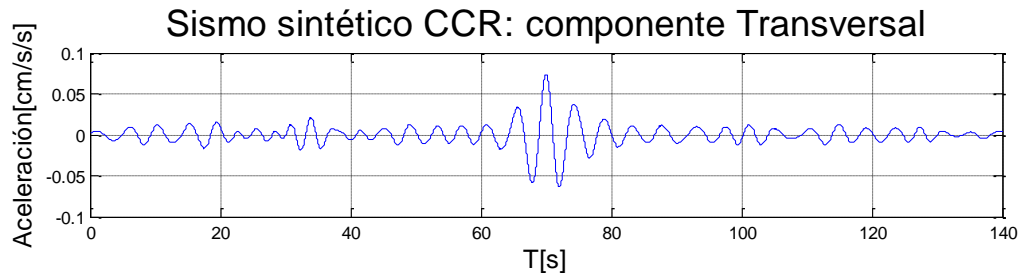
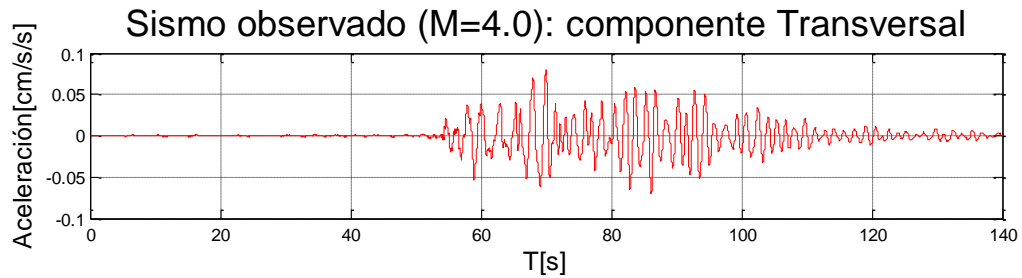
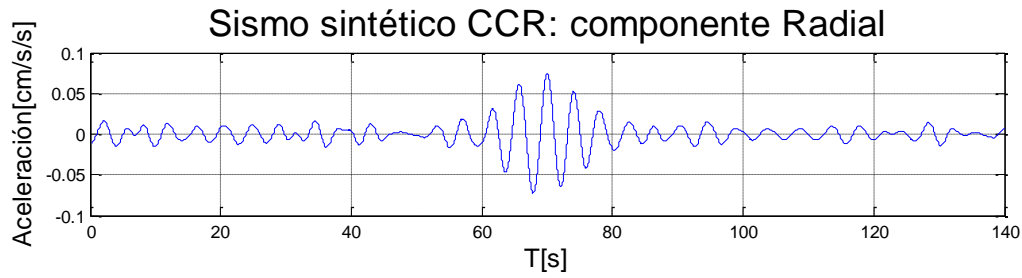
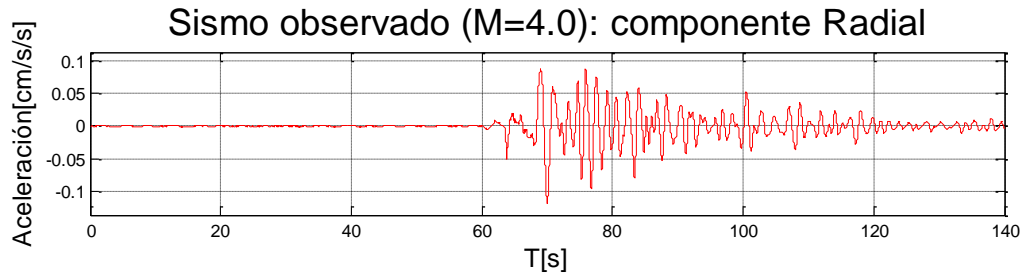
**Anexo 5.**

**Comprobación de los sismogramas sintéticos por medio de las correlaciones cruzadas para los siguientes sismos registrados en la red temporal del Instituto de Ingeniería.**

- **Sismo 19 de septiembre 2013 (M3.5)**



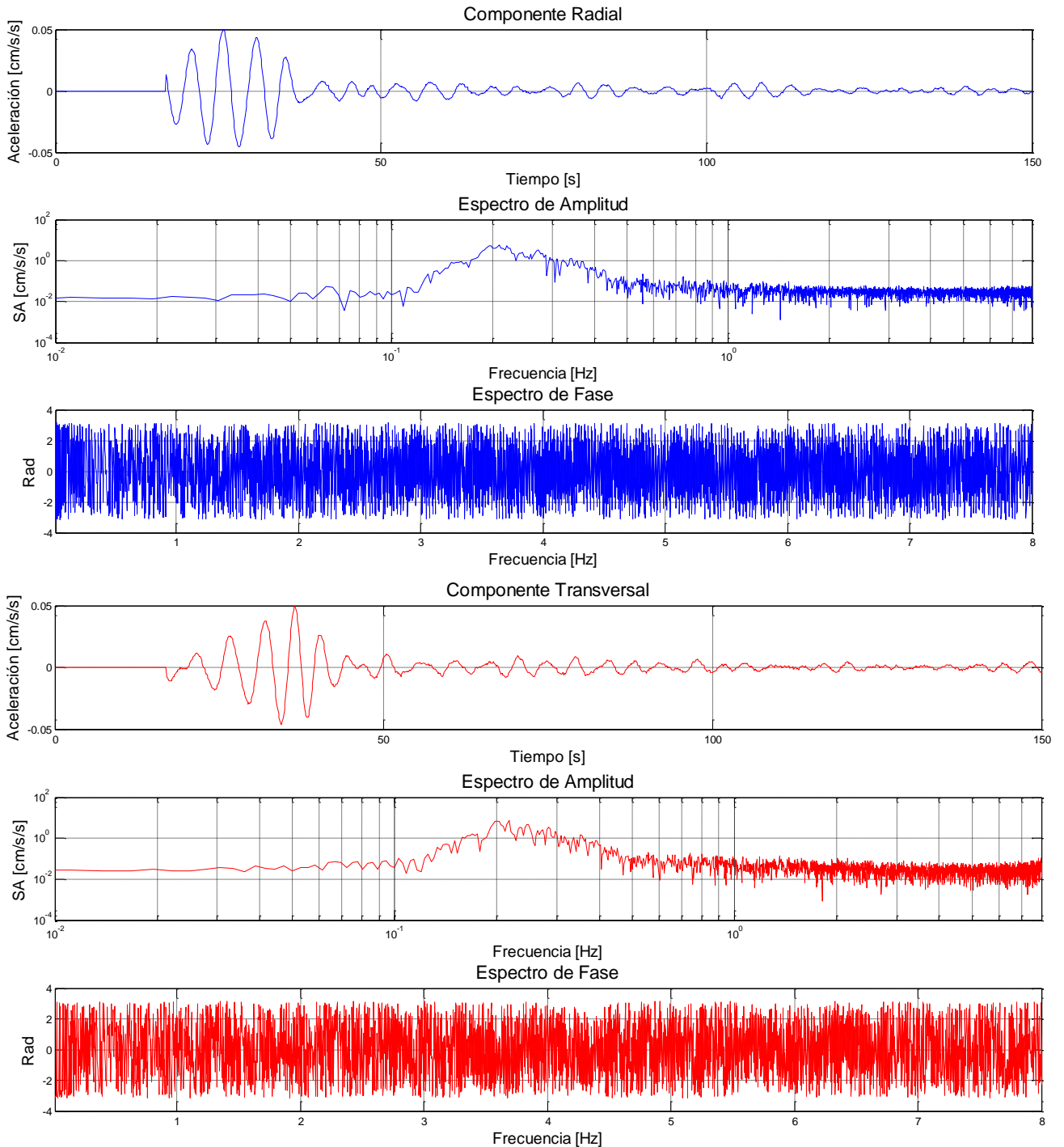
- **Sismo 23 de septiembre 2013 (M4.0)**

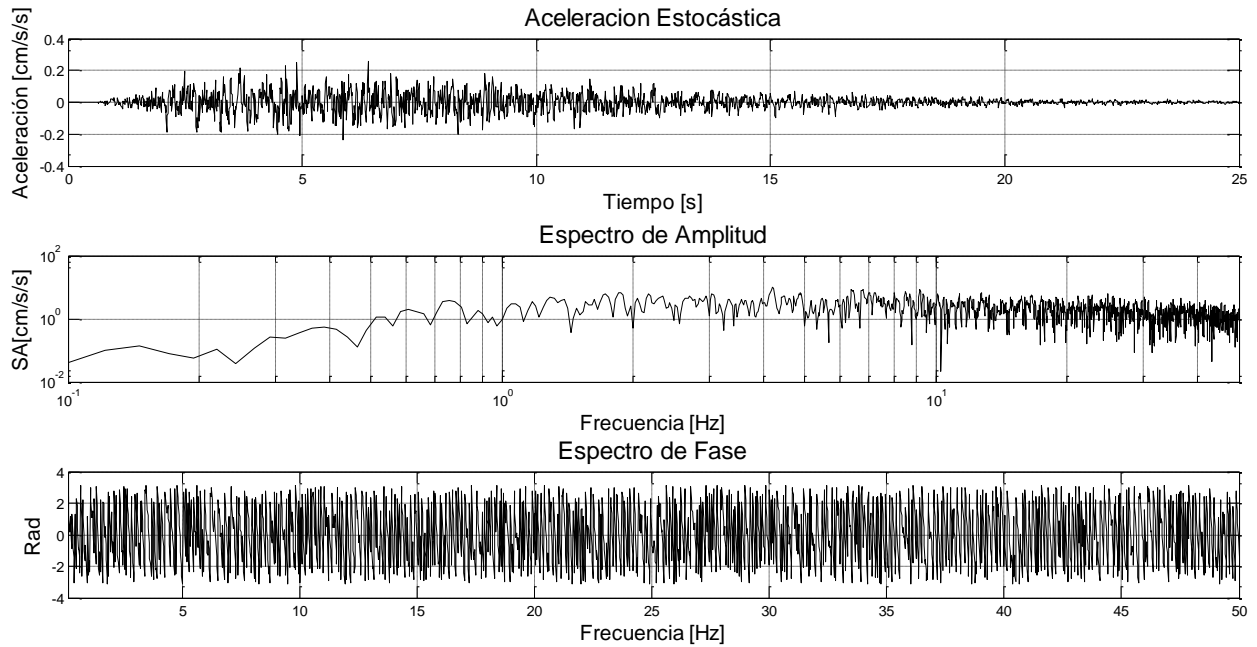


## Anexo 6.

Pasos para obtener el sismo elemento a partir del *matched filter*.

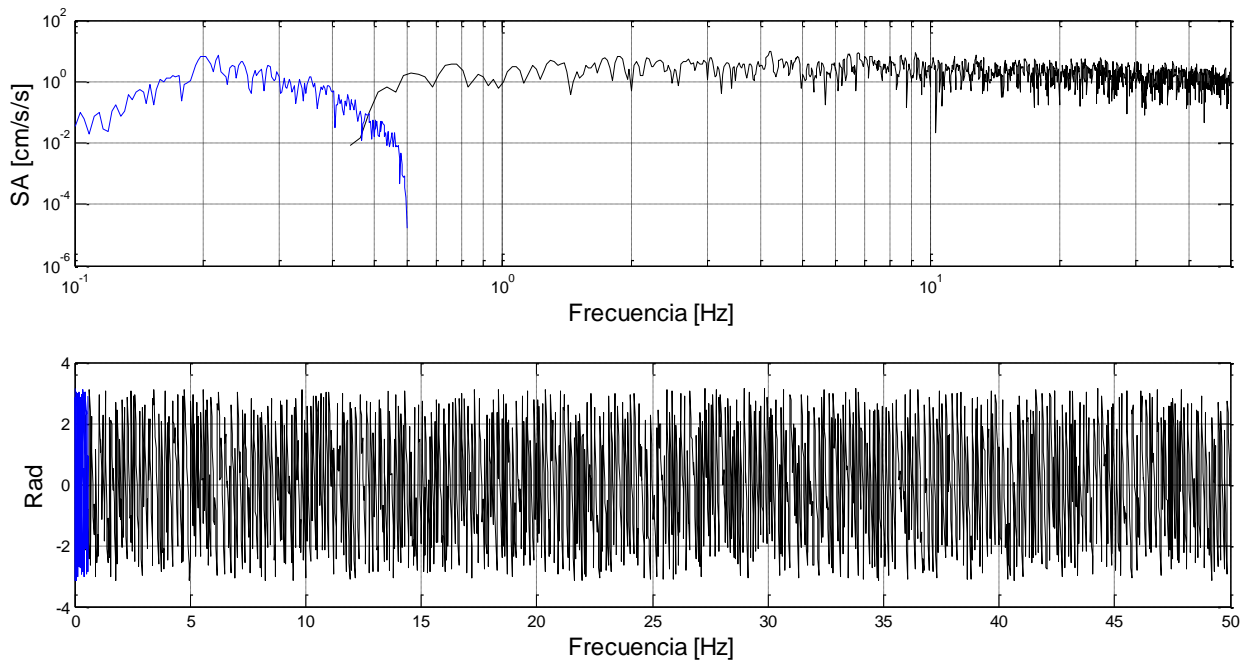
A continuación se presentan los espectros de amplitud y de fase para bajas y altas frecuencias calculados para llevar acabo el *matched filter* (componente radial color azul, componente transversal color rojo y simulación estocástica color negro).





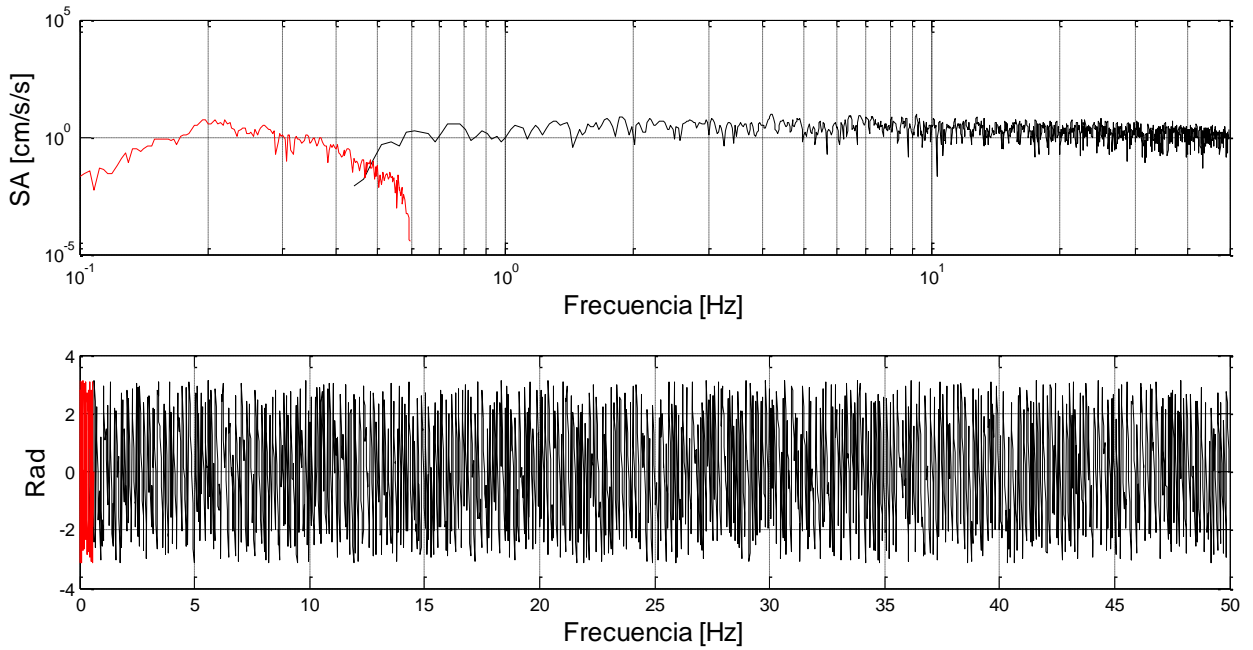
Después los espectros de amplitud se multiplicaron por el matched filter, enseguida se presenta la aportación de ambo espectros (amplitud y fase)

- **Componente Radial y simulación estocástica**



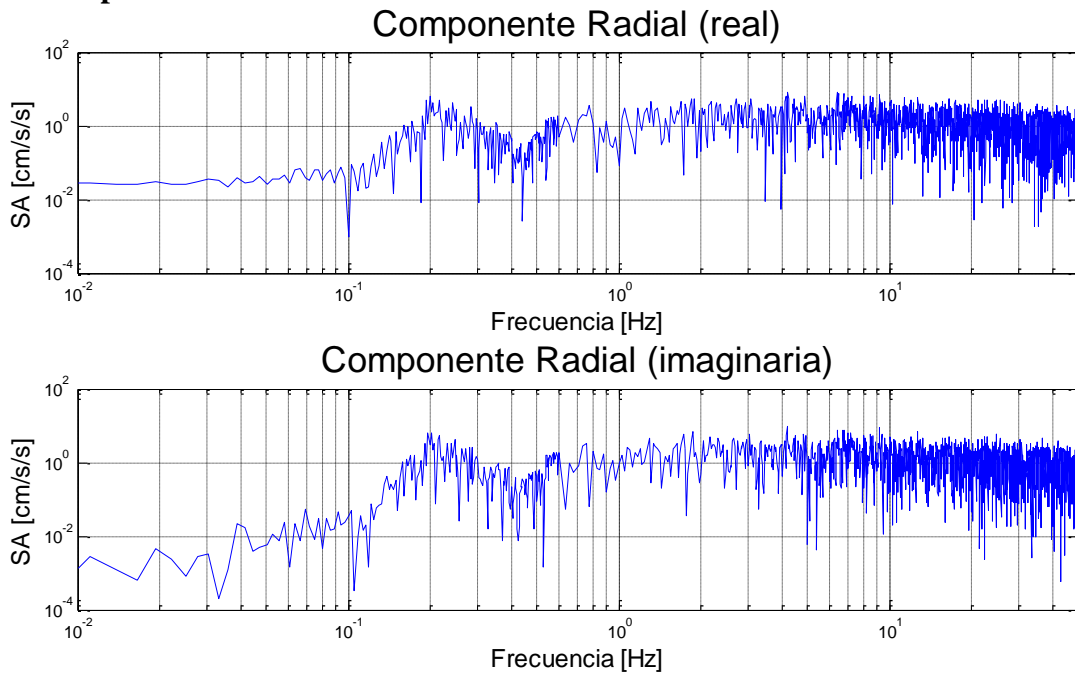


- **Componente Transversal y simulación estocástica**

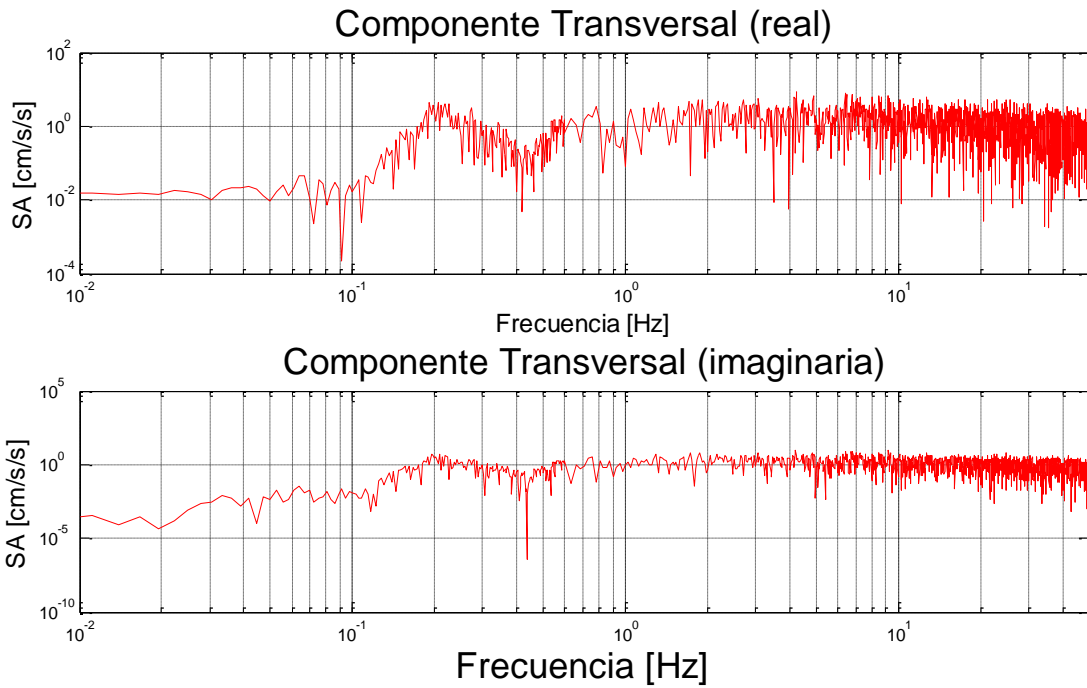


Después se sumaron las frecuencias y se obtuvo la parte real e imaginaria para cada componente:

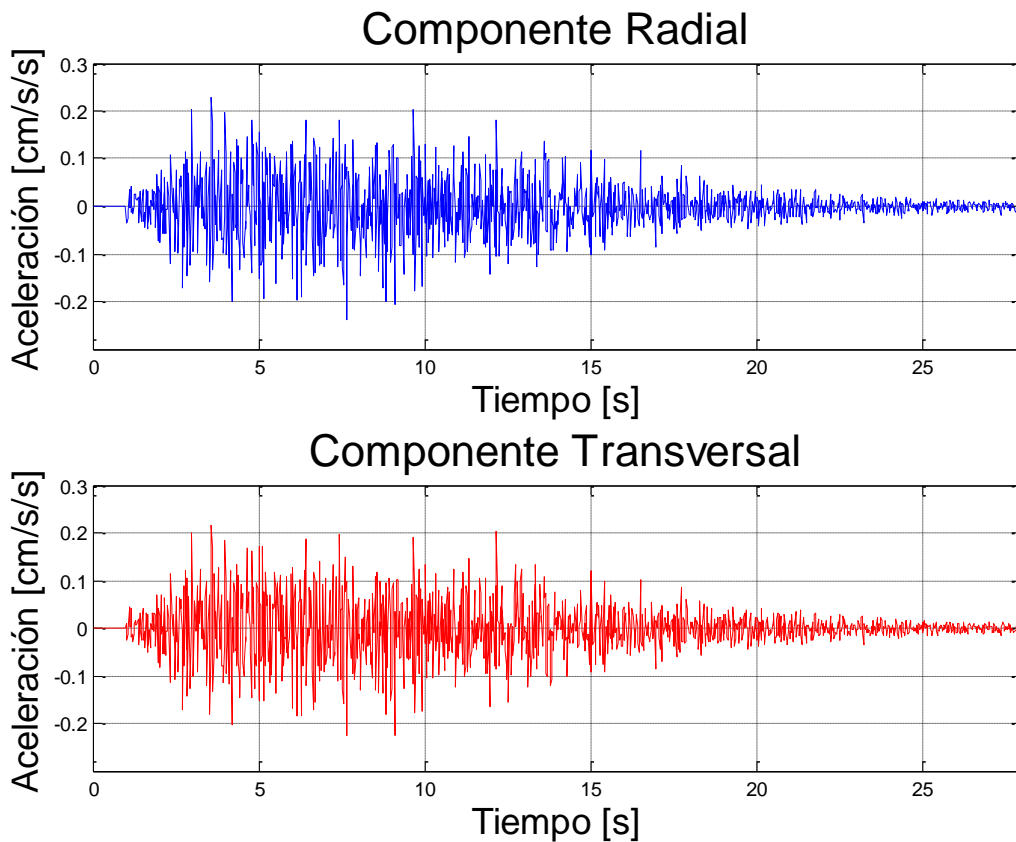
- **Componente Radial**



- **Componente Transversal**



Finalmente se realizó la antitransformada de Fourier y se obtuvieron los registros sintéticos.



**Anexo 7.****Efectos provocados por explosiones en refinerías y componentes vulnerables de plantas.**

<b>Sobrepresión (psig)</b>	<b>Efectos en Refinerías</b>	<b>Efectos en Plantas (Psi)</b>
0.3	Edificio de mantenimiento: caída de techos de asbesto	Torre de enfriamiento: falla de mamparas
	Torre de enfriamiento de agua: caída de lumbresas de asbesto corrugado	
0.5	Cuarto de control(construcción de concreto y estructura de fierro):rotura de ventanas	Cuarto de control (techo metálico: rotura de ventanas y medidores
		Cuarto de control (techo de concreto): rotura de ventanas y medidores
		Torre de enfriamiento: falla de mamparas
1.0	Cuarto de control (construcción de concreto y estructura de fierro):deformación de la estructura	Cuarto de control (techo metálico): conectores dañados por colapso del techo
		Cuarto de control (Techo de concreto):conectores dañados por colapso del techo
		Tanques de almacenamiento (techo cónico): colapso del techo
1.5	Cuarto de control(construcción de concreto y estructura de fierro):derrumbe del techo	Cuarto de control (techo metálico): colapso del techo
	Horno de tubos fijos: ligero desplazamiento de su posición original	Cuarto de control (techo de concreto): colapso del techo
	Tanques de almacenamiento (techo cónico y techo flotante): levantamiento de tanques vacíos	Torre de enfriamiento: partes internas dañadas
		Cubículo de instrumentos: Rotura de ventanas y medidores

Fuente: (DOT, 1989)

Sobrepresión (psig)	Efectos en Refinerías	Efectos en Plantas (Psi)
2.0		Calentador: fractura de ladrillos
		Reactor químico: rotura de ventanas y medidores
		Filtros: falla de paredes de concreto
2.5		Calentador: el equipo se mueve y la tubería se rompe.
3.0	Edificio de mantenimiento: deformación de la estructura	Tanque de almacenamiento (techo cónico): el equipo se levanta (50% de llamado)
		Cubículo de instrumentos: líneas de fuerza dañadas, controles dañados
		Regenerador: el equipo se mueve y las tuberías se rompen
		Tanque de almacenamiento (techo flotante): el equipo se levanta (50% de llenado)
3.5	Cuarto de control (construcción de concreto y estructura de fierro):derrumbe de muros de concreto	Cuarto de control (techo metálico): falla de paredes de concreto
	Torre de enfriamiento de agua: derrumbe de la torre	Cuarto de control (techo de concreto): falla de paredes de concreto
	Tuberías (soportadas por estructuras de acero): deformación de la estructura	Torre de enfriamiento: falla de paredes de concreto
	Tuberías (soportadas por estructuras de concreto): deformación de la estructura	Reactor catalítico: el equipo se mueve y la tubería se rompe
	Tanques de almacenamiento (techo cónico y techo flotante): levantamiento de tanques llenos o medio llenos, dependiendo de su capacidad	Soporte de tuberías: marcos deformados

Continuación.

<b>Sobrepresión (psig)</b>	<b>Efectos en Refinerías</b>	<b>Efectos en Plantas (Psi)</b>
4.0	Tanques de almacenamiento (techo cónico y techo flotante): levantamiento de tanques llenos o medio llenos, dependiendo de su capacidad	Reactor químico: partes internas dañadas
4.5	Torre fraccionadora (montada sobre pedestal de concreto): aflojamiento de tuercas de anclaje	Filtro: partes internas dañadas
	Tanques de almacenamiento (techo cónico y techo flotante): levantamiento de tanques llenos o medio llenos, dependiendo de su capacidad	Medidor de gas: carcasa y caja deformadas
		Transformador eléctrico: daño por proyección de partículas
5.0	Torre de regeneración: deformación de la columna	Calentador: unidad destruida
	Edificio de mantenimiento: derrumbe de muros de tabique, deformación de la estructura	Regenerador: marcos colapsados
	Tuberías: derrumbe de la estructura y rompimiento de líneas	Motor eléctrico: daño por proyección de partículas
	Tanques de almacenamiento (techo cónico y techo flotante): levantamiento de tanques llenos o medio llenos, dependiendo de su capacidad	Ventilador: carcasa y caja dañadas
5.5	Torre rectangular (estructura de concreto): fractura de la estructura de concreto	Soportes de la tubería: marcos colapsados tubería rota
	Tanques de almacenamiento (techo cónico y techo flotante): levantamiento de tanques llenos o medio llenos, dependiendo de su capacidad	Columna fraccionadora: marcos rotos

Continuación.

<b>Sobrepresión (psig)</b>	<b>Efectos en Refinerías</b>	<b>Efectos en Plantas (Psi)</b>
6.0	Unidad de recuperación de vapor (con estructura rectangular de acero): derrumbe de la estructura	Cubículos de Instrumentos: unidad destruida
	Horno de tubos fijos: caída de la chimenea	Recipiente horizontal a presión: marcos deformados, el equipo se mueve y la tubería se rompe
	Edificio de mantenimiento: derrumbe de la estructura	Regulador de gas: el equipo se mueve y la tubería se rompe
	Tubería (soportadas por estructuras de acero): derrumbe de la estructura y rompimiento de la tubería	
	Tanques de almacenamiento (techo cónico y techo flotante): levantamiento de tanques llenos o medio llenos, dependiendo de su capacidad	
6.5	Horno de tubos fijos: derrumbe del horno	Tanques de almacenamiento (techo cónico): equipo levantado (90% llenado)
	Tanques de almacenamiento (techo cónico y techo flotante): levantamiento de tanques llenos o medio llenos, dependiendo de su capacidad	Reactor químico: marcos colapsados
		Tanque de almacenamiento (tanque flotante): equipo levantado (90% llenado)
		Columna de extracción: el equipo se mueve y la tubería se rompe
7.0	Torre rectangular (estructura de concreto): derrumbe de la estructura y la torre	Reactor catalítico: partes internas dañadas
	Torre de vacío octagonal (estructura de concreto): fractura de la estructura	Columna fraccionadora: unidad destruida
	Torre fraccionadora (montada sobre pedestal y concreto): caída de la torre	
	Torre de regeneración (estructura de acero): caída de la torre	
	Tanque de almacenamiento esférico: deformación de la estructura en tanques llenos	

Continuación.