



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Generación de registros
sísmicos sintéticos de fuente
cercana para eventos de gran
magnitud empleando funciones
empíricas de Green
considerando fuente extendida
y efectos de directividad**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Mario Antonio González Sandoval

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, Ángeles y Antonio, mi hermana, Ingrid, y mi abuela, Salomé, que sin su enseñanzas, apoyo, amor y cariño incondicional no sería la persona que soy y también porque me motivan a mejorar cada día y dar lo mejor de mí.

A mis amigos, por todos los momentos compartidos y por formar parte de mi vida.

A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México por la formación académica, profesional y personal, además por todas las oportunidades brindadas y experiencias increíbles que pude vivir al ser estudiante de esta institución.

Al Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro, mi director de tesis, por su apoyo, tiempo, motivación, consejos y conocimientos compartidos, así como por despertar mi interés en la investigación.

Al Dr. Carlos Emiliano González Calva, mi co-director de tesis, por su apoyo, tiempo, motivación, consejos, conocimientos compartidos y sobre todo por su paciencia para orientarme en el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Amado Gustavo Ayala Milian, por su apoyo, tiempo, consejos y motivación para finalizar este trabajo.

Al Dr. Leonardo Ramírez Guzmán, al Dr. Juan Manuel Mayoral Villa y al Dr. Miguel Ángel Mánica Malcom por su tiempo y comentarios que enriquecieron el contenido de esta tesis.

Al Dr. Mario Gustavo Ordaz Schroeder por su tiempo y valiosos comentarios que enriquecieron esta trabajo.

A mi tutor de licenciatura, el Ing. Francisco López Mendieta, por su tiempo y apoyo durante toda mi formación en la facultad.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada para la realización de este trabajo a través del patrocinio del proyecto A1-S-35223 “Definición de demandas sísmicas para el diseño de estructuras basado en riesgo y resiliencia”.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, por la beca otorgada a través del patrocinio del proyecto IN114421 “Efectos del intemperismo y de la interacción suelo-estructura en el riesgo estructural sísmico” mediante el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT).

A ExxonMobil y al Institute of International Education por haberme otorgado la Beca ExxonMobil para la Investigación (BEI) 2022-2023 y por las experiencias y aprendizajes que adquirí al formar parte de este programa. También agradezco a mi mentora la Ing. Olga Gómez por su tiempo y sus valiosos consejos.

Resumen

Uno de los principales retos que presenta la ingeniería sísmica es la caracterización de la amenaza orientada al diseño y evaluación estructural a través de registros sísmicos, en particular, de gran magnitud. Sin embargo, su baja frecuencia de ocurrencia y el poco tiempo de observación limitan la extensión de dicha información. Por este motivo se recurre a métodos de simulación para generar registros sísmicos sintéticos que tengan características similares a las de los sismos registrados. Dentro de estos métodos, han sido de particular relevancia los que emplean la suma estocástica de funciones empíricas de Green (EGF), debido a su simple aplicación y resultados realistas.

Hasta el momento, las formulaciones empleadas consideran la hipótesis de fuente puntual, la cual es válida para sitios lejanos a la fuente. Sin embargo, cuando la distancia del sitio a la fuente no es lo suficientemente grande, comparada con las dimensiones de la falla, los efectos asociados a una fuente extendida, como lo son la directividad y saturación, tienen influencia sobre el movimiento del suelo.

Por lo anterior, en este trabajo se presenta una formulación de simulación sísmica que incorpora explícitamente dichos efectos, manteniendo la simplicidad que caracteriza las metodologías de suma estocástica de EGF basadas en la propuesta por Hartzell (1978). En la formulación propuesta, se parte de la hipótesis de fuente puntual y mediante el uso de un factor de directividad, definido como el cociente de caída de esfuerzos aparente, y los conceptos de fuente puntual equivalente y distancia efectiva, se modifica una de las formulaciones de suma estocástica existentes.

La formulación propuesta se valida a través de procesos de simulación sísmica considerando eventos de gran magnitud, comparándolos con registros de sismos reales en sitios cercanos a la fuente que han mostrado efectos de directividad, entre los que se encuentran: el sismo del 10 de mayo de 2014 en Tecpán, Guerrero y el del 19 de septiembre de 2017 en Puebla. Adicionalmente, se comparan los registros con los obtenidos a través de otro método de simulación estocástica, ampliamente aceptado, que requiere una gran cantidad de parámetros de entrada, lo cual lo hace poco práctico para fines ingenieriles.

Los resultados obtenidos muestran un ajuste adecuado entre los registros sintéticos y los de los sismos registrados, esto en términos de espectros de respuesta elástica, espectros de Fourier, duración de los acelerogramas y aceleración máxima del suelo (PGA).

Se concluye que las mejoras realizadas para tomar en cuenta los efectos de fuente extendida en el método de simulación sísmica, son un avance para mejorar la caracterización de la amenaza sísmica mediante el uso de registros sísmicos sintéticos orientada hacia el diseño o evaluación sismorresistente de estructuras.

Abstract

Seismic hazard characterization is essential to define the actions used in the design of structures. This implies the need for a significant amount of earthquake ground motion recordings of different magnitudes. However, there is not a comprehensive database of strong ground motions given the small observation time and the lack of instrumentation in a given area. This has led to the development of new simulation methodologies to obtain synthetic seismic records. A frequently used methodology is the stochastic summation of Empirical Green Functions (EGF), given its simplicity and reasonable reliability.

Current formulations for this methodology are based on a point-source hypothesis, which is valid for sites in the far-field. Nevertheless, when the source-to-site distance is not significantly larger than the fault dimensions, finite-fault effects, such as directivity and saturation, will have an influence on strong ground motion.

Using the current stochastic summation of EGF approaches to generate synthetic ground motion recordings, it is not possible to fully consider the extended fault hypothesis and its effects. Within this context, the thesis presents a formulation for stochastic summation of EGF that considers the effects of a finite source through the use of concepts such as the apparent stress drop ratio, the equivalent point source, and the effective distance, which is the distance between the site and the equivalent point-source. The proposed formulation maintains the simplicity that characterizes the EGF summation schemes, based on the one proposed by Hartzell (1978).

To validate the proposed formulation, the obtained synthetic time histories are compared with recorded ground motions in near-source sites, for Mexican earthquakes with evidence of rupture directivity, among which are: the May 10th, 2014, earthquake in Guerrero and the September 19th, 2017, one in Puebla. Additionally, synthetic records are compared with those obtained with another stochastic simulation method which requires a larger number of inputs and has higher computational costs, making it not suitable for civil engineering practical purposes.

Findings will show that there is good agreement between the average synthetic records and the real ones in terms of the elastic response spectra, Fourier spectra, time histories duration, and peak ground acceleration. Additionally, when there is amplification due to site-effects, the other stochastic method requires significant more information than the proposed formulation, emphasizing the advantages of using EGF based approaches.

It is concluded that the proposed improvements to consider finite-fault effects on the seismic simulation method based on EGF summation represent a step forward in the characterization of seismic hazard through the use of synthetic ground motion records aimed to be used for structural design or evaluation.

Índice

Resumen	I
Abstract.....	II
Introducción.....	1
Antecedentes	1
Objetivos.....	3
Organización de la tesis	3
I. Marco Teórico	5
I.I. Peligro sísmico	6
I.I.I. Peligro sísmico en México	6
I.II. Registros sísmicos.....	8
I.III. Caracterización de los sismos	9
I.III.I. Momento sísmico.....	9
I.III.II. Caída de esfuerzos	10
I.III.III. Espectro de fuente teórico	10
I.III.IV. Frecuencia de esquina	11
I.IV. Fuente puntual y fuente extendida	12
I.V. Efectos de fuente extendida.....	13
I.V.I. Efectos de saturación.....	13
I.V.II. Efectos de directividad	14
I.VI. Análisis de la demanda sísmica	16
I.VI.I. Espectro de respuesta elástica	16
I.VI.II. Intensidad de Arias.....	16
I.VI.III. Espectro de Fourier	16
II. Formulación propuesta.....	18
II.I. Suma estocástica de funciones empíricas de Green.....	18
II.II. Características de fuente extendida	20
II.II.I. Identificación de la presencia de efectos de directividad en sismos	20
II.II.II. Directividad en sismos en México	22
II.II.III. Presencia de efectos de saturación.....	24
II.III. Desarrollo de la formulación propuesta.....	25
II.III.I. Desarrollo matemático	26

II.III.II. Consideraciones para aplicar la formulación	33
III. Caso de estudio	36
III.I. Criterios considerados para las simulaciones	36
III.I.I. Características del sismo de interés	36
III.I.II. Características de los sitios de estudio	36
III.I.III. Elección de sismos como EGF	37
III.I.IV. Definición de la distancia de Joyner-Boore para los eventos simulados ...	39
III.II. Simulación para sismo hipotético	39
III.II.I. Estación SCT	41
III.II.II. Estación COYC	45
IV. Validación de la formulación propuesta	50
IV.I. Comparación con sismos registrados	51
IV.I.I. Localización de los epicentros de los eventos y estaciones	52
IV.I.II. Generación de registros sintéticos considerando efectos de directividad .	54
IV.I.III. Generación de registros sintéticos considerando efectos de saturación ...	66
IV.I.IV. Generación de registros sintéticos considerando efectos de directividad y saturación	78
IV.II. Comparación de la formulación propuesta con otro método de simulación (EXSIM)	90
IV.II.I. Comparación de los resultados	90
V. Conclusiones	95
V.I. Recomendaciones	98
Referencias	99
Anexo A	A-1
Anexo B	B-1
Anexo C	C-1
Anexo D	D-1
Anexo E	E-1

Introducción

Antecedentes

Los avances significativos en el desarrollo de herramientas para el análisis estructural y las nuevas tendencias del diseño y evaluación estructural han hecho necesario y, en otros casos, obligatorio, que se lleven a cabo análisis no lineales paso a paso en el tiempo, lo cual ha generado la necesidad de contar con una gran cantidad de registros sísmicos para poder determinar la respuesta de la estructura analizada, en particular para eventos de gran magnitud.

No obstante, a pesar de que la instrumentación se ha vuelto más extensa, el tiempo de observación y de obtención de registros sísmicos es insuficiente para definir de manera adecuada la amenaza sísmica para fines de diseño. Ante esta situación, una alternativa de gran utilidad es la generación de registros sísmicos sintéticos que cuenten con características similares a eventos históricos registrados y esperados, como lo son duración, amplitudes máximas, contenido de frecuencias y liberación de energía (Sedaghati, 2018).

Para la obtención de dichos registros se han propuesto diversas técnicas de simulación, como lo son los métodos de elementos finitos (*e.g.* Aagaard, 2000; Ikegami *et al.*, 2008; Ding *et al.*, 2012), los métodos de relaciones empíricas (*e.g.* Satoh *et al.*, 2010; Okawa *et al.*, 2012), los métodos deterministas (Boore, 1983) los métodos estocásticos (*e.g.* Hartzell, 1978; Joyner y Boore, 1986; Wennerberg, 1990; Ordaz *et al.*, 1995; Boore, 1996; Motazedian *et al.*, 2005; Kohrs-Sansorny *et al.*, 2005; Niño *et al.*, 2018) y los métodos híbridos (Kamae *et al.*, 1998; Pitarka *et al.*, 2000).

Los métodos de elementos finitos se basan en modelar el proceso de ruptura de manera detallada, obteniendo el movimiento del suelo a través de la solución de la ecuación de la elasticidad dinámica para tres dimensiones, teniendo así millones de grados de libertad. Por lo tanto, estos modelos requieren información detallada acerca de la orientación del plano de falla, el tipo de falla y características muy detalladas de los materiales, además de que su costo computacional es considerable.

Por otro lado, los métodos de relaciones empíricas se basan en emplear parámetros de sismos anteriores para estimar el movimiento del suelo durante un sismo de mayor magnitud, dada la ubicación del hipocentro. Sin embargo, estos métodos están limitados a la cantidad de sismos con los que se haya ajustado la relación empírica, así como el tipo de sismos analizado, por lo que, si para un sitio no se tiene información amplia sobre su sismicidad, no se pueden aplicar de manera directa estos métodos.

Asimismo, los métodos deterministas, como su nombre lo indica, definen de manera determinista el movimiento del suelo. Principalmente emplean técnicas donde se genera ruido Gaussiano, luego se le aplica una ventana, se transforma al dominio de la

frecuencia y se multiplica por un espectro definido por los modelos de fuente teóricos para sismos y, finalmente, se regresa la señal al dominio del tiempo.

Por su parte, los métodos híbridos combinan los enfoques determinista y estocástico, donde se usan registros sintéticos como funciones de Green (GF). Para los registros sintéticos empleados como GF, las frecuencias bajas se obtienen de manera determinista con un método de diferencias finitas y las altas se obtienen de manera estocástica. Una de las ventajas de este método es poder llevar a cabo simulaciones para sitios donde no se cuenta con funciones empíricas de Green (EGF).

A pesar de que, en algunos casos, los resultados de los métodos anteriores son más cercanos a los de sismos registrados, la complejidad de los modelos en los que se basan y los parámetros que usan que pueden tener mucha incertidumbre e implican un gran costo computacional, de manera que su aplicación resulta poco práctica para fines de la ingeniería sismorresistente.

En contraste, los métodos estocásticos donde, particularmente, se emplean sumas de registros de eventos pequeños como EGF, como lo propuso originalmente Hartzell (1978), tienen amplia practicidad ingenieril debido a que se usan pocos parámetros de entrada, los cuales son más fáciles de determinar, presentan un bajo costo computacional (González, 2023) y los resultados obtenidos son realistas en términos de duración, amplitudes y contenido de frecuencias. Por tal motivo, diversos autores (*e.g.* Joyner y Boore, 1986; Wennerberg, 1990; Ordaz *et al.*, 1995; Kohrs-Sansornny *et al.*, 2005; Niño *et al.*, 2018 y González, 2023) partiendo del método propuesto por Hartzell (1978), han propuesto mejoras a la suma estocástica de EGF, a través de las cuales se obtienen resultados más realistas.

Hasta el momento, estas formulaciones toman en cuenta la hipótesis de fuente puntual, la cual considera que la energía liberada durante un sismo proviene de un solo punto, la cual es válida para sitios lejanos a la fuente. Sin embargo, para sitios cercanos a la fuente, la hipótesis de fuente puntual no es completamente válida. Esto se debe a que los efectos de fuente cercana (*near-field*) comienzan a tener influencia sobre el movimiento del suelo, en términos de duración y amplitudes. Esto toma mayor importancia para eventos de gran magnitud, ya que la cantidad de energía liberada implica mayores dimensiones de la superficie de ruptura, que no son lo suficientemente menores que la distancia al sitio de estudio. Por lo tanto, si se desea caracterizar la amenaza sísmica para sitios cercanos a fuentes sísmicas, es de suma importancia que se modelen los efectos asociados a una fuente extendida, en particular, los efectos de saturación y directividad.

La saturación es un fenómeno donde las amplitudes del movimiento del suelo tienden a un valor constante a medida que la distancia del sitio a la fuente va disminuyendo. Por otro lado, la directividad es un fenómeno donde existe variación azimutal de la propagación de la ruptura, el cual afecta la intensidad del movimiento del suelo en un sitio. La directividad puede ser de dos tipos: *forward*, con amplitudes mayores y menor

duración, y *backward*, con amplitudes menores y mayor duración. Por lo tanto, ignorar la presencia de estos efectos llevaría a la subestimación o sobrestimación de las demandas sísmicas, lo cual afecta la correcta definición de la amenaza sísmica.

Por lo anterior, en esta tesis se presenta una formulación de simulación sísmica para generar registros sísmicos sintéticos, considerando explícitamente los efectos de saturación y directividad asociados a una modelación de fuente extendida, manteniendo la simplicidad que caracteriza a las metodologías de suma estocástica de EGF, basadas en la propuesta por Hartzell (1978), *i.e.*, se mantienen como parámetros de entrada el momento sísmico y caída de esfuerzos de los eventos objetivo y semilla, y únicamente se añade la distancia Joyner-Boore.

Objetivos

El objetivo de esta tesis es modelar los efectos de fuente extendida en el método de simulación sísmica basado en la suma estocástica de EGF, para mejorar la caracterización de la amenaza sísmica.

Para alcanzar este objetivo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Modelar los efectos de directividad en la generación de registros sísmicos sintéticos.
- Modelar los efectos de saturación en la generación de registros sísmicos sintéticos.
- Modelar, simultáneamente, los efectos de directividad y saturación en la generación de registros sísmicos sintéticos.
- Generar registros sísmicos sintéticos considerando la ocurrencia de un sismo hipotético, definido como objetivo, en la brecha de Guerrero.
- Validar los registros sintéticos obtenidos comparándolos con los registrados de eventos reales y con los generados mediante un método estocástico que emplea el concepto de frecuencia dinámica para modelar la fuente extendida.

Organización de la tesis

Este trabajo se divide en 6 capítulos, incluyendo esta introducción. En el Capítulo I se discuten diversos conceptos importantes sobre el peligro sísmico, las hipótesis para considerar una fuente puntual o extendida, los efectos de fuente extendida, así como algunas maneras de analizar las demandas sísmicas para fines de ingeniería sismorresistente. En el Capítulo II se presenta la evolución de las formulaciones basadas en la suma estocástica de EGF y, posteriormente, se desarrolla la formulación que considera los efectos de directividad y saturación. Además, se discuten las consideraciones que se deben tomar en cuenta para cada uno de los efectos estudiados. En el Capítulo III se presenta un caso de estudio donde se generan registros sísmicos sintéticos asociados a la ocurrencia de un sismo hipotético con M_w 8.2 en la brecha de Guerrero para dos sitios, uno en la Ciudad de México y uno en Guerrero.

Posteriormente, en el Capítulo IV se verifica la formulación propuesta a través de la comparación de registros sintéticos obtenidos con los registros de sismos históricos ocurridos en México y de los que se conoce que tuvieron efectos de directividad, así como con los registros sintéticos generados con un método de simulación estocástica que considera los efectos de fuente extendida empleando el concepto de frecuencia de esquina dinámica, el cual es ampliamente aceptado por la comunidad científica. Finalmente, en el Capítulo V se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos y recomendaciones para futuras investigaciones que resultaron de este trabajo.

I. Marco Teórico

Un sismo, también conocido como terremoto o movimiento telúrico, es un conjunto de vibraciones de la corteza terrestre, las cuales pueden ser de origen tectónico, volcánico, o antropogénico. Para fines de ingeniería civil, los sismos de mayor importancia son los de origen tectónico debido a su magnitud y sus efectos sobre la infraestructura. Un sismo tectónico es el movimiento del suelo provocado por la liberación súbita de energía, la cual se propaga a través de ondas, debido a un deslizamiento o ruptura en la corteza terrestre por la interacción de las placas tectónicas (Sauter, 1990).

Gracias al desarrollo de la sismología, se comprende bien la física del fenómeno que ocasiona un sismo (inicio de una fractura y su rápida propagación a lo largo de un plano de falla). Sin embargo, aún existen limitantes considerables en la determinación y modelación de las condiciones que originan el inicio de la ruptura y su propagación, como lo son los esfuerzos locales, deformaciones, geometría y resistencia de las rocas (Niño, 2008).

Debido a la incertidumbre inherente de la ocurrencia de un sismo, se emplean dos tipos de análisis para la predicción de la futura actividad sísmica y así poder determinar el peligro y riesgo: el determinista y el probabilista.

El análisis determinista consiste en la definición de escenarios de sismos y los movimientos del suelo asociados a cada escenario; fundamentalmente, es un análisis directo. Sin embargo, es necesario definir un sismo asociado al peor escenario posible con base en la información disponible, por más limitada que esta sea. Adicionalmente, aunque este enfoque pareciera ser conservador, siempre existe la posibilidad de que dicho escenario no sea el más desfavorable y ocurra uno mayor, lo que implica la subestimación de las demandas sísmicas. Por lo anterior, se considera que este tipo de análisis es limitado, ya que los resultados no son lo suficientemente robustos (Baker *et al.*, 2021).

Por otro lado, el análisis probabilista consiste en la determinación de la tasa de excedencia anual de una intensidad del movimiento del suelo en un sitio para un rango de intensidades y con base en ello se pueden cuantificar los efectos de los temblores sobre el entorno. Para ello es necesario definir las fuentes que afectan el sitio y su patrón de generación de eventos telúricos, lo cual se hace a través de modelos de ocurrencia (*e.g.* modelo de Gutenberg-Richter, modelo del Temblor característico). El valor que tengan los resultados del análisis dependerá, en gran medida, de la elección de los modelos empleados como datos de entrada y, en caso de usar varios modelos, estos se deberán emplear de manera consistente. Este tipo de análisis tiene mayor valor si puede estimar la probabilidad de un escenario desfavorable. El enfoque probabilista también ofrece la ventaja de incorporar las incertidumbres en los cálculos, a diferencia del enfoque determinista que las ignora, y aunque el procedimiento es más complejo, los resultados son más valiosos (Baker *et al.*, 2021). Por lo tanto, el enfoque probabilista se ha vuelto el más utilizado para llevar a cabo análisis de peligro y riesgo sísmico.

I.I. Peligro sísmico

El peligro sísmico, también conocido como amenaza sísmica, se define como la propiedad de un sismo que puede causar daños y pérdidas (McGuire, 2004). Generalmente, el peligro sísmico se calcula como la probabilidad de que un parámetro que describe la amplitud del movimiento del suelo durante un sismo (aceleración, velocidad o desplazamiento) sea mayor que un valor especificado (Niño, 2008). Su definición es fundamental para poder determinar las demandas a las que se verá sometida una estructura, ya sea con fines de evaluación o diseño.

La definición de la amenaza sísmica requiere determinar la sismicidad del sitio, es decir, la caracterización de las fuentes generadoras de sismos, sus tasas de ocurrencia y excedencia de magnitudes.

Para cuantificar el peligro sísmico, se determina la tasa de excedencia para una intensidad a , con la expresión (I.1) propuesta por Esteva (1967) y Cornell (1968):

$$v(a) = \sum_{i=1}^N \int_{M_{0i}}^{M_{ui}} \left(-\frac{d\lambda(M)}{dM} \right) P(A > a | M, R_{ij}) dM \quad (I.1)$$

donde N es la totalidad de fuentes generadoras de sismos con influencia en el sitio de estudio, $P(A > a | M, R_{ij})$ es la probabilidad de que la intensidad A exceda el valor a , dadas la magnitud del sismo, M , y la distancia entre la i -ésima fuente y el sitio, R_{ij} y $\lambda(M)$ representa la sismicidad local de fuente, *i.e.*, su tasa de actividad. Los límites de la integral, M_{0i} y M_{ui} , representan la mínima y máxima magnitud que puede generar la fuente, respectivamente.

I.I.I. Peligro sísmico en México

México se encuentra en una zona de alta actividad sísmica, en particular la costa del suroeste debido a la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa de Norteamérica, como se observa en la Figura I.1. Esta zona es conocida como la zona de subducción mexicana; su longitud es de alrededor de 1,350 km y abarca desde la costa de Jalisco hasta Oaxaca (Singh *et al.*, 1981).

En las zonas de subducción, se pueden producir dos tipos de sismos los interplaca y los intraplaca, cada tipo tiene asociado un cierto mecanismo de falla, inversa con ángulo bajo y normal con ángulo alto, respectivamente. Los movimientos telúricos de mayor magnitud que se han registrado históricamente están asociados con eventos interplaca en zonas de subducción, debido a que generan longitudes de ruptura considerablemente mayores (Baker *et al.*, 2021).

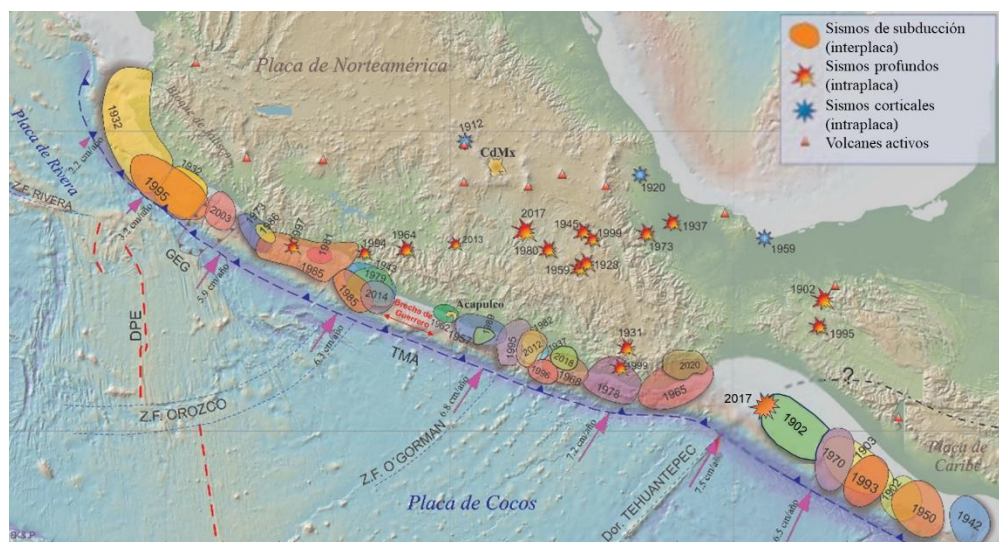


Figura I.1. Entorno tectónico de México (Kostoglodov *et al.*, 1999).

Dentro de las zonas de subducción, existen regiones conocidas como brechas sísmicas, las cuales son de particular interés para los sismólogos. McCann *et al.* (1979) define a una brecha sísmica como una región sobre un borde convergente entre placas tectónicas que no ha generado sismos de gran magnitud por más de 30 años, en otras palabras, tiempos inusualmente largos. Sin embargo, este no es el único criterio para que se considere que dicha zona tiene alto potencial sísmico; también es necesario contar con información adicional, como la sismicidad histórica o el régimen tectónico.

Particularmente, la brecha sísmica de Guerrero, que es un segmento de 230 km de longitud sobre la zona de subducción mexicana (Figura I.1), destaca como la región con el mayor potencial sísmico en la zona de subducción, ya que no ha presentado una ruptura significativa ($M_w \geq 7.2$) en al menos 100 años (Singh *et al.*, 1981). Ante esta situación, los especialistas consideran que un sismo M_w 8.2 en la brecha de Guerrero es un escenario plausible en un futuro no muy lejano (Cruz-Atienza *et al.*, 2018).

Este sería un escenario catastrófico en las zonas urbanas, donde se concentra una cantidad considerable de personas, como lo son las ciudades de Acapulco, Chilpancingo, Cuernavaca y la Ciudad de México, debido principalmente a su cercanía con la fuente del sismo. De manera particular, resalta la Ciudad de México, ya que se encuentra a menos de 300 km de la brecha, y tomando en cuenta que sufrió daños significativos durante el sismo M_w 8.1 del 19 de septiembre de 1985 con epicentro en Michoacán, localizado a más de 400 km de distancia; un evento M_w 8.2 tendría un impacto aún mayor.

Además de la brecha de Guerrero, otra brecha sísmica con gran potencial es la brecha de Tehuantepec, ubicada frente al Istmo de Tehuantepec, debido a que en al menos los últimos 250 años no ha habido un evento interplaca de gran magnitud, lo cual sugiere una longitud de alrededor de 375 km que potencialmente podría resultar en un sismo M_w 8.5. Los temblores importantes que han ocurrido han sido intraplaca, *e.g.*, M_w 7.8 de

1902 en Chiapas, M_w 7.4 de 1903 en Chiapas, M_w 7.8 de 1931 en Oaxaca, M_w 7.5 de 1999 en Oaxaca y M_w 8.2 del 2017 en Chiapas. Por lo tanto, se considera que la amenaza sísmica en la zona proviene de sismos interplaca e intraplaca (Suárez, 2020). A pesar del gran potencial sísmico que tiene la zona, no ha estado sujeta a tantos estudios de peligro sísmico debido a que se encuentra alejada de las principales zonas urbanas, en particular de la región del centro del país.

Cuando se requiere evaluar la amenaza sísmica de un sitio orientada al diseño y la evaluación estructural, existen diversas maneras de caracterizarla; estas incluyen el uso de registros sísmicos, espectros de peligro uniforme, mapas asociados a un periodo de vibrar y un periodo de retorno, curvas de tasas de excedencia o ecuaciones de predicción de movimiento del suelo (GMPE, por sus siglas en inglés) (Baker *et al.*, 2021). De todas estas alternativas, una de las más empleadas es la caracterización a través de registros sísmicos y algunos de sus parámetros asociados, como lo son la aceleración máxima del suelo (PGA, por sus siglas en inglés), la velocidad máxima del suelo (PGV, por sus siglas en inglés) y el desplazamiento máximo del suelo (PGD, por sus siglas en inglés) (González, 2023).

I.II. Registros sísmicos

Un registro sísmico, también conocido como sismograma o acelerograma, es un registro de la amplitud del movimiento del suelo en función del tiempo en un sitio dado. El registro se hace a través de sismógrafos, los cuales son instrumentos que almacenan las amplitudes del movimiento del suelo en tres direcciones ortogonales.

Contar con registros sísmicos es de gran importancia, ya que estos son de utilidad para monitorear los sismos y sus características (*e.g.*, magnitud, momento sísmico, caída de esfuerzos, etc.), para mejorar el conocimiento del peligro sísmico, para estudiar las características del subsuelo y el interior de la tierra, así como para los sistemas de alerta temprana para la población. Para la ingeniería sísmica es de gran utilidad contar con registros sísmicos obtenidos en diferentes sitios y de diferentes intensidades, ya que, además de que permite caracterizar la amenaza sísmica de un sitio, se emplean en el diseño sismorresistente de estructuras y en la evaluación de estructuras nuevas o existentes.

Para llevar a cabo el registro de los movimientos telúricos, se cuenta con diferentes redes sismológicas en el país (*e.g.*, Red de Banda Ancha del Servicio Sismológico Nacional (SSN), Red del Valle de México del SSN, Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería (RAII) de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM). Éstas consisten en un conjunto de estaciones que tienen sismómetros o acelerómetros, los cuales miden velocidades o aceleraciones del suelo, respectivamente.

Aunque durante los últimos años se ha incrementado la cobertura de las redes acelerométricas, en particular, para la zona mexicana de subducción, el poco tiempo de observación en la mayoría de las estaciones, o bien la falta de instrumentación en otros

sitios, implica que no se cuenta con suficientes registros sísmicos, en particular, para eventos de gran magnitud.

Por lo anterior, han surgido como alternativa diversas técnicas para la generación de registros sísmicos sintéticos que cuenten con características similares a aquellas de los eventos registrados, como lo son duración, amplitudes máximas, contenido de frecuencias y liberación de energía (Sedaghati, 2018).

I.III. Caracterización de los sismos

Para llevar a cabo simulaciones para obtener registros sísmicos sintéticos, es necesario definir parámetros de entrada que caractericen al sismo simulado, los cuales varían de acuerdo con la técnica de simulación a emplear.

Existe una serie de parámetros de la fuente sísmica que se emplean para caracterizar a un sismo, siendo algunos de ellos los siguientes: momento sísmico, caída de esfuerzos, frecuencia de esquina, profundidad hipocentral (focal), desplazamiento y dimensiones de la falla, velocidad de ruptura, tiempo de ruptura, entre otros. Aunque todos son de gran importancia desde el punto de vista de la sismología, para aplicaciones del diseño estructural sismorresistente, como la presentada en este trabajo, los primeros tres parámetros mencionados se consideran suficientes para la caracterización del sismo. Por ello, a continuación, se describen brevemente cada uno de ellos.

I.III.I. Momento sísmico

Para caracterizar de manera apropiada el tamaño de un sismo, se estima la energía que libera. El momento sísmico, M_0 , es la medida estándar para cuantificar el tamaño de un sismo y se calcula en términos del módulo de cortante, μ , el área de ruptura, A_R y su desplazamiento, D_R , como se muestra en la expresión (I.2). Por lo tanto, el momento sísmico es el trabajo realizado por la falla en el proceso de ruptura (Baker *et al.*, 2021).

$$M_0 = \mu \cdot A_R \cdot D_R \quad (I.2)$$

Como los valores de M_0 son demasiado grandes, se han propuesto diferentes escalas de magnitud para su uso cotidiano. Actualmente, la más empleada es la magnitud de momento sísmico, M_w , propuesta por Kanamori (1977).

Partiendo de la relación de magnitud-energía de Gutenberg-Richter, Kanamori (1977) propuso una escala de magnitud, donde M_w se define en términos de la energía liberada en el sismo, como se muestra en la siguiente expresión:

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \quad (I.3)$$

Dado que M_w es un parámetro que se estima de manera muy precisa, además de que es bien conocido de los sismos y es difundido por las organizaciones, como el SSN,

encargadas de registrar los eventos sísmicos, entonces se parte de este valor para calcular el momento sísmico.

Partiendo de la expresión anterior, se define el momento sísmico a partir de la magnitud M_w :

$$M_0 = 10^{(M_w + 10.7)(3/2)} \quad (I.4)$$

I.III.II. Caída de esfuerzos

La caída de esfuerzos, $\Delta\sigma$, de un sismo, es la diferencia entre el esfuerzo cortante en la falla justo antes del deslizamiento e inmediatamente después de que ocurre el deslizamiento (Ammon *et al.*, 2020). Aunque intuitivamente es un concepto sencillo, su determinación es compleja, ya que no se puede registrar directamente, por lo que es necesario estimarlo indirectamente a través del análisis de las señales sísmicas registradas y partiendo de suposiciones acerca del mecanismo de ruptura y geometría de la falla. Como consecuencia de lo anterior, se han registrado grandes incertidumbres en el cálculo de dicho parámetro (Neely *et al.*, 2020).

Además de definir un parámetro de la fuente, conocer el valor de $\Delta\sigma$ tiene importancia para el análisis de la amenaza sísmica, debido a que se ha encontrado que dicho valor influye en el nivel del movimiento del suelo para frecuencias altas (Hanks y McGuire, 1981; Cotton *et al.*, 2013). Adicionalmente, diversos estudios (Kanamori y Anderson, 1975; Courboux *et al.*, 2016) indican que este parámetro varía de acuerdo con el entorno sísmico donde se genera, por lo que proporciona información acerca del peligro sísmico de una región.

I.III.III. Espectro de fuente teórico

Un espectro de fuente es de interés para fines ingenieriles, ya que en este se pueden analizar las amplitudes, así como el contenido de frecuencias de los espectros registrados. Aki (1967) propuso una relación entre el espectro de un sismo y la magnitud del evento, a través del modelo espectral omega cuadrada (ω^2), también conocido como ley de escalamiento ω^2 . El modelo representa el espectro a través de una fuente puntual, el cual se caracteriza por su disminución proporcional a ω^{-2} para frecuencias grandes cuando se trata de un espectro de desplazamientos, por lo que algunos autores se refieren a este como modelo omega cuadrada inversa, ω^{-2} , mientras que si se trata de un espectro de aceleraciones se emplea el término original del modelo ω^2 . Por lo tanto, en este trabajo se hará referencia a ambos modelos indistintamente, según resulte más conveniente.

Los espectros de los sismos se definen mediante las siguientes ecuaciones para aceleraciones (I.5) y desplazamientos (I.6).

$$A_a(\omega) = \frac{M_0 \omega^2}{1 + (\omega/\omega_c)^2} \quad (I.5)$$

$$A_d(\omega) = \frac{M_0}{1 + (\omega/\omega_c)^2} \quad (I.6)$$

donde ω_c es la frecuencia de esquina del evento.

I.III.IV. Frecuencia de esquina

La frecuencia donde se cruzan las asíntotas de los espectros de baja (meseta) y alta frecuencia (modelo ω^{-2}), es conocida como frecuencia de esquina, f_c o ω_c . Como f_c es una característica de la fuente de cada evento sísmico, su valor es empleado para definir el espectro de fuente teórico. En la Figura I.2, se presenta la definición de f_c en un espectro de Fourier de desplazamientos de un registro sísmico.

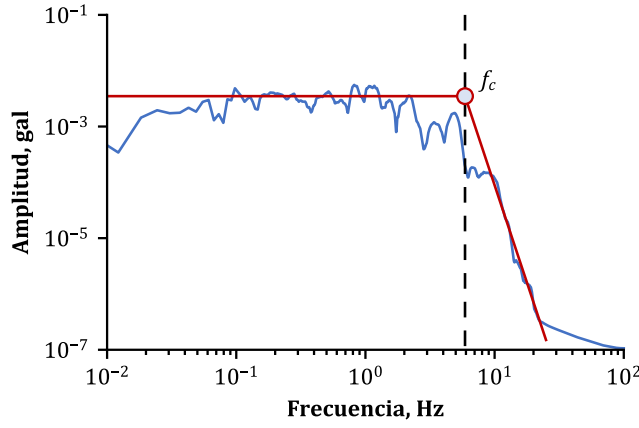


Figura I.2. Definición de frecuencia de esquina en un espectro de desplazamientos.

Brune (1970) definió f_c en términos de M_0 (en dina-cm), $\Delta\sigma$ (en bares) y la velocidad de las ondas S, β (en km/s), como se muestra en la siguiente expresión:

$$f_c = 4.9 \cdot 10^6 \beta \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3} \quad (I.7)$$

Generalmente, la determinación de los parámetros de la fuente se hace a través de estimaciones que parten de registros sísmicos y modelos teóricos. Sin embargo, dichos modelos realizan simplificaciones del proceso físico que genera los sismos. Las simplificaciones pueden ser sobre la geometría de la fuente, la homogeneidad de la corteza, sobre valores como la densidad, la velocidad de propagación de las ondas y de la ruptura, módulo de cortante, entre otras. De las simplificaciones mencionadas, la definición de la geometría de la fuente influye de manera significativa en la obtención de los parámetros, ya que una fuente puede considerarse como un punto o una superficie (rectangular o circular). A continuación, se discuten bajo qué consideraciones es válido emplear una fuente puntual y, en caso de no serlo, qué implicaciones tiene usar una fuente extendida.

I.IV. Fuente puntual y fuente extendida

Cuando para un sitio se hace el procesamiento de un registro sísmico, o se llevan a cabo simulaciones para obtener registros sísmicos sintéticos, se tienen dos clasificaciones de sitios: (1) los sitios que se encuentran cercanos a la fuente sísmica y (2) los que se encuentran lejanos a la fuente. Dicha clasificación no depende solamente de la distancia del sitio a la fuente, sino también de factores como la magnitud del evento, las dimensiones de la fuente y la longitud de las ondas sísmicas.

Cuando se trata de simulación, lo anterior tiene implicaciones significativas en las características de los registros sísmicos y, por consiguiente, en la definición de los parámetros de fuente del sismo, ya que cada clasificación implica emplear un modelo de geometría de la fuente distinto. Para sitios lejanos se emplea un modelo de fuente puntual, que supone que la energía liberada en un sismo proviene de un solo punto; mientras que para sitios cercanos se emplea el modelo de fuente extendida, también conocido como fuente de falla finita, que considera que la energía liberada proviene de una superficie de falla con dimensiones definidas.

En el modelo de fuente puntual, se debe cumplir que la distancia que existe entre el sitio de observación y la fuente es lo suficientemente grande respecto al tamaño de la falla, así como las longitudes de onda son mayores que las dimensiones de la falla. Esto se debe a que, en estos sitios, únicamente se presentan efectos de campo lejano (*far-field*) (Udías *et al.*, 2014). Una de las ventajas de emplear este modelo, es que el problema de determinar el mecanismo de un sismo se simplifica considerablemente si se ignoran las dimensiones de la fuente y la región focal se limita a un punto (Pujol y Herrmann, 1990).

No obstante, cuando la distancia más cercana del área de ruptura al sitio de estudio no es lo suficientemente grande, comparada con la dimensión de la fuente, la aproximación de campo lejano deja de ser válida. Por lo tanto, en estos casos las predicciones que se basan en modelos de fuente de campo lejano, los cuales consideran que la energía es liberada desde un punto, pueden resultar en una sobreestimación de amplitudes (Singh *et al.*, 1989).

Si la hipótesis de fuente puntual se invalida, ahora se debe considerar una fuente extendida, lo cual implica que se deben tomar en cuenta los efectos de campo cercano; como lo son los efectos de propagación de ruptura, **directividad**, asperezas, geometría fuente-a-sitio, **saturación** (distancia de fuente-a-sitio). Los efectos de la ruptura de fuente finita son considerables en términos de amplitudes, duración y contenido de frecuencias (Beresnev y Atkinson, 1997).

Aunque las características para considerar una fuente puntual son bien conocidas, no existe un consenso con respecto a la definición del rango de influencia, en términos de distancia, donde es necesario considerar los efectos de fuente cercana (campo cercano). Autores como Atkinson y Boore (1998) simplemente definen la forma general del espectro de aceleración para distancias cercanas a la fuente. Por su parte, Chen y

Atkinson (2002) expresan este rango para sitios que se encuentran a una distancia menor a 100 km. Finalmente, Yenier *et al.* (2014) mencionan un rango menor a 20 km para eventos de gran magnitud. Estas diferencias se pueden deber al hecho de que este rango varía con base en la magnitud del evento, por lo que no sería adecuado hablar de un rango fijo, sino de un rango variable en función de la magnitud del sismo que se está estudiando.

I.V. Efectos de fuente extendida

De acuerdo con lo discutido anteriormente, los efectos de fuente extendida son diversos. Sin embargo, para fines de este trabajo, se tomarán en cuenta únicamente los efectos de saturación y de directividad. Lo anterior se debe a que el resto de los efectos son fenómenos más complejos y requieren una modelación más detallada, resultando un mayor número de parámetros de entrada, disminuyendo la practicidad que caracteriza la formulación basada en la suma estocástica de EGF. A continuación, se describen en qué consisten los efectos de saturación y directividad, así como su origen.

I.V.I. Efectos de saturación

La saturación es un efecto que se presenta en sitios cercanos a la fuente sísmica, en donde conforme se reduce la distancia a la fuente, las amplitudes del movimiento del suelo (aceleración, velocidad o desplazamiento) se mantienen constantes. Es decir, existe una distancia límite (R_{lim}) a partir de la cual todos los sitios con distancia menor registrarán, aproximadamente, la misma amplitud (Figura I.3). La distancia de influencia del efecto de saturación es dependiente de la magnitud del evento (Yenier *et al.*, 2014). Esto es consistente con lo discutido para los efectos de fuente extendida.

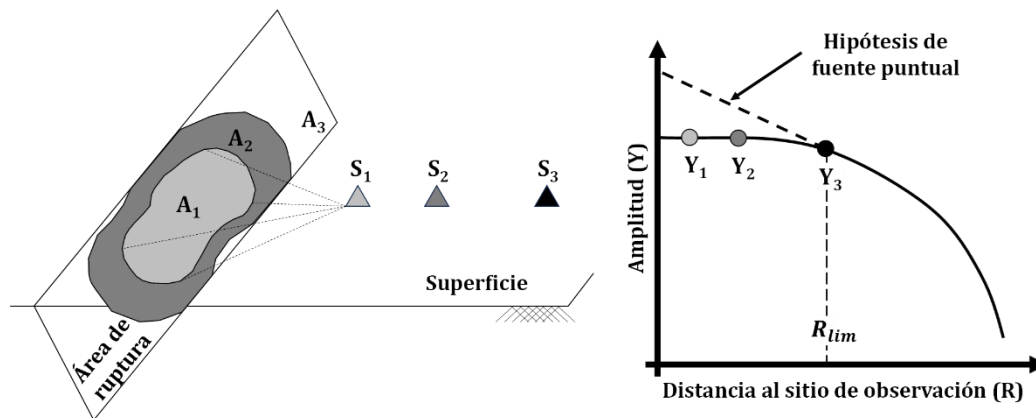


Figura I.3. Representación de los efectos de saturación para diversos sitios (Adaptada de Yenier *et al.*, 2014).

El origen de estos efectos está relacionado con el hecho de que las partes más cercanas de la ruptura tienen mayor influencia en el movimiento del suelo para sitios muy cercanos a la fuente (Rogers y Perkins, 1996). Una fuente se divide en fallas pequeñas (subfallas), cuyas señales tienen corta duración y pueden estar separadas entre sí, lo que reduce la probabilidad de que exista interferencia constructiva (Anderson, 2000).

Ante la presencia de este efecto, el evento aparenta ser menor y/o la falla aparenta estar más alejada del sitio (Yenier *et al.*, 2014).

En la Figura I.3 se observa cómo en distancias pequeñas la amplitud del movimiento (aceleración, velocidad o desplazamiento) se vuelve independiente de la distancia. La línea punteada representa el valor que tendrían las amplitudes si se siguiera considerando fuente puntual, lo cual llevaría a una sobreestimación importante de las amplitudes. En la estación 3 (S_3), que registra una amplitud Y_3 , se representa la distancia mínima (R_{lim}) en la cual toda el área de ruptura de la falla influye sobre el movimiento del suelo.

La suposición de una fuente puntual pierde validez, ya que este modelo estima que los movimientos del suelo aumentan a una tasa constante al disminuir la distancia, debido a que asume que toda la energía proviene de un punto. Los modelos de fuente finita más detallados pueden predecir adecuadamente los movimientos para sismos de gran magnitud, ya que modelan de manera explícita los procesos físicos que producen la saturación. Sin embargo, estos pueden resultar bastante complejos y, para fines de ingeniería sísmica, pierden su practicidad.

I.V.II. Efectos de directividad

La directividad es un fenómeno que se presenta cuando, ante la ocurrencia de un evento sísmico, ocurre una variación azimutal significativa de la propagación de la ruptura, lo cual implica que el movimiento del suelo sea más intenso en dirección de la propagación de la ruptura con respecto a las demás direcciones. Por lo tanto, si una estación sísmica se localiza en la dirección de la propagación, se tiene un registro con amplitudes considerablemente mayores pero una duración menor de la parte intensa; a este fenómeno se le conoce como directividad *forward*. Por el contrario, si la estación se encuentra localizada de manera que la ruptura de la falla se aleje de ella, el registro tendrá amplitudes menores pero la parte intensa tendrá una mayor duración; este tipo de directividad se conoce como *backward*. Esto también se puede observar en la Figura I.4, en las funciones temporales de fuente, en donde, a pesar de existir una variación en la duración y amplitud, el área debajo de la curva se mantiene constante para todos los azimuts, siendo igual al momento sísmico.

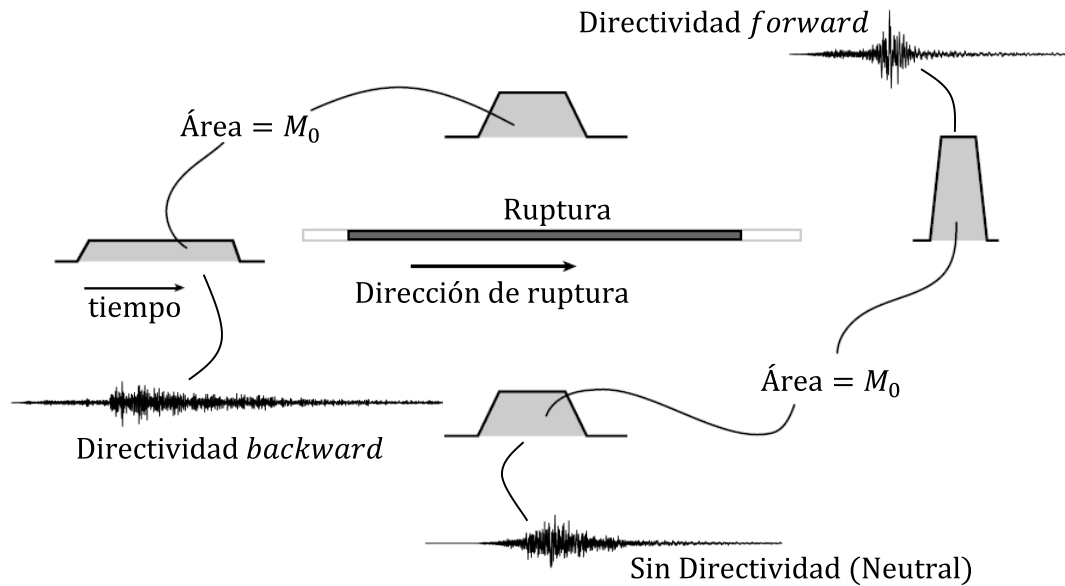


Figura I.4. Representación de los efectos de directividad. (Adaptada de Ammon *et al.*, 2020)

Las funciones temporales de fuente son la forma de los pulsos de las ondas de cuerpo que son provocadas por la ruptura del sismo (Clinton, 2004). Estas funciones tienen forma trapezoidal, la cual resulta de la convolución de dos funciones pulso rectangulares, una representando los efectos de fuente puntual y la segunda los efectos de fuente extendida.

Como se ilustra en la Figura I.4, únicamente en las estaciones que son perpendiculares a la ruptura (estaciones neutras) se puede registrar el tiempo de ruptura verdadero (Ammon *et al.*, 2020), las demás estaciones registran una duración de ruptura aparente que depende del azimut del observador respecto a la dirección de la ruptura. Lo anterior se debe a que, en general, la velocidad de ruptura es menor que la velocidad de la onda S, haciendo que las ondas superficiales generadas de la falla se registren en una estación en el orden de ruptura de los segmentos de la falla. Sin embargo, cuando la trayectoria que recorren las ondas sísmicas no es perpendicular a la falla, las ondas internas (o de cuerpo) que son generadas de diferentes segmentos de la falla recorren distancias diferentes a las estaciones y, por lo tanto, tienen tiempos de recorrido relativos que dependen del azimut.

Aunque la presencia del fenómeno de directividad generalmente está asociada a sismos de gran magnitud, también se ha registrado su ocurrencia en sismos de magnitud pequeña y moderada, en particular para sismos localizados en California con $3.5 \leq M_w \leq 5.4$ (*e.g.*, Bakun, 1980; Mori, 1996; Boatwright, 2007; Seekins *et al.*, 2010; Luo *et al.*, 2010). Esto se puede deber a diversos factores. Primero, para este tipo de sismos, resulta más complicado demostrar la presencia del fenómeno de directividad. También, los eventos de magnitudes menores son estudiados con menor detalle. Por otro lado, no todas las redes acelerográficas en el mundo cuentan con una densidad de estaciones y cobertura comparable con las de California.

I.VI. Análisis de la demanda sísmica

Dentro de la ingeniería sísmica, se pueden analizar los efectos de la demanda a partir de los registros sísmicos de diversas maneras, ya sea mediante el uso de espectros de respuesta elástica, Intensidad de Arias o espectros de Fourier. El concepto y la importancia que tiene cada uno de estos se discute a continuación.

I.VI.I. Espectro de respuesta elástica

Un espectro de respuesta elástica es la representación gráfica de las respuestas máximas de un conjunto de osciladores de un grado de libertad (1GL), definidos por su periodo y su amortiguamiento, al verse sometidos a una excitación sísmica dada, lo que implica que cada oscilador se somete al rango de frecuencias presentes en la señal del sismo. Las respuestas máximas pueden ser en términos de pseudoaceleraciones, velocidades o desplazamientos.

La ventaja de las amplitudes espectrales es que la respuesta máxima del sistema de un grado de libertad se aproxima a la respuesta específica del sistema de interés. Para la mayoría de los periodos de interés, la respuesta del oscilador depende, principalmente, de qué tanta energía del movimiento sísmico tiene una frecuencia natural cercana a la frecuencia del oscilador. Por ello, la importancia de analizar los espectros de respuesta, ya que las ordenadas espectrales toman en cuenta tanto la amplitud como el contenido de frecuencias del movimiento del suelo (Baker *et al.*, 2021).

I.VI.II. Intensidad de Arias

El cálculo de la intensidad de Arias es de gran utilidad, ya que contiene el potencial destructivo de un sismo. Refleja simultáneamente varias características del evento analizado, tales como amplitud, contenido de frecuencias y duración del movimiento del suelo. Lo anterior, juega un papel importante en caracterizar el peligro sísmico (Xu *et al.*, 2019). La intensidad de Arias, I_A (Arias, 1970) se define como la integral del cuadrado de la aceleración registrada, $a(t)$, a lo largo de la duración del sismo, t_d :

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_d} a^2(t) dt \quad (I.8)$$

donde g es la aceleración de la gravedad.

I.VI.III. Espectro de Fourier

El espectro de Fourier es la representación gráfica de la transformada de Fourier, la cual es una operación matemática que transforma una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia (Rodríguez, 2005).

El análisis del contenido de frecuencias de un registro es de gran importancia, ya que la respuesta dinámica de un sistema estructural depende de la similitud entre las frecuencias naturales del sistema de interés y las frecuencias del movimiento provocado por el sismo (Baker *et al.*, 2021). Esto se debe a que si ambas frecuencias

coinciden se presentará resonancia del sistema, lo que implica la amplificación de la respuesta estructural del mismo.

La transformada de Fourier de una señal, $a(t)$, queda definida como:

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)e^{-i\omega t} dt \quad (I.9)$$

Al calcular la transformada de Fourier de una señal, en este caso una historia de tiempo de aceleraciones, velocidades o desplazamientos, se pueden expresar las amplitudes del movimiento del suelo en función de la frecuencia. De este modo, es posible ver al movimiento del suelo como una superposición de componentes senoidales con amplitudes y ángulos de fase particulares en cada frecuencia (Baker *et al.*, 2021).

I.VI.III.I. Transformada de Fourier Discreta (DFT)

Como se vio en la ecuación anterior, la transformada de Fourier está definida para funciones continuas, lo que impide su uso para señales digitales discretas, como lo son los registros sísmicos. Por este motivo, surge la DFT, la cual está definida por la siguiente expresión:

$$A_n = \sum_{k=0}^{N_m-1} a_k e^{-i2\pi nk/N_m} \quad (I.10)$$

para $n = 0, 1, 2, \dots, N_m - 1$, donde N_m es el número de muestras de la señal, registradas a cada Δt segundos.

I.VI.III.II. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La FFT es un algoritmo optimizado de la DFT, que consiste en evitar realizar cálculos redundantes. Pasando de realizar N_m^2 operaciones con la DFT a $N_m \log_2(N_m)$ operaciones (Redmon, 2002). La FFT se puede realizar siempre y cuando N_m es una potencia de 2. Cuando la condición anterior no se cumple, se recurre a rellenar la señal con ceros, ya sea al principio o final de la señal, sin que esto afecte el espectro obtenido (Rodríguez, 2005).

Los espectros de Fourier y de respuesta elástica comparten la característica que expresan amplitudes o intensidades en términos de la frecuencia o del periodo; sin embargo, presentan algunas diferencias. Una diferencia es que los espectros de Fourier son una propiedad de la historia de tiempo del movimiento del suelo, mientras que un espectro de respuesta representa las respuestas máximas de osciladores de 1GL al ser sometidos al movimiento del suelo, de manera que comparar espectros de respuesta de diferentes regiones puede ser complicado (Baker *et al.*, 2021). Por otro lado, las amplitudes espectrales de Fourier pueden presentar variaciones significativas en rangos pequeños de frecuencias, por lo que en algunas ocasiones es necesario suavizar los espectros.

II. Formulación propuesta

II.I. Suma estocástica de funciones empíricas de Green

Como se mencionó anteriormente, dentro de los métodos de simulación estocásticos, uno de los más empleados para fines ingenieriles es el basado en la suma estocástica de EGF, debido a su simplicidad aplicación en términos de parámetros de entrada, su bajo costo computacional y la obtención de resultados realistas. Por tal motivo, diversos autores (Joyner y Boore, 1986; Wennerberg, 1990; Ordaz *et al.*, 1995; Kohrs-Sansorny *et al.*, 2005; Niño *et al.*, 2018; González, 2023) han contribuido en la mejora de este método con el fin de obtener resultados más realistas. A continuación, se describe brevemente el método, así como los avances realizados por dichos autores en el método de suma estocástica de EGF.

El método de simulación sísmica empleando una suma estocástica de EGF, fue propuesto originalmente por Hartzell (1978), en particular, usando registros de réplicas de un evento sísmico de gran magnitud como funciones de Green (GF) para modelar el movimiento del suelo y así replicar las acciones de un sismo de gran magnitud.

El método consiste en discretizar la superficie de falla de un sismo de gran magnitud en η celdas (que contienen a la EGF), también conocidas como fuentes elementales (Niño, 2008), donde cada una de ellas representa una fuente puntual, las cuales se rompen y suman de manera aleatoria. En esta propuesta, se utiliza como EGF un registro sísmico de un evento de menor magnitud generado en la fuente sísmica de interés y registrado en el sitio de estudio.

Entre las bondades de emplear registros sísmicos de eventos de menor magnitud como EGF se encuentran que se consideran, de manera implícita, los efectos de propagación de la trayectoria, la información de la fuente y el mecanismo de falla, la geometría fuente-sitio y los efectos de sitio, debido a que son características inherentes a la señal empleada como EGF.

Posterior al trabajo de Hartzell (1978), otros investigadores como Joyner y Boore (1986) y Wennerberg (1990) propusieron diferentes esquemas de suma con el fin de simular el proceso de ruptura del evento objetivo, sin necesidad de una descripción detallada de este proceso (Ordaz *et al.*, 1995).

Joyner y Boore (1986) propusieron un esquema de suma de una etapa, en el cual las celdas rompen siguiendo una distribución de probabilidad uniforme. La elección de esta PDF produce “huecos” en las frecuencias proporcionales a la frecuencia de esquina. Uno de sus aportes más significativos fue que encontraron que es necesario definir un factor de escala, κ , para ajustarse al espectro teórico del modelo ω^2 (Aki, 1967) para frecuencias bajas y altas.

Años más tarde, Wennerberg (1990) propuso un esquema de suma en dos etapas para poder definir una fuente real compleja, basándose en una función de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) que define el retraso de los tiempos de ruptura y que elimina los “huecos” del esquema de Joyner y Boore (1986). Aunque los acelerogramas generados con esta propuesta son más realistas, al analizar los espectros y comparar con el modelo ω^2 (Aki, 1967) las frecuencias altas se sobreestiman.

Para resolver el problema de sobreestimación de las frecuencias altas, Ordaz *et al.* (1995) propusieron que los retrasos de los tiempos de ruptura de las celdas quedaran definidos a través de una PDF, de manera que el espectro objetivo se ajustara exactamente al modelo de escalamiento ω^{-2} (Aki, 1967) en todo el rango de frecuencias analizado. Ordaz *et al.* (1995) partieron del esquema de suma propuesto por Joyner y Boore (1986), que consiste en una sola etapa de suma de las celdas y el espectro de fuente queda modelado considerando una frecuencia de esquina. Adicionalmente, proponen la definición de η y κ en términos de M_0 y $\Delta\sigma$ de los eventos objetivo y semilla, para poder cumplir con la relación espectral, $H(\omega)$, tanto para frecuencias bajas como altas.

Con la propuesta anterior se obtienen registros sintéticos cuyas envolventes son aparentemente realistas. Sin embargo, se presenta una concentración de la ruptura de las celdas y, por lo tanto, de la energía liberada en la mitad del tiempo, lo cual no es del todo realista. Para representar la complejidad del proceso de ruptura de la fuente sísmica, Kohrs-Sansorny *et al.* (2005) proponen emplear un esquema de suma dividido en dos etapas, al igual que Wennerberg (1990), con la diferencia fundamental de que los registros sintéticos obtenidos siguen el modelo de escalamiento ω^{-2} (Aki, 1967) para todo el rango de frecuencias del espectro. Esto implica que cada etapa de la suma tiene su propia PDF, $p_1(t)$ y $p_2(t)$. En este sentido, se cuenta con un número, η_1 , de celdas que rompen en la primera etapa y para la segunda etapa se rompen, η_2 , celdas. Con esta propuesta, se generan registros sintéticos que, en promedio, se ajustan de mejor manera al modelo ω^{-2} (Aki, 1967) en todo el rango de las frecuencias y se mejora la distribución de la ruptura de celdas, ya que dejan de concentrarse a la mitad del tiempo de ruptura. Por consiguiente, los registros generados son más realistas y suficientemente diferentes entre ellos para que se asocien a diferentes procesos de ruptura.

A pesar de los avances alcanzados, Niño *et al.* (2018) proponen un método de suma estocástica de EGF considerando un esquema de suma en dos etapas, con un modelo de espectro de fuente con dos frecuencias de esquina, basándose en lo presentado por García *et al.* (2004), quienes encontraron que cuando los modelos de espectros de fuente se definen a partir de dos frecuencias de esquina, en lugar de una sola, se puede describir de manera más adecuada la variación de la amplitud de acuerdo con el tamaño de la fuente, *i.e.*, el tamaño del sismo. También, encontraron que tanto el espectro de fuente teórico como el proceso de ruptura de los sismos de gran magnitud se describe de manera más aproximada empleando dos frecuencias de esquina. Los resultados

obtenidos al emplear esta formulación muestran mejoras, comparados con los de las otras formulaciones mencionadas, en particular para los espectros de respuesta elástica promedio, los cuales se ajustan mejor a los espectros de sismos registrados. Sin embargo, en dicho trabajo se reconoce que la propuesta sigue estando limitada por considerar una fuente puntual y no tomar en cuenta efectos propios de una fuente finita como la directividad y la saturación, entre otros.

Ordaz *et al.* (1995) reconocieron que el uso de un solo sismo pequeño como EGF no necesariamente es suficiente para representar una fuente extendida por los patrones de radiación y la distancia hipocentral de los diferentes puntos de la fuente. Como alternativa, propusieron el uso de varios registros de eventos pequeños como EGF's que abarquen el plano de falla del evento objetivo. Adicionalmente, en las formulaciones presentadas anteriormente se tiene la limitante que la forma de los espectros de respuesta elástica y espectros de Fourier promedio es muy similar a la de los espectros correspondientes de la EGF, lo cual no refleja adecuadamente la aleatoriedad del proceso de simulación (González, 2023). Para atender esta problemática, así como enriquecer el contenido de frecuencias de los registros sintéticos e intentar representar variaciones en la propagación de las ondas, González (2023) propone el uso de dos EGF para una formulación que emplea un esquema de suma de una etapa y un modelo de fuente definido con una frecuencia de esquina, similar al propuesto por Ordaz *et al.* (1995). Los registros sintéticos obtenidos con esta propuesta presentan mayor aleatoriedad, *i.e.* los espectros tienen una forma diferente a la de los sismos semilla, además de que se enriquece el contenido de frecuencias. Sin embargo, se sigue considerando la hipótesis de fuente puntual, limitando su aplicación a sitios lejanos a la fuente sísmica.

II.II. Características de fuente extendida

Con el fin de implementar el método de suma estocástica de EGF para sitios cercanos a la fuente, es necesario tomar en cuenta los efectos de fuente extendida, los cuales para este trabajo serán los de directividad y saturación. Por lo tanto, previo al desarrollo de la formulación, es necesario discutir algunos antecedentes relacionados a ambos efectos.

II.II.I. Identificación de la presencia de efectos de directividad en sismos

Para llevar a cabo simulaciones de sismos con efectos de directividad, se estudiaron y usaron algunos métodos existentes para determinar la presencia de este efecto en eventos observados. A continuación, se describen los métodos más relevantes.

La manera más simple de verificar si se presentó directividad es a través de la inspección visual de los registros sísmicos regionales y cercanos a la fuente, pudiéndose observar efectos de directividad *forward* cuando los acelerogramas son más cortos, pero con mayores amplitudes, mientras que las estaciones donde hay directividad *backward* tienen registros más largos, pero con menores amplitudes. Esto se ejemplifica

en la Figura II.1, donde se muestran acelerogramas registrados debido al evento sísmico del 15 de junio de 1999, con M_w 7.0, en el estado de Puebla (Figura II.1a). El primero corresponde a la estación Raboso (RABO) (Figura II.1b), el cual presenta directividad de tipo *forward*, el segundo corresponde a la estación Chila de las Flores (CHFL) (Figura II.1c), donde no se identifican efectos de directividad, mientras que el tercero corresponde a la estación Oaxaca Facultad de Medicina (OAXM) (Figura II.1d), el cual presenta efectos de directividad del tipo *backward*.

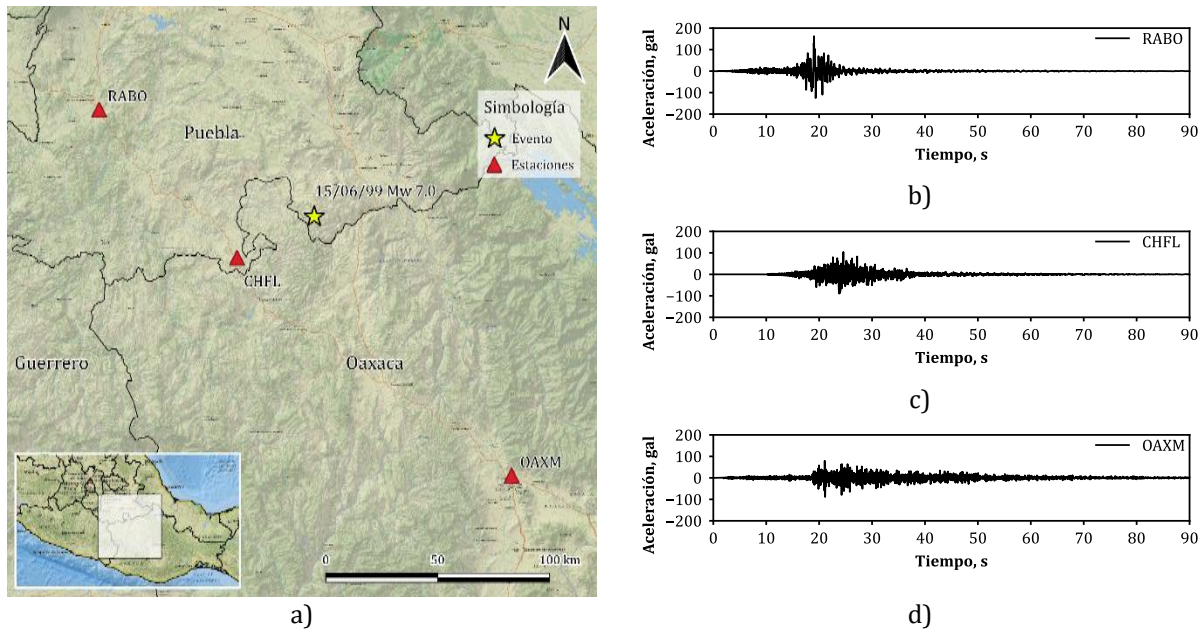


Figura II.1. a) Localización del epicentro y las estaciones; Registros sísmicos del evento M_w 7 del 15/06/1999 en la componente EW: b) RABO con directividad *forward*, c) CHFL sin efectos de directividad y d) OAXM con directividad *backward*.

Otra manera de analizar los efectos de directividad es mediante el cálculo de las frecuencias de esquina observadas (aparentes) en cada estación, identificando si existe una variación de estos valores en función del azimuth respecto a la fuente, como lo realizaron Honoré *et al.* (2011). En la Figura II.2b, se pueden observar las frecuencias de esquina calculadas, con la ecuación (I.7), para distintas estaciones que registraron el evento sísmico del 04 de abril de 2010, de M_w 7.2, con epicentro cercano a Mexicali (Figura II.2a), seleccionado este ejemplo por sus conocidos efectos de directividad (Jaimes, 2010). Es evidente que las estaciones con azimuths entre 0° y 100° tienden a frecuencias de esquina menores al promedio, presentando directividad *forward*, mientras que las estaciones con azimuths de entre 200° y 250° son mayores al promedio y presentan directividad *backward*.

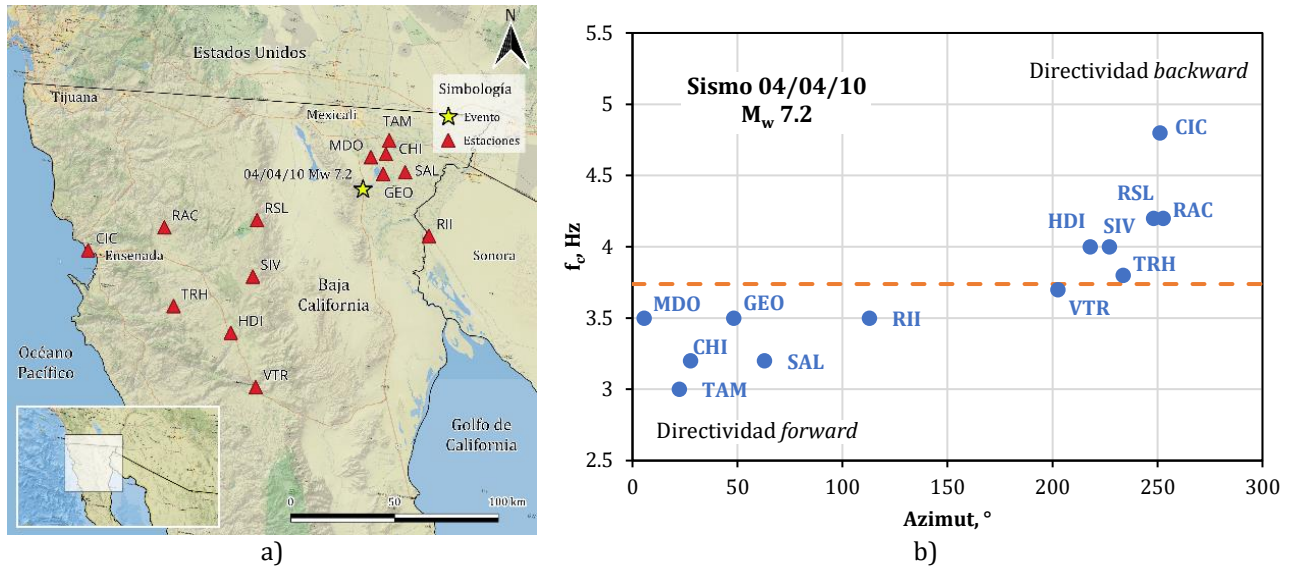


Figura 11.2. a) Localización del epicentro y las estaciones b) Variación de las frecuencias de esquina en términos del azimuth de la estación (la clave de la estación está dada por 3 letras).

Adicionalmente, se pueden verificar los efectos de directividad mediante la inversión cinemática del deslizamiento de la falla, empleando sismogramas cercanos a la fuente y vectores de desplazamiento estáticos cosísmicos de estaciones del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), como lo realizaron Iglesias *et al.* (2022), en conjunto con la inspección visual de los registros, para demostrar directividad significativa en el sismo M_w 7 del 08 de septiembre de 2021 en Acapulco, Guerrero.

II.II.II. Directividad en sismos en México

Los efectos de directividad en el estudio de la amenaza sísmica son de particular importancia para México, pues se ha encontrado evidencia de sismos donde se presentó dicho efecto, como lo son el de M_w 7 de Tehuacán, Puebla, ocurrido el 15 de junio de 1999; el de M_w 7.2 de Mexicali, Baja California, ocurrido el 04 de abril de 2010; los de M_w 6.5 y M_w 6.1 de Guerrero, que ocurrieron el 08 y 10 de mayo de 2014, respectivamente; así como el de M_w 7.1 de Puebla, ocurrido el 19 de septiembre de 2017; y, el más reciente, de M_w 7.0 de Acapulco, Guerrero, que ocurrió el 08 de septiembre de 2021 (Singh *et al.*, 1999; Jaimes, 2010; Singh *et al.*, 2019; Arroyo *et al.*, 2020; Iglesias *et al.*, 2022).

Singh *et al.* (1999) revisaron los registros del evento sísmico de Tehuacán, Puebla M_w 7, que ocurrió el 15 de junio de 1999, y encontraron que, en algunas estaciones, la duración de la parte intensa del sismo fue menor que en otros sitios, concluyendo que se presentó directividad de la fuente hacia el noroeste (NW).

Jaimes (2010) analizó los acelerogramas del sismo de Mexicali con M_w 7.2, del 4 de abril de 2010, y encontró la presencia de directividad en la dirección de la falla de Laguna Salada, que se encuentra al noreste (NE) del epicentro, lo cual es consistente con lo

determinado en términos de las frecuencias de esquina observadas en las estaciones (Figura II.2b).

De manera más reciente, Singh *et al.* (2019) analizaron los registros sísmicos en distancias regionales de los eventos del 8 y 10 de mayo de 2014, en Guerrero (M_w 6.5 y 6.1, respectivamente) a través de relaciones espectrales, cocientes de PGA's y PGV's y energía sísmica emitida, donde se encontró variación azimutal de estos valores, lo cual es consistente con el concepto de directividad de la fuente. Estos autores observaron que el mecanismo focal influenció la directividad en cada evento, presentándose esta en dirección Este-Sureste (ESE) para el primer evento, mientras que para el segundo se presentó en la dirección opuesta. Además, sugieren la presencia de este efecto en la dirección Este-Sureste (ESE) en el sismo M_w 8.1 del 19 de septiembre de 1985, con epicentro en Michoacán, que causó daños, tanto humanos como materiales, sin precedentes en la Ciudad de México. Los resultados de este estudio resaltan la importancia de la directividad en movimientos fuertes del suelo provenientes de sismos de magnitud importante en la zona de subducción de la placa de Cocos.

En el sismo del 19 de septiembre de 2017, Arroyo *et al.* (2020) encontraron que hubo una ruptura con dirección bilateral en las direcciones noroeste y sureste (NW-SE), lo cual confirma lo encontrado por Melgar *et al.* (2018) quienes empleando un modelo de inversión telesísmica encontraron directividad hacia la dirección noroeste (NW), mientras que empleando un modelo de inversión diferente encontraron que la propagación de la ruptura era predominante hacia la dirección sureste (SE).

Durante el sismo ocurrido en Acapulco, Guerrero, el 8 de septiembre de 2021, también se observaron efectos de directividad en los registros sísmicos. Se encontró que la propagación de la ruptura se dio en la dirección noreste (NE), lo cual fue confirmado mediante el análisis visual de los registros sísmicos, así como mediante la inversión cinemática del deslizamiento de la falla empleando sismogramas cercanos a la fuente. La ocurrencia de este sismo y los efectos de directividad observados confirman la hipótesis de presencia de efectos de directividad en el terremoto M_w 8.1 del 19 de septiembre de 1985 (Iglesias *et al.*, 2022).

La Tabla II.1 presenta un resumen de algunos sismos en México en los que se tiene evidencia de los efectos de directividad, además de su dirección de ruptura y la clasificación de las estaciones con base en el tipo de directividad registrado.

Tabla II.1. Resumen de algunos eventos sísmicos con directividad en México.

Evento	Magnitud, M_w	Epicentro		Dirección de la directividad	Estaciones con directividad <i>forward</i>	Estaciones con directividad <i>backward</i>
		Latitud	Longitud			
15/06/99	7	18.133	-97.539	NW	PLIG, RABO, YAIG	LVIG, OXIG, PNIG
04/10/10	7.2	32.470	-115.370	NE	CHI, TAM, SAL	RSL, SIV, RAC, CIC
08/05/14	6.5	16.986	-100.916	ESE	SUCH	SLU2
10/05/14	6.1	17.036	-100.893	WNW	SLU2	SUCH
19/09/17	7.1	18.3297	-98.6712	Bilateral (NW-SE)	PBP2, SXPU	LMPP, TNLP
08/09/21	7	16.755	-99.953	NE	DAIG, PLIG, PNIG, VIGA	ATYC, CAIG, ZIIG

De acuerdo con lo discutido anteriormente, a pesar de la presencia de este fenómeno en una cantidad significativa de eventos sísmicos, este efecto no se ha considerado para la generación de registros sísmicos sintéticos empleando el método de suma estocástica de EGF, lo que implica la posible subestimación de las demandas en caso de presentarse el fenómeno en condición *forward* y la sobreestimación al presentarse directividad *backward*. Por lo tanto, para mejorar la definición de la amenaza sísmica es necesario considerar este efecto de la fuente.

II.II.III. Presencia de efectos de saturación

Como se discutió anteriormente, debido a los efectos de saturación, considerar la hipótesis de fuente puntual para sitios cercanos a la fuente no es adecuado, ya que esto conlleva a la sobreestimación de las amplitudes del movimiento del suelo.

Para modelar adecuadamente dichas amplitudes, generalmente se emplean modelos de fuente extendida, los cuales requieren una gran cantidad de parámetros de entrada, lo que implica una mayor complejidad. Por lo tanto, esto les resta practicidad para aplicaciones en la ingeniería sísmica. Sin embargo, Atkinson y Silva (2000) y Boore (2009) encontraron que los efectos de saturación se pueden representar en modelos de fuente puntual equivalente, los cuales se describen a continuación.

II.II.III.I. Modelado de una fuente extendida empleando una fuente puntual equivalente

Los modelos de fuente puntual equivalente se basan en la hipótesis de que la energía se libera desde un punto virtual ubicado a una distancia efectiva, R_{eff} , de manera que las amplitudes de los movimientos del suelo se atenúen y se determinen de manera adecuada, como lo harían si se empleara un modelo de fuente extendida. El punto equivalente es denominado “virtual”, ya que este no es real y, por lo tanto, no se encuentra sobre la superficie de ruptura de la falla (Figura II.3).

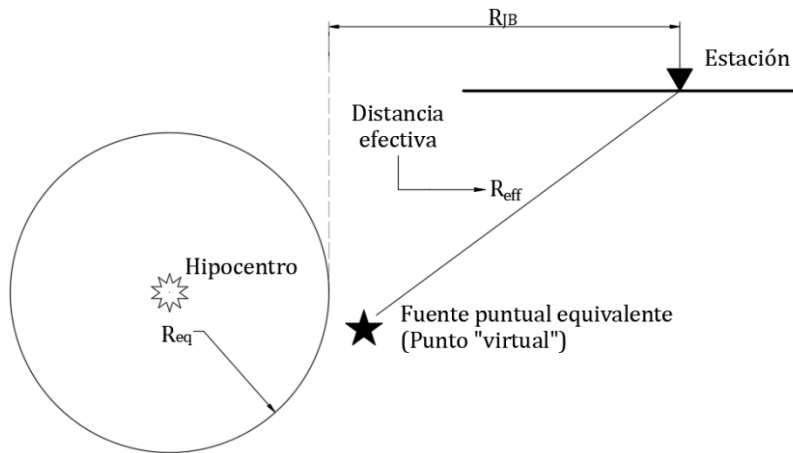


Figura II.3. Concepto de fuente puntual equivalente y distancia efectiva (Adaptada de Sedaghati, 2018).

A pesar de que no considerar los efectos de saturación conlleva a la sobreestimación de las demandas sísmicas, las formulaciones actuales de suma estocástica de EGF no los toman en cuenta explícitamente; esto se puede deber a que, al menos para fines de diseño, sobreestimar las demandas brinda un margen de seguridad. Sin embargo, si se desea mejorar la definición de la amenaza sísmica, es indispensable considerar estos efectos.

II.III. Desarrollo de la formulación propuesta

Las formulaciones del método de suma estocástica de EGF que se han presentado en esta tesis, han ido mejorando la similitud de los registros sintéticos con los de eventos registrados y la representación del proceso de ruptura. Sin embargo, estas formulaciones parten de la hipótesis de una fuente puntual, limitando su aplicación para sitios donde se presentan efectos de campo lejano. No obstante, como se discutió anteriormente, para sitios cercanos a la fuente sísmica o para eventos de gran magnitud, dicha hipótesis no es del todo válida, ya que se presentan los efectos de campo cercano, como lo son directividad y saturación, que están asociados a una fuente extendida.

Los efectos de fuente extendida tienen influencia sobre las amplitudes del movimiento del suelo, y no tomarlos en cuenta lleva a una definición deficiente de la amenaza sísmica. En el caso más desfavorable, esto puede resultar en la subestimación de las demandas, mientras que en el extremo opuesto estas se pueden sobreestimar significativamente. Ninguno de estos casos es deseable cuando se requiere caracterizar la amenaza sísmica de un sitio para fines de conocer, con la mayor aproximación posible, la respuesta estructural ante el movimiento del terreno ocasionado por eventos sísmicos.

Para mejorar la representación del movimiento del suelo obtenido con las formulaciones anteriores, en esta tesis se propone una formulación donde se toman en cuenta los efectos de directividad y saturación, de manera individual y simultánea, con

el fin de representar una fuente extendida, lo que mejorará la definición de las demandas sísmicas en términos de amplitudes del movimiento del terreno.

Para la formulación propuesta en esta tesis, se toma como base la propuesta de simulación presentada por Ordaz *et al.* (1995), debido a que, al considerar un esquema de una sola etapa, una frecuencia de esquina y un registro como semilla, la cantidad de expresiones que se deben modificar es menor, por lo que, en caso de existir alguna inconsistencia en los resultados, se tiene mayor control sobre el posible origen de la misma, haciendo que su localización y corrección sea más rápida.

II.III.I. Desarrollo matemático

Al igual que Ordaz *et al.* (1995), se toma en cuenta el esquema de suma propuesto por Joyner y Boore (1986). Considerando que la fuente del evento objetivo se divide en η celdas, de la cual la j -ésima genera la señal $\kappa'_j a_s(t)$, empezando en el tiempo t_j , de la cual, su espectro de Fourier es $\kappa'_j A_s(\omega)$. El espectro del evento objetivo, $A_e(\omega)$, es:

$$A_e(\omega) = A_s(\omega) \sum_{j=1}^{\eta} \kappa'_j e^{-i\omega t_j} \quad (II.1)$$

Si los tiempos t_j 's son aleatorios, independientes e igualmente distribuidos siguiendo la PDF $p(t)$, el valor esperado de $|A_e(\omega)|^2$, $E[|A_e(\omega)|^2]$ está definido como:

$$E[|A_e(\omega)|^2] = \kappa_j'^2 |A_e(\omega)|^2 [\eta + (\eta^2 - \eta) |P(\omega)|^2] \quad (II.2)$$

donde $P(\omega)$ es la transformada de Fourier de $p(t)$. El cociente espectral de Fourier entre la señal que resulta y la señal original, $R(\omega)$, se puede aproximar como:

$$R(\omega) = \sqrt{\frac{E[|A_e(\omega)|^2]}{|A_s(\omega)|^2}} \approx \kappa'_j \sqrt{\eta + (\eta^2 - \eta) |P(\omega)|^2} \quad (II.3)$$

Por definición, $P(0) = 1$ y, entonces, $R(0) = \kappa'_j \eta$. Por otro lado, si $\omega \rightarrow \infty$, entonces $P(\omega) \rightarrow 0$. Por lo tanto, $R(\infty) = \kappa'_j \sqrt{\eta}$. Siguiendo la hipótesis que las fuentes siguen un modelo de escalamiento ω^{-2} , esto implica que la relación espectral entre el evento objetivo y el evento semilla, $H(\omega)$, debe ser:

$$H(\omega) = \frac{M_{0e}}{M_{0s}} \left[\frac{1 + (\omega/\omega_{cs})^2}{1 + (\omega/\omega_{ce})^2} \right] \quad (II.4)$$

donde ω_{cs} y ω_{ce} representan las frecuencias de esquina de los eventos semilla y objetivo, respectivamente.

Para poder ajustar la relación espectral $H(\omega)$ en las frecuencias bajas y altas con las que están dadas por $R(\omega)$, Ordaz *et al.* (1995) proponen definir η y κ como:

$$\eta = \left(\frac{M_{0e}}{M_{0s}}\right)^{4/3} \left(\frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma_s}\right)^{-4/3} \quad (\text{II.5})$$

$$\kappa = \left(\frac{M_{0e}}{M_{0s}}\right)^{-1/3} \left(\frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma_s}\right)^{4/3} \quad (\text{II.6})$$

donde M_{0e} y M_{0s} representan los momentos sísmicos de los eventos objetivo y semilla y $\Delta\sigma_e$ y $\Delta\sigma_s$ representan las caídas de esfuerzos de los eventos objetivo y semilla.

La caída de esfuerzos está relacionada a la frecuencia de esquina, a través de la expresión propuesta por Brune (1970):

$$\omega_c = 2\pi \cdot 4.9 \cdot 10^6 \beta \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0}\right)^{1/3} \quad (\text{II.7})$$

Como $R(\omega)$ depende de $P(\omega)$ para frecuencias intermedias, entonces la PDF elegida debe estar definida de manera que $H(\omega) = R(\omega)$ se cumpla para todo el rango de frecuencias. Por lo tanto, en este caso $P(\omega)$ se define como:

$$|P(\omega)| = \frac{\sqrt{1 + \alpha \left(\frac{\omega}{\omega_{ce}}\right)^2}}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{ce}}\right)^2} \quad (\text{II.8})$$

donde α está definido por:

$$\alpha = \frac{2\omega_{ce}^2}{\omega_{ce}^2 + \omega_{cs}^2} \quad (\text{II.9})$$

De acuerdo con lo planteado por Wennerberg (1990), se limita que $P(\omega)$ sea real y, por lo tanto, la PDF del retraso de los tiempos de ruptura de las celdas, $p(t)$, se define como:

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sqrt{1 + \alpha \left(\frac{\omega}{\omega_{ce}}\right)^2}}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{ce}}\right)^2} e^{i\omega t} d\omega \quad (\text{II.10})$$

Efectos de directividad

Con el objetivo de incorporar los efectos de directividad a la formulación de Ordaz *et al.* (1995), se recuperan las definiciones de η y κ propuestas por Kohrs-Sansorny *et al.* (2005), en términos del cociente de las frecuencias de esquina, N , y del cociente de las caídas de esfuerzos, C .

$$\eta = N^4 \quad (\text{II.11})$$

$$\kappa = \frac{C}{N} \quad (\text{II.12})$$

donde N y C se definen como:

$$N = \frac{\omega_{cs}}{\omega_{ce}} \quad (II.13)$$

$$C = \frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma_s} \quad (II.14)$$

Para que las expresiones (II.11) y (II.12) sean consistentes con las definidas por Ordaz *et al.* (1995), y para delimitar el esquema de suma, Kohrs-Sansorny *et al.* (2005) proponen la siguiente relación:

$$\frac{M_{0e}}{M_{0s}} = CN^3 \quad (II.15)$$

Cuando se presentan efectos de directividad en una estación, el tiempo de ruptura registrado es aparente y no el verdadero, por lo que, siguiendo la hipótesis de fuente puntual, Honoré *et al.* (2011) proponen el concepto de cociente de caída de esfuerzos aparente, C_a , el cual depende de la región (*forward* o *backward*) en la que se localiza la estación a evaluar y queda definido como:

$$C_a = \left(\frac{T_r}{T_a}\right)^3 C \quad (II.16)$$

donde T_r y T_a son los tiempos de ruptura verdadero y aparente, respectivamente.

Partiendo de las expresiones (II.15) y (II.16) se puede redefinir C_a como:

$$C_a = \frac{M_{0e}}{M_{0s}} \frac{1}{N^3} \quad (II.17)$$

Aceptando que N solo puede tomar valores enteros (Honoré *et al.* 2011), entonces se tienen dos casos de valores de N : $N_{forward}$ y $N_{backward}$, que corresponden a los efectos de directividad tipo *forward* y del tipo *backward*. Para el caso de simulaciones con efectos de directividad tipo *forward* se utiliza la función floor, definida como el truncamiento de los decimales del cociente N y únicamente tomando la parte entera, obteniendo $N_{forward}$ con la ecuación (II.18), mientras que, para el caso de simulaciones con efectos de directividad tipo *backward*, se utiliza la función ceiling, definida como el redondeo del cociente N al entero superior próximo, es decir, hace lo contrario que la función floor, obteniendo $N_{backward}$ con la ecuación (II.19).

$$N_{forward} = \text{floor}\left(\frac{\omega_{cs}}{\omega_{ce}}\right) \quad (II.18)$$

$$N_{backward} = \text{ceiling}\left(\frac{\omega_{cs}}{\omega_{ce}}\right) \quad (II.19)$$

Dado que se está modificando el valor de N , entonces se debe calcular de nuevo el valor de C con la expresión (II.17) y, con base en C y N , se calculan los valores de η y κ .

El enfoque empleado permite simular los efectos de directividad de manera simple para una estación dada, únicamente variando la duración de la función temporal de fuente aparente, sin importar que el sismo empleado como EGF no haya presentado efectos de directividad (Honoré *et al.* 2011).

Efectos de saturación

Como Ordaz *et al.* (1995) parten de la hipótesis de fuente puntual, suponen que todas las celdas se concentran en un solo punto, por lo que las celdas tienen un factor de escala, κ , uniforme. Sin embargo, para esta formulación, al considerar una fuente extendida, las celdas deben tener diferente distribución espacial y, por lo tanto, no tienen el mismo efecto sobre la señal en el sitio y se debe definir un factor de escala para cada una de las celdas, κ'_j . Esto se logra al asociar cada una de las celdas con una fuente puntual equivalente, ubicada a una distancia efectiva del sitio de observación, R_{eff} , como lo proponen Yenier *et al.* (2014).

Para obtener R_{eff} a cada celda, es necesario conocer la distancia de las celdas al sitio de observación, lo cual implica que se debe elegir una geometría para representar el plano de falla. Debido a lo anterior, se propone emplear una geometría circular (Figura II.4).

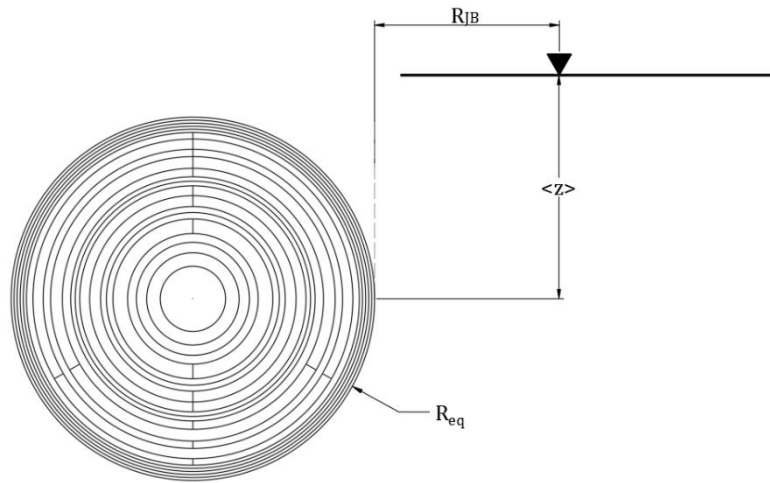


Figura II.4. Esquema de la falla, las celdas y su localización respecto al sitio de observación, donde R_{JB} es la distancia de Joyner-Boore, $< z >$ la profundidad hipocentral y R_{eq} es el radio equivalente del plano de falla.

Se eligió tomar la suposición de falla circular, en lugar de una falla rectangular, para representar la propagación de la ruptura ya que así se representa de manera más intuitiva y realista el fenómeno físico de ruptura. Como se propone que las celdas se localicen en coronas circulares concéntricas alrededor del hipocentro, se tiene que la ruptura de celdas es progresiva y se va propagando hacia afuera del hipocentro, teniendo así una representación, aunque simplista, más aproximada al mecanismo de ruptura de la falla, sin que esto implique una mayor cantidad de parámetros de entrada o que estos sean poco prácticos de determinar, además que no se aumenta el costo computacional con la implementación de la formulación.

Una vez elegida la geometría del plano de falla, es necesario determinar las dimensiones del mismo y, dado que la magnitud de un evento sísmico está relacionada con los parámetros de ruptura, como lo son el área de la falla que se desplazó y cuánto se desplazó (Wells y Coppersmith, 1994), es posible obtener relaciones empíricas relacionando estos valores.

Wells y Coppersmith (1994) desarrollaron la siguiente expresión para determinar la superficie de ruptura, A_R , en términos de M_w , partiendo de una base de datos mundial de 421 sismos históricos.

$$A_R = 10^{-3.49+0.91M_w} \text{ (en km}^2\text{)} \quad (\text{II.20})$$

Una vez determinada la superficie de ruptura, A_R , de la superficie circular, se obtiene el radio equivalente del plano de falla, R_{eq} .

$$R_{eq} = \sqrt{\frac{A_R}{\pi}} \quad (\text{II.21})$$

El único parámetro de entrada adicional que se incluye en la formulación es la distancia de Joyner-Boore (R_{JB}), que se define como la distancia de un sitio de observación al punto más cercano del plano de falla proyectado sobre la superficie (Joyner y Boore, 1981).

Para determinar la profundidad hipocentral, $< z >$, se propone usar la expresión empírica obtenida por Scherbaum *et al.* (2004) que relaciona $< z >$ con la magnitud de momento del sismo, como se muestra en la ecuación (II.22):

$$< z > = 7.08 + 0.61 \cdot M_w \quad (\text{II.22})$$

El conjunto de sismos empleados para obtener la expresión anterior contiene los empleados por Wells y Coppersmith (1994) (Scherbaum *et al.*, 2004), por lo que las expresiones para determinar el tamaño de la fuente y la profundidad hipocentral son consistentes.

Con base en los parámetros anteriores, se conocen las dimensiones y ubicación del plano de falla respecto al sitio. Sin embargo, es necesario conocer la distancia del sitio a cada una de las celdas. Por lo tanto, a continuación, se describe cómo obtener esta distancia con base en la distribución geométrica propuesta de las celdas.

Se propone que las celdas tienen la misma área y se distribuyen como segmentos de coronas circulares concéntricas (Figura II.5). Adicionalmente, cada corona circular representa un instante de tiempo k donde rompe un número N_{cel_k} de celdas, el cual se determina a partir de la PDF de retraso de los tiempos de ruptura propuesta por Ordaz *et al.* (1995). Lo anterior, implica que el ancho de la corona circular dependerá del número de celdas que rompe en ese instante, N_{cel_k} .

Considerando que el tiempo de ruptura es T_d y la EGF tiene un paso de tiempo dt , se debe cumplir la expresión (II.23).

$$\eta = \sum_{k=1}^{T_d/dt} N_{cel_k} \quad (II.23)$$

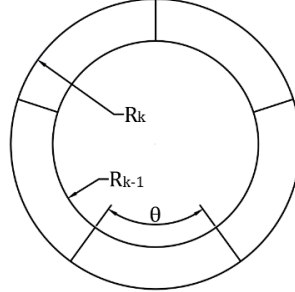


Figura II.5. Corona circular para el instante de tiempo k rompiendo 5 celdas ($N_{cel_k} = 5$), donde R_k y R_{k-1} son los radios exterior e interior de la corona y θ el ángulo central de un segmento de corona.

Con base en N_{cel_k} , se determina el radio exterior de la corona circular en el instante k , R_k , con la ecuación (II.24).

$$R_k = \sqrt{R_{k-1}^2 + \frac{1}{\pi} A_{cel} N_{cel_k}} \quad (II.24)$$

donde R_{k-1} representa el radio interior de la corona circular para el instante de tiempo k y A_{cel} es el área de cada celda (para el primer instante de tiempo, $k = 1$ y el radio interior $R_{k-1} = 0$).

Como se propone que todas las celdas tienen la misma área, entonces el área de cada celda, A_{cel} , es:

$$A_{cel} = \frac{A_R}{\eta} \quad (II.25)$$

Por otro lado, θ es el ángulo central de cada segmento de corona circular en el instante de tiempo k , y se define como:

$$\theta = \frac{360^\circ}{N_{cel_k}} \quad (II.26)$$

Como se parte de la hipótesis de que las celdas se ubican en puntos distintos, es necesario determinar su localización espacial y así calcular la menor distancia al sitio de observación.

Para determinar la distancia mínima del sitio a las celdas, se obtiene la distancia a cada uno de sus cuatro vértices, obteniendo $d_{l_{k1}}$, $d_{l_{k2}}$, $d_{l_{k3}}$ y $d_{l_{k4}}$, donde cada vértice se enumera según se muestra en la Figura II.6.

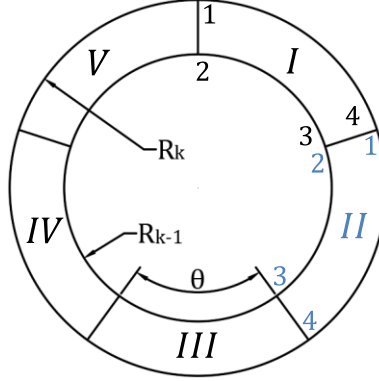


Figura II.6. Distribución propuesta de los segmentos de una corona circular y enumeración de los vértices de algunos segmentos, para el instante de tiempo k donde rompieron 5 celdas ($N_{cel_k} = 5$).

Las distancias $d_{l_{k_1}}$, $d_{l_{k_2}}$, $d_{l_{k_3}}$ y $d_{l_{k_4}}$ están definidas de la ecuación (II.27) a la (II.30).

$$d_{l_{k_1}} = \begin{cases} \sqrt{(R_{JB} + R_{eq})^2 + (< z > - R_k)^2}, & l_k = 1 \\ d_{l_{k-1_4}}, & l_k \geq 2 \end{cases} \quad (II.27)$$

$$d_{l_{k_2}} = \begin{cases} \sqrt{(R_{JB} + R_{eq})^2 + (< z > - R_{k-1})^2}, & l_k = 1 \\ d_{l_{k-1_3}}, & l_k \geq 2 \end{cases} \quad (II.28)$$

$$d_{l_{k_3}} = \sqrt{[R_{JB} + R_{eq} + R_{k-1} \cos(l_k \cdot \theta - 90^\circ)]^2 + [< z > + R_{k-1} \sin(l_k \cdot \theta - 90^\circ)]^2} \quad (II.29)$$

$$d_{l_{k_4}} = \sqrt{[R_{JB} + R_{eq} + R_k \cos(l_k \cdot \theta - 90^\circ)]^2 + [< z > + R_k \sin(l_k \cdot \theta - 90^\circ)]^2} \quad (II.30)$$

donde $l_k = I, II, \dots, N_{cel_k} - 1, N_{cel_k}$ y representa el número del segmento que está siendo analizado.

Por lo tanto, para determinar la distancia mínima a la celda j que rompió en el instante k , D_{Mj} , se emplea la expresión:

$$D_{Mj} = \min(d_{l_{k_1}}, d_{l_{k_2}}, d_{l_{k_3}}, d_{l_{k_4}}) \quad (II.31)$$

donde $j_k = j_{k-1} + l_k$.

Partiendo de la expresión propuesta por Yenier *et al.* (2014), y proponiendo que la medida de distancia, D , sea la distancia mínima de la celda j al sitio, D_{Mj} , entonces la distancia efectiva, R_{eff} , de la fuente puntual equivalente asociada a cada celda al sitio está definida como:

$$R_{eff} = \sqrt{D_{Mj}^2 + h^2} \quad (II.32)$$

donde h es el término de pseudo-profundidad, también conocido como factor de fuente finita, y queda definido en función de la magnitud del evento a través de la relación empírica propuesta por Yenier *et al.* (2014).

$$h = 10^{-1.72+0.43M_w} \quad (\text{II.33})$$

La expresión anterior es válida únicamente para magnitudes mayores o iguales a 6.

Finalmente, se propone definir el factor de escala para la j -ésima celda, κ'_j , como el producto del factor de escala uniforme, κ , por el cociente de la distancia mínima de la celda j al sitio, D_{Mj} , y la distancia efectiva al sitio, R_{eff} , como se presenta en (II.34).

$$\kappa'_j = \frac{D_{Mj}}{R_{\text{eff}}} \cdot \kappa \quad (\text{II.34})$$

II.III.II. Consideraciones para aplicar la formulación

II.III.III.I. Consideraciones para los efectos de directividad

Previo a la ocurrencia de un sismo no se tiene certeza del mecanismo focal y, en caso de presentarse directividad de la fuente, no se sabrá cuál será la dirección predominante, implicando que, para cualquier estación dada, durante un sismo con directividad se pueden presentar 3 casos: que la estación presente efectos de directividad *forward*, directividad *backward* o que sea neutra. Las formulaciones actuales empleadas para la generación de registros sísmicos sintéticos que utilizan esquemas de suma estocástica con EGF, no consideran la presencia de este efecto, *i.e.*, consideran el caso neutro, causando posibles subestimaciones de la demanda sísmica en el sitio en el caso de ser *forward* o sobreestimaciones en caso de ser *backward*.

Es importante proponer nuevas formulaciones que modelen de manera más adecuada la demanda sísmica. Sin embargo, dependiendo hacia dónde se oriente el uso de los registros sintéticos obtenidos, debe ser el caso de directividad que se debe emplear. En el caso de que se empleen los registros sísmicos para fines de diseño, siempre se debe de tener en cuenta que se esté considerando el caso más desfavorable, esto quiere decir, que cuando se está considerando que si un sitio está en la región con directividad de fuente *backward* las amplitudes (aceleraciones, velocidades o desplazamientos) serán menores que si el sitio estuviera en una región neutra o con directividad *forward*. Por otro lado, si se desea emplear los registros para evaluar la amenaza sísmica de un sitio, será necesario considerar los tres casos posibles de directividad (*forward*, *backward* y región neutra). Adicionalmente, no se debe subestimar la directividad de tipo *backward*, ya que se tienen mayores duraciones, lo que puede someter a las estructuras a un mayor número de ciclos de carga y descarga, lo cual, dependiendo de las características estructurales, puede tener consecuencias negativas en términos de daño global y local.

En la formulación propuesta se requiere de mayor rigor al estimar los valores de caída de esfuerzos, pues una vez que se incluye C_a , se está modificando de manera indirecta la caída de esfuerzos del sismo objetivo. Esto contrasta con formulaciones anteriores, en donde se tenía mayor flexibilidad para definir los valores de la caída de esfuerzos, llevándose a cabo ajustes a los valores para que los registros obtenidos sintéticamente

se ajustaran a las amplitudes esperadas. En esta formulación esto tiene menor viabilidad, ya que de realizarse esto se estaría anulando/invalidando el efecto de directividad en los registros sísmicos generados, esto quiere decir que, para un sismo objetivo dado, con su respectiva semilla, se deben de emplear los mismos parámetros sísmicos en todas las estaciones y la única variable debe ser C_a . Por lo tanto, se debe plantear una manera en la que se determinen de mejor manera los valores de caída de esfuerzos para que estos permanezcan constantes al llevar a cabo simulaciones en distintas estaciones.

También es importante mencionar que en la formulación matemática las frecuencias de esquina usadas no se modifican, porque a pesar de que en cada estación se presentan frecuencias de esquina aparentes, se está considerando la frecuencia de esquina (en la fuente) que define el evento simulado y no la de cada estación. Esto es posible gracias al cociente C_a , el cual ya considera el efecto de directividad que genera que se presenten frecuencias de esquina aparentes.

II.III.II.II. Consideraciones para los efectos de saturación

Como se discutió anteriormente, el único parámetro adicional presentado en esta formulación es R_{JB} y, aunque el concepto es relativamente simple de comprender (la distancia entre el sitio de estudio y el punto más cercano del plano de falla proyectado sobre la superficie), definir R_{JB} para un sismo hipotético no es un procedimiento directo debido a la incertidumbre asociada a la definición de los planos de falla.

Por lo anterior, existen diversas posibilidades para obtener R_{JB} con fines de simulación sísmica, ya sea calcular la distancia epicentral al sismo objetivo, R_{EPI} , en caso de ser un sismo que ya se registró, y si es un sismo hipotético se debe suponer la ubicación del epicentro; posteriormente, determinar las dimensiones de la falla del sismo objetivo por medio de las expresiones empíricas propuestas por Wells y Coppersmith (1994), ya sea suponiendo una geometría rectangular o circular y restar dichas dimensiones a R_{EPI} . Una desventaja de emplear la suposición de plano de falla rectangular es que se debe suponer la orientación del plano y su ángulo de inclinación respecto a la horizontal para poder hacer una proyección aproximada en la superficie, lo cual implica mayor incertidumbre, además de que las ecuaciones presentadas en esta formulación dejan de ser válidas para dicha geometría y se pierde la simplicidad para fines de aplicación de ingeniería sísmica. Por otro lado, si se conocen a detalle las características de una fuente sísmica, como lo podría ser una brecha, se puede hacer una estimación de la geometría de la ruptura y con base en ella, calcular la R_{JB} .

Al existir diferentes casos que se pueden elegir, se aumenta la incertidumbre asociada a los procesos de simulación, por lo que una alternativa útil es realizar simulaciones para diferentes valores de R_{JB} para abarcar diferentes escenarios, como lo realizado por Sedaghati (2018).

La elección del método para determinar la R_{JB} dependerá de diversos factores como lo son los objetivos y alcances del estudio y la información disponible de las fuentes sísmicas.

III. Caso de estudio

Para la aplicación de la formulación propuesta, se desarrolla un caso de estudio, para el cual se llevan a cabo procesos de simulación sísmica para un sismo hipotético M_w 8.2 en la brecha de Guerrero en 2 sitios, uno en la Ciudad de México y otro en un sitio cercano a la fuente en el estado de Guerrero.

III.I. Criterios considerados para las simulaciones

A continuación, se presentan algunos criterios que se deben considerar para la generación de registros sísmicos sintéticos para sitios cercanos a la fuente.

III.I.I. Características del sismo de interés

Para fines del caso de estudio, el sismo de interés será un sismo de subducción interplaca (de profundidad somera) en la zona de convergencia de las placas de Cocos y la placa norteamericana.

Los sismos interplaca son de particular interés ya que, como se discutió anteriormente, están asociados con mayores longitudes de ruptura y se cuenta con estudios (*e.g.*, Kanamori *et al.*, 1993; Singh, S. *et al.*, 2018) que esperan la ocurrencia de un sismo M_w 8.2 en la brecha de Guerrero en un futuro cercano. Un sismo de tal magnitud implica una liberación de energía tal que la hipótesis de fuente puntual se vuelve poco acertada y se requiera la modelación de la falla como una fuente extendida. Por ejemplo, la distancia entre Ciudad de México y la costa de Guerrero es aproximadamente 300 km. Suponiendo que ocurre el escenario de un sismo M_w 8.2 en la brecha de Guerrero, con una longitud de ruptura de alrededor de 230 km, la suposición de fuente puntual no es estrictamente válida (Arroyo *et al.*, 2022). Por lo tanto, se deben considerar los efectos de saturación y directividad, *i.e.*, efectos de campo cercano (*near-field*).

III.I.II. Características de los sitios de estudio

Como el objetivo de este trabajo es la obtención de registros sintéticos para sitios cercanos a las fuentes sísmicas, es necesario determinar cuál es el radio de influencia de los efectos de saturación y directividad para analizar sitios que pueden presentar dichos efectos.

Partiendo de las ecuaciones II.31 y II.32, se construyeron curvas donde se expresa el cociente de la distancia mínima a la celda y la distancia efectiva, para diferentes magnitudes (Figura III.1). Se puede apreciar claramente cómo el radio de influencia de los efectos de saturación aumenta a medida que aumenta la magnitud del evento. Del mismo modo, para una misma magnitud, a medida que disminuye la distancia del sitio de observación a la fuente aumenta la influencia de los efectos de saturación, *i.e.*, disminuye el valor del factor, lo cual es consistente con el comportamiento esperado.

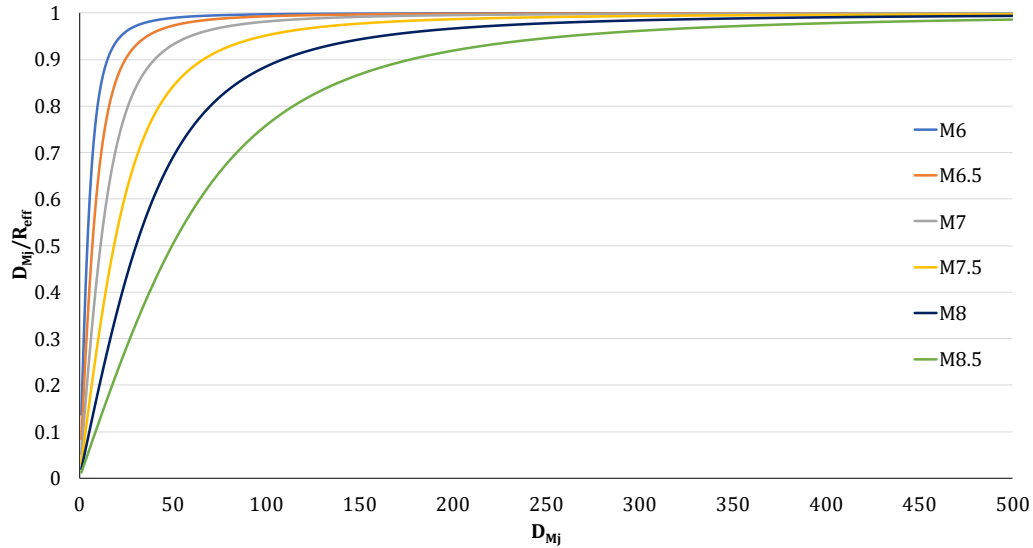


Figura III.1. Influencia de los efectos de saturación para diversas magnitudes en función de las distancias mínimas a las celdas.

Debido a lo anterior, la distancia entre los sitios de interés y el punto más cercano a la fuente deberá ser menor o igual a 350 km, ya que, de acuerdo con la Figura III.1, para magnitudes menores a M_w 8.5 los efectos de saturación para distancias mayores son prácticamente despreciables y la suposición de fuente puntual es suficiente.

Con base en lo anterior, se eligieron dos sitios: SCT y COYC, las cuales son estaciones de la RAIL. La estación SCT está localizada en la Ciudad de México y COYC está localizada en el municipio de Coyuca de Benítez, en el estado de Guerrero. La estación SCT se eligió debido a que durante el sismo M_w 8.1 del 19 de septiembre de 1985 registró las mayores aceleraciones en Ciudad de México, mientras que la estación COYC se eligió por su cercanía con la brecha de Guerrero y la disponibilidad de los registros para los sismos empleados como EGF.

III.I.III. Elección de sismos como EGF

En formulaciones previas (*e.g.*, Ordaz *et al.*, 1995; Niño *et al.*, 2018), la elección de un registro sísmico como EGF tiene mayor flexibilidad debido a que toman en cuenta la suposición de fuente puntual y únicamente consideran efectos de campo lejano (*far-field*). Un ejemplo de ello es que las formulaciones anteriores para simular el evento M_w 8.1 del 19 de septiembre de 1985, para estaciones localizadas dentro de la Ciudad de México, se emplea el sismo M_w 6.9 del 25 de abril de 1989 como semilla; la distancia entre los epicentros de dichos eventos es de 384 km. Sin embargo, como se muestra en la Figura III.2, las distancias epicentrales a la estación SCT son de 366 km y 288 km, respectivamente y, a pesar de ser una diferencia de casi 80 km, los resultados obtenidos son muy similares a los del sismo registrado.



Figura III.2. Localización de la estación SCT y de los epicentros de los sismos semilla y objetivo empleados para las simulaciones.

Sin embargo, como el objetivo de este trabajo es la generación de registros sísmicos sintéticos para sitios cercanos a la fuente, la elección de los sismos como EGF tiene mayor importancia, particularmente en términos de la distancia epicentral al sitio de estudio para los sismos objetivo y semilla, por lo que el criterio empleado anteriormente no resulta viable. Por lo tanto, los sismos semilla se eligieron con base en los siguientes criterios: (1) el sismo semilla y el sismo objetivo deben tener el mismo mecanismo focal, (2) deben tener profundidades hipocentrales similares, (3) las distancias epicentrales a las estaciones de interés, dentro de lo posible, deben ser casi iguales y (4) los eventos se deben generar en la misma fuente sísmica. En la Figura III.3, se muestran las fuentes sísmicas en México que son de interés para los sismos interplaca.



Figura III.3. Fuentes sísmicas en México para sismos interplaca (modificada de CFE, 2015).

Luego de consultar el catálogo de datos de sismos históricos del SSN (2023), se hizo una lista preliminar de posibles sismos semilla. Posterior a ello, se confirmó que dichos

sismos estuvieran registrados en las estaciones de interés. Adicionalmente, se calcularon los parámetros de interés de los eventos, como el momento sísmico (ecuación I.4), la frecuencia de esquina (ecuación I.7), la caída de esfuerzos y la distancia de Joyner-Boore (en el caso de las formulaciones que consideran efectos de saturación).

III.I.IV. Definición de la distancia de Joyner-Boore para los eventos simulados

Según lo discutido anteriormente, para definir la distancia de Joyner-Boore, R_{JB} , para sismos simulados existen diversos métodos. Sin embargo, para fines de esta tesis, R_{JB} se calcula como la diferencia entre la distancia epicentral al sismo objetivo, R_{EPI} , y el radio equivalente que representa el área de ruptura suponiendo una falla circular, R_{eq} , obtenido a partir de la ecuación (II.21).

$$R_{JB} = R_{EPI} - R_{eq} \quad (III.1)$$

En la situación de que se presente un caso donde la estación se localice sobre la proyección de la superficie del plano de falla del evento, en otras palabras, que la distancia epicentral al sitio de estudio es menor que el radio equivalente del plano de falla; se propone considerar R_{JB} igual a 0 km.

III.II. Simulación para sismo hipotético

De acuerdo con lo discutido anteriormente, un sismo M_w 8.2 en la brecha de Guerrero es un escenario plausible (Cruz-Atienza *et al.*, 2018) y dado que durante el sismo M_w 8.1 del 19 de septiembre de 1985, con epicentro en Michoacán, se registraron daños sin precedentes en la Ciudad de México, es de particular interés llevar a cabo simulaciones para estimar las amplitudes del movimiento del suelo que se presentarían durante el evento hipotético.

El criterio para elegir los sismos semilla fue que tuvieran M_w mayor o igual a 6.5 y que su epicentro se haya registrado en la extensión aproximada de la brecha de Guerrero, como se muestra en la Figura III.4. Partiendo del Catálogo de Sismos del SSN (SSN, 2023), se eligieron tres sismos como EGF, el M_w 6.9 del 25 de abril de 1989, el M_w 6.5 del 08 de mayo de 2014 y el M_w 7.0 del 08 de septiembre de 2021.



Figura III.4. Localización estaciones empleadas para las simulaciones, de la brecha de Guerrero y de los epicentros de los sismos usados como EGF.

En la Tabla III.1 se presentan los parámetros sísmicos de los eventos semilla y objetivo. Los valores de M_w fueron obtenidos del catálogo de sismos del SSN (SSN, 2023), M_0 se obtuvo empleando la ecuación (I.4), $\Delta\sigma$ fue obtenida a través del análisis de algunas de las señales de cada evento y f_c se obtuvo con la ecuación (I.7).

Tabla III.1. Resumen de los parámetros sísmicos de los eventos semilla y objetivo.

Evento	Fecha	M_w	M_0 (dyn-cm)	$\Delta\sigma$ (bar)	f_c (Hz)
Semilla	25/04/89	6.9	2.40E+26	150	0.19
Semilla	08/05/14	6.5	6.22E+25	90	0.26
Semilla	08/09/21	7.0	3.60E+26	186	0.18
Objetivo	Hipotético	8.2	2.50E+28	150	0.04

En el caso del sismo hipotético, se tomaron como referencia los valores de caída de esfuerzos y momento sísmico que consideraron Ordaz *et al.* (1995) para llevar a cabo sus respectivas simulaciones.

Empleando las ecuaciones II.20 y II.21, en términos de M_w del sismo, se determinan las dimensiones del plano de falla para el sismo propuesto, como se presenta en la Tabla III.2.

Tabla III.2. Dimensiones del plano de falla.

Evento	M_w	A_R (km ²)	R_{eq} (km)
Objetivo			
Hipotético	8.2	9,376	54.6

Para este evento se simularon registros sintéticos para las estaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), localizada en la Ciudad de México, y Coyuca (COYC), en el estado de Guerrero, como se muestra en la Figura III.4.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las simulaciones llevadas a cabo en cada estación; primero para las tres EGF's elegidas empleando la formulación propuesta por Ordaz, con el fin de comparar cada una de las EGF, principalmente en términos de amplitudes y contenido de frecuencias. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos empleando la formulación propuesta, donde se consideran, de manera independiente y simultánea, los efectos de directividad y saturación.

III.II.I. Estación SCT

La estación SCT se emplea como referencia para llevar a cabo simulaciones en la Ciudad de México, debido a que durante el sismo M_w 8.1 del 19 de septiembre de 1985 registró las mayores aceleraciones en todo el Valle de México (Ordaz *et al.*, 1995).

En la Figura III.5, se comparan los resultados obtenidos a partir de procesos de simulación para 3 EGF diferentes: el sismo M_w 6.9 del 25/04/89, el sismo M_w 6.5 del 08/05/14 y el sismo M_w 7.0 del 08/09/21, con distancias epicentrales de 288 km, 326 km y 304 km, respectivamente; con los espectros registrados durante el sismo M_w 8.1 del 19/09/85. Se puede observar cómo, a pesar de tener distancias epicentrales similares, las amplitudes espectrales varían considerablemente (Figura III.5a). Esto puede deberse a que algunos registros presentaron efectos de directividad, generando la diferencia de amplitudes. Por otro lado, la pseudoaceleración máxima se presenta en periodos de alrededor de 2 segundos, mientras que para el espectro promedio obtenido usando el sismo del 08/05/14 como EGF, la pseudoaceleración máxima es para un periodo de alrededor de 1.5 segundos. Lo anterior se debe a la variación del contenido de frecuencias de cada sismo (Figura III.5b).

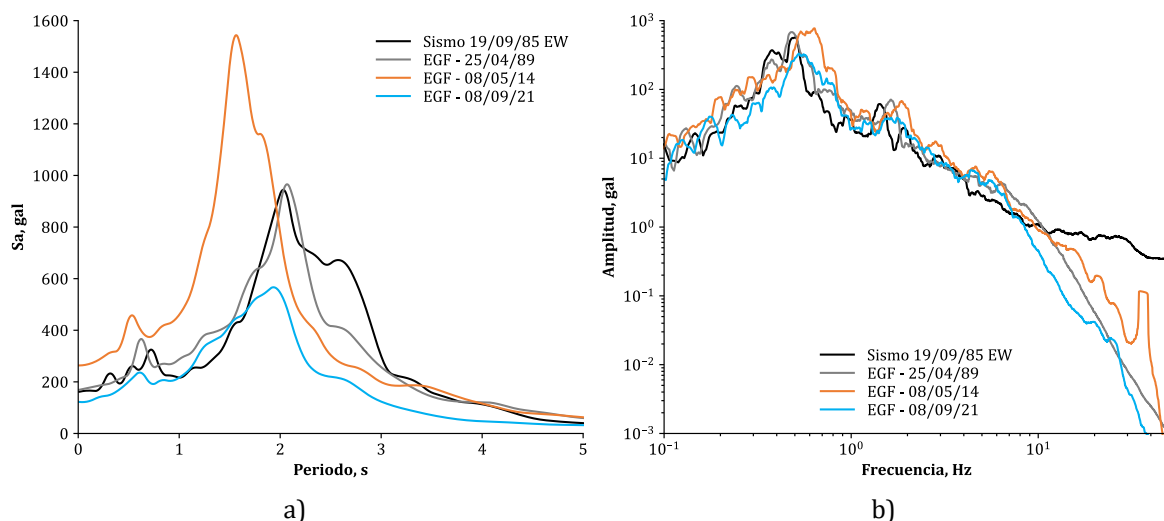


Figura III.5. a) Espectros de respuesta elástica y b) espectros de Fourier promedio de 1000 simulaciones, empleando la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995), en la estación SCT para el sismo hipotético M_w 8.2 empleando diferentes sismos como EGF.

Una vez analizados los resultados para el promedio de las simulaciones con cada EGF, así como sus características, se incluyen los efectos de directividad y saturación en las

simulaciones. Suponiendo que la distancia epicentral al sismo hipotético M_w 8.2 es de aproximadamente 300 km, y partiendo del R_{eq} obtenido empleando la expresión (III.1), R_{JB} tiene un valor aproximado de 245 km.

En la Figura III.6, Figura III.7 y Figura III.8, se presentan algunos registros sintéticos obtenidos con las simulaciones para la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de directividad y saturación, para los casos *backward* y *forward*. Para los acelerogramas mostrados en la Figura III.6 se empleó el sismo del 25/04/89 como EGF, para los mostrados en la Figura III.7 el sismo del 08/05/14 y para los mostrados en la Figura III.8 el sismo del 08/09/21. Consistente con lo observado en la Figura III.5a y la Figura III.5b, al emplear la EGF del 08/05/14 se obtienen las mayores PGA's, mientras que las menores se presentan para la EGF del 08/09/21, esto indica que la semilla registró efectos de directividad *backward*.

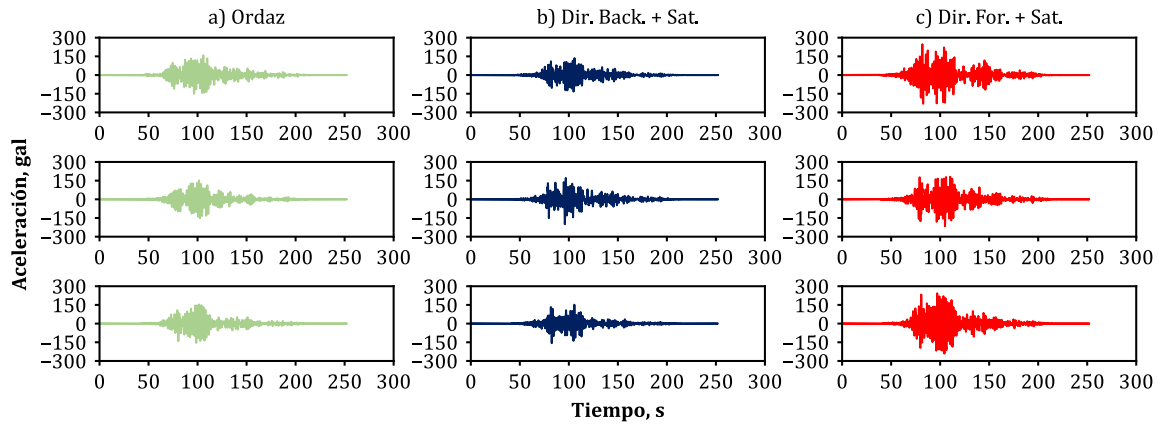


Figura III.6. Acelerogramas sintéticos obtenidos para las formulaciones de a) Ordaz *et al.* (1995), b) Directividad *backward* y saturación y c) Directividad *forward* y saturación empleando como EGF el sismo del 25/04/89.

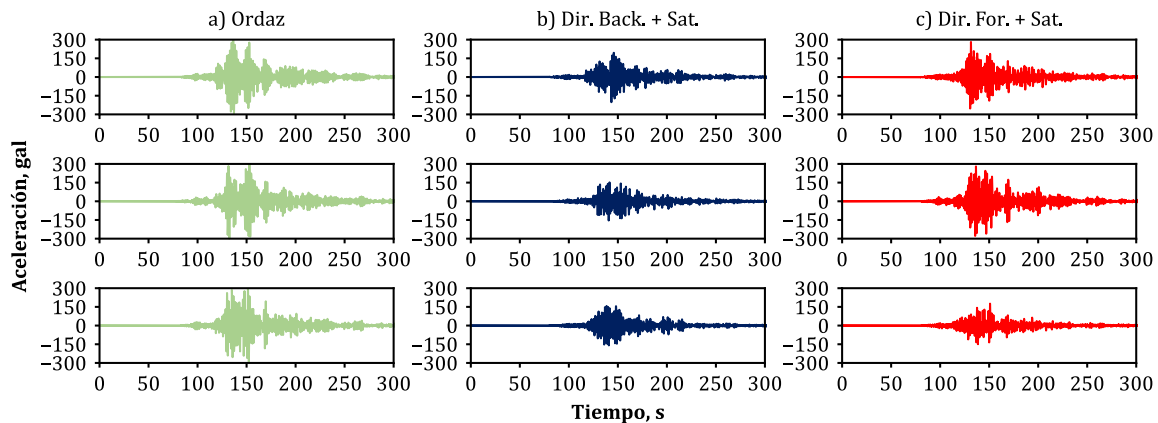


Figura III.7. Acelerogramas sintéticos obtenidos para las formulaciones de a) Ordaz *et al.* (1995), b) Directividad *backward* y saturación y c) Directividad *forward* y saturación empleando como EGF el sismo del 08/05/14.

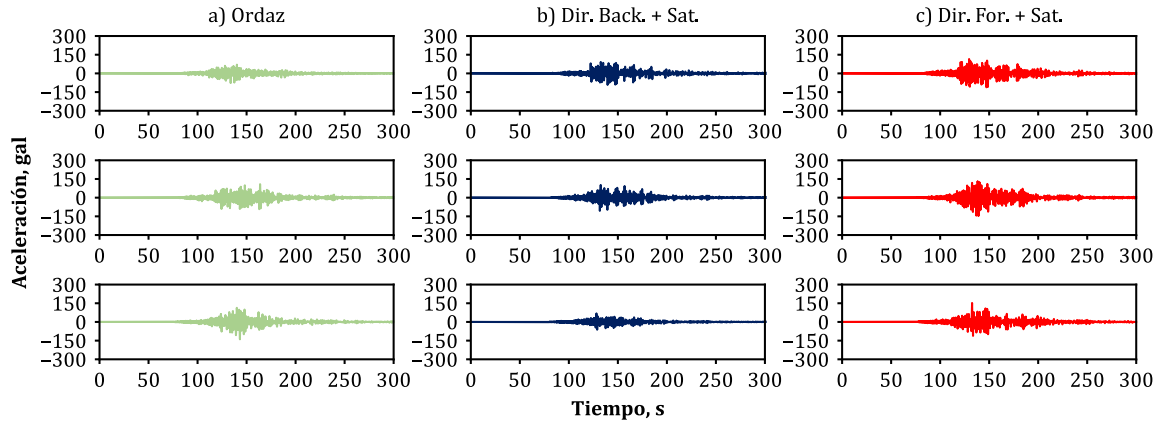


Figura III.8. Acelerogramas sintéticos obtenidos para las formulaciones de a) Ordaz *et al.* (1995), b) Directividad *backward* y saturación y c) Directividad *forward* y saturación empleando como EGF el sismo del 08/09/21.

Para ilustrar el proceso de ruptura propuesto para el plano de falla circular, en la Figura III.9 se presenta el número de celdas rotas en cada instante de tiempo (Figura III.9a), la evolución del radio del plano de falla en el tiempo (Figura III.9b), así como el tamaño del plano de falla en diferentes instantes de tiempo (Figura III.9c) para dos simulaciones donde se consideraron los efectos de saturación y directividad simultáneamente; en la Figura III.9 con directividad *backward* y en la Figura III.9 con directividad *forward*. Como se planteó en la formulación, la ruptura de las celdas en el tiempo está dada por la PDF. En la Figura III.9a se observa que la ruptura de celdas se concentra en la mitad del tiempo de ruptura. De manera similar, en la Figura III.9b, el radio del plano de falla va aumentando a medida que van rompiendo las celdas, por lo que al principio el radio va creciendo de manera paulatina, luego entre los 15 y 25 segundos incrementa de manera súbita y en los últimos segundos el incremento es pequeño, como si fuera un comportamiento asintótico. Por último, en la Figura III.9c se presenta el tamaño del plano de falla, así como la distribución de las coronas circulares para ocho instantes de tiempo (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 segundos). El color de la circunferencia exterior de la corona circular depende del número de celdas que rompieron en ese instante; si rompió 1 es azul, 2 es roja, 3 es amarilla, 4 es cian, 5 es magenta, 6 es verde y para 7 o más es negra. Se puede observar que, según van rompiendo las celdas, los radios exteriores de las coronas van disminuyendo debido a que todas las celdas tienen la misma área. Por este motivo, para las primeras coronas circulares se observa la separación entre estas, mientras que para las últimas coronas no se logra apreciar la separación entre estas.

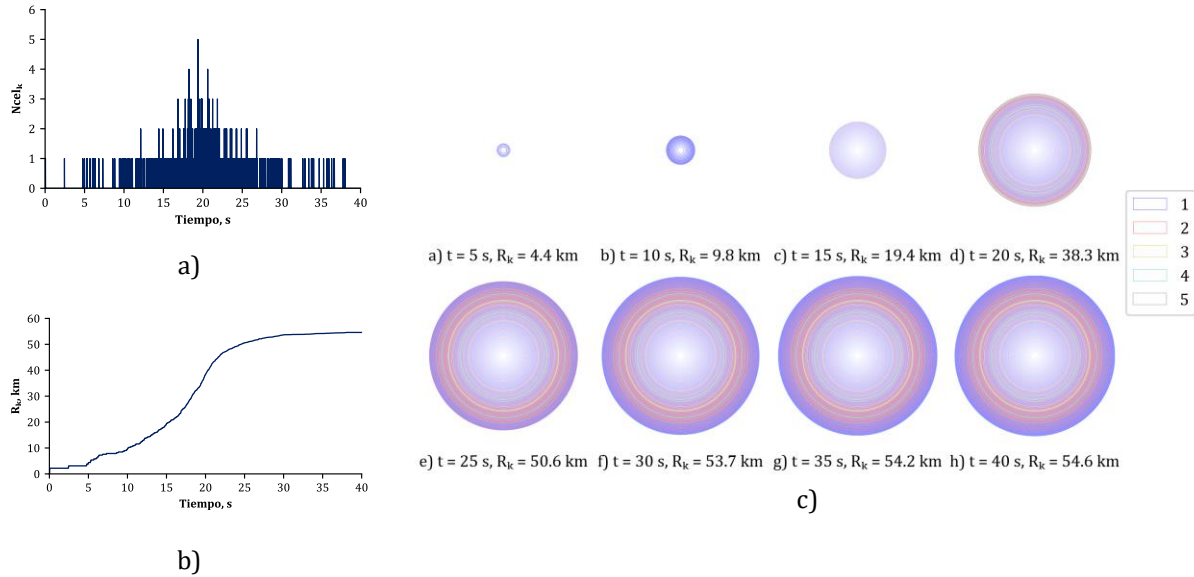


Figura III.9. Diagramas para representar el proceso de ruptura del plano de falla para un registro sintético obtenido considerando directividad *backward* y saturación: a) ruptura de las celdas en el tiempo, b) evolución del radio del plano en el tiempo y c) tamaño del plano de falla y distribución de las coronas circulares en ocho instantes del tiempo de ruptura.

Como se observa en la Figura III.10, al incluir los efectos de directividad en las simulaciones, las demandas aumentan en términos de pseudo aceleraciones en el caso de directividad *forward*, mientras que disminuyen en el caso de directividad *backward*, cuando se comparan respecto al caso neutro, es decir, empleando la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995). Adicionalmente, al incluir los efectos de saturación, se observa una ligera disminución en las amplitudes espectrales promedio para las tres EGF empleadas (Figura III.10a, b y c). Eso implica que, a pesar de ser un evento de gran magnitud, los efectos de saturación no influyen significativamente. Como se esperaba, en términos de amplitudes, el caso más desfavorable es cuando se considera directividad *forward*. En el caso de los espectros de Fourier, se observan claramente las variaciones en términos de amplitudes mas no en el contenido de frecuencias.

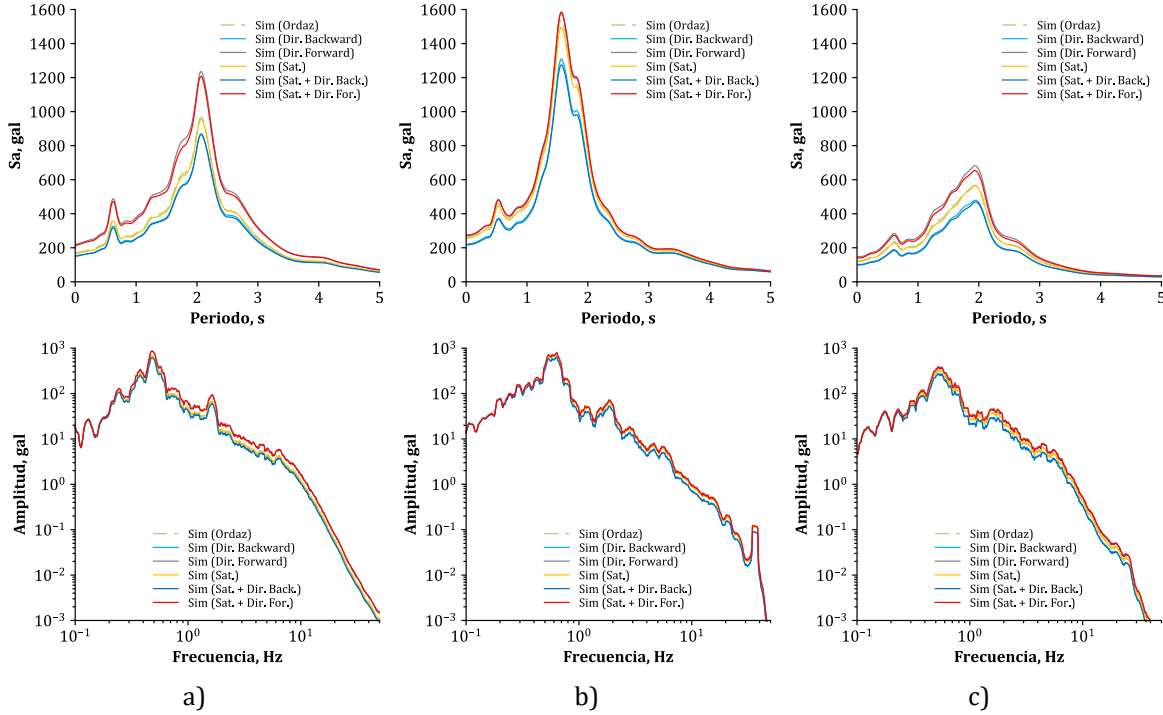


Figura III.10. Espectros de respuesta elástica y de Fourier promedio de 1000 simulaciones en la estación SCT, para las EGF: a) 25/04/89 b) 08/05/14 y c) 08/09/21.

III.II.II. Estación COYC

La estación Coyoaca (COYC) se emplea para llevar a cabo simulaciones para un sitio cercano a la fuente; se eligió dicha estación debido a que se encuentra en la zona que abarca la brecha de Guerrero y, por lo tanto, los efectos de saturación tendrán mayor impacto en las amplitudes del movimiento del suelo.

En la Figura III.11a, se presentan el espectro de respuesta durante el sismo M_w 8.1 del 19/09/85 y los espectros de respuesta promedio de las simulaciones empleando la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995), para los 3 sismos usados como EGF para la estación COYC (25/04/89, 08/05/14 y 08/09/21); las distancias epicentrales a los sismos son de 90 km, 88 km y 31 km, respectivamente. Como se mencionó anteriormente, se presentan primero los resultados obtenidos con la formulación de Ordaz con el fin de comparar cada una de las EGF, principalmente en términos de amplitudes y contenido de frecuencias.

En este caso se puede observar que, a pesar de que la R_{EPI} al sismo del 08/05/14 es 88 km y la R_{EPI} al sismo del 08/09/21 de 31 km, los espectros de respuesta promedio presentan amplitudes similares. Esto se atribuye a la presencia de efectos de directividad *forward* en el registro del sismo del 08/05/14, lo cual es consistente con lo encontrado por Singh *et al.* (2019). Más aún, el R_{EPI} al sismo del 25/04/89 es 90 km, es decir, casi igual que la distancia del sismo del 08/05/14. Sin embargo, existe una diferencia significativa en las amplitudes, lo cual confirma la hipótesis de la presencia de efectos de directividad en el registro empleado como EGF.

En la Figura III.11b, se presentan los espectros de Fourier promedio obtenidos considerando la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995), así como el espectro registrado durante el sismo M_w 8.1 del 19/09/85. En términos del contenido de frecuencias, se obtienen amplitudes similares al usar los sismos del 08/05/14 y del 08/09/21, mientras que al usar el sismo del 25/04/89 se tienen amplitudes significativamente menores, lo cual es consistente con lo observado en el espectro de respuesta elástica (Figura III.11a).

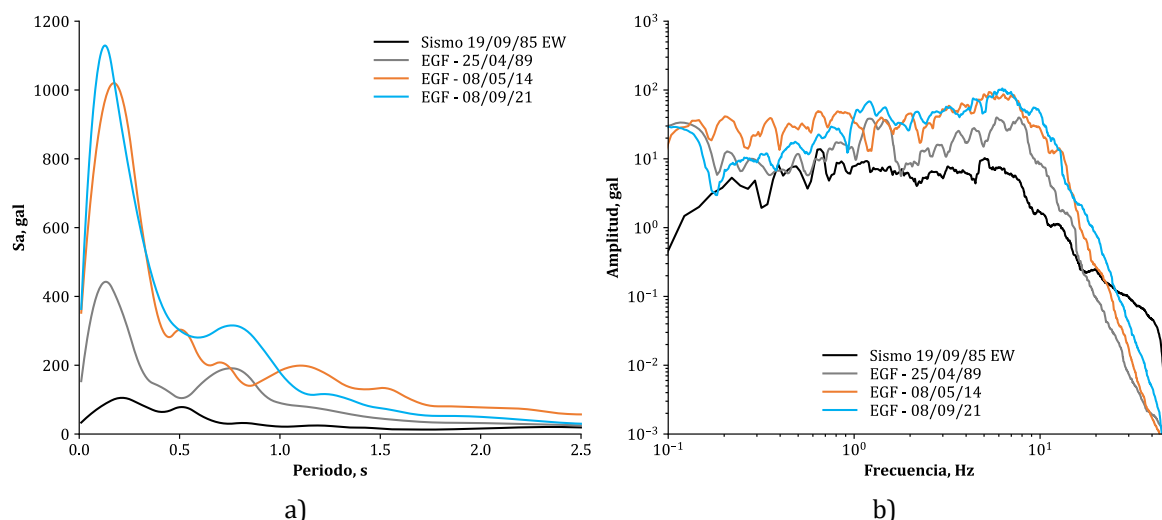


Figura III.11. a) Espectros de respuesta elástica y b) espectros de Fourier promedio de 1000 simulaciones, empleando la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995), en la estación COYC para el sismo hipotético M_w 8.2 empleando diferentes sismos como EGF.

Se resalta la importancia de elegir adecuadamente la EGF para sitios cercanos a la fuente. Aunque para la estación SCT el sismo M_w 6.9 del 25 de abril de 1989 sirve para simular el sismo M_w 8.1, para la estación COYC no es de utilidad ya que las distancias epicentrales de la semilla y el sismo objetivo son significativas. Adicionalmente, aunque este sismo también es empleado como EGF para simular el sismo hipotético M_w 8.2, el cual es aplicable para sitios en la Ciudad de México, no necesariamente es aplicable para sitios cercanos a la fuente sísmica, lo cual resalta la importancia de contar con catálogos más amplios.

Para los sismos del 25 de abril de 1989, 08 de mayo de 2014 y 08 de septiembre de 2021 se exceden de manera significativa las ordenadas espectrales con respecto al sismo del 19 de septiembre de 1985. Esto se debe a las distancias epicentrales que se tienen respecto a la estación estudiada. Adicionalmente, al realizar simulaciones con la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995) se sigue suponiendo una fuente puntual, por lo que el ignorar los efectos de saturación contribuye a la sobrestimación de las amplitudes.

Una vez analizados los resultados obtenidos con la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995) para cada EGF, se incluyen los efectos de directividad y saturación. Al ser un sitio comprendido en la brecha de Guerrero, este se localiza en la proyección de la

superficie de ruptura para el sismo hipotético. Por lo tanto, como se discutió anteriormente, se considerará una R_{JB} de 0 km.

En la Figura III.12, Figura III.13 y Figura III.14, se presentan algunos acelerogramas sintéticos obtenidos con las simulaciones nuevamente para la formulación propuesta por Ordaz et al. (1995) y, además, considerando efectos de directividad y saturación para los casos *backward* y *forward*. Para los acelerogramas de la Figura III.12 se empleó el sismo del 25/04/89 como EGF, para los de la Figura III.13 el sismo del 08/05/14 y para los de la Figura III.14 el sismo del 08/09/21. En este caso, los acelerogramas que presentan las mayores PGA's son los obtenidos con la EGF del 08/09/21. Aunque la duración de los registros sintéticos para el evento del 25/04/89 (Figura III.12) es menor que las de los otros sismos (Figura III.13 y Figura III.14), la duración de la parte intensa de los registros es similar. Aunque al considerar los efectos de directividad *forward* (Figura III.12c) en las simulaciones se aumentan las amplitudes, al considerar simultáneamente dichos efectos y los de saturación, para una distancia de 0 km, se disminuyen de manera considerable las amplitudes con respecto a la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995) (Figura III.12a).

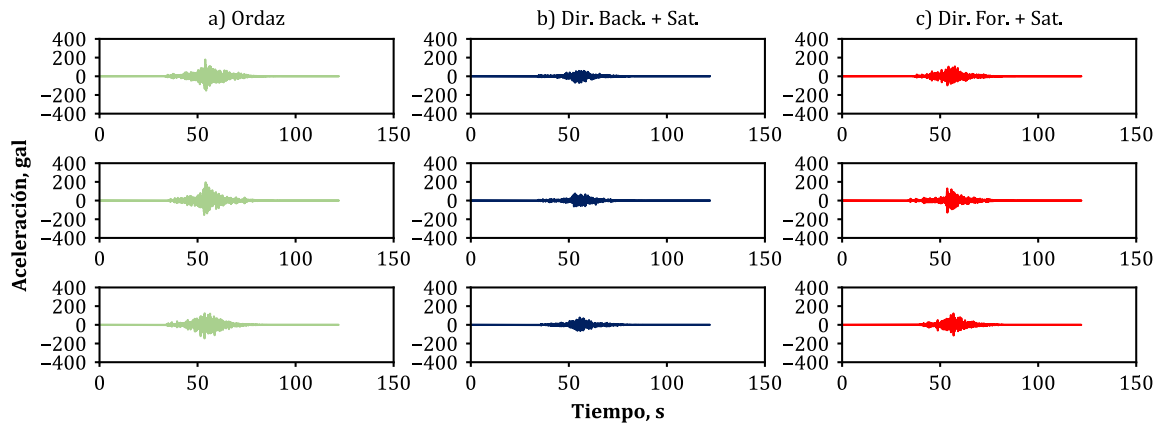


Figura III.12. Acelerogramas sintéticos obtenidos para las formulaciones de a) Ordaz *et al.* (1995), b) Directividad *backward* y saturación y c) Directividad *forward* y saturación empleando como EGF el sismo del 25/04/89.

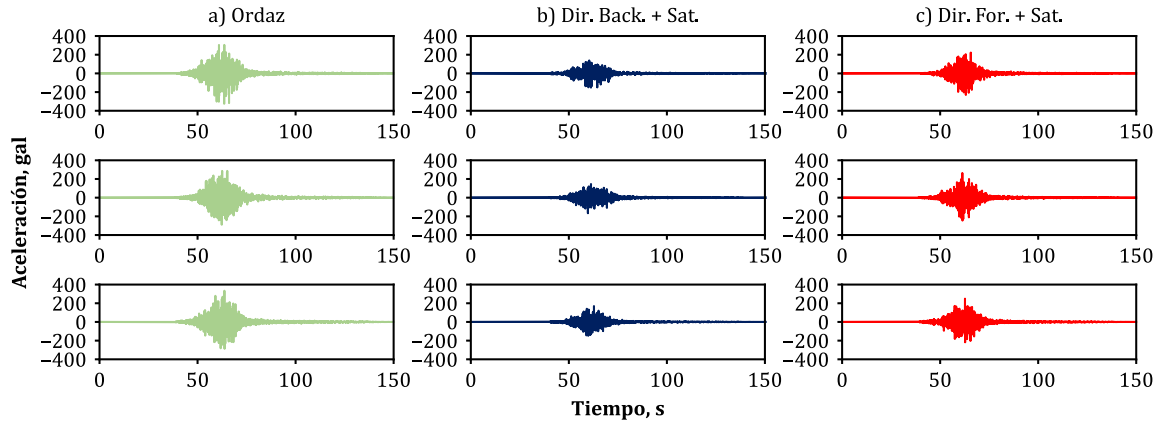


Figura III.13. Acelerogramas sintéticos obtenidos para las formulaciones de a) Ordaz *et al.* (1995), b) Directividad *backward* y saturación y c) Directividad *forward* y saturación empleando como EGF el sismo del 08/05/14.

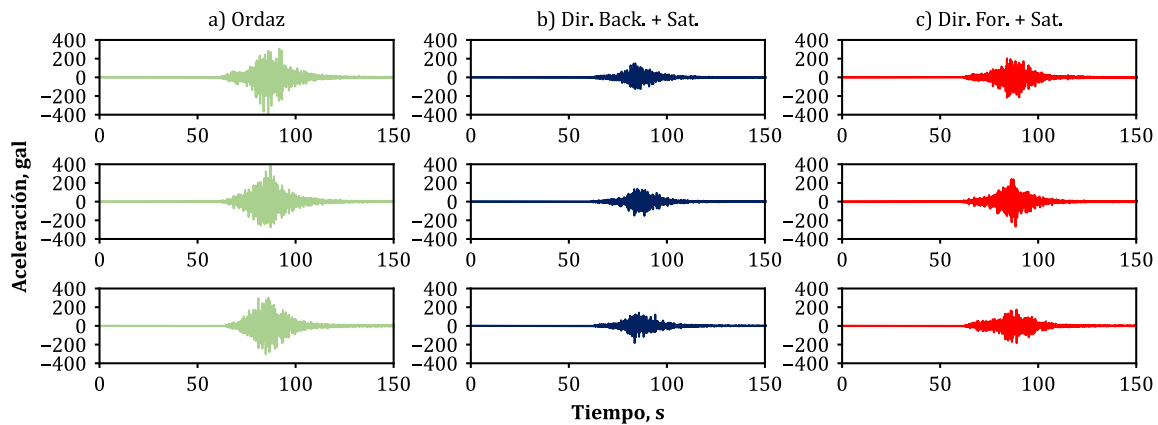


Figura III.14. Acelerogramas sintéticos obtenidos para las formulaciones de a) Ordaz *et al.* (1995), b) Directividad *backward* y saturación y c) Directividad *forward* y saturación empleando como EGF el sismo del 08/09/21.

Una vez que se toman en cuenta los efectos de saturación en la simulación de los registros, se observa claramente cómo disminuyen significativamente las pseudoaceleraciones comparadas con las del espectro promedio obtenido con la formulación de Ordaz *et al.* (1995), como se observa en la Figura III.15. Al igual que para la estación SCT, en términos de amplitudes, el caso más desfavorable es cuando se presenta directividad *forward*. Sin embargo, al considerar los efectos de saturación se disminuyen considerablemente las amplitudes. También, en términos de los espectros de Fourier, se observa cómo varían las amplitudes y no el contenido de frecuencias.

En la Figura III.15a, se observa que los espectros promedio de las simulaciones empleando la formulación de Ordaz y la que considera directividad *backward* tienen amplitudes similares. Sin embargo, la que considera directividad *forward* es considerablemente mayor, lo cual resalta la importancia de tomar en cuenta este tipo de efectos para la definición de la amenaza sísmica de un sitio. Por otro lado, en la Figura III.15b, se observa algo similar; los espectros promedio de la formulación de Ordaz y la

que considera directividad *forward* tienen amplitudes similares y la diferencia entre el espectro promedio obtenido con Ordaz y la que considera directividad *backward* también es considerable. Lo anterior se debe a la manera en que se incluyen los efectos de directividad, ya que al truncar o redondear al entero más próximo el valor del cociente de caída de esfuerzos, N , se puede llegar a casos extremos donde el valor de N es muy cercano a un valor entero y, por lo tanto, la variación en términos de amplitudes es prácticamente insignificante en comparación a la formulación de Ordaz. En el caso del sismo del 25/04/89 (Figura III.15a) el valor de N es 4.7 y en el caso del sismo del 08/05/14 (Figura III.15b) el valor de N es 6.2.

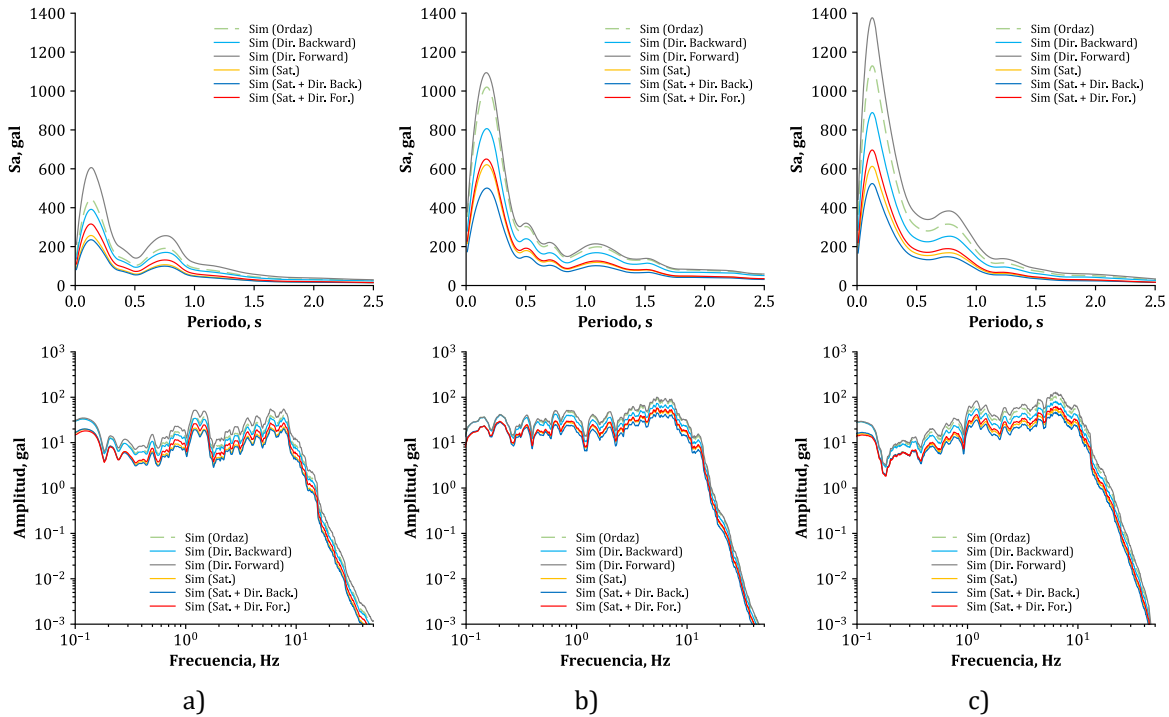


Figura III.15. Espectros de respuesta elástica y de Fourier promedio de 1000 simulaciones en la estación COYC, para las EGF: a) 25/04/89 b) 08/05/14 y c) 08/09/21.

Como los resultados obtenidos para este capítulo son para un sismo objetivo hipotético, no es posible compararlos directamente con registros observados. Por tal motivo, en el siguiente capítulo se mostrará la validez de la formulación y, por lo tanto, de los resultados presentados en este capítulo, a través de la comparación de registros sísmicos sintéticos con registros observados durante eventos históricos.

IV. Validación de la formulación propuesta

Con el objetivo de validar que los resultados obtenidos en el caso de estudio sean realistas y que la formulación propuesta que incorpora los efectos de directividad y saturación en la suma estocástica de EGF es adecuada, se llevaron a cabo procesos de simulación sísmica para eventos sísmicos que han ocurrido en la zona de interés y que han presentado efectos de directividad. Los resultados obtenidos de las simulaciones se comparan con los datos observados durante los eventos, en términos de registros sísmicos, intensidad de Arias, espectros de respuesta elástica y espectros de Fourier. También se compara la relación espectral teórica con la relación espectral, determinada como el cociente del espectro de Fourier promedio de las señales sintéticas y el espectro de la EGF. Adicionalmente, se comparan los resultados de la formulación presentada en esta tesis con los obtenidos mediante la aplicación de la formulación desarrollada con el método estocástico propuesto por Motazedian *et al.* (2005), que se basa en el concepto de frecuencia de esquina dinámica para modelar la fuente extendida.

Para fines de esta tesis, la amenaza sísmica queda delimitada para sismos de subducción interplaca (profundidad somera) (Figura IV.1a) y sismos de subducción intraplaca (profundidad intermedia) (Figura IV.1**Figura III.3b**).

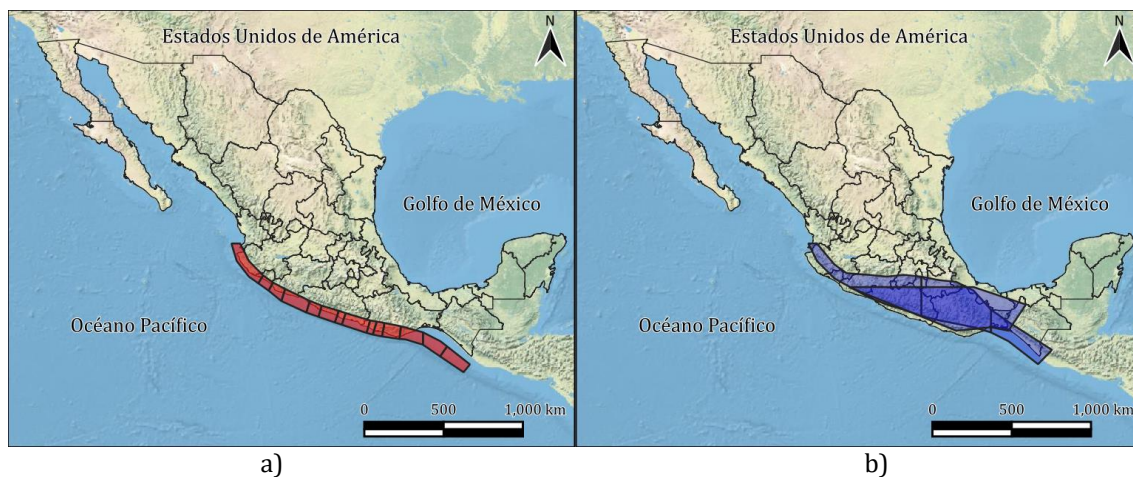


Figura IV.1. Fuentes sísmicas en México: a) sismos interplaca, b) sismos intraplaca (modificado de CFE, 2015).

Como se discutió en el capítulo anterior, los sismos interplaca son de gran interés debido a que, históricamente, son los que se asocian a mayores superficies de ruptura, lo cual implica mayor liberación de energía, *i.e.*, sismos de mayor magnitud.

En el caso de los sismos intraplaca, aunque generalmente son de menor magnitud, al ser más cercanos a zonas urbanas la consideración de fuente extendida puede ayudar a definir mejor las demandas sísmicas en estas zonas, a diferencia de las limitaciones que supone considerar una fuente puntual. Algunos ejemplos de sismos en México con fuente cercana a zonas urbanas son el sismo M_w 7.0 del 15 de junio de 1999 y el sismo M_w 7.1 del 19 de septiembre de 2017. Para el primero, su epicentro se localizó a menos

de 130 km de la ciudad de Puebla, Puebla, mientras que para el segundo su epicentro se localizó a menos de 150 km de la ciudad de Puebla y de la Ciudad de México.

Por razones de simplicidad, en este capítulo se analizan y discuten a detalle los resultados obtenidos para dos eventos sísmicos objetivo, uno interplaca y otro intraplaca. Sin embargo, en los Anexos A, B y C se presentan mapas con la ubicación de los epicentros de los sismos objetivo y semilla, las tablas con los parámetros sísmicos empleados para llevar a cabo las simulaciones y los resultados obtenidos para otros eventos objetivo, registrados en México con efectos de directividad, que se usaron para validar la formulación propuesta.

IV.I. Comparación con sismos registrados

Los eventos objetivo que se encuentran dentro de la zona de interés, que se emplearán como referencia para evaluar los resultados obtenidos de los procesos de simulación, son el sismo interplaca M_w 6.1 del 10 de mayo de 2014 con epicentro cercano a Tecpán, Guerrero, y el sismo intraplaca M_w 7.1 del 19 de septiembre de 2017 con epicentro cercano a Chiautla de Tapia, Puebla, los cuales se eligieron debido a sus conocidos efectos de directividad, su cercanía a las zonas de interés, así como su importancia histórica.

El criterio para elegir los sismos semilla fue que la ubicación del epicentro fuera muy cercana a la del evento objetivo, lo que implica que los dos sismos se generaron en la misma fuente y que la distancia epicentral a las estaciones de interés fuera similar. También se verificó que el mecanismo focal de los sismos fuera el mismo.

Los valores de los parámetros con los que se definen los eventos sísmicos se presentan en la Tabla IV.1. Los valores de M_w fueron obtenidos del Catálogo de Sismos del SSN (SSN, 2023), el M_0 se obtuvo empleando la ecuación (I.4), la caída de esfuerzos se obtuvo a través del análisis de registros de cada evento y f_c se definió empleando la ecuación (I.7).

Tabla IV.1. Parámetros sísmicos empleados para la simulación de eventos.

Evento	Fecha	M_w	M_0 (dyn-cm)	$\Delta\sigma$ (bar)	f_c (Hz)
Semilla	10/05/14	4.9	2.51E+23	60	1.42
Objetivo	10/05/14	6.1	1.63E+25	90	0.41
Semilla	21/07/00	6.0	1.12E+25	150	0.54
Objetivo	19/09/17	7.1	5.01E+26	150	0.15

Los registros objetivo se obtuvieron de estaciones en donde se cuenta con evidencia de que se presentaron efectos de directividad, tanto *forward* como *backward*. Para cada uno de los sismos objetivo se aplicaron distintos enfoques de suma estocástica: (a) la formulación desarrollada por Ordaz *et al.* (1995), (b) la formulación aquí propuesta considerando únicamente los efectos de directividad, (c) la formulación aquí propuesta considerando únicamente efectos de saturación y (d) la formulación propuesta considerando los efectos de directividad y de saturación de manera simultánea.

Se eligió llevar a cabo los procesos de simulación con la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995), dado que la presentada en este trabajo está basada en ella. La comparativa mostrará el efecto que tienen las modificaciones propuestas al considerar directividad y saturación, de manera separada y simultánea, y analizar si los efectos observados son consistentes con lo esperado de dichos fenómenos.

Se llevaron a cabo 1000 simulaciones con el objetivo de tener una mayor variedad de registros sísmicos y así poder determinar el comportamiento promedio. Este número se determinó a través de un análisis de sensibilidad, donde se observó el comportamiento del promedio y desviación estándar para diferentes números de simulaciones, y se encontró que a partir de 1000 simulaciones la variación del promedio y desviación estándar de las amplitudes era prácticamente despreciable.

Para analizar los resultados obtenidos de las simulaciones, se presentan algunos de los registros sísmicos sintéticos en términos de aceleraciones para analizar la duración de los registros y amplitudes, las curvas promedio de Intensidad de Arias para comparar la liberación de energía, los espectros de respuesta elástica y de Fourier de aceleraciones promedio para contrastarlos con los del sismo registrado y analizar las pseudoaceleraciones y el contenido de frecuencias, así como la relación espectral de los espectros promedio de las simulaciones entre el del sismo semilla (EGF) para compararlo con el modelo teórico.

IV.I.I. Localización de los epicentros de los eventos y estaciones

IV.I.I.I. Sismo M_w 6.1 del 10 de mayo de 2014 (Tecpán, Guerrero)

Para este evento se simularon registros para las estaciones El Súchil (SUCH) y San Luis de la Loma (SLU2) de la RAI - UNAM. Estas se encuentran a 27 km y 34 km del epicentro del evento objetivo, respectivamente y a 34 km y 45 km del epicentro del evento semilla (Figura IV.2).

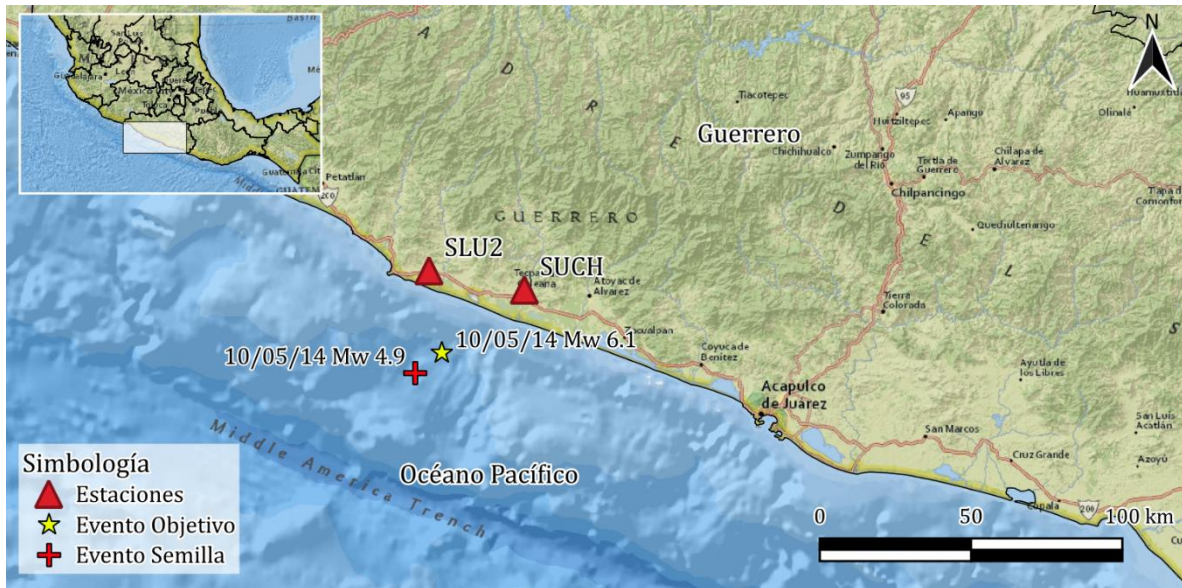


Figura IV.2. Localización de los epicentros y estaciones para el evento objetivo Mw 6.1 del 10/05/14.

IV.I.I.II. Sismo Mw 7.1 del 19 de septiembre de 2017 (Chiautla de Tapia, Puebla)

Para este evento se simularon registros para las estaciones Tonalapa del Sur (TNLP) y IDEI Patio 5 – Caseta del Patio del Instituto de Ingeniería (CUP5) de la RAII - UNAM. Estas se encuentran a 98 km y 123 km del epicentro del evento objetivo, respectivamente y a 63 km y 139 km del epicentro del evento semilla (Figura IV.3).

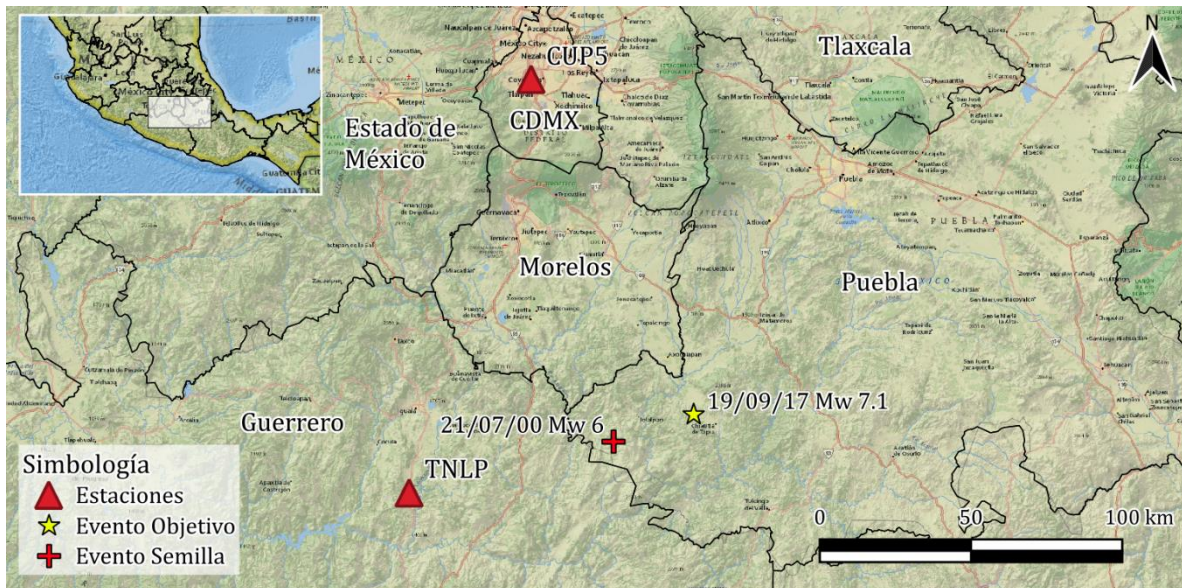


Figura IV.3. Localización de los epicentros y estaciones para el evento objetivo Mw 7.1 del 19/09/17.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los procesos de simulación considerando únicamente efectos de directividad.

IV.I.II. Generación de registros sintéticos considerando efectos de directividad

IV.I.II.I. Sismo M_w 6.1 del 10 de mayo de 2014 (Tecpán, Guerrero)

Estación El Súchil – **SUCH** (Registró efectos de directividad *backward*)

Durante el evento sísmico, se presentó directividad hacia la dirección WNW, como la estación SUCH se localiza al este del epicentro, en la estación se registraron efectos de directividad *backward*. Al comparar la duración y amplitudes de los registros de SUCH con los de SLU2, se encontró que en SUCH se presentó mayor duración y menores amplitudes que en SLU2, lo cual es consistente con la directividad *backward*.

En la Figura IV.4 se presentan los registros sísmicos de los eventos objetivo (Figura IV.4a) y semilla (Figura IV.4b), así como algunos de los registros sintéticos obtenidos considerando la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995) (Figura IV.4c) y efectos de directividad *backward* (Figura IV.4d) y *forward* (Figura IV.4e). Se puede observar que los registros sintéticos son realistas en términos de duración y PGA, en particular, al considerar directividad *backward*, lo cual es consistente con lo registrado en la estación durante el sismo.

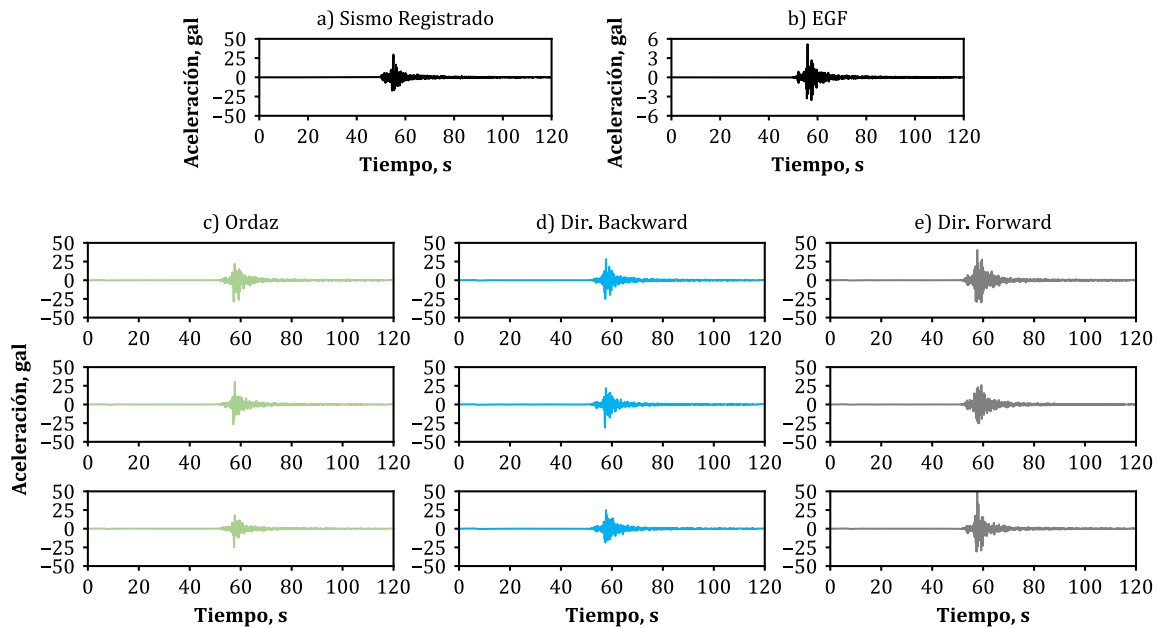


Figura IV.4. Registros sísmicos para la estación SUCH de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de directividad: d) directividad *backward*, e) directividad *forward*.

En la Figura IV.5 se presenta la comparación de la intensidad de Arias de los sismos objetivo, de la EGF, así como el promedio de las simulaciones para los tres casos (Ordaz, directividad *backward* y directividad *forward*). La liberación de energía se produce de manera súbita en los registros sintéticos, de manera casi idéntica a la del sismo registrado y la de la EGF.

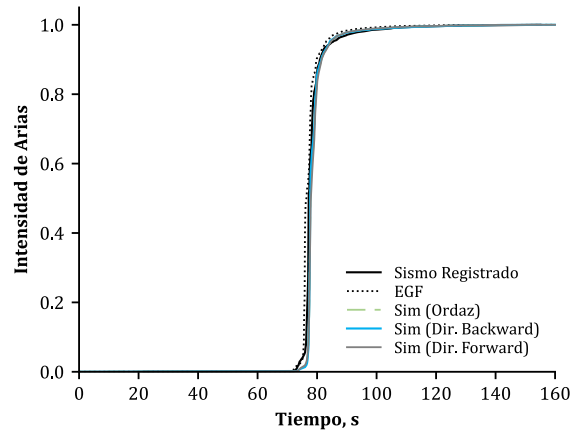


Figura IV.5. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad.

La Figura IV.6a muestra los espectros de respuesta elástica de los sismos objetivo y de la EGF escalada (con factor de escala de 4), así como el promedio de las simulaciones. El factor de escala de la EGF fue elegido de manera arbitraria ya que el fin es comparar la forma del espectro de la EGF, con el del sismo registrado y los espectros promedio de las simulaciones, esta consideración es válida para el resto de las estaciones analizadas. En la Figura IV.6b se presenta el espectro de respuesta elástica del sismo registrado y los espectros de las simulaciones promedio y promedio más/menos una desviación estándar. Se observa que el considerar los efectos de directividad modifica de manera considerable las amplitudes de los espectros de respuesta elástica promedio con respecto al espectro promedio obtenido con la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995), en particular, para periodos menores a 1 segundo. Consistente con lo esperado, para la directividad *forward* se presentan mayores amplitudes de pseudoaceleraciones con respecto al espectro obtenido con Ordaz, mientras que para la directividad *backward* se presentan menores amplitudes. Por lo que únicamente considerar la formulación de Ordaz conlleva a la sobrestimación de la pseudoaceleración máxima. En el espectro del sismo objetivo, se observa que se tienen las mayores pseudoaceleraciones en dos periodos, 0.4 y 1 segundo, sin embargo, el sismo empleado como EGF no presentó esta característica, por lo que, para el periodo de 1 segundo, se subestima ligeramente la amplitud espectral. Dentro de la envolvente formada por los espectros promedio más y menos una desviación estándar se encuentra el sismo registrado (Figura IV.6b), donde se observa que la amplitud del espectro del sismo registrado para periodos menores o iguales a 1.2 segundos queda cubierta por este rango; sin embargo, a partir de 1.2 segundos, se presenta una sobreestimación de las ordenadas.

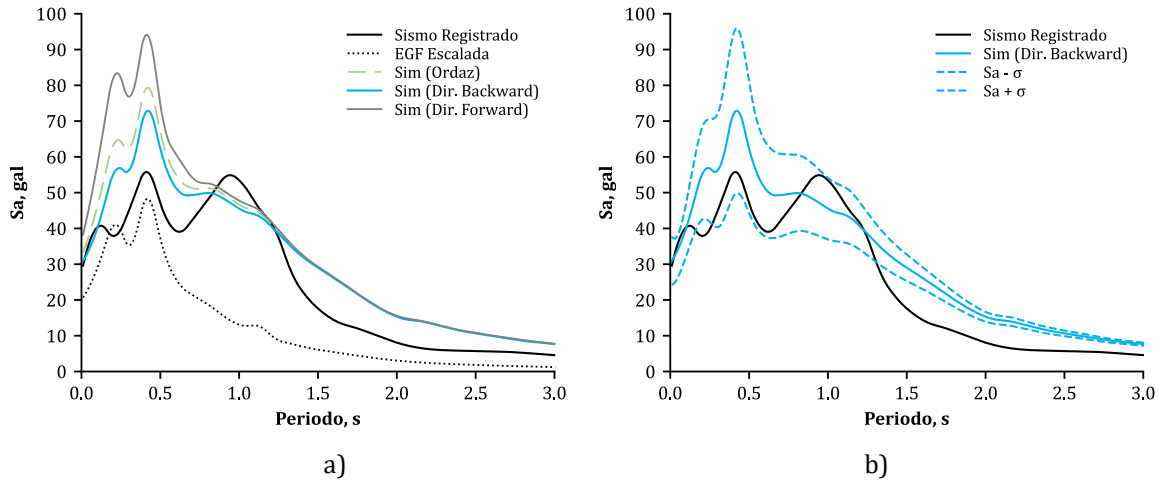


Figura IV.6. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de directividad: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación SUCH.

En la Figura IV.7a, se presentan los espectros de Fourier de aceleraciones y en la Figura IV.7b, se muestra la comparación entre la relación espectral teórica y las promedio obtenidas de las simulaciones. Al igual que con los espectros de respuesta elástica, los espectros de Fourier promedio varían en términos de amplitudes, según el caso de directividad que se esté considerando, mayores amplitudes para *forward* y menores para *backward*. El contenido de frecuencias de los registros sintéticos, en promedio, es muy parecido al del sismo registrado para frecuencias menores a 10 Hz, para frecuencias mayores se observa cómo las tres formulaciones subestiman las amplitudes del espectro del evento lo cual está asociado al contenido de frecuencias de la EGF empleada, adicionalmente, como las frecuencias mayores a 10 Hz no son de particular interés para la ingeniería sísmica.

En la relación espectral (Figura IV.7b), se observa un buen ajuste para las formulaciones propuestas en esta tesis, para frecuencias bajas se presentan unos “picos” los cuales sugieren la presencia de ruido en las señales simuladas. Para frecuencias menores a 1 Hz, las 3 formulaciones tienen un ajuste muy similar, mientras que para frecuencias mayores se alejan del modelo, por lo tanto, el mejor ajuste al modelo teórico se presenta para el promedio de las simulaciones empleando la formulación de Ordaz. A pesar de que, para la relación espectral, se tiene un mejor ajuste con esta formulación, para el resto de las características analizadas los resultados obtenidos con la formulación propuesta que considera directividad *backward* se aproximan más a las características del sismo registrado.

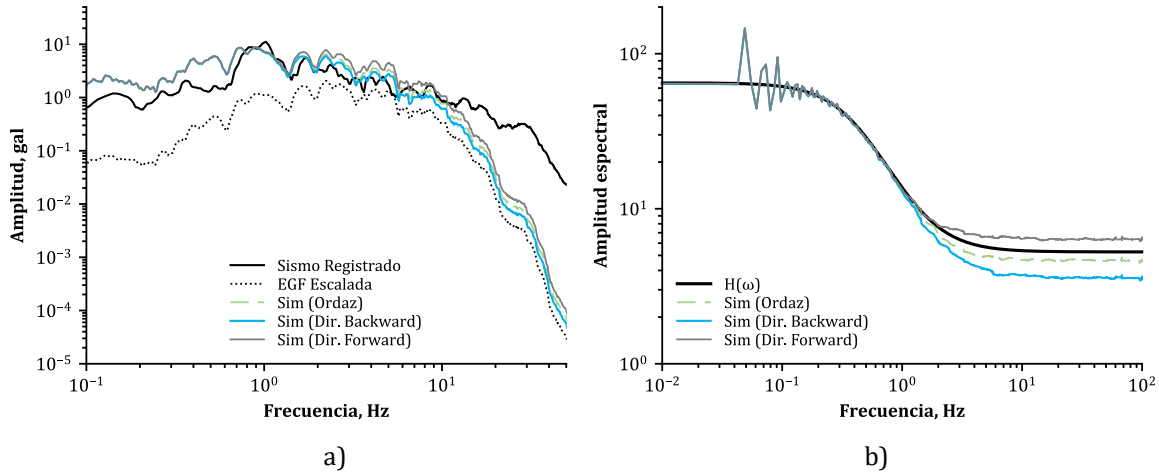


Figura IV.7. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad para la estación SUCH que registró directividad *backward*: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

Estación San Luis de la Loma – **SLU2** (Registró efectos de directividad *forward*)

Durante el evento sísmico, se presentó directividad hacia la dirección WNW, como la estación SLU2 se localiza al oeste del epicentro, en la estación se registraron efectos de directividad *forward*. Al comparar la duración y amplitudes de los registros de SLU2 con los de SUCH, se encontró que en SLU2 se presentó menor duración y mayores amplitudes que en SUCH, lo cual es consistente con la directividad *forward*.

En la Figura IV.8a se presentan el registro sísmico del evento, de la semilla (Figura IV.8b) y los sintéticos obtenidos, considerando las formulaciones de Ordaz (Figura IV.8c), la propuesta en esta tesis considerando directividad *backward* (Figura IV.8d) y considerando directividad *forward* (Figura IV.8e). En términos de duración y PGA, los registros sintéticos son representativos del sismo registrado, en particular, al considerar los efectos de directividad *forward*, como se registraron durante el sismo.

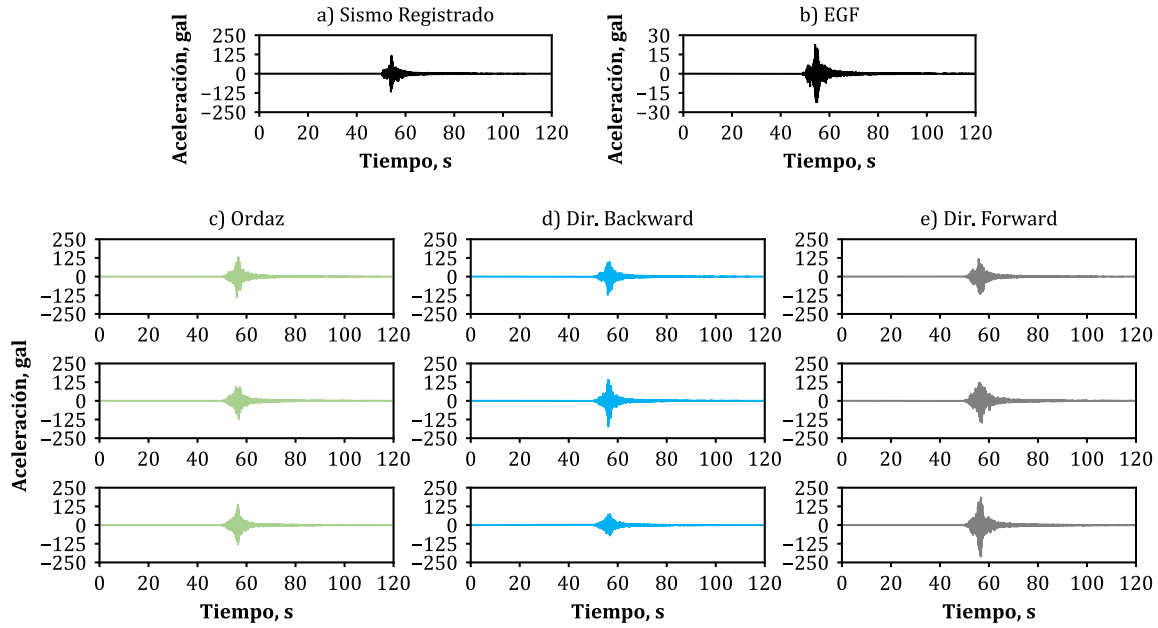


Figura IV.8. Registros sísmicos para la estación SLU2 de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de directividad: d) directividad *backward*, e) directividad *forward*.

En la Figura IV.9, se comparan las curvas de intensidad de Arias normalizada y, al igual que en la estación SUCH, la duración es similar para los registros sintéticos y el sismo objetivo, además se presenta una liberación de energía súbita para los registros sintéticos, así como para los sismos objetivo y semilla.

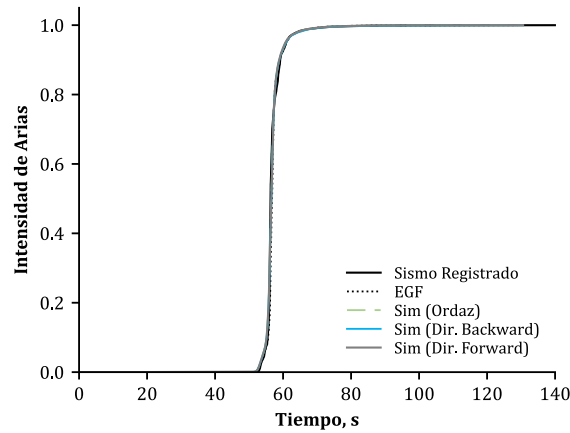


Figura IV.9. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad.

En la Figura IV.10a, se comparan los espectros de respuesta elástica del sismo registrado, de la EGF escalada y los espectros promedio de las simulaciones para las tres formulaciones consideradas. El espectro de la EGF se escaló con un factor de 2.5, con el fin de compararlo con el del sismo registrado, así como con los espectros promedio de las simulaciones. En esta figura se observa claramente cómo el no

considerar los efectos de directividad *forward* en la generación de registros sintéticos, conlleva a la subestimación de las amplitudes espectrales. Al generar registros con directividad *forward*, se obtienen amplitudes similares a las del sismo objetivo. Para periodos mayores a 0.5 segundos, se subestima el espectro del evento objetivo, lo cual está asociado a las características del espectro de respuesta del sismo empleado como EGF.

Para la envolvente formada con los espectros promedio y promedio más y menos una desviación estándar (Figura IV.10b), el sismo registrado queda comprendido dentro de esta, sin embargo, se mantiene la subestimación para periodos mayores a 0.5 segundos.

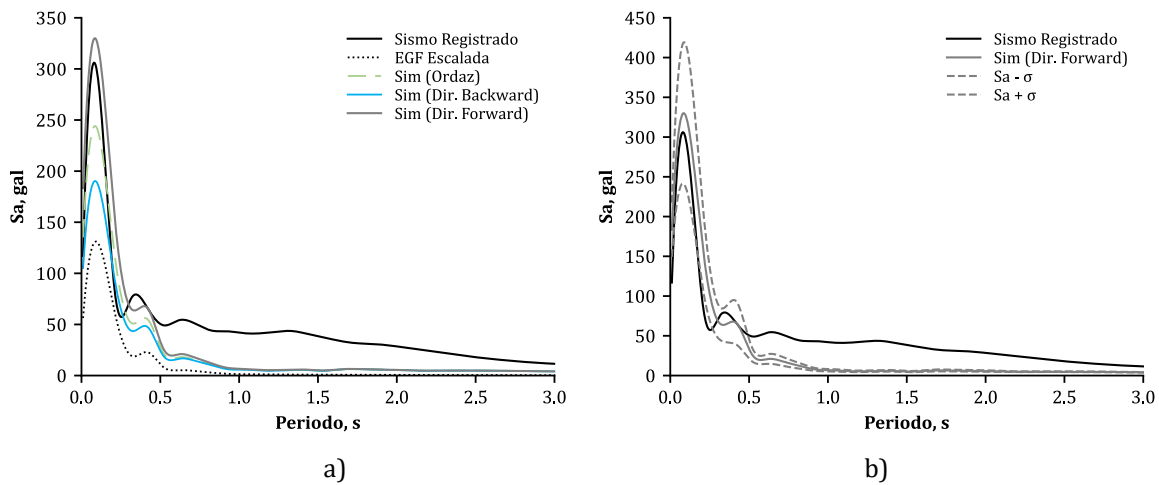


Figura IV.10. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de directividad: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación SLU2.

En los espectros de Fourier promedio que se muestran en la Figura IV.11a se observa que para frecuencias mayores a 2 Hz el contenido de frecuencias es similar a la del sismo objetivo, mientras que para las frecuencias entre 0.1 y 2 Hz, se subestima el espectro del sismo registrado. Al igual que para los espectros de respuesta, la forma de los espectros promedio es muy similar a la del espectro de la EGF escalada, lo cual resalta un área de oportunidad de la formulación, ya que, al tener un sismo objetivo de tal magnitud, se espera que el contenido de frecuencias varíe; sin embargo, en términos de amplitudes se obtienen valores promedio similares a los del espectro registrado.

En la relación espectral que se presenta en la Figura IV.11b, se observan pequeños “picos”, a diferencia de la estación SUCH, la señal no tiene tanto ruido. Considerando directividad *forward* en las simulaciones, se presenta un ajuste adecuado respecto al modelo teórico. Aunque para la relación espectral, la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995) se ajusta de mejor manera al modelo teórico, para el resto de las características analizadas (acelerogramas, intensidad de Arias, espectros de respuesta elástica y Fourier) la formulación propuesta que considera directividad *forward* se aproxima más a las del sismo registrado.

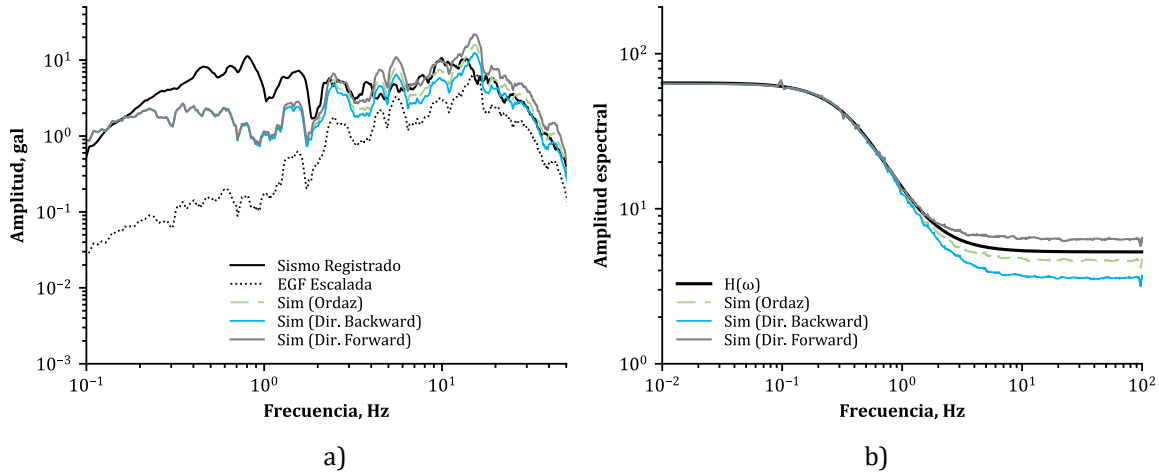


Figura IV.11. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad para la estación SLU2 que registró directividad *forward*: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

IV.I.II.II. Sismo M_w 7.1 del 19 de septiembre de 2017 (Chiautla de Tapia, Puebla)

Estación Tonalapa del Sur – **TNLP** (Registró efectos de directividad *backward*)

Durante el evento sísmico, se presentó directividad bilateral hacia las direcciones NW-SE, como la estación TNLP se localiza al suroeste del epicentro, en la estación se registraron efectos de directividad *backward*. Al comparar la duración y amplitudes de los registros de TNLP con los de CUP5, se encontró que en TNLP se presentó mayor duración y menores amplitudes que en CUP5, lo cual es consistente con la directividad *backward*.

Se muestran los registros sísmicos para el evento objetivo (Figura IV.12a), la EGF (Figura IV.12b) y registros sintéticos obtenidos con las formulaciones de Ordaz (Figura IV.12c), la que considera directividad *backward* (Figura IV.12d) y la de directividad *forward* (Figura IV.12e). En el acelerograma del sismo registrado se ve la presencia de efectos de directividad *backward*, mientras que el sismo empleado como EGF muestra efectos de directividad *forward*, lo cual se puede ver en los registros sintéticos, donde la duración, así como las amplitudes, son diferentes para las simulaciones con respecto al registrado.

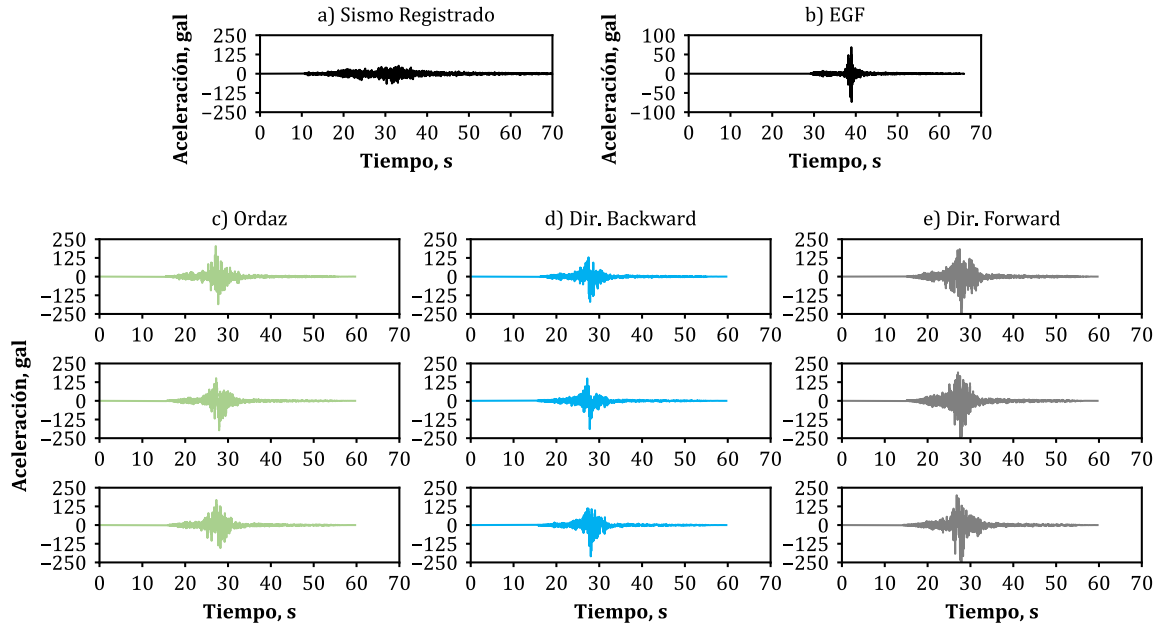


Figura IV.12. Registros sísmicos para la estación TNLP de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de directividad: d) directividad *backward*, e) directividad *forward*.

En la Figura IV.13, se presentan las curvas de intensidad de Arias normalizadas para el sismo objetivo, la EGF y las promedio para las simulaciones. En la curva del sismo registrado se observa que la energía se libera de manera paulatina, a diferencia de la intensidad de Arias de la EGF y la curva promedio de las simulaciones, donde se libera de manera súbita, lo cual está asociado a lo observado en los acelerogramas de la Figura IV.12, donde para el sismo registrado (Figura IV.12a) se tienen amplitudes menores y duración mayor, mientras que para las simulaciones con directividad *backward* (Figura IV.12d) se tiene una menor duración de la parte intensa del sismo y mayores amplitudes.

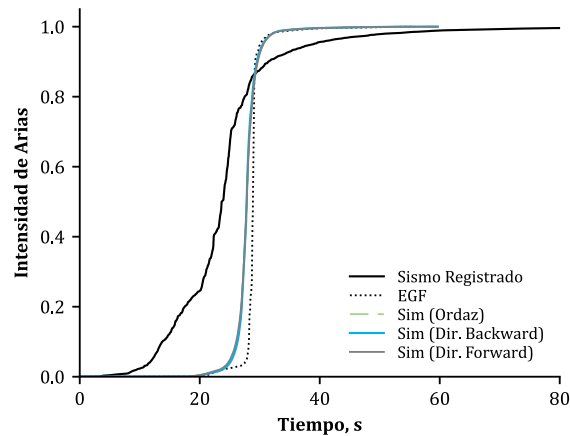


Figura IV.13. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad.

En la Figura IV.14a se comparan los espectros de respuesta elástica del sismo objetivo, de la EGF escalada (con un factor de escala de 1.5) y los espectros promedio considerando las diferentes formulaciones. Respecto al espectro promedio de la formulación de Ordaz, el espectro promedio de las simulaciones con directividad *backward* se aproxima más al espectro del sismo objetivo, aunque se produce una sobrestimación, la cual se pronuncia para periodos mayores a 0.5 segundos.

En la envolvente formada por los espectros promedio y promedio más y menos una desviación estándar (Figura IV.14b), se encuentra el espectro del sismo objetivo para promedios menores a 0.4 segundos, para periodos mayores las amplitudes se siguen sobrestimando.

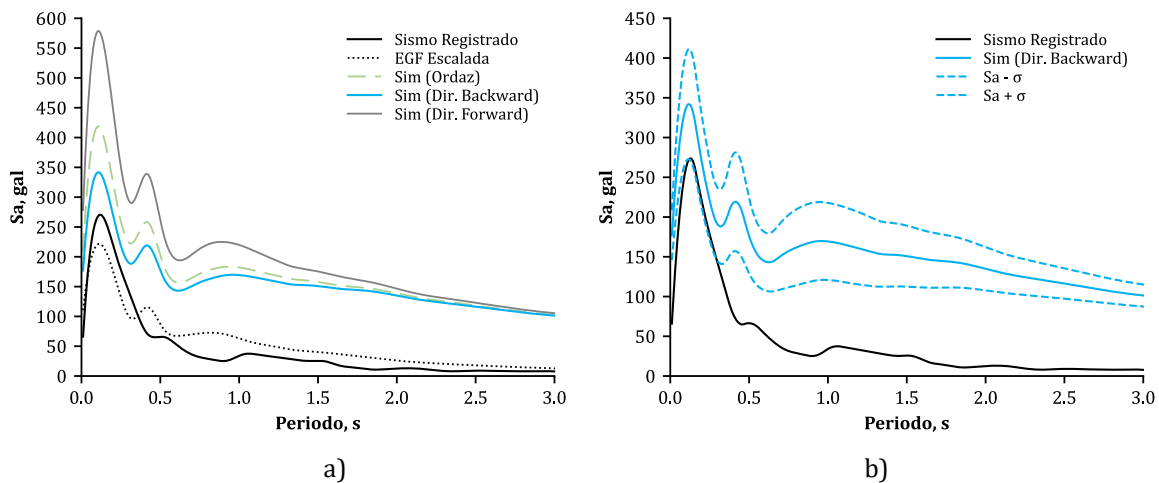


Figura IV.14. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de directividad: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación TNLP.

En la Figura IV.15a se presentan los espectros de Fourier del sismo registrado, de la EGF y del promedio de las simulaciones. A pesar de que se aplicó corrección línea base y un filtro pasa banda entre 0.1 y 10 Hz, para frecuencias menores a 2 Hz, los espectros promedio de las simulaciones presentan ruido, ya que, en lugar de registrar una rama ascendente, presentan una rama descendente esto indica que el registro empleado como EGF contiene ruido, lo cual se puede observar en su espectro, ya que a pesar de que la EGF fue un sismo de menor magnitud, para algunas frecuencias se tienen amplitudes mayores.

En la Figura IV.15b, se presentan las relaciones espectrales promedio y la teórica, para frecuencias menores a 0.5 Hz las tres formulaciones se ajustan de manera adecuada al modelo teórico y para frecuencias mayores, la formulación de Ordaz presenta un mejor ajuste únicamente para la relación espectral teórica, para el resto de características analizadas (acelerogramas, intensidad de Arias, espectros de respuesta elástica y Fourier), la formulación propuesta se aproxima más a las del sismo registrado.

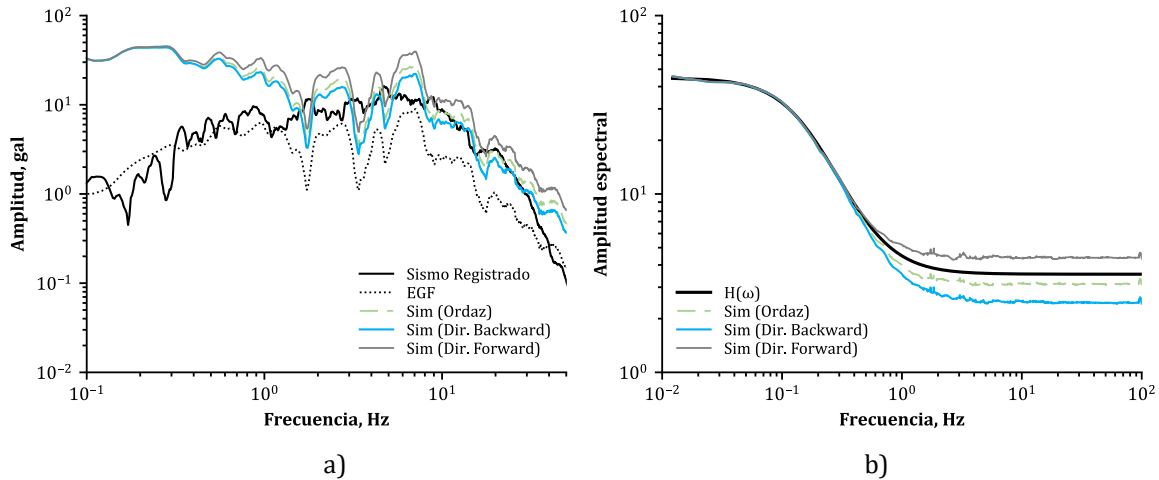


Figura IV.15. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad para la estación TNLP que registró directividad *backward*: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

Estación IDEI Patio 5 (Caseta del Patio del Instituto de Ingeniería) – **CUP5** (Registró efectos de directividad *forward*)

Durante el evento sísmico, se presentó directividad bilateral hacia las direcciones NW-SE, como la estación CUP5 se localiza al noroeste del epicentro, en la estación se registraron efectos de directividad *forward*. Al comparar la duración y amplitudes de los registros de CUP5 con los de TNLP, se encontró que en CUP5 se presentó menor duración y mayores amplitudes que en TNLP, lo cual es consistente con la directividad *forward*.

En la Figura IV.16 se presenta el acelerograma del sismo registrado (Figura IV.16a) el de la EGF (Figura IV.16b) y algunos de los registros sintéticos para las formulaciones de Ordaz (Figura IV.16c), la que considera efectos de directividad *backward* (Figura IV.16d) y la que considera directividad *forward* (Figura IV.16e). En términos de duración del evento y amplitudes de las señales (Figura IV.16), los registros sintéticos son representativos del sismo objetivo, en particular, cuando se consideran los efectos de directividad *forward*, lo cual es consistente con lo registrado.

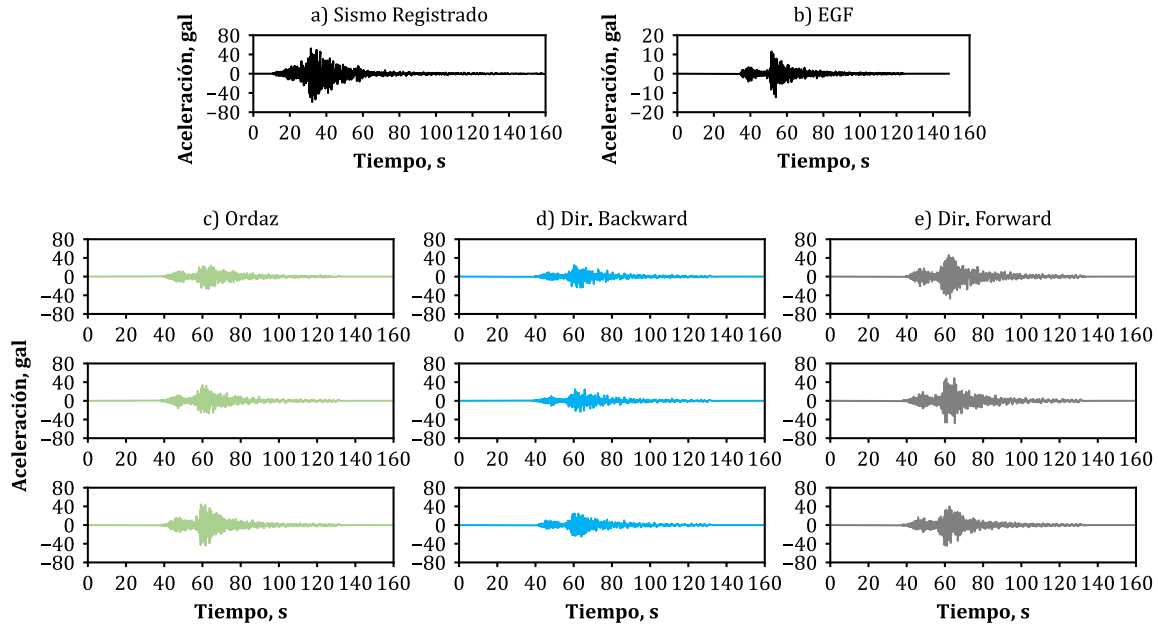


Figura IV.16. Registros sísmicos para la estación CUP5 de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de directividad: d) directividad *backward*, e) directividad *forward*.

En términos de la intensidad de Arias, en la Figura IV.17, se presentan las curvas obtenidas para el sismo registrado, la EGF y las curvas promedio para las simulaciones de Ordaz, la que considera directividad *backward* y la que considera directividad *forward*. En términos de duración y liberación de la energía, las curvas promedio de las simulaciones son representativas de los sismos registrados.

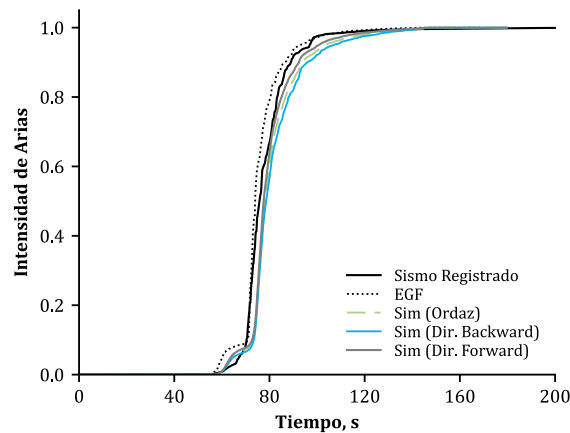


Figura IV.17. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad.

En la Figura IV.18a, se presentan los espectros de respuesta elástica para el sismo registrado, la EGF escalada (con factor de escala de 2) y los espectros promedio de las simulaciones, para las formulaciones de Ordaz y las que consideran efectos de directividad. Se observa que al ignorar los efectos de directividad *forward* para las

simulaciones, se subestiman, de manera considerable las amplitudes, en particular para periodos menores a 0.5 segundos. En esta figura también se observa que los espectros promedio de las simulaciones tienen una forma muy similar al espectro de la EGF; por lo tanto, no se logran representar las crestas del espectro de respuesta del sismo objetivo para el rango de periodos entre 0.5 y 2 segundos, es decir, se subestiman las amplitudes espectrales.

Por otro lado, en la Figura IV.18 se muestran los espectros de respuesta promedio de las simulaciones que considera directividad *forward*, así como el promedio más y menos una desviación estándar. De la envolvente formada por los espectros, el espectro del sismo registrado queda por dentro de dicha envolvente, lo que implica que las simulaciones realizadas son representativas del sismo objetivo, en otras palabras, en al menos una de las mil simulaciones, su espectro tiene pseudoaceleraciones muy parecidas a las del espectro del sismo registrado.

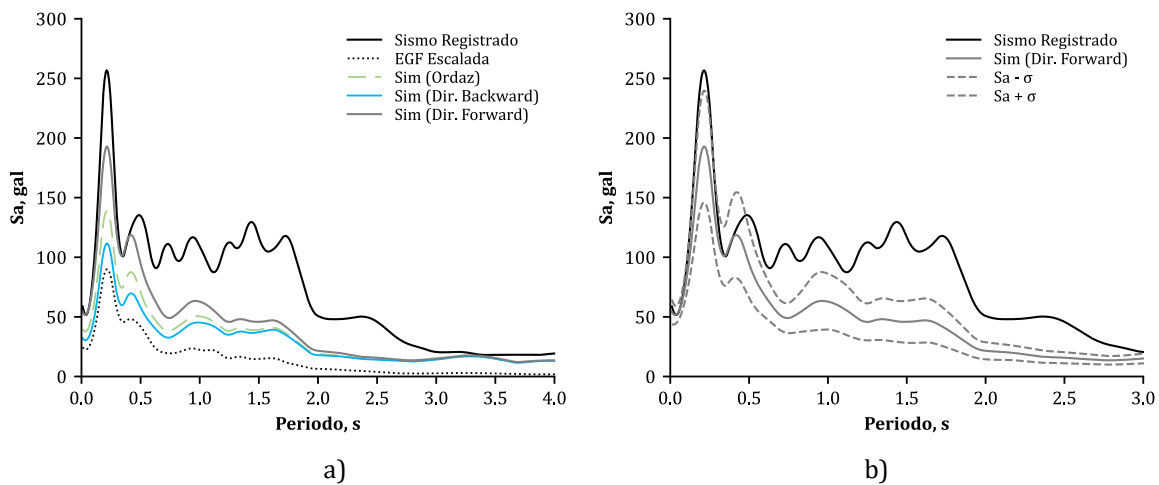


Figura IV.18. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de directividad: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación CUP5.

En la Figura IV.19a, se presentan los espectros de Fourier del sismo registrado, el de la EGF escalada (con factor de 2) y los espectros promedio de las simulaciones con las formulaciones consideradas. El contenido de frecuencias del espectro promedio de las simulaciones que considera directividad *forward* es similar al espectro del sismo registrado, en particular para frecuencias menores a 10 Hz, para frecuencias mayores, el espectro promedio de las simulaciones subestima el sismo registrado. La forma de los espectros promedio es muy similar a la del espectro de la EGF.

En la Figura IV.19b, se presentan las relaciones espectrales promedio y la teórica. La formulación para la cual su relación espectral promedio se ajusta mejor a la teórica es la de Ordaz.

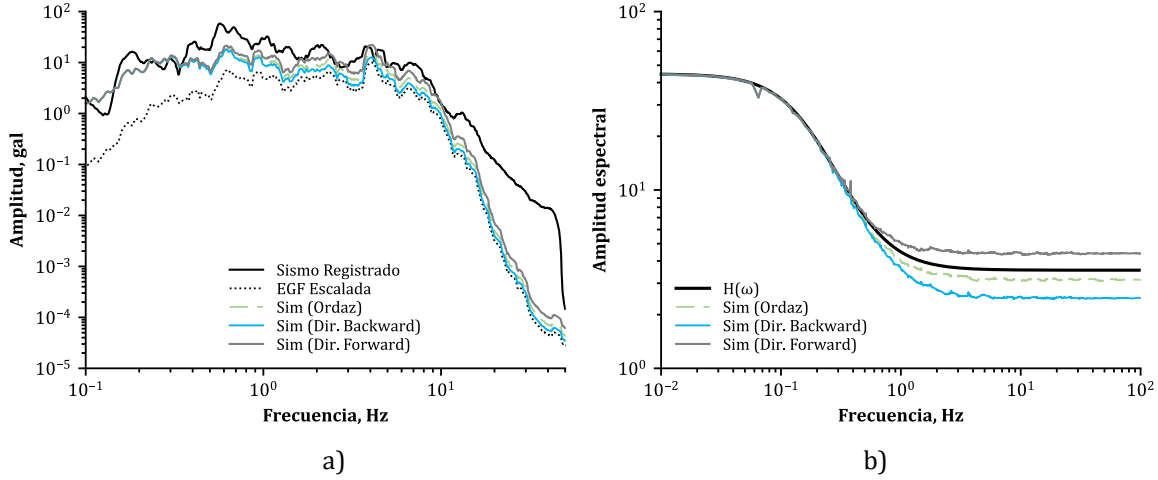


Figura IV.19. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad para la estación CUP5 que registró directividad *forward*: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

Con base en los resultados presentados, se observó la importancia que tiene considerar los efectos de directividad en la generación de registros sintéticos, ya que, si no se consideran, esto conlleva a la subestimación o sobrestimación de las demandas del evento objetivo, según es el caso de directividad registrado en la estación.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los procesos de simulación considerando únicamente efectos de saturación.

IV.I.III. Generación de registros sintéticos considerando efectos de saturación

Como los efectos de saturación dependen de la distancia de la fuente al sitio de estudio, no obstante, existen diversas definiciones de distancias como R_{EPI} o R_{JB} que se pueden emplear para considerar estos efectos; sin embargo, para fines de esta tesis se empleará R_{JB} .

Cálculo de R_{JB}

Como se discutió anteriormente, para este trabajo se calculará R_{JB} como la diferencia de la distancia epicentral a la estación de interés para el evento objetivo (R_{EPI}) y el radio equivalente obtenido a partir de la ecuación (II.21).

$$R_{JB} = R_{EPI} - R_{eq} \quad (III.1)$$

En la Tabla IV.2 se presentan las R_{JB} calculadas para las estaciones en las que simularon los sismos objetivo.

Tabla IV.2. Cálculo de las distancias de Joyner Boore para los eventos simulados.

Evento Objetivo	M_w	A_R (km^2)	R_{eq} (km)	Estación	R_{EPI} (km)	R_{JB} (km)
10/05/14	6.1	115	6.1	SUCH	34	28
				SLU2	27	21
19/09/17	7.1	935	17.3	TNLP	98	80
				CUP5	123	106

IV.1.III.1. Sismo M_w 6.1 del 10 de mayo de 2014 (Tecpán, Guerrero)

Estación El Súchil – **SUCH** (Registró efectos de directividad *backward*)

En la Figura IV.20, se muestran los acelerogramas para el sismo registrado (Figura IV.20a), la EGF (Figura IV.20b) y algunos de los registros sintéticos para las formulaciones de Ordaz (Figura IV.20c) y la que considera efectos de saturación (Figura IV.20d). En términos de duración y amplitudes, los registros sintéticos son representativos del sismo real, en particular, los que se obtuvieron tomando en cuenta saturación tienen amplitudes más cercanas a las del sismo registrado. Al considerar los efectos de saturación, se aprecia la disminución de las amplitudes del movimiento del suelo, comparadas con las de los registros obtenidos con la formulación de Ordaz *et al.* (1995).

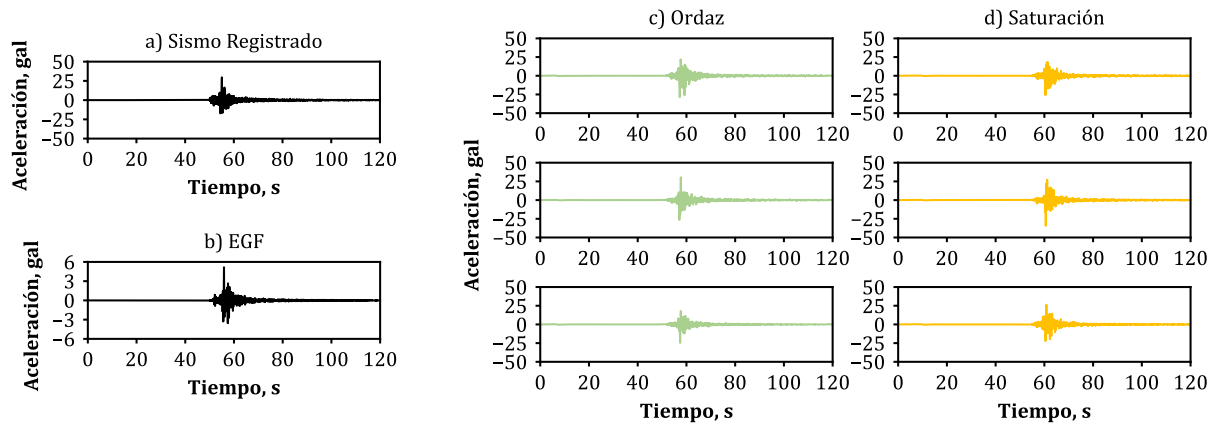


Figura IV.20. Registros sísmicos para la estación SUCH de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación: d) Saturación con R_{JB} de 28 km.

En la Figura IV.21, se presenta la comparativa de la intensidad de Arias normalizada de los sismos: registrado, la EGF y los sintéticos, la duración y liberación de la energía son similares, al igual que cuando se consideraban los efectos de directividad.

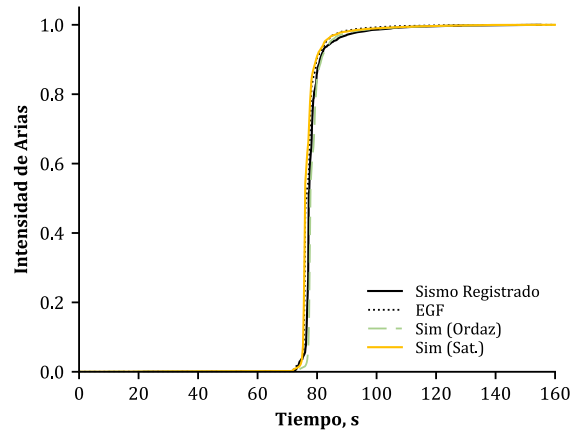


Figura IV.21. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación.

En la Figura IV.22a, se presentan los espectros de respuesta elástica del evento objetivo, de la EGF escalada (con factor de escala de 4) y los espectros promedio de las simulaciones empleando la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995) y la que considera efectos de saturación. Al considerar los efectos de saturación, se presenta una disminución, aunque pequeña, comparada con el espectro promedio obtenido con la formulación de Ordaz. Así como se observó cuando se consideraron efectos de directividad, para periodos mayores a 1.2 segundos, se sobrestiman las amplitudes espectrales, lo cual está asociado a la elección de la EGF y la forma que tiene. Adicionalmente, como la forma de los espectros promedio es muy similar a la del espectro de la EGF, no se logra representar la segunda amplitud máxima (periodo de 1 segundo) del espectro del sismo registrado. Dicha “cresta” en el espectro de respuesta, está asociada a una característica particular ocurrida durante el sismo objetivo.

En la Figura IV.22b, se presenta el espectro de respuesta del evento real y los espectros promedio de las simulaciones, así como promedio más y menos una desviación estándar, en términos generales, el evento objetivo queda comprendido dentro de la envolvente formada por los espectros promedio más y menos una desviación estándar; sin embargo, el ajuste no es más adecuado que cuando se consideraron los efectos de directividad *backward*.

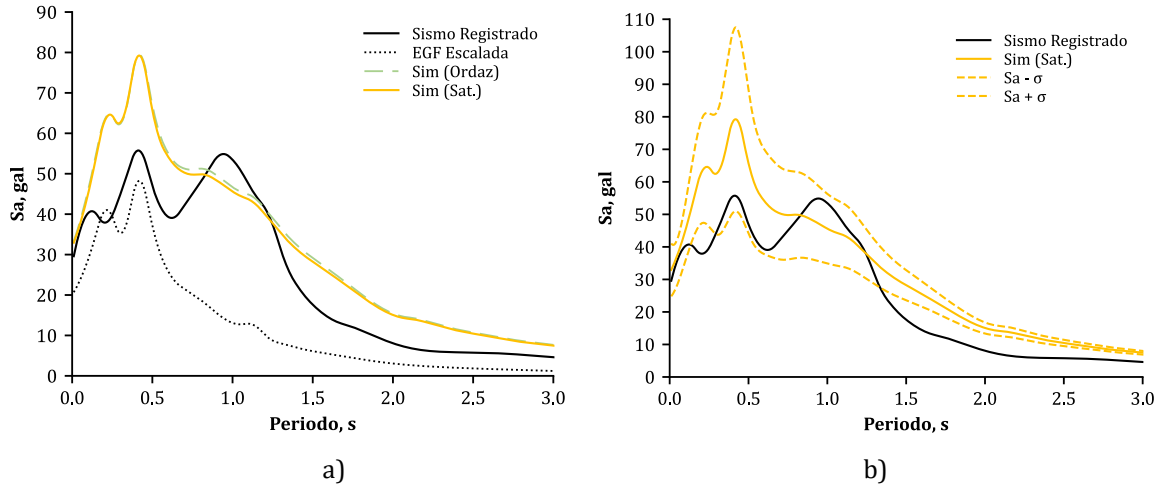


Figura IV.22. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación para R_{JB} de 28 km: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación SUCH.

En la Figura IV.23a, se presentan los espectros de Fourier del sismo registrado, la EGF escalada (con factor de 2) y los espectros promedio para las simulaciones con la formulación de Ordaz *et al.* (1995) y la que considera saturación. El contenido de frecuencias de los espectros promedio es representativo del espectro observado en el sismo registrado, en particular para frecuencias menores a 10 Hz, posterior a 10 Hz, se presenta la subestimación de las amplitudes del evento objetivo. En esta figura, también se puede observar que el espectro promedio obtenido con la formulación propuesta que considera efectos de saturación es casi idéntico que el promedio obtenido con la formulación de Ordaz, esto se debe a que para esta magnitud la R_{JB} a la estación no tiene gran influencia.

En la Figura IV.23b, se observan las relaciones espectrales promedio para las dos simulaciones y la teórica, donde las dos curvas promedio se ajustan de manera adecuada a la relación teórica en todo el rango de frecuencias analizado, esto se debe a que el efecto de saturación fue mínimo en el promedio de las simulaciones, por lo tanto, la relación espectral es prácticamente idéntica.

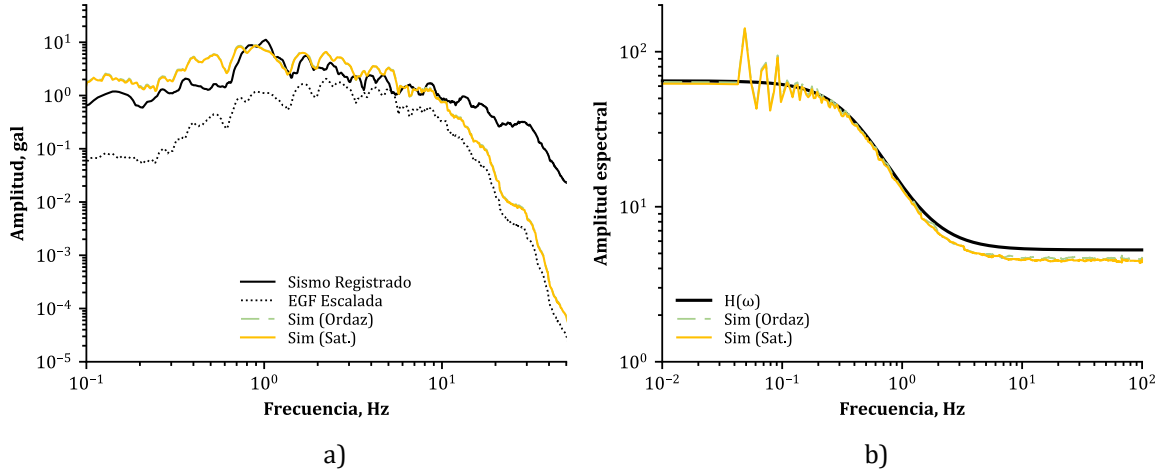


Figura IV.23. Promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación con R_{JB} de 28 km para la estación SUCH: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

Estación San Luis de la Loma – **SLU2** (Registró efectos de directividad *forward*)

En la Figura IV.24, se presentan los registros sísmicos del evento objetivo (Figura IV.24a), de la EGF (Figura IV.24b) y algunos de los sintéticos con las formulaciones de Ordaz (Figura IV.24c) y la que considera efectos de saturación (Figura IV.24d). En términos de duración, los registros sintéticos presentados son representativos del sismo real. En este caso al considerar los efectos de saturación se disminuyen las amplitudes de los registros sintéticos, pero como en esta estación se registró directividad *forward*, las amplitudes de los registros sintéticos obtenidos con la formulación de Ordaz se acercan más a las del evento objetivo, esto quiere decir que considerar únicamente los efectos de saturación no es suficiente para representar el registro del evento objetivo, por lo que se deben considerar los efectos de directividad y saturación.

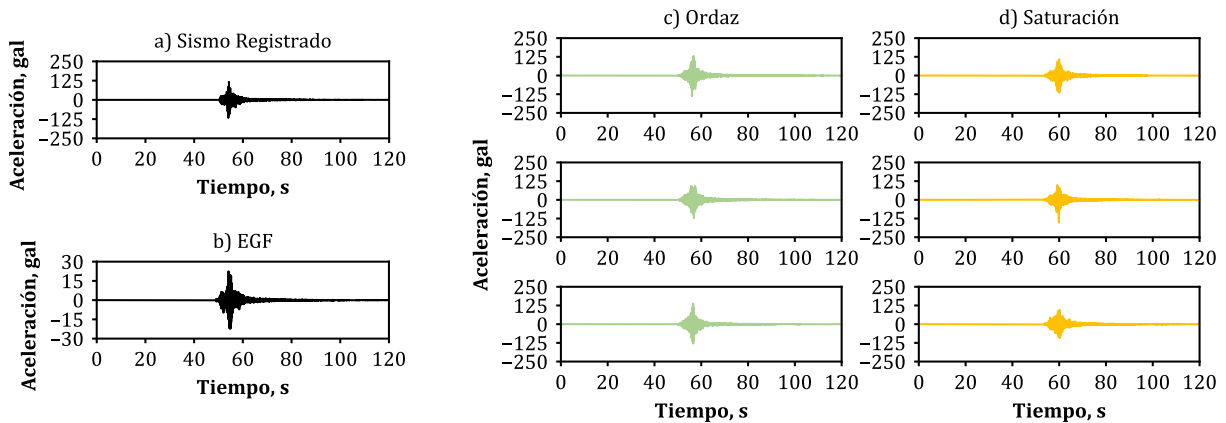


Figura IV.24. Registros sísmicos para la estación SLU2 de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación: d) Saturación con R_{JB} de 21 km.

En la Figura IV.25, se muestran las curvas de intensidad de Arias normalizada para los sismos objetivo y semilla y las curvas promedio para las simulaciones (Ordaz y saturación). En todos los casos, la duración y la liberación de la energía es similar.

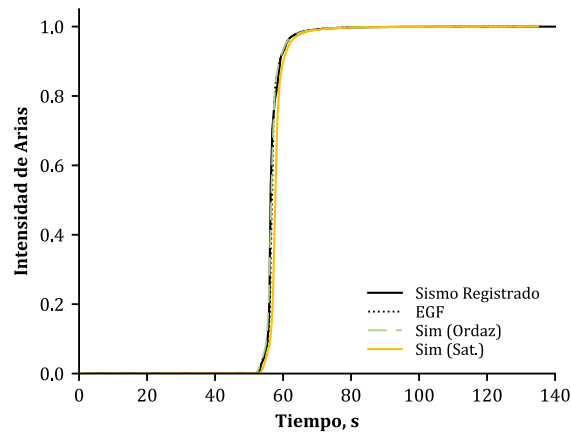


Figura IV.25. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación.

En la Figura IV.26a, se presentan los espectros de respuesta elástica para el sismo registrado, la EGF escalada (con factor de escala de 2.5) y los espectros promedio de las simulaciones para las formulaciones de Ordaz y la propuesta que considera saturación. Se puede observar que al emplear cualquiera de las dos formulaciones, se subestima de manera importante la pseudoaceleración máxima, lo cual era esperado, ya que en esta estación durante el evento objetivo se registraron efectos de directividad *forward*. En la Figura IV.26b, se presentan los espectros promedio y los promedio más y menos una desviación estándar, el espectro del sismo objetivo queda en el límite superior de la envolvente para periodos menores a 0.5 segundos, posterior a este periodo, se subestiman las amplitudes espectrales, lo cual está asociado a la EGF elegida y la forma de su espectro.

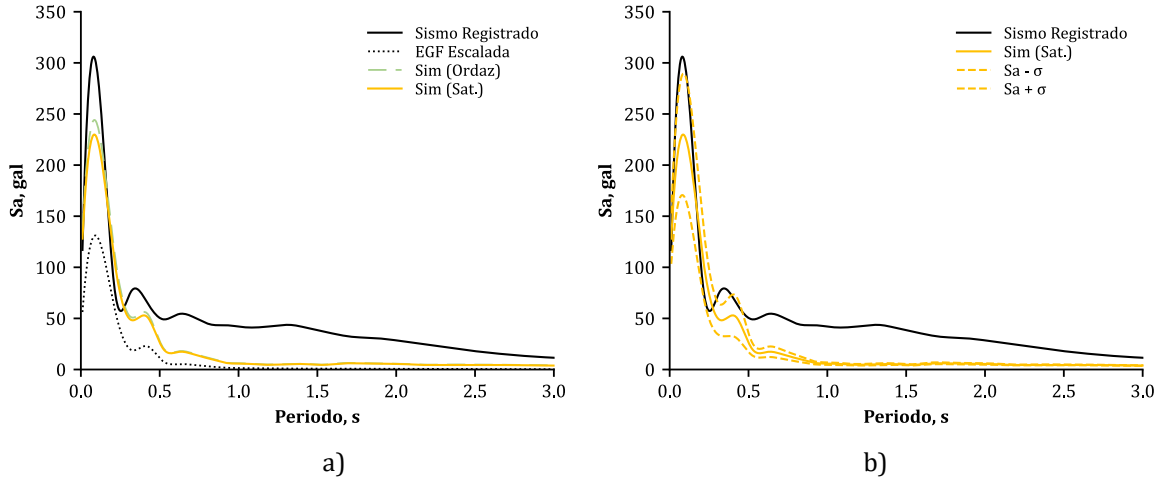


Figura IV.26. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación para R_{JB} de 21 km: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación SLU2.

Los espectros de Fourier del sismo registrado, el espectro escalado de la EGF (con factor de 2) y los espectros promedio de las simulaciones se presentan en la Figura IV.27a. El contenido de frecuencias del promedio de las simulaciones es similar al del sismo objetivo, en particular para frecuencias mayores a 2 Hz. Únicamente entre 0.2 y 2 Hz, los espectros de las simulaciones subestiman el del espectro real. Adicionalmente, similar a lo que se observó en los espectros de respuesta elástica promedio (Figura IV.26a) los efectos de saturación son pequeños, en términos de amplitudes, esto quiere decir que para R_{JB} de 21 km, prácticamente, la totalidad del área de ruptura del evento afecta el movimiento del suelo en el sitio de interés.

En la Figura IV.27b, se presenta la relación espectral teórica y las promedio para las simulaciones. Para todo el rango de frecuencias se presenta un mejor ajuste de la relación espectral para la formulación de Ordaz al modelo teórico.

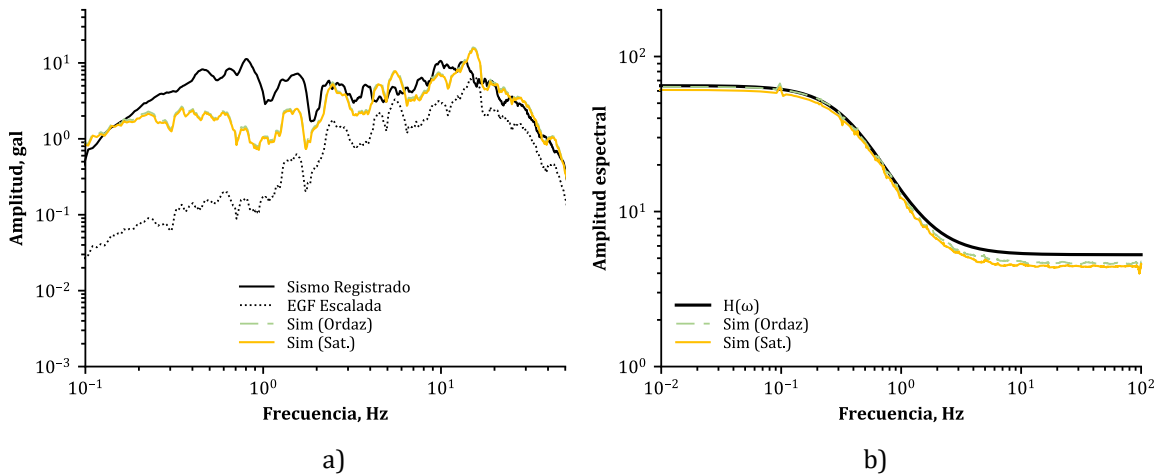


Figura IV.27. Promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación con R_{JB} de 21 km para la estación SLU2: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

IV.I.III.II. Sismo M_w 7.1 del 19 de septiembre de 2017 (Chiautla de Tapia, Puebla)

Estación Tonalapa del Sur – **TNLP** (Registró efectos de directividad *backward*)

En la Figura IV.28, se muestran los registros sísmicos para el evento objetivo (Figura IV.28a), la EGF (Figura IV.28b) y algunos registros sintéticos obtenidos de las simulaciones para la formulación de Ordaz (Figura IV.28c) y la que considera únicamente efectos de saturación (Figura IV.28d). Se observa cómo al considerar los efectos de saturación disminuyen ligeramente las amplitudes de los acelerogramas, sin embargo, no son similares a las del sismo registrado, ya que la EGF empleada registró efectos de directividad *forward*, lo cual hizo que la señal sea como un “pulso”, donde hay una corta duración y amplitudes significativas, por lo tanto, esto también se reprodujo en los registros sintéticos obtenidos.

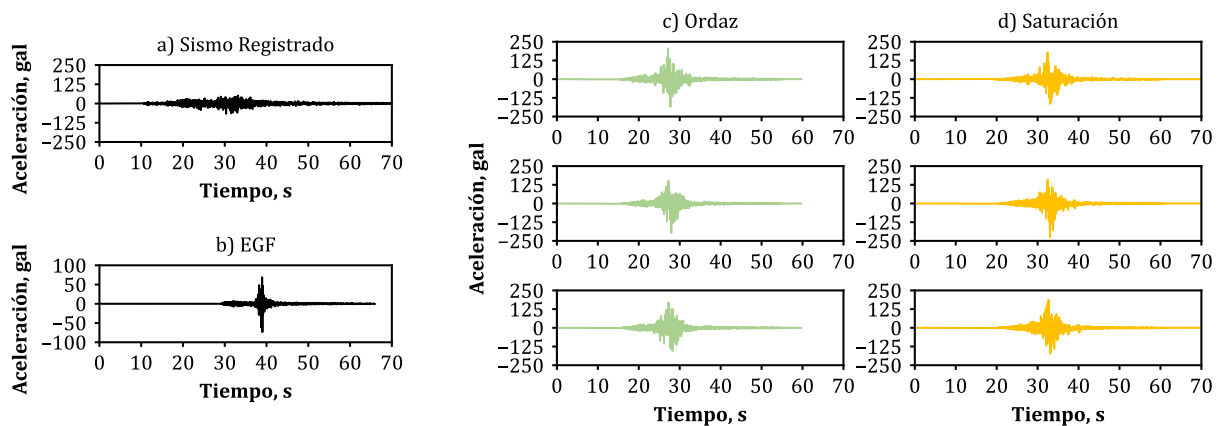


Figura IV.28. Registros sísmicos para la estación TNLP de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación: d) Saturación con R_{JB} de 80 km.

En la Figura IV.29 se presenta la comparación de las curvas de intensidad de Arias normalizada del sismo registrado, de la EGF y las curvas promedio de las simulaciones para la formulación de Ordaz y la que considera efectos de saturación, como se ha observado, las simulaciones tienen curvas muy similares a la de la EGF, sin embargo, en este caso como el sismo registrado presentó directividad *backward* la energía se libera de manera más paulatina y la duración es mayor, ambas características diferentes respecto a las simulaciones, donde se liberó la energía de manera súbita y tuvo menor duración.

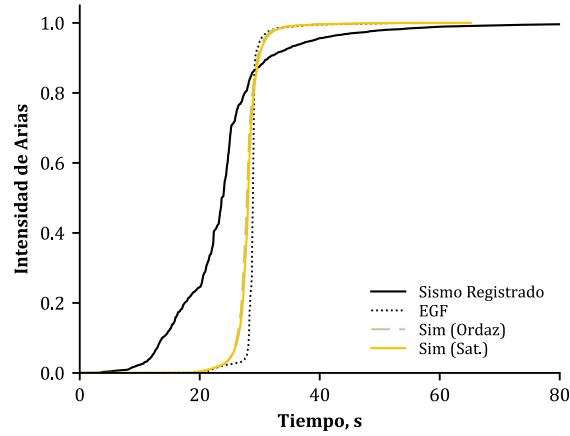


Figura IV.29. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación.

En la Figura IV.30a, se presentan los espectros de respuesta elástica del sismo objetivo, el de la EGF escalada (con un factor de escala de 1.5) y los espectros promedio de las simulaciones. La influencia de los efectos de saturación sobre la disminución de las amplitudes en este caso es pequeña, esto se debe a que la R_{JB} es de 80 km, la cual es cercana a la distancia límite donde dichos efectos dejan de tener influencia sobre las amplitudes, es decir, el área de ruptura del plano de falla afecta casi por completo al movimiento del suelo en el sitio de estudio.

En la Figura IV.30b, se presentan los espectros de respuesta promedio y los espectros promedio más y menos una desviación estándar. En este caso el espectro de respuesta del sismo registrado no queda dentro de la envolvente formada. Esto se asocia a que en esta estación durante el evento objetivo se registraron efectos de directividad *backward*, adicionalmente, la EGF presentó efectos de directividad *forward*, lo cual no se está tomando en cuenta para generar los registros sintéticos.

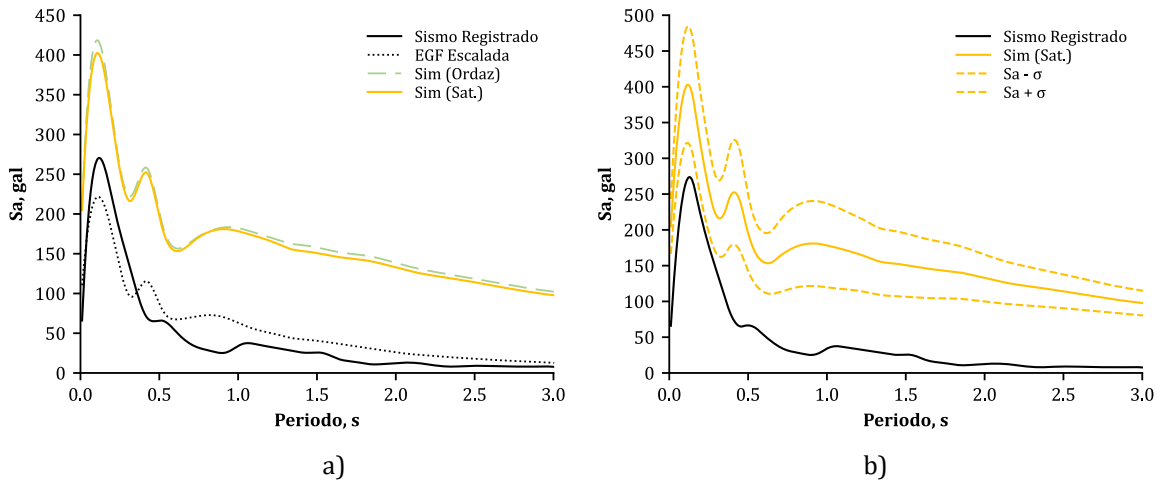


Figura IV.30. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación para R_{JB} de 80 km: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación TNLP.

En la Figura IV.31a, se presentan los espectros de Fourier para el sismo objetivo, el sismo usado como EGF y los espectros promedio para las simulaciones de la formulación de Ordaz y la que considera efectos de saturación. Los efectos de saturación disminuyen ligeramente, en términos de amplitudes, el espectro promedio con respecto al obtenido con Ordaz, al igual que cuando se consideraron únicamente efectos de directividad, debido al ruido que tiene la señal empleada como EGF, y a pesar de haberle aplicado un filtrado paso banda entre 0.1 y 10 Hz, los espectros promedio tienen ruido para frecuencias menores a 1 Hz, ya que en esta parte del espectro se esperaba una rama ascendente.

Para la relación espectral (Figura IV.31b) ambas formulaciones presentan un ajuste adecuado al modelo teórico para el todo el rango de frecuencias analizado.

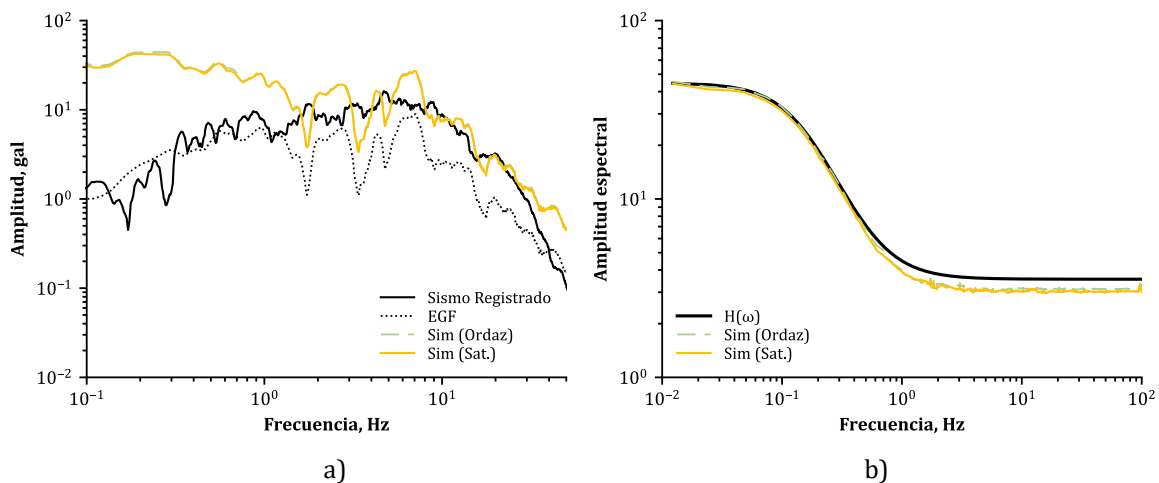


Figura IV.31. Promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación con R_{JB} de 80 km para la estación TNLP: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

Estación IDEI Patio 5 (Caseta del Patio del Instituto de Ingeniería) – **CUP5** (Registró efectos de directividad *forward*)

Se presenta el registro sísmico del evento objetivo (Figura IV.32a), el de la EGF (Figura IV.32b) y algunos de los registros sintéticos obtenidos con la formulación de Ordaz *et al.* (1995) (Figura IV.32c) y con la que considera efectos de saturación (Figura IV.32d). En este caso, para ambas formulaciones se tienen duraciones representativas del evento objetivo; sin embargo, al ignorar los efectos de directividad en las formulaciones, las amplitudes de los acelerogramas obtenidos con la formulación de Ordaz son más parecidas a las del sismo registrado, lo cual resalta la importancia de considerar los efectos de directividad en las simulaciones, en el caso de esta estación, del tipo *forward*, ya que si en una estación se registró este tipo de directividad y únicamente se consideran los efectos de saturación, los cuales reducen las amplitudes de las simulaciones, entonces como se muestra en los resultados, los obtenidos con la formulación propuesta por Ordaz son más parecidos a los del sismo registrado.

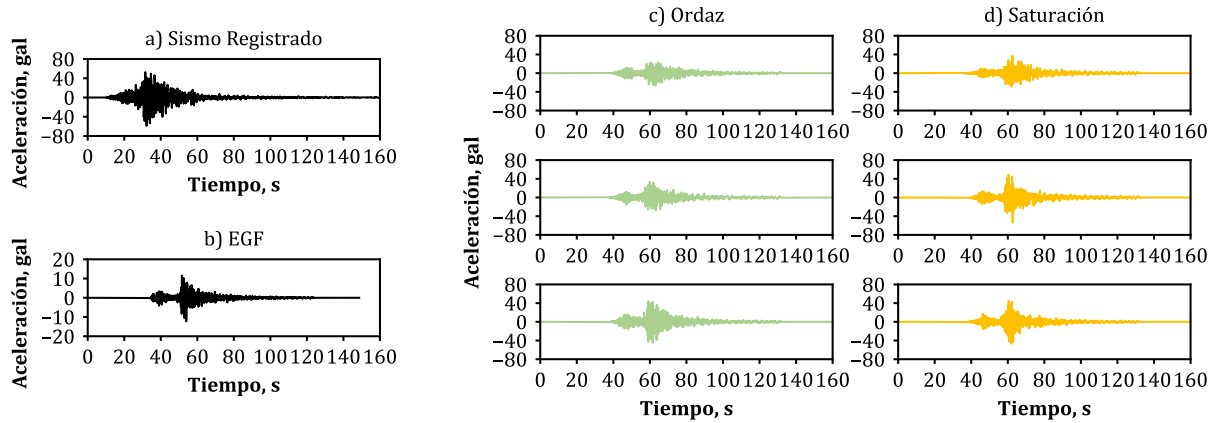


Figura IV.32. Registros sísmicos para la estación CUP5 de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación: d) Saturación con R_{JB} de 106 km.

En la Figura IV.33, se presenta la comparación de las curvas de intensidad de Arias normalizada para el sismo registrado, la EGF y las curvas promedio de las simulaciones, en términos generales, se tiene una duración y liberación de energía similar para todas las curvas.

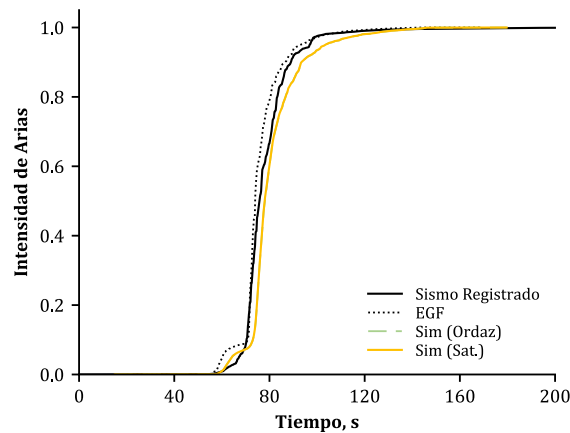


Figura IV.33. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación.

En la Figura IV.34a se presentan los espectros de respuesta elástica para el sismo registrado, la EGF escalada y los espectros promedio de las simulaciones para las formulaciones de Ordaz y la que considera efectos de saturación. Al tener una R_{JB} mayor a 100 km para esta estación, los efectos de saturación son muy pequeños, adicionalmente, como se registró directividad *forward* durante este evento, los espectros de respuesta promedio obtenidos subestiman las amplitudes espectrales para los periodos menores a 3 segundos. Aún, al construir la envolvente con el espectro promedio y los espectros promedio más y menos una desviación estándar (Figura IV.34b), el espectro de respuesta del sismo objetivo no queda dentro de dicha envolvente, esto implica que en ninguna de las mil simulaciones se alcanzaron esos

valores de pseudoaceleraciones, lo cual se esperaba, ya que esta formulación está considerando únicamente los efectos de saturación, por lo tanto, hace falta considerar los efectos de directividad, en particular, de tipo *forward*, tal y como se registraron en CUP5 durante el sismo objetivo.

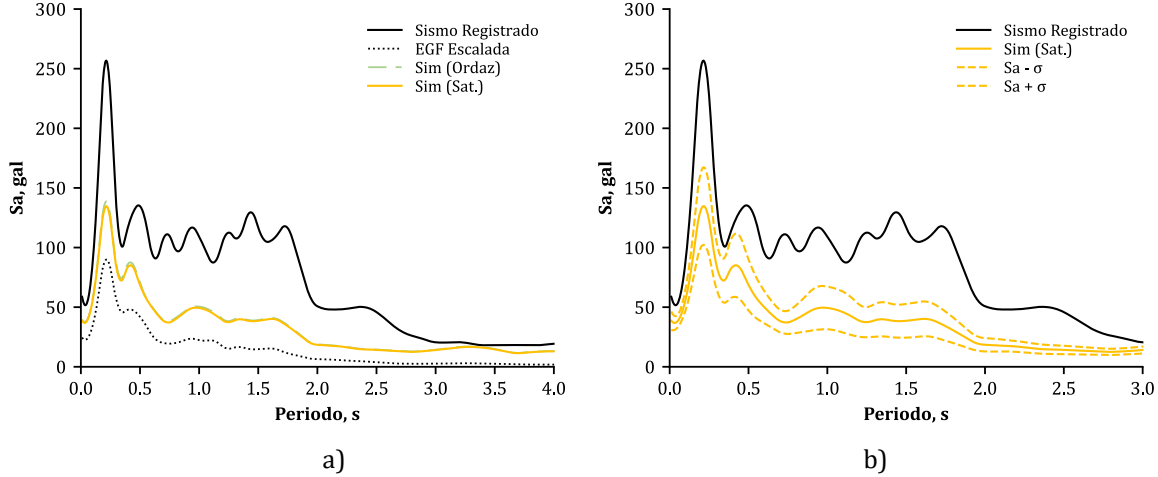


Figura IV.34. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación para R_{JB} de 106 km: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación CUP5.

En la Figura IV.35a, se presentan los espectros de Fourier del sismo registrado, la EGF escalada (con factor de 2) y los espectros promedio de las simulaciones de Ordaz y saturación. Consistente con lo observado en los espectros de respuesta elástica, los espectros de Fourier promedio no alcanzan las amplitudes del espectro del evento objetivo para las frecuencias analizadas, particularmente, para frecuencias mayores a 10 Hz se subestiman de manera más considerable.

En la Figura IV.35b se presentan las relaciones espectrales promedio de las simulaciones y se comparan con la relación teórica. Al igual que en la estación TNLP, la relación espectral promedio de cada simulación se ajusta de manera adecuada al modelo teórico en todo el rango de frecuencias.

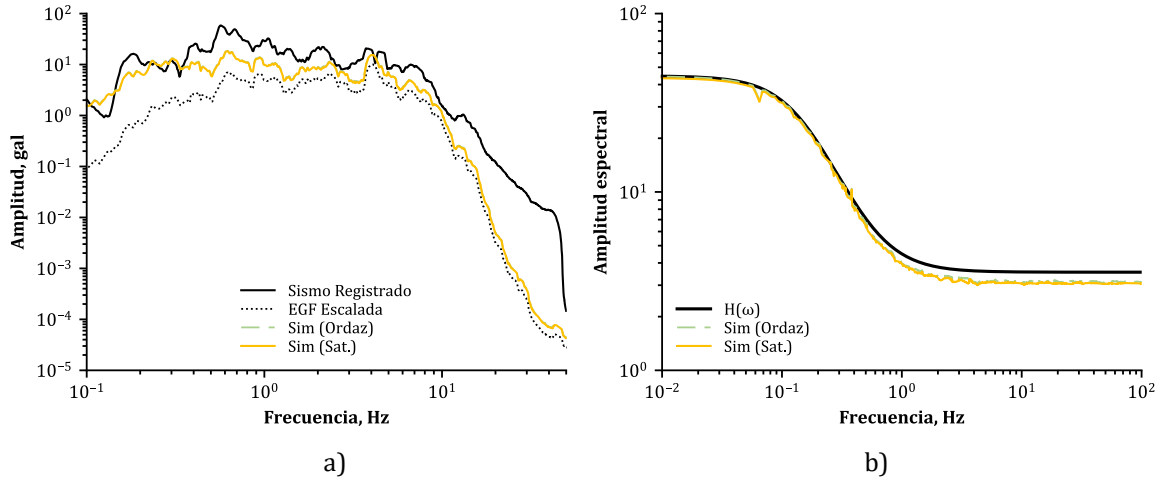


Figura IV.35. Promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación con R_{JB} de 106 km para la estación CUP5: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

Con base en los resultados presentados, se observó la dependencia entre la magnitud del evento y el radio de influencia que tienen los efectos de saturación, como se esperaba, aplicar estos efectos siempre resultará en la disminución de las amplitudes (aceleraciones, velocidades o desplazamientos) de los registros sintéticos. En los sismos comparados en este capítulo esta disminución no fue significativa debido a la R_{JB} de las estaciones estudiadas y la magnitud de los eventos objetivo, lo cual es consistente con lo observado en la Figura III.1. Adicionalmente, como dichos sismos registraron efectos de directividad, y como en esta variante de la formulación no se tomaron en cuenta estos efectos, entonces para los casos con directividad *forward*, la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995) resultó en un mejor ajuste. En términos generales, ignorar los efectos de saturación lleva a la sobrestimación de las demandas sísmicas.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los procesos de simulación considerando simultáneamente los efectos de directividad y saturación.

IV.I.IV. Generación de registros sintéticos considerando efectos de directividad y saturación

IV.I.IV.I. Sismo M_w 6.1 del 10 de mayo de 2014 (Tecpán, Guerrero)

Estación El Súchil – **SUCH** (Registró efectos de directividad *backward*)

Se presentan los registros sísmicos del evento registrado (Figura IV.36a), de la EGF (Figura IV.36b) y algunos de los registros sintéticos para las formulaciones de Ordaz (Figura IV.36c) y la propuesta que considera simultáneamente efectos de saturación y directividad *backward* (Figura IV.36d). En términos de duración y amplitudes, los registros sintéticos con la formulación propuesta en esta tesis son más representativos del evento objetivo que los obtenidos con la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995), lo cual resalta la importancia de considerar explícitamente los efectos de directividad y saturación, en particular, para sitios cercanos a la fuente.

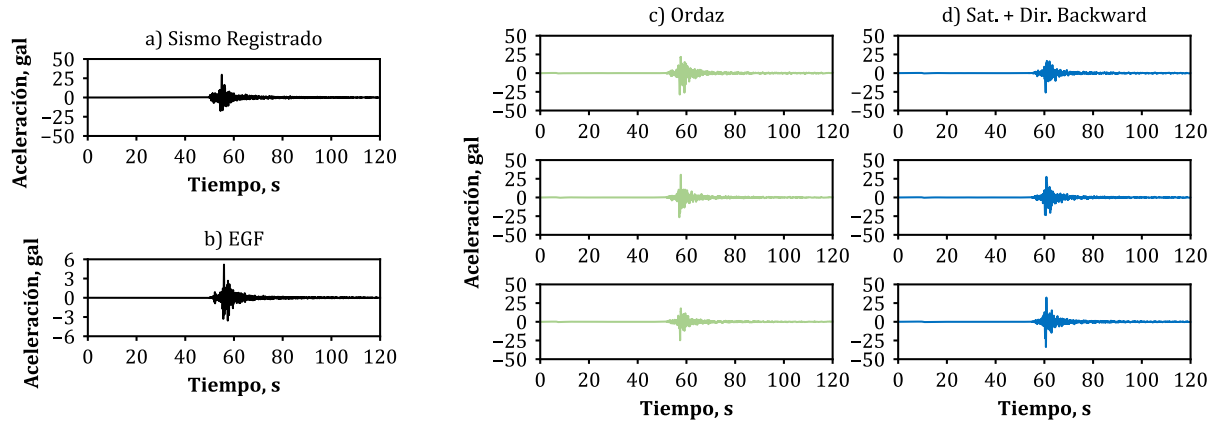


Figura IV.36. Registros sísmicos para la estación SUCH de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación y directividad: d) Saturación con R_{JB} de 28 km y directividad *backward*.

En la Figura IV.37, se presentan las curvas de intensidad de Arias normalizadas del sismo objetivo, de la EGF y las curvas promedio de las diferentes formulaciones, la duración y la liberación de las curvas es prácticamente idéntica.

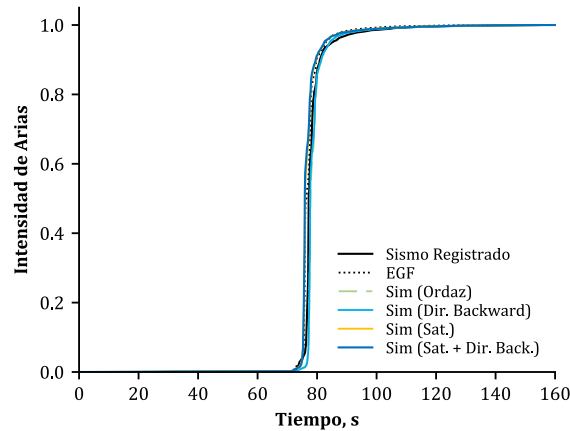


Figura IV.37. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación y directividad.

En la Figura IV.38a, se presentan los espectros de respuesta elástica para el evento objetivo, la EGF escalada (con factor de 4) y los espectros promedio para las simulaciones considerando las formulaciones de Ordaz, la que considera saturación y la que considera simultáneamente directividad *backward* y saturación. Al considerar los efectos simultáneos de directividad *backward* y saturación, se tiene una estimación ligeramente más adecuada del evento observado, con respecto al caso neutro (Ordaz). Al ignorar los efectos de directividad, se sobrestiman las amplitudes espectrales, Lo anterior, particularmente para periodos menores a 1 segundo. En todos los espectros promedio, para periodos mayores a 1.2 segundos, se sobrestima el espectro objetivo, lo cual está asociado a la EGF empleada.

En la Figura IV.38b, se presentan los espectros de respuesta elástica promedio, promedio más y menos una desviación estándar. El espectro del evento objetivo queda comprendido dentro de la envolvente formada, esto implica, que, en algunas de las 1000 simulaciones realizadas, se obtuvo un espectro de respuesta similar al del sismo objetivo.

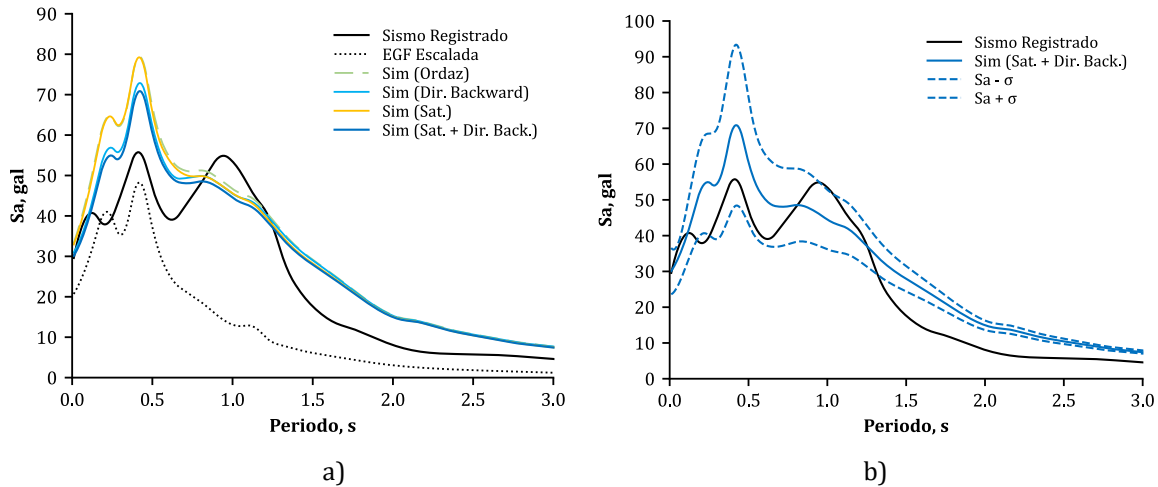


Figura IV.38. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación, para R_{JB} de 28 km, y directividad *backward*: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación SUCH.

En la Figura IV.39a se comparan los espectros de Fourier del evento objetivo, de la EGF escalada (con factor de 2) y los espectros promedio de las simulaciones para las formulaciones de Ordaz, la que considera saturación y la que considera simultáneamente saturación y directividad *backward*. Las amplitudes del espectro promedio de la formulación propuesta son similares a las del sismo objetivo para frecuencias menores a 10 Hz, posteriormente se subestiman las amplitudes, lo cual está asociado a la elección de la EGF, donde se presenta una pendiente más pronunciada en la rama descendente del espectro de aceleraciones.

En la Figura IV.39b, se presentan las curvas de las relaciones espectrales promedio para las diversas simulaciones. Las crestas que se presentan en las relaciones espectrales promedio indican que la EGF contiene ruido. Analizando las diferentes relaciones espectrales se observa que, aunque el ajuste de la formulación con los efectos de saturación y directividad es adecuado, no mejora el obtenido con la formulación de Ordaz; sin embargo, lo anterior no implica que los resultados obtenidos con la formulación propuesta no sean válidos, ya que al analizar los acelerogramas, curvas de Intensidad de Arias, espectros de respuesta elástica y Fourier obtenidos, estos se aproximan de manera más adecuada a los valores del sismo registrado.

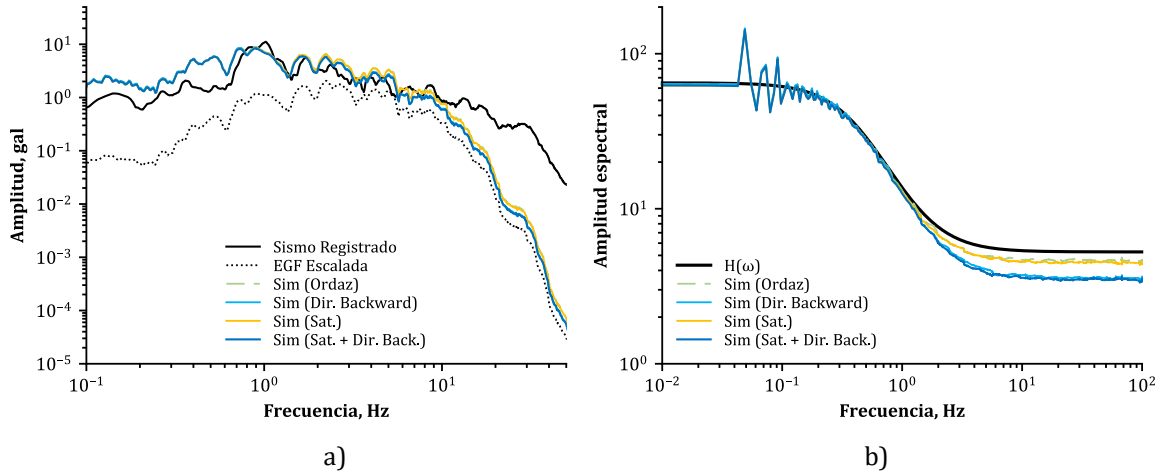


Figura IV.39. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad *backward* y saturación con R_{JB} de 28 km para la estación SUCH: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

Estación San Luis de la Loma – **SLU2** (Registró efectos de directividad *forward*)

Se presentan los registros sísmicos del evento registrado (Figura IV.40a), de la EGF (Figura IV.40b) y algunos de los registros sintéticos para las formulaciones de Ordaz (Figura IV.40c) y la propuesta que considera efectos de saturación y directividad *forward* (Figura IV.40d). Los registros obtenidos con la formulación propuesta se aproximan más al acelerograma del sismo objetivo, particularmente, en términos de amplitudes, ya que, en términos de duración, los registros sintéticos de ambas formulaciones se aproximan de manera adecuada al del sismo objetivo.

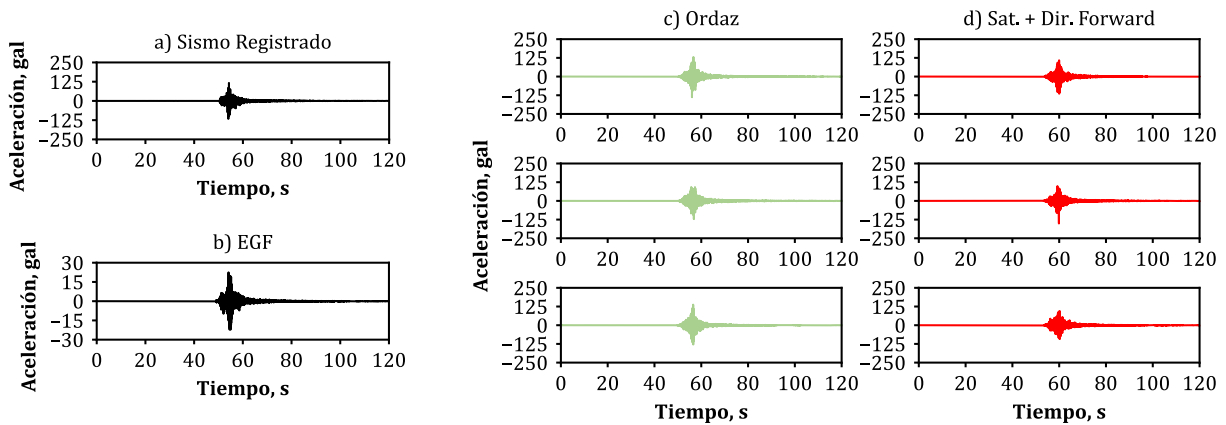


Figura IV.40. Registros sísmicos para la estación SLU2 de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación y directividad: d) Saturación con R_{JB} de 21 km y directividad *forward*.

En las curvas de la intensidad de Arias normalizada (Figura IV.41), se observa que tanto para los sismos objetivo y semilla (EGF) como para las curvas promedio de todas las simulaciones, se tiene que la duración y la liberación de la energía son similares, lo cual es consistente con lo observado en los acelerogramas (Figura IV.40).

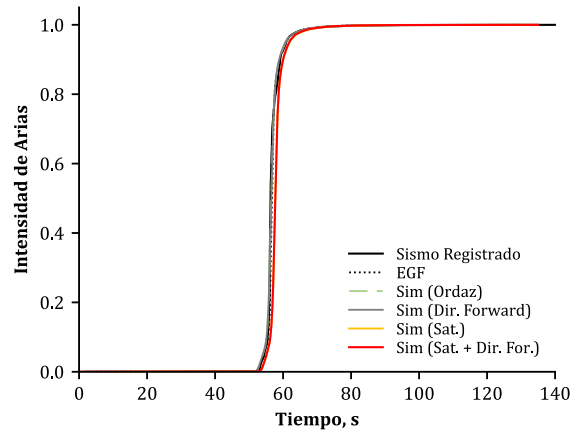


Figura IV.41. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación y directividad.

En la Figura IV.42a, se presentan los espectros de respuesta elástica del sismo objetivo, de la EGF escalada (con factor de 2.5) y los espectros promedio de las simulaciones de las formulaciones de Ordaz, la que considera directividad *forward*, la de saturación y la de saturación y directividad *forward*. Al ignorar los efectos de directividad, es decir, al emplear las formulaciones de Ordaz o la que considera únicamente efectos de saturación, se subestima de manera considerable la pseudoaceleración máxima registrada durante el sismo objetivo, lo cual resalta la importancia de poder simular los efectos de directividad. Aunque para el periodo fundamental del suelo se estima adecuadamente la amplitud, para periodos mayores a 0.5 segundos se subestiman las pseudoaceleraciones y ni al formar la envolvente con los espectros promedio y los promedio más y menos una desviación estándar (Figura IV.42b), se alcanzan las amplitudes para estos periodos, lo cual está asociado a la elección de la EGF, la cual debido a sus características y contenido de frecuencias para periodos mayores a 0.6 segundos, sus pseudoaceleraciones son casi nulas, a diferencia, de las registradas durante el sismo objetivo. Este problema se solucionaría al emplear una formulación que enriquezca el contenido de frecuencias de los registros sísmicos sintéticos, por ejemplo, como la propuesta de González (2023) que simula registros empleando dos EGF's.

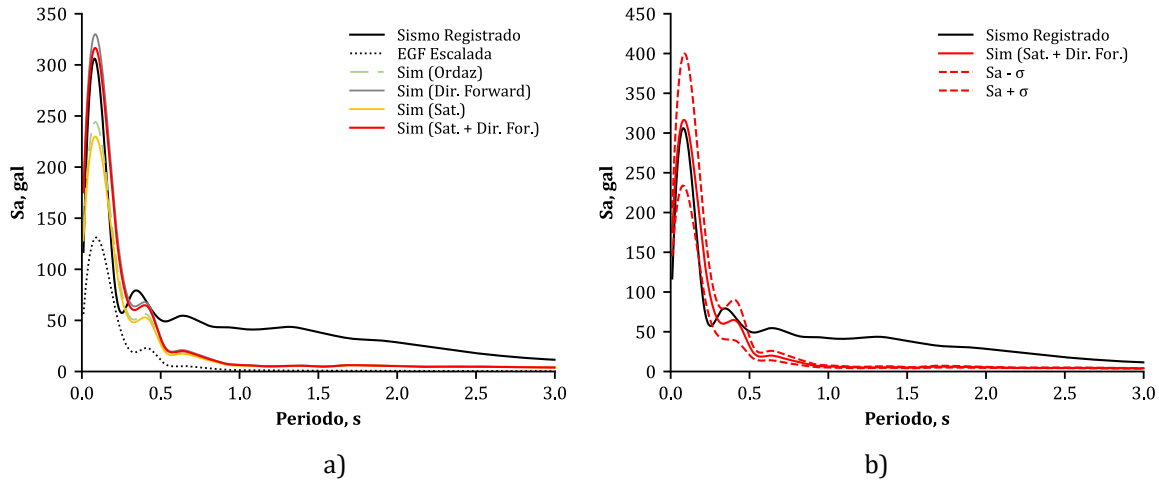


Figura IV.42. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación, para R_{JB} de 21 km, y directividad *forward*: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación SLU2.

En los espectros de Fourier promedio de las simulaciones para las diferentes formulaciones consideradas (Figura IV.43a) se ve que para el rango de frecuencias entre 0.2 y 2 Hz se subestiman las amplitudes del evento objetivo, lo cual es consistente con lo observado en el espectro de respuesta elástica (Figura IV.42a), donde para periodos largos se subestiman las pseudoaceleraciones. Para el resto de las frecuencias se tiene una buena aproximación del espectro promedio al espectro del sismo registrado, lo cual, valida la formulación propuesta, ya que el rango de frecuencias de interés para aplicaciones de ingeniería sísmica va de 0.1 a 10 Hz. Una vez más, considerar simultáneamente los efectos de directividad y saturación para la generación de registros sintéticos, ofrece una mejor definición de la amenaza sísmica, resaltando la importancia de poder tomarlos en cuenta explícitamente, cuando se llevan a cabo procesos de simulación.

De la relación espectral (Figura IV.43b) se observa un buen ajuste para las 4 formulaciones presentadas; sin embargo, la formulación que presenta el mejor ajuste de todas es la que considera simultáneamente efectos de saturación y directividad *forward*.

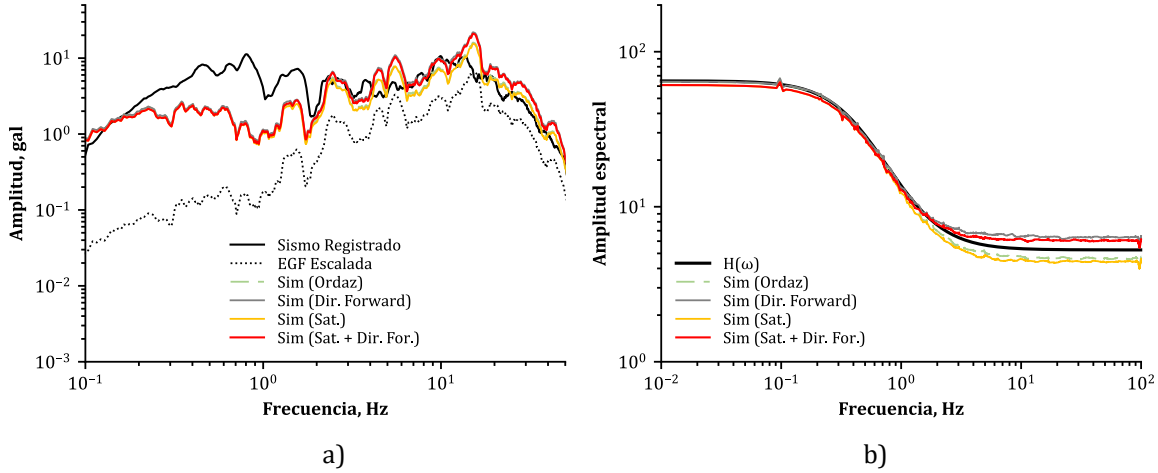


Figura IV.43. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad *forward* y saturación con R_{JB} de 21 km para la estación SLU2: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

IV.IV.II. Sismo M_w 7.1 del 19 de septiembre de 2017 (Chiautla de Tapia, Puebla)

Estación Tonalapa del Sur - **TNLP** (Registró efectos de directividad *backward*)

En la Figura IV.44, se muestran los acelerogramas del sismo registrado (Figura IV.44a), de la EGF (Figura IV.44b) y algunos de los sintéticos obtenidos de las simulaciones para la formulación de Ordaz (Figura IV.44c) y para la formulación propuesta considerando efectos de saturación y directividad *backward* (Figura IV.44d). A pesar de que cuando se toman en cuenta los efectos de directividad *backward* y saturación, disminuyen las amplitudes estas no son representativas del evento objetivo, esto se debe a que el sismo empleado como EGF presentó efectos de directividad *forward*; por lo tanto, tampoco la duración de los registros sintéticos es representativa del evento observado. Emplear una EGF que presentó efectos de directividad *forward* para considerar efectos *backward*, sería equivalente a anular los efectos de directividad, al menos en términos de amplitudes.

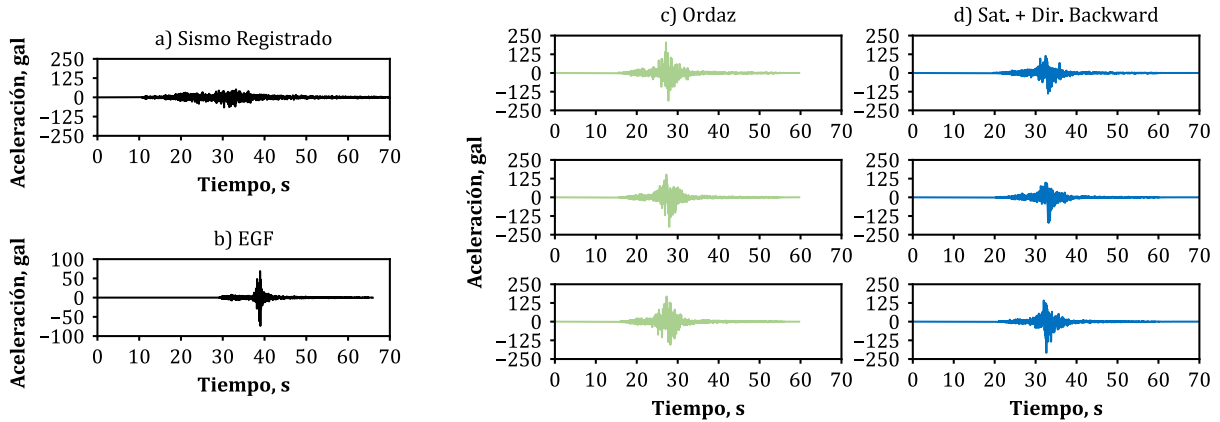


Figura IV.44. Registros sísmicos para la estación TNLP de a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación y directividad: d) Saturación con R_{JB} de 80 km y directividad *backward*.

Para las curvas de intensidad de Arias normalizada (Figura IV.45), las curvas promedio de las simulaciones son prácticamente idénticas a la curva de la EGF, sin embargo, al igual que cuando se consideraban únicamente efectos de directividad o saturación, la liberación de energía es mucho más súbita que la del sismo registrado. Lo anterior es consistente con que la semilla tenga efectos de directividad *forward*, implicando una duración menor.

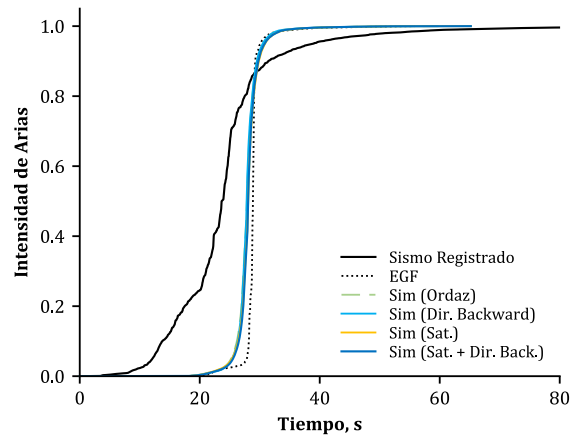


Figura IV.45. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación y directividad.

En la Figura IV.46a, se presentan los espectros de respuesta elástica para el sismo registrado, la EGF escalada (con un factor de 1.5) y los espectros promedio de las formulaciones (Ordaz, directividad *backward*, saturación y saturación con directividad *backward*). Se observa, que para periodos mayores a 0.6 segundos, para todos los espectros promedio de las diversas formulaciones se sobrestiman de manera importante las amplitudes, lo cual está asociado a la elección de la EGF. Como se esperaba, emplear la formulación de Ordaz o la que considera únicamente saturación implica la sobrestimación de las amplitudes espectrales. Al considerar efectos de directividad *backward*, se tiene una mejor aproximación al espectro del sismo registrado, a pesar de que sigue sobrestimando las pseudoaceleraciones, lo cual está asociado al hecho de que la EGF registró efectos de directividad *forward*. Adicionalmente, se presenta el espectro de respuesta promedio y los espectros promedio más y menos una desviación estándar para la formulación propuesta considerando simultáneamente efectos de saturación y directividad (Figura IV.46b), el espectro del sismo objetivo queda representado dentro de la envolvente formada por estos espectros hasta un periodo de aproximadamente 0.3 segundos, lo que implica que para este rango de periodos, al menos una de las simulaciones presentó las pseudoaceleraciones del espectro del sismo registrado.

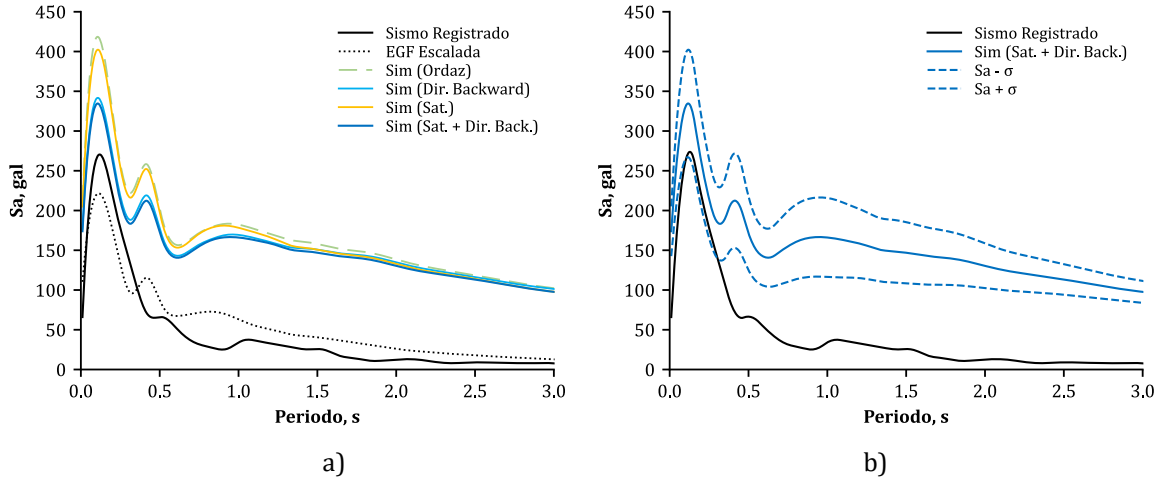


Figura IV.46. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación, para R_{JB} de 80 km, y directividad *backward*: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación TNLP.

Los espectros de Fourier promedio de las simulaciones (Figura IV.47a) alcanzan amplitudes muy parecidas a las del espectro del evento objetivo a partir de 1.5 Hz. Para frecuencias menores a 1.5 Hz, se está sobrestimando el espectro del sismo, ya que como se había observado para las simulaciones obtenidas considerando directividad y saturación, de manera independiente, la EGF tiene ruido en las frecuencias bajas.

En la Figura IV.47b, se presentan las relaciones espectrales promedio para las diversas formulaciones. Para frecuencias menores a 1 Hz se tiene un muy buen ajuste a la relación teórica, para frecuencias mayores, la formulación de Ordaz resulta en un mejor ajuste, esto es únicamente para la relación espectral, para acelerogramas, curvas de Intensidad de Arias y espectros de respuesta elástica y Fourier, con la formulación propuesta se obtienen mejores resultados.

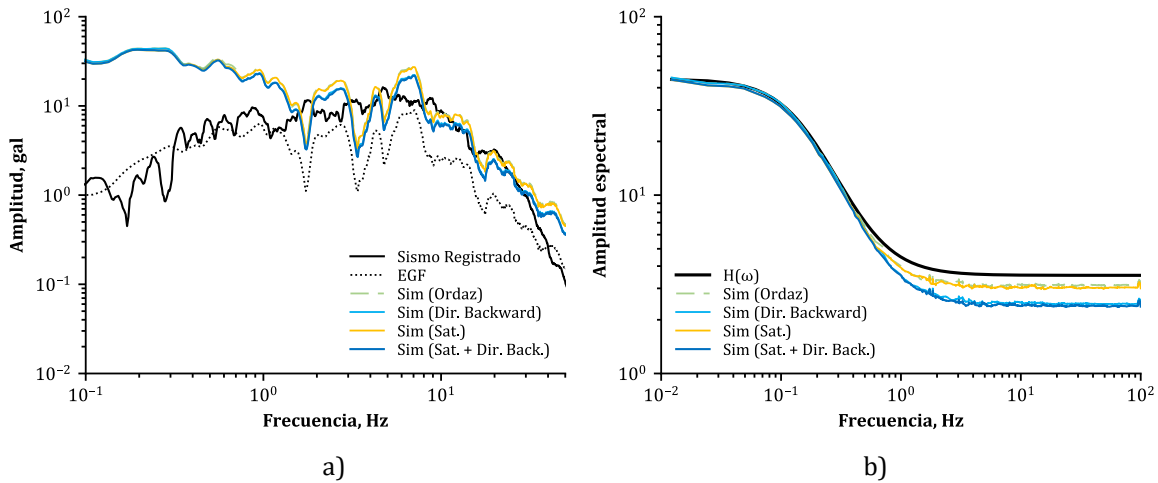


Figura IV.47. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad *backward* y saturación con R_{JB} de 80 km para la estación TNLP: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

Estación IDEI Patio 5 – Caseta del Patio del Instituto de Ingeniería – **CUP5** (Registró efectos de directividad *forward*)

Se presentan los registros sísmicos para el evento objetivo (Figura IV.48a), la EGF (Figura IV.48b) y algunos de los registros sintéticos para las formulaciones de Ordaz (Figura IV.48c) y la propuesta que considera efectos de saturación y directividad *forward* (Figura IV.48d). Al considerar simultáneamente saturación y directividad *forward* se obtienen registros sintéticos mucho más parecidos al acelerograma del sismo registrado, tanto en términos de duración como de amplitudes, mientras que, si únicamente se emplea la formulación de Ordaz, es decir, se ignoran los efectos de directividad, las amplitudes del evento objetivo se subestiman.

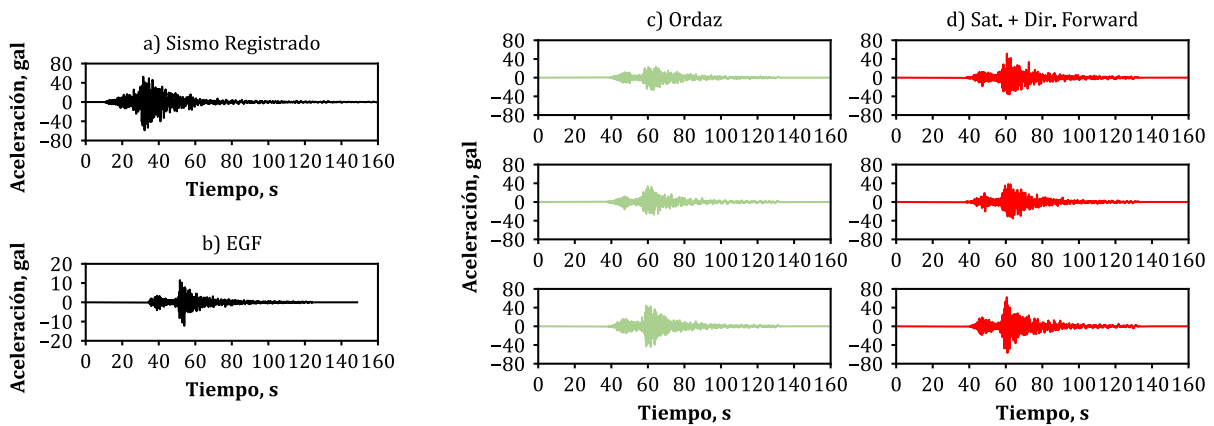


Figura IV.48. Registros sísmicos para la estación CUP5 de a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación y directividad: d) Saturación con R_{JB} de 106 km y directividad *forward*.

En la Figura IV.49, se presentan las curvas de intensidad de Arias normalizada para el promedio de las simulaciones, así como para el sismo objetivo y la EGF, para todas las curvas se observa que la liberación de energía y la duración son similares y representativas del evento registrado.

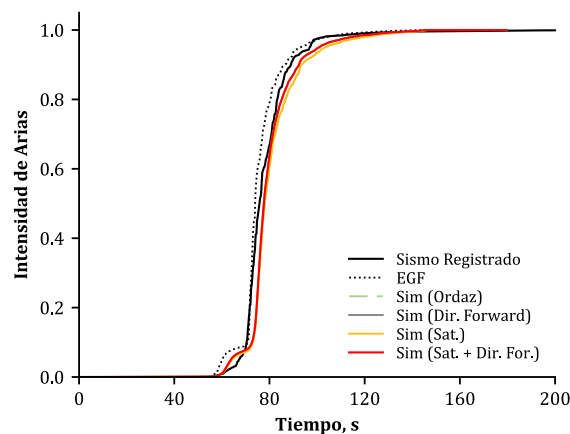


Figura IV.49. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación y directividad.

En la Figura IV.50a, se presentan los espectros de respuesta elástica para el evento objetivo, el escalado de la EGF (con un factor de escala de 2) y los espectros promedio de las simulaciones empleando las diversas formulaciones (Ordaz, directividad, saturación y saturación y directividad simultáneamente). Al considerar los efectos de directividad y saturación, se obtiene una estimación más adecuada del espectro del sismo registrado, resaltando la importancia de considerar los efectos asociados a fuente extendida, ya que de ignorarlos se estarían subestimando las demandas sísmicas. Una característica que no se logra obtener en los espectros promedio, son las “crestas” del sismo registrado, entre los periodos 0.5 y 2 segundos, esto se debe a la elección de la EGF, ya que su espectro no tiene esta característica y, por lo tanto, no es posible reproducir dichas crestas en los espectros promedio de las simulaciones.

En la Figura IV.50b se muestran los espectros de respuesta promedio de las simulaciones considerando los efectos de saturación y directividad *forward*, así como el promedio más y menos una desviación estándar, los cuales forman una envolvente y para periodos menores a 0.6 segundos, el espectro del sismo registrado queda dentro de dicha envolvente, lo cual implica que, en al menos una de las simulaciones, se obtiene un espectro de respuesta casi idéntico, en términos de amplitudes, al espectro del sismo registrado, o bien, visto de otra manera, el sismo real puede considerarse como una de las simulaciones realizadas.

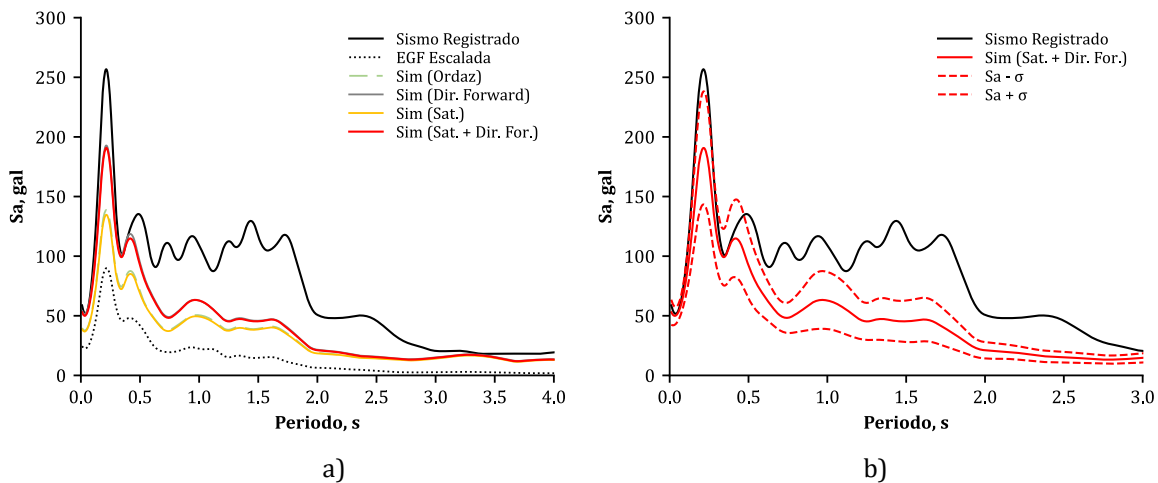


Figura IV.50. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación, para R_{JB} de 106 km, y directividad *forward*: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación CUP5.

En la Figura IV.51a, se muestran los espectros de Fourier del sismo registrado, de la EGF escalada (con factor de escala de 2) y los espectros promedio de las simulaciones. Al igual que para los espectros de respuesta, se ve la variación en las amplitudes al considerar los efectos asociados a la fuente extendida, en este caso, saturación y directividad *forward*, lo cual resalta la importancia de tomar en cuenta simultáneamente los efectos de saturación y directividad cuando se están llevando a

cabo simulaciones para la definición de la amenaza sísmica. Para frecuencias menores a 10 Hz el espectro promedio de la formulación propuesta se ajusta adecuadamente al espectro objetivo, mientras que para frecuencia mayores a 10 Hz se subestima el evento observado, lo cual, como se había discutido anteriormente, está asociado a la elección de la EGF.

En la Figura IV.51b, se presenta la relación espectral para las diferentes simulaciones consideradas y se comparan con el modelo teórico. Para la relación espectral promedio de la formulación que considera saturación y directividad *forward* se tiene un ajuste adecuado al modelo teórico, en particular para frecuencias menores a 1 Hz.

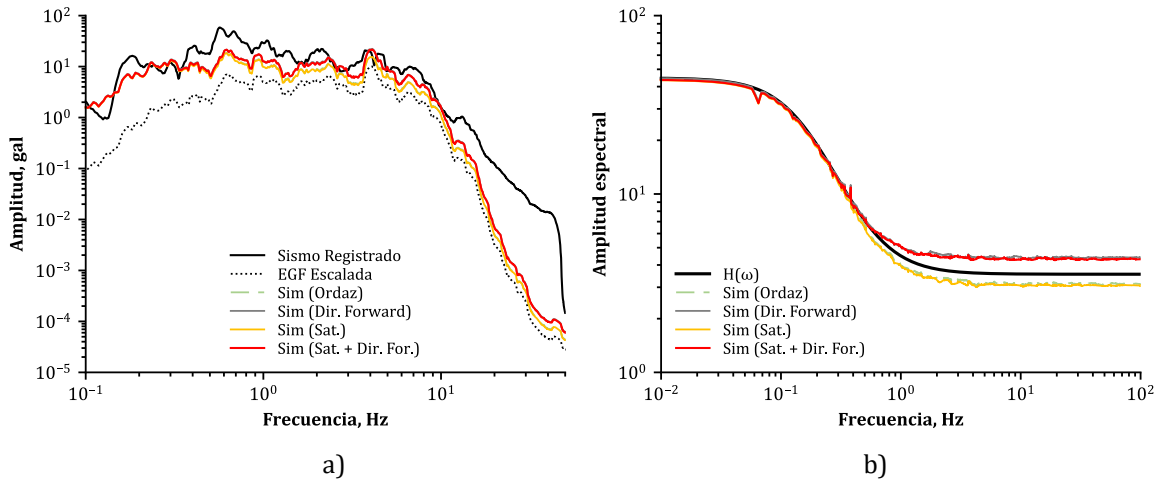


Figura IV.51. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad *forward* y saturación con R_{JB} de 106 km para la estación CUP5: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

Con base en los resultados presentados, se observó cómo el considerar los efectos de saturación y directividad de manera simultánea, mejora la definición de las demandas sísmicas para los registros sintéticos.

Luego de comparar los registros sísmicos sintéticos obtenidos con la formulación propuesta en esta tesis, con los acelerogramas de sismos registrados, se observó la importancia de considerar los efectos de directividad y saturación para mejorar la modelación de la fuente extendida, en particular, los efectos de directividad tienen mayor influencia sobre las amplitudes de los registros sintéticos, mientras que, para los efectos de saturación, dependiendo la magnitud del evento y la distancia R_{JB} a la estación, será la influencia de estos efectos en términos de amplitudes. Los registros sintéticos obtenidos son representativos de los sismos registrados, en términos de amplitudes y duración, así como en la mayoría de los casos, en términos de liberación de la energía, pseudoaceleraciones y contenido de frecuencias.

IV.II. Comparación de la formulación propuesta con otro método de simulación (EXSIM)

EXSIM (Extended Finite Fault Simulation) es un software de simulación sísmica estocástica que parte de un método basado en el concepto de frecuencia de esquina dinámica para modelar la fuente sísmica como extendida, el cual fue desarrollado por Motazedian y Atkinson (2005) al modificar el programa FINSIM propuesto por Beresnev y Atkinson (1998) para implementar el concepto de frecuencia de esquina dinámica.

Para este método, la falla se divide en N_{EX} subfallas, donde cada una de ellas se considera una fuente puntual. En el modelo de frecuencia de esquina dinámica, la frecuencia de esquina está en función del tiempo y el proceso de ruptura modelado controla el contenido de frecuencias del registro generado por cada subfalla (Motazedian y Atkinson, 2005).

El método empleado en el EXSIM (Motazedian y Atkinson, 2005) se considera robusto en sus bases; sin embargo, las desventajas que presenta este método son varias, entre las que se encuentra la gran cantidad de parámetros de entrada que requiere para llevar a cabo las simulaciones, la complejidad asociada a la definición de los parámetros y la sensibilidad de la calidad de los resultados en caso de haber supuesto algunos valores de los parámetros. En el Anexo D, se presentan a detalle los parámetros de entrada que requiere este método.

Adicionalmente, contrario a lo que sucede con los enfoques de suma estocástica con EGF, si se desean incluir efectos de sitio, es necesario que se conozca de antemano la manera en que se amplifican las ondas, es decir, se deben tener factores de amplificación para cada frecuencia, lo cual implica contar con estudios detallados del suelo del sitio, haciéndolo poco práctico para fines de ingeniería sísmica.

Todas las estaciones para las que se presentaron los resultados de las simulaciones, tienen en común que se encuentran en zona de suelo duro, por este motivo, será posible comparar los resultados de la formulación propuesta con los obtenidos de las simulaciones con EXSIM, así como con los espectros de respuesta elásticos para el sismo objetivo registrado.

IV.II.I. Comparación de los resultados

A continuación, se presenta la comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones promedio empleando la formulación propuesta, los resultados obtenidos al emplear el software EXSIM y los espectros del sismo objetivo, para los eventos analizados anteriormente. En el Anexo E, se incluye la comparación de los resultados obtenidos con EXSIM, para el resto de los eventos empleados para validar la formulación.

IV.II.I.I. Sismo M_w 6.1 del 10 de mayo de 2014 (Tecpán, Guerrero)

Estación El Súchil – **SUCH** (Registró efectos de directividad *backward*)

En la Figura IV.52a, se presenta la comparación de los espectros de respuesta elástica y en la Figura IV.52b se presentan los espectros de Fourier, para ambos casos se comparan tres espectros: el del sismo registrado, el promedio de las simulaciones obtenido con EXSIM y el promedio para la formulación propuesta que considera efectos de saturación con R_{JB} de 28 km y directividad *backward*, ya que fue el tipo de directividad registrada durante el sismo objetivo. Para la Figura IV.52a, se observa que para un periodo de 0.1 segundos, EXSIM sobrestima de manera considerable el evento objetivo y para periodos mayores a 0.6 segundos lo subestima, esto se debe a que en EXSIM es necesario ingresar factores de amplificación para cada frecuencia, lo cual vuelve poco práctica su aplicación para fines de la ingeniería sísmica. En términos del contenido de frecuencias (Figura IV.52b), se presenta un mejor ajuste al espectro de Fourier del sismo registrado, al considerar el promedio de las simulaciones con la formulación propuesta, basada en la suma estocástica de EGF, en particular para frecuencias menores a 10 Hz.

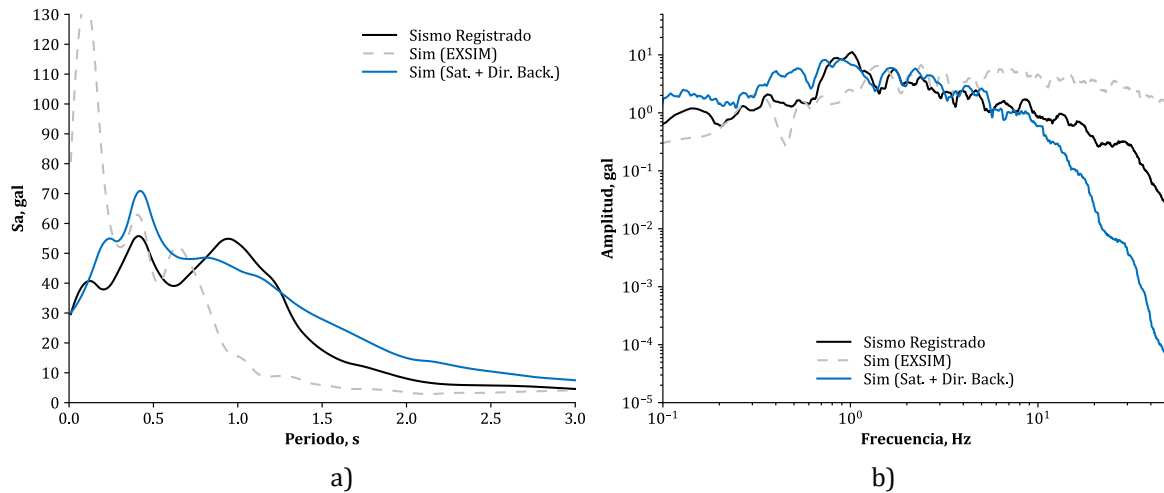


Figura IV.52. Comparación del sismo registrado con los resultados promedio obtenidos para las simulaciones de la formulación propuesta y las obtenidas con EXSIM para la estación SUCH: a) Espectro de respuesta elástica y b) espectro de Fourier.

Estación San Luis de la Loma – **SLU2** (Registró efectos de directividad *forward*)

Para esta estación se puede observar que tanto en términos de amplitudes máximas del espectro de respuesta elástica (Figura IV.53a) como del espectro de Fourier (Figura IV.53b) se tiene un buen ajuste, tanto para la formulación propuesta de simulación, así como la simulación con el software EXSIM. En esta estación, en la formulación propuesta se consideraron los efectos de saturación con R_{JB} de 21 km y directividad *forward*, ya que fue el tipo de directividad registrada durante el sismo objetivo. La pseudoaceleración máxima en el espectro del sismo registrado y en el espectro promedio de las simulaciones empleando la formulación propuesta coincide para un periodo de

0.1 segundos, mientras que, para el espectro de EXSIM, la máxima pseudoaceleración es para alrededor de 0.2 segundos. Para un periodo de 0.5 segundos, el espectro obtenido con EXSIM, presenta una cresta, la cual no se presenta ni en el espectro del sismo objetivo ni el del promedio de las simulaciones. Lo anterior resalta una de las desventajas de emplear EXSIM, debido a que los efectos de sitio se deben determinar a través de factores de amplificación para frecuencias específicas, y aunque el sitio de estudio tiene suelo duro, no se logran reproducir las características del suelo.

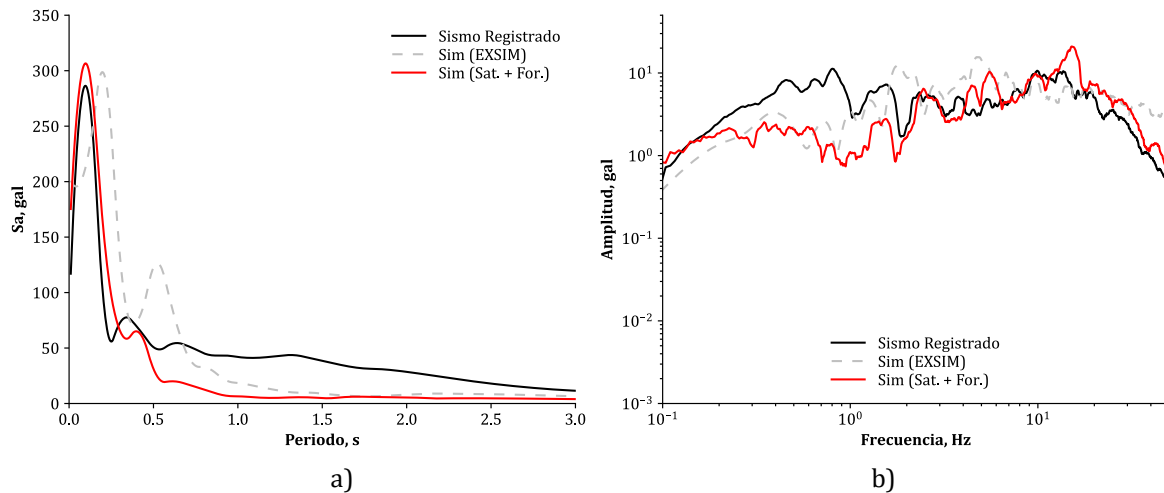


Figura IV.53. Comparación del sismo registrado con los resultados promedio obtenidos para las simulaciones de la formulación propuesta y las obtenidas con EXSIM para la estación SLU2: a) Espectro de respuesta elástica y b) espectro de Fourier.

IV.II.I.II. Sismo M_w 7.1 del 19 de septiembre de 2017 (Chiautla de Tapia, Puebla)

Estación Tonalapa del Sur - **TNLP** (Registró efectos de directividad *backward*)

En la Figura IV.54a, se presentan los espectros de respuesta elástica y en la Figura IV.54b los espectros de Fourier, donde se comparan el del sismo registrado, el promedio para EXSIM y el promedio para la formulación que incluye saturación con R_{JB} de 80 km y directividad *backward*, ya que fue el tipo de directividad registrada durante el sismo objetivo. En términos del espectro de respuesta para los periodos presentados (Figura IV.54a), EXSIM se ajusta de mejor manera al espectro del evento objetivo, a pesar de que también presenta una cresta de amplitud similar a la máxima para un periodo de 0.4 segundos, la cual no se observa en el sismo registrado. La razón por la cual, no se tiene un ajuste adecuado, en particular para periodos mayores a 1 segundo, para el espectro promedio obtenido con la formulación propuesta es que la EGF elegida, no tiene una disminución significativa en las pseudoaceleraciones para dichos periodos, a diferencia del espectro del sismo registrado y del espectro obtenido con EXSIM. Para el contenido de frecuencias (Figura IV.54b), también se presenta un mejor ajuste con EXSIM, en particular para frecuencias bajas, ya que como el método no es empírico, no se tienen problemas de ruido y se tiene el comportamiento esperado de la rama ascendente del espectro; únicamente para frecuencias mayores a 10 Hz, se sobrestiman de manera considerable las amplitudes del espectro del sismo real, para las cuales, el

espectro promedio de la formulación basada en suma de EGF se ajusta adecuadamente. A pesar de que la señal del sismo elegido como EGF se filtró con un filtro paso banda, la señal todavía tiene ruido, entonces para frecuencias bajas del espectro promedio de aceleraciones de las simulaciones, se tiene un comportamiento inesperado, es decir, se tiene una rama descendente, en lugar de una ascendente; sin embargo, a partir de 1 Hz el espectro promedio tiene el comportamiento esperado, se mantiene constante y finalmente, para frecuencias altas tiene una rama descendente.

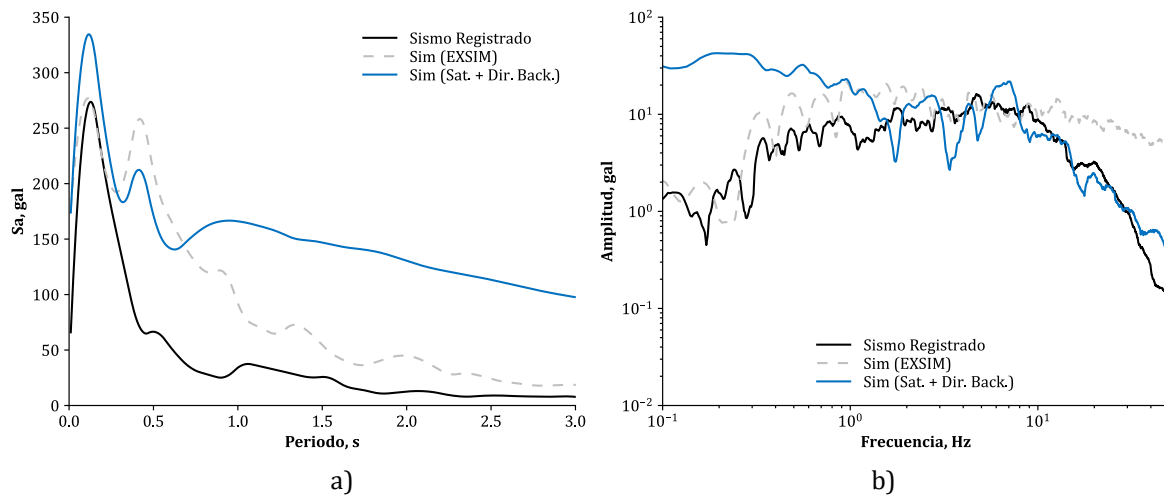


Figura IV.54. Comparación del sismo registrado con los resultados promedio obtenidos para las simulaciones de la formulación propuesta y las obtenidas con EXSIM para la estación TNLP: a) Espectro de respuesta elástica y b) espectro de Fourier.

Estación IDEI Patio 5 – Caseta del Patio del Instituto de Ingeniería – **CUP5** (Registro efectos de directividad *forward*)

En la Figura IV.55, se presentan los espectros de respuesta elástica (Figura IV.55a) y los espectros de Fourier (Figura IV.55b) para el sismo registrado y para los métodos de simulación empleados: EXSIM y el de suma estocástica de EGF con la formulación propuesta, que considera efectos de saturación con R_{JB} de 106 km y directividad *forward*, ya que fue el tipo de directividad registrada durante el sismo objetivo. Aunque para la pseudoaceleración máxima del espectro del evento real y del espectro obtenido con EXSIM se tienen amplitudes similares, para el sismo registrado se presenta para un periodo de 0.2 segundos, mientras que para EXSIM en 0.1 segundos, el mejor ajuste se presenta para periodos menores a 1 segundo y mayores a 2.5 segundos, entre 1 y 2.5 segundos se subestiman las amplitudes espectrales lo cual se debe a efectos particulares del sismo, ya que esto también se presenta en el espectro promedio de la simulación para la formulación propuesta. Al analizar el contenido de frecuencias (Figura IV.55b), para ambos métodos de simulación se tiene un buen ajuste para frecuencias menores a 8 Hz; sin embargo, para el espectro promedio de las simulaciones obtenidas con EXSIM, se sobrestima de manera considerable el espectro objetivo. Al igual que para el resto de las estaciones analizadas, para frecuencias mayores a 10 Hz, los espectros de las simulaciones obtenidas con EXSIM las amplitudes

se mantienen prácticamente constantes, a diferencia del comportamiento observado para los sismos registrados, donde se observa una clara tendencia descendente de las amplitudes.

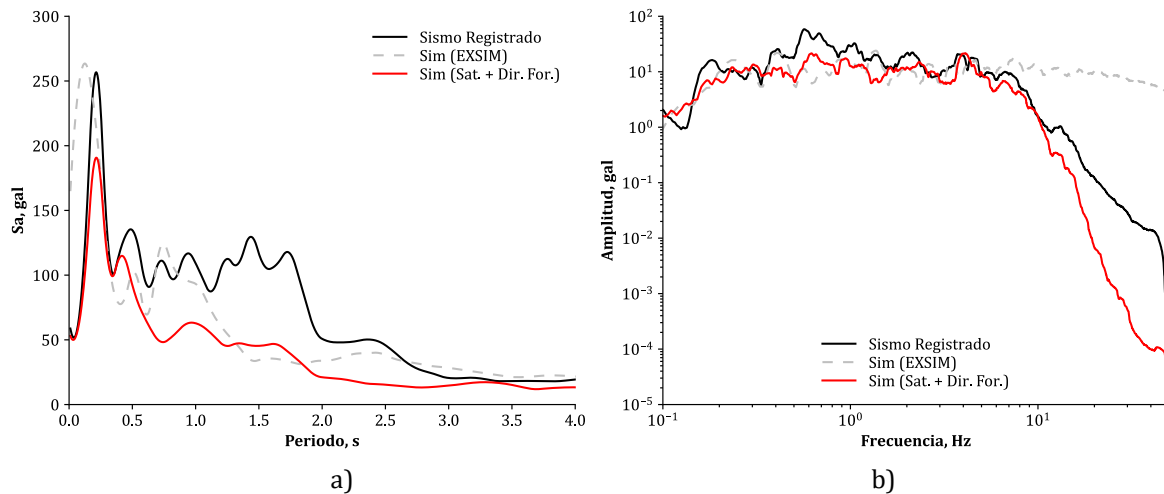


Figura IV.55. Comparación del sismo registrado con los resultados promedio obtenidos para las simulaciones de la formulación propuesta y las obtenidas con EXSIM para la estación CUP5: a) Espectro de respuesta elástica y b) espectro de Fourier.

Comparar los registros sintéticos obtenidos con la formulación propuesta con los obtenidos con EXSIM, resaltó las bondades que tiene la formulación propuesta, que al estar basada en la suma estocástica de EGF, no es necesario contar con información detallada acerca del suelo y conocer cómo se amplifican las frecuencias, ya que esta información se encuentra implícita en la EGF, a diferencia de EXSIM, donde es necesario definir un factor de amplificación para cada frecuencia.

Del contenido de frecuencias de los registros de EXSIM, es importante resaltar que, para todos los casos estudiados, para frecuencias mayores a 10 Hz, cuando para los espectros del sismo registrado y los promedio de las simulaciones con la formulación propuesta se tiene una rama descendente, para el espectro promedio de EXSIM, se mantiene constante, lo cual está asociado a la técnica de simulación empleada en este software; sin embargo, para frecuencias menores a 10 Hz, las amplitudes del espectro de EXSIM son representativas del sismo registrado.

Una bondad de la formulación propuesta es que el usuario puede decidir el tipo de directividad que desea considerar para su simulación, mientras que en EXSIM, no existe esta posibilidad, únicamente es posible determinar la localización de las estaciones, en términos de coordenadas polares, para las cuales se desean obtener los registros.

V. Conclusiones

En esta tesis se presenta una formulación la simulación de registros sísmicos, basada en la suma estocástica de funciones empíricas de Green, para generar registros sísmicos sintéticos en sitios cercanos a la fuente sísmica, tomando en cuenta los efectos asociados a una fuente extendida, particularmente: directividad y saturación. Dicha formulación se basa en aquella propuesta por Ordaz *et al.* (1995), manteniendo la simplicidad que caracteriza la misma al utilizar únicamente como parámetros de entrada los valores de los momentos sísmicos y caídas de esfuerzos de los sismos objetivo y semilla, así como la distancia Joyner-Boore al sitio de estudio.

En el caso de estudio se aplicó la formulación presentada para generar registros sísmicos sintéticos considerando un sismo hipotético de M_w 8.2 generado en la Brecha de Guerrero y registrado en dos sitios: uno en la Ciudad de México (SCT) y el otro en Coyuca, Guerrero (COYC). Debido a la incertidumbre de la localización del epicentro de este sismo, se generaron registros empleando, como EGF's tres registros de sismos diferentes y se compararon los resultados obtenidos, encontrándose diferencias importantes, en términos de duración, amplitudes y contenido de frecuencias, las cuales se debieron a la localización de los epicentros de los sismos semilla, así como la presencia de directividad *forward* en una de las EGF's. Adicionalmente, se encontró que los efectos de saturación son prácticamente despreciables para el sitio de Ciudad de México, por el contrario, para el sitio en Guerrero, estos tienen gran importancia, ya que reducen considerablemente las amplitudes (alrededor de la mitad), en comparación a cuando no se modelan estos efectos.

Para validar la formulación propuesta se simularon y compararon los registros obtenidos con los de cinco sismos mexicanos con evidencias de directividad, para diversos sitios. Adicionalmente, se compararon los resultados obtenidos con esta formulación con los resultados obtenidos con un método estocástico que modela una fuente extendida basándose en el concepto de frecuencia de esquina dinámica (EXSIM) (Motazedian *et al.*, 2005), el cual es considerado como un software con una formulación robusta y es ampliamente aceptado en el ámbito académico; sin embargo, requiere una cantidad significativamente mayor de parámetros de entrada para realizar las simulaciones, lo cual resalta la ventaja de emplear el método de suma estocástica de EGF propuesto en esta tesis, ya que los resultados son similares para ambos métodos pero considerando una menor cantidad de información de entrada. Más aún, una desventaja de EXSIM es que requiere que se indique la amplificación para cada una de las frecuencias en el sitio de estudio, lo cual requiere de un análisis más detallado de las condiciones del sitio, en contraste con el método de suma de EGF, esta información se encuentra de manera implícita en el registro empleado como EGF.

Luego de comparar los resultados obtenidos empleando la formulación propuesta con los registros observados durante los sismos objetivo, así como los resultados obtenidos con EXSIM, se considera que los registros sintéticos son válidos y son representativos

de los eventos objetivo, particularmente, en términos de amplitudes, así como también, de duración y contenido de frecuencias.

Para obtener registros sísmicos sintéticos para sitios cercanos a la fuente, la elección del evento semilla como EGF debe tener rigor, no solo considerando que la fuente y el mecanismo de falla sean los mismos para los eventos objetivo y semilla, sino también, que las distancias epicentrales sean casi idénticas, ya que, si estas distancias son considerablemente diferentes, esto puede conllevar a la sobrestimación y/o subestimación de las demandas sísmicas en el sitio. Asociado a ello, también se debe procurar realizar un filtrado adecuado para las EGF's empleadas, ya que, si cuentan con ruido considerable, este se amplifica en los registros sintéticos, lo cual, a su vez, afecta el contenido de frecuencias de los registros, en particular, como se observó en algunos, casos para frecuencias bajas; sin embargo, para el resto de las frecuencias, las amplitudes sí fueron representativas.

Para la mayoría de las estaciones, se encontró que los registros sintéticos obtenidos son representativos de los registrados durante los eventos, ya que se observó que considerar los efectos de directividad, ya sea *forward* o *backward* mejoró la definición de la amenaza sísmica, es decir, los registros obtenidos se aproximan más al del evento objetivo, principalmente, en términos de amplitudes. Es importante mencionar que una gran ventaja de la formulación propuesta en esta tesis es que, aunque la EGF usada no haya registrado efectos de directividad, es posible obtener registros sintéticos con directividad, ya sea *forward* o *backward*. Adicionalmente, se debe tener precaución al emplear EGF que hayan registrado efectos de directividad, ya que como se pudo observar para la estación TNLP para el sismo M_w 7.1 del 19 de septiembre de 2017 que registró efectos de directividad *backward*, la EGF empleada registró directividad *forward*, por lo cual, al simular para el sismo objetivo considerando directividad *backward*, se anularon los efectos aplicados por la formulación, además de que la duración de los registros simulados era considerablemente menor que la del sismo objetivo.

Aunque para los espectros de cada una de las simulaciones realizadas se tiene variabilidad en términos de amplitudes y contenido de frecuencias; consistente con lo observado por González (2023), al analizar el promedio de las simulaciones se observa que el contenido de frecuencias de los espectros de los registros sintéticos tiene una tendencia similar a la forma del espectro de la EGF, es decir, no varía considerablemente, ya que los espectros de respuesta elástica y de Fourier tienen una forma similar a la del espectro de la EGF; lo cual no es completamente representativo para los eventos de gran magnitud.

Para implementar los efectos de directividad, se empleó el concepto de caída de esfuerzos aparente, C_a , el cual se obtiene mediante el uso de una función de truncamiento al entero inferior o redondeo al entero superior, según sea el caso de directividad considerado. No obstante, una de las limitantes de emplear este concepto,

es cuando el valor de N es muy cercano a un valor entero, ya sea el superior o el inferior. Esto se debe a que el nuevo valor de N , $N_{forward}$ o $N_{backward}$, será prácticamente el mismo, por lo que los valores de C , η y κ serán casi idénticos a los del caso neutral por lo que, los efectos de directividad en términos de amplitudes son casi despreciables.

Dependiendo de la aplicación que se la vaya a dar a los registros sísmicos sintéticos, deberá ser, el tipo de directividad que se deberá considerar, por ejemplo, para fines de diseño se considera aceptable contar con el caso más desfavorable, el cual será cuando en un sitio se presente directividad *forward*; sin embargo, si se desea caracterizar la amenaza sísmica de un sitio, entonces se deben emplear los tres casos: *forward*, *backward* y neutral.

Para implementar los efectos de saturación en la formulación, se emplea el concepto de fuente puntual equivalente, el cual considera que existe una fuente puntual que se encuentra a una distancia efectiva del sitio de estudio, R_{eff} , desde la cual se reproducen los efectos asociados a una fuente extendida. Adicionalmente, para representar la fuente se propuso una geometría circular que representa el plano de falla, cuyas dimensiones se obtienen con base en las expresiones empíricas desarrolladas por Wells y Coppersmith (1994). Además, se verificó que el radio de influencia de los efectos de saturación fuera consistente con la magnitud de los eventos sísmicos objetivo, es decir, cuando se considera una distancia Joyner-Boore suficientemente grande en un sitio dado, los registros sintéticos obtenidos son idénticos a los que se obtienen empleando la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995), la cual considera una fuente puntual, como se observó en el caso de estudio para el sitio en la Ciudad de México. Al considerar únicamente los efectos de saturación, se presenta una reducción, en términos de amplitudes, de los registros sintéticos, la cual dependerá del radio de influencia de estos efectos, por lo que, en algunos sitios pueden ser prácticamente despreciables, mientras que en sitios donde la R_{JB} es pequeña, estos efectos afectan considerablemente las amplitudes, como se observó en el caso de estudio para la estación COYC localizada sobre la brecha de Guerrero, donde las amplitudes, al considerar efectos de saturación, disminuyeron a casi la mitad.

Al generar registros sintéticos considerando simultáneamente los efectos de directividad y saturación, se encontró que estos representaban de manera más aproximada al registro o espectro observado para todos los sismos objetivo, en comparación a los registros sintéticos obtenidos con la formulación propuesta por Ordaz *et al.* (1995), ya que estos últimos sobrestimaban o subestimaban las demandas, dependiendo el tipo de directividad registrada en la estación.

Finalmente, mejorar la definición de las acciones sísmicas es fundamental para poder llevar a cabo análisis probabilísticos de la respuesta estructural, por lo cual, los métodos de simulación sísmica son una alternativa de gran utilidad para este fin, en particular, los basados en la suma estocástica de EGF debido a su simplicidad de aplicación para

fines de ingeniería sismorresistente, lo cual se logra con una mejor aproximación cuando se emplea la formulación propuesta en esta tesis.

V.I. Recomendaciones

Aunque la formulación representa un avance importante en la definición de la amenaza sísmica, para fines de la ingeniería sísmica, en sitios cercanos a la fuente, aún existen diversas áreas de oportunidad y mejora por atender, por ello, a continuación, se proponen las siguientes recomendaciones al método de simulación.

Se debe aplicar la formulación propuesta a formulaciones más recientes que representan de manera más realista la fuente extendida, como lo son la propuesta por Niño *et al.* (2018) que consideran un esquema de suma en dos etapas y un modelo de fuente sísmica definido por dos frecuencias de esquina, así como también a la formulación presentada por González (2023) que emplea dos registros como EGF's.

Se debe considerar un modelo que enriquezca el contenido de frecuencias del espectro del evento objetivo, en particular, para las frecuencias asociadas a eventos de gran magnitud, una manera de hacerlo sería explorando la aplicación del concepto de frecuencia de esquina dinámica, presentado por Motazedian *et al.* (2005).

Para mejorar la representación de los efectos de directividad, se debe proponer una formulación donde no solo se modifiquen las amplitudes, sino que también se modifique la duración de los registros sintéticos.

Como se discutió, los efectos asociados a una fuente extendida son diversos, por lo que, junto con los de directividad y saturación, se deben tomar en cuenta los efectos ocasionados por las asperezas, los cuales no han sido considerados en las formulaciones existentes. Una alternativa sería tomar en cuenta las ideas presentadas por Irikura *et al.* (2011) y adaptarlas para su aplicación en este método.

Por otro lado, es necesario considerar la atenuación de las señales, ya que al dejar de considerar la fuente como puntual, las señales recorren distancias mayores, modificando las características de las señales originales. Se recomienda considerar este efecto a través de la modificación de la EGF empleada con base en la ubicación de cada una de las celdas, como lo propone Jaimes *et al.* (2008).

Se recomienda investigar el uso de registros sintéticos, obtenidos con métodos estocásticos (*e.g.*, Motazedian *et al.*, 2005), como funciones de Green para eventos sísmicos de gran magnitud, en caso de que resulte complicado conseguir los registros de los eventos semilla.

Dado que las expresiones empíricas desarrolladas por Wells y Coppersmith (1994) y por Scherbaum *et al.* (2004), que relacionan las dimensiones del área de ruptura y la profundidad hipocentral con la magnitud del sismo; fueron deducidas a partir de una base de datos mundial de sismos históricos, se recomienda desarrollar expresiones similares empleando bases de datos de sismos mexicanos en el área de interés.

Referencias

- Aagaard, B. (2000) Finite-Element Simulations of Earthquakes. *Tesis de Doctorado, California Institute of Technology, Pasadena, California, EE.UU.* Recuperado de <https://resolver.caltech.edu/CaltechThesis:04292016-090209111>
- Aki, K. (1967) Scaling Law of Seismic Spectrum, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 72, No. 4, pp. 1217-1231.
- Ammon, C., Velasco, A., Lay, T. y Wallace, T. (2020) Foundations of Modern Global Seismology (Segunda edición), *Elsevier*, EE.UU.
- Anderson, J. (2000) Expected shape of regressions for ground-motion parameters on rock, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90, No. 6B, pp. S43–S52.
- Arias, A. (1970) A Measure of Earthquake Intensity, *Cambridge, MA, M.I.T. Press*, pp. 438-483.
- Arroyo, D., Singh, SK., Ordaz, M., Meli, R. y Ramírez, M. (2020) Observed Seismic Intensities and Damage Pattern in Central Mexico during Intrastab Earthquakes of 1999 (M_w 6.9) and 2017 (M_w 7.1), *Geofísica Internacional*, Vol. 59, No. 2, pp. 83-100.
- Arroyo, D., Singh, S., Ordaz, M. e Iglesias, A. (2022) Strong Ground Motion during the 8 September 2021 (M_w 7.0) Acapulco Earthquake: Rupture Directivity and its Effect on Simulated Motions in Mexico City from Postulated M_w 7.5 – 8.0 Earthquakes, *enviado para su publicación en el Journal of Seismology*.
- Atkinson, G. y Boore, D. (1998) Evaluation of Models for Earthquake Source Spectra in Eastern North America, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 88, No. 4, pp. 917-934.
- Atkinson, G. y Silva, W. (2000) Stochastic modeling of California ground motions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90, No. 2, pp. 255-274.
- Baker, J., Bradley, B. y Stafford, P. (2021) Seismic Hazard and Risk Analysis, *Cambridge University Press* (Primera edición), Reino Unido.
- Bakun, W. (1980) Seismic Activity on the Southern Calaveras Fault in Central California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 70, No. 4, pp. 1181-1197.
- Beresnev, A. y Atkinson, G. (1997) Modelling Finite-Fault Radiation from the Spectrum, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 87, No. 1, pp. 67-84.
- Beresnev, I. y Atkinson, G. (1998) FINSIM—a FORTRAN Program for Simulating Stochastic Acceleration Time Histories from Finite Faults, *Seismological Research Letters*, Vol. 69, No. 1, pp. 27-32.
- Boatwright, J. (2007) The Persistence of Directivity in Small Earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 6, pp. 1850–1861.

- Boore, D. (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. (1996) SMSIM – Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: version 1.0, *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 96-80-A.
- Boore, D. (2003) Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method, *Pure applied geophysics*, 160, pp. 635-676.
- Boore, D. (2005) SMSIM - Fortran Programs for Simulating Ground Motions from Earthquakes: Version 2.3 - A Revision of OFR 96-80-A, *U.S. Geological Survey: Estados Unidos*.
- Boore, D. (2009) Comparing Stochastic Point-Source and Finite-Source Ground-Motion Simulations: SMSIM and EXSIM, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 6, pp. 3202-3216.
- Brune, J. (1970) Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves of earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, No. 26, pp. 4997-5009.
- Chen, S. y Atkinson, G. (2002) Global Comparisons of Earthquake Source Spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92, No. 3, pp. 885-895.
- Clinton, J. (2004) Modern Digital Seismology: Instrumentation, and Small Amplitude Studies in the Engineering World, *Tesis de Doctorado, California Institute of Technology, Pasadena, California, EE. UU.*
- Comisión Federal de Electricidad, CFE. (2015) Manual de diseño de obras civiles: diseño por sismo. Instituto de Investigaciones Eléctricas: México.
- Courboux, F., Vallée, M., Causse, M. y Chounet, A. (2016) Stress-Drop Variability of Shallow Earthquakes Extracted from a Global Database of Source Time Functions, *Seismological Research Letters*, Vol 87, No. 4, pp. 912-918.
- Cornell, C. (1968) Engineering seismic risk analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 58, No. 5, pp. 1583-1606.
- Cotton, F., Archuleta, R. y Causse, M. (2013) What is sigma of the stress drop?, *Seismological Research Letters*, Vol. 84, No. 1, pp. 42-48.
- Cruz-Atienza, V., Ito, Y., Kostoglodov, V., Hjörleifsdóttir, V., Iglesias, A., Tago, J., Calò, M., Real, J., Husker, Al., Ide, S., Nishimura, T., Shunohara, M., Mortera-Gutierrez, C., García, S. y Kido, M. (2018) A Seismogeodetic Amphibious Network in the Guerrero Seismic Gap, Mexico, *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 4, pp. 1435-1449.
- Ding, H., Yu, Y., Luo, G. y Liao, J. (2012) 3D Finite-element Method of Ground Motion Simulation, *15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal*.

Esteva, L. (1967) Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico. *3er Simposio Panamericano de Estructuras, Caracas, Venezuela*.

García, D., Singh, S., Herráiz, M., Pacheco, J. y Ordaz, M. (2004) Inslab Earthquakes of Central Mexico: Q, Source Spectra and Stress Drop, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 3, pp. 789-802.

González, C. (2023) Definición de Demandas Sísmicas para el Diseño de Estructuras basándose en Conceptos de Resiliencia, *Tesis de Doctorado, Posgrado en Ingeniería, UNAM, México*.

Hanks, T. y McGuire, R. (1981) The character of high-frequency strong ground motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No. 6, pp. 2071-2095.

Hartzell, S. (1978) Earthquake Aftershocks as Green's Functions, *Geophysical Research Letters*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-4.

Honoré, L., Courboux, F. y Souriau, A. (2011) Ground motion simulations of a major historical earthquake (1660) in the French Pyrenees using recent moderate size earthquakes, *Geophysical Journal International*, Vol. 187, No. 2, pp. 1001-1018.

Iglesias, A., Singh, S., Castro-Artola, O., Pérez-Campos, X., Corona-Fernandez, R., Santoyo, M., Espíndola, V., Arroyo, D. y Franco, S. (2022) A Source Study of the M_w 7.0 Acapulco, Mexico, Earthquake of 8 September 2021, *Seismological Research Letters*, Vol. 93, No. 6, pp. 3205-3218.

Irikura, K. y Miyake, H. (2011) Recipe for Predicting Strong Ground Motion from Crustal Earthquake Scenarios, *Pure Applied Geophysics*, Vol. 168, pp. 85-104.

Ikegami, Y., Koketsu, K., Kimura, T. y Miyake, H. (2008) Finite-element simulations of long-period ground motions: Japanese subduction-zone earthquakes and the 1906 San Francisco earthquake, *Journal of Seismology*, Vol. 12, pp. 161-172.

Jaimes, M. (2008) Empirical Green's Functions Modified by Attenuation for Sources Located at Intermediate and Far Distances from the Original Source, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 12, pp. 584-595.

Jaimes, M. (2010) A seis meses del temblor del Mayor-Cucapah, Baja California, del 4 de abril de 2010 ($M_w = 7.2$), Boletín ERNtérate. ERN, Recuperado de <https://www.ern.com.mx/boletines/InformesDanos/101004-S.pdf>

Joyner, W. y Boore, D. (1981). Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No. 6, pp. 2011-2038.

Joyner, W. y Boore, D. (1986) On Simulating Large Earthquakes by Green's-Function Addition of Smaller Earthquakes, *American Geophysical Monograph*, Vol. 37, pp. 269-274.

Kamae, K., Irikura, K. y Pitarka, A. (1998) A Technique for Simulating Strong Ground Motion Using Hybrid Green's Function, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 88, No. 2, pp. 357-367.

Kanamori, H. y Anderson, D. (1975) Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 65, No. 5, pp. 1073-1095.

Kanamori, H. (1977) The Energy Release in Great Earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 82, No. 20, pp. 2981-2987.

Kohrs-Sansorny, C., Courboux, F., Bour, M. y Deschamps, A. (2005) A two-stage method for ground-motion simulation using stochastic summation of small earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 4, pp. 1387-1400.

Kostoglodov, V. y Pacheco J. (1999). Cien Años de Sismicidad en Mexico, Poster, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

Luo, Y., Tan, Y., Wei, S., Helmberger, D., Zhan, Z., Ni, S., Hauksson, E y Chen, Y. (2010) Source Mechanism and Rupture Directivity of the 18 May 2009 M_w 4.6 Inglewood, California, Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 100, No. 6, pp. 3269-3277.

McCann, W., Nishenko, S., Sykes, L. y Krause, J. (1979) Seismic gaps and plate tectonics: Seismic potential for major boundaries, *PAGEOPH*, Vol. 117, pp. 1082-1147.

McGuire, R. (2004) Seismic Hazard and Risk Analysis, *Earthquake Engineering Research Institute, Risk Engineering Inc., Colorado, EE.UU.*

Melgar, D., Pérez-Campos, X., Ramírez-Guzmán, L., Spica, Z., Espíndola, V., Hammond, W. y Cabral-Cano, E. (2018) Bend faulting at the edge of a flat slab: the 2017 M_w 7.1 Puebla-Morelos, Mexico earthquake, *Geophysical Research Letters*, Vol. 45, pp. 2633-2641.

Mori, J. (1996) Rupture Directivity and Slip Distribution of the M 4.3 Foreshock to the 1992 Joshua Tree Earthquake, Southern California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No. 3, pp. 805-810.

Motazedian, D. y Atkinson, G. (2005) Stochastic Finite-Fault Modeling Based on a Dynamic Corner Frequency, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 3, pp. 995-1010.

Neely, J., Stein, S. y Spencer, B. (2020) Large Uncertainties in Earthquake Stress-Drop Estimates and Their Tectonic Consequences, *Seismological Research Letters*, Vol. 91, No. 4, pp. 2320-2329.

Niño, M. (2008) Desarrollo y Aplicación de Espectros de Peligro Uniforme en la Evaluación y Diseño Sísmico de Estructuras Basados en el Desempeño, *Tesis de Doctorado, Posgrado en Ingeniería, UNAM, México*.

Niño, M., Ayala, G. y Ordaz, M. (2018) Ground-Motion Simulation by the Empirical Green's Function Method with a Source Define by Two Corner Frequencies and a Two-Stage Summation Scheme, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 108, No. 2, pp. 901-912.

Okawa, I., Satoh, T., Sato, T. y Nishikawa, T. (2012) An Empirical Evaluation of Long-Period Earthquake Motion for Building Design, *15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal*.

Ordaz, M., Arboleda, J. y Singh, K. (1995) A scheme of random summation of an empirical Green's function to estimate ground motions from future large earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 6, pp. 1635-1647.

Pitarka, A., Somerville, P., Yoshimitsu, F., Uetake, T. y Irikura, K. (2000) Simulation of Near-Fault Strong-Ground Motion Using Hybrid Green's Functions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90, No. 3, pp. 566-586.

Pujol, J. y Herrmann, B. (1990) A Student's Guide to Point Source in Homogeneous Media, *Seismological Research Letters*, Vol. 61, No. 3-4.

Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería (RAII-UNAM) (2023), Sistema de Base de Datos Acelerográficos, recuperado el 28/11/23 de: <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/>

Redmon, N. (2002) A gentle introduction to the FFT, *EARLEVEL Engineering*, Recuperado de <http://www.earlevel.com/main/2002/08/31/a-gentle-introduction-to-the-fft/>

Rodríguez, M. (2005) Análisis modal operacional: Teoría y práctica, *Tesis de Licenciatura, Escuela Superior de Sevilla, España*.

Rogers, A. y Perkins, D. (1996) Monte Carlo simulation of peak acceleration attenuation using a finite-fault uniform-patch model including isochron and extremal characteristics, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No. 1A, pp. 79-92.

Satoh, T., Okawa, I., Nishikawa, T., Sato, T. y Seki, M. (2010) Prediction of Waveforms of Long-Period Ground Motions for Hypothetical Earthquakes using Empirical Regression Relations of Response Spectra and Phase Spectra, *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 75, No. 649, pp. 521-530.

Sauter, F. (1990) Introducción a la sismología (Primera edición), *Editorial Tecnológica de Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica*, Costa Rica.

Scherbaum, F., Schmedes, J. y Cotton, F. (2004) On the Conversion of Source-to-Site Distance Measures for Extended Earthquake Source Models, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 3, pp. 1053-1069.

Sedaghati, F. (2018) Simulation of Strong Ground Motions using the Stochastic Summation of Small to Moderate Earthquakes as Green's Functions, *Tesis de doctorado, The University of Memphis, EE.UU.*

Seekins, L. y Boatwright, J. (2010) Rupture Directivity of Moderate Earthquakes in Northern California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 100, No. 3, pp. 1107-1119.

Singh, S., Astiz, L. y Havskov, J. (1981) Seismic Gaps and Recurrence Periods of Large Earthquakes along the Mexican Subduction Zone: A Reexamination, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No. 3, pp. 827-843.

Singh, S., Ordaz, M., Anderson, J., Rodríguez, M., Quaas, R., Mena, E., Ottaviani, M., & Almora, D. (1989) Analysis of Near-Source Strong-Motion Recordings along the Mexican Subduction Zone, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 79, No. 6, pp. 1697-1717.

Singh, S., Ordaz M., Pacheco, J., Quaas, R., Alcántara, L., Alcocer, S., Gutierrez, C., Meli, R. y Ovando, E. (1999), A Preliminary Report on the Tehuacán, México Earthquake of June 15, 1999 ($M_w = 7.0$), *Seismological Research Letters*, Vol. 70, No. 5, pp. 489-504.

Singh, S., Plata-Martínez, R., Pérez-Campos, X., Espíndola, V., Arroyo, D. e Iglesias, A. (2019) Evidence of directivity during the earthquakes of 8 and 10 May 2014 (M_w 6.5, 6.1) in the Guerrero, Mexico seismic gap and some implications, *Journal of Seismology*, Vol. 23, pp. 683-697.

Suárez, G. (2020) Large earthquakes in the Tehuantepec subduction zone: evidence of a locked plate interface and large-scale deformation of the slab, *Journal of Seismology*, Vol. 25, pp. 449-460.

Udías, A., Madariaga, R. y Buforn, E. (2014) Source Mechanisms of Earthquakes, Chapter 4 – Point source models, *Cambridge, Reino Unido*, Recuperado de <https://www.cambridge.org/core/books/source-mechanisms-of-earthquakes/point-source-models/3509E75F78A7E66C68AE963A58D76468>

Universidad Nacional Autónoma de México, I. d. G., Servicio Sismológico Nacional (SSN). (2023). Catálogo de sismos. Extraído de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>

Wells, D. y Coppersmith, K. (1994) New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002.

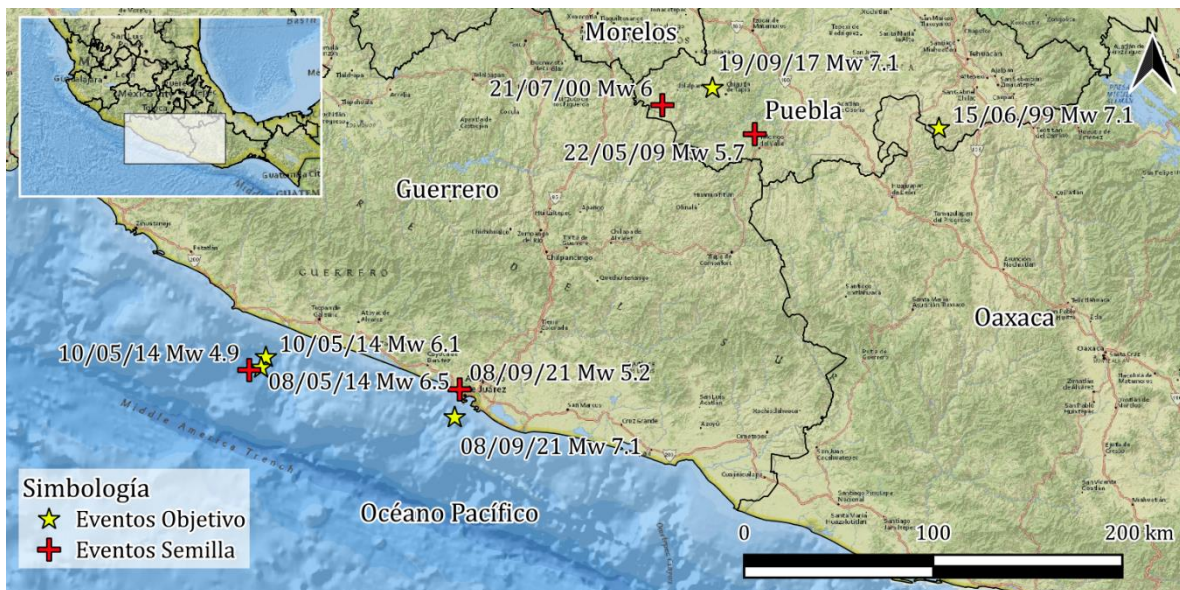
Wennerberg, L. (1990) Stochastic Summation of Empirical Green's Functions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 80, No. 6, pp. 1418-1432.

Xu, W., Li, X. y Gao, M. (2019) The Calculation of Arias Intensity in North – South Seismic Belt Based on Probabilistic Seismic Hazard Analysis, *Proceedings of the Sixth Symposium of Risk Analysis and Risk Management in Western China (WRARM 2019)*, Vol. 170, pp. 107-110.

Yenier, E. y Atkinson, G. (2014) Equivalent Point-Source Modeling of Moderate-to-Large Magnitude Earthquakes and Associated Ground-Motion Saturation Effects, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 104, No. 3, pp. 1458-1478.

Anexo A. Mapas de localización de los eventos y estaciones

Además de los sismos presentados en el capítulo de validación de la formulación, también se emplearon los siguientes eventos objetivo que se encuentran dentro de la zona de interés: el sismo M_w 7 del 15 de junio de 1999 con epicentro cercano a Tehuacán, Puebla; los sismos M_w 6.5 del 08 de mayo de 2014, con epicentro cercano a Tecpán, Guerrero y el sismo M_w 7 del 08 de septiembre de 2021 con epicentro cercano a Acapulco, Guerrero. Los epicentros de los eventos objetivo y de los sismos empleados como EGF se muestran en la Figura A.1.



A.I. Sismo M_w 7 del 15/06/99 (Tehuacán, Puebla)

Para este evento se simularon registros para las estaciones Oaxaca (OXIG) y Yautepec (YAIG) de la Red Sísmica de Banda Ancha del Instituto de Geofísica de la UNAM. Como se muestra en la Figura A.2, estas se encuentran a 148 km y 181 km del epicentro del evento objetivo, respectivamente y a 216 km y 105 km del epicentro del evento semilla.



Figura A.2. Localización de los epicentros y estaciones para el evento objetivo M_w 7 del 15/06/99.

A.II. Sismo M_w 6.5 del 08/05/14 (Tecpán, Guerrero)

Para este evento se simularon registros para las estaciones San Luis de la Loma (SLU2) y El Súchil (SUCH) de la RII - UNAM. Estas se encuentran a 33 km y 40 km del epicentro del evento objetivo, respectivamente y a 34 km y 45 km del epicentro del evento semilla, como se muestra en la Figura A.3.

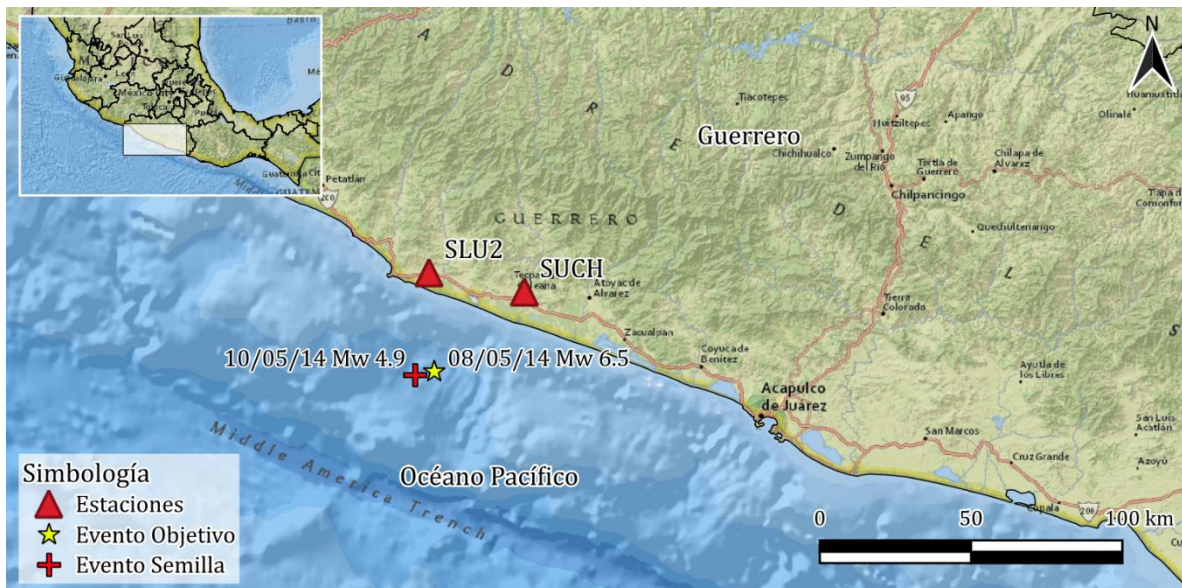


Figura A.3. Localización de los epicentros y estaciones para el evento objetivo M_w 6.5 del 08/05/14.

A.III. Sismo M_w 7 del 08/09/21 (Acapulco, Guerrero)

Para este evento se simularon registros para las estaciones Atoyac (ATYC) y Las Vigas (VIGA) de la RAIL – UNAM. Estas se encuentran a 72 y 77 km del epicentro del evento objetivo, respectivamente y a 64 y 76 km del epicentro del evento semilla, como se muestra en la Figura A.4.

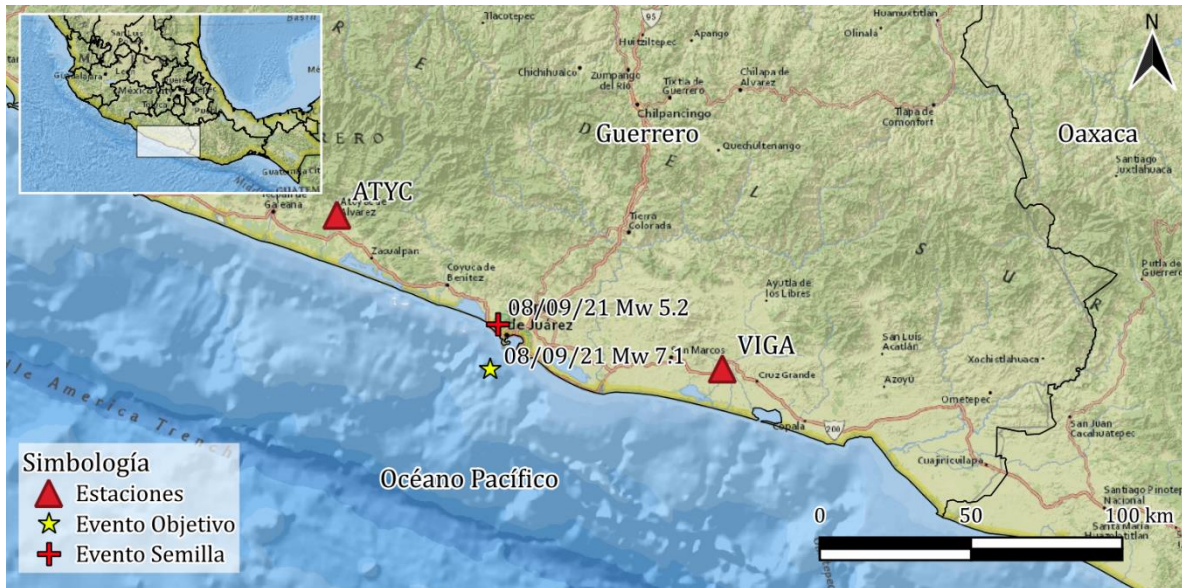


Figura A.4. Localización de los epicentros y estaciones para el evento objetivo M_w 7 del 08/09/21.

Anexo B. Tablas parámetros sísmicos

Los valores de los parámetros sísmicos con los que se definen los eventos sísmicos, que no se presentaron en el capítulo de validación de la formulación, se presentan en la Tabla B.1, los valores de M_w fueron obtenidos del catálogo de sismos del SSN (SSN, 2023), mientras que el M_0 se obtuvo empleando la ecuación (I.4), la caída de esfuerzos fue obtenida a través del análisis de algunas de las señales de cada evento y f_c se obtuvo con la ecuación (I.7).

Tabla B.1. Resumen de los parámetros sísmicos de los eventos simulados.

Evento	Fecha	M_w	M_0 (dyn-cm)	$\Delta\sigma$ (bar)	f_c (Hz)
Semilla	22/05/09	5.7	3.98E+24	350	0.85
Objetivo	15/06/99	7.0	3.10E+26	733	0.34
Semilla	10/05/14	4.9	2.51E+23	60	1.42
Objetivo	08/05/14	6.5	6.22E+25	90	0.26
Semilla	08/09/21	5.2	7.08E+23	100	1.19
Objetivo	08/09/21	7.0	3.60E+26	186	0.18

En la Tabla B.2 se presentan las R_{JB} calculadas, empleando la ecuación (III.1), para las estaciones en las que simularon los sismos objetivo.

Tabla B.2. Cálculo de las distancias de Joyner Boore para los eventos simulados.

Evento Objetivo	M_w	A_R (km ²)	R_{eq} (km)	Estación	R_{EPI} (km)	R_{JB} (km)
15/06/99	7	759	15.5	OXIG	148	132
				YAIG	181	165
08/05/14	6.5	266	9.2	SLU2	33	23
				SUCH	40	31
08/09/21	7	759	15.5	ATYC	72	56
				VIGA	77	61

Anexo C. Resultados obtenidos con la formulación propuesta

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los procesos de simulación considerando únicamente efectos de directividad.

C.I. Generación de registros sintéticos considerando efectos de directividad

C.I.I. Sismo M_w 7 del 15 de junio de 1999 (Tehuacán, Puebla)

C.I.I.I. Estación Oaxaca – **OXIG** (Registró efectos de directividad backward)

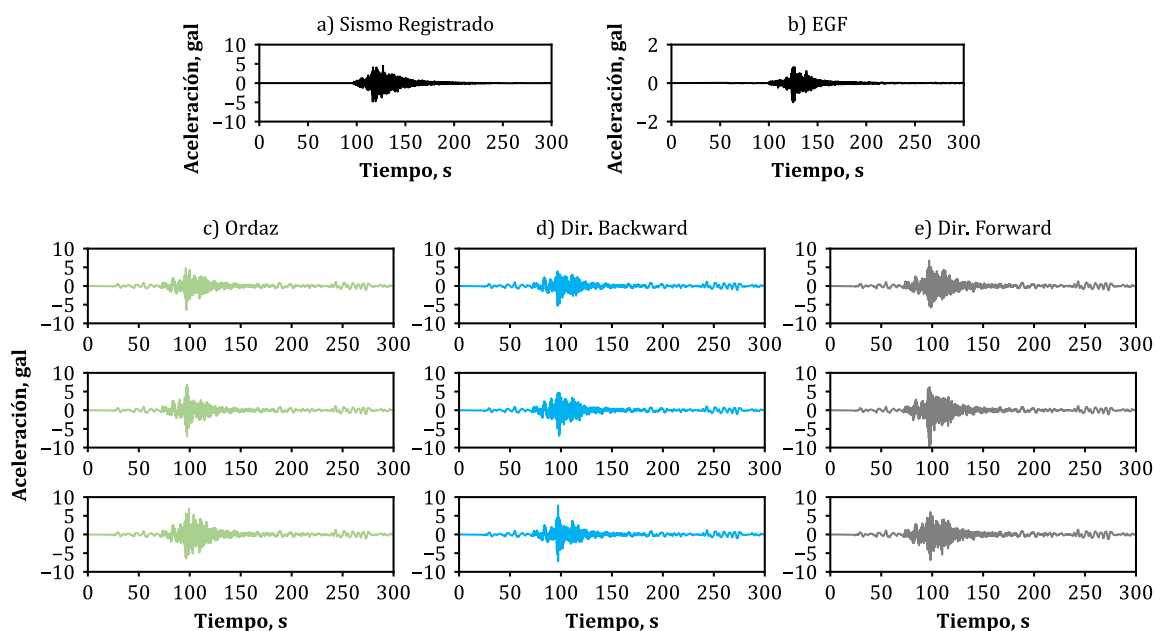


Figura C.1. Registros sísmicos para la estación OXIG de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de directividad: d) directividad *backward*, e) directividad *forward*.

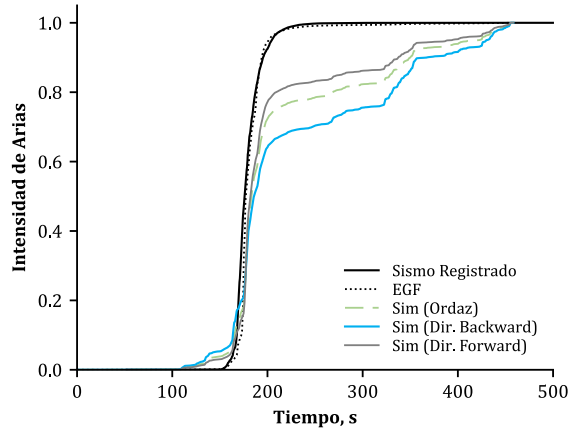


Figura C.2. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad.

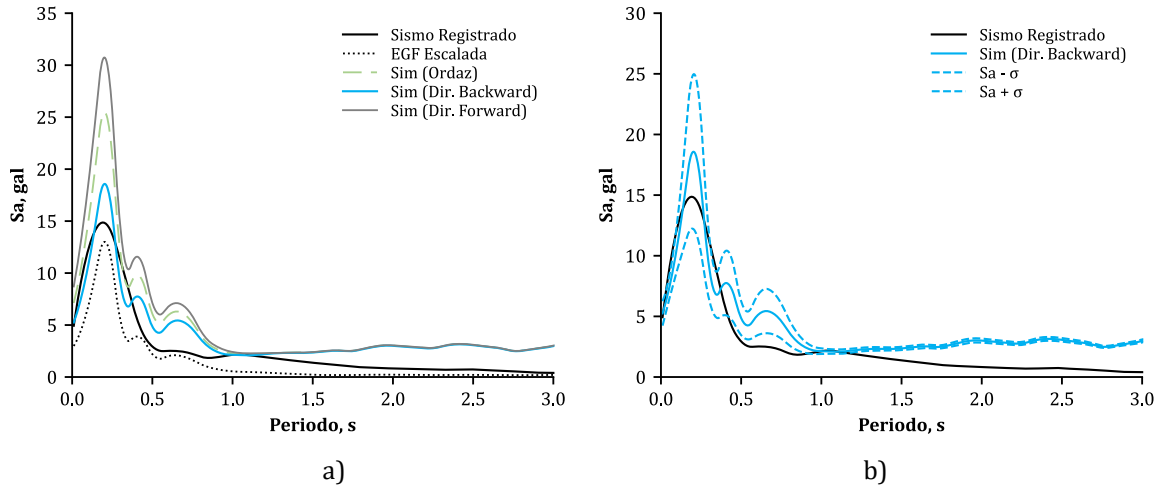


Figura C.3. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de directividad: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación OXIG.

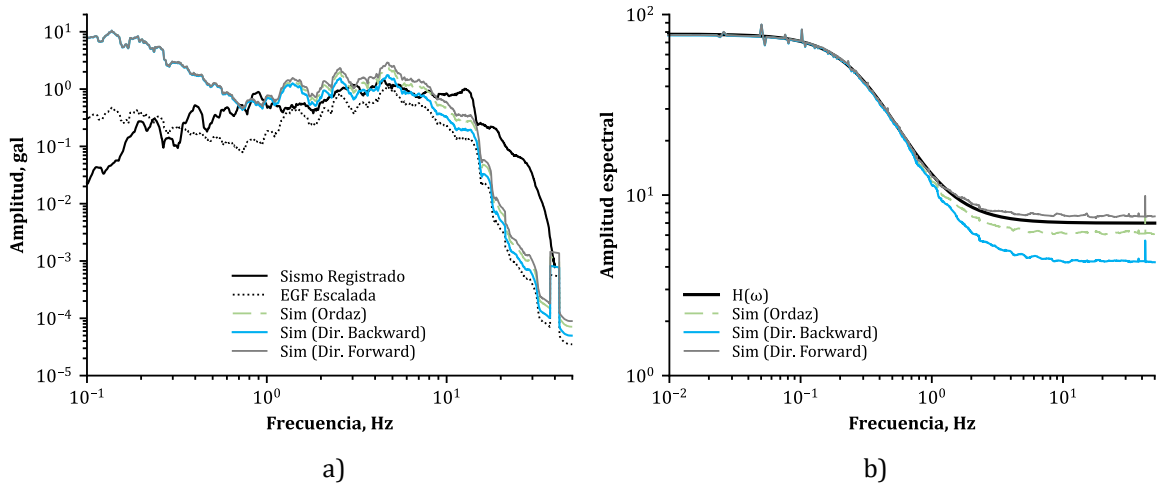


Figura C.4. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad para la estación OXIG que registró directividad *backward*: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.I.I.II. Estación Yautepec – YAIG (Registró efectos de directividad forward)

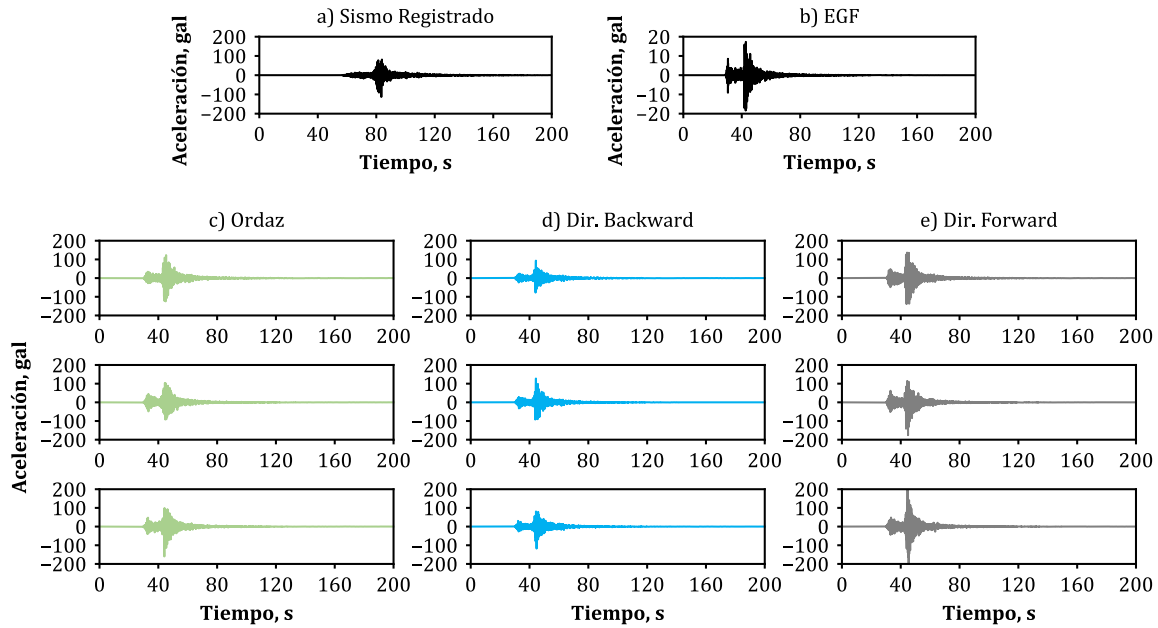


Figura C.5. Registros sísmicos para la estación YAIG de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de directividad: d) directividad *backward*, e) directividad *forward*.

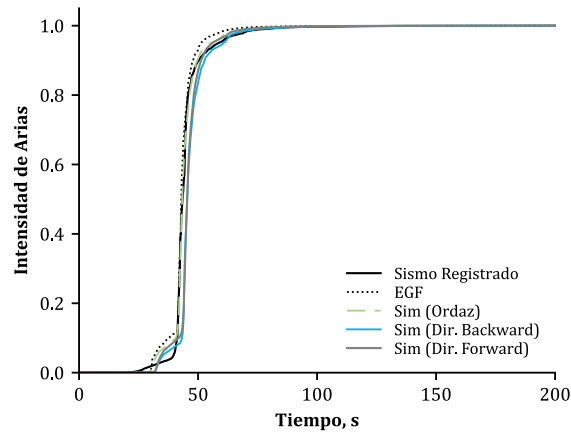


Figura C.6. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad.

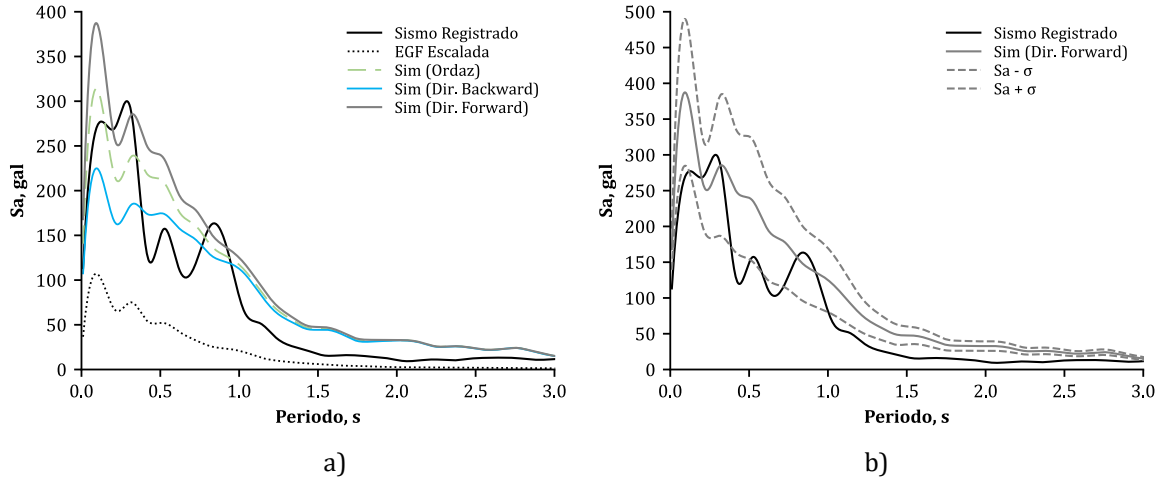


Figura C.7. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de directividad: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación YAIG.

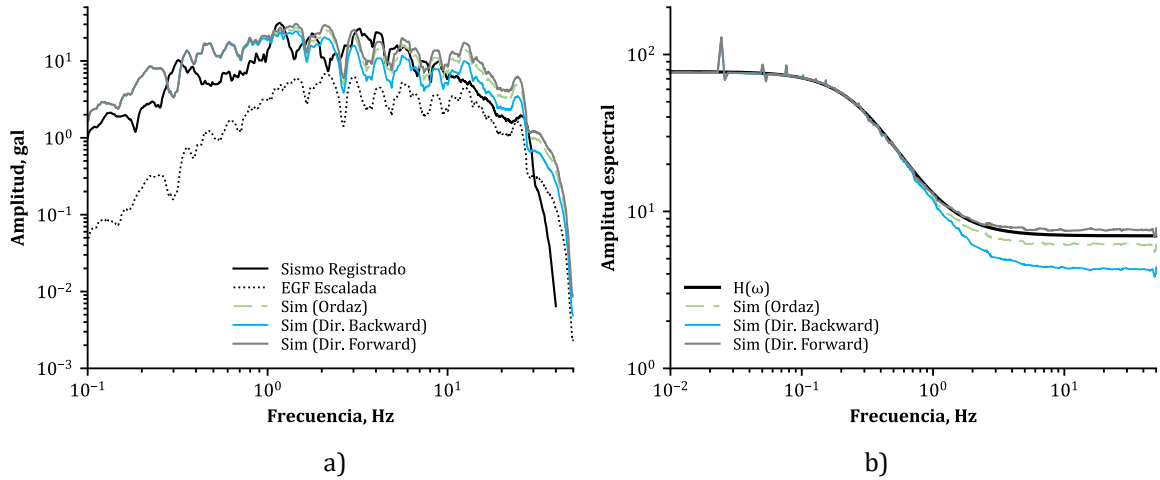


Figura C.8. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad para la estación YAIG que registró directividad *forward*: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.I.II. Sismo M_w 6.5 del 08 de mayo de 2014 (Tecpán, Guerrero)

C.I.II.1. Estación San Luis de la Loma – **SLU2** (Registró efectos de directividad backward)

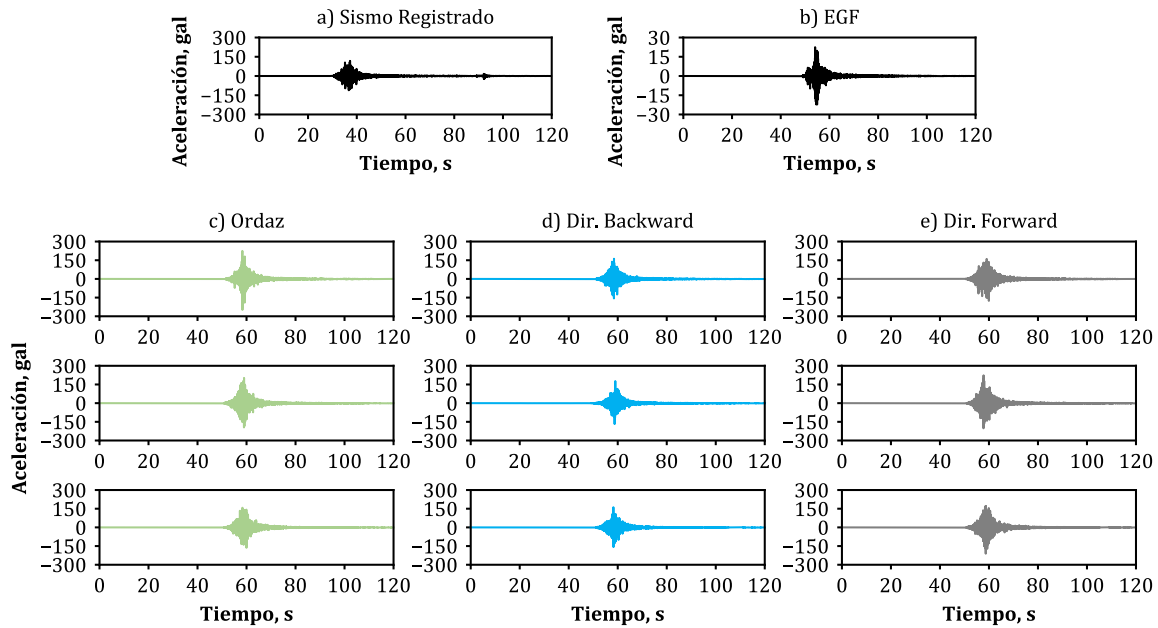


Figura C.9. Registros sísmicos para la estación SLU2 de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de directividad: d) directividad *backward*, e) directividad *forward*.

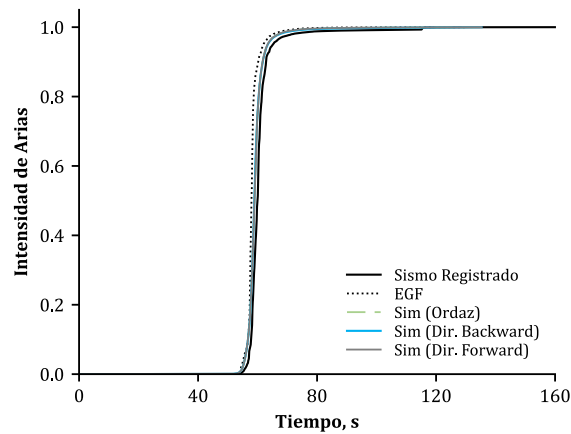


Figura C.10. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad.

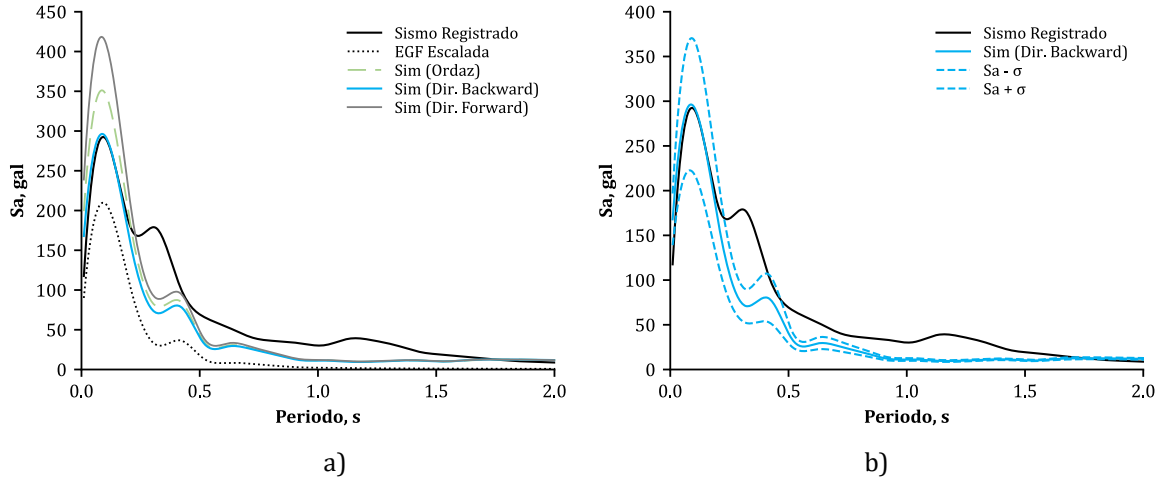


Figura C.11. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de directividad: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación SLU2.

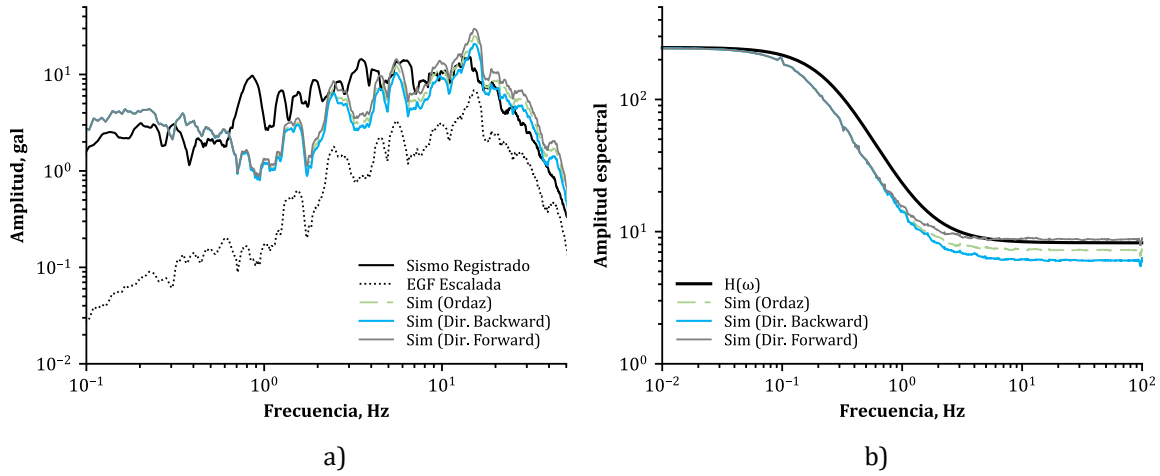


Figura C.12. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad para la estación SLU2 que registró directividad *backward*: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.I.II.II. Estación El Súchil – **SUCH** (Registró efectos de directividad forward)

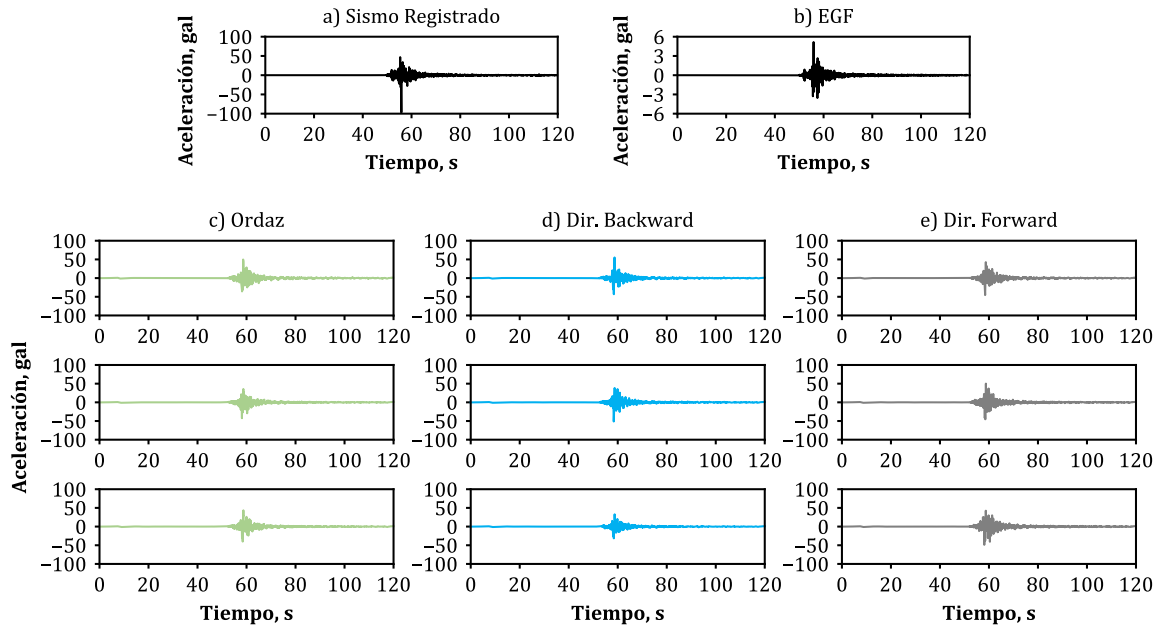


Figura C.13. Registros sísmicos para la estación SUCH de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de directividad: d) directividad *backward*, e) directividad *forward*.

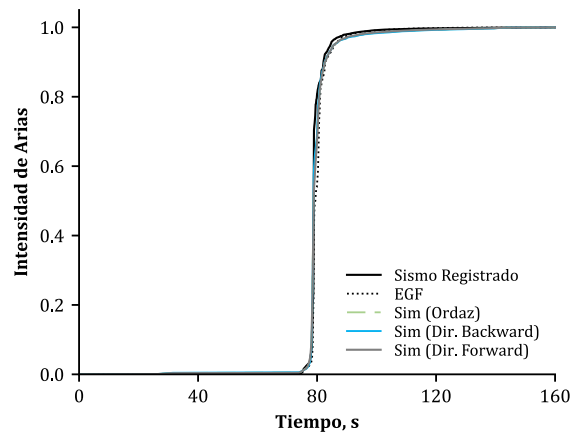


Figura C.14. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad.

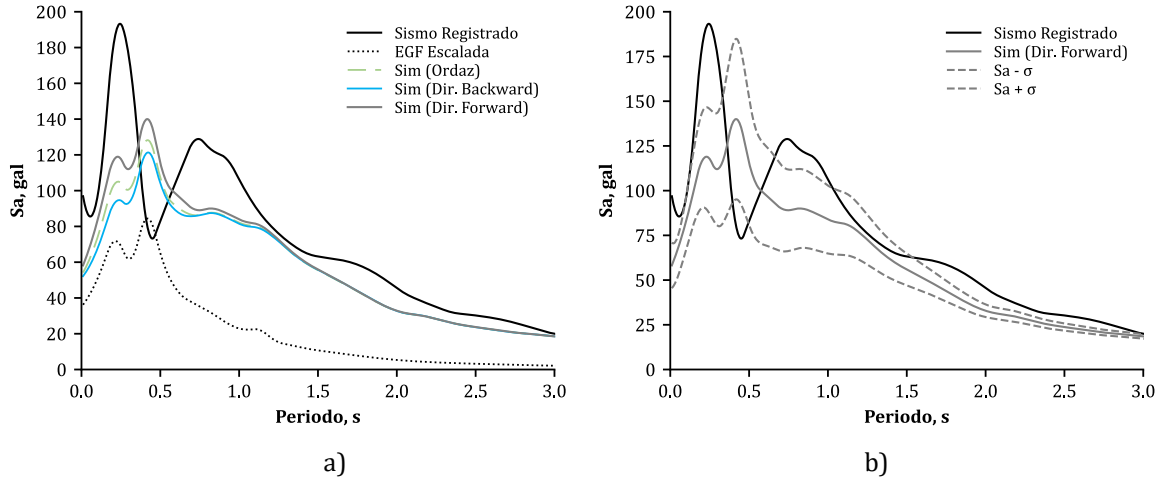


Figura C.15. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de directividad: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación SUCH.

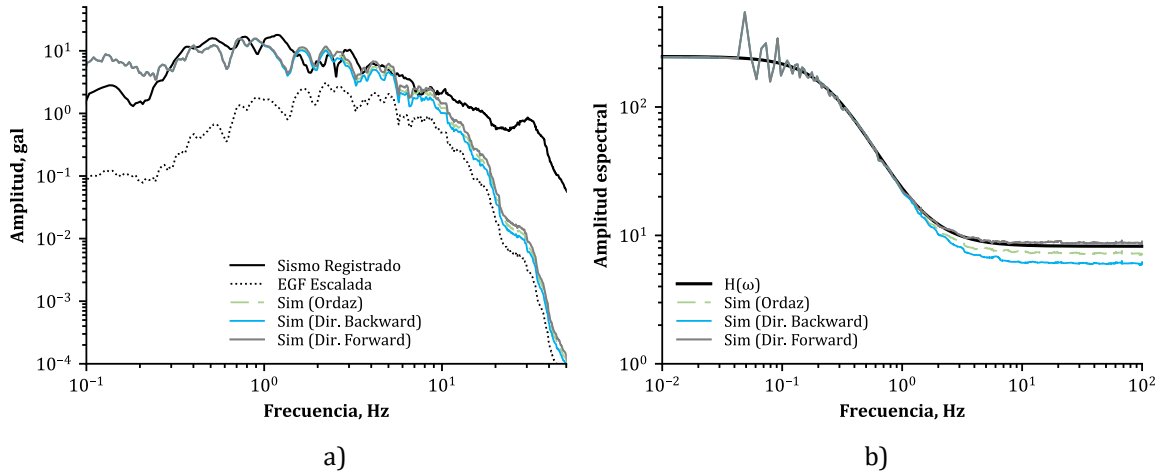


Figura C.16. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad para la estación SUCH que registró directividad *forward*: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.I.III. Sismo M_w 7 del 08 de septiembre de 2021 (Acapulco, Guerrero)

C.I.III.I. Estación Atoyac – ATYC (Registró efectos de directividad backward)

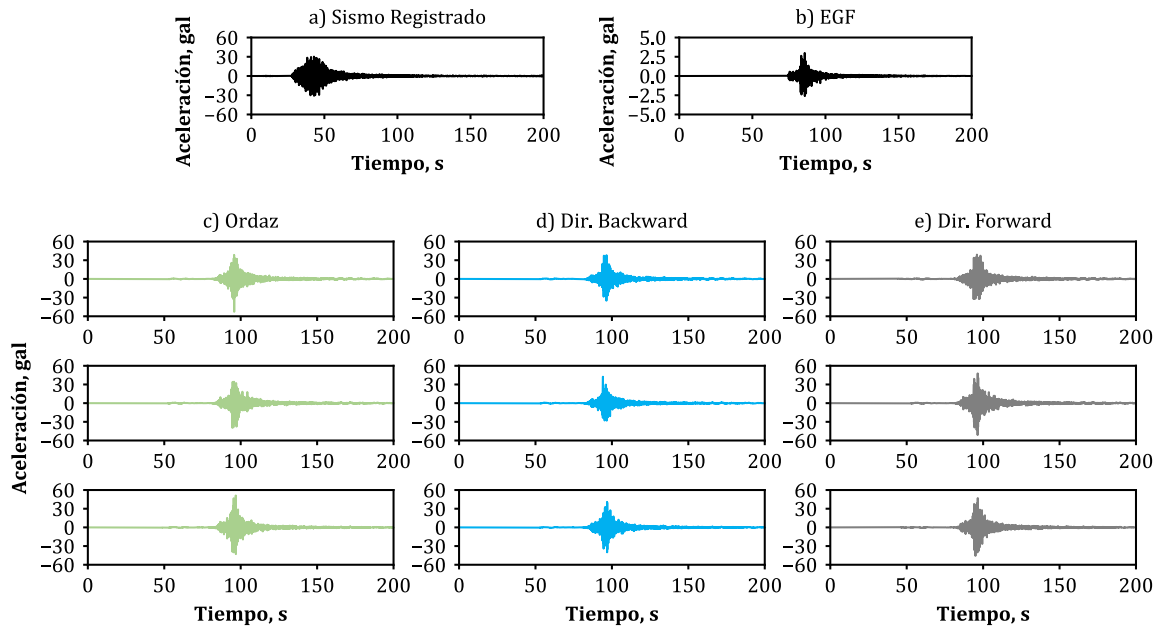


Figura C.17. Registros sísmicos para la estación ATYC de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de directividad: d) directividad *backward*, e) directividad *forward*.

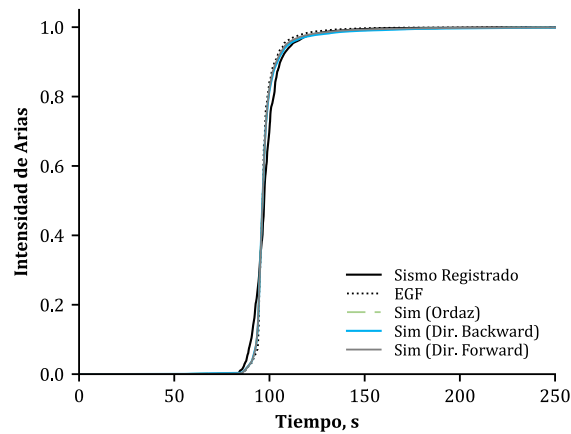


Figura C.18. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad.

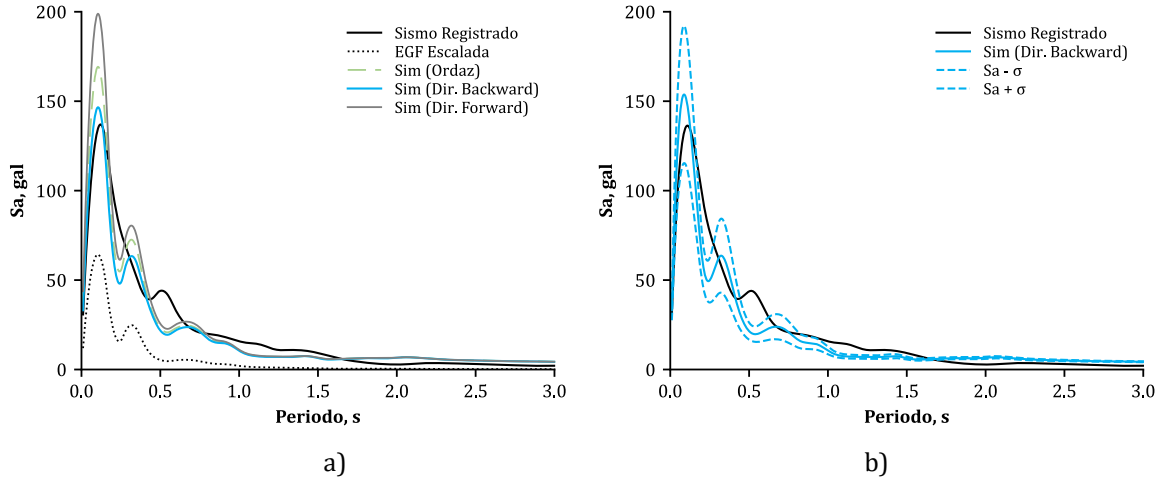


Figura C.19. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de directividad: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación ATYC.

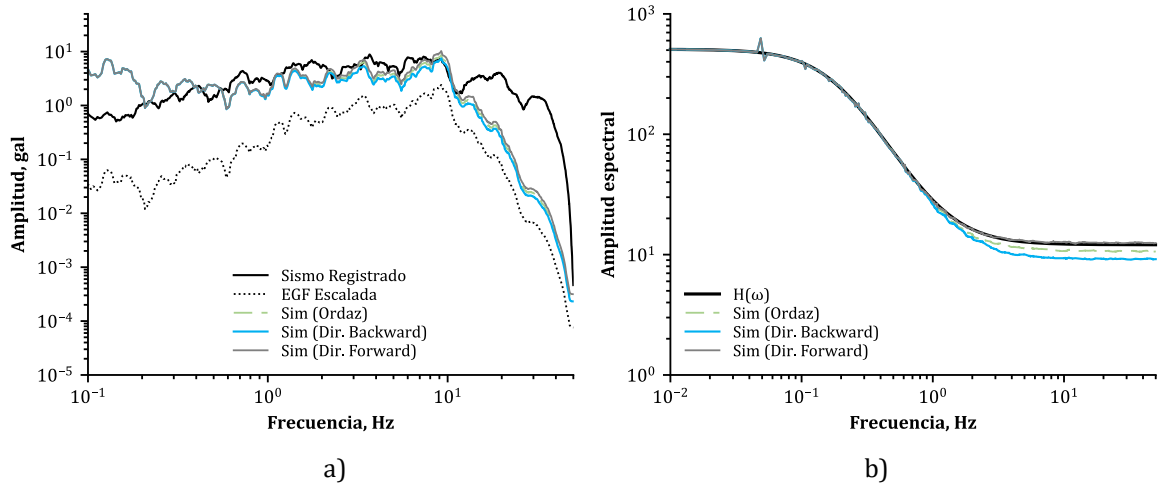


Figura C.20. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad para la estación ATYC que registró directividad *backward*: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.I.III.II. Estación Las Vigas – **VIGA** (Registró efectos de directividad forward)

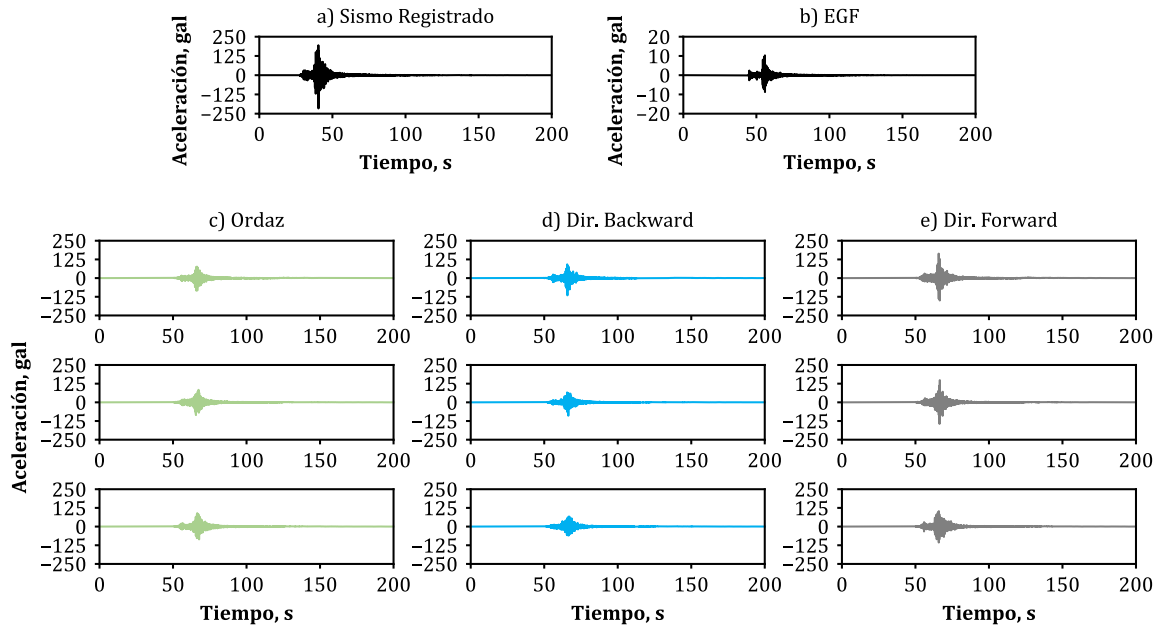


Figura C.21. Registros sísmicos para la estación VIGA de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de directividad: d) directividad *backward*, e) directividad *forward*.

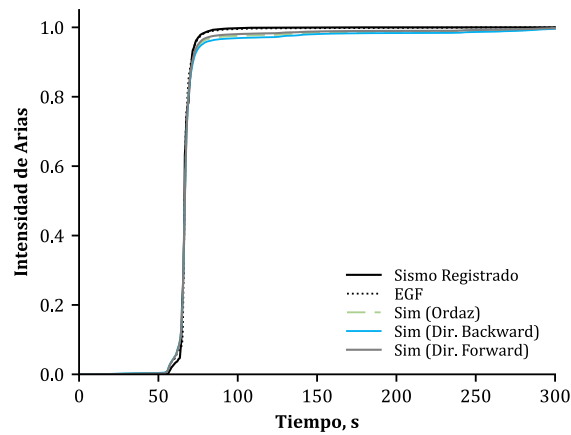


Figura C.22. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad.

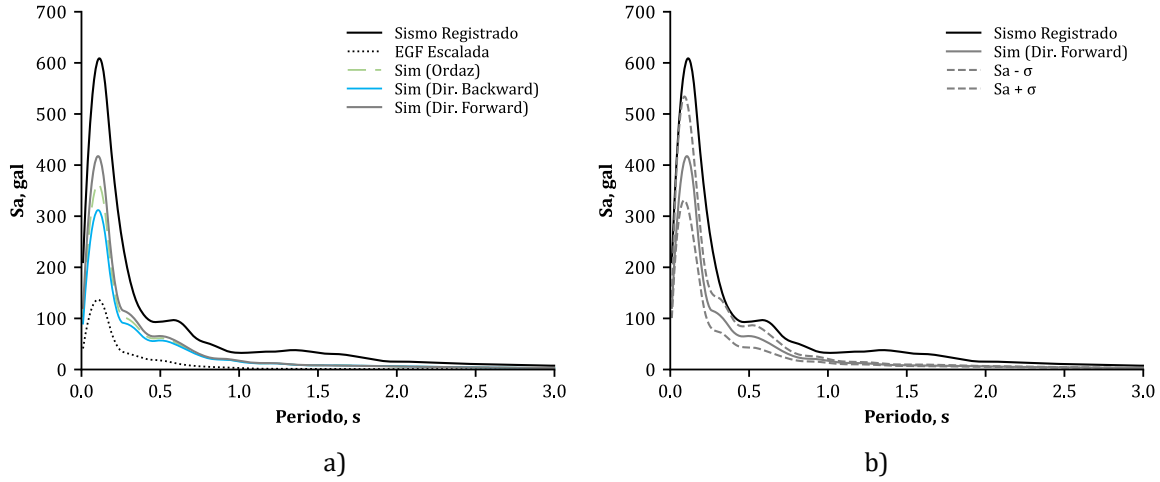


Figura C.23. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de directividad: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación VIGA.

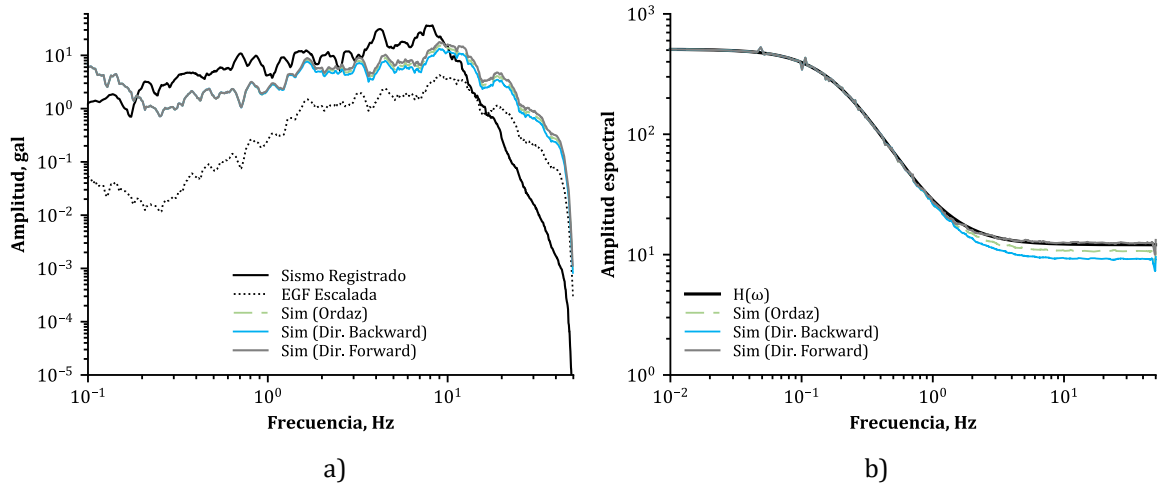


Figura C.24. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad para la estación VIGA que registró directividad *forward*: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los procesos de simulación considerando únicamente efectos de saturación.

C.II. Generación de registros sintéticos considerando efectos de saturación

C.II.I. Sismo M_w 7 del 15 de junio de 1999 (Tehuacán, Puebla)

C.II.I.I. Estación Oaxaca – **OXIG** (Registró efectos de directividad backward)

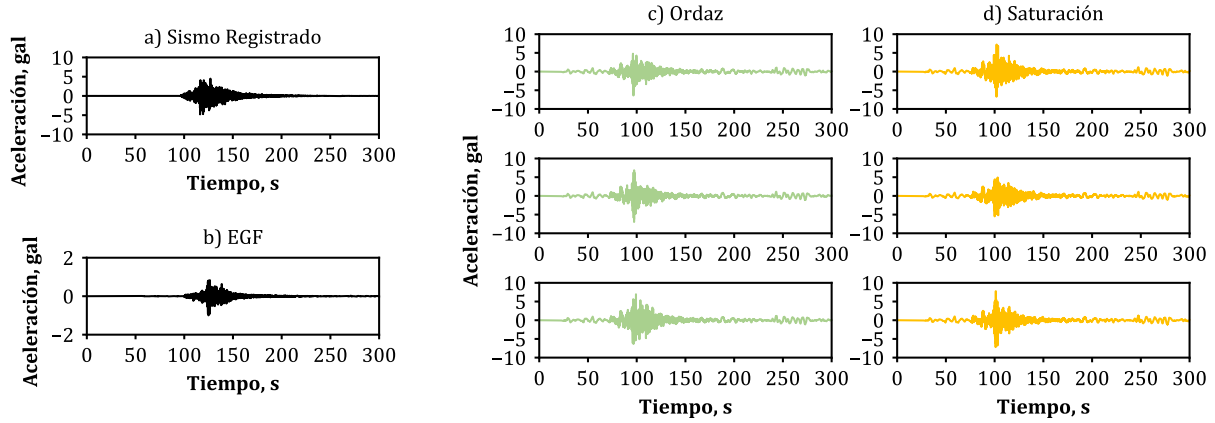


Figura C.25. Registros sísmicos para la estación OXIG de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación: d) Saturación con R_{JB} de 132 km.

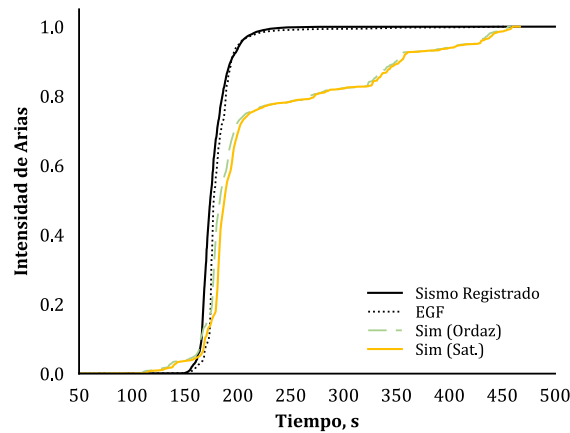


Figura C.26. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación.

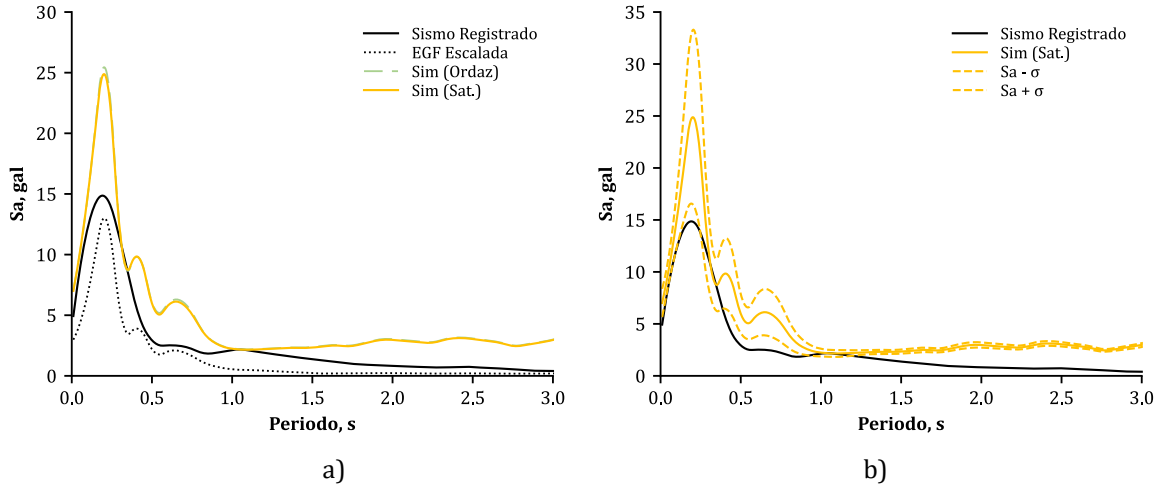


Figura C.27. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación para R_{JB} de 132 km: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación OXIG.

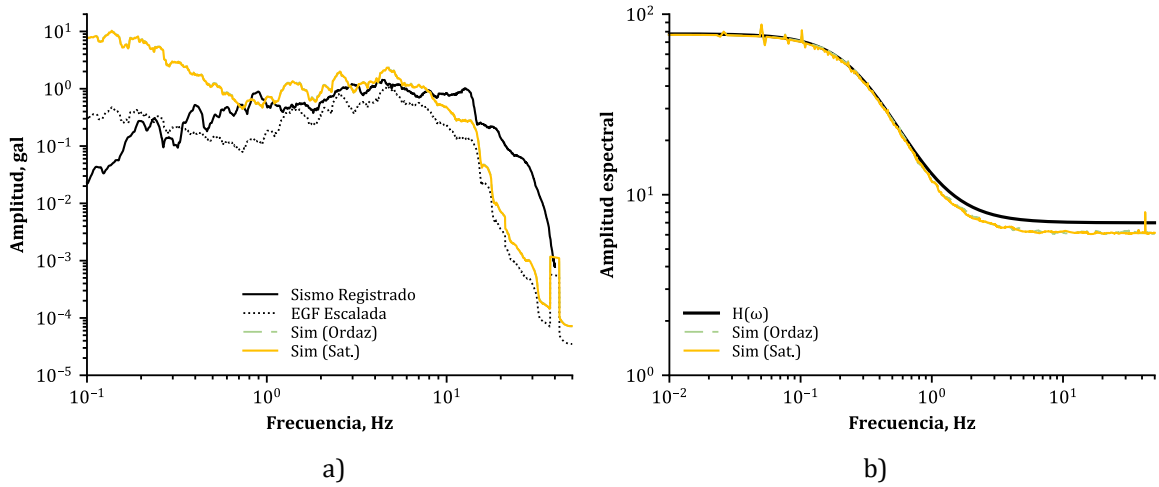


Figura C.28. Promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación con R_{JB} de 132 km para la estación OXIG: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.II.I.II. Estación Yautepec – YAIG (Registró efectos de directividad forward)

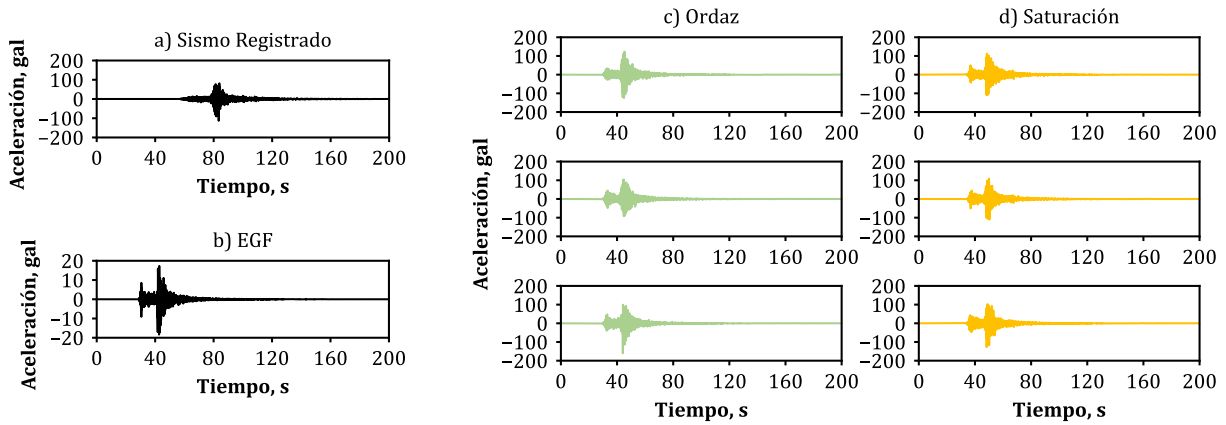


Figura C.29. Registros sísmicos para la estación YAIG de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación: d) Saturación con R_{JB} de 165 km.

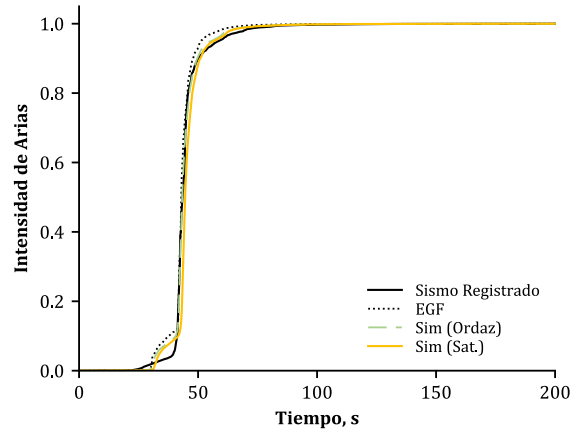


Figura C.30. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación.

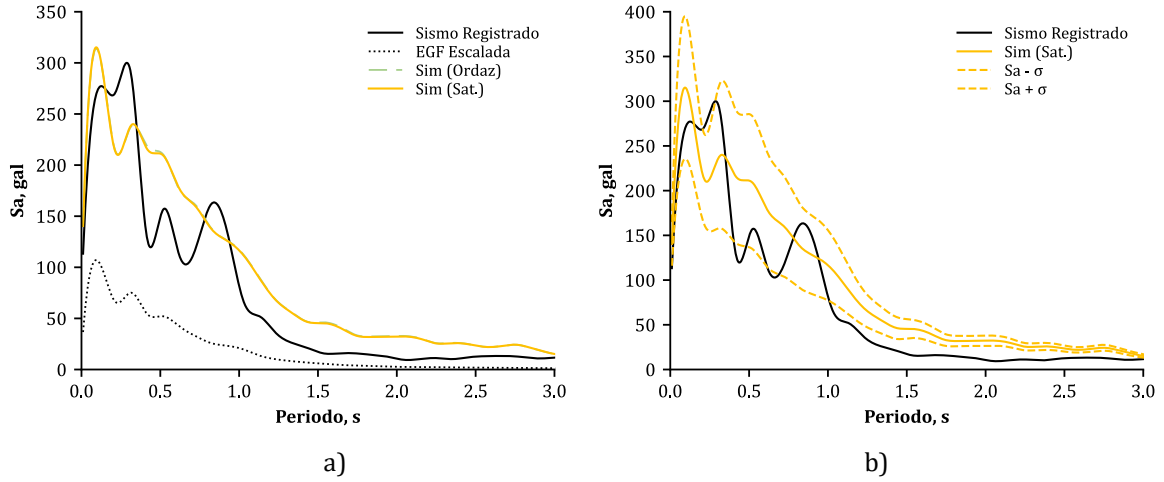


Figura C.31. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación para R_{JB} de 165 km: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación YAIG.

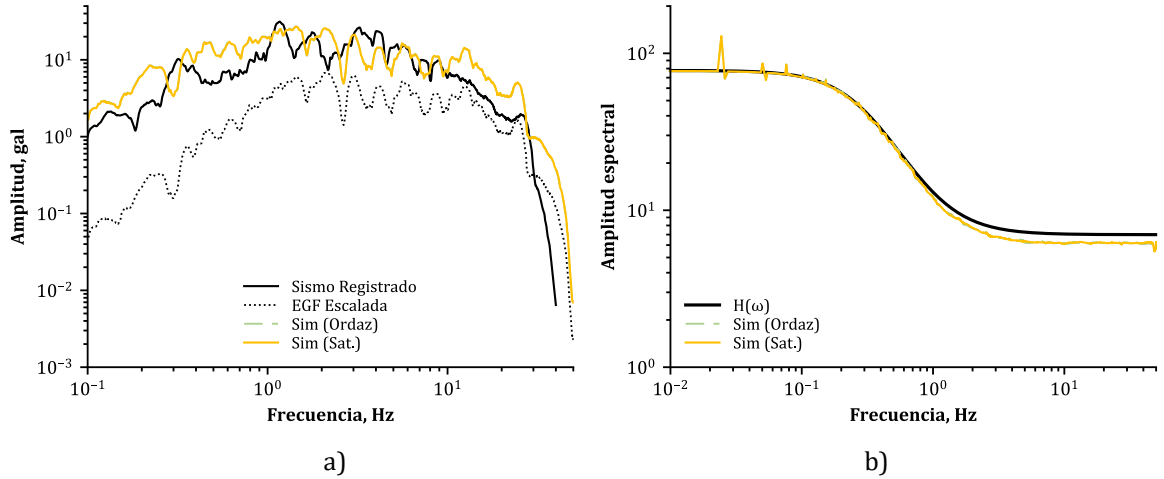


Figura C.32. Promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación con R_{JB} de 165 km para la estación YAIG: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.II.II. Sismo M_w 6.5 del 08 de mayo de 2014 (Tecpán, Guerrero)

C.II.II.I. Estación San Luis de la Loma – **SLU2** (Registró efectos de directividad backward)

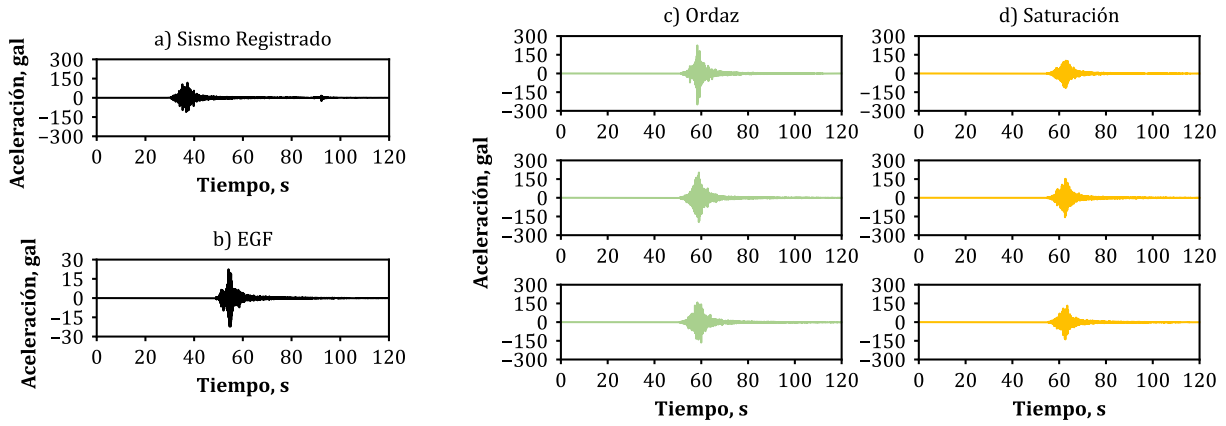


Figura C.33. Registros sísmicos para la estación SLU2 de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación: d) Saturación con R_{JB} de 23 km.

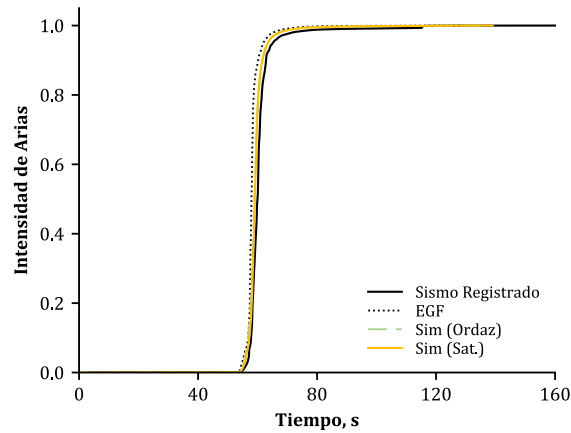


Figura C.34. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación.

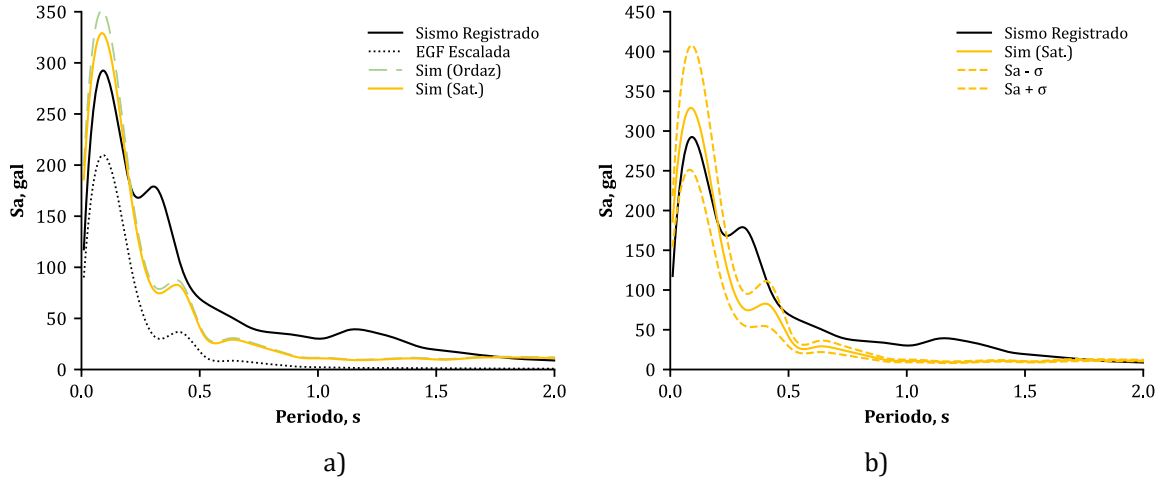


Figura C.35. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación para R_{JB} de 23 km: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación SLU2.

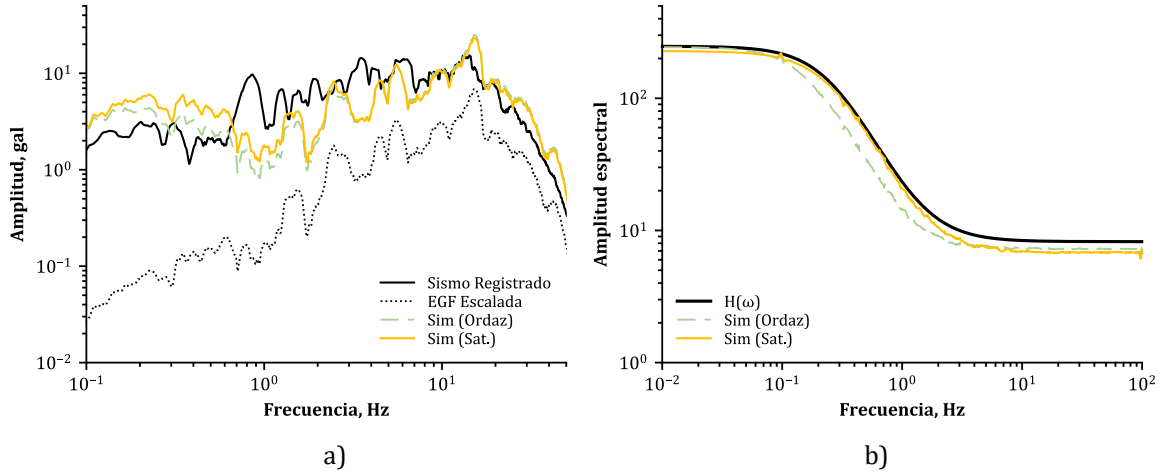


Figura C.36. Promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación con R_{JB} de 23 km para la estación SLU2: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

*C.II.II.II. Estación El Súchil – **SUCH** (Registró efectos de directividad forward)*

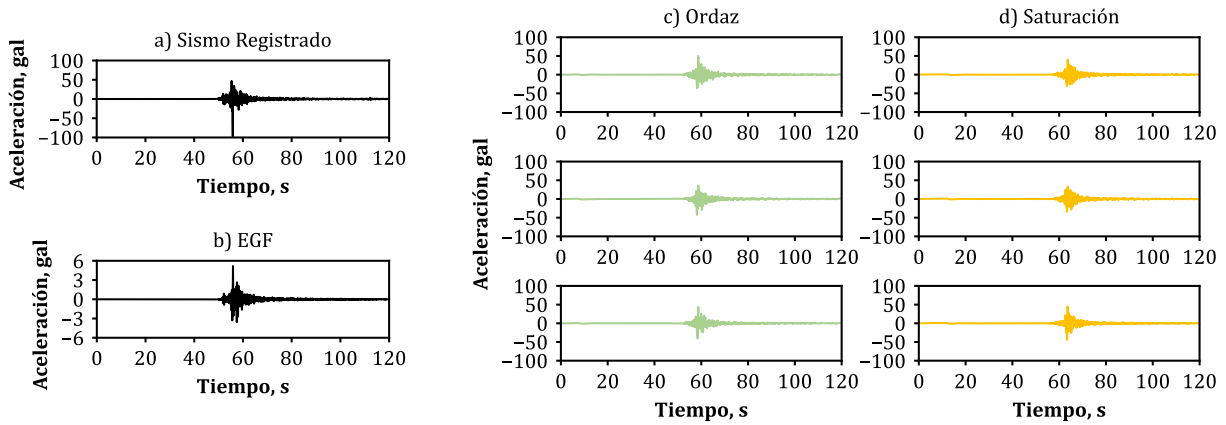


Figura C.37. Registros sísmicos para la estación SUCH de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación: d) Saturación con R_{JB} de 31 km.

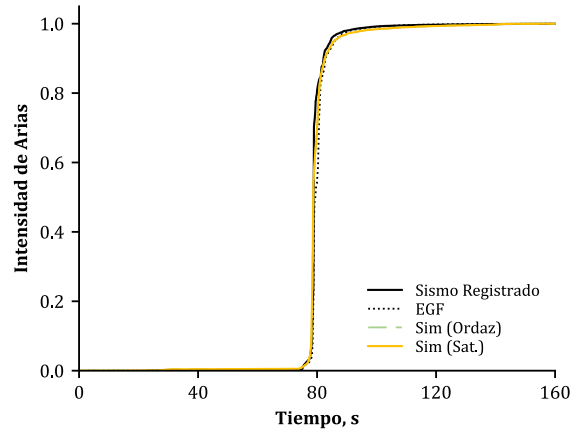


Figura C.38. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación.

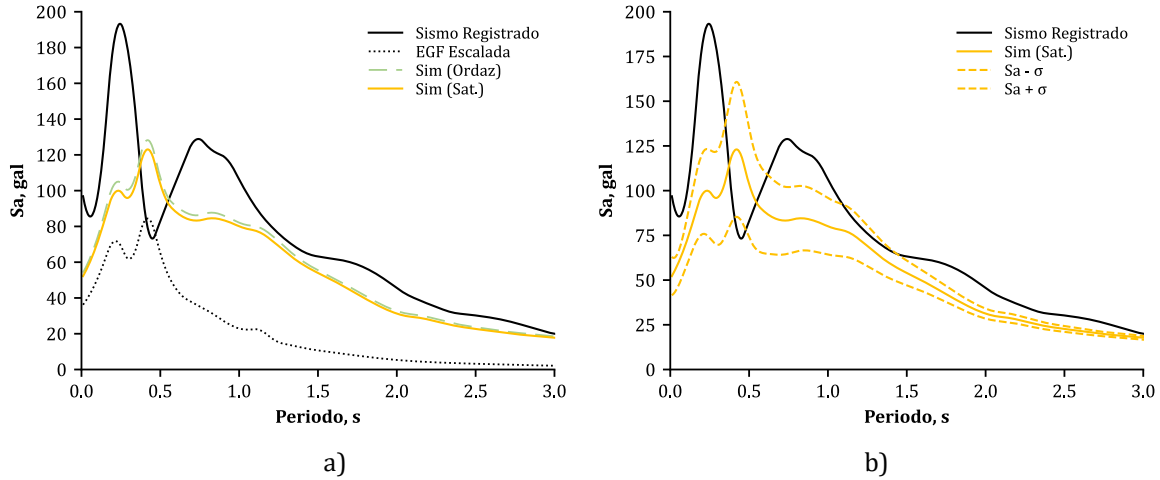


Figura C.39. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación para R_{JB} de 31 km: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación SUCH.

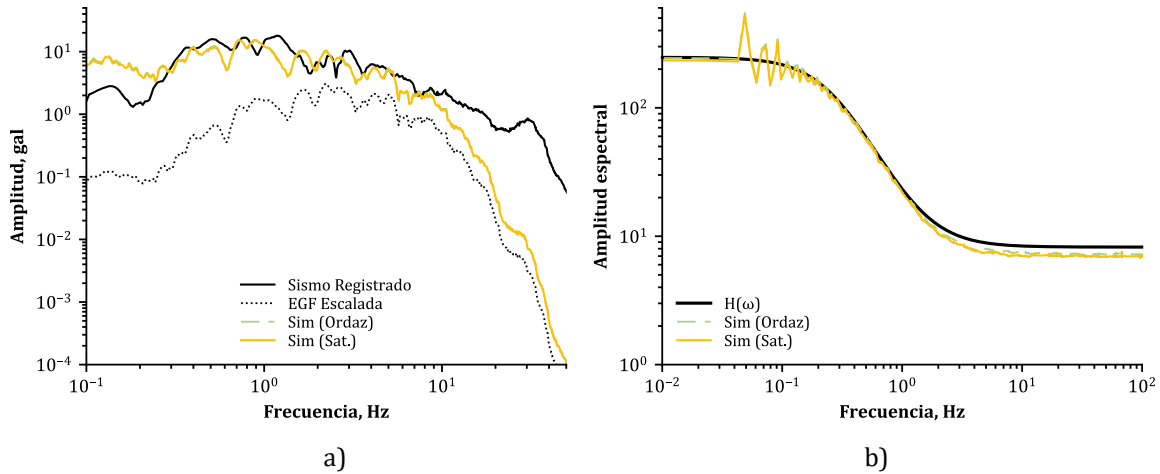


Figura C.40. Promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación con R_{JB} de 31 km para la estación SUCH: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.II.III. Sismo M_w 7 del 08 de septiembre de 2021 (Acapulco, Guerrero)

C.II.III.I. Estación Atoyac – ATYC (Registró efectos de directividad backward)

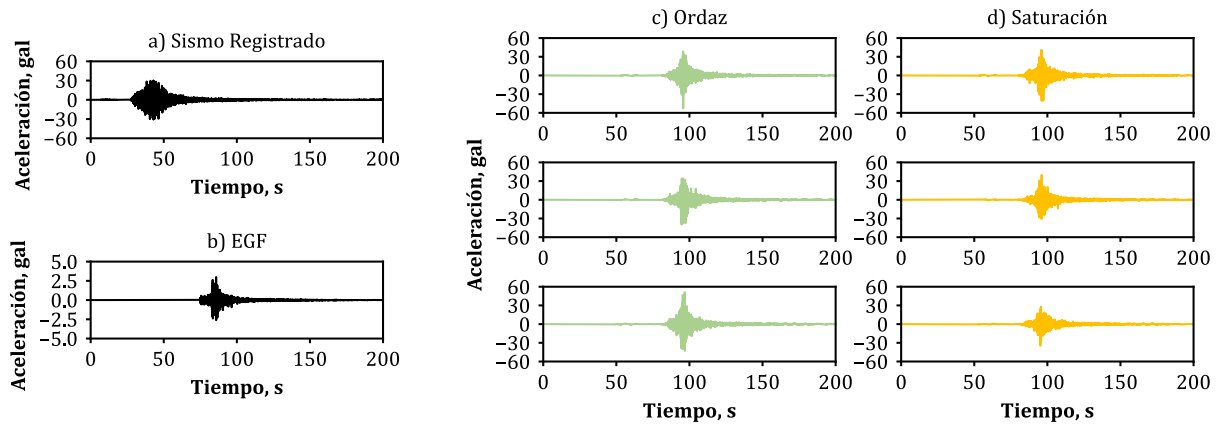


Figura C.41. Registros sísmicos para la estación ATYC de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación: d) Saturación con R_{JB} de 56 km.

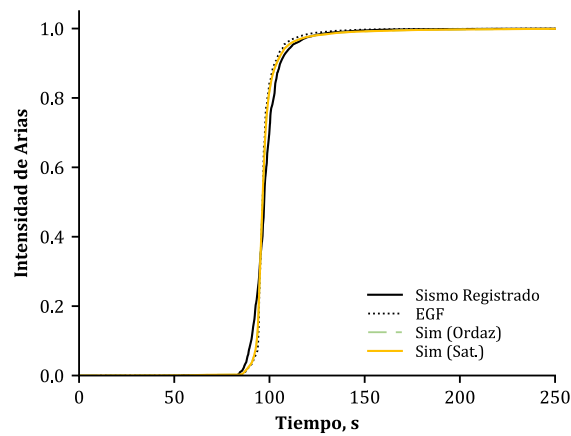


Figura C.42. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación.

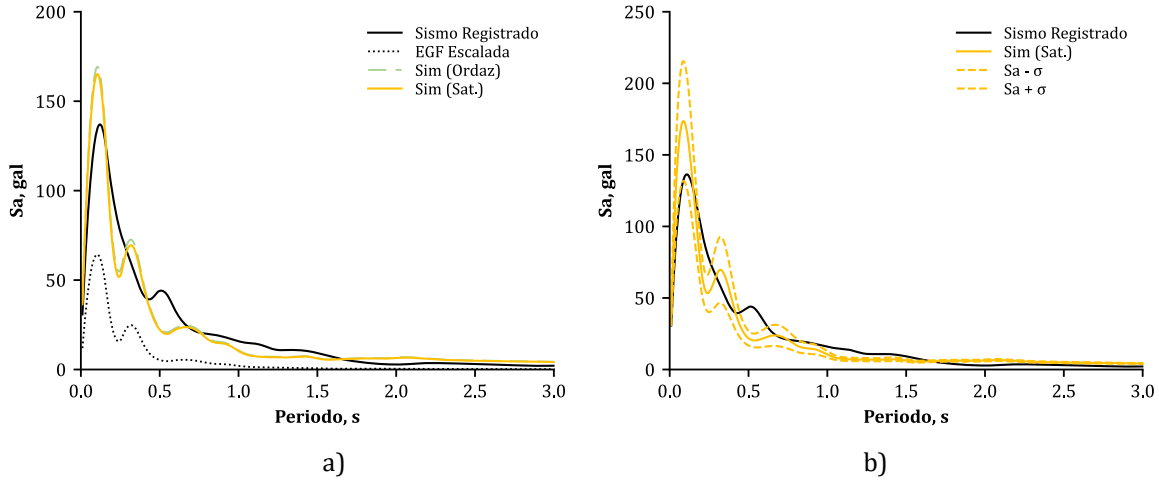


Figura C.43. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación para R_{JB} de 56 km: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación ATYC.

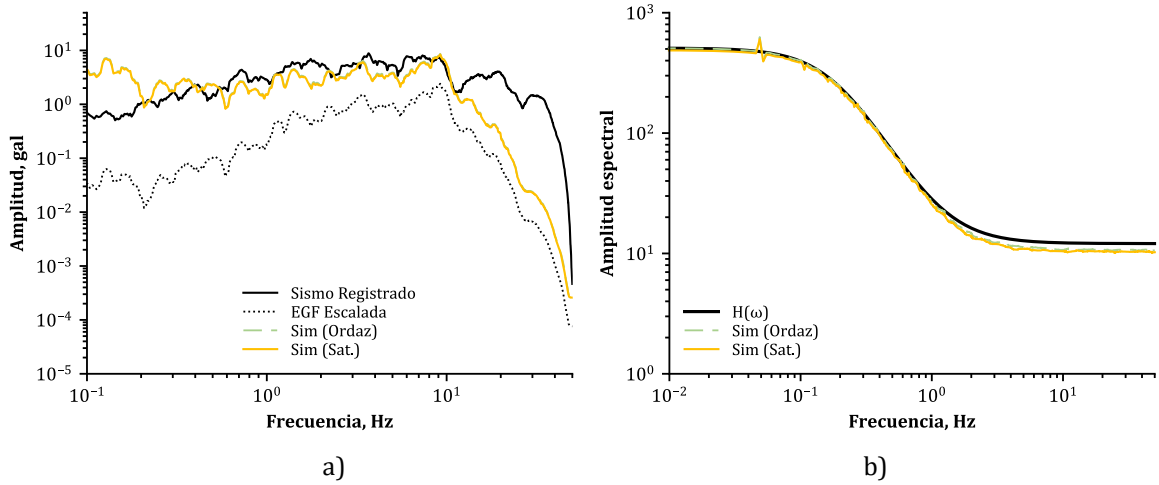


Figura C.44. Promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación con R_{JB} de 56 km para la estación ATYC: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.II.III.II. Estación Las Vigas – VIGA (Registró efectos de directividad forward)

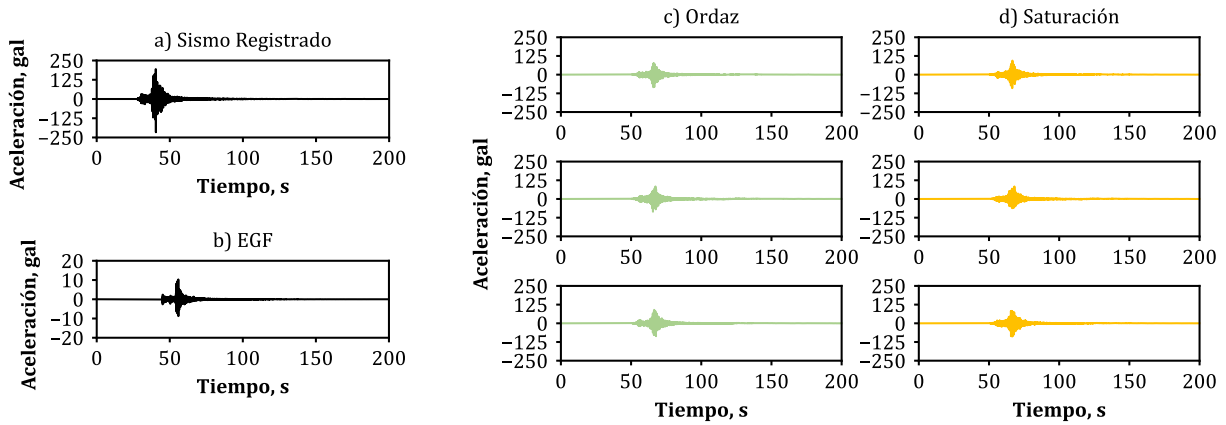


Figura C.45. Registros sísmicos para la estación VIGA de: a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación: d) Saturación con R_{JB} de 61 km.

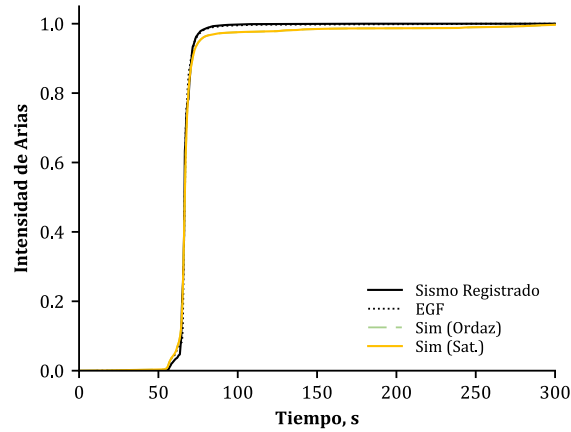


Figura C.46. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación.

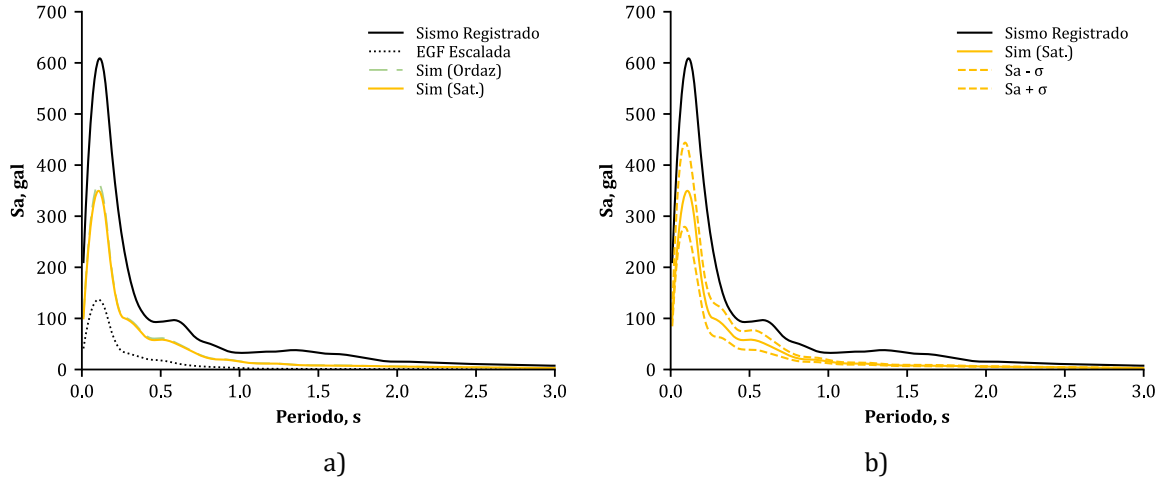


Figura C.47. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación para R_{JB} de 61 km: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación VIGA.

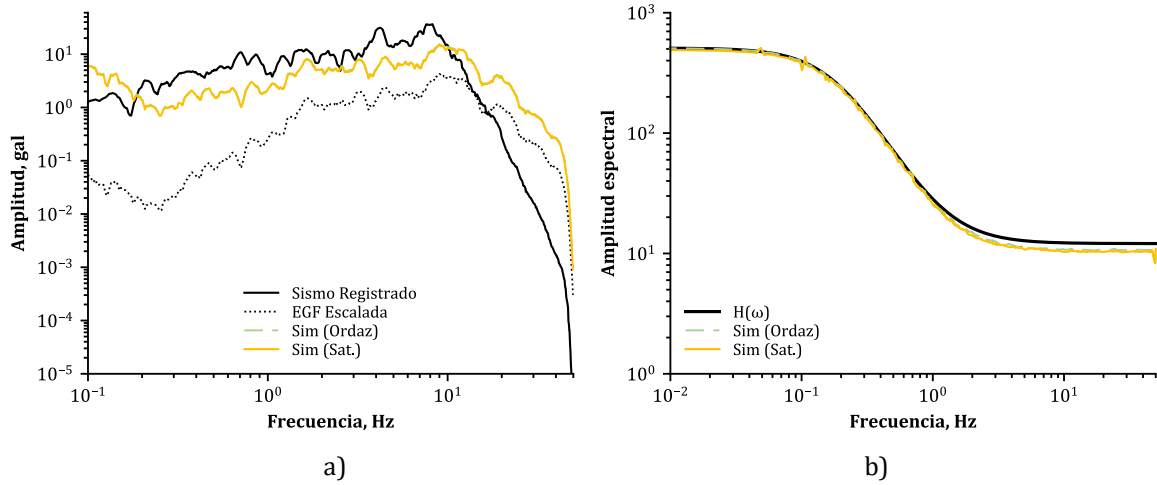


Figura C.48. Promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación con R_{JB} de 61 km para la estación VIGA: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los procesos de simulación considerando efectos de directividad y saturación.

C.III. Generación de registros sintéticos considerando efectos de directividad y saturación

C.III.I. Sismo M_w 7 del 15 de junio de 1999 (Tehuacán, Puebla)

C.III.I.I. Estación Oaxaca – **OXIG** (Registró efectos de directividad backward)

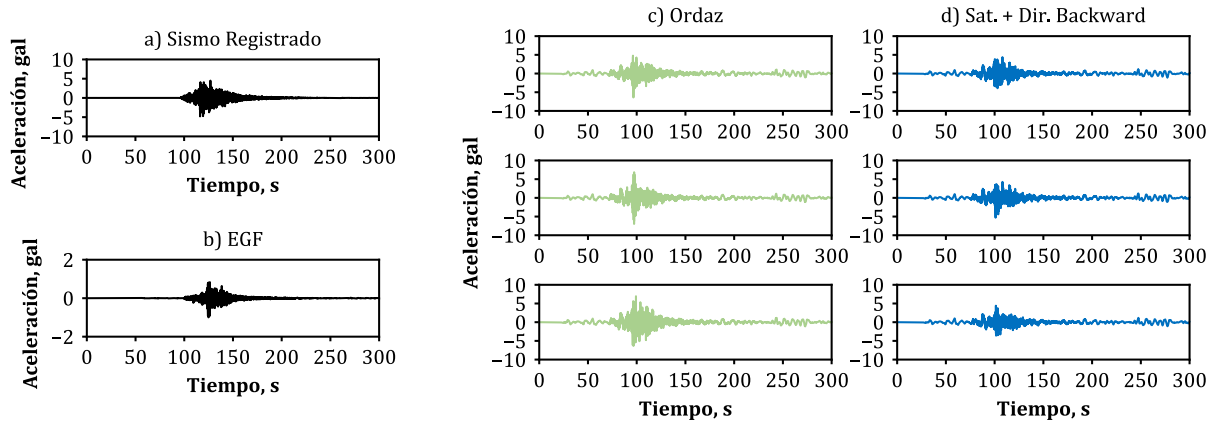


Figura C.49. Registros sísmicos para la estación OXIG de a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación y directividad: d) Saturación con R_{JB} de 132 km y directividad *backward*.

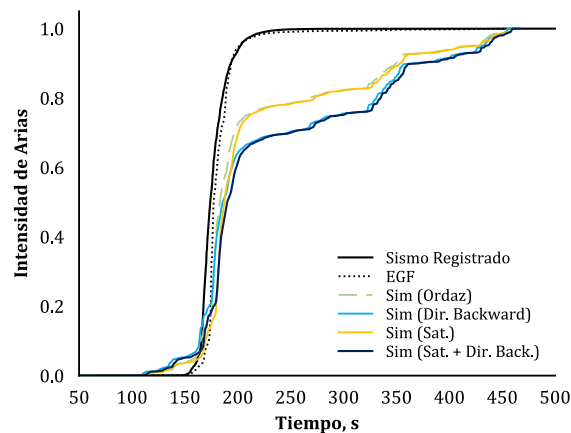


Figura C.50. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación y directividad.

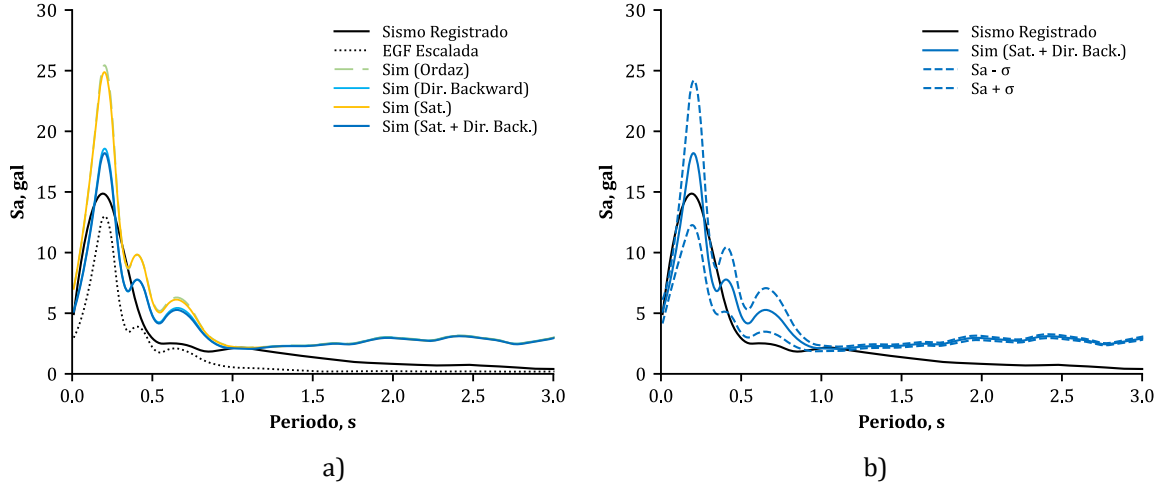


Figura C.51. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación, para R_{JB} de 132 km, y directividad *backward*: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación OXIG.

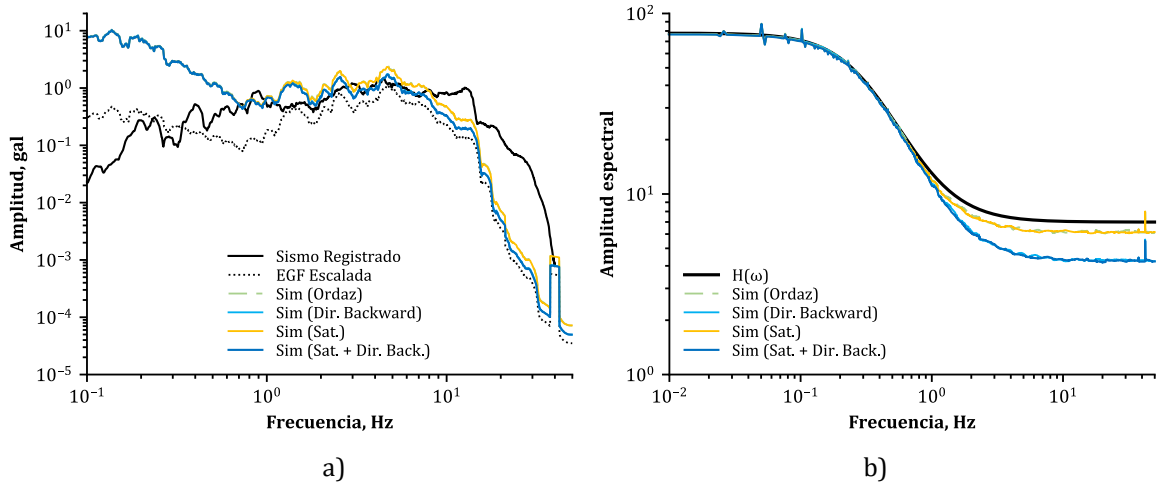


Figura C.52. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad *backward* y saturación con R_{JB} de 132 km para la estación OXIG: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.III.I.II. Estación Yautepec – **YAIG** (Registró efectos de directividad forward)

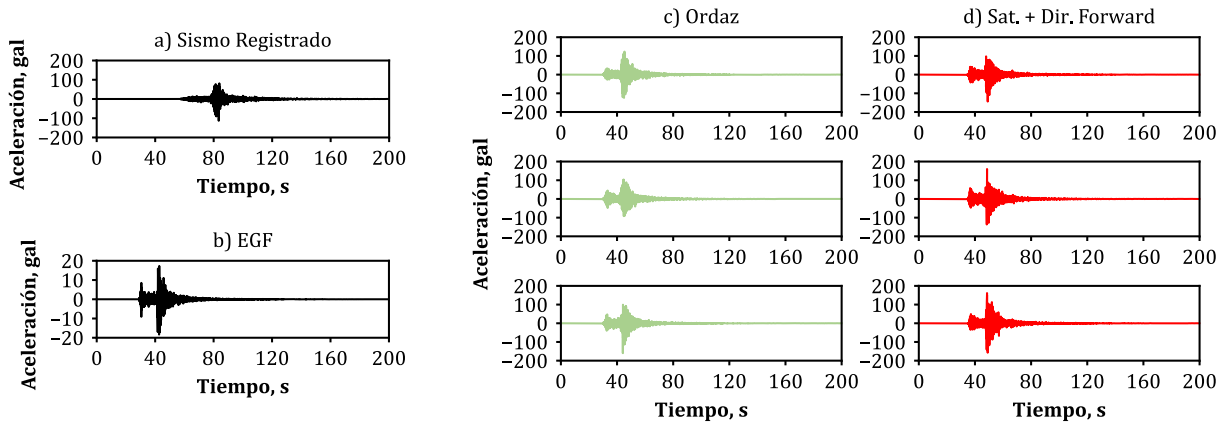


Figura C.53. Registros sísmicos para la estación YAIG de a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación y directividad: d) Saturación con R_{JB} de 165 km y directividad *forward*.

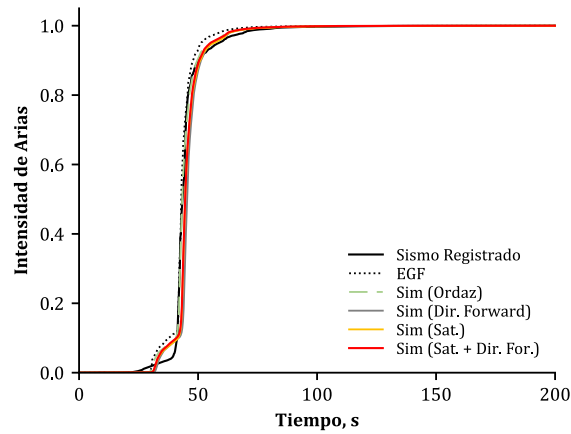


Figura C.54. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación y directividad.

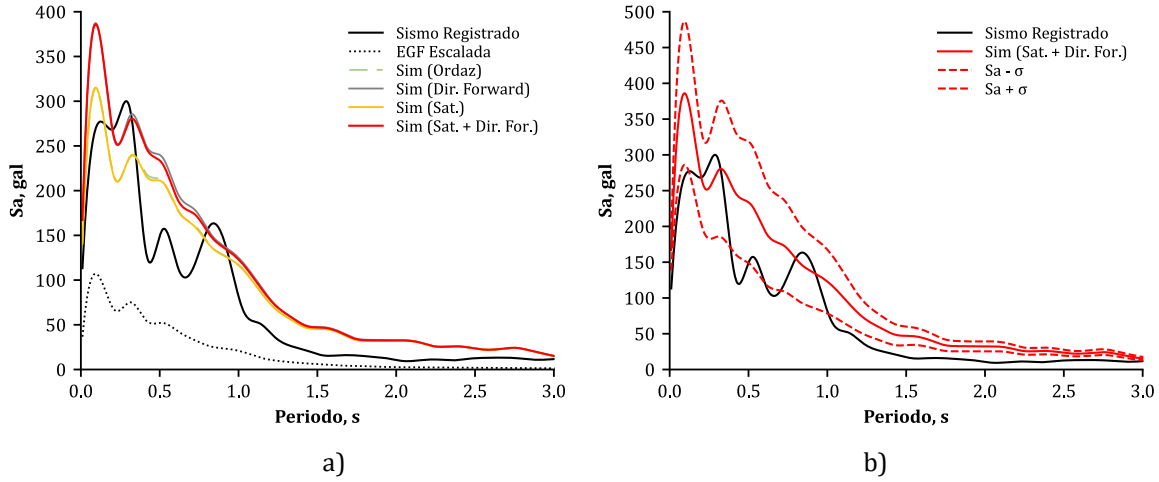


Figura C.55. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación, para R_{JB} de 165 km, y directividad *forward*: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación YAIG.

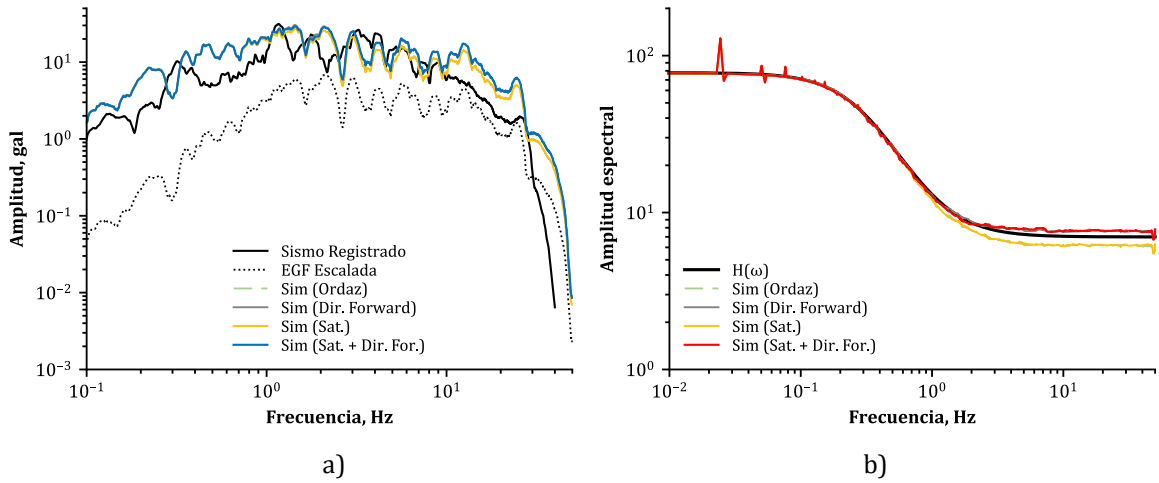


Figura C.56. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad *forward* y saturación con R_{JB} de 165 km para la estación YAIG: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.III.II. Sismo M_w 6.5 del 08 de mayo de 2014 (Tecpán, Guerrero)

C.III.II.I. Estación San Luis de la Loma – **SLU2** (Registró efectos de directividad backward)

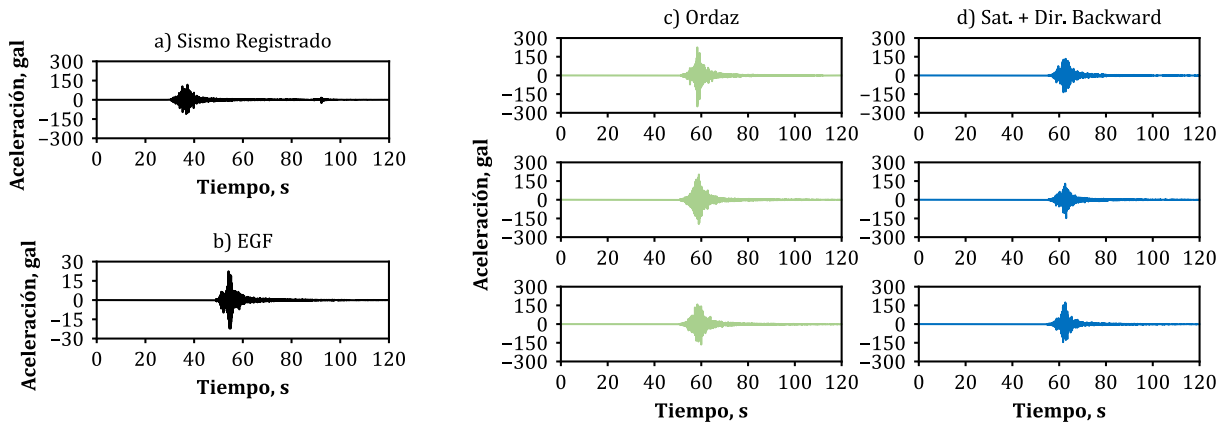


Figura C.57. Registros sísmicos para la estación SLU2 de a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación y directividad: d) Saturación con R_{JB} de 23 km y directividad *backward*.

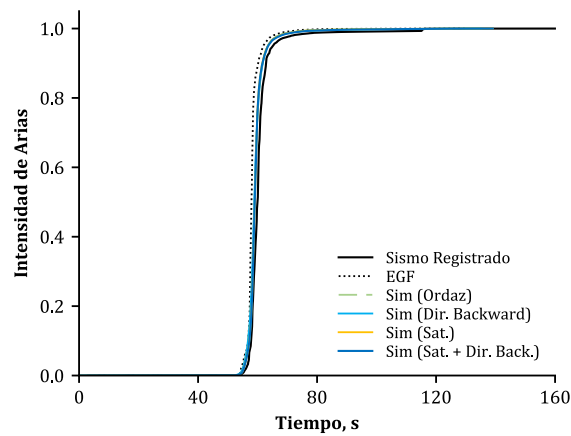


Figura C.58. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación y directividad.

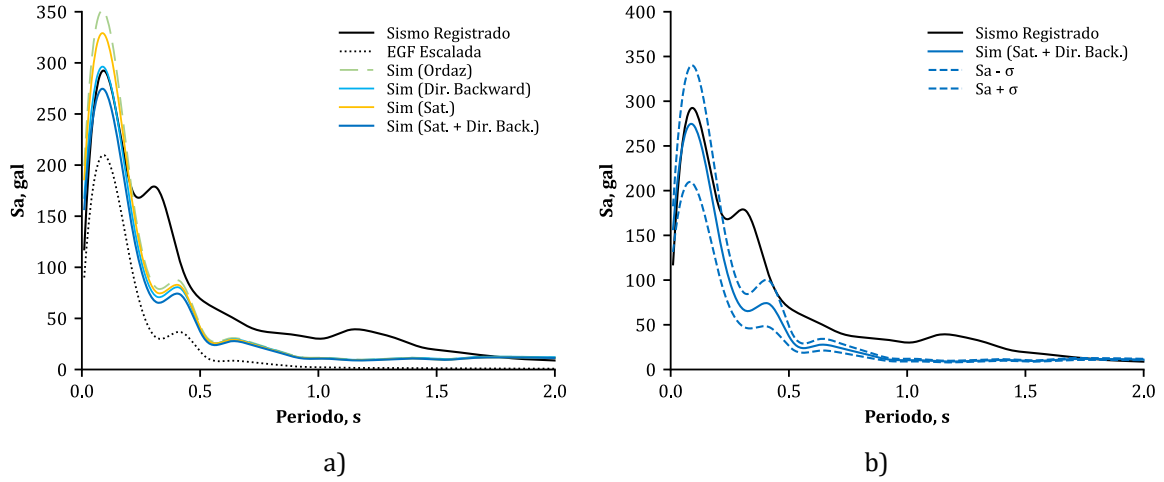


Figura C.59. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación, para R_{JB} de 23 km, y directividad *backward*: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación SLU2.

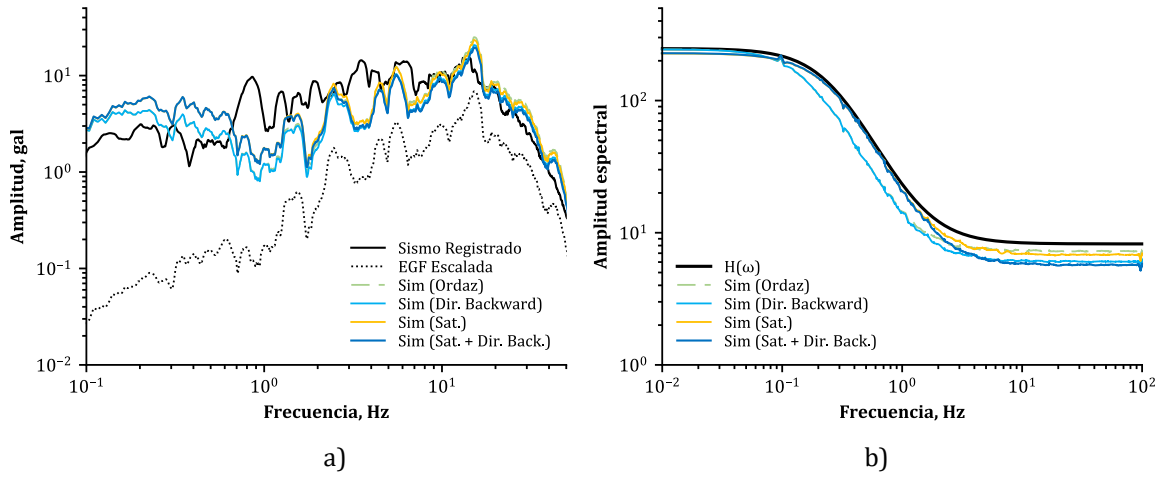


Figura C.60. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad *backward* y saturación con R_{JB} de 23 km para la estación SLU2: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.III.II.II. Estación El Súchil – **SUCH** (Registró efectos de directividad forward)

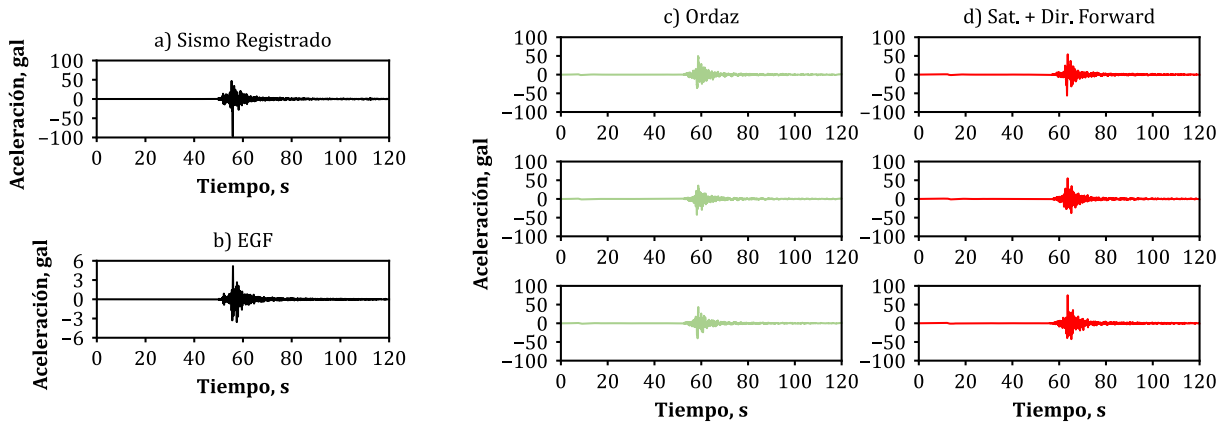


Figura C.61. Registros sísmicos para la estación SUCH de a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación y directividad: d) Saturación con R_{JB} de 31 km y directividad forward.

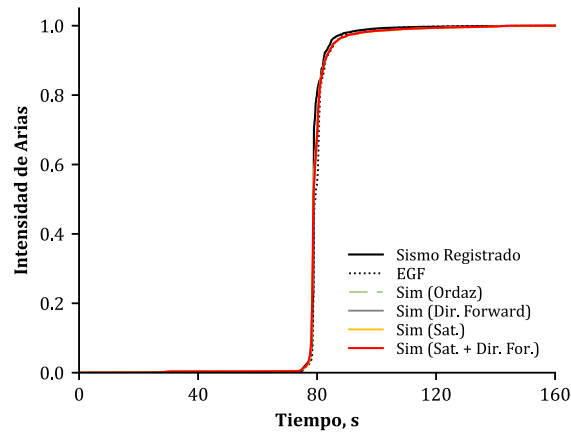


Figura C.62. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación y directividad.

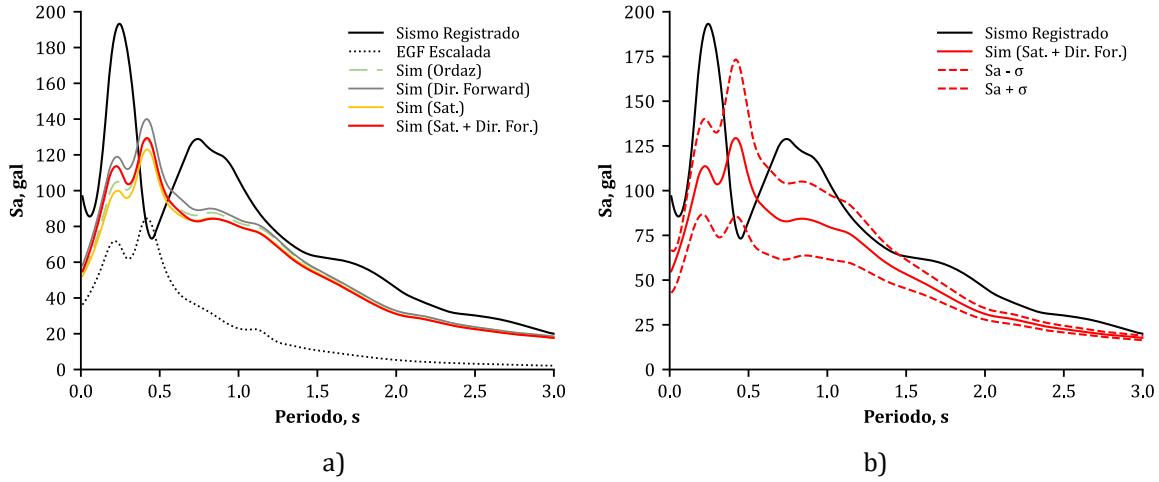


Figura C.63. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación, para R_{JB} de 31 km, y directividad *forward*: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación SUCH.

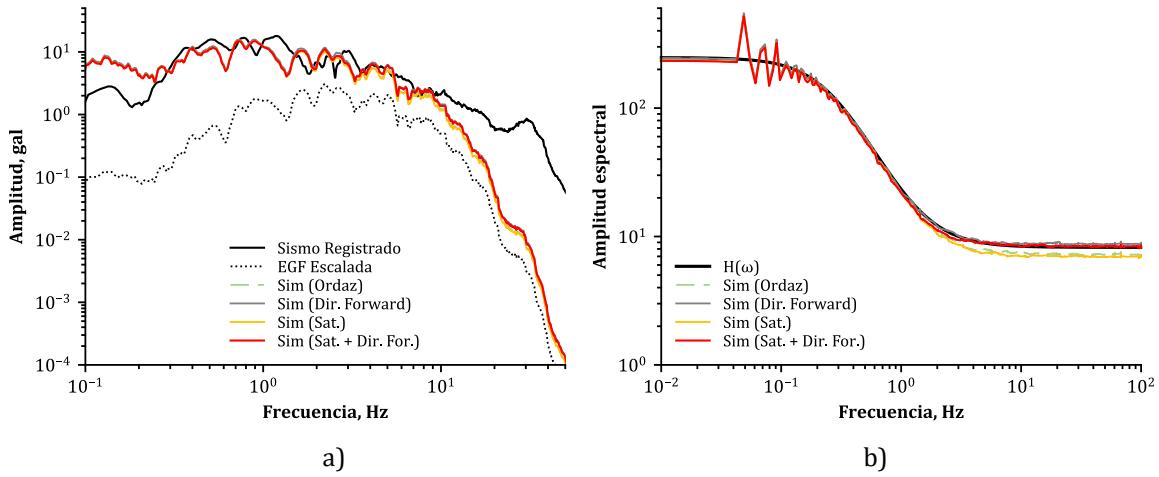


Figura C.64. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad *forward* y saturación con R_{JB} de 31 km para la estación SUCH: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.III.III. Sismo M_w 7 del 08 de septiembre de 2021 (Acapulco, Guerrero)

C.III.III.I. Estación Atoyac – ATYC (Registró efectos de directividad backward)

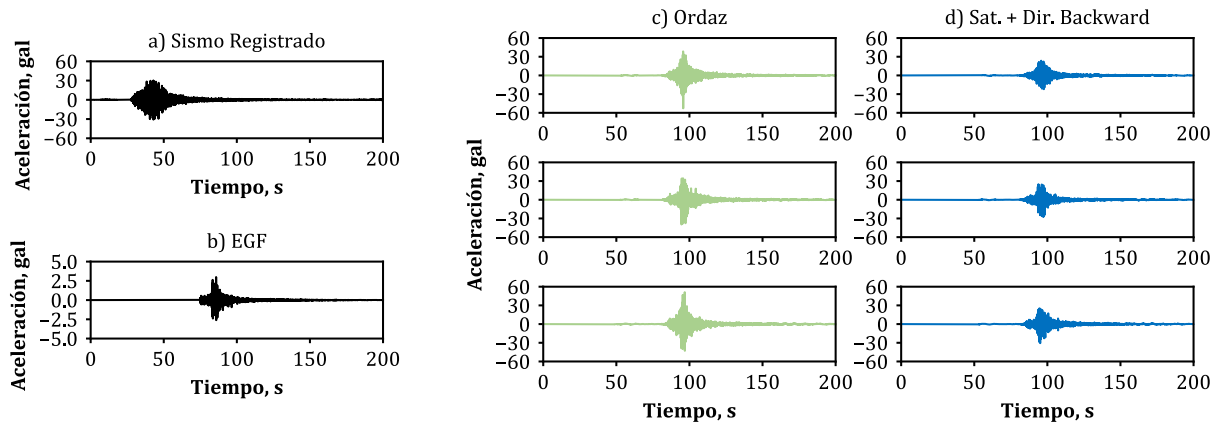


Figura C.65. Registros sísmicos para la estación ATYC de a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación y directividad: d) Saturación con R_{JB} de 56 km y directividad *backward*.

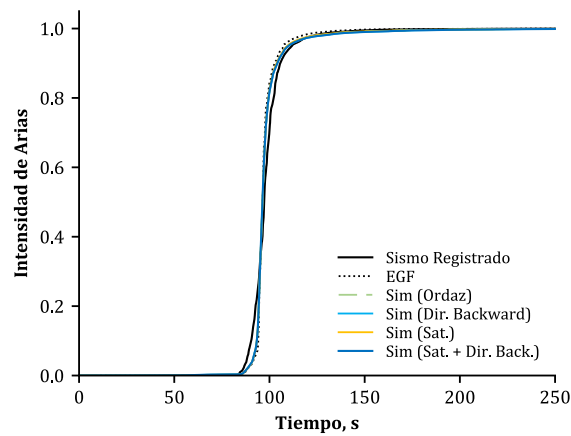


Figura C.66. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación y directividad.

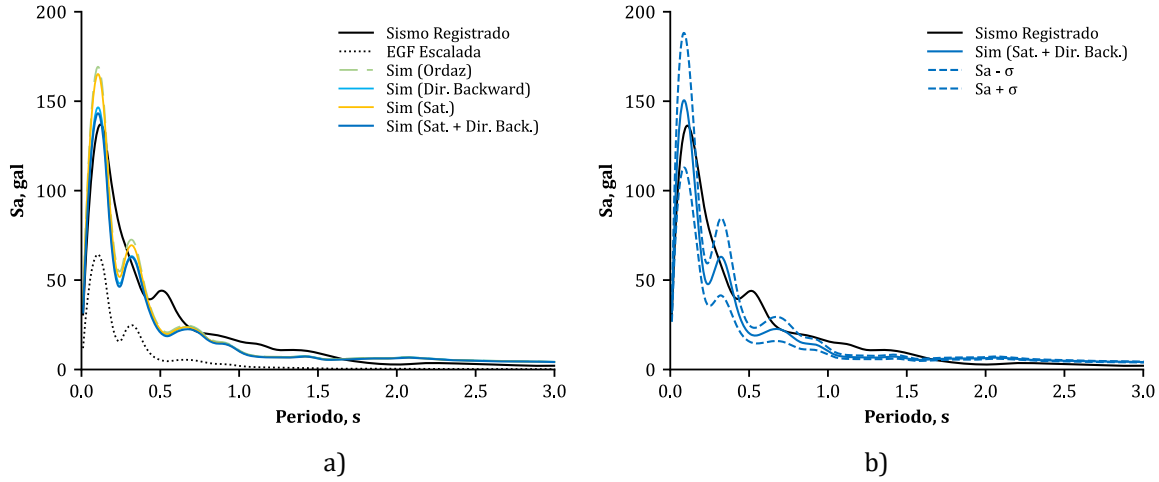


Figura C.67. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación, para R_{JB} de 56 km, y directividad *backward*: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación ATYC.

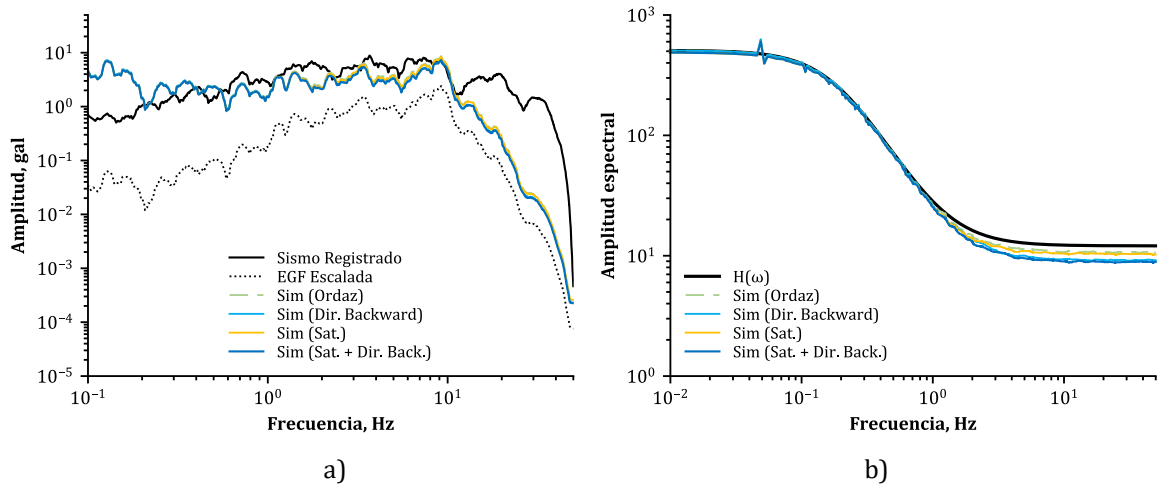


Figura C.68. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad *backward* y saturación con R_{JB} de 56 km para la estación ATYC: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

C.III.III.II. Estación Las Vigas – **VIGA** (Registró efectos de directividad forward)

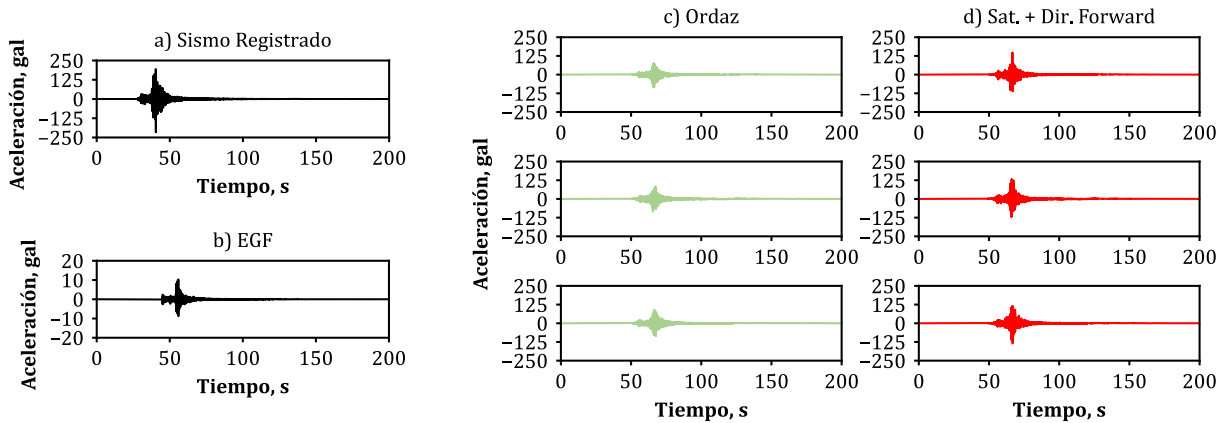


Figura C.69. Registros sísmicos para la estación VIGA de a) sismo registrado, b) EGF y sintéticos obtenidos con c) Ordaz *et al.* (1995) y considerando efectos de saturación y directividad: d) Saturación con R_{JB} de 61 km y directividad forward.

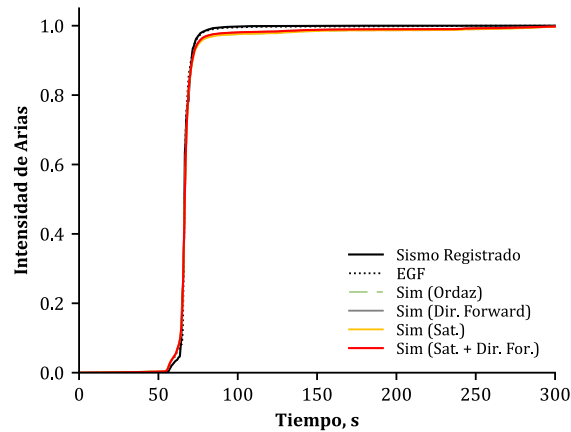


Figura C.70. Comparación de intensidad de Arias de los sismos objetivo y semilla con el promedio de las simulaciones considerando efectos de saturación y directividad.

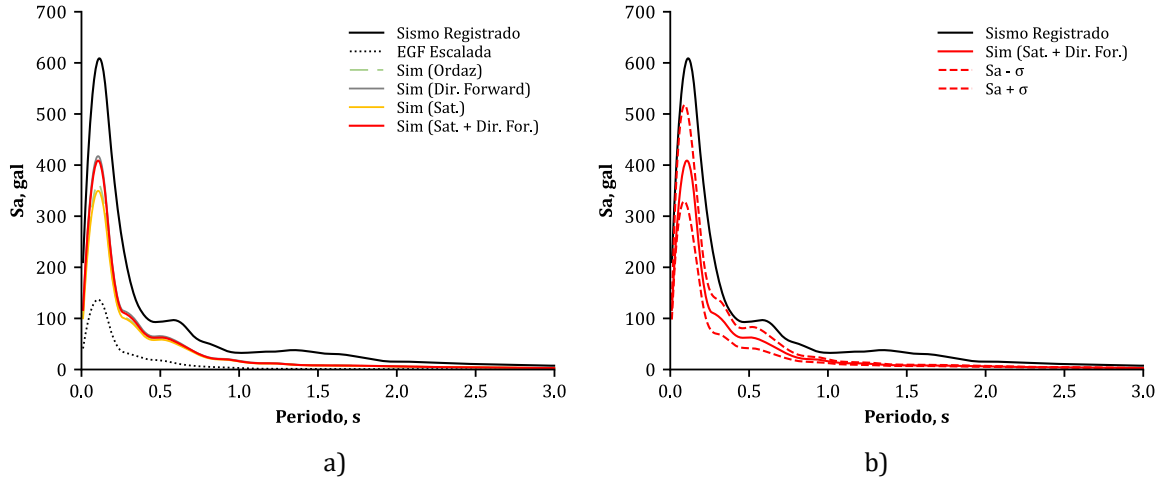


Figura C.71. Espectros de respuesta elástica promedio considerando efectos de saturación, para R_{JB} de 61 km, y directividad *forward*: a) promedio de las simulaciones y b) promedio, más y menos una desviación estándar (σ) comparados con el espectro de respuesta del sismo registrado para la estación VIGA.

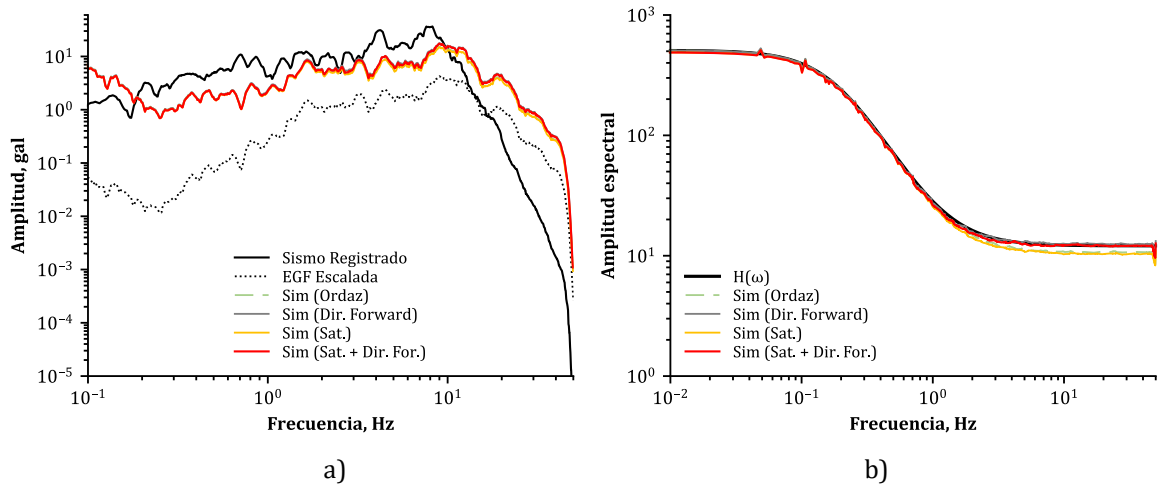


Figura C.72. Promedio de las simulaciones considerando efectos de directividad *forward* y saturación con R_{JB} de 61 km para la estación VIGA: a) Espectro de Fourier de aceleraciones y b) relación espectral.

Anexo D. Parámetros de entrada EXSIM

A continuación, se presentan los parámetros que se requieren definir en un archivo de entrada para poder llevar a cabo simulaciones con el software EXSIM, así como notas importantes de la definición de dichos parámetros.

Tabla D.1. Parámetros de entrada EXSIM y los valores que toman para una simulación.

Parámetro de entrada	Valor(es)	Notas
Parámetros asociados a la corteza		
Densidad de la corteza (ρ)	3.2	(g/cm ³)
Velocidad de las ondas de cortante (β)	4.68	(km/s)
Factor de partición (V)	0.7071	Partición en dos componentes horizontales
Patrón de radiación (R)	0.55	Valor promedio para ondas de cortante
Factor de superficie libre (FS)	2	Valor tomado para casi todos los casos, aunque estrictamente sólo es válido para ondas SH (Boore, 2003)
Función de atenuación geométrica, $G(R)$	Modelo con la forma: $R^{\alpha+\beta_s(M_w-M_s)}$	
Distancia de referencia	1	Usualmente tomada como 1 km (Boore, 2003)
Número de segmentos de la función de atenuación geométrica (j)	3	
R_j	1, 70, 140	Para todas las distancias se consideró: $G(R) = 1/R$
α_j	-1, -1, -1	
β_{sj}	0.0, 0.0, 0.0	
M_{sj}	6.5, 6.5, 6.5	
		Si se considera $\beta_{sj} = 0$ este valor no afecta.
Función de factor de calidad, Q	Modelo con la forma: $Q(f) = Q_0 f^n$ (Se empleó el propuesto por García <i>et al.</i> , 2004: $Q(f) = 251 f^{0.58}$)	
$f r_1$	1.0	$Q(f) = Q r_1 \left(\frac{f}{f r_1}\right)^{s_1}$ para $f \leq f t_1$
$Q r_1$	251.0	
s_1	0.58	
$f t_1$	1.4242	
$f t_2$	1.4242	$Q(f) = Q r_2 \left(\frac{f}{f r_2}\right)^{s_2}$ para $f \geq f t_2$
$f r_2$	1.0	
$Q r_2$	251.0	
s_2	0.58	
Velocidad de las ondas S empleada para derivar la función Q (c_q)	4.68	Se asume igual a β

Duración de la trayectoria		
Número de articulaciones	4	Número de líneas rectas que forman la función (es necesario determinar las coordenadas, distancia y duración, de las articulaciones)
Distancia	0, 10, 70, 130	En kilómetros
Duración	0.0, 0.0, 9.6, 7.8	En segundos
Pendiente después de la última articulación	0.04	Pendiente de la recta después de la articulación
Parámetros de disminución de sitio		
Fmax (f_m)	0.0	Usados en el filtro: $\frac{e^{-\pi\kappa f}}{\sqrt{1 + (f/f_m)}}$ Donde: $\kappa = \kappa_0 + dkappadmag(M_w - amagkref)$ Si solo quiere usarse f_m , entonces $\kappa_0 = 0$ y $dkappadmag = 0$.
Parámetro de atenuación (κ_0)	0.005	
Dkappadmag	0.0	
Magnitud de referencia ($amagkref$)	6.0	
Esquina del filtro de corte-bajo (Low-cut filter corner)	0.05	
Número de pendientes (Nslope)	8	Tiene que ser múltiplo de dos.
Forma de la Ventana aplicada a la señal en el dominio del tiempo	1 0.05 0.2 0.05 2.12 2.0	
Tipo de ventana	1	0 = box, 1 = exponencial
Taper	0.05	Únicamente empleado para la ventana "box"
Eps_w	0.2	
Eta_w	0.05	
Factor para convertir la duración box a exponencial	2.12	
Factor para extender el tiempo t_η	2.0	
Tpadl	50.0	
Tpadt	20.0	
Incremento del tiempo (dt)	0.005	
Semilla	309.0	Semilla original del generador de números aleatorios
Número de simulaciones	100	
Parámetros de la fuente		
Magnitud del evento (M_w)	6.1	
Caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$)	90	En bar
Latitud y longitud de la esquina en el borde superior de la falla	0.0, 0.0	

Localización del hipocentro		
Rumbo (Strike)	0.0	
Buzamiento (Dip)	50.0	
Profundidad	2.0	
Parámetros de la falla		
Tipo de falla	U	S = strike-slip, R = inversa, N = normal, U = indiferenciada.
Longitud de la falla (L)	0	0 = emplea las relaciones de Wells y Coppersmith (1994)
Ancho de la falla (W)	0	0 = emplea las relaciones de Wells y Coppersmith (1994)
Longitud de la subfalla (dL)	1.5	Tiempo de subida de la subfalla
Ancho de la subfalla (dW)	1.5	$= \sqrt{\frac{dL \cdot dW}{\pi}} / v_{rup}$
Caída de esfuerzos de referencia ($\Delta\sigma_{ref}$)	70	Los valores de L y W se multiplican por el factor $\left(\frac{\Delta\sigma_{ref}}{\Delta\sigma}\right)^{1/3}$
Velocidad de ruptura (fracción de la velocidad de ondas de cortante)	0.8	v_{rup}/β Normalmente se emplea este valor (Beresnev y Atkinson, 1997)
Localización del hipocentro sobre la falla y distancia down-dip desde el punto de referencia de la falla	-1.0, -1.0	
Número de hipocentros	2	Si este valor es mayor a 1, se ignoran las distancias sobre la falla y down-dip.
Definición del tiempo de subida (duración de fuente de la subfalla)	2	1 = original, 2 = 1/f0
“Bandera” dinámica	1	0 = no, 1 = sí
Porcentaje de pulsaciones	50.0	Porcentaje máximo de subfallas activas durante la ruptura de una subfalla.
Flag scale factor	2	1 = vel^2 , 2 = acc^2 , 3 = acc^2 asintótico (dmb) (Boore, 2009 recomienda emplear 2)
Definición de pesos de deslizamiento	-1	-1 = deslizamiento uniforme para todas las subfallas, 0 = deslizamientos especificados en un archivo, 1 = pesos aleatorios
Matriz de pesos de deslizamiento	Slip_weights.txt	
“Bandera” determinista	0	0 = sin pulso determinista
γ	1.0	
ν	90.0	
t_0	4.0	
Pico de impulso	10	

Parámetros relacionados a la trayectoria y sitio		
Amplificación de la corteza		
Número de frecuencias	5	
Frecuencia	0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10	Valores para sitios de suelo duro en ENA (se deben modificar por valores específicos para la zona de interés)
Amplificación	1.0, 1.13, 1.22, 1.36, 1.41	
Amplificación del sitio		
Número de frecuencias	1	1 = sin amplificación
Frecuencia	1	
Amplificación	1	
Parámetros relacionados al cálculo de promedios		
Promedio Espectro de amplitudes de Fourier (FAS)	3	1 = aritmético, 2 = geométrico, 3 = cuadrática (rms) (Boore, 2009 recomienda usar 3)
Promedio de pseudoaceleraciones absolutas (PSA)	1	1 = aritmético, 2 = geométrico, 3 = cuadrática (rms) (Boore, 2009 recomienda usar 1)
Promedio de pseudoaceleraciones absolutas (PSA) sobre los hipocentros	2	1 = aritmético, 2 = geométrico, 3 = cuadrática (rms) (Boore, 2009 recomienda usar 2)
Parámetros relacionados a los archivos de salida		
Escribir archivos de aceleración y pseudoaceleración para cada sitio	Y	Y = sí, N = no
Nombre del archivo	Sites_on_radial_line_mex_190917	
% de amortiguamiento para el espectro de respuesta	5.0	
<i>nfreq</i>	100	Número de frecuencias
<i>f_{mín}</i>	0.1	Frecuencia mínima
<i>f_{máx}</i>	99	Frecuencia máxima
<i>nfreq_{sum}</i>	4	Número de frecuencias para el archivo de salida resumen
Parámetros relacionados a los sitios donde se generarán los registros		
Manera en que se definen los sitios	2	1 = latitud, longitud 2 = radio, azimut 3 = Norte, Este
Coordenada 1 del sitio	30, 100	Latitud, Radio o Norte
Coordenada 2 del sitio	45, 45	Longitud, Azimut o Este

Anexo E. Comparación resultados formulación propuesta, EXSIM y sismo registrado

A continuación, se presenta la comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones promedio empleando la formulación propuesta, los resultados obtenidos al emplear el software EXSIM y los espectros del sismo objetivo, para los eventos objetivo que no se presentaron en el capítulo de validación de la formulación.

E.I. Sismo M_w 7 del 15 de junio de 1999 (Tehuacán, Puebla)

E.I.I. Estación Oaxaca – OXIG (Registró efectos de directividad *backward*)

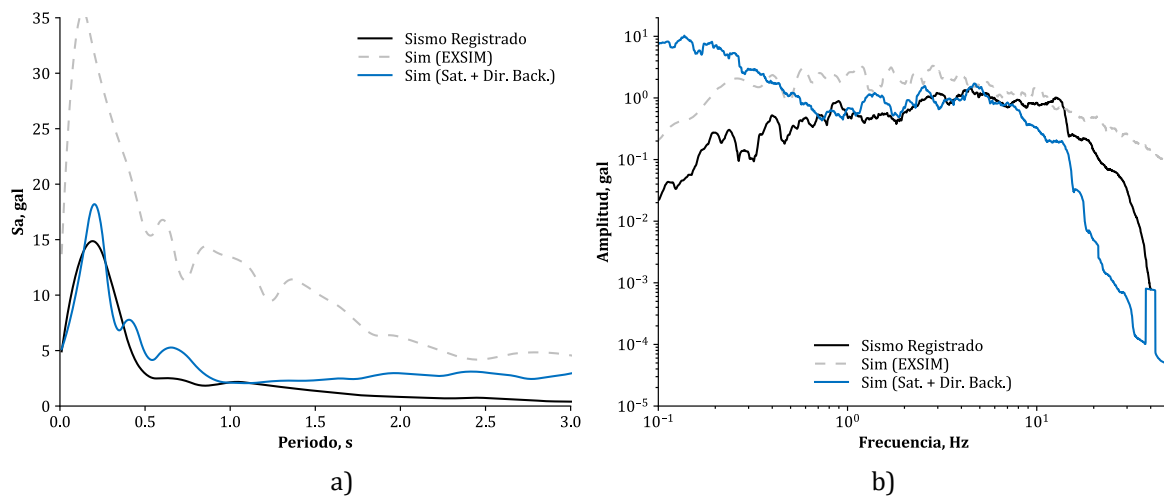


Figura E.1. a) Espectro de respuesta elástica y b) espectro de Fourier promedio para las simulaciones de la formulación propuesta y las obtenidas con EXSIM en la estación OXIG.

E.I.II. Estación Yautepec – YAIG (Registró efectos de directividad *forward*)

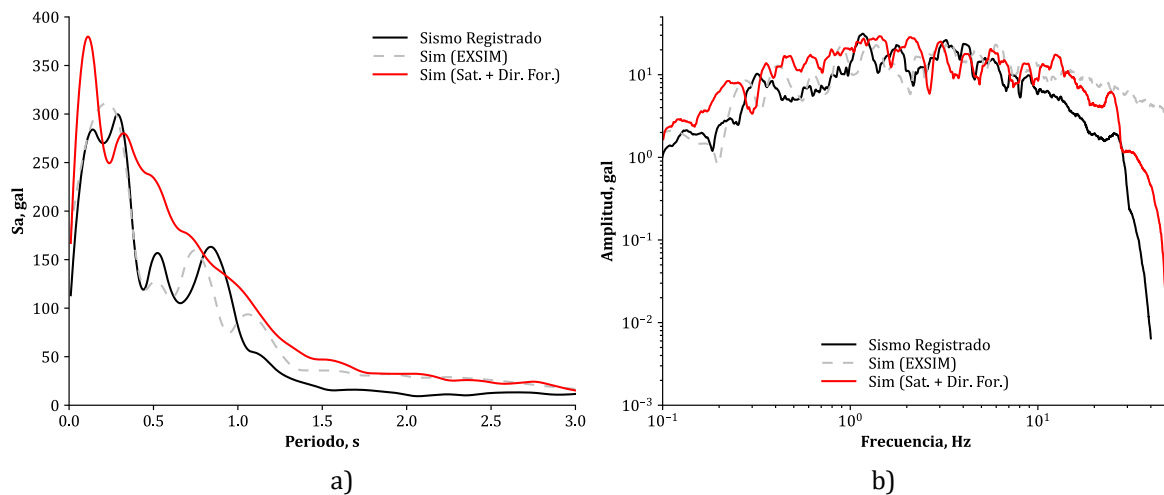


Figura E.2. a) Espectro de respuesta elástica y b) espectro de Fourier promedio para las simulaciones de la formulación propuesta y las obtenidas con EXSIM en la estación YAIG.

E.II. Sismo M_w 6.5 del 08 de mayo de 2014 (Tecpán, Guerrero)

E.II.I. Estación San Luis de la Loma – SLU2 (Registró efectos de directividad *backward*)

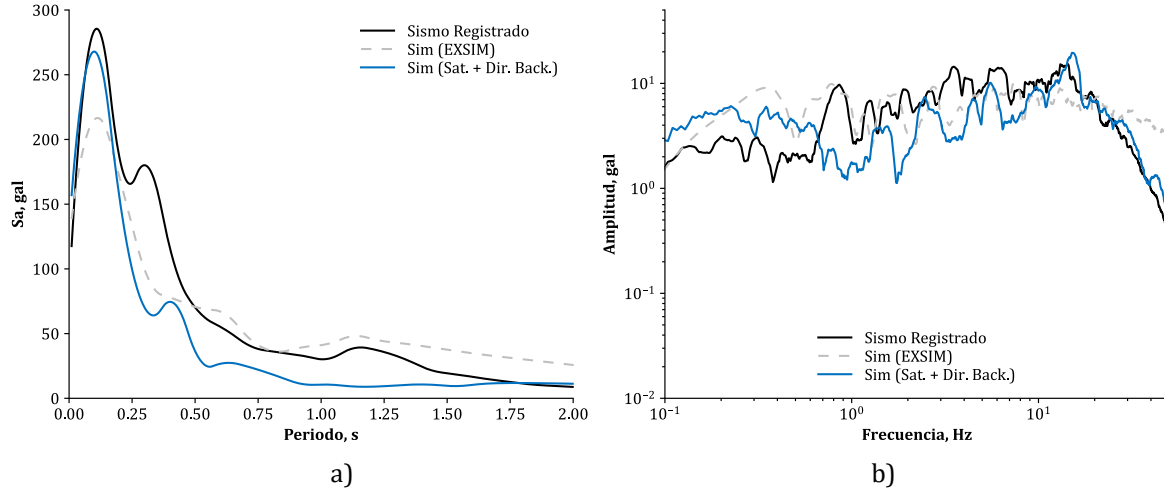


Figura E.3. a) Espectro de respuesta elástica y b) espectro de Fourier promedio para las simulaciones de la formulación propuesta y las obtenidas con EXSIM en la estación SLU2.

E.II.II. Estación El Súchil – SUCH (Registró efectos de directividad *forward*)

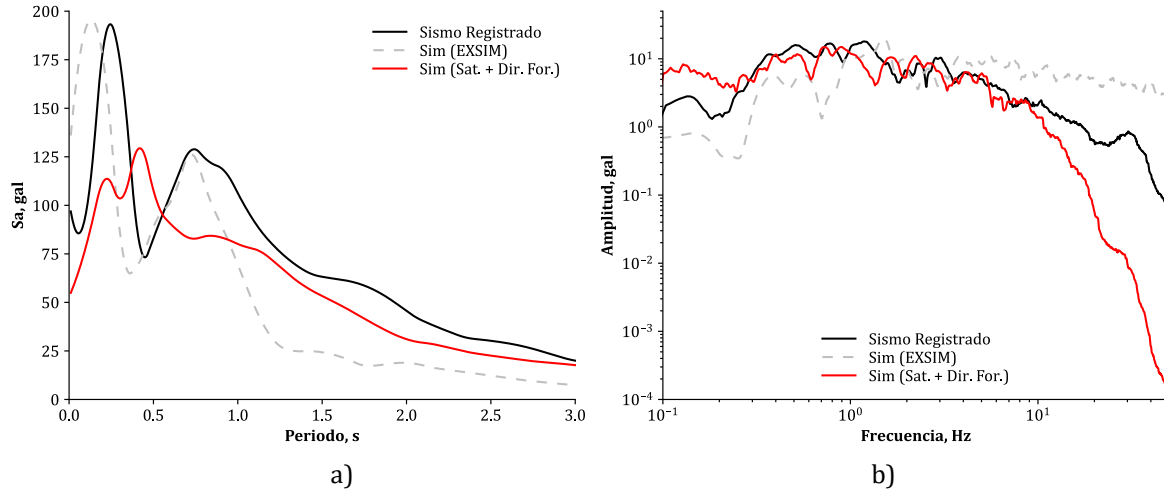


Figura E.4. a) Espectro de respuesta elástica y b) espectro de Fourier promedio para las simulaciones de la formulación propuesta y las obtenidas con EXSIM en la estación SUCH.

E.III. Sismo M_w 7 del 08 de septiembre de 2021 (Acapulco, Guerrero)

E.III.I. Estación Atoyac – ATYC (Registró efectos de directividad *backward*)

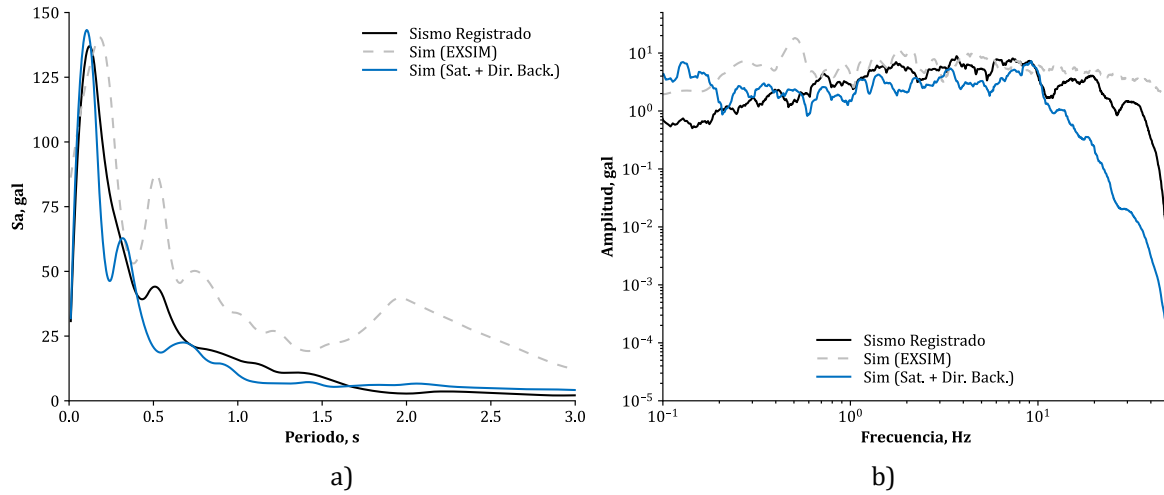


Figura E.5. a) Espectro de respuesta elástica y b) espectro de Fourier promedio para las simulaciones de la formulación propuesta y las obtenidas con EXSIM en la estación ATYC.

E.III.II. Estación Las Vigas – VIGA (Registró efectos de directividad *forward*)

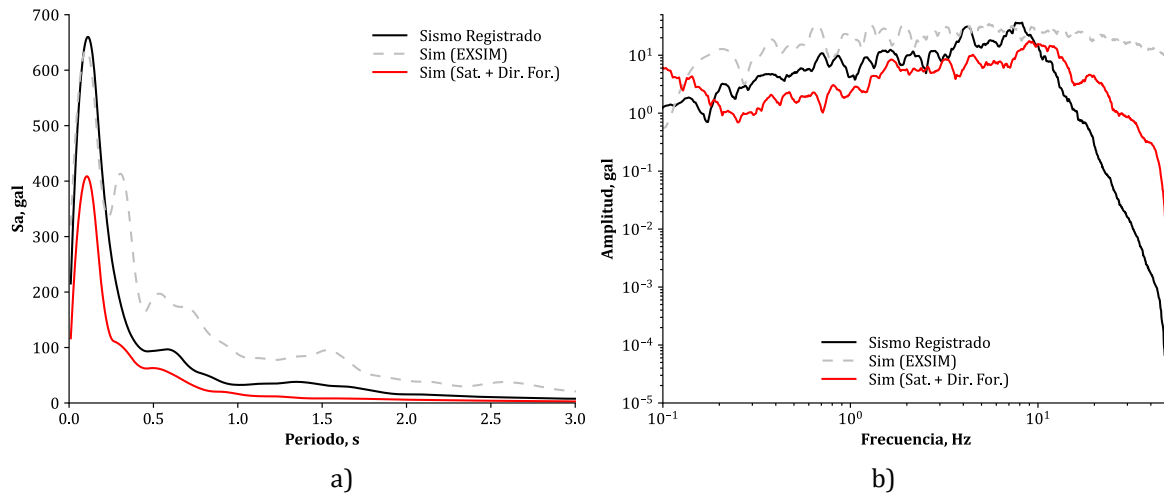


Figura E.6. a) Espectro de respuesta elástica y b) espectro de Fourier promedio para las simulaciones de la formulación propuesta y las obtenidas con EXSIM en la estación VIGA.