



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Movimiento sísmico vertical y horizontal
en la Ciudad de México incluyendo el
sismo del 19 de septiembre de 2017
Mw7.1**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Abel Díaz Martínez

DIRECTOR(A) DE TESIS

Dr. Miguel Ángel Jaimes Téllez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

Dedicatoria

A mi madre, Catalina Díaz Martínez, por ser mi más grande motivación cada día que vivo y por darme el amor más puro e incondicional.

A mis hermanos, Marco y Ana, por creer en mí y apoyarme en todo momento.

A mi tía Jacinta, por darme su amor, por enseñarme con su ejemplo y fomentar en mí el apego a Dios.

A mis tíos, primos, sobrinos y abuelos, por ser la familia más hermosa que pude tener.

A Aylin, por ser alguien muy especial y estar a mi lado.

A mis amigos, familia por elección con los que sé que cuento en todo momento.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por contribuir en mi formación académica y profesional.

A mis profesores, por brindarme sus conocimientos y cultivar en mí el amor al conocimiento.

A mi director de tesis, Dr. Miguel Ángel Jaimes Téllez por su tiempo y asesoría brindada para la elaboración de este trabajo.

A mis sinodales, por darme la oportunidad de presentarles esta tesis y por sus acertadas observaciones a la misma.

Índice

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Capítulo 1. Sismicidad y tipos de sismos en México	4
1.1 Sismos de subducción	5
1.2 Sismos de falla normal	5
Capítulo 2. Espectros de respuesta en estaciones en la Ciudad de México	7
2.1 Sistemas de un grado de libertad	7
2.2 Acelerograma en un sitio registrado	10
2.3 Espectros de respuesta	13
2.4 Espectros de respuesta verticales	16
2.5 Relación de espectros de respuesta verticales sobre horizontales (V/H)	17
Capítulo 3. Cálculo de espectros de respuesta dada una magnitud y distancia	19
3.1 Relación de espectros de respuesta V/H obtenidos mediante datos observados	19
3.2 Estimación de la relación de espectros de respuesta V/H obtenidos mediante ecuaciones de predicción del movimiento	25
3.3 Selección de datos de la red acelerométrica en la Ciudad de México	26
3.4 Procesamiento de datos	28
3.5 Análisis de regresión	28
3.6. Resultados de la regresión	30
3.6.1 Coeficientes de regresión y error	30
Capítulo 4. Comparación de amplitudes V/H	34
4.1 Comparación de amplitudes V/H observados y estimados para cinco estaciones en la CDMX	34
4.1.1 Comparación de métodos de estimación	34
4.1.2 Estimación de la relación V/H dada en función de magnitud y distancia	36
4.1.3 Estimación de amplitudes V/H observados y calculados con las ecuaciones de predicción ..	38
4.2 Comparación de amplitudes V/H observados y estimados para eventos sísmicos en México durante el periodo de 1985-2017	43
4.2.1 Obtención de la ecuación de estimación V/H y su comportamiento	43
4.4.2 Estimación de amplitudes V/H observados y calculados	46
4.3 Espectro de diseño V/H propuesto	49
Discusión	51

Conclusiones.....	55
Referencias	56
Anexo A: Periodos predominantes del suelo y estaciones acelerográficas	58
Anexo B: Espectros de relaciones V/H	59
Anexo C: Coeficientes de regresión para cinco estaciones acelerométricas	66
Anexo D: Comparación de métodos para cinco estaciones acelerométricas	70
Anexo E: Relación V/H estimada en función de distancia (R) para cinco estaciones acelerométricas.....	72
Anexo F: Residuales para cinco estaciones acelerométricas	73
Anexo G: Comparación de amplitudes V/H observados y estimados para eventos sísmicos en México durante el periodo de 1985-2017.....	89

Resumen

En esta tesis se presentan relaciones de las componentes vertical sobre horizontal, V/H , de espectros de respuesta, para sitios sobre suelo blando y terreno firme en la Ciudad de México. Así mismo, se presentan las diferencias de amplitudes de dichas relaciones para distintos periodos de respuesta, clasificando los eventos sísmicos estudiados de acuerdo con su tipo de falla tectónica: subducción y profundidad intermedia. Se consideró una gran variedad de magnitudes de momento, M_w , profundidades focales, H_D , y distancias de ruptura, R , que incluyera la mayor cantidad de aceleraciones de respuesta. También se calcularon estimaciones de espectros de respuesta para las componentes horizontal y vertical, así como la relación vertical sobre horizontal. Esto mediante la propuesta de un método de predicción de movimiento del suelo, con base en registros existentes en estaciones acelerométricas dentro de la Ciudad de México. Se utilizó una base de datos de eventos sísmicos ocurridos durante las últimas décadas, incluyendo dos sismos que han tenido un gran impacto sobre la capital de país: i) sismo del 19 de septiembre de 1985 y ii) sismo del 19 de septiembre de 2019. Se analizó la precisión del método de predicción del movimiento del suelo construido a partir de la obtención de coeficientes de regresión, mediante la comparación de los datos observados versus datos estimados. Mediante los residuales, se validó la utilización del método propuesto para predecir la respuesta del suelo ante movimientos telúricos dada una magnitud M_w y distancia R para la relación V/H .

Abstract

In this thesis, ratios of the vertical-to-horizontal components, V/H , of response spectra are presented, for sites on soft soil and firm ground in Mexico City. Likewise, the differences in amplitudes of these ratios for different response periods are presented, classifying the seismic events studied according to their type of tectonic failure: subduction and intermediate-depth. A large variety of moment magnitudes, M_w , focal depths, H_D , and rupture distances, R , were considered to include the greatest number of response accelerations. Estimates of response spectra were also calculated for the horizontal and vertical components, as well as the vertical-to-horizontal ratio. This through the proposal of a method of ground motion prediction, based on existing records in accelerometric stations within Mexico City. A database of seismic events occurred during the last decades was used, including two earthquakes that have had a great impact on the country's capital: i) earthquake of September 19, 1985 and ii) earthquake of September 19, 2019. The precision of the prediction method of ground motion constructed from the obtaining of regression coefficients was analyzed, by comparing the observed data versus estimated data. Using the residuals, the use of the proposed method to predict the ground response to telluric motions was validated given a magnitude M_w and distance R for the V/H ratio.

Introducción

La presente tesis está elaborada con el fin de ofrecer información relevante en el estudio y avance en el conocimiento de los efectos sísmicos de la componente vertical del movimiento del suelo en la Ciudad de México. Cabe señalar, que la componente vertical del movimiento del suelo hasta hace unos pocos años no había sido estudiada, dado que no existía evidencia de grandes intensidades en eventos sísmicos pasados de la componente vertical. Esto ha llevado a la simplificación de su cálculo y se le ha dado mayor atención al estudio de la componente horizontal. Sin embargo, el reciente sismo del 19 de septiembre de 2017 presentó evidencia de que la componente vertical pudo haber tenido una presencia significativa en los daños ocurridos sobre estructuras. Por esto, la realización de más estudios sobre las fuerzas verticales y sus efectos, serán la base para el completo entendimiento de esta componente, y así, tener más perspectivas para la comprensión de los sismos y sus efectos.

Se presentarán los conceptos y términos que ofrezcan claridad al lector de cada tema abarcado, con el fin de dar una lectura comprensible de los mismos. Por ello, en los primeros capítulos se pretende dar un panorama general de la situación de análisis, antecedentes y métodos de estudio de eventos sísmicos en nuestro país. Posteriormente se realizarán estudios y análisis propios que pretenden comparar de mejor manera la teoría expuesta, reafirmando y/o refutando las hipótesis propuestas.

Se expondrá la importancia de realizar estudios como este, citando algunos de los trabajos previos hechos por investigadores de gran prestigio en la Ingeniería, y buscando que este escrito ofrezca también en poca o mucha medida, una fuente confiable y de credibilidad en la investigación hecha.

En general, es conocido que los eventos sísmicos producen constantes movimientos del suelo y, en las últimas décadas, se han podido registrar de manera precisa y confiable dichos movimientos en la Ciudad de México. Con estos registros acelerométricos, diversos estudios parten para hacer análisis del comportamiento que provocan los sismos sobre el suelo, y en particular, las aceleraciones a las que son sometidos cuando ocurren estos fenómenos.

Con mucha frecuencia se suele considerar que las componentes ortogonales horizontales en el movimiento del suelo son las más importantes para el diseño de estructuras en ingeniería, y la atención se centra en lo que ocurre en los segmentos de la placa Cocos. Teniendo estas consideraciones, se desarrollan *Ground Motion Prediction Equations* (GMPE por sus siglas en inglés), o ecuaciones de predicción del movimiento en el suelo, para las componentes horizontales (Cotton et al., 2006). Sin embargo, estudios recientes señalan la importancia de la componente vertical en el movimiento del suelo (p. ej., Bozorgnia and Campbell, 2016a; Stewart et al., 2016) con los que se pueden estimar además la relación espectral vertical sobre horizontal (V/H). Más aún, si tomamos en cuenta aquellos eventos sísmicos menos estudiados como lo son los de profundidad intermedia, se podrá abarcar más el panorama de análisis en el comportamiento del suelo. Así, se analizaría más a detalle aquellos sismos menos estudiados pero que también representan riesgos importantes para los habitantes de la Ciudad de México. Con estas razones, el análisis tomará en cuenta las tres componentes que han registrado distintas estaciones sísmicas a lo largo de los últimos años en la Ciudad, con dos tipos de fallas tectónicas relevantes de estudio.

Capítulo 1. Sismicidad y tipos de sismos en México

Los avances en el conocimiento de la constitución interna de la Tierra a través de estudios y contribuciones en los campos de la Geología, Geofísica, etc., ha llevado a un gran número de aportaciones para su comprensión. Una de estas aportaciones es la Teoría de Tectónica de Placas, la cual admite que la litósfera de la corteza terrestre se encuentra dividida o fragmentada, formando mosaicos rígidos conocidos como placas, las cuales son de distintos tamaños y grosores. Estas placas tienen la posibilidad de encontrarse entre sí debido al movimiento constante de las mismas.

Esto conlleva a la definición de sismo, que se trata de movimientos bruscos del terreno como consecuencia de la disipación repentina de energía por la tectónica de placas. Las placas son capaces de almacenar grandes cantidades de energía y debido a los movimientos frecuentes, choques y fracturas de éstas, disipan la energía acumulada repentinamente desde su punto de origen (llamado foco o hipocentro). Posteriormente, se producen grandes esfuerzos capaces de sobrepasar la resistencia de la roca y que pueden llegar a la superficie terrestre en forma de ondas que se propagan en todas las direcciones, dichas ondas son conocidas como ondas sísmicas.

A lo largo de su extensión territorial, la república mexicana se encuentra sobre algunas de estas placas tectónicas. Es bien sabido que el sur y sureste es donde se registra la mayor ocurrencia de sismos del país, esto debido principalmente a las placas de Rivera y Cocos, las cuales se encuentran en subducción (se sumergen) por debajo de la placa de Norteamérica.

Para la Ingeniería Civil, el estudio de las características de las ondas sísmicas tales como sus duraciones, direcciones de propagación, efectos sobre la superficie terrestre, etc., tiene una gran relevancia al momento de diseñar cualquier tipo de estructura. Estas características permiten tener un panorama más amplio de los requerimientos ante eventos sísmicos a los cuales las obras estarán expuestas a lo largo de su vida útil. Por ello, se emplean distintos tipos de instrumentos que puedan medir estas características, siendo principalmente los sismógrafos y los acelerógrafos. El inglés John Milne fue el creador del primer sismógrafo moderno en el año 1880, el cual era capaz de registrar el movimiento del suelo. Este aparato se basa en el principio de inercia de una masa suspendida de un soporte rígido el cual es constantemente sacudido por el paso de ondas sísmicas. Lo anterior permitía el registro de movimiento al inscribirlo sobre un papel pegado a un rodillo giratorio, a través de un punzón o lápiz conectado al péndulo. Por su parte, el acelerógrafo tal como su nombre hace mención, registra la aceleración que sufre el suelo ante el movimiento durante un sismo. Su principal característica es que, en contraste con los sismógrafos, es capaz de registrar aceleraciones mucho mayores que la gravedad g . Esto permite que los registros de los acelerógrafos no se saturen y así tener una mejor precisión del registro de aceleraciones en el suelo para eventos de gran energía y de más cercanía al sitio.

A continuación, se describen los dos tipos de sismos más relevantes de estudio en nuestro país, que poseen características propias y con las cuales se clasificarán los eventos sísmicos recopilados en las últimas décadas en México, de acuerdo con el tipo de falla de placas, para posteriormente estudiar estos fenómenos desde el punto de vista de la Ingeniería, obteniendo respuestas de sistemas ante estos movimientos.

1.1 Sismos de subducción

Debido a su alta ocurrencia en nuestro país, este tipo de evento sísmico es el más conocido y estudiado en nuestro país, un ejemplo de este tipo de sismo es el del 19 de septiembre de 1985. Este evento, fue originado en las costas de Michoacán y sus características provocaron devastadores daños en estructuras, así como pérdidas materiales y humanas. No solo eso, este sismo marcó un antes y un después en la normatividad de construcción y seguridad de estructuras y de la Ingeniería Civil misma, exhibiendo las debilidades y los errores en las obras afectadas. Desde entonces el estudio de este sismo en particular permitió adecuar mejores consideraciones en las normas de diseño para estructuras en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF). También, provocó la extensión progresiva de la Red Acelerográfica de la Ciudad de México que, gracias a distintas instituciones públicas y privadas, incluyendo el Instituto de Ingeniería, se han instalado hasta la actualidad más de 200 aparatos de medición de sismos fuertes en la Ciudad. Se denomina subducción al proceso mediante el cual parte de la corteza oceánica, individualizada en una placa litosférica, se sumerge bajo otra placa de carácter continental. Los sismos de subducción tienen un mecanismo de falla inversa, la cual se caracteriza por deslizamientos verticales ascendentes entre dos bloques, en este caso, entre placas tectónicas. Estos deslizamientos son provocados por la liberación de grandes cantidades de energía acumuladas en el interior de las placas, causando acortamientos en la corteza terrestre.

A lo largo de la zona de subducción, se ha podido registrar otro sismo relevante de este tipo, que alcanzó una magnitud de 8.2, el cual ocurrió el 3 de junio de 1932 y que se prolongó por las costas de Jalisco y Colima, mismos Estados que tuvieron las mayores afectaciones.

Además de esto, algunos segmentos de esta zona tienen periodos de recurrencia relativamente cortos de alrededor de 40 años.

Una característica importante en este tipo de sismo es que el tipo de onda que producen poseen periodos largos, por lo que su atenuación es menor. Esta característica propicia que, al atravesar el suelo de la Ciudad de México en zonas con sedimentos altamente compresibles (como arenas, limos o arcillas) o poco consolidados, las ondas se amplifiquen. Los sismos de subducción tienden a durar más que otros sismos con distinto tipo de falla.

1.2 Sismos de falla normal

Son aquellos que ocurren en profundidades mayores a 50 km. Ocurren porque el bloque encima de la falla (la pared colgante) se mueve hacia abajo con respecto al bloque debajo de la falla (pared fija). Este movimiento es causado por fuerzas tensoras que resulta en grandes deformaciones que logran el rompimiento de roca, lo cual genera energía que se disipa como ondas sísmicas.

Siendo menos estudiados que los sismos de subducción, los habitantes de la capital hemos sentido lo devastador que puede llegar a ser un sismo con falla normal. El reciente evento del 19 de septiembre del 2017 es considerado el segundo sismo más destructivo en la historia de la Ciudad

de México, lo que refleja de manera muy clara la necesidad de prestar más atención a estos tipos de sismos.

A diferencia de los sismos de subducción, el periodo ocurrencia de sismos con falla normal es mayor. Otras diferencias con los sismos de subducción son que los sismos de profundidad intermedia tienden a ser más enérgicos, pero con una duración menor y ondas con una mayor atenuación.

Algunos otros ejemplos de grandes sismos de profundidad intermedia son: Orizaba, Veracruz en 1973 con $M_w = 7.0$; Huajuapán de León en 1980 de $M_w = 7.0$; 30 de septiembre de 1999 en Oaxaca con $M_w = 7.5$ y 21 de julio de 2000 en Puebla de $M_w = 5.9$.

Capítulo 2. Espectros de respuesta en estaciones en la Ciudad de México

Teniendo descrito el panorama general de la sismicidad en nuestro país, podemos continuar adentrándonos en la parte matemática que permite estudiar de manera cuantitativa el comportamiento del suelo en la Ciudad de México ante los efectos que produce un sismo. Para esto, comenzaremos definiendo algunos términos que hacen posible un estudio más riguroso de los efectos producidos en estructuras ante estos fenómenos naturales. Así mismo, se presentan los parámetros principales utilizados que se deben de tomar en cuenta para analizar, comparar y estimar dichos efectos. Además, gracias a diversas aportaciones de investigadores, se han propuesto métodos factibles para el estudio de los datos registrados, que reducen considerablemente la incertidumbre y dan confiabilidad para la representación numérica de la situación real al ocurrir sismos.

2.1 Sistemas de un grado de libertad

Uno de los modelos que permite estudiar la respuesta sísmica en las estructuras ante acciones dinámicas que se presentan en el suelo sobre las que se desplantan, es la conceptualización del oscilador de un grado de libertad. En este oscilador, se describen las características principales de un sistema que responde ante desplazamientos, velocidades o aceleraciones provocadas por las ondas sísmicas generadas durante un evento sísmico en un sitio.

El oscilador de un grado de libertad es uno de los sistemas más simples (Figura 2.1). Está constituido por la masa m , un resorte, el cual está representada como una columna cuya rigidez lateral k es la constante de dicho resorte, y un amortiguador con un valor de amortiguamiento c . Una vez que la masa m está sujeta a un movimiento de su base \ddot{x}_g , esta comenzará a oscilar y se presentarán en ella tres tipos de fuerza:

- La primera es la fuerza de inercia, la cual es proporcional al producto de la masa m y la aceleración total \ddot{x} , la cual se representa de la siguiente manera:

$$\ddot{x} = \ddot{x}_g + \ddot{x}_0 \quad (2.1)$$

donde \ddot{x} es la aceleración total de la masa, \ddot{x}_g es la aceleración del suelo y \ddot{x}_0 es la aceleración de la masa respecto a suelo. Entonces, la fuerza de inercia queda como se presenta, mediante el principio de D'Alembert. Esto es dado por la ecuación (2.2) como:

$$F_I = m\ddot{x} \quad (2.2)$$

donde F_I es la fuerza de inercia, m es la masa del sistema y \ddot{x} es la aceleración total de la masa.

- La segunda fuerza presente en la masa es la de amortiguamiento, generada para buscar el equilibrio de la estructura en vibración. Se obtiene al multiplicar la velocidad de la masa respecto al suelo por una constante de proporcionalidad.

$$F_A = c\dot{x} \quad (2.3)$$

donde F_A es la fuerza de amortiguamiento, c es la constante de proporcionalidad conocida como coeficiente de amortiguamiento y \dot{x} es la velocidad de la masa.

- La tercera fuerza es la generada en la columna debido a su resistencia al tratar de ser desplazada respecto al suelo. Se obtiene con el producto del desplazamiento relativo de la masa respecto al suelo, y la rigidez lateral de la columna que se opone, la expresión matemática de esta fuerza se muestra enseguida.

$$F_R = kx \quad (2.4)$$

donde F_R es la fuerza de resistencia, k es la rigidez lateral de la columna y x es el desplazamiento de la masa.

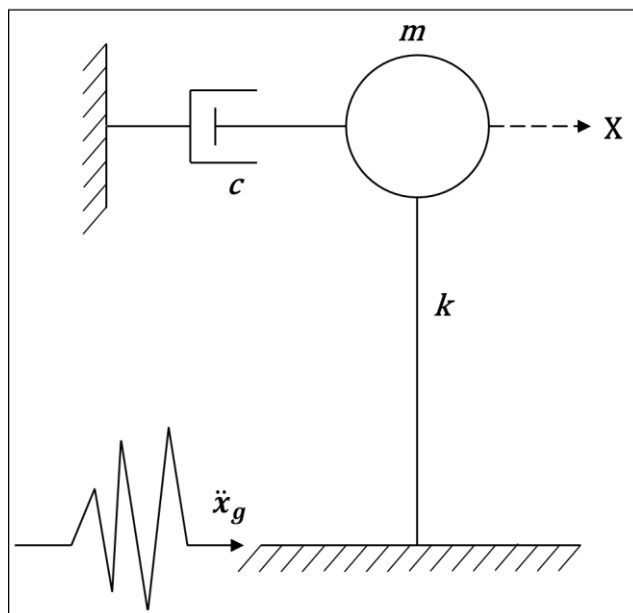


Figura 2.1 Sistema de un grado de libertad sometido a una excitación sísmica.

El equilibrio dinámico de estas fuerzas ocurre cuando su suma algebraica resulte 0. Al sustituir sus componentes y tomando como término común los efectos de desplazamiento, velocidad y aceleración de la masa respecto del suelo se obtiene la siguiente ecuación.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (2.5)$$

Dividiendo la ecuación (2.5) entre m se tiene que:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = -\ddot{x}_g \quad (2.6)$$

Se observa que $\frac{c}{m}$ y $\frac{k}{m}$ son conceptos relacionados a la vibración libre del sistema, es decir, a las vibraciones producidas por excitaciones instantáneas sobre el sistema. Nótese que $\frac{k}{m}$ es el cuadrado de la frecuencia circular del sistema no amortiguado, es decir:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \therefore \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.7)$$

donde ω es la frecuencia natural de vibrar del sistema no amortiguado, y, por ende, se describe un movimiento armónico simple con frecuencia ω y periodo:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2.8)$$

Siguiendo un análisis del sistema en vibración libre, el amortiguamiento crítico es aquel para el cual el sistema una vez que haya sido desplazado, vuelve a su posición original sin oscilar:

$$C_{cr} = 2\sqrt{km} \quad (2.10)$$

Por lo que, la constante de amortiguamiento c se puede definir como una fracción del amortiguamiento crítico:

$$\xi = \frac{c}{C_{cr}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{2m\sqrt{\frac{k}{m}}} = \frac{c}{2m\omega} \quad (2.11)$$

De (2.11) reordenamos términos:

$$\frac{c}{m} = 2\omega\xi \quad (2.12)$$

Ahora sustituyendo (2.7) y (2.12) en (2.6):

$$\ddot{x} + 2\omega\xi\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{x}_g \quad (2.13)$$

Por lo que ahora la ecuación diferencial (2.13) sólo depende de la frecuencia circular del sistema (o bien de su periodo como se aprecia en la ecuación (2.8)), y la fracción del amortiguamiento crítico.

2.2 Acelerograma en un sitio registrado

Se puede definir acelerograma como una superposición de una cantidad muy grande de ondas armónicas de forma aleatoria, abarcando un rango amplio de frecuencias pero con amplitudes muy variantes. Estas últimas, son muy pequeñas inicialmente y crecen rápidamente, alcanzando los valores máximos en los periodos dominantes, que dependen de distintos factores. Algunos de estos factores pueden ser: el tipo de sismo que provoque las excitaciones (p. ej., sismos de subducción o de profundidad intermedia), la distancia al epicentro o el tipo de suelo. Finalmente, las amplitudes decrecen muy rápido hasta que el movimiento se detiene. Una característica muy importante en un acelerograma es la aceleración máxima que registra, pues para el diseño estructural, es suficiente conocer la sollicitación máxima a la que las estructuras estarán expuestas ante un sismo. Sin embargo, el estudiar más a detalle los acelerogramas permitiría un mayor entendimiento del comportamiento real ante un evento sísmico, y, en consecuencia, ofrecer datos más sólidos para el mejoramiento en el diseño de estructuras sismorresistentes.

Como se mencionó anteriormente, el instrumento encargado de registrar el comportamiento del suelo durante un evento sísmico es el acelerógrafo, el cual mide la aceleración del suelo a través del tiempo. Matemáticamente, la aceleración es la derivada de la velocidad respecto al tiempo, o bien, la segunda derivada del desplazamiento respecto al tiempo. Conociendo esto, es posible hallar las historias de velocidades y desplazamientos del suelo aplicando la integración o doble integración a la historia de aceleraciones, respectivamente. Para fines de este estudio, será de interés únicamente la historia de aceleraciones. Como ejemplo en la Figura 2.2, se muestra a continuación la representación gráfica de la historia de aceleraciones registradas por dos acelerógrafos ubicados en distintas estaciones o sitios. El primer sitio se nombra Ciudad Universitaria (CU). El segundo en la Figura 2.3, es el registro de Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), ambos ubicados en la Ciudad de México. Los acelerogramas fueron creados con los registros del evento sísmico del 19 de septiembre de 1985, obtenidos de la base de datos de sismos fuertes del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

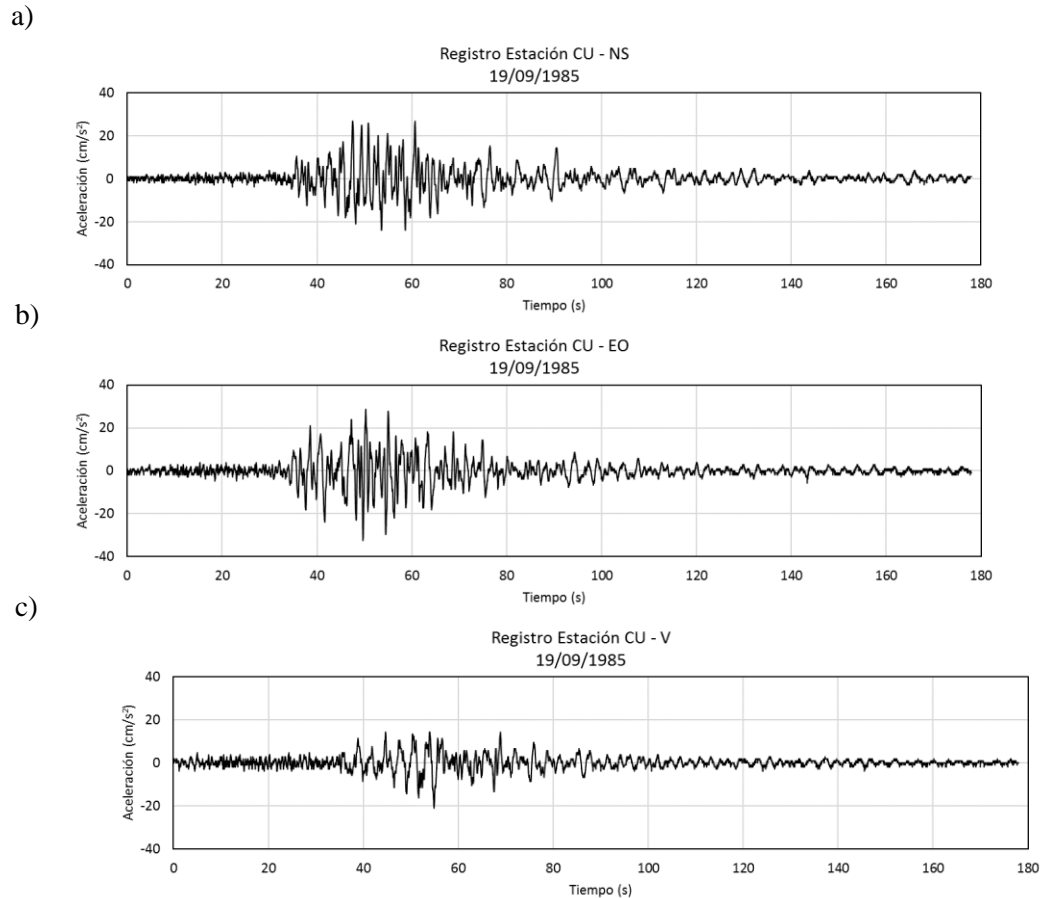


Figura 2.2 Acelerogramas registrados en las componentes: a) Norte-Sur (NS), b) Este-Oeste (EO) y c) Vertical (V) para la estación CU del sismo del 19/09/1985.

Como es posible observar, los acelerogramas indican aceleraciones tanto positivas como negativas, pues debido a las características de las ondas sísmicas, la aceleración del suelo puede variar bruscamente de sentido en cada instante de registro. Nótese que el tiempo total registrado de la aceleración en este acelerograma es de 180 segundos o 3 minutos, los cuales están divididos en intervalos de 0.01 segundos. El registro en intervalos pequeños como estos, son considerados detallados, pues contienen una gran cantidad de puntos que los conforman. Observe que las aceleraciones máximas del suelo, para las tres componentes se presentan dentro del rango de 35-75 segundos aproximadamente. Además, se observa que las aceleraciones máximas alcanzan valores de hasta 30 cm/s^2 en las componentes Norte-Sur y Este-Oeste, mientras que, por su parte, la componente vertical registró aceleraciones máximas de aproximadamente 20 cm/s^2 .

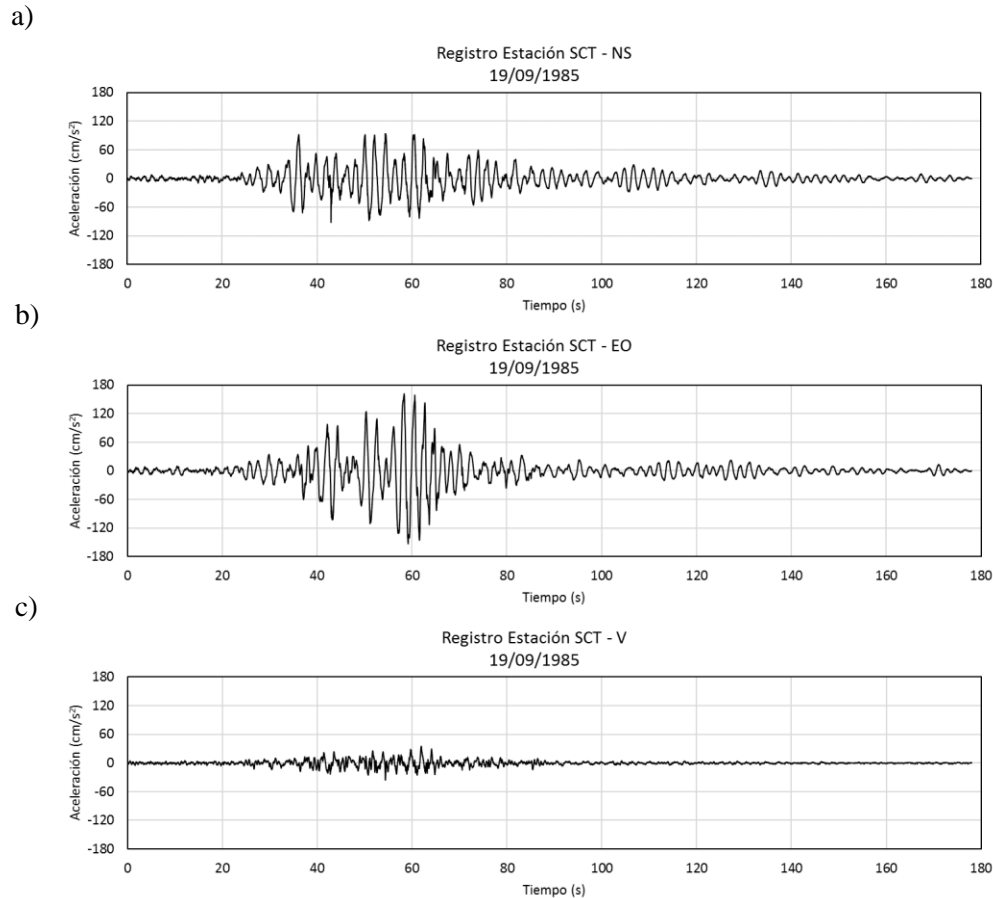


Figura 2.3 Acelerogramas registrados en las componentes: a) Norte-Sur (NS), b) Este-Oeste (EO) y c) Vertical (V) para la estación SCT del sismo del 19/09/1985.

Nuevamente, el tiempo de registro en estos acelerogramas son de 180 s, obteniendo las aceleraciones máximas del suelo en un rango similar al de la estación de Ciudad Universitaria. Sin embargo, observe que los valores de estas son mucho mayores al comparar las tres componentes, registrando aceleraciones de hasta 170 cm/s^2 (componente Este-Oeste). Esto da muestra que, para un mismo evento, se pueden tener acelerogramas muy diferentes. En este caso en particular, un factor importante que puede explicar la diferencia de aceleraciones es el terreno sobre el que se encuentra cada sitio de observación. En el sitio de Ciudad Universitaria el terreno debajo del acelerógrafo es terreno rocoso, mientras que la estación SCT está ubicada sobre suelo blando y como se ha mencionado, este suelo propicia la amplificación de las ondas sísmicas y con ello, se registran aceleraciones mucho mayores.

2.3 Espectros de respuesta

Si obtenemos la respuesta de sistemas de un grado de libertad con amortiguamiento ante un acelerograma con periodos desde cero, y para cada sistema se halla su respuesta máxima, es posible graficar dicho conjunto de respuestas. A esta representación se le conoce como espectro de respuesta. Así, el eje de las abscisas mide los distintos periodos del sistema mientras que las ordenadas miden las respuestas máximas, ya sea en términos de aceleración, velocidad o desplazamiento de la masa. Una observación digna de mencionar es la importancia del amortiguamiento, pues esta evita que la frecuencia de la excitación en el suelo debido a un sismo y la frecuencia del sistema sea igual a uno. Esto último se da cuando dichas frecuencias son iguales o muy similares, pues en estos casos se presenta el fenómeno conocido como resonancia. Esto provoca que los desplazamientos en la masa del sistema lleguen a ser mucho mayores que las del suelo debido a que las fuerzas sobre el sistema se amplifican, lo que representa un peligro potencial sobre las estructuras que puede poner en riesgo su integridad. Es por ello que, mientras las estructuras sean más rígidas (con periodos de vibración más bajos), se verán afectadas mucho más ante movimientos externos en donde la mayor cantidad de energía esté contenida en frecuencias altas. Por otro lado, aquellas estructuras con periodos de vibración altos, conocidas como estructuras flexibles, son afectadas más por movimientos cuya energía se encuentre en el rango de frecuencias bajas.

La respuesta de un sistema de un grado de libertad a un movimiento del suelo se puede obtener a partir de la ecuación diferencial (2.13) utilizando distintos métodos:

- En el dominio del tiempo por medio de la integral de Duhamel
- En el dominio del tiempo por medio de una integración numérica de la ecuación del movimiento
- En el dominio de la frecuencia obteniendo la transformada de Fourier de la historia de aceleraciones, multiplicándola por la función de transferencia del sistema y obteniendo la transformada inversa de Fourier de dicho producto

Así, para la utilización del primer método, por ejemplo, la solución de la ecuación diferencial (2.13), cuando la estructura parte del reposo, está dada por la integral de Duhamel:

$$x(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_{t_0}^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \text{sen}[\omega_D(t-\tau)] d\tau \quad (2.14)$$

donde $\omega_D = \omega\sqrt{1-\xi^2}$, la solución implica la aproximación $1-\xi^2 = 1$, la cual es tolerable, ya que comúnmente en estructuras civiles $\xi < 1$. La integral de Duhamel es uno de los métodos más utilizados para el análisis dinámico lineal de estructuras sometidas a fuerzas variables respecto al tiempo. Es obtenida a partir de impulsos diferenciales basados en el principio de superposición, por lo que es aplicable solo para estructuras cuyas propiedades tales como la masa o la rigidez, permanecen constantes durante los efectos dinámicos.

Así, derivando la ecuación 2.14, obtenemos la respuesta de velocidades:

$$\dot{x}(t) = - \int_{t_0}^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos[\omega_D(t-\tau)] d\tau - \xi\omega x(t) \quad (2.15)$$

Y derivando de nuevo, hallamos la respuesta en aceleraciones:

$$\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) = \left[\int_{t_0}^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \text{sen}[\omega_D(t-\tau)] d\tau - \xi\omega \right] - 2\xi\omega\dot{x}(t) - (\xi\omega)^2 x(t) \quad (2.16)$$

El espectro de respuesta en desplazamiento, velocidad o aceleración será el conjunto de valores máximos de las respuestas del sistema.

Debido a la complejidad de su resolución se opta por seguir procedimientos numéricos simplificados que dan una buena aproximación y reducen sensiblemente el trabajo numérico.

Uno de estos métodos simplificados es el conocido como el de las “8 constantes”, el cual consiste en determinar la respuesta de desplazamiento y velocidad para cada intervalo de tiempo por medio de constantes (4 para desplazamiento y 4 para velocidad). Estas constantes se calculan una sola vez en el procedimiento. Partiendo de la solución de equilibrio dinámico de fuerzas representada en la ecuación 2.13, se obtienen expresiones para calcular el desplazamiento y la velocidad para cada instante de tiempo y se visualizan de la siguiente manera:

$$x(t_{i+1}) = Ax(t_i) + B\dot{x}(t_i) + C\ddot{x}_g(t_i)m + D\ddot{x}_g(t_{i+1})m \quad (2.17)$$

$$\dot{x}(t_{i+1}) = A'\dot{x}(t_i) + B'\dot{x}(t_i) + C'\ddot{x}_g(t_i)m + D'\ddot{x}_g(t_{i+1})m \quad (2.18)$$

El cálculo de las constantes para la ecuación 2.17 se obtiene a continuación:

$$A = e^{-\xi\omega\Delta t} \left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \text{sen}\omega_D\Delta t + \cos\omega_D\Delta t \right) \quad (2.19)$$

$$B = e^{-\xi\omega\Delta t} \left(\frac{1}{\omega_D} \text{sen}\omega_D\Delta t \right) \quad (2.20)$$

$$C = \frac{1}{k} \left\{ \frac{2\xi}{\omega\Delta t} + e^{-\xi\omega\Delta t} \left[\left(\frac{1-2\xi^2}{\omega_D\Delta t} - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \right) \text{sen}\omega_D\Delta t - \left(1 + \frac{2\xi}{\omega\Delta t} \right) \cos\omega_D\Delta t \right] \right\} \quad (2.21)$$

$$D = \frac{1}{k} \left[1 - \frac{2\xi}{\omega\Delta t} + e^{-\xi\omega\Delta t} \left(\frac{2\xi^2-1}{\omega_D\Delta t} \text{sen}\omega_D\Delta t + \frac{2\xi}{\omega\Delta t} \cos\omega_D\Delta t \right) \right] \quad (2.22)$$

Así mismo, las constantes para la ecuación 2.18 se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$A' = -e^{-\xi\omega\Delta t} \left(\frac{\omega}{\sqrt{1-\xi^2}} \operatorname{sen}\omega_D\Delta t \right) \quad (2.23)$$

$$B' = e^{-\xi\omega\Delta t} \left(\cos\omega_D\Delta t - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \operatorname{sen}\omega_D\Delta t \right) \quad (2.24)$$

$$C' = \frac{1}{k} \left\{ -\frac{1}{\Delta t} + e^{-\xi\omega\Delta t} \left[\left(\frac{\omega}{\sqrt{1-\xi^2}} + \frac{\xi}{\Delta t\sqrt{1-\xi^2}} \right) \operatorname{sen}\omega_D\Delta t + \frac{1}{\Delta t} \cos\omega_D\Delta t \right] \right\} \quad (2.25)$$

$$D' = \frac{1}{k\Delta t} \left[1 - e^{-\xi\omega\Delta t} \left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \operatorname{sen}\omega_D\Delta t + \cos\omega_D\Delta t \right) \right] \quad (2.26)$$

De este modo, al obtener los coeficientes y utilizándolos para obtener la respuesta máxima de un sistema de 1 grado de libertad con amortiguamiento del 5% y periodos en un rango entre 0.01-3 s, se obtienen espectros aproximados de respuesta en término de desplazamiento y velocidad, los cuales son llamados “pseudoespectros de respuesta”.

Es posible calcular las aceleraciones máximas aproximadas a partir de los desplazamientos máximos mediante la siguiente relación:

$$S_a = \omega^2 S_d \quad (2.27)$$

donde S_a son las aceleraciones máximas aproximadas, S_d son los desplazamientos máximos calculados y ω es la frecuencia natural de vibrar del sistema. Así mismo, las velocidades y aceleraciones máximas se relacionan entre sí de la siguiente manera:

$$S_a = \omega S_v \quad (2.28)$$

donde S_v son las velocidades máximas calculadas. La gráfica de S_a vs T se conoce como pseudoespectro de aceleraciones. El prefijo “pseudo” se utiliza para distinguirlo del espectro exacto, sin embargo, para amortiguamientos pequeños el error que se comete es muy bajo (Entendiendo esta diferencia, en adelante llamaremos “espectros” a los “pseudoespectros” para una mejor lectura). De esta manera, se calculan los espectros de respuesta para los acelerogramas de la componente Este-Oeste mostradas en las Figuras 2.2 y 2.3 para las estaciones CU y SCT. Los resultados obtenidos mediante el método de las ocho constantes se muestran a continuación:

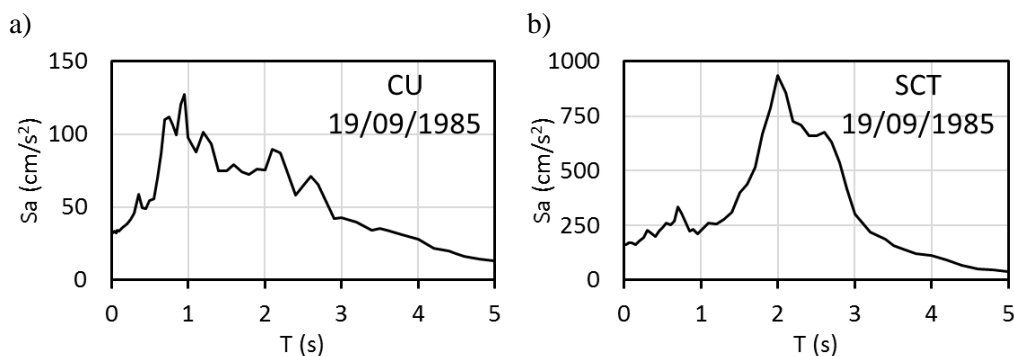


Figura 2.4 Espectros de respuesta en términos de aceleración de la componente Este-Oeste para las estaciones a) CU y b) SCT, utilizando el acelerograma registrado para el sismo del 19/09/1985.

De igual modo, el mismo método es aplicado para obtener los espectros de respuesta para la componente Norte-Sur, lo cuales, por lo general arrojan resultados similares. Por esta razón, más adelante se utilizará un método que considere la respuesta en ambas componentes como una sola respuesta que serán de gran utilidad para su posterior análisis. Nótese que para la Figura 2.4, el rango de periodos para los cuáles se tienen los mayores valores de ordenadas espectrales, son aquellos periodos dominantes del acelerograma que son más cercanos a los periodos dominantes del sistema de 1 grado de libertad sobre el que se analiza, esto debido a las amplitudes en las respuestas máximas por el fenómeno de resonancia.

Un parámetro muy utilizado en los cálculos dinámicos de las estructuras y relacionados con su respuesta, es la aceleración pico del suelo o Peak Ground Acceleration (PGA), la cual representa una medida de la fuerza de inercia en la estructura por el movimiento máximo del suelo.

2.4 Espectros de respuesta verticales

A diferencia de las componentes Norte-Sur y Este-Oeste, las respuestas máximas en términos de aceleración para la componente vertical muestran resultados regularmente distintos. Por lo general, los valores de espectros de respuesta verticales suelen ser menores que los obtenidos en las otras dos componentes, sin embargo, esto no es una regla. En ocasiones, las respuestas verticales pueden llegar a representar un efecto importante de la respuesta total sobre una estructura afectada por un movimiento sísmico. De ahí que, en este estudio se considerará también esta componente para los análisis posteriores. La Figura 2.5 muestra la obtención del espectro de respuesta vertical, nuevamente para las estaciones CU y SCT a partir de la historia de aceleraciones registrada para el sismo del 19 de septiembre de 1985.

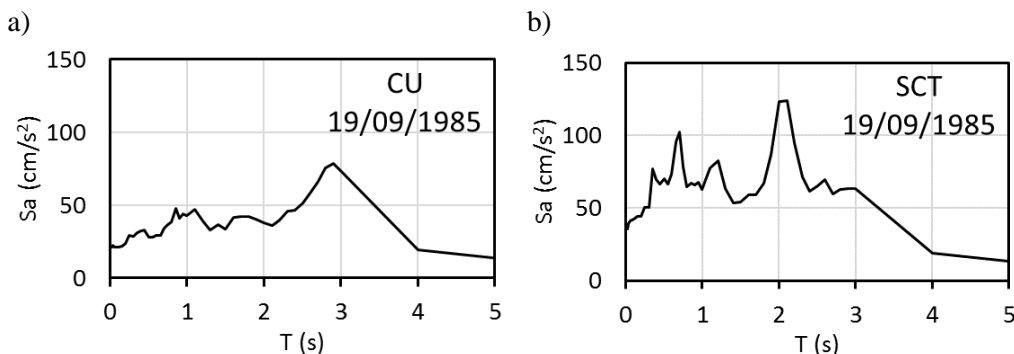


Figura 2.5 Espectros de respuesta en términos de aceleración de la componente vertical para las estaciones a) CU y b) SCT utilizando el acelerograma registrado para el sismo del 19/09/1985.

2.5 Relación de espectros de respuesta verticales sobre horizontales (V/H)

Las relaciones V/H se generan dividiendo los valores de respuesta máxima del espectro de aceleración vertical entre el espectro de aceleración horizontal. Los espectros horizontales utilizados para obtener las relaciones V/H, que se informan a lo largo de este estudio, se basan en la media cuadrática.

La media cuadrática se define como la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los valores de una variable. Esta media es comúnmente utilizada en cálculos científicos debido a que toma en cuenta mediciones con signo negativo:

$$MC = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n}} \tag{2.29}$$

donde MC es la media cuadrática, y_i corresponde al valor de cada dato observado de la variable de interés y n es el número total de datos.

Llevando esta ecuación a nuestro estudio, podemos hallar la ecuación que define los valores del espectro de respuesta de la componente horizontal utilizando la media cuadrática de los valores de respuesta máxima de las componentes Norte-Sur y Este -Oeste en función del periodo del sistema:

$$Sa_H(T) = \sqrt{\frac{(Sa_{NS}(T))^2 + (Sa_{EO}(T))^2}{2}} \tag{2.30}$$

donde $Sa_H(T)$ son los valores de respuesta máxima en función del periodo para la componente horizontal, $Sa_{NS}(T)$ son los valores de respuesta máxima en función del periodo para la componente Norte-Sur, y $Sa_{EO}(T)$ son los valores de respuesta máxima en función del periodo del sistema para la componente Este-Oeste.

De esta manera obtenemos primeramente el espectro de respuesta horizontal para las estaciones ejemplificadas anteriormente, obteniendo los siguientes resultados:

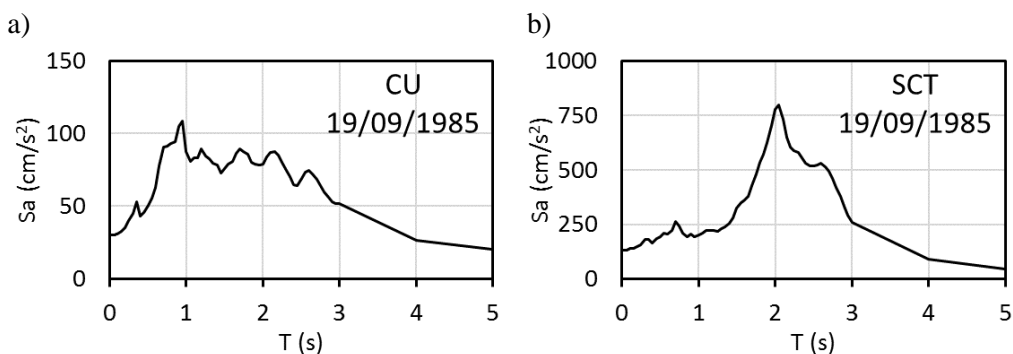


Figura 2.6 Espectros de respuesta en términos de aceleración de la componente horizontal para las estaciones a) CU y b) SCT utilizando el acelerograma registrado para el sismo del 19/09/1985.

Ahora, es posible calcular la relación para ambas estaciones. La Figura 2.7 muestra en el eje de las abscisas los periodos de vibración de los sistemas analizados, mientras que el eje de las ordenadas representa el cociente de las respuestas máximas en términos de aceleración de la componente vertical sobre las repuestas máximas de la componente horizontal.

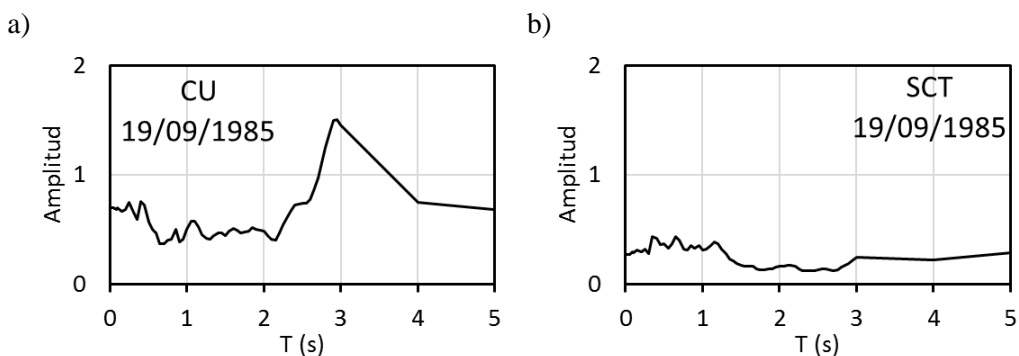


Figura 2.7 Espectros de respuesta de la relación de la componente vertical sobre la componente horizontal para las estaciones a) CU y b) SCT utilizando el acelerograma registrado para el sismo del 19/09/1985.

Capítulo 3. Cálculo de espectros de respuesta dada una magnitud y distancia

Este capítulo se profundizará en la utilización de los espectros de respuesta, en particular, se analizarán los espectros de respuesta de las relaciones de la componente vertical sobre la horizontal. Primeramente, se detallará la información ya recolectada de eventos sísmicos, y que serán utilizados para la elaboración de los espectros, indicando su procedencia y la razón de su elección para el estudio. Posteriormente se describirán los métodos empleados para la obtención gráfica de las relaciones V/H de los datos observados, incluyendo las fórmulas necesarias para su cálculo. Una vez obtenidos los cálculos y gráficos necesarios, se expondrán algunos de los avances realizados para el conocimiento del comportamiento de la componente vertical y la relación V/H, tal como las ecuaciones de predicción de movimiento del suelo. Empleando métodos similares a los propuestos en investigaciones anteriores, se compararán los resultados obtenidos para los eventos seleccionados, con el fin de validar el uso de estos y comprobar su efectividad. Finalmente se ejemplificará alguna de las ventajas de este tipo de estudios en investigaciones posteriores, que encaminen a nuevos descubrimientos y futuras aportaciones en el tema de las fuerzas verticales.

3.1 Relación de espectros de respuesta V/H obtenidos mediante datos observados

A través de este estudio se ha obtenido la información de los espectros de respuesta para acelerogramas de eventos sísmicos registrados desde el año 1985 hasta 2017 en México, abarcando 54 estaciones localizadas en suelo blando, así como 5 estaciones sobre terreno firme. La clasificación anterior toma en cuenta los periodos predominantes del suelo, siendo categorizados como estaciones sobre suelo blando aquellas donde los periodos predominantes del suelo sean mayores a 0.5s, mientras que serán considerados estaciones sobre terreno firme aquellas cuyos periodos sean menores a 0.5s (Figura A.1 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, 2004). El Anexo A muestra un ejemplo aproximado de los isoperiodos predominantes en la Ciudad de México, así como la ubicación de la mayoría de las estaciones utilizadas para este estudio. Se contemplaron los dos tipos de eventos sísmicos de gran relevancia previamente mencionados; sismos de subducción y sismos de falla normal, analizando 18 y 23 eventos, respectivamente. El cálculo de los espectros de respuesta para esta tesis estará basado en los acelerogramas de tres componentes registrados en las estaciones de campo: (i) componente Norte-Sur (NS), (ii) componente Este-Oeste (EO) y (iii) componente vertical (V).

A continuación, se muestran las Tablas 3.1 y 3.2 que representan los principales datos registrados de dichos eventos. Como es posible observar, la composición de las tablas muestran (de izquierda a derecha) las siguientes columnas: “Número de evento”, con el fin poder identificar con mayor facilidad las características de un evento en particular; “Fecha”, que muestra mediante el formato (año, mes, día) la fecha de registro de cada evento sísmico; “Magnitud”, medida en magnitud de momento M_w debido a su confiabilidad, además de ser la más utilizada para el análisis científico; “ R ” es la distancia de ruptura, o bien, la distancia desde el punto donde se genera la liberación de energía hasta la estación que registra su efecto sobre el suelo (punto de observación); “Localización del Foco” son las coordenadas geográficas (latitud, longitud) y la profundidad del foco o hipocentro H_D ; el apartado “Estado” sirve como una referencia del Estado más cercano a donde ocurrió el

evento sísmico; por último, “N° de Registros” son la cantidad de estaciones con registros acelerométricos en las tres componentes mencionadas para cada evento analizado.

Tabla 3.1 Sismos de falla normal usados en este estudio durante el periodo de 1993-2017 para el cálculo de espectros de respuesta horizontales, verticales y la relación V/H - 979 registros.

N° Evento	Fecha (aa/mm/dd)	Magnitud M_w	R km	Localización del Foco				N° de Registros
				Lat (°)	Lon (°)	H_D (km)	Estado	
1	93/08/05	5.2	237	17.62	-97.94	53.7	Oaxaca	5
2	94/02/23	5.8	278	17.75	-97.27	75	Oaxaca	20
3	94/05/23	6.2	209	18.02	-100.57	50	Guerrero	49
4	94/12/10	6.4	300	17.98	-101.52	50	Guerrero	46
5	97/01/11	7.1	377	18.34	-102.58	40	Michoacán	52
6	97/04/03	5.2	154	18.51	-98.10	51.7	Puebla	11
7	97/05/22	6.5	300	18.37	-101.82	54	Guerrero	50
8	98/04/20	5.9	246	18.35	-101.19	64	Guerrero	55
9	99/06/15	6.9	218	18.13	-97.54	61	Puebla	57
10	99/06/21	6.3	310	18.15	-101.70	53	Guerrero	56
11	99/09/30	7.4	415	16.03	-96.96	47	Oaxaca	55
12	00/07/21	5.9	146	18.11	-98.97	50	Guerrero	56
13	03/11/19	5.2	173	17.91	-99.03	69.3	Guerrero	13
14	07/04/13	5.3	244	17.37	-100.14	42.7	Guerrero	50
15	08/04/28	5.8	195	17.89	-100.10	55.5	Guerrero	52
16	09/05/22	5.6	168	18.22	-98.26	59.4	Puebla	49
17	11/02/25	6.0	464	17.98	-95.20	128.4	Veracruz	17
18	11/12/11	6.5	176	17.89	-99.84	55.3	Guerrero	48
19	13/06/16	5.9	103	18.25	-99.18	49.6	Guerrero	56
20	14/07/29	6.4	406	17.97	-95.69	109.2	Veracruz	39
21	15/03/20	5.4	169	18.12	-98.35	58.4	Puebla	41
22	17/09/07	8.2	604	14.85	-94.11	58	Oaxaca	50
23	17/09/19	7.1	100	18.40	-98.72	57	Puebla	52

Tabla 3.2 Sismos de subducción usados en este estudio durante el periodo de 1985-2014 para el cálculo de espectros de respuesta horizontales, verticales y la relación V/H - 890 registros.

N° Evento	Fecha (aa/mm/dd)	Magnitud M_w	R km	Localización del Foco				N° de Registros
				Lat (°)	Lon (°)	H_D (km)	Estado	
1	85/09/19	8.1	295	18.14	-102.71	15	Michoacán	9
2	89/04/25	6.9	290	16.60	-99.40	19	Guerrero	51
3	90/05/31	6.1	304	17.15	-100.85	21	Guerrero	57
4	93/10/24	6.7	310	16.50	-99.00	19	Guerrero	49
5	95/09/14	7.3	320	16.31	-98.88	45	Guerrero	52
6	96/07/15	6.6	301	17.40	-101.10	20	Guerrero	53
7	98/02/03	6.3	509	15.69	-96.37	33	Oaxaca	48
8	00/08/09	6.5	380	18.13	-102.39	33	Michoacán	54
9	03/01/22	7.5	526	18.86	-103.90	26	Colima	53
10	04/01/01	6.0	323	17.45	-101.40	15	Guerrero	51
11	07/04/13	6.0	240	17.37	-100.14	42.7	Guerrero	52
12	10/06/30	6.3	346	16.47	-97.77	17.8	Oaxaca	48
13	12/03/20	7.5	294	16.60	-98.39	15.4	Guerrero	51
14	12/04/11	6.7	414	18.10	-102.97	20.5	Michoacán	49
15	13/04/22	6.1	344	18.05	-102.19	26.6	Michoacán	52
16	14/04/18	7.3	278	17.55	-101.25	18.9	Guerrero	53
17	14/05/08	6.5	268	17.36	-100.74	21.3	Guerrero	55
18	14/05/10	6.1	280	17.31	-100.82	20.7	Guerrero	53

Siguiendo el método mencionado anteriormente, se obtienen los espectros de respuestas horizontales y verticales, para posteriormente, hallar la relación V/H. Debido a la gran cantidad de espectros de respuesta calculados, así como relaciones V/H, y para una mejor comparación, se agrupan los gráficos de los cocientes respecto a cada estación de análisis. Otra ventaja de tener esta agrupación es la posibilidad de representar gráficamente el promedio del conjunto de relaciones de espectros de respuesta obtenidos en cada estación dentro del mismo gráfico.

Para la obtención de los promedios de las relaciones de espectros de respuesta sísmica agrupados por estación, se utilizaron dos métodos: la media aritmética y la media logarítmica. La primera manera se obtiene con la siguiente expresión:

$$\widehat{V/H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V/H)_i \quad (3.1)$$

donde $\widehat{V/H}$ es la media aritmética de las relaciones de repuestas máximas de la componente vertical entre las respuestas máximas de la componente horizontal para todos los eventos analizados, $(V/H)_i$ son las relaciones de repuestas máximas de la componente vertical entre las respuestas máximas de la componente horizontal para el evento i y n es el número de eventos sísmicos analizados.

El segundo método es utilizando la media logarítmica. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$\ln(\widehat{V/H}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(V/H)_i \quad (3.2)$$

donde $\ln(\widehat{V/H})$ es la media logarítmica de las relaciones de repuestas máximas de la componente vertical entre las respuestas máximas de la componente horizontal para todos los eventos analizados, $\ln(V/H)_i$ es el logaritmo de las relaciones de repuestas máximas de la componente vertical entre las respuestas máximas de la componente horizontal calculadas para el evento i y n es el número de eventos sísmicos analizados.

Al realizar los cálculos para ambos métodos, se hallan resultados muy parecidos, por lo que se opta por utilizar la media logarítmica debido a su mayor precisión en estudios del mismo tipo que el analizado en esta tesis. Así, se presentan las Figuras 3.1-3.3, así como el Anexo B, donde se representan las relaciones o amplitudes de las respuestas máximas en términos de aceleración de la componente vertical sobre la componente horizontal, utilizando los registros de los eventos sísmicos de las Tablas 3.1 (Falla Normal) y 3.2 (Subducción), obtenidos por cada estación.

En dichas figuras, se agrega la relación 2/3 con línea punteada, la cual representa una proporción utilizada comúnmente para las relaciones de respuestas máximas verticales sobre horizontales, y sobre la cual se darán más detalles en el capítulo 4.

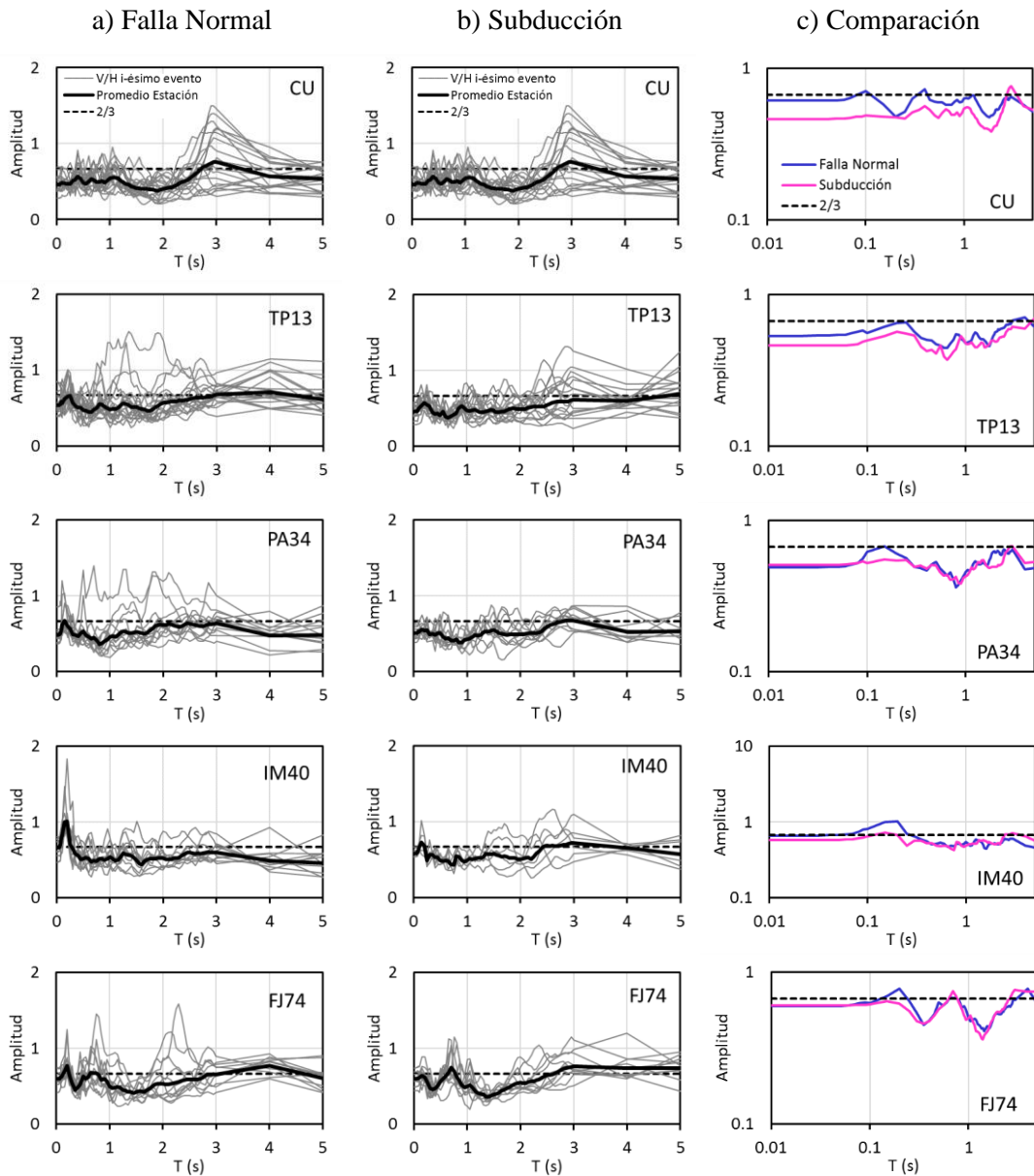


Figura 3.1 Relación V/H para las estaciones dentro del grupo 0 (terreno firme).

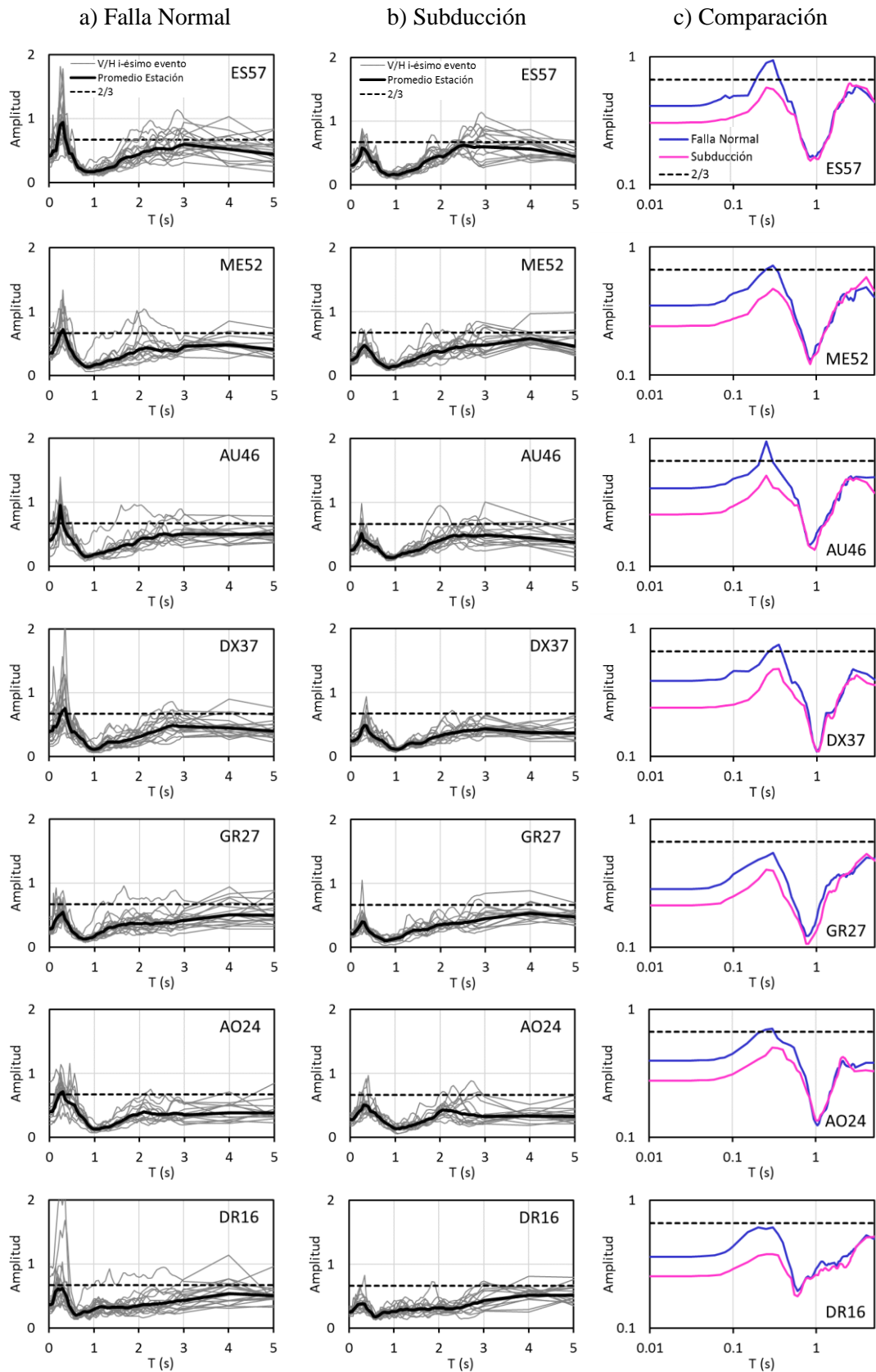


Figura 3.2 Relación V/H para las estaciones dentro del grupo 1 (suelo blando).

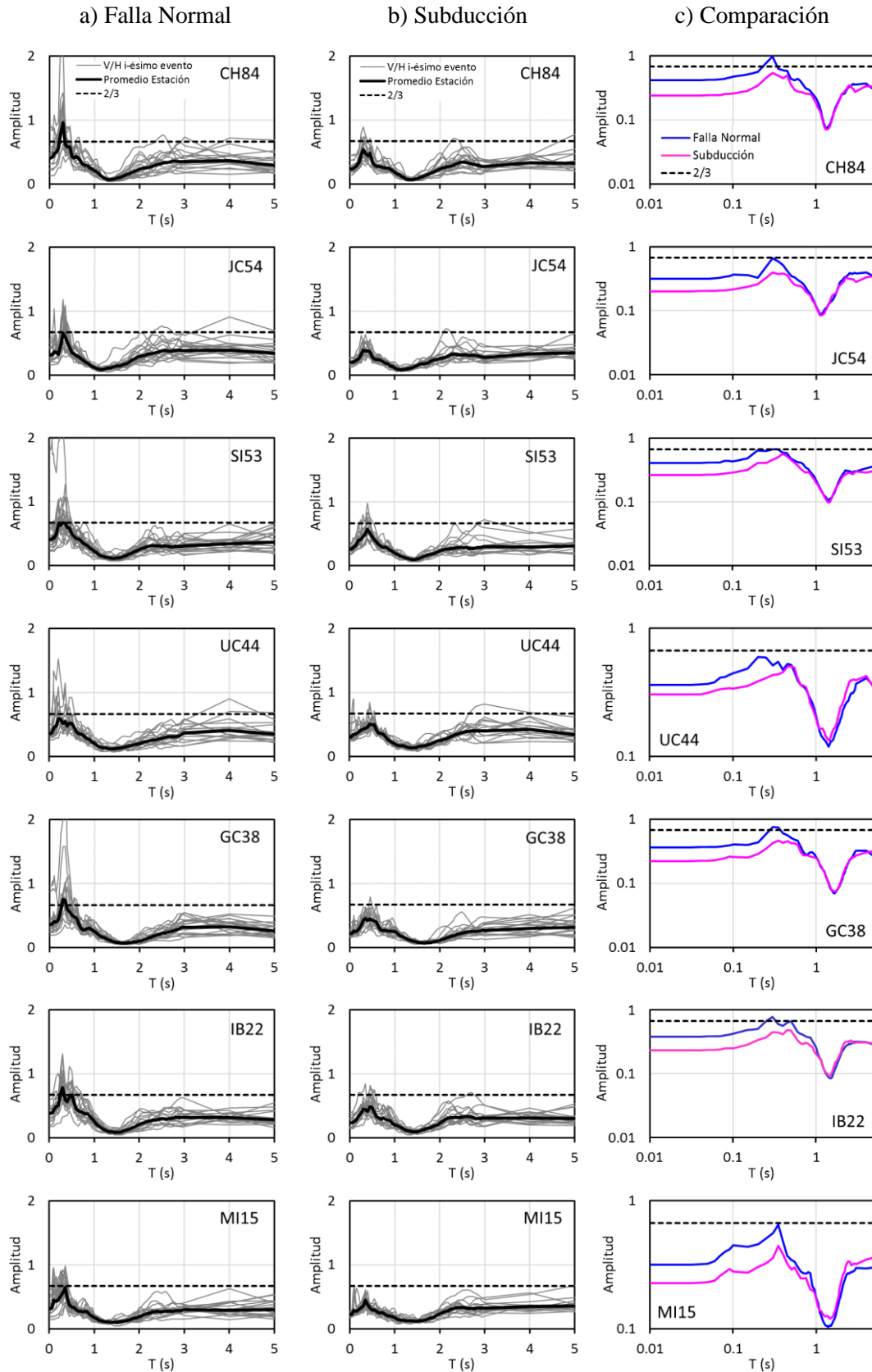


Figura 3.3 Relación V/H para las estaciones dentro del grupo 2 (suelo blando).

3.2 Estimación de la relación de espectros de respuesta V/H obtenidos mediante ecuaciones de predicción del movimiento

Con el registro de la actividad sísmica, se crea la necesidad de estudiar los efectos que se producen en sitios de interés. Una opción para estos estudios es el poder simular una situación en la que ocurra un evento de una magnitud en específico, por ello, se han creado leyes de atenuación, las cuales relacionan magnitud, posición relativa fuente-sitio (normalmente expresada como la distancia de ruptura) e intensidad. Se ha dado un sentido más general al término “intensidad” como una medida cuantificable del tamaño de un sismo y no de la forma literal, que es definida como una medida subjetiva de los estragos del terreno y en obras civiles, así como la percepción humana de los daños causados por un evento en un lugar determinado.

El uso de la proporción 2/3 entre los espectros de diseño vertical entre horizontal V/H se ha considerado para el diseño de espectros de aceleración verticales y se han incluido en muchos reglamentos alrededor del mundo (Bozorgnia y Campbell, 2004; Bommer et al., 2011). Bozorgnia y Campbell (2016b) encontraron que el valor del factor de 2/3 es inadecuado para los sitios sobre suelo blando, en particular para los sitios cercanos a la superficie de ruptura de la falla. Algunas de las ventajas de desarrollar GMPE para relaciones V/H en comparación con GMPE solamente para la componente vertical se informa en la literatura, así como dos de los enfoques para obtener los GMPE para las proporciones V/H (p. ej., Gülerce y Abrahamson, 2011). Aunque en uno de los enfoques, la relación se calcula utilizando los GMPE obtenidos por separado para las componentes vertical y horizontal (por ejemplo, Bozorgnia y Campbell, 2004), en el otro, los GMPE se desarrollan directamente para la relación V/H (por ejemplo, Ambraseys y Douglas, 2003; Bommer et al., 2011; Gülerce y Abrahamson, 2011; Akkar et al., 2014; Stewart et al., 2016). Bozorgnia y Campbell (2016b) proponen un enfoque para hacer que ambas alternativas sean consistentes al considerar los coeficientes de correlación para los residuos de los errores estándar. No hay muchos estudios relacionados con GMPE de V/H, aunque hay una tendencia creciente a desarrollar modelos de movimiento de base de este tipo en los últimos años. Las ecuaciones de predicción existentes incluyen modelos que consideran sismos de magnitud de momento (M_w) de tamaño pequeño y moderado (muchos de ellos menores de 7), distancias hipocentrales, diferentes sitios de suelo, distancias de fuente a sitio típicamente no mayores de 330 km, terremotos de corteza superficial y diferentes mecanismos de falla.

La estimación de la respuesta sísmica del suelo ante movimientos sísmicos permite tener un gran avance en la anticipación de sus efectos frente a las estructuras. Así, en este capítulo se propondrá un método que permita obtener GMPE para eventos sísmicos registrados en la Ciudad de México, que relacione la magnitud y distancia fuente-sitio de un sismo con la medida de intensidad buscada, normalmente siendo la aceleración máxima del suelo o aceleración espectral.

Teniendo definidos estos parámetros, se construyen leyes de atenuación para estimar las aceleraciones espectrales a través de un método de regresión de un conjunto de coeficientes para cada periodo estructural (p. ej., Reyes, 1999; Joyner y Boore, 1993). Este método considera en forma directa los efectos de sitio (p. ej., posibles efectos no lineales de suelo) y se comparará con

las relaciones de espectros de respuesta observados, a fin de analizar la precisión con la cual se está modelando este comportamiento.

3.3 Selección de datos de la red acelerométrica en la Ciudad de México

Utilizando información de datos acelerométricos, es posible contar con registros de acelerogramas horizontales y verticales registrados en varias de estas estaciones instaladas en la Ciudad de México.

Tabla 3.3 Sismos de subducción usados en este estudio durante el periodo de 1965-2014 para relaciones horizontales, verticales y V/H - 93 registros.

No. Evento	Fecha (aa/mm/dd)	Magnitud M_w	R km	Localización del Foco			CU	SCT	CDAO	JC54	CH84
				Lat (°)	Lon (°)	H_D (km)					
1	65/08/23	7.8	466	16.28	-96.02	16	✓	-	-	-	-
2	76/06/07	6.4	292	17.45	-100.65	48	✓	-	-	-	-
3	78/03/19	6.4	285	16.85	-99.9	16	✓	-	-	-	-
4	78/11/29	7.8	414	16	-96.69	19	-	-	-	-	-
5	79/03/14	7.6	287	17.46	-101.46	20	✓	-	-	-	-
6	81/10/25	7.3	330	17.75	-102.25	20	✓	-	-	-	-
7	82/06/07	6.9	304	16.35	-98.37	15	✓	-	-	-	-
8	82/06/07	7	303	16.35	-98.37	15	✓	-	-	-	-
9	85/09/19	8.1	295	18.14	-102.71	15	✓	✓	✓	-	-
10	85/09/21	7.6	318	17.62	-101.82	15	✓	-	✓	-	-
11	86/04/30	7	409	18.42	-102.99	16	✓	-	-	-	-
12	89/04/25	6.9	290	16.6	-99.4	19	✓	✓	✓	✓	✓
13	90/05/31	6.1	304	17.15	-100.85	21	✓	✓	✓	✓	✓
14	93/05/15	6	320	16.47	-98.72	20	-	-	✓	✓	✓
15	93/10/24	6.7	310	16.5	-99	19	✓	✓	✓	✓	✓
16	95/09/14	7.3	320	16.31	-98.88	45	✓	✓	✓	✓	✓
17	95/10/09	8	530	18.85	-104.53	27	-	-	✓	✓	✓
18	96/07/15	6.6	301	17.4	-101.1	20	✓	-	-	✓	✓
19	98/02/03	6.3	509	15.69	-96.37	33	✓	✓	-	✓	✓
20	00/08/09	6.5	380	18.13	-102.39	33	✓	-	✓	✓	✓
21	03/01/22	7.5	526	18.86	-103.9	26	✓	✓	✓	✓	✓
22	04/01/01	6	323	17.45	-101.4	15	✓	✓	-	✓	✓
23	07/04/13	6	240	17.37	-100.14	42.7	✓	✓	✓	✓	✓
24	10/06/30	6.3	346	16.47	-97.77	17.8	✓	-	✓	✓	✓
25	12/03/20	7.5	294	16.6	-98.39	15.4	✓	✓	-	✓	✓
26	12/04/11	6.7	414	18.1	-102.97	20.5	✓	✓	-	✓	✓
27	13/04/22	6.1	344	18.05	-102.19	26.6	✓	✓	-	✓	✓
28	13/08/21	6.2	258	17	-99.54	23.3	✓	✓	-	-	-
29	14/04/18	7.3	278	17.55	-101.25	18.9	✓	✓	-	✓	✓
30	14/05/08	6.5	268	17.36	-100.74	21.3	✓	✓	-	✓	✓
31	14/05/10	6.1	280	17.31	-100.82	20.7	✓	-	-	✓	✓

En la Tabla 3.3 se muestran las características de los 31 sismos de subducción utilizados en este estudio y los datos de movimiento fuerte disponibles en 5 estaciones acelerométricas.

Como se observa, los sismos de subducción seleccionados para la derivación de los modelos de atenuación de la componente horizontal, vertical y relación V/H, cubren una amplia gama de magnitudes de momento ($6.0 < M_w < 8.1$), distancias de ruptura ($240 < R < 530 \text{ km}$) y profundidades focales de los eventos sísmicos ($15 < H < 48 \text{ km}$).

Por otro lado, en la Tabla 3.4 se muestran las características de los sismos de profundidad intermedia, falla normal, utilizados también en este estudio y los datos de movimiento fuerte disponibles. Los sismos de profundidad intermedia seleccionados, para la derivación de los modelos de atenuación de la componente horizontal, vertical y relación V/H, cubren una amplia gama de magnitudes de momento ($5.2 < M_w < 8.2$), distancias de ruptura ($100 < R < 604 \text{ km}$) y profundidades focales de los eventos ($40 < H < 128 \text{ km}$). Nótese que los registros de acelerogramas se registraron de un total de 29 sismos obtenidos también en las mismas 5 estaciones acelerométricas en las regiones con sismos de profundidad intermedia en México.

Tabla 3.4 Sismos de profundidad intermedia usados en este estudio durante el periodo de 1964-2017 para relaciones horizontales, verticales y V/H - 96 registros.

No. Evento	Fecha (aa/mm/dd)	Magnitud M_w	R km	Localización del Foco			CU	SCT	CDAO	JC54	CH84
				Lat (°)	Lon (°)	H _p (km)					
1	64/07/06	7.3	217	18.03	-100.77	55	✓	-	-	-	-
2	93/08/05	5.2	237	17.62	-97.94	53.7	✓	-	-	✓	-
3	94/02/23	5.8	278	17.75	-97.27	75	✓	-	-	✓	-
4	94/05/06	5.2	160	18.38	-98.2	61.7	✓	-	-	-	-
5	94/05/23	6.2	209	18.02	-100.57	50	✓	✓	✓	✓	✓
6	94/12/10	6.4	300	17.98	-101.52	50	✓	✓	✓	✓	✓
7	97/01/11	7.1	377	18.34	-102.58	40	✓	✓	✓	✓	✓
8	97/04/03	5.2	154	18.51	-98.1	51.7	✓	-	-	-	-
9	97/05/22	6.5	300	18.37	-101.82	54	✓	✓	✓	✓	✓
10	98/04/20	5.9	246	18.35	-101.19	64	✓	✓	✓	✓	✓
11	99/06/15	6.9	218	18.13	-97.54	61	✓	✓	-	✓	✓
12	99/06/21	6.3	310	18.15	-101.7	53	✓	✓	✓	✓	✓
13	99/09/30	7.4	415	16.03	-96.96	47	✓	✓	✓	✓	✓
14	99/12/29	5.9	301	18.00	-101.63	50	-	✓	-	✓	-
15	00/07/21	5.9	146	18.11	-98.97	50	✓	✓	✓	✓	✓
16	03/11/19	5.2	173	17.91	-99.03	69.3	✓	-	-	-	-
17	06/08/11	6.0	228	18.5	-101.6	57.8	-	-	✓	-	-
18	06/02/20	5.2	191	18.3	-100.54	55.7	✓	-	-	-	-
19	07/04/13	5.3	244	17.37	-100.14	42.7	✓	✓	-	✓	✓
20	08/02/12	6.5	603	16.35	-94.51	87.1	-	✓	✓	✓	-
21	08/04/28	5.8	195	17.89	-100.1	55.5	✓	-	✓	✓	✓
22	09/05/22	5.6	168	18.22	-98.26	59.4	✓	✓	✓	✓	✓
23	11/02/25	6.0	464	17.98	-95.2	128.4	✓	-	-	-	-
24	11/12/11	6.5	176	17.89	-99.84	55.3	✓	✓	-	✓	✓
25	13/06/16	5.9	103	18.25	-99.18	49.6	✓	✓	-	✓	✓
26	14/07/29	6.4	406	17.97	-95.69	109.2	✓	✓	-	✓	✓
27	15/03/20	5.4	169	18.12	-98.35	58.4	✓	-	-	✓	✓
28	17/09/07	8.2	604	14.85	-94.11	58	✓	✓	-	✓	✓
29	17/09/19	7.1	100	18.40	-98.72	57	✓	✓	-	✓	✓

3.4 Procesamiento de datos

Con frecuencia los valores registrados en los acelerogramas se encuentran desplazados respecto a la línea que marca la aceleración cero. Lo anterior provocado comúnmente a errores en la nivelación del acelerógrafo, y, en consecuencia, distorsionando también la velocidad y desplazamiento determinados por integración. Por ello, para corregir estos errores, los registros se procesan aplicando una corrección de línea base (Boore, 2005). Otra corrección aplicada a los registros es un filtrado de frecuencias bajas, causadas por ruido indeseado sobre los acelerogramas. Por ello, se utilizan filtros con una frecuencia de pasa-alta de 0.05 Hz para eventos con magnitud $M_w > 6.5$, y 0.1 Hz para los eventos restantes como los utilizados por García et al. (2005), García (2006), Arroyo et al. (2010), Hong et al. (2010), y García-Soto et al. (2012) para las componentes horizontales de los registros. Una vez que el procesamiento de los datos se realiza en los registros de aceleración vertical y horizontal, leemos los valores de PGA y calculamos la pseudo-aceleración espectral de respuesta (S_a = amortiguada al 5% en 70 períodos estructurales entre 0.01 y 5 s para ambos componentes). También integramos los registros para obtener PGV a partir de los registros de acelerogramas.

3.5 Análisis de regresión

El análisis de regresión para estimar aceleraciones espectrales verticales y relación V/H para PGA, PGV y con 5% de amortiguamiento del conjunto de datos, se realiza utilizando la máxima probabilidad de una etapa, técnica propuesta en Joyner and Boore (1993); esta es la forma más directa de predecir espectros de respuesta o relaciones espectrales V/H usando datos observados. La misma técnica es empleada para realizar el análisis de regresión para las componentes horizontales, ya que, de esta manera, es aplicable dos opciones de obtención de espectros de respuesta verticales: (1) directamente del modelo de atenuación vertical y (2) multiplicando ordenadas espectrales horizontales por los cocientes vertical/horizontal.

Utilizando la siguiente forma funcional más simple, propuesta por Ordaz et. al (1989) para estimar PGA, PGV y las ordenadas espectrales 5% amortiguadas, para sismos de subducción y profundidad intermedia ocurridos en México, se tiene:

$$\ln Y_V(T) = \alpha_1(T) + \alpha_2(T)M_w + \alpha_3(T)\ln R + \alpha_4(T)R + \varepsilon_1(T) \quad (3.3)$$

$$\ln Y_H(T) = \beta_1(T) + \beta_2(T)M_w + \beta_3(T)\ln R + \beta_4(T)R + \varepsilon_2(T) \quad (3.4)$$

donde $Y_V(T)$ es el modelo de la ordenada espectral vertical (ecuación (3.3)); Y_H es el modelo de la ordenada espectral horizontal basado en la media cuadrática de las componentes horizontales Norte-Sur y Este-Oeste (ecuación (3.4)); T es el periodo del sistema de un grado de libertad en segundos; M_w es la magnitud del momento; R es la distancia más cercana desde el sitio hasta la superficie de falla para eventos grandes ($M_w > 6.5$) o bien, la distancia hipocentral para el resto, ambos en kilómetros (Arroyo et. al. 2010); α_i y β_i son los coeficientes a estimar por el análisis de regresión para los casos verticales y horizontales, respectivamente; ε_1 y ε_2 son los errores de estimación

aleatoria suponiendo que se distribuyen normalmente para los casos verticales y horizontales, respectivamente.

Se debe tomar en cuenta que en anteriores estudios (p. ej., Arroyo et al. 2010) no se halló una dependencia importante en la profundidad focal, por lo tanto, se excluye del presente análisis. Además, utilizamos la media cuadrática porque es probable que el uso directo de la media geométrica en el desarrollo de la relación de atenuación sea ligeramente menos conservador que el uso de la media cuadrática para la evaluación de riesgo sísmico (p. ej., Hong and Goda, 2007).

La dispersión geométrica vertical y horizontal se puede calcular como:

$$G_V(R) = R^{\alpha_3(T)} \quad (3.5)$$

$$G_H(R) = R^{\beta_3(T)} \quad (3.6)$$

donde $\alpha_3(T)$ y $\beta_3(T)$ son los coeficientes de dispersión geométrica, que controlan el decaimiento de las amplitudes con la distancia R. Si se considera el logaritmo natural en ambos lados de las expresiones, es posible linealizarlas como:

$$\ln(G_V(R)) = \alpha_3(T) * \ln(R) \quad (3.7)$$

$$\ln(G_H(R)) = \beta_3(T) * \ln(R) \quad (3.8)$$

los cuales corresponden al tercer término de las ecuaciones (3.3) y (3.4), respectivamente.

En este estudio, consideraremos que $\alpha_3(T)$ y $\beta_3(T)$ están bien limitados por las observaciones de datos mexicanos para sismos de subducción y profundidad intermedia (p. ej., Ordaz et al., 1994; Reyes, 1999; Jaimes et al., 2006). Además, fijando el valor del coeficiente de dispersión geométrica igual a -0.5 para todas las ordenadas de ambos componentes en el caso de los sismos de subducción, y de -1.0 para los sismos con falla normal (Ordaz et al., 1994; Reyes, 1999; Jaimes et al., 2006), se evita la obtención de valores no realistas (es decir, valores no negativos de $\alpha_3(T)$, que son insostenibles por razones físicas; Ordaz et al., 1994).

El supuesto común de la distribución logarítmica normal en los movimientos del suelo horizontales y verticales impone la misma distribución de probabilidad para su relación, lo que constituye la base de nuestro modelo logarítmico V/H basado en las ecuaciones (3.3) y (3.4). Por lo tanto, siguiendo este supuesto:

$$\ln(V/H) = \ln Y_V(T) - \ln Y_H(T) \quad (3.9)$$

Y usando las ecuaciones (3.3) y (3.4) en la ecuación (3.9):

$$\ln(V/H) = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2)M_w + (\alpha_3 - \beta_3)\ln R + (\alpha_4 - \beta_4)R + \varepsilon \quad (3.10)$$

donde ε es el error aleatorio, pero es obtenido por regresión directa de las relaciones V/H. Sin embargo, se debe tener presente que el término $(\alpha_3 - \beta_3)$ se cancela, ya que se supone que, para los eventos de subducción, estos coeficientes se fijan en un valor igual a -0.5 , y de -1.0 para los eventos de profundidad intermedia, en ambos casos. Esto lleva a una expresión más simple:

$$\ln(V/H) = \gamma_1 + \gamma_2 M_w + \gamma_3 R + \varepsilon \quad (3.11)$$

donde γ_i son los coeficientes a estimar por análisis de regresión para las relaciones V/H.

3.6. Resultados de la regresión

Una vez explicado los métodos utilizados para la estimación de la relación V/H, así como los datos de eventos sísmicos empleados, se procede a obtener los coeficientes de regresión para su utilización en las ecuaciones de predicción del movimiento. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada caso estudiado.

3.6.1 Coeficientes de regresión y error

En la Tabla 3.5 se muestran los coeficientes de regresión y la desviación estándar obtenidos para los registros en la Tabla 3.3 con los coeficientes de regresión para la componente vertical, la media cuadrática de la componente horizontal y la relación V/H, respectivamente. También se simplifica la cantidad de periodos T mostrados en las tablas, colocando solo aquellas que se consideran relevantes (dado que se utilizaron 70 periodos estructurales para el análisis).

Tabla 3.5 Coeficientes de regresión obtenidos para las componentes vertical, horizontal y la relación V/H - CU; subducción.

T (s)	Vertical				Horizontal				V/H				
	α_1	α_2	α_4	σ	β_1	β_2	β_4	σ	γ_1	γ_2	γ_3	σ	$\rho_{\ln V, \ln H}$
0.01	-2.3788	1.1752	-0.0051	0.19	-0.8896	1.0803	-0.0053	0.22	-1.4892	0.0950	0.0003	0.16	0.158
0.02	-2.3780	1.1750	-0.0051	0.19	-0.8882	1.0800	-0.0053	0.22	-1.4898	0.0950	0.0003	0.16	0.158
0.04	-2.3198	1.1689	-0.0051	0.19	-0.8342	1.0743	-0.0054	0.22	-1.4855	0.0947	0.0003	0.16	0.158
0.06	-2.2902	1.1654	-0.0051	0.19	-0.7906	1.0710	-0.0054	0.22	-1.4995	0.0945	0.0003	0.15	0.155
0.08	-2.0077	1.1460	-0.0053	0.19	-0.7007	1.0647	-0.0055	0.21	-1.3070	0.0812	0.0001	0.16	0.160
0.1	-1.8505	1.1357	-0.0054	0.19	-0.4570	1.0423	-0.0056	0.21	-1.3935	0.0934	0.0002	0.15	0.150
0.2	-0.4524	1.0313	-0.0065	0.23	1.2105	0.8994	-0.0067	0.20	-1.6629	0.1319	0.0002	0.17	0.171
0.3	-0.7547	1.0627	-0.0059	0.22	0.5438	0.9807	-0.0062	0.18	-1.2986	0.0820	0.0003	0.16	0.163
0.4	-0.9184	1.1020	-0.0057	0.21	-0.4114	1.1046	-0.0057	0.19	-0.5070	-0.0026	0.0000	0.17	0.171
0.5	-0.5462	1.0401	-0.0055	0.24	-0.0238	1.0608	-0.0055	0.23	-0.5224	-0.0207	0.0000	0.18	0.178
0.6	-1.3751	1.1552	-0.0052	0.23	-0.0210	1.0311	-0.0049	0.22	-1.3541	0.1241	-0.0003	0.18	0.181
0.7	-0.7531	1.0942	-0.0056	0.22	-0.6939	1.1358	-0.0049	0.19	-0.0592	-0.0416	-0.0007	0.17	0.166
0.8	-1.6216	1.1930	-0.0051	0.23	-0.5768	1.1168	-0.0047	0.17	-1.0448	0.0761	-0.0004	0.16	0.163
0.9	-1.6255	1.1799	-0.0048	0.28	-1.0697	1.1587	-0.0041	0.18	-0.5558	0.0212	-0.0007	0.19	0.195
1	-1.2806	1.0969	-0.0040	0.26	-1.3110	1.1823	-0.0039	0.23	0.0304	-0.0853	-0.0001	0.17	0.166
2	-4.1435	1.4157	-0.0034	0.27	-1.9621	1.2747	-0.0044	0.35	-2.1814	0.1410	0.0009	0.22	0.220
3	-5.5526	1.5943	-0.0031	0.40	-3.1934	1.3515	-0.0040	0.36	-2.3592	0.2428	0.0009	0.40	0.405
4	-6.8842	1.5931	-0.0014	0.41	-4.8016	1.4020	-0.0021	0.39	-2.0826	0.1910	0.0007	0.38	0.380
5	-7.2324	1.5462	-0.0011	0.42	-5.7041	1.3666	-0.0003	0.40	-1.5283	0.1795	-0.0008	0.43	0.431
PGA	-2.3789	1.1753	-0.0051	0.19	-0.8898	1.0803	-0.0053	0.22	-1.4891	0.0949	0.0003	0.16	0.158
PGV	-5.9752	1.4176	-0.0037	0.29	-3.7947	1.2007	-0.0036	0.31	-2.1805	0.2170	-0.0001	0.21	0.206

Los coeficientes α_3 y β_3 son fijados a -0.5 para las componentes verticales y horizontales; también se incluyen los coeficientes de correlación entre el residual de las ecuaciones de predicción de movimiento vertical y horizontal.

La Tabla 3.6 muestra los coeficientes de regresión y la desviación estándar obtenidos para los registros en la Tabla 3.4 con los coeficientes de regresión para la componente vertical, la media cuadrática de la componente horizontal y la relación V/H, respectivamente, respectivamente.

Tabla 3.6 Coeficientes de regresión obtenidos para las componentes vertical, horizontal y la relación V/H - CU; profundidad intermedia.

T (s)	Vertical				Horizontal				V/H				
	α_1	α_2	α_4	σ	β_1	β_2	β_4	σ	γ_1	γ_2	γ_3	σ	$\rho_{\ln V, \ln H}$
0.01	-2.0899	1.5577	-0.0051	0.30	-1.9745	1.6216	-0.0051	0.37	-0.1154	-0.0639	0.0000	0.21	0.212
0.02	-2.0894	1.5577	-0.0050	0.30	-1.9744	1.6218	-0.0051	0.37	-0.1150	-0.0641	0.0000	0.21	0.212
0.04	-1.9960	1.5458	-0.0051	0.30	-1.8628	1.6050	-0.0050	0.37	-0.1332	-0.0592	0.0000	0.21	0.209
0.06	-1.8287	1.5287	-0.0051	0.29	-1.8026	1.6059	-0.0052	0.36	-0.0261	-0.0772	0.0000	0.20	0.200
0.08	-1.6239	1.5465	-0.0058	0.31	-1.5252	1.5696	-0.0051	0.35	-0.0987	-0.0232	-0.0007	0.18	0.180
0.1	-1.0033	1.4821	-0.0057	0.30	-1.1745	1.5531	-0.0054	0.32	0.1712	-0.0710	-0.0004	0.16	0.159
0.2	-0.5011	1.4561	-0.0058	0.34	-0.3603	1.5783	-0.0065	0.35	-0.1408	-0.1222	0.0007	0.17	0.168
0.3	-1.1198	1.5417	-0.0053	0.35	-1.0007	1.6144	-0.0056	0.36	-0.1191	-0.0727	0.0002	0.24	0.239
0.4	-1.2150	1.5393	-0.0047	0.34	-1.0604	1.5722	-0.0048	0.41	-0.1546	-0.0328	0.0001	0.19	0.188
0.5	-1.7051	1.5858	-0.0043	0.40	-1.0796	1.5710	-0.0044	0.41	-0.6255	0.0148	0.0001	0.18	0.177
0.6	-2.6695	1.7222	-0.0042	0.38	-1.9508	1.6802	-0.0040	0.41	-0.7187	0.0419	-0.0002	0.17	0.174
0.7	-2.8992	1.7401	-0.0040	0.43	-2.0906	1.6732	-0.0035	0.46	-0.8086	0.0669	-0.0005	0.23	0.234
0.8	-3.5174	1.8104	-0.0035	0.46	-2.4034	1.7011	-0.0032	0.44	-1.1139	0.1093	-0.0003	0.23	0.226
0.9	-3.3512	1.7830	-0.0036	0.47	-3.0314	1.7839	-0.0029	0.47	-0.3198	-0.0009	-0.0008	0.19	0.194
1	-4.1978	1.9233	-0.0039	0.45	-3.3588	1.8201	-0.0029	0.47	-0.8390	0.1032	-0.0010	0.22	0.219
2	-6.6158	2.0288	-0.0012	0.43	-6.3134	2.0999	-0.0013	0.47	-0.3024	-0.0711	0.0001	0.28	0.276
3	-7.8865	2.1404	-0.0005	0.45	-7.8674	2.2060	-0.0004	0.48	-0.0192	-0.0656	-0.0001	0.21	0.206
4	-8.8549	2.2561	-0.0015	0.39	-8.9353	2.3392	-0.0010	0.46	0.0804	-0.0831	-0.0005	0.23	0.235
5	-9.0113	2.1763	-0.0005	0.40	-10.0886	2.4781	-0.0011	0.42	1.0774	-0.3017	0.0006	0.25	0.252
PGA	-2.0901	1.5577	-0.0051	0.30	-1.9745	1.6216	-0.0051	0.37	-0.1156	-0.0639	0.0000	0.21	0.212
PGV	-7.0439	1.9141	-0.0028	0.38	-7.0275	1.9918	-0.0024	0.43	-0.0163	-0.0777	-0.0004	0.23	0.228

Los coeficientes α_3 y β_3 son fijados a -1.0 para las componentes verticales y horizontales; también se incluyen los coeficientes de correlación entre el residual de las ecuaciones de predicción de movimiento vertical y horizontal. El Anexo C presenta los coeficientes de regresión obtenidos para el resto de las estaciones analizadas, siguiendo las mismas consideraciones de acuerdo con el tipo de sismo estudiado.

Las Figuras 3.4 y 3.5 muestran los coeficientes de regresión y la desviación estándar logarítmica natural de los modelos horizontales y verticales propuestos; respectivamente. También se muestran los coeficientes de regresión del modelo V/H para la aceleración espectral (Figura 3.6).

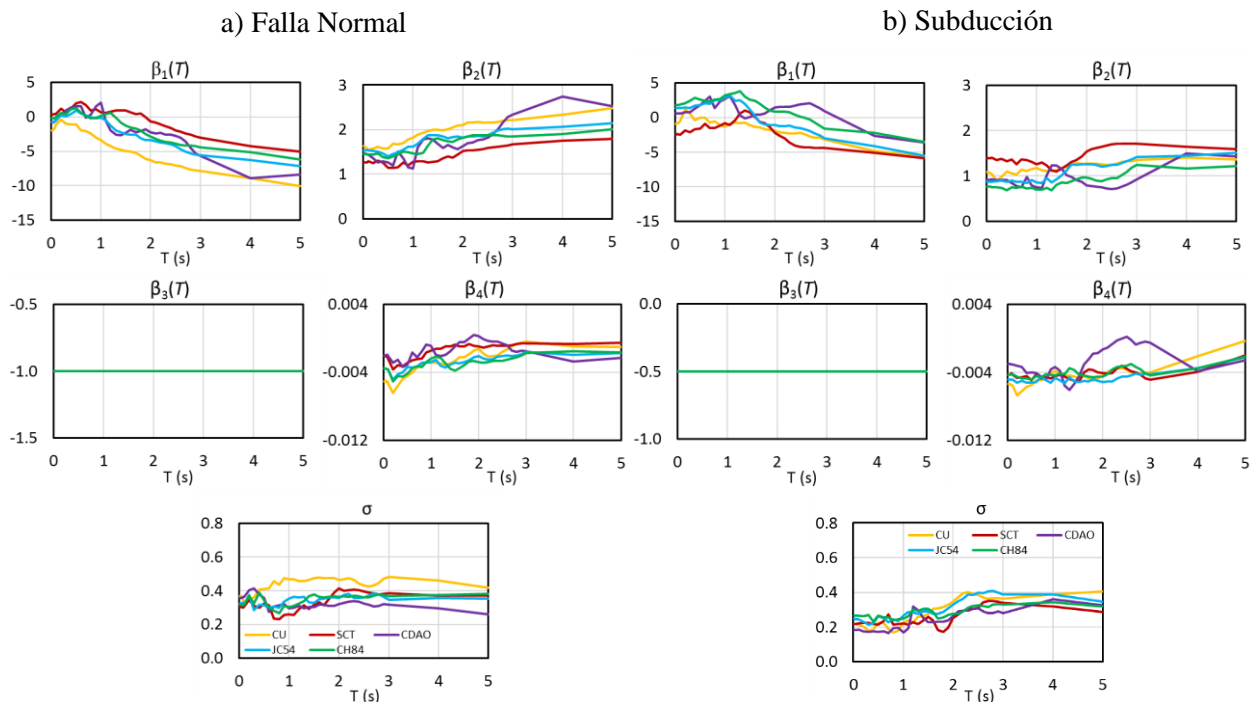


Figura 3.4 Coeficientes de regresión y desviación estándar logarítmica natural de la componente horizontal para sismos de falla normal y subducción en las 5 estaciones analizadas.

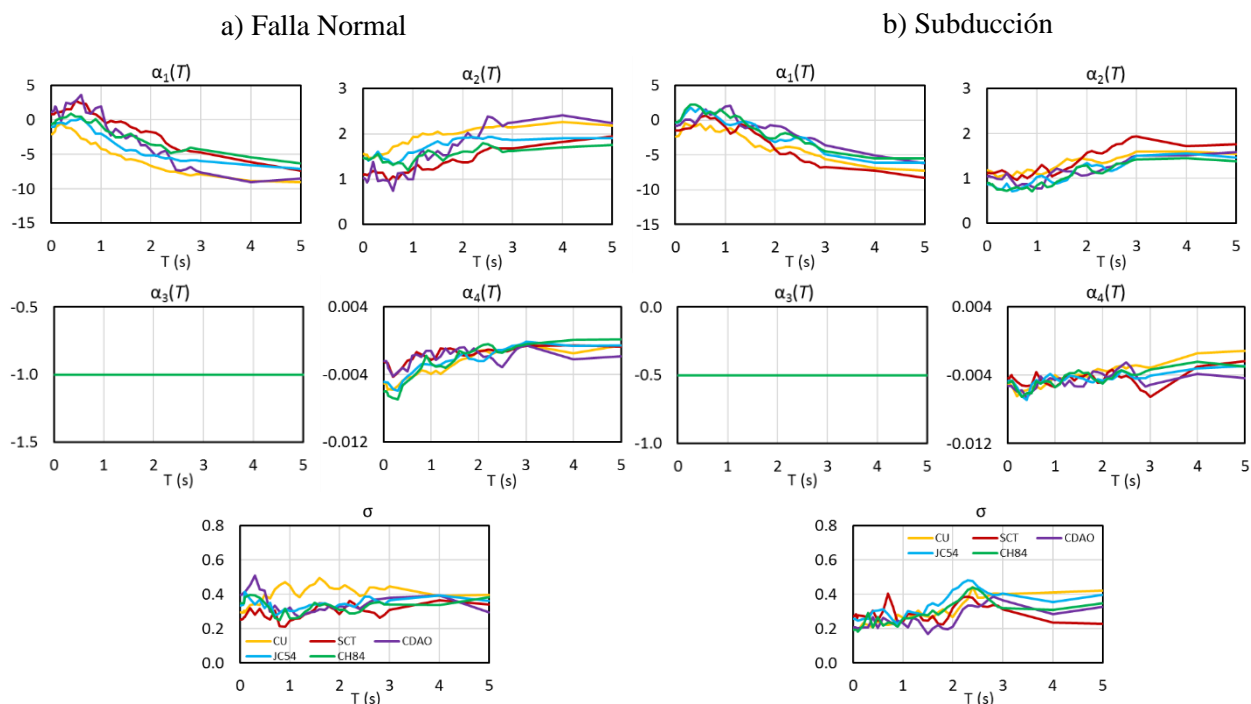


Figura 3.5 Coeficientes de regresión y desviación estándar logarítmica natural de la componente vertical para sismos de falla normal y subducción en las 5 estaciones analizadas.

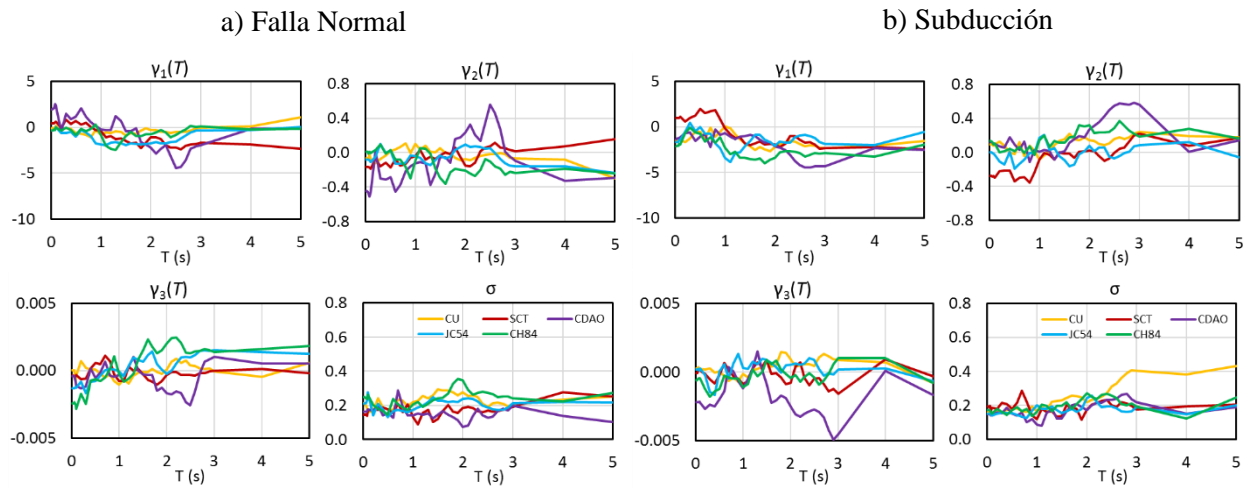


Figura 3.6. Coeficientes de regresión y desviación estándar logarítmica natural de la relación vertical sobre horizontal para sismos de falla normal y subducción en las 5 estaciones analizadas.

Capítulo 4. Comparación de amplitudes V/H

Los coeficientes de regresión obtenidos en el capítulo anterior permitirán realizar otros análisis de comparación entre los métodos de estimación, así como sus representaciones gráficas. Además, teniendo las ecuaciones de predicción del movimiento para la relación V/H, se propondrán eventos sísmicos ficticios que den un primer panorama de la capacidad de predicción de estas ecuaciones. Posterior a ello, se estimarán las relaciones V/H de los eventos sísmicos con los que se obtuvieron las ecuaciones de predicción, comparándolos con los datos observados para verificar la efectividad del proceso de estimación.

4.1 Comparación de amplitudes V/H observados y estimados para cinco estaciones en la CDMX

4.1.1 Comparación de métodos de estimación

Como se mencionó, se utilizaron dos métodos para estimar la relación de respuestas espectrales V/H para eventos con tipo de falla por subducción y fallas normales. El primer método siguiendo el modelo matemático (3.9) y basados a su vez en las ecuaciones (3.3) y (3.4), obteniendo los coeficientes de cada componente por separado y después calculando la relación V/H aplicando propiedades logarítmicas. El segundo método aplicado para la estimación de respuestas espectrales, representado por la ecuación (3.11) combina los otros dos modelos que estiman las aceleraciones horizontales y verticales por separado, simplificando el cálculo al realizar una sola vez el análisis de regresión para hallar los coeficientes y obteniendo de manera directa la relación V/H.

Una vez obtenidos los coeficientes de regresión, éstas son reemplazadas en las ecuaciones de predicción de aceleraciones espectrales (3.3) y (3.4), así como en la ecuación de predicción de la relación V/H (3.11), obteniendo así, las ecuaciones de ordenadas espectrales estimadas $\ln(\overline{Y_V})$, $\ln(\overline{Y_H})$ y $\ln(\overline{V/H})$, respectivamente.

Para estudiar las diferencias entre las ecuaciones, se realiza una simulación de la estimación de la relación V/H proponiendo como parámetros para ambos tipos de eventos sísmicos, magnitudes M_w de 6.5, 7.0 y 7.5, con una distancia R constante de 150 km y posteriormente de 100 km. La representación gráfica de los resultados para 2 de las 5 estaciones se muestran a continuación.

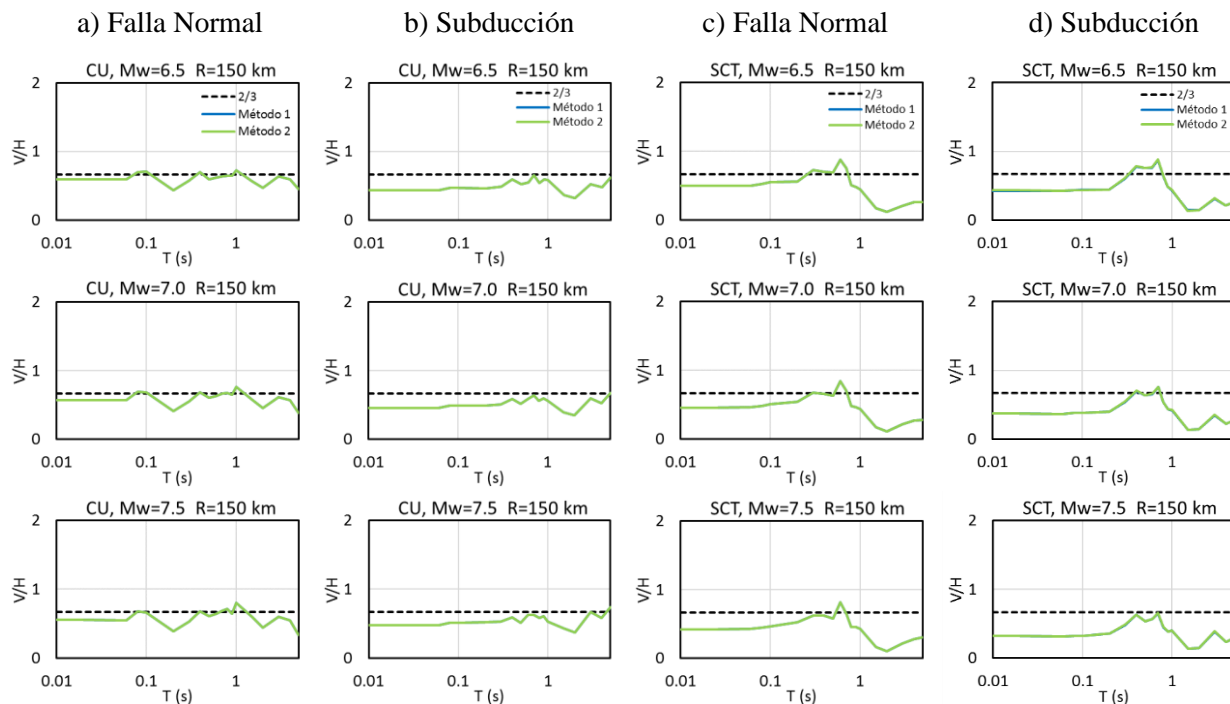


Figura 4.1 Comparación entre métodos para la estimación de la relación V/H manteniendo una distancia constante $R = 150$ km, con magnitudes de $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para las estaciones: CU (incisos a y b) y SCT (incisos c y d).

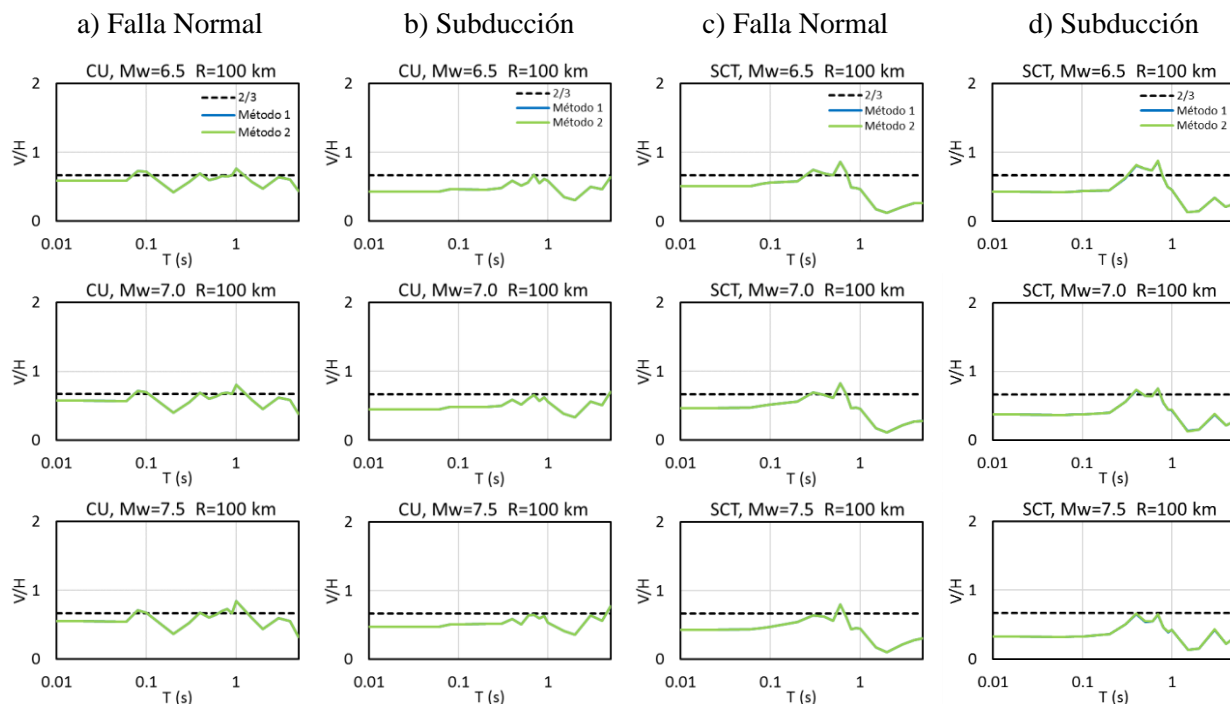


Figura 4.2 Comparación entre métodos para la estimación de la relación V/H manteniendo una distancia constante $R = 100$ km, con magnitudes de $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para las estaciones: CU (incisos a y b) y SCT (incisos c y d).

Los resultados para las estaciones restantes se muestran en el Anexo D. Como es posible observar, los resultados arrojan una variación poco significativa entre ambos métodos (se comentará más sobre estos resultados en la discusión), siendo imperceptible a simple vista las diferencias en las representaciones gráficas, por lo que, para los posteriores análisis, utilizaremos los cálculos correspondientes al método 2 ($\ln(V/H) = \gamma_1 + \gamma_2 M_w + \gamma_3 R + \varepsilon$) ya que su cálculo es más simplificado a comparación del método 1.

4.1.2 Estimación de la relación V/H dada en función de magnitud y distancia

Así mismo, agrupamos los resultados comparando distancias R propuestas y sustituyéndolas en las ecuaciones de estimación.

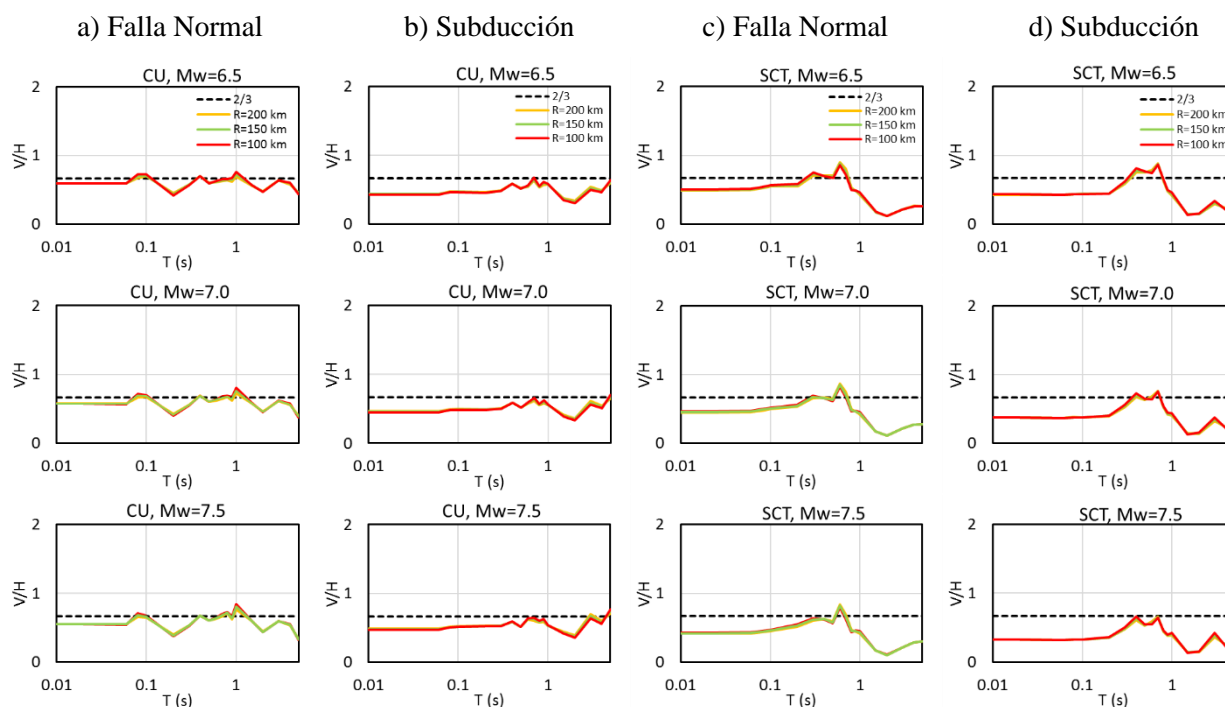


Figura 4.3 Estimación de la relación V/H dadas distancias $R = 100, 150$ y 200 km, con magnitudes de $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para las estaciones: CU (incisos a y b) y SCT (incisos c y d).

Las estimaciones para las estaciones acelerométricas restantes se encuentran en el Anexo E. Observe que, independientemente de la variación que se presenta en cada periodo T de análisis, las diferencias de las amplitudes estimadas en función de las distancias de ruptura R propuestas son mínimas. Debido a esto último, ahora se propone una distancia de análisis intermedia $R = 150$ km, y esta vez, agrupamos las magnitudes propuestas de $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para las estimaciones de las relaciones V/H en cada estación, a fin de observar las diferencias respecto a este parámetro. Los resultados son mostrados en la Figura 4.4.

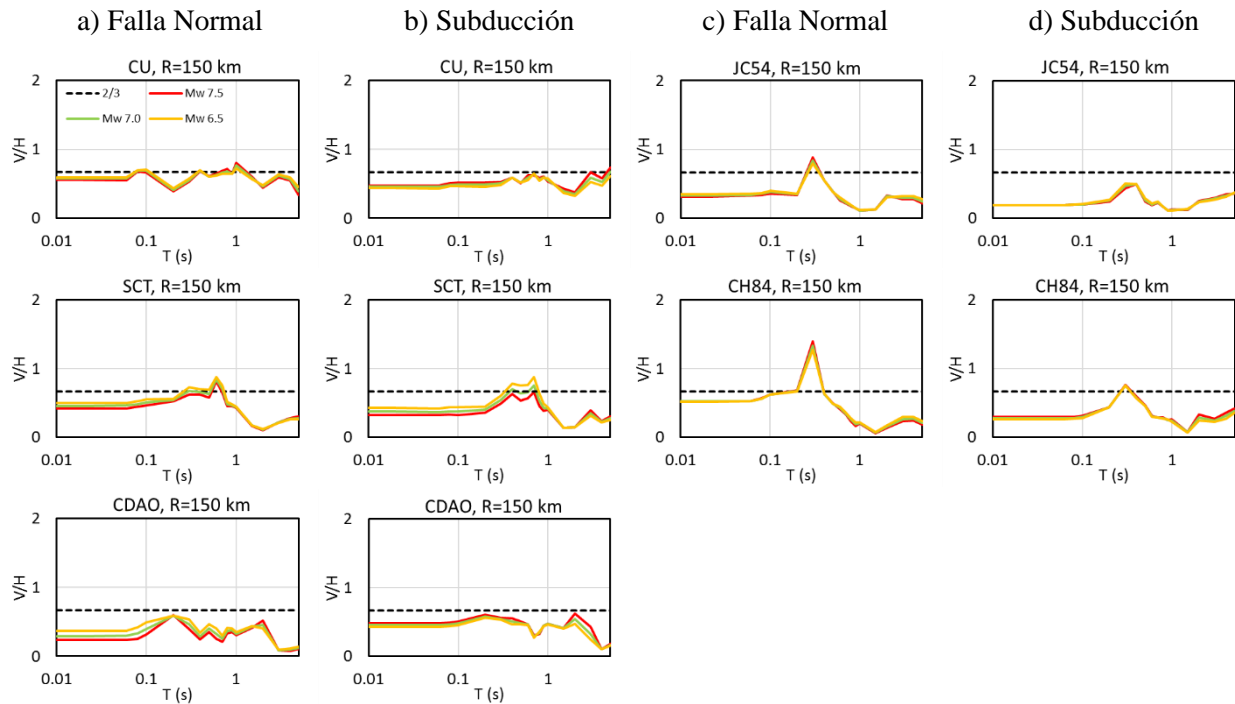


Figura 4.4 Estimación de la relación V/H con una distancia $R = 150$ km, dadas magnitudes de $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para las 5 estaciones de análisis.

Ahora, se muestran algunos de los resultados obtenidos para las estaciones sobre suelo blando con distancias $R = 200$ km y $R = 100$ km, con el fin de observar las similitudes y diferencias de la estimación entre estas. Cabe recordar, que se utiliza el método de estimación que predice de forma directa la relación V/H , dado por la ecuación (3.11).

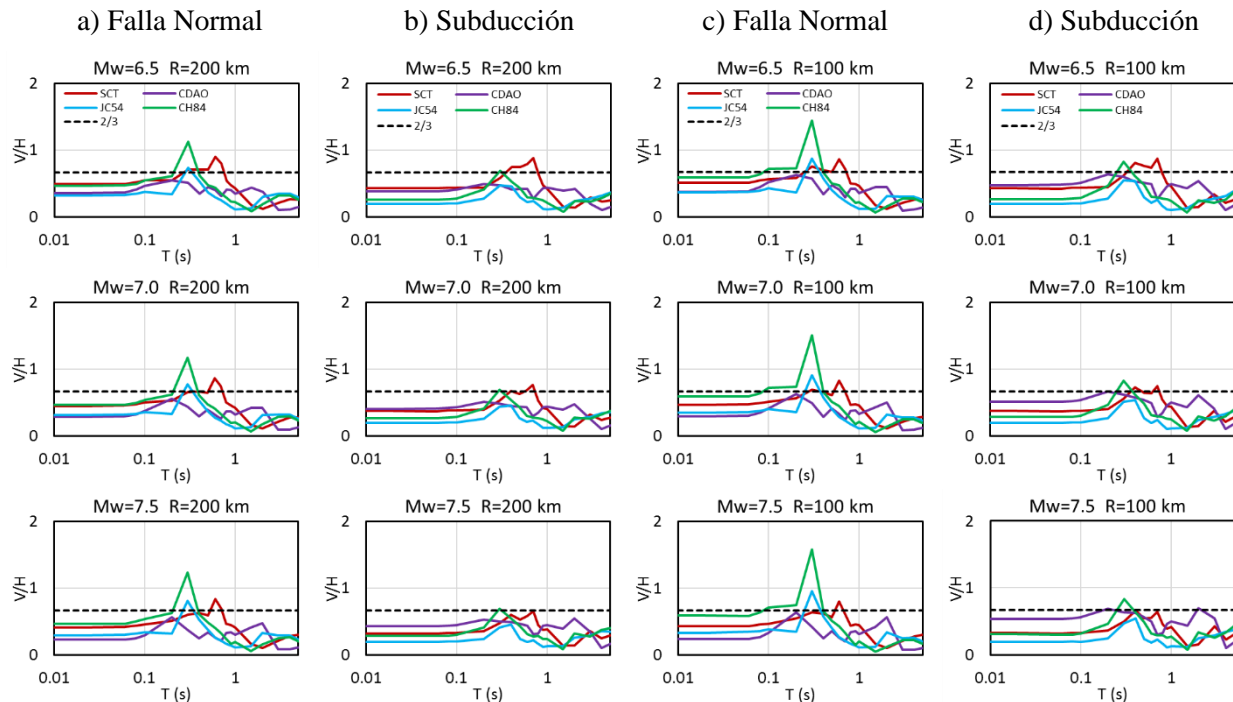


Figura 4.5 Comparación de estimaciones de la relación V/H para sitios sobre suelo blando en la Ciudad de México con distancias: $R = 200$ km (incisos a y b) y $R = 100$ km (incisos c y d).

4.1.3 Estimación de amplitudes V/H observados y calculados con las ecuaciones de predicción

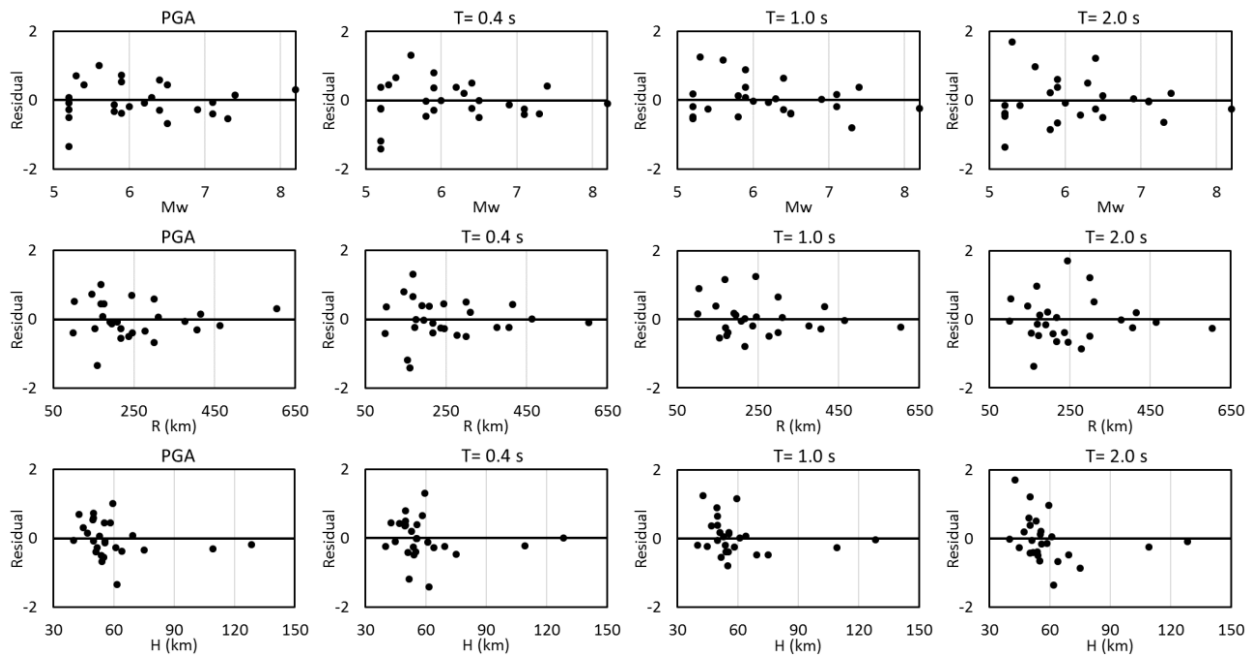
Una vez hecha las distintas propuestas de magnitudes M_w y distancias R para analizar nuestras ecuaciones de predicción del movimiento en el suelo, procedemos a comparar las estimaciones de las relaciones V/H con las que se obtienen a partir de los acelerogramas registrados. Para ello, se utilizan las magnitudes y distancias focales de los eventos de la Tabla 3.3 y Tabla 3.4, y al sustituirlas en las ecuaciones de predicción (3.11), se obtienen las amplitudes o relaciones de las componentes V/H .

Para propósitos de este análisis de comparación, utilizamos los residuales que arrojan ambos resultados. Definimos un residual como:

$$\delta_i = \ln(V/H_i) - \ln(\overline{V/H_i}) \quad (4.1)$$

donde $\ln(V/H_i)$ es el logaritmo natural de i -ésimo valor observado de V/H , y $\ln(\overline{V/H_i})$ es el correspondiente valor estimado. Para que el modelo sea objetivo, el residual debe tener media de cero y no estar correlacionado con respecto a los parámetros en el modelo de regresión. Esta ecuación es también aplicada a los valores observados y estimados para las componentes horizontal y vertical, de este modo se obtienen los residuales de todas las componentes para las cinco estaciones analizadas. Las gráficas de residuos de V/H como función de la magnitud de momento M_w , distancias de ruptura R y profundidad H_D para las ordenadas espectrales de respuesta en 2 de los 5 sitios seleccionados se muestran en las Figuras 4.6 y 4.7.

a) Componente Horizontal



b) Componente Vertical

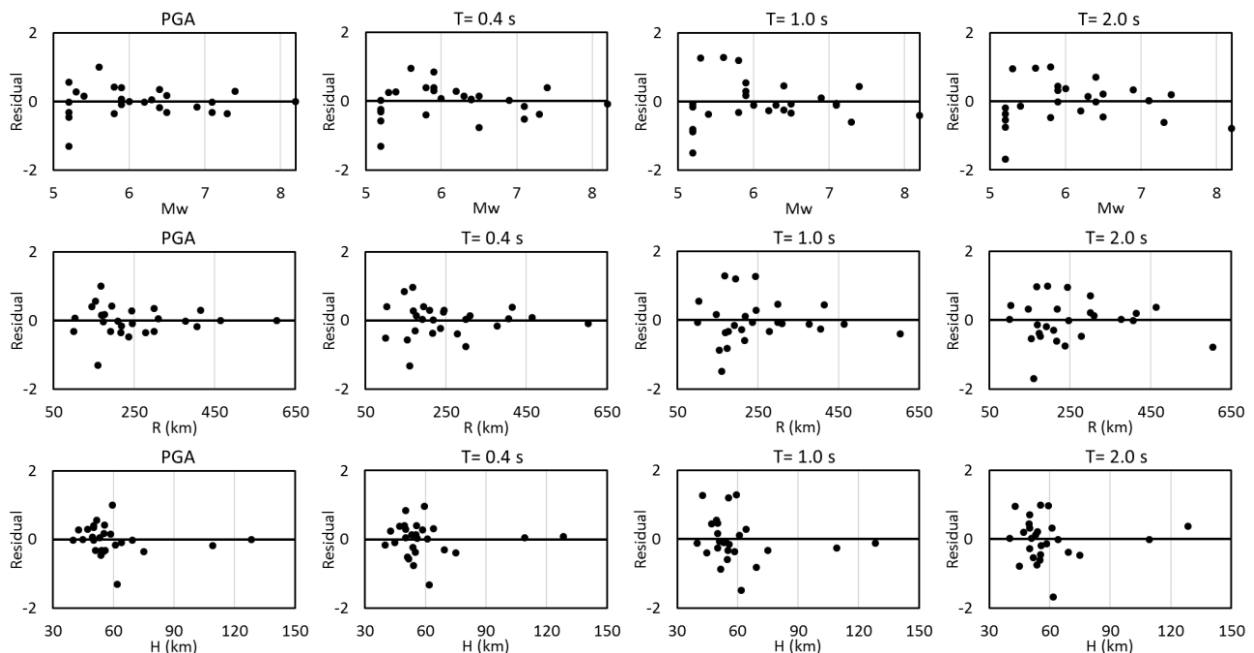


Figura 4.6 Residual de la regresión para las componentes: a) horizontal, b) vertical y c) relación V/H, de la estación CU con eventos de profundidad intermedia, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la PGA y aceleración espectral de respuesta en $T=0.4, 1.0$ y 2.0 s.

c) Relación V/H

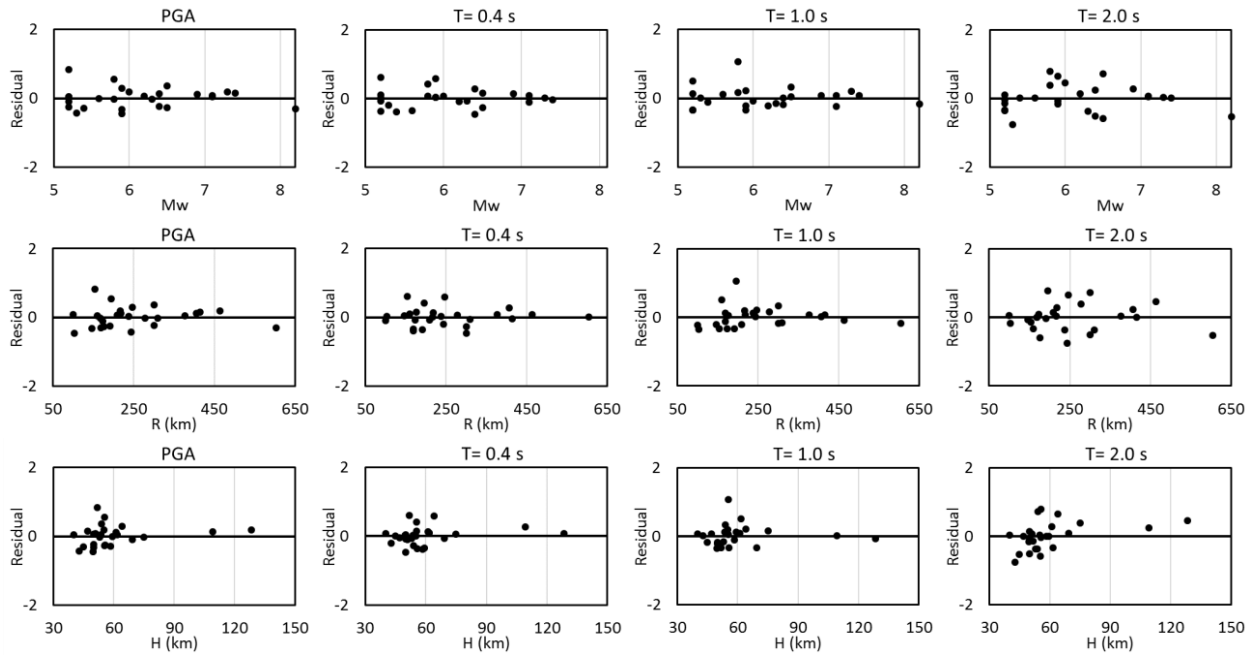
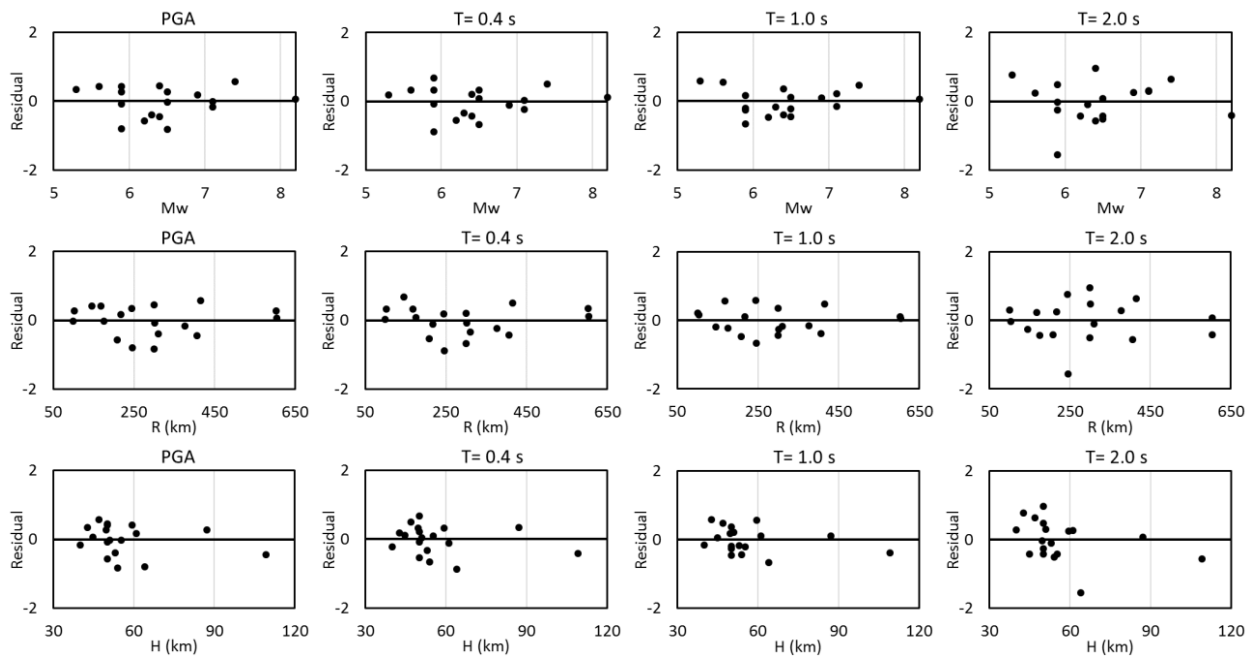


Figura 4.6 Continuación.

a) Componente Horizontal



b) Componente Vertical

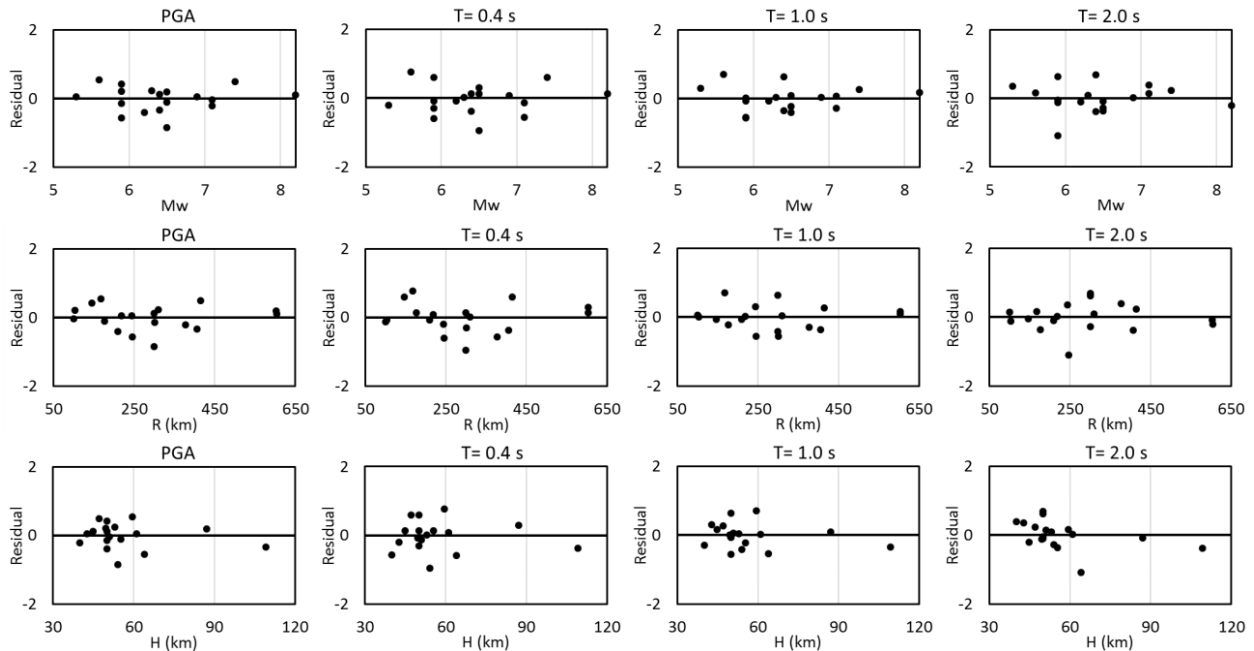


Figura 4.7 Residual de la regresión para las componentes: a) horizontal, b) vertical y c) relación V/H, de la estación SCT con eventos de profundidad intermedia, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la PGA y aceleración espectral de respuesta en $T=0.4, 1.0$ y 2.0 s.

c) Relación V/H

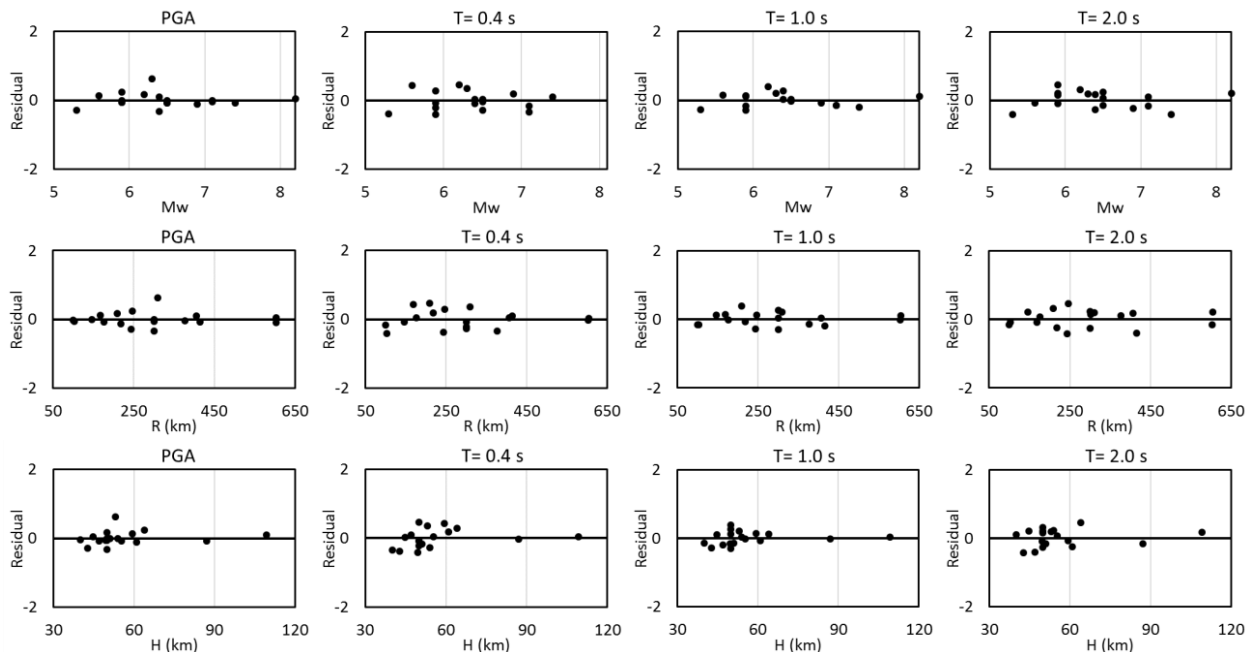


Figura 4.7 Continuación.

Las figuras de los residuales obtenidas para el resto de las cinco estaciones analizadas se presentan en el Anexo F de este trabajo.

Los resultados mostrados en las cinco estaciones para los dos tipos de fallas utilizados muestran que el modelo de regresión no está sesgado con respecto a la magnitud, distancia de ruptura y profundidad focal, por lo que se valida la selección de la forma funcional para el modelo de regresión dado en la ecuación (3.11).

Como se mencionó anteriormente, también obtuvimos la desviación estándar logarítmica natural, combinando las ecuaciones de predicción de movimiento horizontales y verticales para generar un modelo de V/H según lo propuesto por Stewart et. al. (2016). La desviación estándar correspondiente se calcula como:

$$\sigma_{\ln V/H} = \sqrt{\sigma_{\ln V}^2 + \sigma_{\ln H}^2 - 2\rho_{\ln V, \ln H} * \sigma_{\ln V} * \sigma_{\ln H}} \tag{4.2}$$

donde $\sigma_{\ln V}$ es la variabilidad de la componente vertical (variabilidad de la ecuación (3.3)); $\sigma_{\ln H}$ es la variabilidad de la componente horizontal (variabilidad de la ecuación (3.4)) y $\rho_{\ln V, \ln H}$ es el coeficiente de correlación entre el residual de las ecuaciones de predicción de movimiento vertical y horizontal (Tablas 3.5 y 3.6).

4.2 Comparación de amplitudes V/H observados y estimados para eventos sísmicos en México durante el periodo de 1985-2017

Una vez hecho la construcción de las ecuaciones de predicción de movimiento del suelo para cinco estaciones acelerométricas de gran relevancia en la Ciudad de México, utilizamos el mismo procedimiento para el hallazgo de coeficientes de regresión para una cantidad mucho mayor de registros sísmicos y, considerando la propuesta de que cualquiera de los dos métodos para la estimación de la relación V/H es igualmente válido, el proceso se lleva a cabo para la ecuación que estima la relación de los valores espectrales de respuesta verticales sobre horizontales de manera directa, es decir el segundo método ($\ln(V/H) = \gamma_1 + \gamma_2 M_w + \gamma_3 R + \varepsilon$).

Como se comentó, los eventos de la Tabla 3.1 y 3.2 fueron registrados durante un periodo de 1985 a 2017 para 54 sitios sobre suelo blando, así como para 5 sitios sobre terreno firme. El procesamiento de datos, así como el análisis de regresión se realizó para 904 registros de sitios sobre suelo blando y 75 sobre terreno firme para eventos de profundidad intermedia, mientras que se han utilizado 826 registros de sitios sobre suelo blando y 64 en terreno firme para los eventos de subducción, con la intención de abarcar la mayor cantidad de eventos y, por ende, una amplia variedad de magnitudes, distancias y profundidades, a fin de comprobar la efectividad de este procedimiento para la estimación del movimiento del suelo en base al tipo de falla y al tipo del suelo del sitio.

4.2.1 Obtención de la ecuación de estimación V/H y su comportamiento

Con la obtención de los nuevos coeficientes de regresión, se construye la ecuación de estimación de la relación V/H, con lo que, es posible observar el comportamiento del modelo se proponen algunos parámetros, como magnitud y distancias variadas, así, siguiendo las mismas clasificaciones para su análisis, se visualizan los resultados hallados.

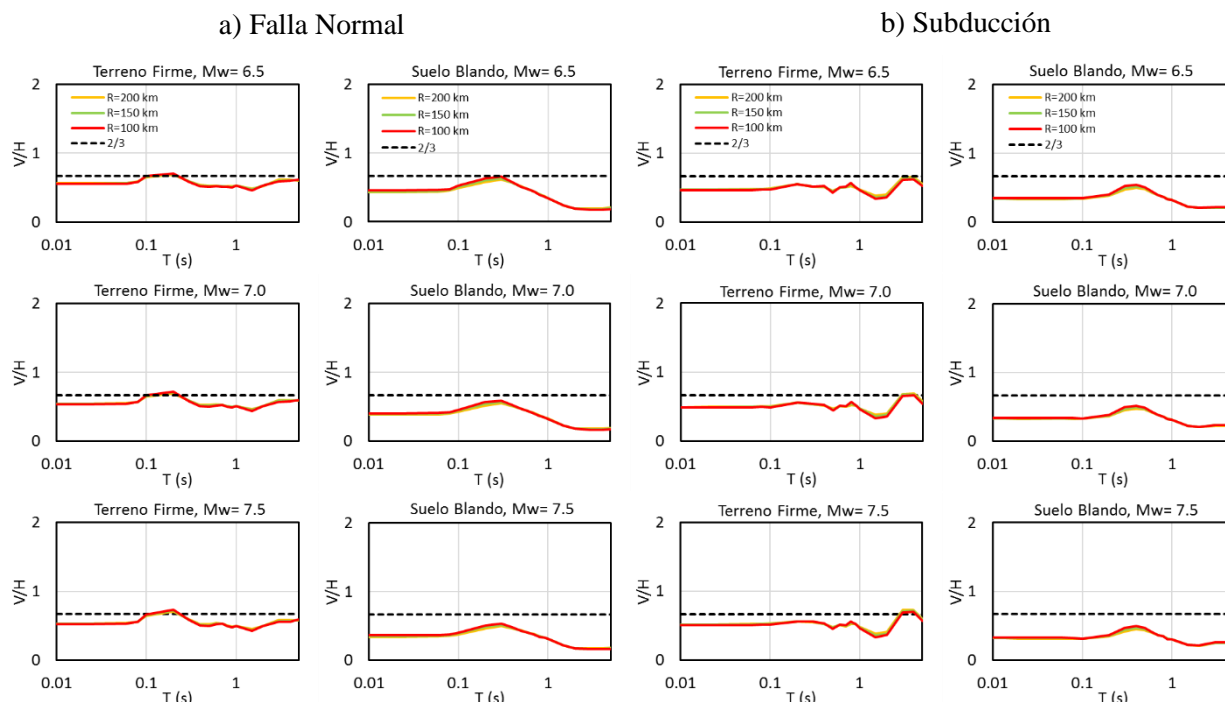


Figura 4.8 Comparación para la estimación de la relación V/H respecto a distancias $R = 100, 150$ y 200 km, con magnitudes $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para eventos de falla normal y subducción, separados por el tipo de suelo de los sitios.

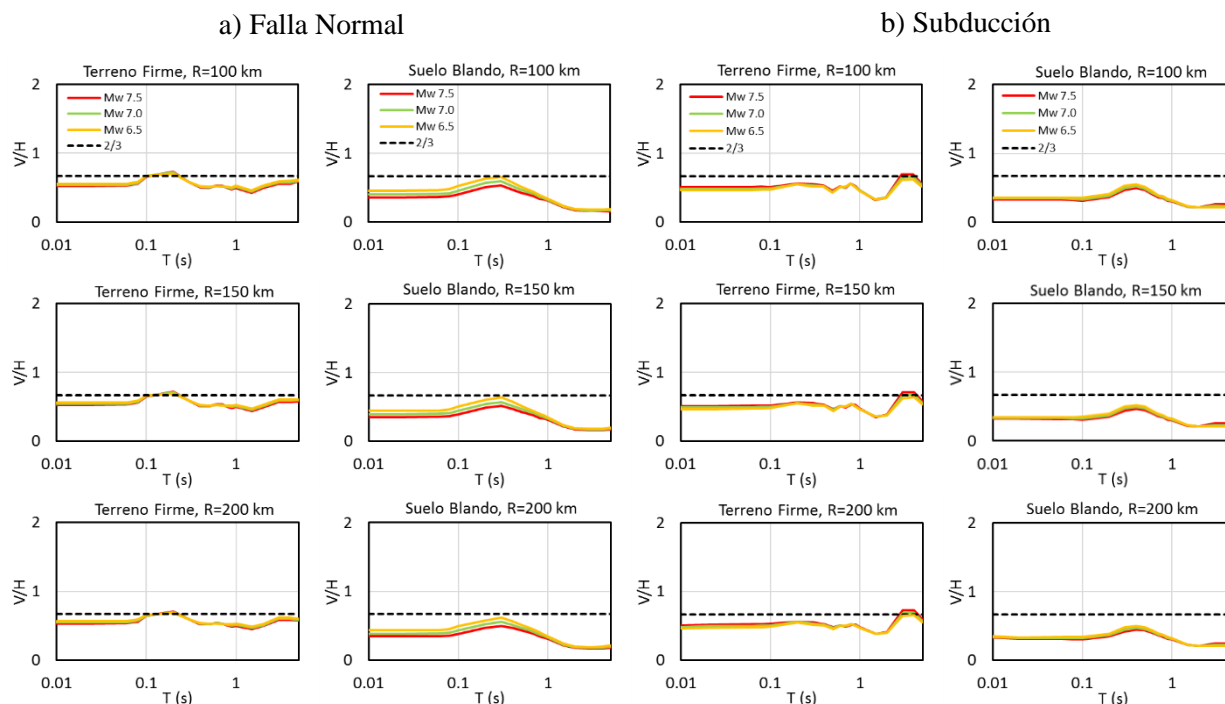


Figura 4.9 Comparación para la estimación de la relación V/H respecto a magnitudes $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 , con distancias $R = 100, 150$ y 200 km para eventos de falla normal y subducción, separados por el tipo de suelo de los sitios.

Ahora, ya que se han obtenido las ecuaciones de estimación de la relación V/H tanto para 5 estaciones por separado, como para cualquier estación con los métodos antes mencionados, podemos agrupar todas las estimaciones hechas en base a las distancias y magnitudes propuestas, $R = 100, 150$ y 200 km y $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 , respectivamente. Sin embargo, dada la similitud entre relaciones V/H para las distancias calculadas (se comentará este resultado en las discusiones), se opta por mostrar solamente las amplitudes para una distancia promedio de $R = 150$ km.

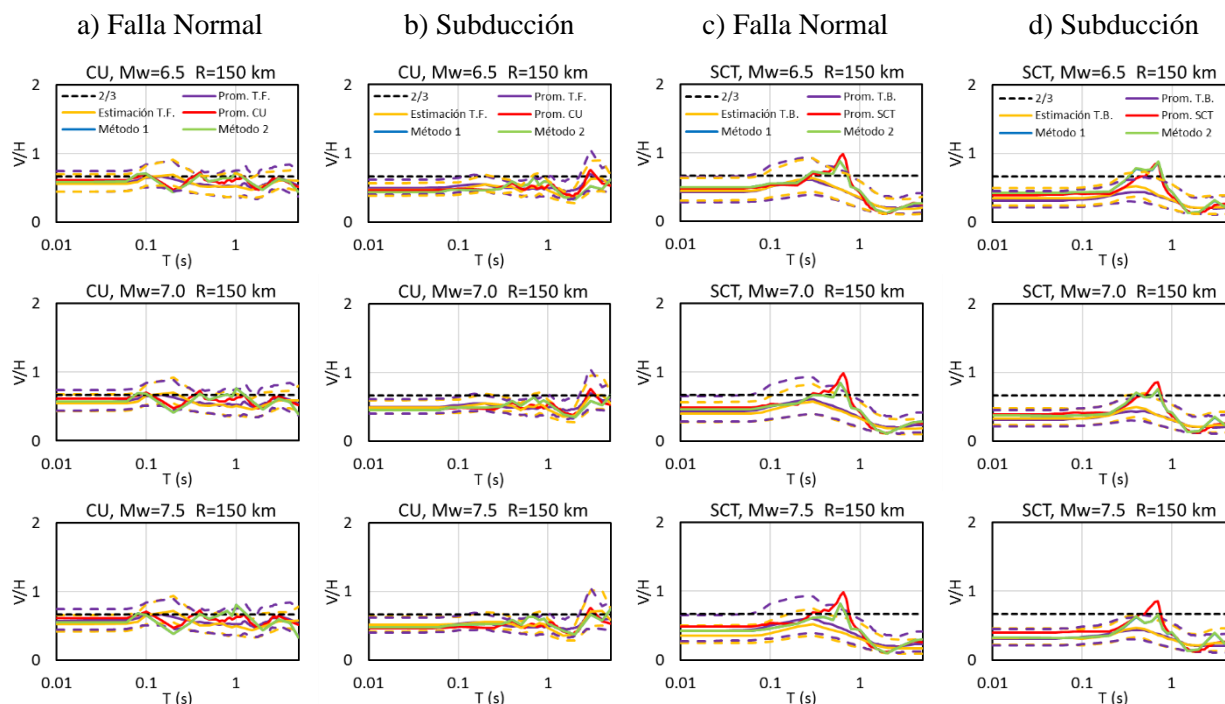


Figura 4.10 Comparación de relaciones V/H respecto a distancia $R = 150$ km, con magnitudes $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para estaciones: CU (incisos a y b) y SCT (incisos c y d).

En la Figura 4.10 se muestran los promedios logarítmicos de la relación V/H para cada estación de acuerdo con la cantidad de eventos que registraron (“Prom. CU”, “Prom. SCT”, etc.), así como el promedio logarítmico de las amplitudes en el conjunto de estaciones con el mismo tipo de suelo en el que se encuentra el sitio (“Prom. T.F.” para CU y “Prom. T.B.” para el resto). Así, por ejemplo, para la estación CU, este promedio será de las 5 estaciones que también se encuentran sobre terreno firme, a su vez, la estación SCT mostrará el promedio de las 54 estaciones que registran aceleraciones sobre suelo blando. Se contemplan para estas relaciones promedios de acuerdo con el tipo de suelo, más menos una desviación estándar, señalada con línea punteada y del mismo color. Además, se incluyen las estimaciones de las relaciones dado una distancia y magnitud, utilizando los métodos 1 y 2 obtenidos con los coeficientes de regresión de cada estación. Por último, se agrega la estimación de las amplitudes en base a los coeficientes obtenidos para todos los registros de las Tablas 3.3 y 3.4 (“Estimación T.F.” para CU y “Estimación T.B.” para el resto), incluyendo también más menos una desviación estándar con línea punteada y del mismo color. Los gráficos complementarios de las 5 estaciones se muestran en el Anexo G.

4.4.2 Estimación de amplitudes V/H observados y calculados

Tal como en el cálculo de las 5 estaciones, utilizamos las magnitudes y distancias focales para los eventos sísmicos reportados de la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 para estimar las ordenadas espectrales con la ecuación de predicción de la relación V/H (3.11), nuevamente obtenemos los residuales con la ecuación (4.1) y los graficamos para algunos periodos de relevancia, sin embargo, la clasificación esta vez será por el tipo de suelo sobre las que se encuentran las estaciones, así como el tipo de falla de los eventos analizados.

A continuación, se muestran los residuales obtenidos.

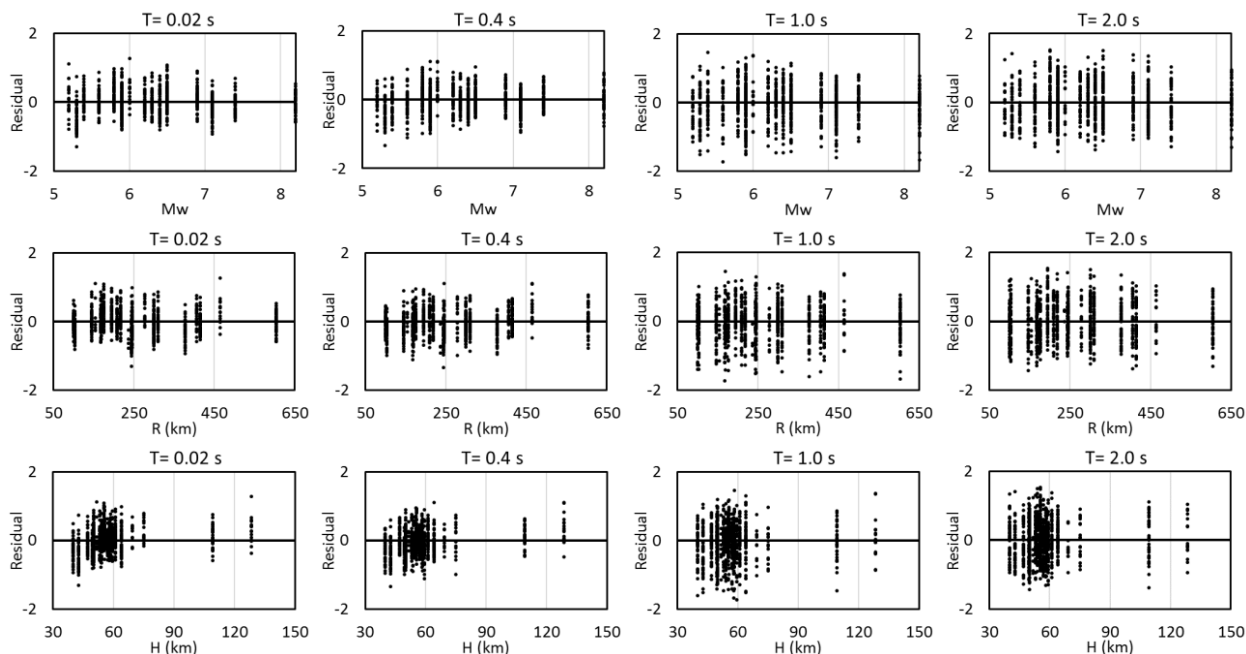


Figura 4.11 Residual de la regresión para la relación V/H de 54 estaciones sobre suelo blando con eventos de profundidad intermedia, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la aceleración espectral de respuesta en T= 0.02, 0.4, 1.0 y 2.0 s.

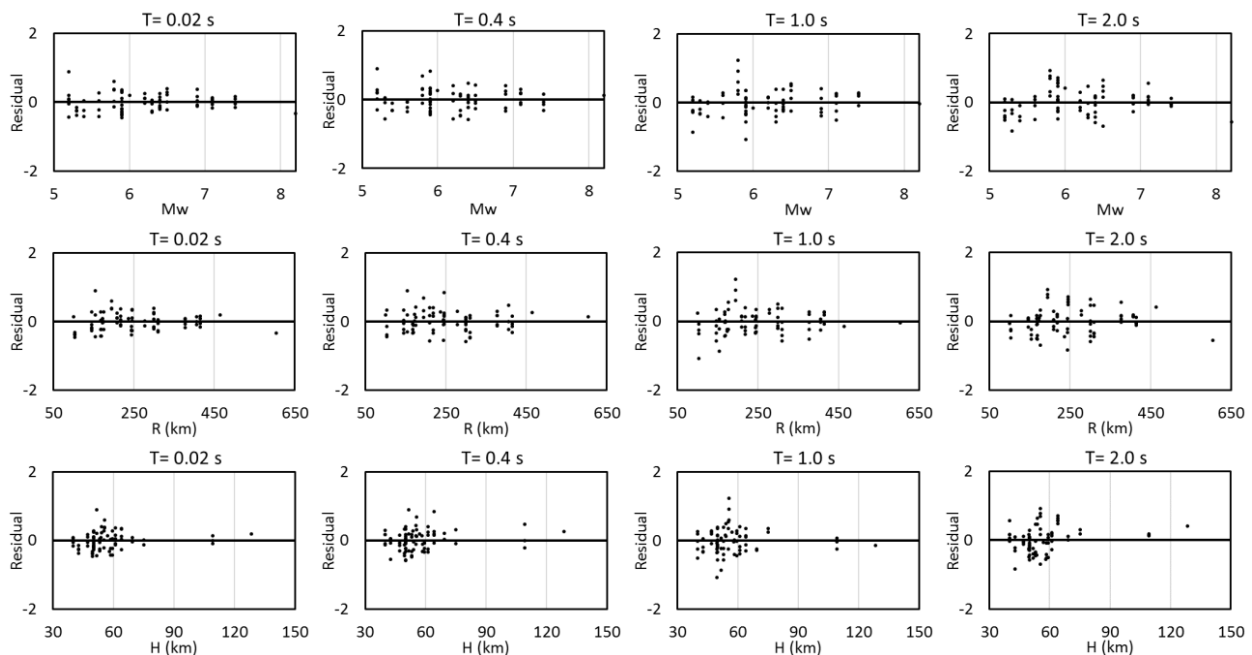


Figura 4.12 Residual de la regresión para la relación V/H de 5 estaciones sobre terreno firme con eventos de profundidad intermedia, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la aceleración espectral de respuesta en $T= 0.02, 0.4, 1.0$ y 2.0 s.

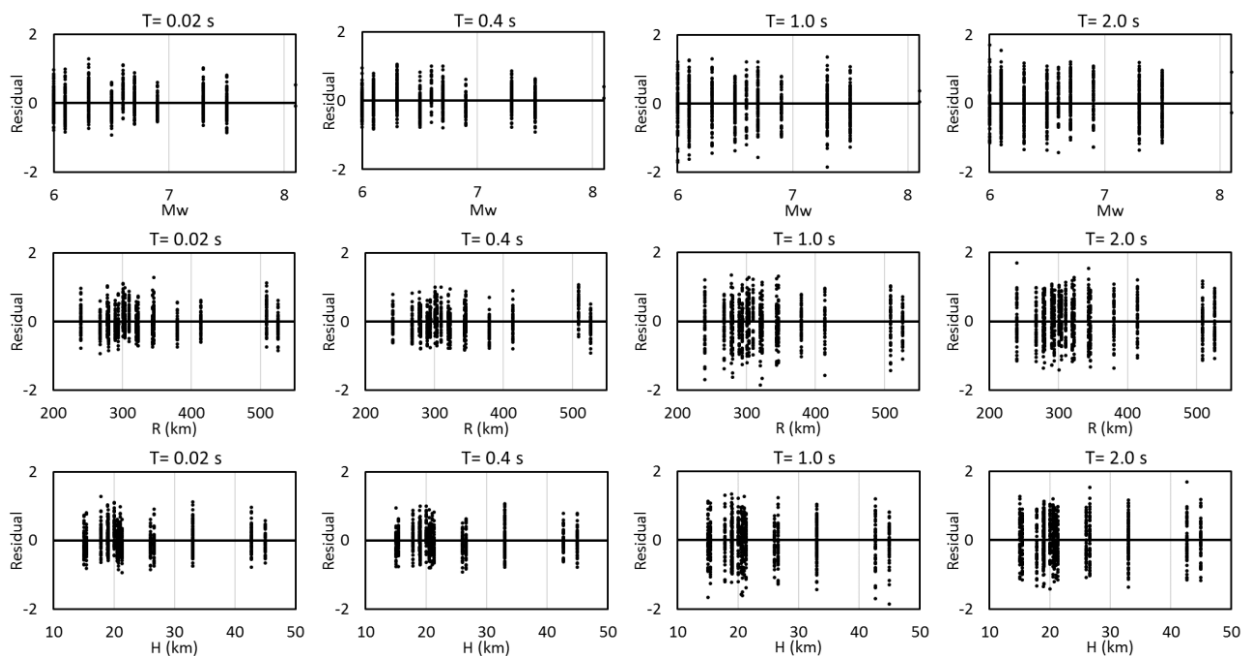


Figura 4.13 Residual de la regresión para la relación V/H de 54 estaciones sobre suelo blando con eventos de subducción, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la aceleración espectral de respuesta en $T= 0.02, 0.4, 1.0$ y 2.0 s.

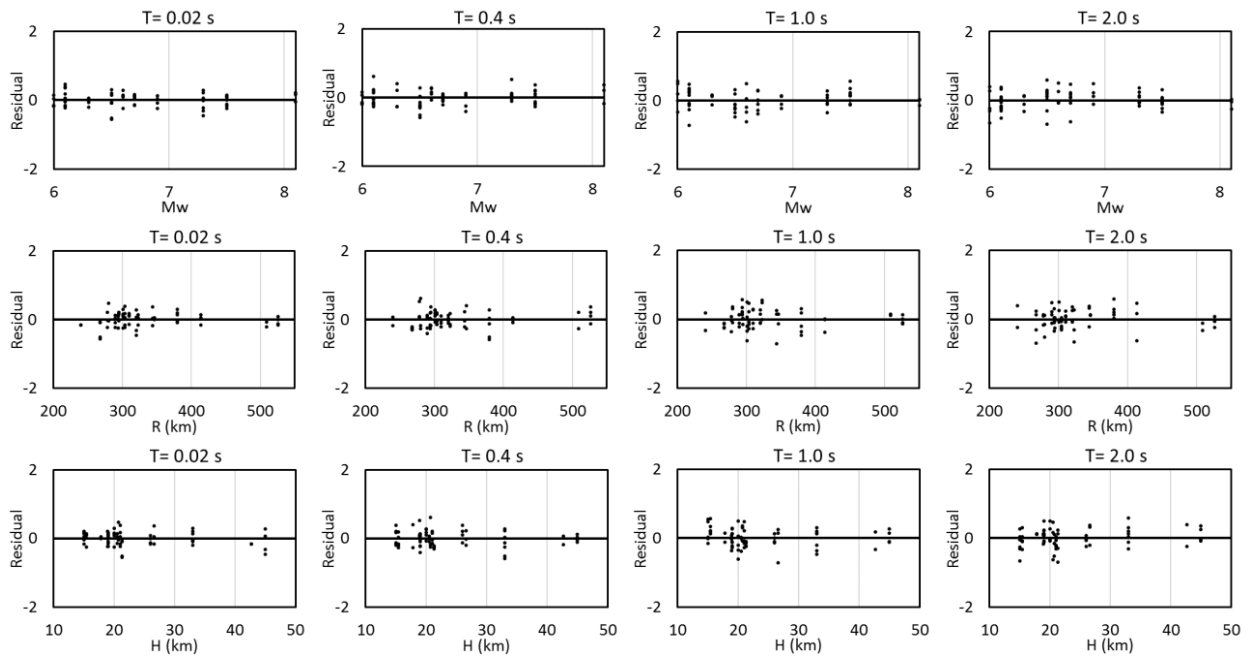


Figura 4.14 Residual de la regresión para la relación V/H de 5 estaciones sobre terreno firme con eventos de subducción, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la aceleración espectral de respuesta en $T= 0.02, 0.4, 1.0$ y 2.0 s.

Nuevamente, los resultados mostrados en las Figuras 4.11-4.14 para estaciones sobre suelo blando y terreno firme, así como para los dos tipos de falla analizados sugieren que el modelo de regresión no está sesgado con respecto a la magnitud, distancia y profundidad focal, por lo que se valida la selección de la forma funcional para el modelo de regresión dado en la ecuación (3.11) con estos datos.

En adición, un estudio reciente (Jaimes, M. A., & Ruiz-García, J., 2019) similar al expuesto en esta tesis, evalúa la estimación de la relación V/H utilizando la ecuación de predicción $\ln(V/H) = \gamma_1(T) + \gamma_2(T) \cdot T_s + \delta_{V/H}(T)$ donde V/H es la ordenada de la relación vertical sobre horizontal, T es el periodo natural de vibración, γ_1 y γ_2 son los coeficientes a ser estimados por el análisis de regresión, mientras que $\delta_{V/H}(T)$ es el término de error aleatorio, asumiendo una distribución normal con media cero y desviación estándar $\sigma_{V/H}(T)$. Dicho estudio encontró que, para tres periodos dominantes ($T_s = 1.0, 1.5$ y 2.0 s) la forma espectral de las ordenadas para la relación V/H estimadas varía ligeramente en función de T_s , pero las ordenadas más altas son similares independientemente del valor de T_s . Cabe mencionar que para la obtención de la relación de estimación V/H los autores utilizaron 6 eventos de profundidad intermedia con 283 registros de movimiento del suelo obtenidos en estaciones acelerométricas instaladas sobre suelo blando en la Ciudad de México. Los sismos de profundidad intermedia seleccionados cubren una amplia gama de magnitudes de momento ($5.6 < M_w < 7.1$), distancias de ruptura ($100 < R < 218$ km) y profundidades focales de los eventos sísmicos ($29 < H < 59$ km).

4.3 Espectro de diseño V/H propuesto

Existen algunas excepciones al enfoque de considerar la relación V/H de 2/3, por ejemplo, la edición 2008 del Manual de Estructuras Civiles (MOC2008) (Tena-Colunga, Mena-Hernández, Pérez-Rocha, Avilés, Ordaz, Vilar, 2009) en México, y sus actualizaciones posteriores (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2008), y el Eurocódigo 8 (European Committee for Standardization, 2004), los cuales especifican un espectro de aceleración vertical dependiente del período.

Aunque el MOC (2008 y posteriores) especifica que el espectro de aceleración vertical se puede usar para estructuras en sitios de suelo blando ubicados a una distancia menor de 80 km de una falla activa, se debe tener en cuenta que su forma funcional se basa en la investigación reportada en *Perea T, Esteva L.*, que empleó 10 movimientos de tierra causados por terremotos registrados en sitios de suelo de rocas y firmes debido a sismos de subducción. Es por esto que todavía hay una falta de recomendaciones para tener en cuenta las aceleraciones verticales debido a los sismos de profundidad intermedia para sitios de suelo blando (como algunos de los mostrados en este trabajo) que han afectado la Ciudad de México.

De este modo, a través del estudio expuesto hasta el momento en este trabajo, se podrá proponer una nueva relación V/H, la cual puede se podría aplicar para la obtención de un espectro de aceleración vertical de diseño para la ciudad de México. Cabe señalar que esto requiere cálculos adicionales y el presente trabajo mostrará solo un ejemplo de una posible propuesta. Un enfoque para obtener estimaciones de las aceleraciones verticales S_{av} , para el diseño sísmico, es relacionarlas con las ordenadas de aceleración horizontal ya disponibles S_{ah} (por ejemplo, a través del análisis de riesgo sísmico probabilístico) a través de un espectro de diseño V/H. Por lo tanto, basado en el espectro V/H mediano empírico, se propone una forma tripartita para el espectro de diseño V/H para sitios de suelos blandos en la Ciudad de México (Jaimes, M. A., & Ruiz-García, J., 2019), de la siguiente manera:

$$a_{V/H} = \begin{cases} a_{0V/H} + (c_{V/H} - a_{0V/H})T/T_a & \text{si } T < T_a \\ c_{V/H} & \text{si } T_a \leq T < T_b \\ c_{V/H}(T_b/T)^r & \text{si } T \geq T_b \end{cases} \quad (4.3)$$

donde T es el periodo natural de vibración de interés en la dirección vertical, $a_{0V/H}$ es el valor al origen del espectro de diseño, $c_{V/H}$ es el valor que define la meseta, T_a y T_b son periodos de control que definen la meseta del espectro de diseño V/H y r es el parámetro que define la rama descendiente del espectro de diseño V/H.

Valores de V/H calculados con la ecuación (3.11) son claramente una aproximación que tiene una incertidumbre asociada, que estrictamente debe propagarse para estimar los valores de las aceleraciones espectrales verticales (es decir, S_{av}). Sin embargo, si el espectro de respuesta horizontal al que se aplica para obtener estimaciones de aceleración vertical se ha determinado a partir de un análisis de riesgo sísmico probabilístico que tiene en cuenta la variabilidad aleatoria en las ecuaciones de predicción de movimiento del terreno y los efectos del sitio, la propagación de la incertidumbre puede ser despreciada.

La razón de esto es que la desviación estándar asociada para la predicción de V/H es consistentemente menor que las asociadas con la predicción de las aceleraciones espectrales horizontales. Por lo tanto, los valores de desviación más altos en la predicción de S_{ah} deberían explicar al menos parcialmente la incertidumbre en la conversión $V/H - S_{av}$ que no se propaga.

Discusión

Comenzamos la discusión de los resultados obtenidos en los acelerogramas registrados para el sismo del 19 de septiembre de 1985 en las estaciones CU y SCT. Se observa que para el primer sitio (Figura 2.2a y 2.2b), la similitud entre las componentes Norte-Sur y Este-Oeste es evidente, pues la variación en las aceleraciones para los primeros 30s se mantienen constantes. Obteniendo, además, los valores máximos en torno a los 30 cm/s^2 abarcando rangos de tiempo entre 35-75 segundos aproximadamente, para posteriormente disminuir los valores en ambas componentes al alejarse de este intervalo. Por su parte la componente vertical (Figura 2.2c) denota aceleraciones máximas de aproximadamente 20 cm/s^2 en un rango de tiempo similar a las otras dos componentes, pero siendo en general menores a estas últimas.

Para la estación SCT, los acelerogramas muestran sus valores máximos dentro del rango de 30 a 80 segundos, y siendo alrededor de 90 cm/s^2 para la componente Norte-Sur (Figura 2.3a), 170 cm/s^2 para la componente Este-Oeste (Figura 2.3b) y 30 cm/s^2 para la componente vertical (Figura 2.3c). De nueva cuenta se observan menores valores de las aceleraciones del suelo en la componente vertical que en las otras componentes.

Ahora bien, el comportamiento de las ondas sísmicas de este evento sísmico con falla de subducción sobre el suelo es el esperado de acuerdo con las características propias del sismo, así como del tipo de suelo que donde las ondas sísmicas atraviesan. Esto debido a que la energía expresada como aceleración en el terreno, alteró más el suelo blando sobre el sitio SCT, en comparación del terreno firme de la estación CU, por ello se explica que las aceleraciones en todas las componentes para prácticamente cada intervalo de registro en SCT fueron mayores que en CU.

Con la explicación y el cálculo de los espectros de respuesta en términos de aceleración para estas mismas estaciones, se observan respuestas distintas para el mismo evento (19/09/1985), y es aquí donde se observa claramente el efecto que provoca el tipo de suelo sobre las estructuras al durante el paso de las ondas. Lo anterior dicho en base a que mientras las repuestas en los periodos dominantes de CU llegan a los 130 cm/s^2 (Figura 2.4a), el espectro de respuesta en el sitio SCT (Figura 2.4b) mostró aceleraciones espectrales de repuesta de hasta 900 cm/s^2 . Dichas repuestas de aceleración fueron encontradas en los periodos dominantes de cada estación, siendo para el espectro de CU periodos estructurales cercanos a 1 segundo, mientras que SCT posee sus periodos dominantes cercanos a los 2 segundos. Esto quiere decir que aquellas construcciones en las cercanías de estos sitios con periodos de vibración similares a los respectivos periodos dominantes de cada estación fueron los que recibieron mayores fuerzas dinámicas. Cabe mencionar, que estos resultados se obtuvieron sólo para la componente Este-Oeste, por ello se utilizó la media cuadrática para obtener espectros de respuesta que contemplara además el movimiento en la componente Norte-Sur. De esta forma, se obtuvo una mejor representación del comportamiento real que se pudo tener durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, obteniendo respuestas espectrales similares que las mencionadas para la componente Este-Oeste (Figura 2.6). Con los espectros de la componente horizontal, se obtuvieron ordenadas espectrales en CU de 110 cm/s^2 aproximadamente para periodos de 1s, mientras que SCT tuvo aceleraciones de respuesta rondando valores de 800 cm/s^2 para periodos de 2s.

Los espectros de respuesta para la componente vertical muestran que para el sitio SCT las aceleraciones pico se presentan para los periodos estructurales cercanos a 2s (Figura 2.5b), tal como en la componente horizontal. Sin embargo, las aceleraciones pico en la componente vertical son mucho menores que en la horizontal, lo cual es apreciable en la relación V/H (Figura 2.7b), donde las amplitudes no sobrepasan el 30%. En cambio, para la componente vertical de la estación CU (Figura 2.5a) se muestran aceleraciones pico en los periodos cercanos a 3s para posteriormente disminuir de manera constante la respuesta en periodos mayores. Por ello, la relación V/H en este caso (Figura 2.7a) muestra un crecimiento a partir de los 2s y hasta los 3s, en donde la relación llega a ser mayor a uno. Esto significa que, aquellas construcciones con periodos dominantes cercanos a 3s, fueron en las que las fuerzas verticales estuvieron más presentes que las horizontales, por lo que algunas de las estructuras de aquel tiempo pudieron ser afectadas de distinta manera que aquellas en donde predominaron las fuerzas horizontales.

Por otro lado, tomando las ordenadas de los espectros de respuestas en términos de aceleración tanto horizontales como verticales para los eventos de las Tablas 3.1 y 3.2, se hallaron las relaciones V/H entre éstas para 54 estaciones sobre suelo blando y 5 estaciones sobre terreno firme. Los resultados obtenidos serán analizados para el promedio de la relación de aceleraciones verticales sobre horizontales V/H por estación, con el fin de clasificar comportamiento general de respuesta en cada sitio de acuerdo con el tipo de sismo que provoca las alteraciones. Por ello, se encontró que, tanto para sismos de profundidad intermedia como para sismos de subducción de los sitios sobre terreno blando, en periodos cortos ($T < 1s$) existe una presencia importante de fuerzas verticales. Estas decaen al llegar a periodos muy cercanos a 1 segundo ($T \sim 1s$). Además, para $T < 1s$, se observa que las amplificaciones para sismos de falla normal son en general mayores a los de subducción, para posteriormente disminuir la diferencia de amplitudes entre ambos tipos de fallas y manteniendo relaciones V/H muy similares para periodos mayores $T > 1s$.

Por otra parte, las estaciones sobre terreno firme muestran amplificaciones mucho más constantes para los dos tipos de falla en periodos comprendidos de 0.01 a 5 segundos en donde el cambio brusco de las amplitudes no se presenta, además, la comparación entre ambos tipos de fallas tectónicas arroja resultados muy similares a lo largo de los periodos de análisis.

Para la estimación de las amplificaciones en la relación V/H dada una magnitud y distancia para 5 estaciones (4 sobre terreno blando y 1 en terreno firme) fueron utilizados dos métodos. El primero con la ecuación (3.9) y el segundo es el descrito en la ecuación (3.11). Se comparó las estimaciones de la relación V/H de ambos métodos con parámetros de magnitudes M_w y R variadas, así como para eventos con fallas normales e inversas, con el objetivo de abarcar la mayor cantidad de escenarios posibles, y las cuales son mostradas en las Figuras 4.1, 4.2 y el Anexo D. Dichos resultados mostraron que, en cada caso, las estimaciones de las ordenadas espectrales para ambos métodos son prácticamente iguales en las 5 estaciones, así como en ambos tipos de falla. Dados estos resultados, el empleo de cualquiera de los dos métodos propuestos llevarán a los mismos resultados, por lo que se decidió utilizar el segundo método para los cálculos y comparaciones posteriores.

Las comparaciones siguientes representadas en las Figuras 4.3 y 4.4, proponiendo distancias de ruptura y magnitudes de momento, arrojan resultados similares a los ya mencionados. Como última comparación con parámetros M_w y R propuestos, se presentan en la Figura 4.5, los resultados de las estimaciones V/H en conjunto para las estaciones sobre suelo blando SCT, CDAO, JC54 y CH84. Esta figura denota las diferencias en la relación V/H por estación, donde en general, tienden a tener valores crecientes desde periodos de $T > 0.3s$ hasta $T \sim 0.7s$ aproximadamente, en cuyo rango se llegan a las amplificaciones máximas. En la mayoría de las estaciones analizadas para eventos con tipo de falla normal, las amplitudes superan las dos terceras partes de la relación V/H . Posterior a $T > 0.7s$ comienzan a decaer los valores hasta llegar a sus amplificaciones mínimas entre periodos de 1-3s. Las amplitudes para eventos de subducción en todas las estaciones no sobrepasan la proporción de $2/3$ para periodos $T < 0.1s$. Sin embargo, para periodos $T > 0.1s$, las amplitudes comienzan a crecer, llegando a sobrepasar en algunos casos la relación de $2/3$, para posteriormente decaer a sus amplitudes mínimas en periodos $T \sim 1.0s$. Cabe señalar, que las relaciones V/H máximas para la estación CH84, localizadas entre periodos $0.1s < T < 0.7s$, llegan a ser mayores que 1 para los eventos de falla normal. Además, las amplificaciones en eventos de subducción arrojan en lo general, valores menores que los obtenidos para eventos con falla normal. Por su parte, en la estación CU localizada sobre terreno firme, el comportamiento de las relaciones V/H tiende a ser constante y con valores muy cercanos a $2/3$.

Para aprobar el empleo del método de estimación de la relación V/H propuesto, comparamos los valores estimados con las ecuaciones de predicción, y los correspondientes valores observados. Para ello, se utilizan los residuales, los cuales son representados en las Figuras 4.6 y 4.7, para las estaciones CU y SCT, respectivamente, y en el Anexo F para las estaciones restantes. Como se aprecia en dichas figuras, los residuales muestran un comportamiento adecuado para la estimación, pues no presenta relación alguna con la magnitud de momento, distancia de ruptura o la profundidad focal, además de no sobrepasar valores de ± 2 , lo que refleja una precisión aceptable de la estimación de cocientes V/H versus los correspondientes observados.

Una vez validado el modelo que estima la relación V/H en cada una de las 5 estaciones, se llevó a cabo la misma metodología para los eventos principales de estudio, es decir, los reportados en las Tablas 3.1 y 3.2. En esta ocasión, la obtención de los coeficientes de regresión se calculó a partir de la clasificación del tipo de falla en placas tectónicas que presentaron los eventos, así como del tipo de terreno. Así, se inspeccionó la influencia de la distancia y la magnitud en las relaciones V/H , que se muestran en las Figuras 4.8 y 4.9, respectivamente. En los resultados para el primer caso, se observa poca variación utilizando distancias R propuestas de 200, 150 y 100 km para eventos de profundidad intermedia, y muy poca a nula variación en eventos de subducción. Por ello, respecto a la distancia es prácticamente nula la influencia de este parámetro con cualquier magnitud analizada, cuyo resultado es aplicable para los dos tipos de sismos analizados. Para la magnitud se observa muy poca relevancia en las estaciones de terreno firme para ambos tipos de sismos, y un poco más de variación en las estaciones sobre suelo blando, notándose más la diferencia en sismos de profundidad intermedia (desde periodos de 0.01-1s aprox.) que las de subducción.

La Figura 4.10, así como las del Anexo G agrupa las representaciones gráficas de las estimaciones de la relación de la relación V/H creadas a partir de la propuesta de distintas magnitudes y distancias. Aquí es posible comparar el método propuesto para estimar las amplitudes, con las calculadas a partir de los registros acelerográficos. Primeramente, se observa que para la estimación de las amplitudes V/H , ya sea utilizando el método 1 o el método 2 (línea azul y verde), es prácticamente coincidente con el promedio logarítmico de cada estación (línea roja), teniendo la mayor precisión con estimaciones para eventos de magnitud 6.5. Un caso similar ocurre a comparar las amplitudes estimadas para sitios sobre terreno firme/terreno blando (línea amarilla), con los respectivos promedios logarítmicos calculados en base a los acelerogramas (línea morada). Nuevamente, se observa que en general, ni las estimaciones, ni los promedios logarítmicos siguen un comportamiento lineal de $2/3$ para periodos mayores a 0.1s, pudiendo ser la excepción para periodos entre 0.01-0.1s, sin embargo, aunque el comportamiento de amplitudes en este rango pudiera considerarse lineal, tiende a ser menor que la relación de $2/3$.

Conclusiones

Se estudiaron las relaciones espectrales V/H de eventos sísmicos registrados desde el año 1985 hasta 2017 en México en 54 estaciones localizadas en suelo blando, así como 5 estaciones sobre terreno firme. Se contemplaron dos tipos de eventos de gran relevancia; sismos de subducción y sismos de falla normal, analizando 18 y 23 eventos, respectivamente. Como se discutió, los resultados mostraron diversas diferencias entre las pseudoaceleraciones de respuesta para los dos tipos de sismos analizados, así como variaciones entre valores de amplitudes para la relación V/H. Para este último caso, las amplitudes mostraron en general mucha variación en sus resultados, a diferencia del valor recurrente de 2/3, comúnmente utilizado en reglamentos para la derivación de espectros de diseño de aceleración verticales. Esto a su vez, permitió observar las distintas repuestas que se pueden presentar de acuerdo con el tipo de suelo sobre el que las ondas sísmicas producen alteraciones.

Además, se halló que el uso de la proporción 2/3 para la relación V/H de las ordenadas espectrales representa un valor aproximado, pues, no es capaz de representar en su totalidad el comportamiento en muchos sitios en la Ciudad de México. Esto dio paso a la propuesta de dos métodos capaces de obtener la predicción del movimiento de suelo, con lo que fue posible estimar las respuestas espectrales en términos de pseudoaceleración para las componentes vertical y horizontal, así como las relaciones espectrales V/H. Dichos métodos se compararon y se optó por la utilización del método que estima la relación V/H directamente, simplificando la estimación de la componente vertical. Con ello, se obtuvieron resultados bastante favorables del método de predicción, al comparar las respuestas estimadas y las observadas, ya sea haciendo el análisis para una estación en particular, o abarcando aspectos más generales como el tipo de sismo (subducción / profundidad intermedia) o de suelo (terreno firme / suelo blando) que se desee estudiar.

De esto último, se puede concluir que, si se desea conocer las relaciones V/H de una estación en particular, para fines de precisión, será más factible usar las ecuaciones de predicción de movimiento del suelo construidas a partir coeficientes de regresión calculados con eventos sísmicos registrados en dicha estación. Sin embargo, la utilización de ecuaciones de predicción creadas a partir de un conjunto de estaciones sobre un mismo tipo de suelo permite tener mayor perspectiva del comportamiento de las amplitudes. Así pues, ambos procesos cumplen funciones complementarias que puedan apoyar en investigaciones similares a la presentadas en esta tesis.

Finalmente, se expuso un método funcional, capaz de estimar la relación V/H dada una magnitud M_w y distancia de ruptura R, que además de ser confiable, permite su uso para la obtención de ordenadas espectrales verticales a partir de espectros de respuesta horizontales, tales como los que se obtienen en un análisis de riesgo sísmico.

Referencias

- Arroyo, D., D. García, M. Ordaz, M. A. Mora, and S. K. Singh (2010). Strong ground-motion relations for Mexican interplate earthquakes, *J. Seismol.* 14, no. 4, 769–785.
- Bommer, J., S. Akkar, and Ö. Kale (2011). A model for vertical-to-horizontal response spectral ratios for Europe and the Middle East, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 101, no. 4, 1783–1806.
- Boore, D. M. (2005). On pads and filters: Processing strong-ground motion data, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95, no. 2, 745–750.
- Bozorgnia, Y., and K. W. Campbell (2016a). Vertical ground motion model for PGA, PGV, and linear response spectra using the NGA-West2 database, *Earthq. Spectra* 32, no. 2, 979–1004.
- Bozorgnia, Y., and K. W. Campbell (2016b). Ground motion model for the vertical-to-horizontal (V/H) ratios of PGA, PGV, and response spectra, *Earthq. Spectra* 32, no. 2, 951–978.
- Cotton, F., F. Scherbaum, J. J. Bommer, and H. Bungum (2006). Criteria for selecting and adjusting ground motion models for specific target regions: Application to Central Europe and rock sites, *J. Seismol.* 10, no. 137, 137–156.
- European Committee for Standardization (2004). Eurocode 8 Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization.
- García, D., S. K. Singh, M. Herráiz, M. Ordaz, and F. Pacheco (2005). Inslab earthquakes of Central Mexico: Peak ground-motion parameters and response spectra, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95, no. 6, 2272–2282.
- García, D. (2006). Estimación de parámetros del movimiento fuerte del suelo para terremotos interplaca e intraslab en México central, *Ph.D. Thesis*, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.
- García-Soto, A. D., H. P. Hong, and R. Gómez (2012). Effect of the orientation of records on displacement ductility demand, *Can. J. Civ. Eng.* 39, 362–373.
- Hanks, T.C y H. Kanamori (1979). Moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, 84, 2348-2350.
- Hong, H., and K. Goda (2007). Orientation-dependent ground-motion measure for seismic-hazard assessment, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 97, no. 5, 1525–1538.
- Hong, H. P., A. D. García-Soto, and R. Gómez (2010). Impact of different earthquake types on the statistics of ductility demand, *J. Struct. Eng. ASCE* 136, no. 7, 770–780.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas (2008). MOC-2015 Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo. Recomendaciones y Comentarios, *Comisión Federal de Electricidad*.
- Jaimes, M. A., & Reinoso Angulo, E. (2006). Comparación del comportamiento de edificios en el valle de México ante sismos de subducción y de falla normal. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (75).
-

-
- Jaimes, M., E. Reinoso, and M. Ordaz (2006). Comparison of methods to predict response spectra at instrumented sites given the magnitude and distance of an earthquake, *J. Earthq. Eng.* 10, no. 6, 887–902.
- Jaimes, M. A., Reinoso, E., & Esteva, L. (2015). Risk analysis for structures exposed to several multi-hazard sources. *Journal of Earthquake Engineering*, **19**(2), 297-312.
- Jaimes, M. A., Ramirez-Gaytán, A., & Reinoso, E. (2015). Ground-motion prediction model from intermediate-depth intraslab earthquakes at the hill and lake-bed zones of Mexico City. *Journal of Earthquake Engineering*, *19*(8), 1260-1278.
- Jaimes, M. A., & Candia, G. (2018). Toppling of rigid electric equipment during earthquakes. *Engineering Structures*, 168, 229-242.
- Jaimes, M. A., & Ruiz-García, J. (2019). New vertical-to-horizontal ratio spectrum due to intraslab earthquakes for soft-soil sites of Mexico City. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 126, 105804.
- Joyner, W. B., and D. M. Boore (1993). Methods for regression analysis of strong-motion data, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 83, no. 2, 469–487.
- Núñez-Cornu, F., & Ponce, L. (1989). Zonas sísmicas de Oaxaca, México: Sismos máximos y tiempos de recurrencia para el período 1542-1988. *Geofísica Internacional*, 28(4).
- Ordaz, M., S. K. Singh, and A. Arciniega (1994). Bayesian attenuation regressions: An application to Mexico City, *Geophys. J. Int.* 117, no. 2, 335–344.
- Paz, K. (2007). Media aritmética simple. *Universidad Rafael Landívar*.
- Perea T, Esteva L (2004). Analysis of vertical ground motions of near source records in Mexico. Proceedings of the 13th. World conference on earthquake engineering, vancouver, Canada. paper 1852.
- Reyes, C. (1999). El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios, *Ph.D. Thesis*, UNAM, México.
- Stewart, J. P., D. M. Boore, E. Seyhan, and G. M. Atkinson (2016). NGA-West2 equations for predicting vertical-component PGA, PGV, and 5%-damped PSA from shallow crustal earthquakes, *Earthq. Spectra* 32, no. 2, 1005–1031.
- Tena-Colunga A, Mena-Hernández U, Pérez-Rocha LE, Avilés J, Ordaz M, Vilar JI (2009). Updated seismic design guidelines for model building code of Mexico, *Earthq Spectra*, 25(4), 869–898.
-

Anexo A: Periodos predominantes del suelo y estaciones acelerográficas

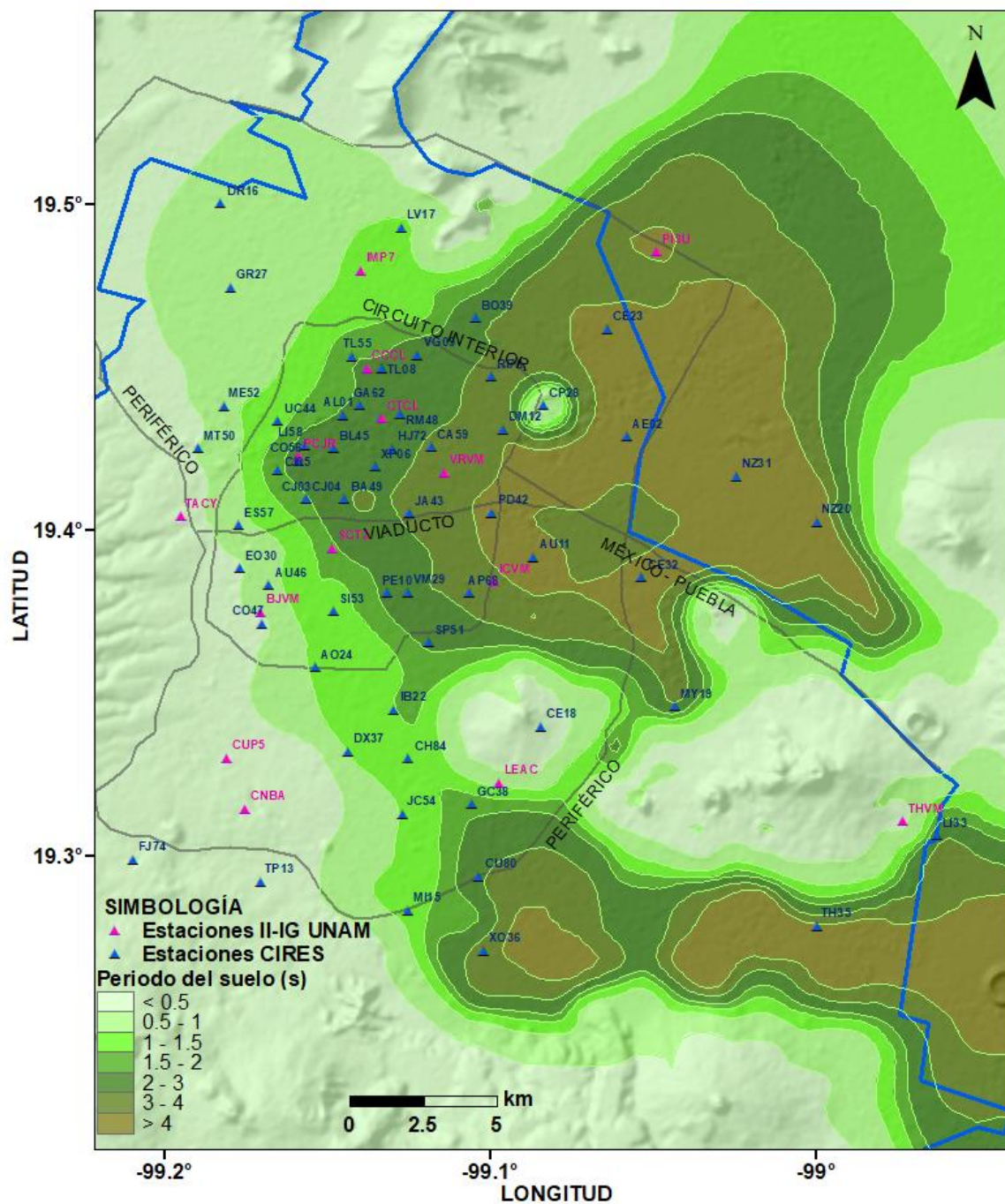


Figura A.1 Isoperiodos predominantes del suelo y estaciones acelerográficas

Anexo B: Espectros de relaciones V/H

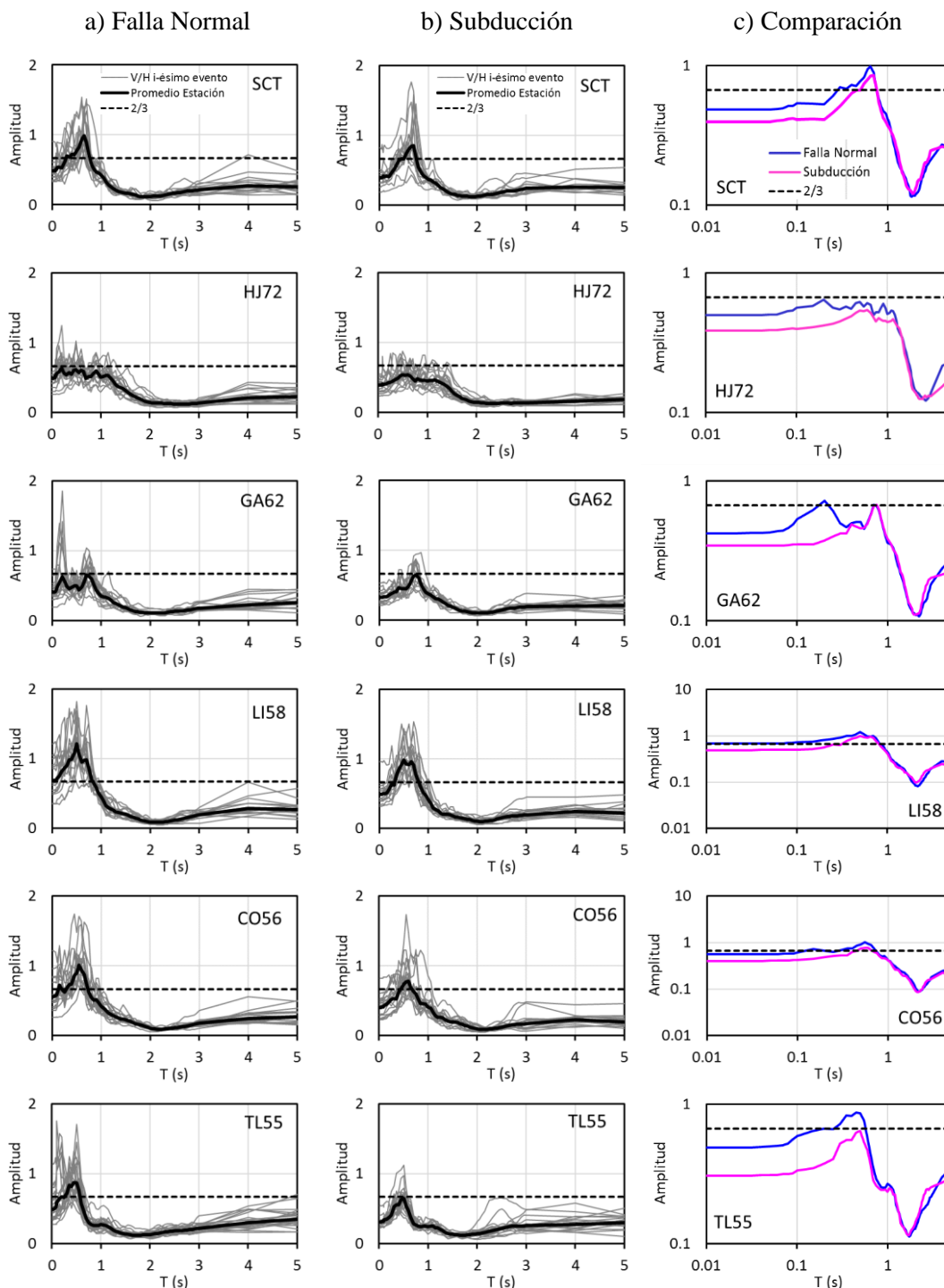


Figura B.1 Relación V/H para las estaciones dentro del grupo 3 (suelo blando).

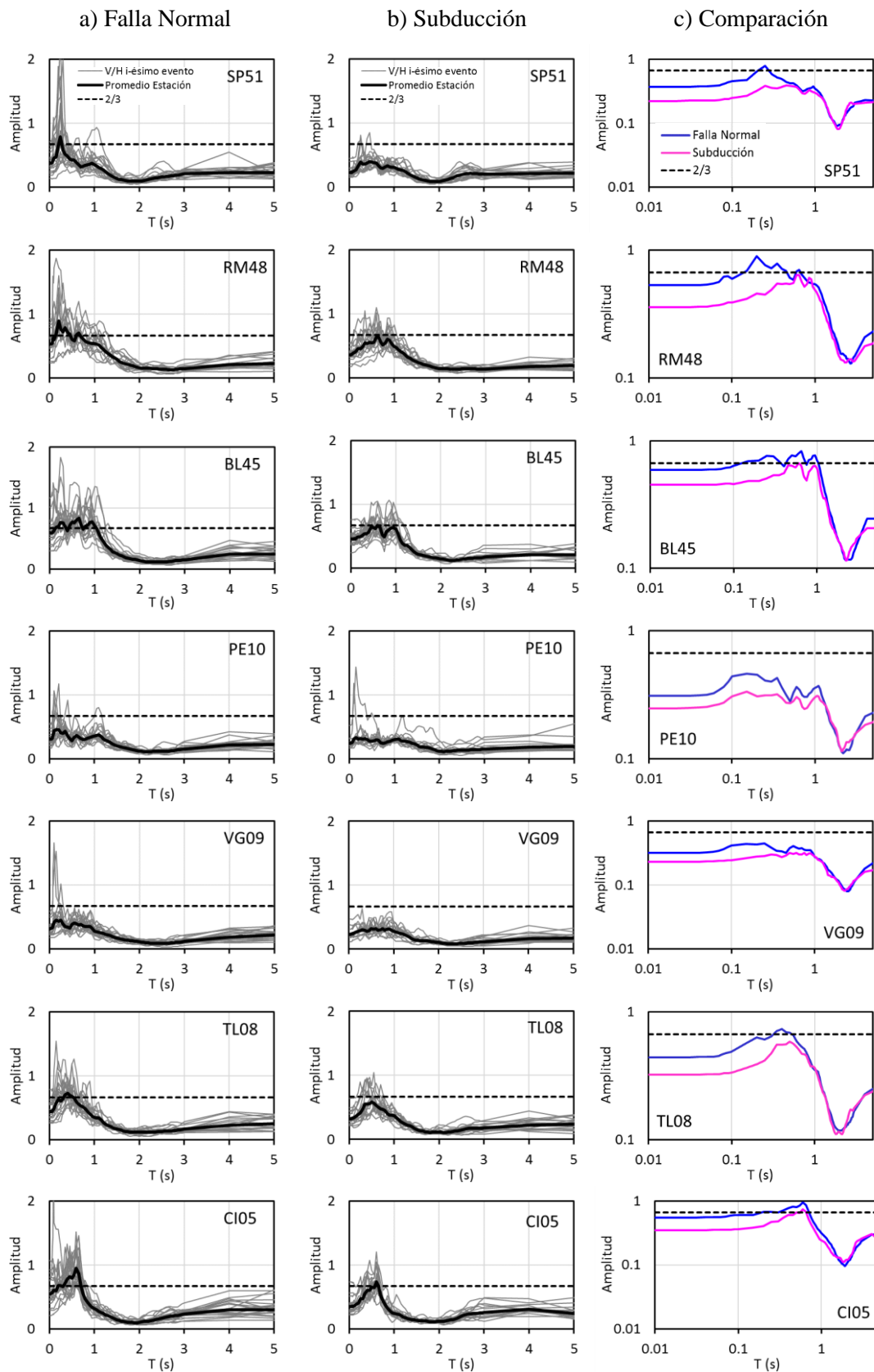


Figura B.1 Continuación.

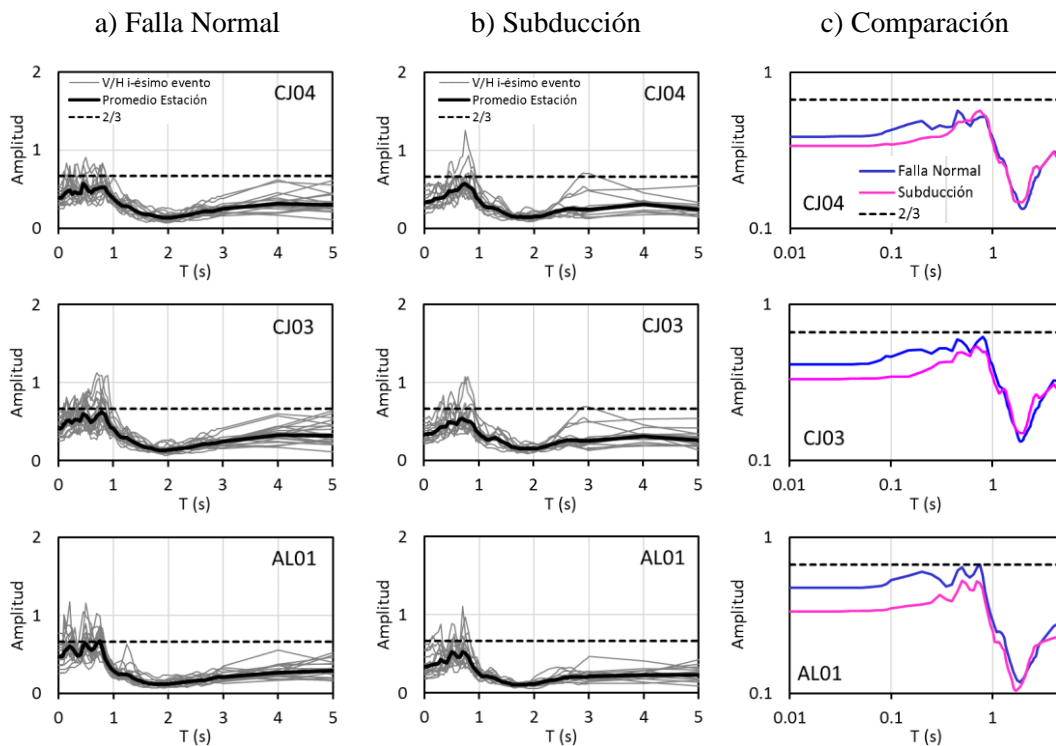


Figura B.1 Continuación.

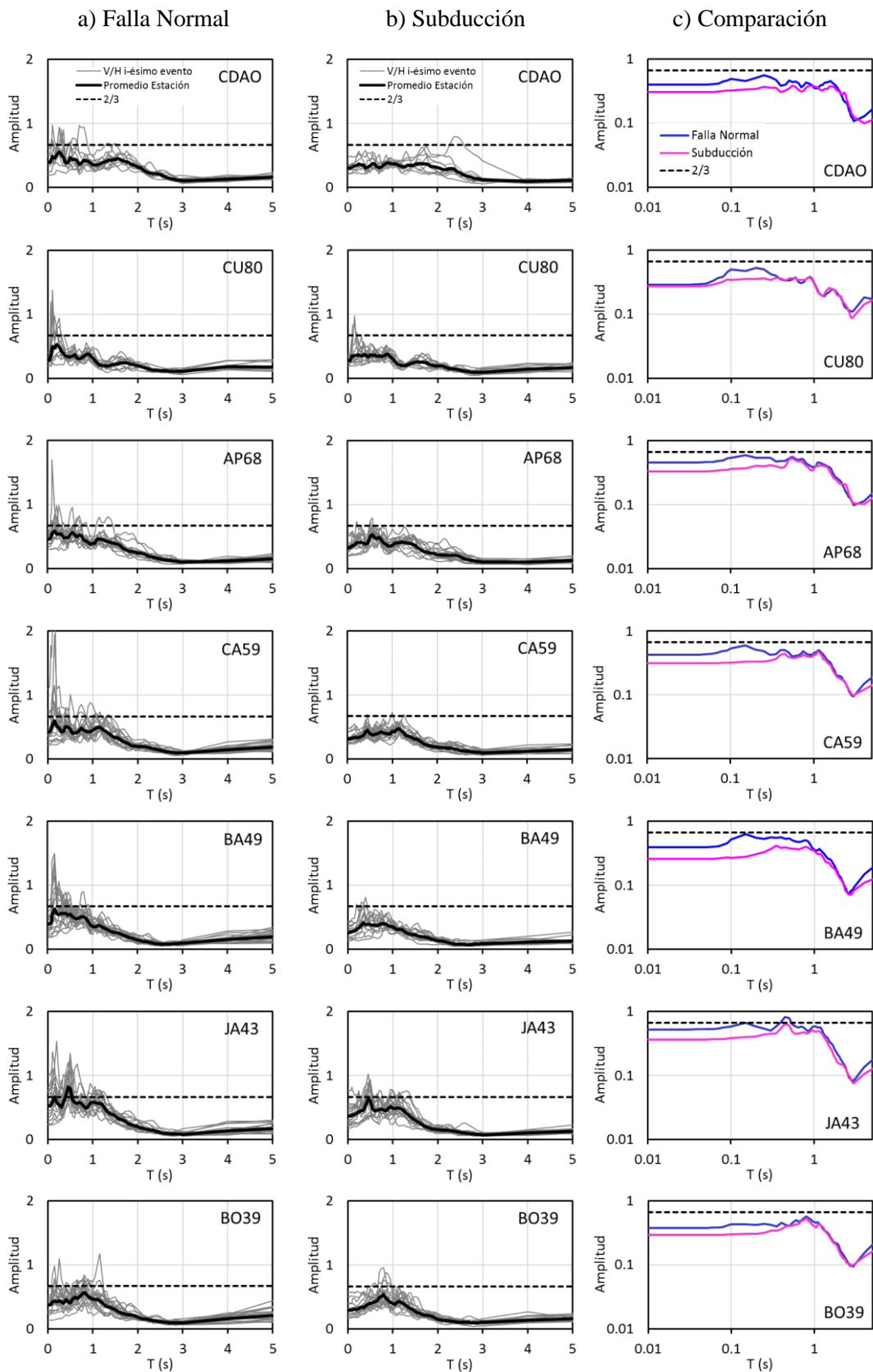


Figura B.2 Relación V/H para las estaciones dentro del grupo 4 (suelo blando).

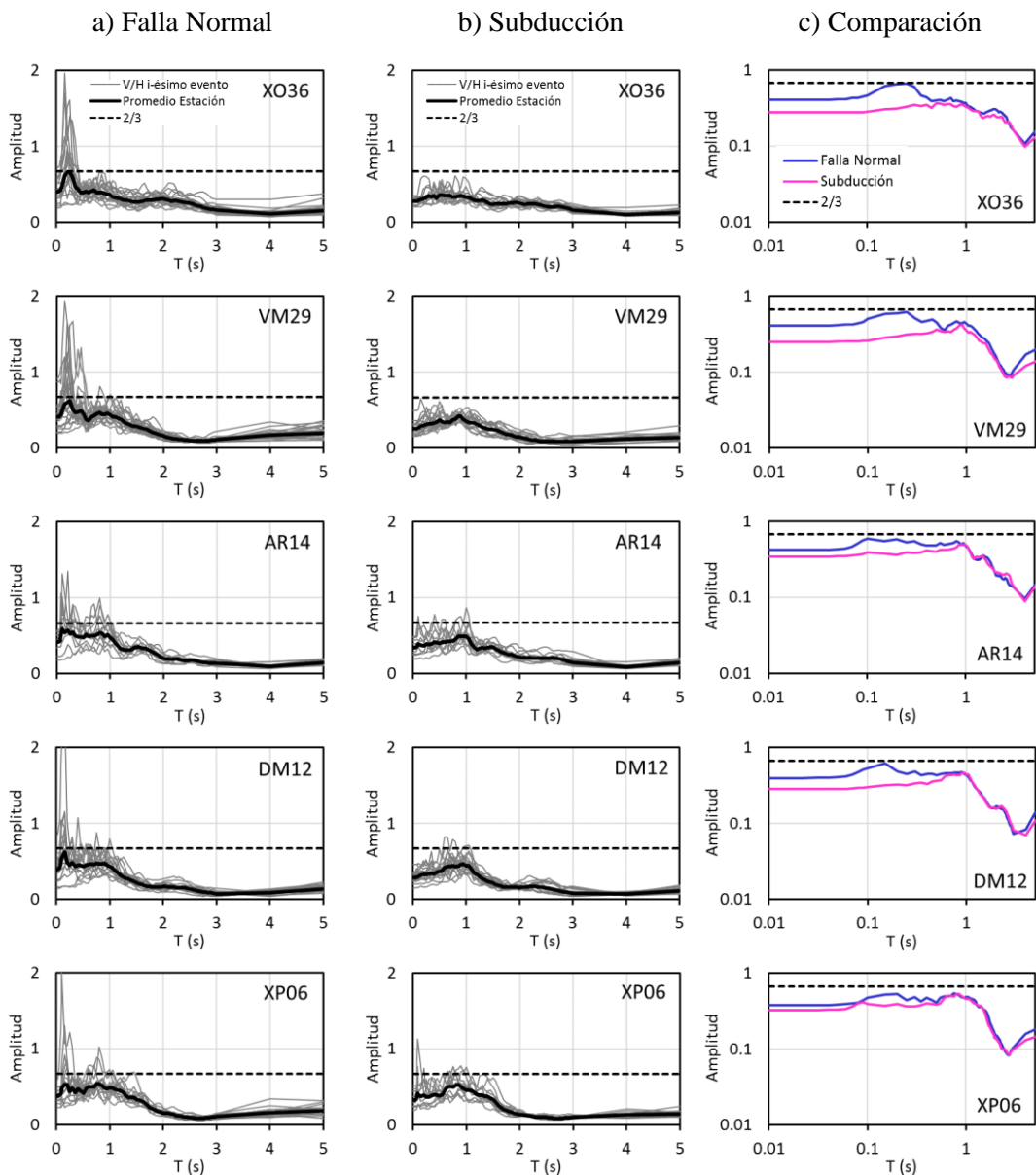


Figura B.2 Continuación.

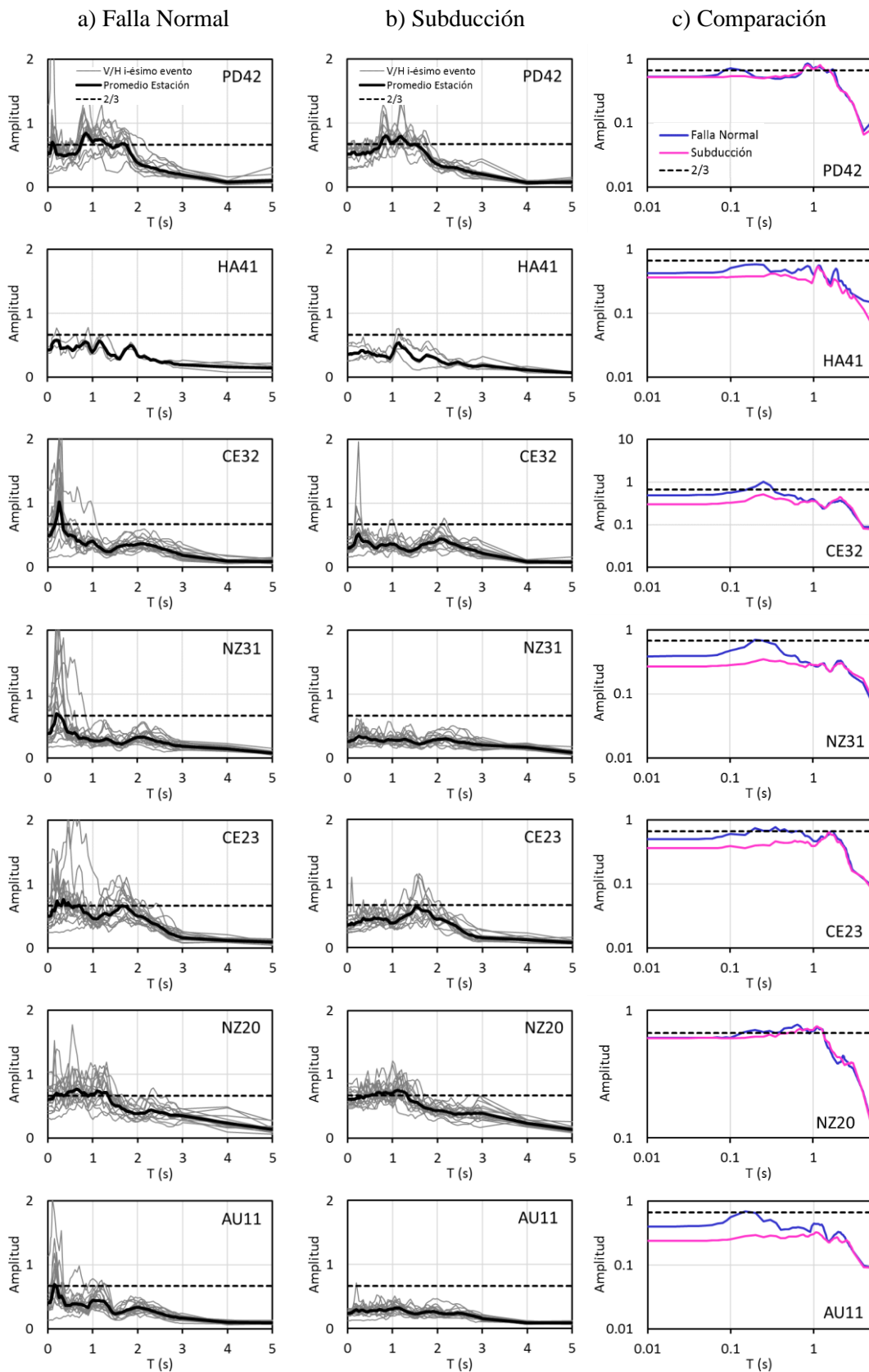


Figura B.3 Relación V/H para las estaciones dentro del grupo 5 (suelo blando).

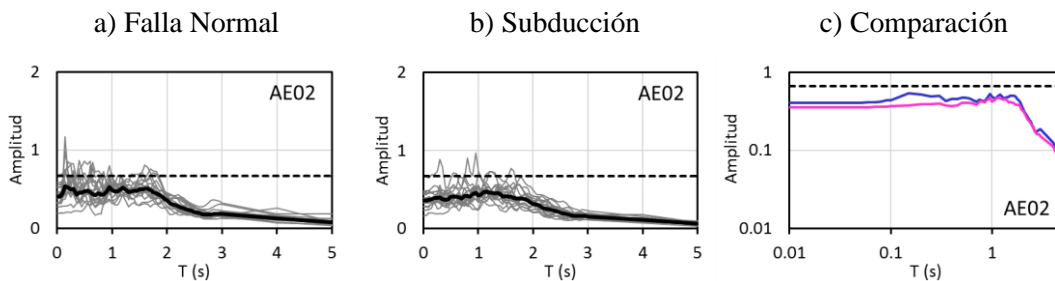


Figura B.3 Continuación.

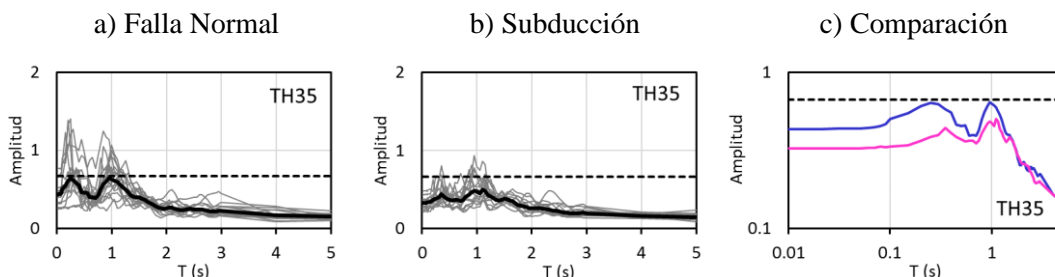


Figura B.4 Relación V/H para las estaciones dentro del grupo 6 (suelo blando).

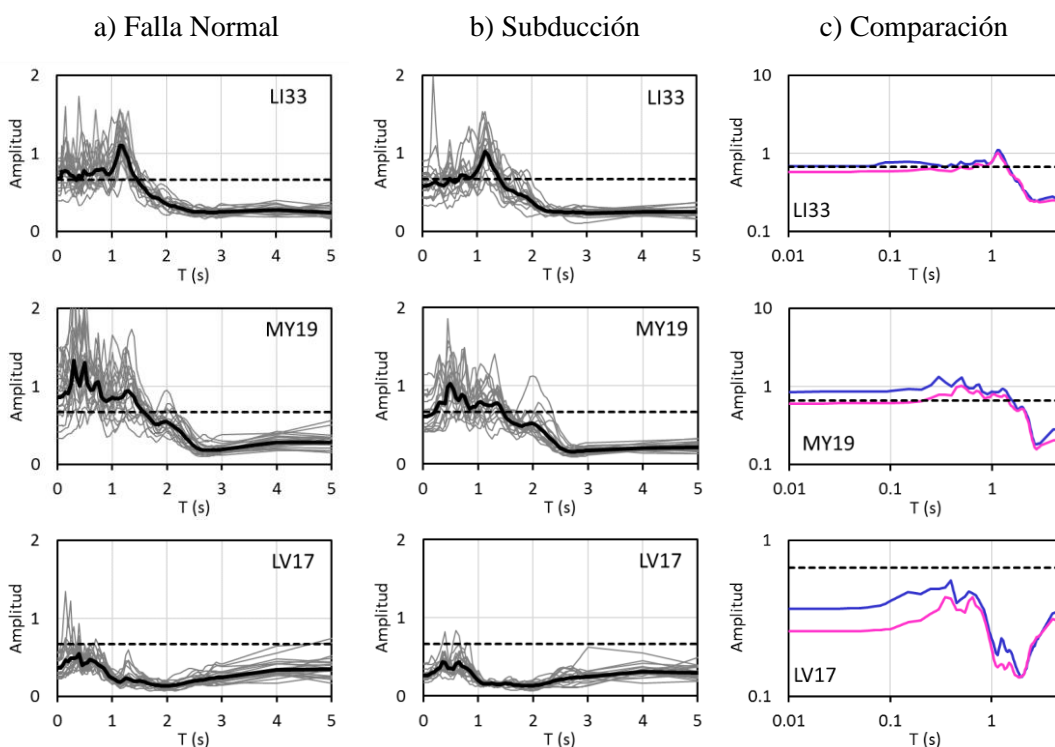


Figura B.5 Relación V/H para las estaciones dentro del grupo 7 (suelo blando).

Anexo C: Coeficientes de regresión para cinco estaciones acelerométricas

Tabla C.1 Coeficientes de regresión obtenidos para las componentes vertical, horizontal y la relación V/H - SCT; subducción.

T (s)	Vertical				Horizontal				V/H				
	α_1	α_2	α_4	σ	β_1	β_2	β_4	σ	γ_1	γ_2	γ_3	σ	$\rho_{\ln V, \ln H}$
0.01	-1.4806	1.1188	-0.0044	0.27	-2.4412	1.3951	-0.0043	0.22	0.9616	-0.2767	-0.0001	0.19	0.192
0.02	-1.4802	1.1187	-0.0044	0.27	-2.4411	1.3950	-0.0043	0.22	0.9619	-0.2767	-0.0001	0.19	0.192
0.04	-1.4807	1.1206	-0.0044	0.27	-2.4339	1.3946	-0.0043	0.22	0.9547	-0.2745	-0.0001	0.19	0.192
0.06	-1.4573	1.1072	-0.0041	0.28	-2.4156	1.3899	-0.0042	0.22	0.9555	-0.2822	0.0001	0.20	0.197
0.08	-1.4742	1.1097	-0.0040	0.26	-2.4380	1.3892	-0.0041	0.22	0.9611	-0.2789	0.0001	0.17	0.169
0.1	-1.3766	1.1073	-0.0042	0.28	-2.4744	1.4055	-0.0043	0.22	1.0968	-0.2977	0.0001	0.19	0.187
0.2	-1.2529	1.1326	-0.0048	0.28	-1.8592	1.3482	-0.0047	0.23	0.6083	-0.2162	-0.0001	0.18	0.180
0.3	-1.1401	1.1739	-0.0052	0.27	-2.0915	1.3834	-0.0046	0.22	0.9570	-0.2128	-0.0005	0.22	0.216
0.4	-0.5006	1.1245	-0.0052	0.30	-1.7310	1.3319	-0.0044	0.22	1.2474	-0.2116	-0.0008	0.21	0.207
0.5	0.3919	1.0230	-0.0052	0.24	-1.5808	1.3635	-0.0049	0.21	1.9753	-0.3418	-0.0002	0.18	0.180
0.6	0.6956	0.9583	-0.0036	0.30	-0.8820	1.2570	-0.0042	0.23	1.5526	-0.2962	0.0007	0.22	0.217
0.7	0.2177	1.0698	-0.0045	0.40	-1.5429	1.3631	-0.0047	0.27	1.7462	-0.2933	0.0002	0.29	0.285
0.8	0.3540	0.9991	-0.0049	0.33	-1.5279	1.3492	-0.0046	0.21	1.8856	-0.3518	-0.0003	0.22	0.222
0.9	-0.2948	1.0736	-0.0052	0.24	-1.1675	1.3081	-0.0047	0.22	0.8859	-0.2365	-0.0005	0.14	0.142
1	-0.9791	1.1780	-0.0054	0.24	-0.8187	1.2590	-0.0045	0.22	-0.1379	-0.0853	-0.0009	0.12	0.120
2	-4.2010	1.5687	-0.0048	0.32	-2.2276	1.5452	-0.0041	0.25	-1.9486	0.0203	-0.0008	0.18	0.175
3	-6.7532	1.9330	-0.0065	0.31	-4.3725	1.7064	-0.0049	0.34	-2.3476	0.2187	-0.0016	0.18	0.177
4	-7.2299	1.7148	-0.0030	0.24	-5.0732	1.6399	-0.0039	0.32	-2.1841	0.0789	0.0009	0.19	0.194
5	-8.3181	1.7595	-0.0023	0.23	-5.8687	1.5867	-0.0020	0.29	-2.4419	0.1714	-0.0003	0.20	0.203
PGA	-1.4804	1.1188	-0.0044	0.27	-2.4411	1.3950	-0.0043	0.22	0.9617	-0.2767	-0.0001	0.19	0.192
PGV	-4.7546	1.3052	-0.0036	0.24	-4.3819	1.4803	-0.0040	0.24	-0.3844	-0.1733	0.0004	0.15	0.147

Tabla C.2 Coeficientes de regresión obtenidos para las componentes vertical, horizontal y la relación V/H - SCT; profundidad intermedia.

T (s)	Vertical				Horizontal				V/H				
	α_1	α_2	α_4	σ	β_1	β_2	β_4	σ	γ_1	γ_2	γ_3	σ	$\rho_{\ln V, \ln H}$
0.01	0.7987	1.0994	-0.0025	0.25	0.3479	1.2676	-0.0021	0.30	0.4508	-0.1683	-0.0004	0.15	0.146
0.02	0.7990	1.0994	-0.0025	0.25	0.3481	1.2676	-0.0021	0.30	0.4508	-0.1683	-0.0004	0.15	0.146
0.04	0.8078	1.1004	-0.0025	0.25	0.3592	1.2677	-0.0021	0.30	0.4487	-0.1672	-0.0004	0.14	0.144
0.06	0.8482	1.0987	-0.0026	0.26	0.3889	1.2664	-0.0022	0.30	0.4593	-0.1678	-0.0004	0.14	0.144
0.08	0.9954	1.0920	-0.0026	0.27	0.4232	1.2680	-0.0022	0.30	0.5721	-0.1760	-0.0004	0.14	0.136
0.1	1.0446	1.1046	-0.0028	0.27	0.3818	1.2898	-0.0025	0.31	0.6628	-0.1851	-0.0003	0.17	0.170
0.2	1.1948	1.1879	-0.0043	0.32	1.2417	1.2540	-0.0036	0.35	-0.0468	-0.0661	-0.0006	0.18	0.175
0.3	1.5300	1.1466	-0.0038	0.28	0.7154	1.3074	-0.0032	0.31	0.8146	-0.1608	-0.0006	0.17	0.174
0.4	1.5655	1.1399	-0.0031	0.32	1.1868	1.2573	-0.0033	0.30	0.3787	-0.1174	0.0002	0.19	0.186
0.5	2.7231	0.9622	-0.0023	0.27	2.0377	1.1379	-0.0029	0.33	0.6854	-0.1757	0.0006	0.18	0.176
0.6	2.4349	1.0605	-0.0022	0.25	2.1625	1.1332	-0.0026	0.31	0.2724	-0.0727	0.0005	0.16	0.157
0.7	2.2738	1.0070	-0.0014	0.31	1.7528	1.1560	-0.0025	0.24	0.5210	-0.1490	0.0011	0.21	0.210
0.8	0.9945	1.1384	-0.0016	0.22	0.9440	1.2657	-0.0024	0.23	0.0505	-0.1273	0.0007	0.16	0.161
0.9	0.8425	1.1367	-0.0019	0.21	1.1262	1.1994	-0.0016	0.26	-0.2837	-0.0627	-0.0003	0.20	0.205
1	0.2085	1.2353	-0.0023	0.25	0.6621	1.2717	-0.0015	0.26	-0.4537	-0.0364	-0.0008	0.13	0.133
2	-1.7214	1.3662	-0.0013	0.28	-0.6047	1.5157	-0.0010	0.41	-1.1167	-0.1494	-0.0003	0.18	0.184
3	-4.7136	1.6800	-0.0006	0.31	-3.0529	1.6629	-0.0006	0.38	-1.6607	0.0171	0.0000	0.19	0.191
4	-6.1301	1.8228	-0.0005	0.36	-4.2726	1.7470	-0.0007	0.37	-1.8575	0.0758	0.0001	0.28	0.277
5	-7.3977	1.9458	-0.0007	0.34	-5.0545	1.7898	-0.0005	0.37	-2.3433	0.1561	-0.0002	0.25	0.252
PGA	0.7988	1.0994	-0.0025	0.25	0.3480	1.2676	-0.0021	0.30	0.4509	-0.1683	-0.0004	0.15	0.146
PGV	-3.2019	1.3694	-0.0018	0.23	-2.5430	1.4317	-0.0010	0.33	-0.6589	-0.0623	-0.0008	0.22	0.221

Tabla C.3 Coeficientes de regresión obtenidos para las componentes vertical, horizontal y la relación V/H - CDAO; subducción.

T (s)	Vertical				Horizontal				V/H				
	α_1	α_2	α_4	σ	β_1	β_2	β_4	σ	γ_1	γ_2	γ_3	σ	$\rho_{\ln V, \ln H}$
0.01	-0.8092	1.0509	-0.0052	0.21	0.5682	0.9190	-0.0030	0.18	-1.3133	0.1215	-0.0022	0.15	0.148
0.02	-0.8091	1.0509	-0.0052	0.21	0.5683	0.9190	-0.0030	0.18	-1.3133	0.1215	-0.0022	0.15	0.148
0.04	-0.7819	1.0476	-0.0052	0.21	0.5753	0.9183	-0.0030	0.18	-1.2931	0.1190	-0.0022	0.15	0.148
0.06	-0.7496	1.0436	-0.0052	0.21	0.5865	0.9170	-0.0030	0.18	-1.2723	0.1163	-0.0022	0.15	0.149
0.08	-0.6775	1.0376	-0.0052	0.20	0.5761	0.9206	-0.0031	0.18	-1.1902	0.1067	-0.0022	0.14	0.140
0.1	-0.5866	1.0347	-0.0054	0.21	0.5951	0.9208	-0.0031	0.19	-1.1152	0.1028	-0.0023	0.14	0.139
0.2	0.0474	0.9926	-0.0059	0.21	0.7789	0.9067	-0.0032	0.18	-0.6523	0.0726	-0.0027	0.16	0.157
0.3	0.0795	0.9830	-0.0057	0.21	0.7773	0.9171	-0.0033	0.17	-0.6276	0.0542	-0.0024	0.16	0.156
0.4	-0.4121	1.1089	-0.0066	0.27	1.2340	0.9169	-0.0041	0.18	-1.5739	0.1813	-0.0025	0.19	0.186
0.5	0.6125	0.9560	-0.0060	0.21	1.7655	0.8504	-0.0040	0.17	-1.0940	0.0949	-0.0020	0.15	0.152
0.6	1.5818	0.8109	-0.0055	0.26	2.4049	0.7732	-0.0041	0.17	-0.7817	0.0308	-0.0014	0.14	0.139
0.7	0.7952	0.8713	-0.0041	0.24	2.9795	0.7464	-0.0045	0.17	-2.1956	0.1277	0.0003	0.16	0.159
0.8	1.0569	0.8701	-0.0048	0.23	1.3538	0.9828	-0.0048	0.19	-0.2993	-0.1118	0.0001	0.10	0.102
0.9	1.4243	0.8225	-0.0043	0.25	2.3401	0.7936	-0.0037	0.20	-0.8970	0.0260	-0.0007	0.12	0.118
1	2.0114	0.7709	-0.0046	0.23	2.6969	0.7550	-0.0034	0.17	-0.6501	0.0096	-0.0012	0.09	0.088
2	-0.7576	1.0709	-0.0038	0.21	1.4386	0.7886	-0.0013	0.26	-2.1209	0.2688	-0.0025	0.17	0.174
3	-3.5497	1.5064	-0.0051	0.37	0.9549	0.9221	-0.0005	0.28	-4.3702	0.5617	-0.0046	0.22	0.217
4	-5.0522	1.5133	-0.0038	0.29	-2.6804	1.5031	-0.0039	0.36	-2.3737	0.0104	0.0001	0.15	0.150
5	-6.2093	1.5860	-0.0043	0.33	-3.6357	1.4360	-0.0026	0.33	-2.5225	0.1405	-0.0017	0.19	0.192
PGA	-0.8092	1.0509	-0.0052	0.21	0.5683	0.9190	-0.0030	0.18	-1.3134	0.1215	-0.0022	0.15	0.148
PGV	-3.7892	1.2483	-0.0045	0.28	-1.7256	1.0635	-0.0020	0.24	-1.9898	0.1718	-0.0025	0.17	0.166

Tabla C.4 Coeficientes de regresión obtenidos para las componentes vertical, horizontal y la relación V/H - CDAO; profundidad intermedia.

T (s)	Vertical				Horizontal				V/H				
	α_1	α_2	α_4	σ	β_1	β_2	β_4	σ	γ_1	γ_2	γ_3	σ	$\rho_{\ln V, \ln H}$
0.01	1.1603	1.0166	-0.0024	0.40	-0.8040	1.4648	-0.0020	0.36	1.9672	-0.4487	-0.0004	0.16	0.162
0.02	1.1604	1.0166	-0.0024	0.40	-0.8038	1.4648	-0.0020	0.36	1.9670	-0.4487	-0.0004	0.16	0.162
0.04	1.2315	1.0062	-0.0024	0.40	-0.7751	1.4609	-0.0020	0.36	2.0092	-0.4552	-0.0004	0.16	0.162
0.06	1.3888	0.9851	-0.0024	0.40	-0.7029	1.4494	-0.0020	0.36	2.0944	-0.4648	-0.0004	0.16	0.163
0.08	1.9343	0.9326	-0.0028	0.41	-0.6204	1.4386	-0.0020	0.36	2.5603	-0.5070	-0.0008	0.16	0.164
0.1	1.8688	0.9802	-0.0032	0.41	-0.5580	1.4367	-0.0021	0.36	2.4340	-0.4578	-0.0011	0.18	0.176
0.2	-0.1246	1.3876	-0.0042	0.45	0.3944	1.3605	-0.0029	0.40	-0.5124	0.0261	-0.0013	0.17	0.169
0.3	2.4574	0.9611	-0.0037	0.51	0.9607	1.2598	-0.0025	0.42	1.5034	-0.2998	-0.0012	0.20	0.200
0.4	2.2895	0.9784	-0.0032	0.43	1.3715	1.2900	-0.0034	0.38	0.9148	-0.3110	0.0002	0.14	0.143
0.5	2.7221	0.9733	-0.0036	0.42	1.5598	1.2586	-0.0031	0.36	1.1649	-0.2856	-0.0005	0.16	0.156
0.6	3.6447	0.7427	-0.0018	0.30	1.5899	1.1943	-0.0016	0.28	2.0552	-0.4516	-0.0001	0.13	0.126
0.7	1.0670	1.1298	-0.0016	0.33	-0.0909	1.5071	-0.0022	0.31	1.1508	-0.3759	0.0006	0.29	0.289
0.8	0.8999	1.1467	-0.0019	0.30	0.3486	1.3588	-0.0015	0.31	0.5532	-0.2124	-0.0004	0.19	0.192
0.9	1.7101	0.9995	-0.0012	0.30	1.5373	1.1541	-0.0008	0.32	0.1766	-0.1554	-0.0004	0.14	0.143
1	1.9216	1.0027	-0.0012	0.32	2.1264	1.1256	-0.0009	0.29	-0.2014	-0.1235	-0.0003	0.14	0.142
2	-4.3979	1.8704	-0.0014	0.33	-2.1880	1.6298	0.0003	0.32	-2.1983	0.2385	-0.0017	0.07	0.072
3	-7.6203	2.2439	-0.0006	0.38	-5.6996	2.3381	-0.0016	0.32	-1.9274	-0.0930	0.0010	0.20	0.200
4	-9.0229	2.4113	-0.0022	0.39	-8.8854	2.7413	-0.0027	0.30	-0.1439	-0.3287	0.0005	0.14	0.136
5	-8.5088	2.2291	-0.0018	0.29	-8.4163	2.5247	-0.0023	0.26	-0.0963	-0.2949	0.0005	0.10	0.103
PGA	1.1604	1.0166	-0.0024	0.40	-0.8038	1.4648	-0.0020	0.36	1.9670	-0.4487	-0.0004	0.16	0.162
PGV	-4.7283	1.6408	-0.0019	0.34	-5.8437	2.0150	-0.0014	0.35	1.1200	-0.3751	-0.0004	0.13	0.133

Tabla C.5 Coeficientes de regresión obtenidos para las componentes vertical, horizontal y la relación V/H - JC54; subducción.

T (s)	Vertical				Horizontal				V/H				
	α_1	α_2	α_4	σ	β_1	β_2	β_4	σ	γ_1	γ_2	γ_3	σ	$\rho_{\ln V, \ln H}$
0.01	-0.3413	0.8701	-0.0047	0.26	1.3312	0.8694	-0.0049	0.25	-1.6724	0.0007	0.0001	0.15	0.152
0.02	-0.3410	0.8701	-0.0047	0.26	1.3312	0.8694	-0.0049	0.25	-1.6723	0.0007	0.0001	0.15	0.152
0.04	-0.3203	0.8680	-0.0047	0.26	1.3361	0.8690	-0.0049	0.25	-1.6564	-0.0010	0.0002	0.15	0.152
0.06	-0.2924	0.8623	-0.0046	0.25	1.3401	0.8691	-0.0049	0.25	-1.6324	-0.0068	0.0002	0.15	0.151
0.08	-0.1710	0.8512	-0.0047	0.25	1.3355	0.8683	-0.0048	0.25	-1.5065	-0.0171	0.0001	0.15	0.147
0.1	-0.1044	0.8416	-0.0046	0.24	1.3337	0.8715	-0.0048	0.24	-1.4381	-0.0299	0.0002	0.14	0.140
0.2	0.9223	0.7752	-0.0054	0.26	1.4865	0.8832	-0.0052	0.23	-0.5642	-0.1080	-0.0002	0.15	0.153
0.3	1.8460	0.7542	-0.0064	0.26	1.3682	0.8981	-0.0050	0.21	0.4777	-0.1439	-0.0015	0.16	0.160
0.4	1.2356	0.8828	-0.0069	0.30	1.7424	0.8749	-0.0052	0.22	-0.5068	0.0079	-0.0017	0.15	0.153
0.5	1.7879	0.7093	-0.0051	0.31	1.8170	0.8971	-0.0052	0.26	-0.0291	-0.1878	0.0001	0.15	0.154
0.6	1.3038	0.7350	-0.0045	0.31	2.0260	0.8727	-0.0051	0.25	-0.7222	-0.1377	0.0006	0.14	0.143
0.7	1.1724	0.7852	-0.0050	0.29	1.9355	0.8728	-0.0045	0.23	-0.7631	-0.0876	-0.0005	0.13	0.133
0.8	0.6861	0.8393	-0.0043	0.25	2.5023	0.8490	-0.0049	0.25	-1.8162	-0.0097	0.0006	0.13	0.126
0.9	0.1259	0.9039	-0.0039	0.23	2.4722	0.9084	-0.0052	0.24	-2.3463	-0.0046	0.0013	0.17	0.169
1	-0.5365	1.0266	-0.0043	0.26	2.8430	0.8578	-0.0046	0.27	-3.3795	0.1687	0.0003	0.20	0.199
2	-3.1863	1.3350	-0.0046	0.43	-1.1146	1.2543	-0.0052	0.33	-2.0716	0.0807	0.0005	0.24	0.244
3	-4.9177	1.5077	-0.0040	0.40	-3.0427	1.4238	-0.0042	0.39	-1.8749	0.0838	0.0002	0.19	0.189
4	-6.1008	1.5603	-0.0032	0.35	-4.1177	1.4408	-0.0035	0.39	-1.9832	0.1194	0.0003	0.15	0.148
5	-6.0800	1.4596	-0.0029	0.40	-5.5516	1.5139	-0.0022	0.35	-0.5284	-0.0543	-0.0006	0.20	0.201
PGA	-0.3410	0.8701	-0.0047	0.26	1.3312	0.8694	-0.0049	0.25	-1.6723	0.0007	0.0001	0.15	0.152
PGV	-4.4602	1.2134	-0.0040	0.30	-1.3973	1.0300	-0.0048	0.27	-3.0630	0.1834	0.0007	0.16	0.155

Tabla C.6 Coeficientes de regresión obtenidos para las componentes vertical, horizontal y la relación V/H - JC54; profundidad intermedia.

T (s)	Vertical				Horizontal				V/H				
	α_1	α_2	α_4	σ	β_1	β_2	β_4	σ	γ_1	γ_2	γ_3	σ	$\rho_{\ln V, \ln H}$
0.01	-1.0590	1.4560	-0.0049	0.34	-0.7253	1.5400	-0.0036	0.33	-0.3337	-0.0840	-0.0013	0.21	0.209
0.02	-1.0589	1.4560	-0.0049	0.34	-0.7253	1.5400	-0.0036	0.33	-0.3337	-0.0840	-0.0013	0.21	0.209
0.04	-1.0495	1.4573	-0.0049	0.34	-0.7140	1.5396	-0.0036	0.33	-0.3355	-0.0822	-0.0013	0.21	0.211
0.06	-0.9932	1.4542	-0.0049	0.34	-0.6843	1.5373	-0.0036	0.33	-0.3089	-0.0831	-0.0013	0.21	0.214
0.08	-0.8618	1.4436	-0.0049	0.35	-0.6322	1.5336	-0.0037	0.33	-0.2297	-0.0901	-0.0012	0.23	0.230
0.1	-0.5264	1.4145	-0.0050	0.41	-0.5351	1.5269	-0.0037	0.32	0.0087	-0.1123	-0.0013	0.28	0.276
0.2	-0.4175	1.4825	-0.0057	0.37	0.2230	1.5262	-0.0049	0.37	-0.6405	-0.0437	-0.0008	0.14	0.142
0.3	-0.5847	1.6043	-0.0059	0.34	0.0480	1.5034	-0.0042	0.28	-0.6327	0.1009	-0.0017	0.21	0.210
0.4	-0.0742	1.4640	-0.0048	0.37	0.3975	1.4648	-0.0040	0.32	-0.4717	-0.0008	-0.0008	0.18	0.176
0.5	-0.0740	1.4163	-0.0042	0.32	0.9368	1.3913	-0.0034	0.31	-1.0107	0.0251	-0.0008	0.13	0.131
0.6	0.1779	1.3237	-0.0038	0.35	0.4802	1.4556	-0.0034	0.30	-0.3023	-0.1319	-0.0003	0.16	0.165
0.7	-0.3643	1.3625	-0.0033	0.27	0.2170	1.4927	-0.0033	0.31	-0.5814	-0.1302	0.0000	0.17	0.174
0.8	-0.9909	1.4322	-0.0028	0.29	-0.0625	1.5502	-0.0029	0.30	-0.9284	-0.1180	0.0001	0.17	0.168
0.9	-1.9727	1.5820	-0.0028	0.32	-0.2410	1.6130	-0.0029	0.33	-1.7317	-0.0311	0.0001	0.16	0.158
1	-2.0328	1.5814	-0.0029	0.30	-0.1326	1.6206	-0.0028	0.35	-1.9002	-0.0392	-0.0001	0.17	0.175
2	-5.1542	1.9163	-0.0024	0.34	-3.4019	1.8248	-0.0021	0.36	-1.7523	0.0915	-0.0003	0.24	0.237
3	-5.9370	1.8580	-0.0001	0.36	-5.5886	2.0147	-0.0016	0.35	-0.3484	-0.1567	0.0015	0.21	0.213
4	-6.5472	1.8956	-0.0006	0.39	-6.2567	2.0574	-0.0020	0.36	-0.2904	-0.1619	0.0014	0.22	0.219
5	-7.1255	1.9039	-0.0005	0.36	-7.1865	2.1406	-0.0018	0.36	0.0610	-0.2367	0.0012	0.21	0.214
PGA	-1.0589	1.4560	-0.0049	0.34	-0.7253	1.5400	-0.0036	0.33	-0.3336	-0.0840	-0.0013	0.21	0.209
PGV	-4.7515	1.6108	-0.0030	0.33	-3.7636	1.6978	-0.0029	0.32	-0.9879	-0.0870	0.0000	0.21	0.215

Tabla C.7 Coeficientes de regresión obtenidos para las componentes vertical, horizontal y la relación V/H - CH84; subducción.

T (s)	Vertical				Horizontal				V/H				
	α_1	α_2	α_4	σ	β_1	β_2	β_4	σ	γ_1	γ_2	γ_3	σ	$\rho_{\ln V, \ln H}$
0.01	-0.2917	0.8955	-0.0049	0.19	1.8341	0.7625	-0.0043	0.27	-2.1257	0.1330	-0.0006	0.17	0.173
0.02	-0.2915	0.8955	-0.0049	0.19	1.8342	0.7625	-0.0043	0.27	-2.1257	0.1330	-0.0006	0.17	0.173
0.04	-0.2691	0.8926	-0.0048	0.19	1.8365	0.7625	-0.0043	0.27	-2.1056	0.1301	-0.0006	0.17	0.172
0.06	-0.2084	0.8809	-0.0047	0.19	1.8372	0.7622	-0.0043	0.27	-2.0456	0.1187	-0.0005	0.17	0.167
0.08	-0.0349	0.8569	-0.0047	0.19	1.8317	0.7631	-0.0042	0.27	-1.8666	0.0938	-0.0004	0.16	0.162
0.1	-0.0634	0.8685	-0.0047	0.18	1.8675	0.7587	-0.0042	0.27	-1.9309	0.1098	-0.0005	0.15	0.150
0.2	1.4296	0.7533	-0.0058	0.22	2.0792	0.7539	-0.0045	0.26	-0.6497	-0.0005	-0.0012	0.18	0.181
0.3	2.2706	0.7452	-0.0066	0.29	2.3605	0.7336	-0.0047	0.27	-0.0899	0.0116	-0.0018	0.16	0.163
0.4	2.2228	0.7291	-0.0061	0.21	2.8480	0.6881	-0.0047	0.23	-0.6252	0.0409	-0.0014	0.14	0.145
0.5	1.9015	0.7725	-0.0061	0.27	2.6203	0.7554	-0.0049	0.26	-0.7188	0.0171	-0.0012	0.17	0.172
0.6	0.8256	0.8008	-0.0047	0.22	2.4424	0.7348	-0.0044	0.26	-1.6168	0.0660	-0.0003	0.19	0.190
0.7	1.1651	0.7609	-0.0050	0.24	2.2967	0.7705	-0.0046	0.25	-1.1317	-0.0096	-0.0004	0.17	0.165
0.8	0.8835	0.7993	-0.0047	0.23	2.6057	0.7268	-0.0042	0.24	-1.7222	0.0724	-0.0005	0.18	0.180
0.9	1.5643	0.7134	-0.0048	0.21	2.6917	0.7394	-0.0043	0.25	-1.1274	-0.0260	-0.0005	0.14	0.138
1	0.9066	0.8385	-0.0054	0.26	3.1666	0.6978	-0.0043	0.25	-2.2600	0.1407	-0.0011	0.16	0.161
2	-2.5867	1.2859	-0.0050	0.35	0.8429	0.9674	-0.0045	0.28	-3.4296	0.3185	-0.0005	0.27	0.273
3	-4.4279	1.4242	-0.0034	0.32	-1.5679	1.2403	-0.0044	0.33	-2.8601	0.1838	0.0010	0.19	0.194
4	-5.4790	1.4457	-0.0024	0.31	-2.1880	1.1660	-0.0035	0.34	-3.2909	0.2797	0.0010	0.12	0.123
5	-5.4642	1.3847	-0.0030	0.35	-3.4927	1.2218	-0.0022	0.32	-1.9716	0.1629	-0.0008	0.25	0.248
PGA	-0.2916	0.8955	-0.0049	0.19	1.8341	0.7625	-0.0043	0.27	-2.1257	0.1330	-0.0006	0.17	0.173
PGV	-4.0357	1.1533	-0.0041	0.27	-0.3988	0.8577	-0.0038	0.27	-3.6370	0.2956	-0.0002	0.19	0.190

Tabla C.8 Coeficientes de regresión obtenidos para las componentes vertical, horizontal y la relación V/H - CH84; profundidad intermedia.

T (s)	Vertical				Horizontal				V/H				
	α_1	α_2	α_4	σ	β_1	β_2	β_4	σ	γ_1	γ_2	γ_3	σ	$\rho_{\ln V, \ln H}$
0.01	-0.6029	1.4607	-0.0060	0.35	-0.2390	1.4497	-0.0035	0.32	-0.3639	0.0111	-0.0024	0.25	0.250
0.02	-0.6028	1.4607	-0.0060	0.35	-0.2389	1.4497	-0.0035	0.32	-0.3639	0.0111	-0.0024	0.25	0.250
0.04	-0.5731	1.4586	-0.0060	0.35	-0.2319	1.4503	-0.0036	0.32	-0.3412	0.0083	-0.0024	0.25	0.248
0.06	-0.4521	1.4430	-0.0060	0.35	-0.2179	1.4516	-0.0036	0.32	-0.2341	-0.0085	-0.0023	0.24	0.242
0.08	-0.4795	1.4664	-0.0062	0.35	-0.1893	1.4531	-0.0037	0.32	-0.2902	0.0133	-0.0025	0.24	0.239
0.1	-0.0537	1.4265	-0.0065	0.38	-0.0431	1.4326	-0.0037	0.32	-0.0106	-0.0060	-0.0028	0.26	0.261
0.2	0.2682	1.4725	-0.0068	0.40	0.6325	1.4401	-0.0051	0.37	-0.3642	0.0324	-0.0017	0.20	0.202
0.3	0.3602	1.5561	-0.0069	0.39	0.3761	1.4597	-0.0044	0.32	-0.0159	0.0965	-0.0025	0.18	0.181
0.4	0.8698	1.3708	-0.0053	0.38	1.1483	1.3803	-0.0045	0.39	-0.2786	-0.0095	-0.0007	0.17	0.168
0.5	0.4528	1.3799	-0.0048	0.35	1.2701	1.3504	-0.0042	0.34	-0.8173	0.0295	-0.0006	0.14	0.144
0.6	0.4469	1.3113	-0.0043	0.32	0.5819	1.3955	-0.0035	0.30	-0.1350	-0.0842	-0.0008	0.24	0.236
0.7	-0.2939	1.3634	-0.0038	0.27	0.1479	1.4436	-0.0033	0.28	-0.4418	-0.0803	-0.0005	0.20	0.205
0.8	-0.4017	1.3424	-0.0032	0.25	-0.2085	1.5110	-0.0034	0.27	-0.1933	-0.1686	0.0001	0.19	0.186
0.9	0.1457	1.1908	-0.0018	0.32	-0.1302	1.4925	-0.0028	0.31	0.2760	-0.3017	0.0011	0.17	0.174
1	-0.7760	1.3743	-0.0027	0.26	0.1051	1.4676	-0.0024	0.30	-0.8811	-0.0932	-0.0003	0.21	0.207
2	-3.5856	1.6069	-0.0008	0.31	-2.8506	1.8118	-0.0028	0.36	-0.7350	-0.2048	0.0020	0.35	0.348
3	-4.2772	1.6159	-0.0004	0.34	-4.3838	1.8514	-0.0018	0.37	0.1066	-0.2355	0.0014	0.24	0.242
4	-5.4026	1.7050	0.0001	0.34	-5.1662	1.8935	-0.0015	0.37	-0.2364	-0.1885	0.0016	0.22	0.225
5	-6.3207	1.7611	0.0001	0.38	-6.1792	2.0035	-0.0017	0.38	-0.1415	-0.2424	0.0018	0.27	0.274
PGA	-0.6028	1.4607	-0.0060	0.35	-0.2389	1.4497	-0.0035	0.32	-0.3639	0.0111	-0.0024	0.25	0.250
PGV	-3.8460	1.4948	-0.0031	0.31	-3.4202	1.6580	-0.0030	0.32	-0.4257	-0.1632	-0.0002	0.24	0.241

Anexo D: Comparación de métodos para cinco estaciones acelerométricas

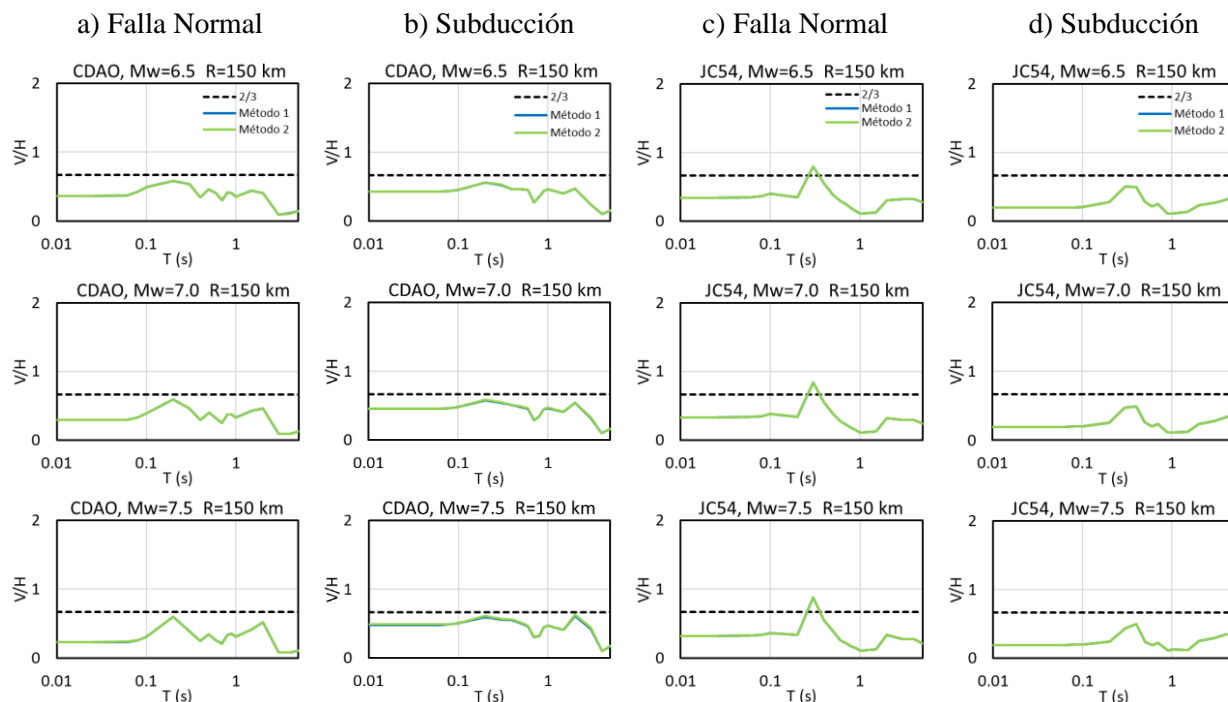


Figura D.1 Comparación entre métodos para la estimación de la relación V/H manteniendo una distancia constante $R = 150$ km, con magnitudes de $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para las estaciones: CDAO (incisos a y b) y JC54 (incisos c y d).

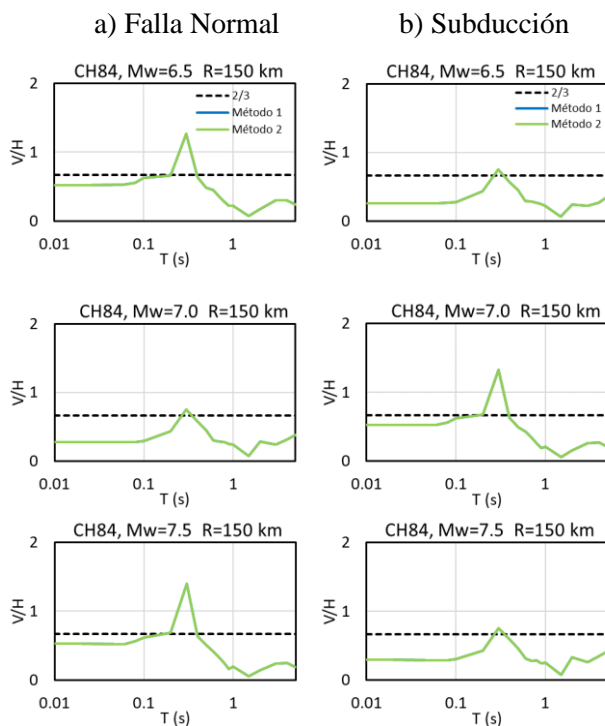


Figura D.2 Comparación entre métodos para la estimación de la relación V/H manteniendo una distancia constante $R = 150$ km, con magnitudes de $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para la estación CH84.

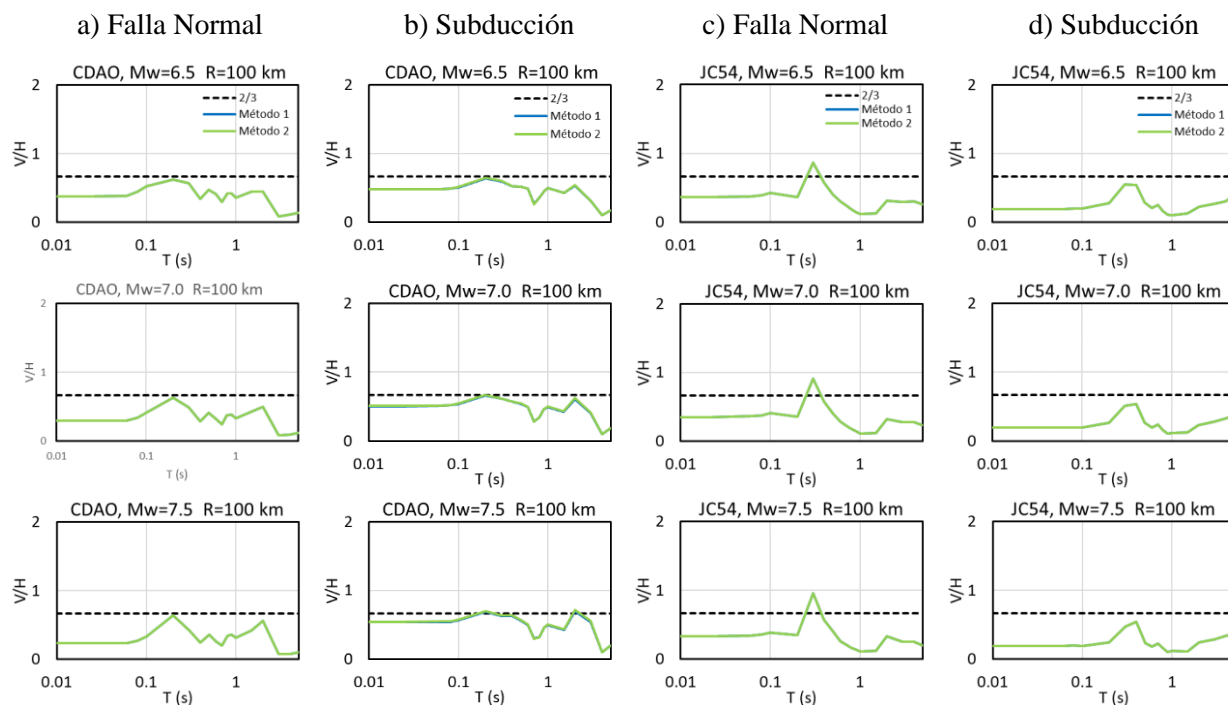


Figura D.3 Comparación entre métodos para la estimación de la relación V/H manteniendo una distancia constante $R = 100$ km, con magnitudes de $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para las estaciones: CDAO (incisos a y b) y JC54 (incisos c y d).

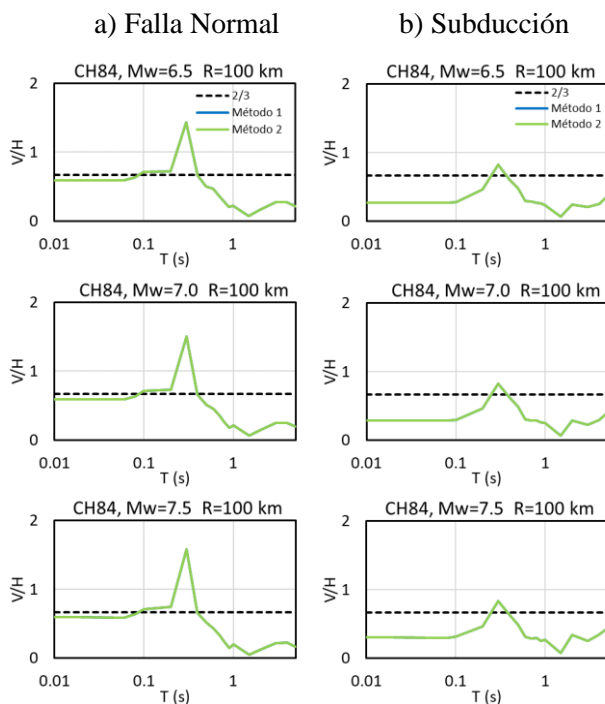


Figura D.4 Comparación entre métodos para la estimación de la relación V/H manteniendo una distancia constante $R = 100$ km, con magnitudes de $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para la estación CH84.

Anexo E: Relación V/H estimada en función de distancia (R) para cinco estaciones acelerométricas

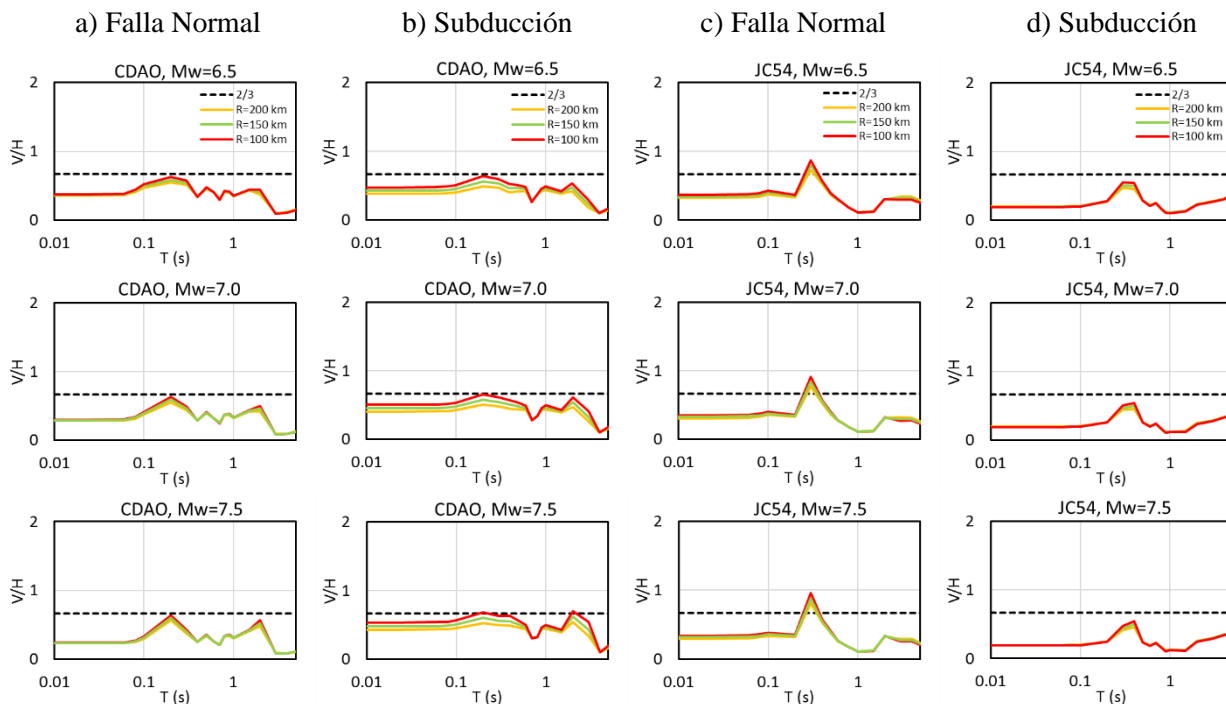


Figura E.1 Estimación de la relación V/H dadas distancias $R = 100, 150$ y 200 km, con magnitudes de $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para las estaciones: CDAO (incisos a y b) y JC54 (incisos c y d).

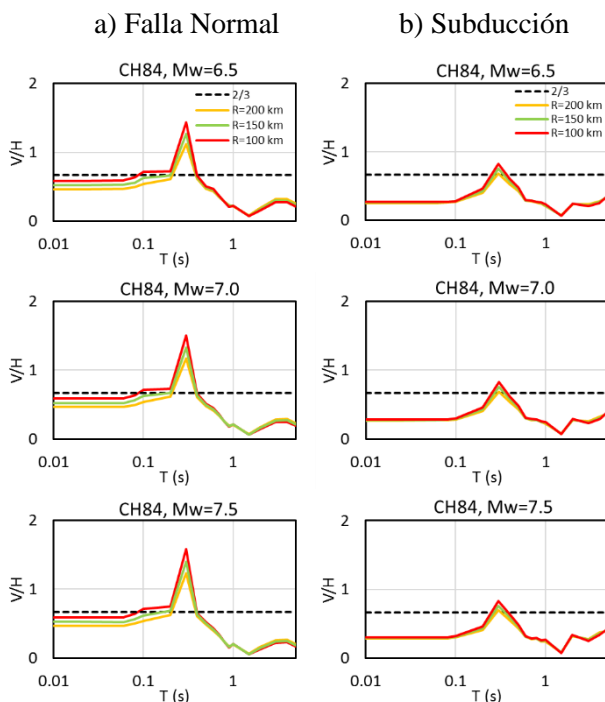
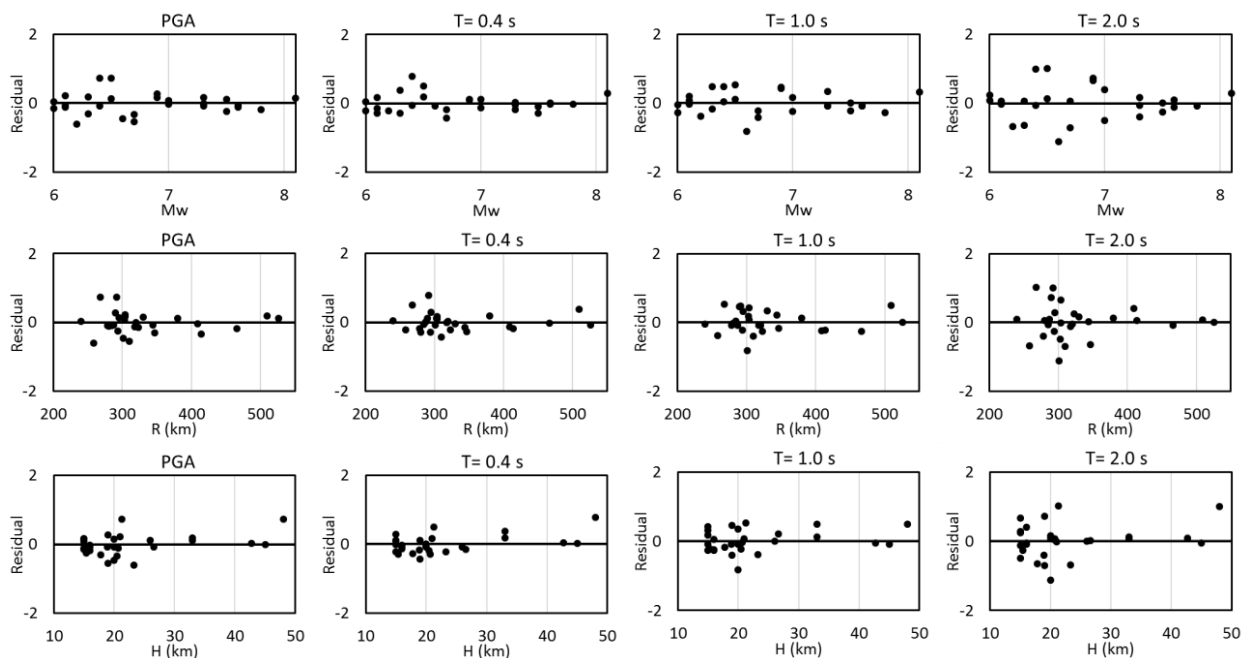


Figura E.2 Estimación de la relación V/H dadas distancias $R = 100, 150$ y 200 km, con magnitudes de $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para la estación CH84.

Anexo F: Residuales para cinco estaciones acelerométricas

a) Componente Horizontal



b) Componente Vertical

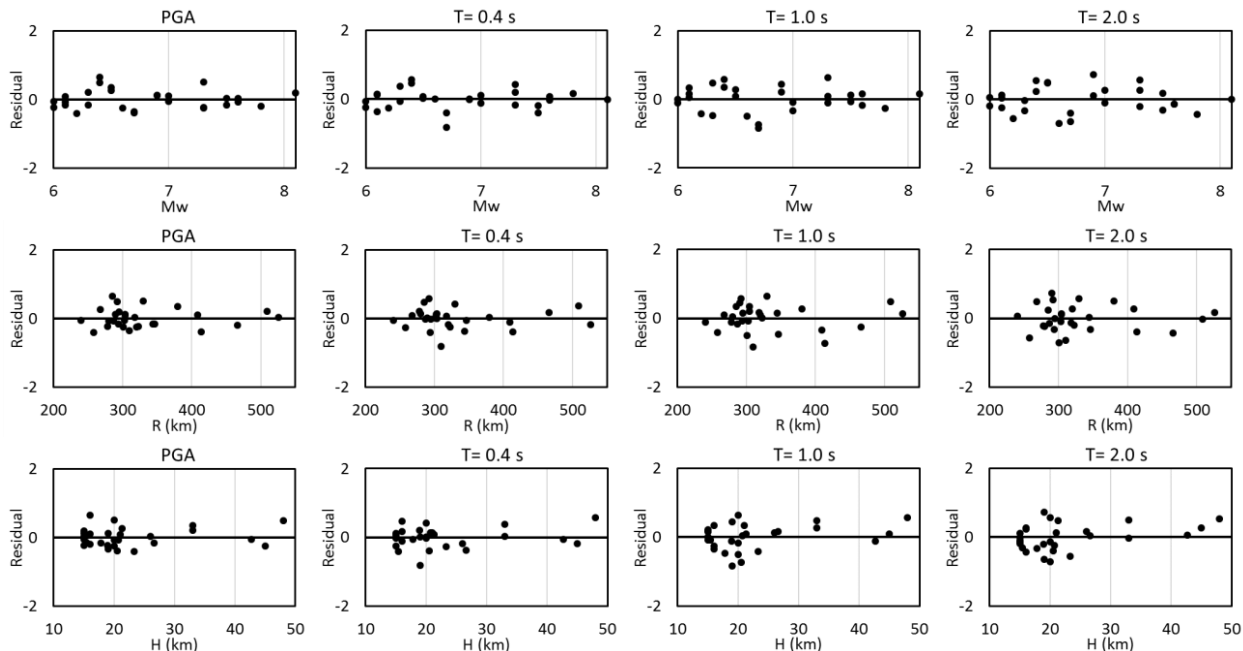


Figura F.1 Residual de la regresión para las componentes: a) horizontal, b) vertical y c) relación V/H, de la estación CU con eventos de subducción, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la PGA y aceleración espectral de respuesta en T= 0.4, 1.0 y 2.0 s.

c) Relación V/H

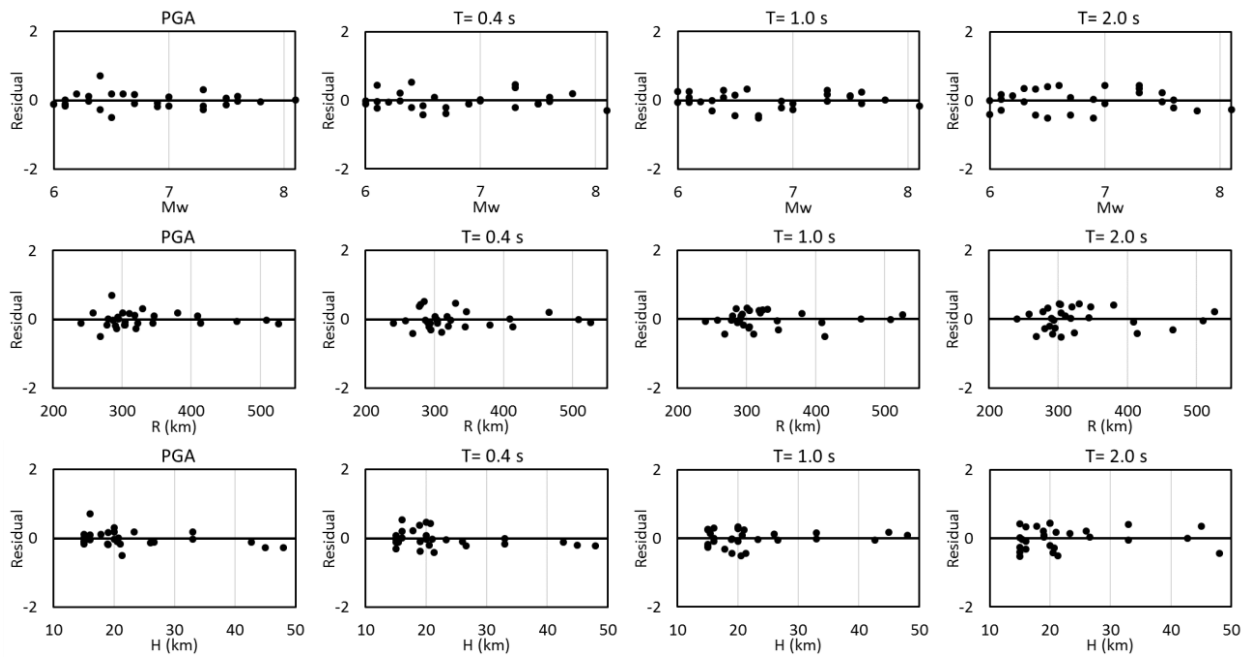
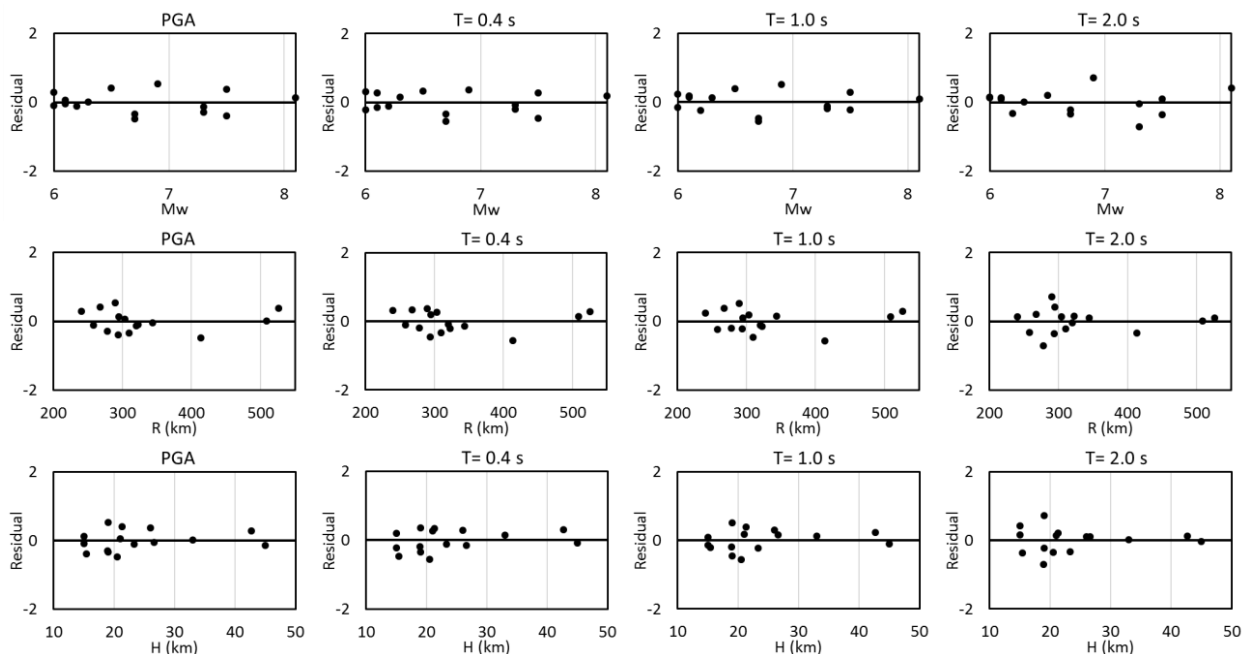


Figura F.1 Continuación.

a) Componente Horizontal



b) Componente Vertical

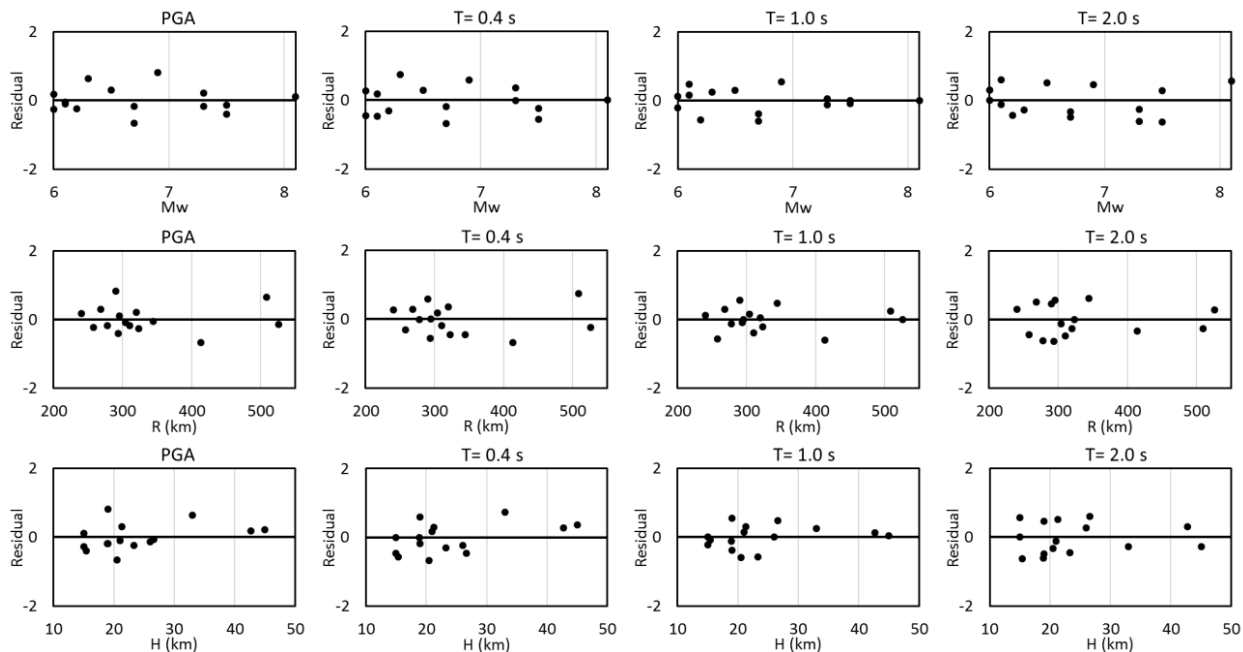


Figura F.2 Residual de la regresión para las componentes: a) horizontal, b) vertical y c) relación V/H, de la estación SCT con eventos de subducción, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la PGA y aceleración espectral de respuesta en T= 0.4, 1.0 y 2.0 s.

c) Relación V/H

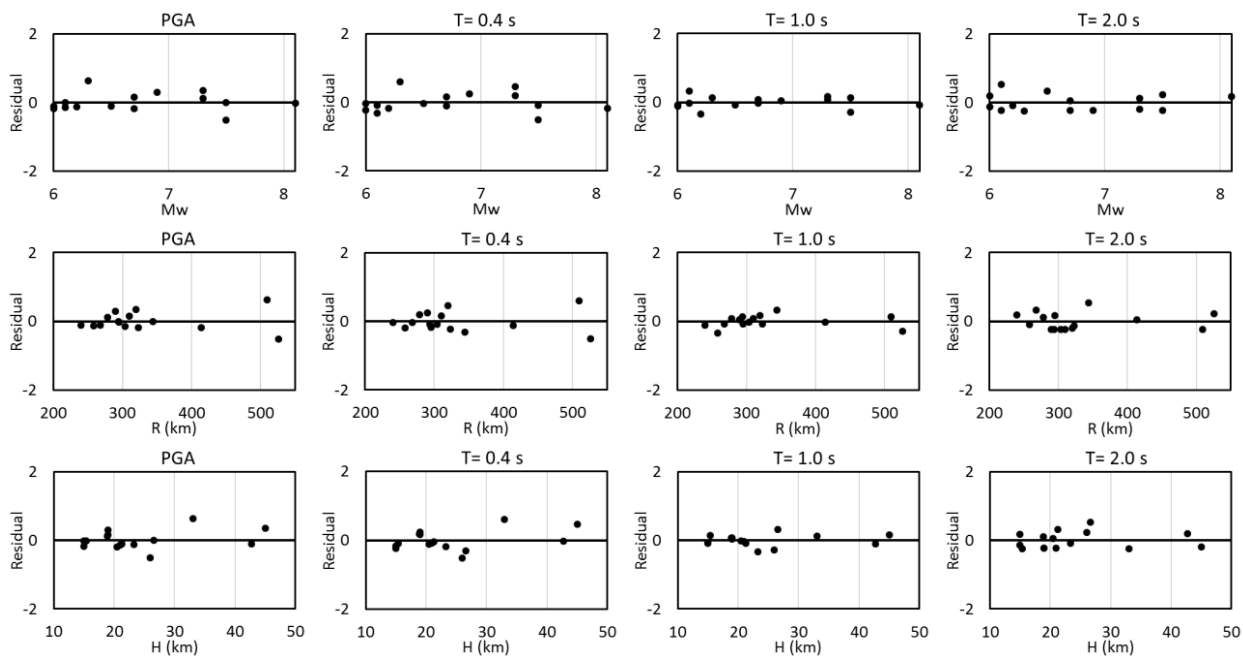
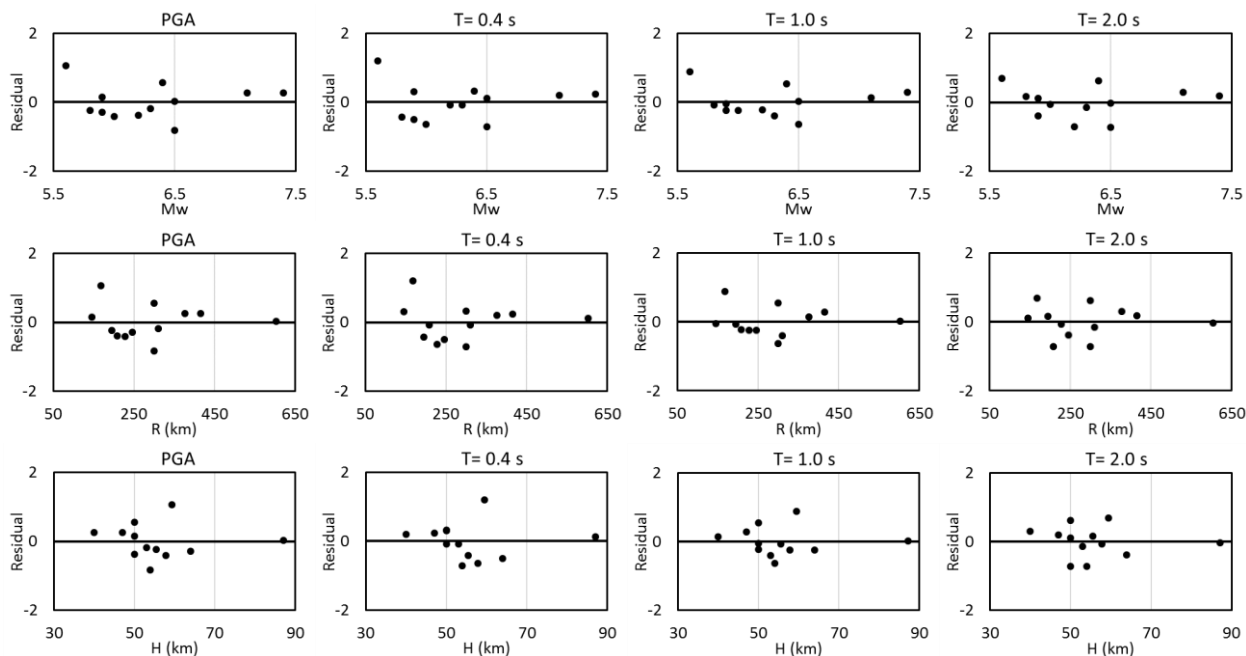


Figura F.2 Continuación.

a) Componente Horizontal



b) Componente Vertical

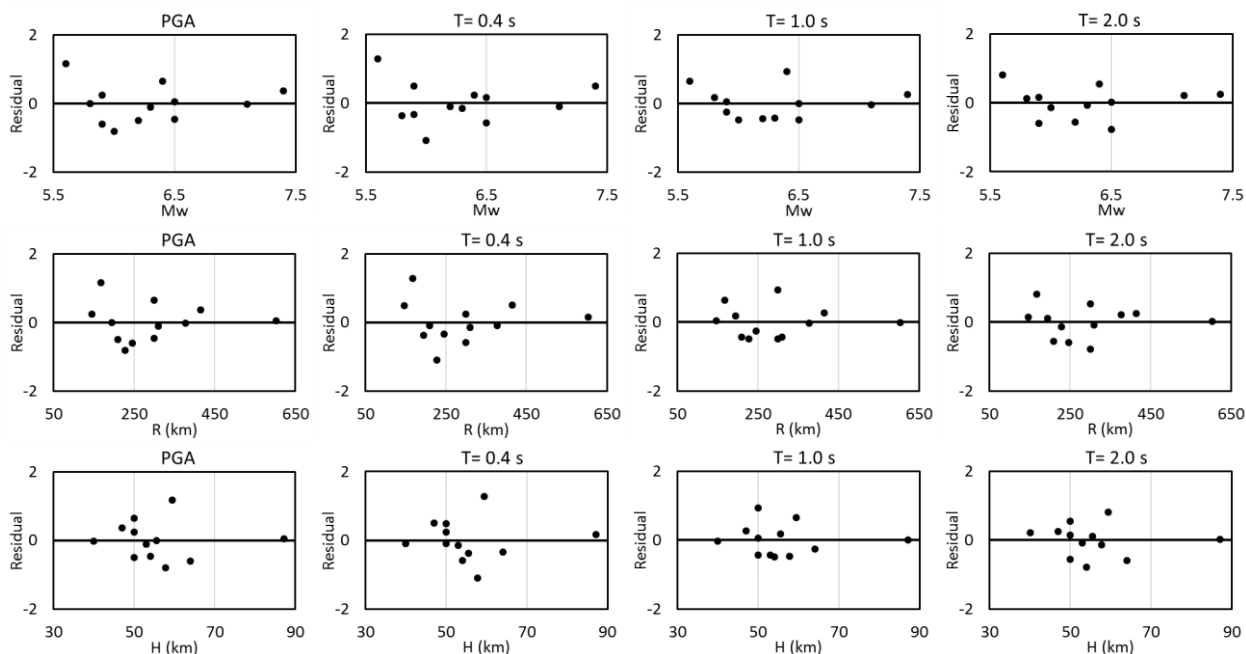


Figura F.3 Residual de la regresión para las componentes: a) horizontal, b) vertical y c) relación V/H, de la estación CDAO con eventos de profundidad intermedia, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la PGA y aceleración espectral de respuesta en $T= 0.4, 1.0$ y 2.0 s.

c) Relación V/H

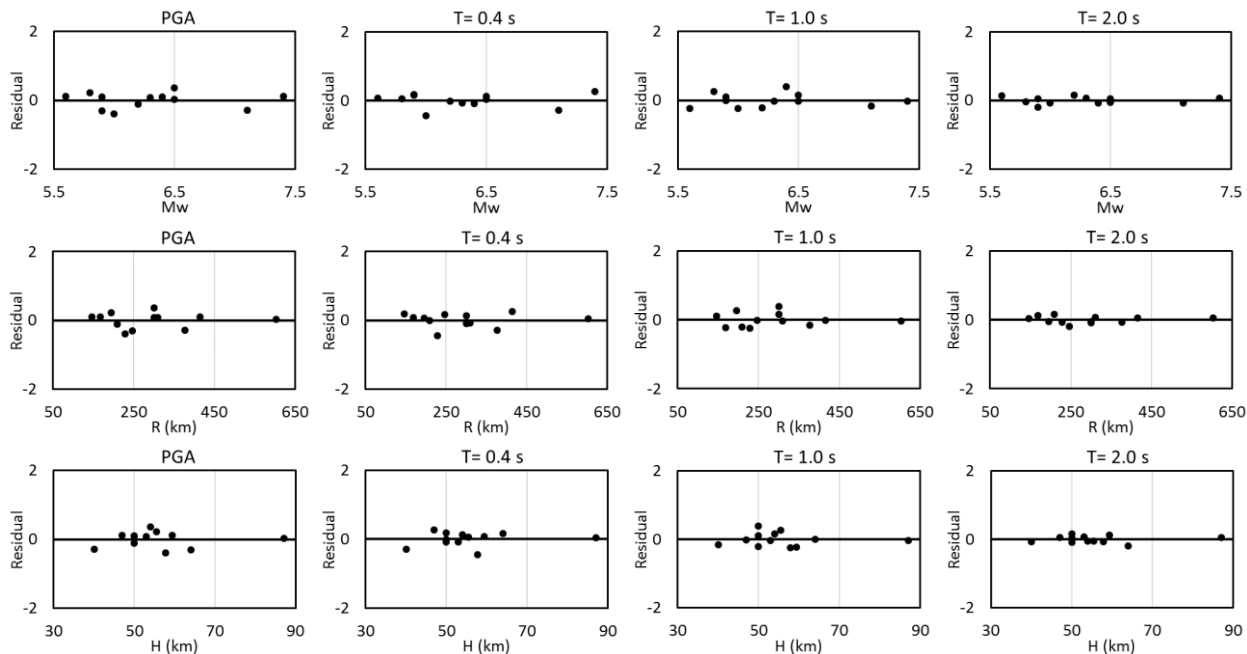
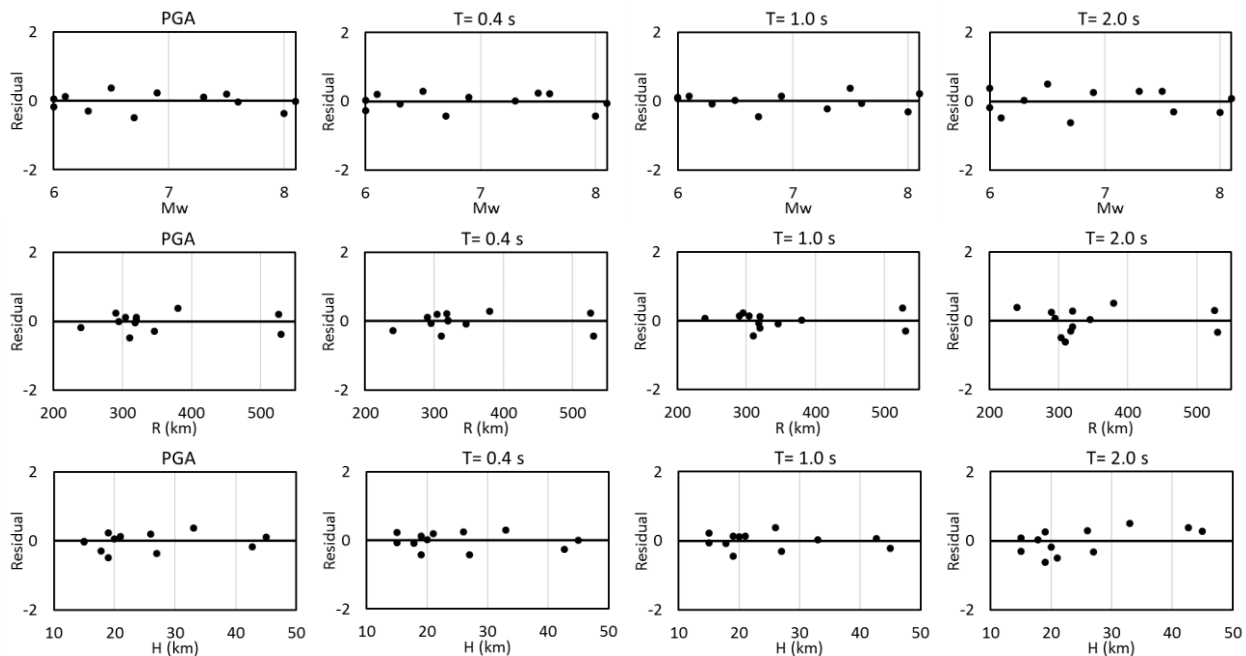


Figura F.3 Continuación.

a) Componente Horizontal



b) Componente Vertical

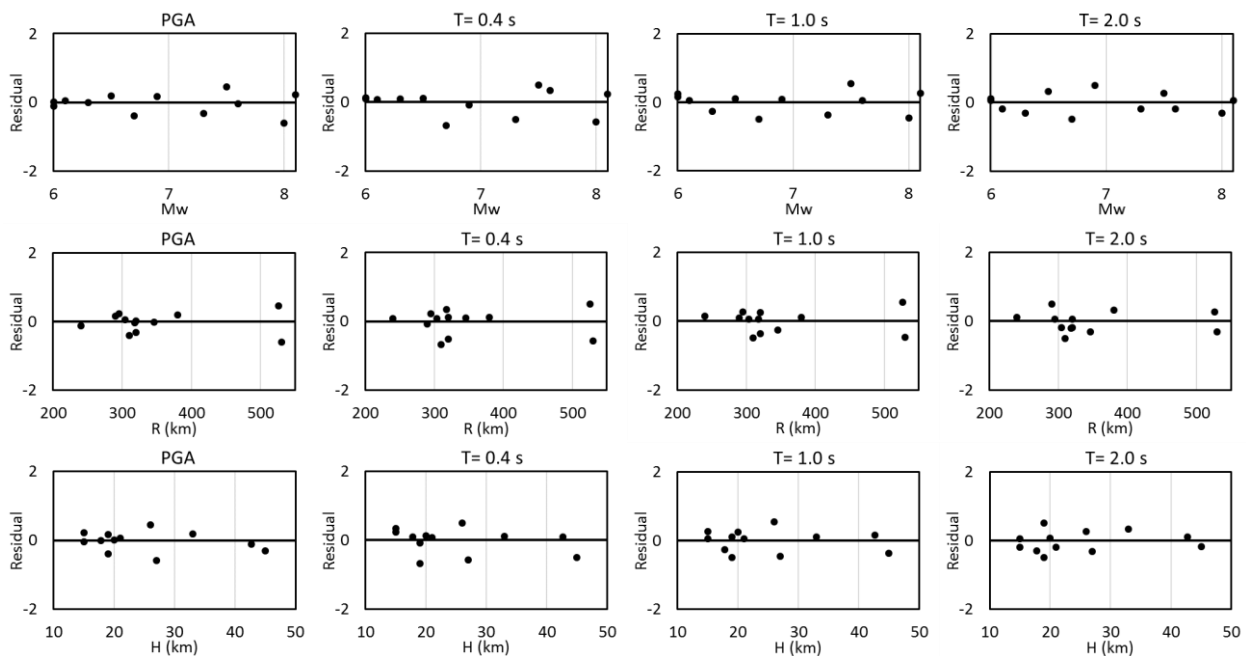


Figura F.4 Residual de la regresión para las componentes: a) horizontal, b) vertical y c) relación V/H, de la estación CDAO con eventos de subducción, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la PGA y aceleración espectral de respuesta en $T=0.4, 1.0$ y 2.0 s.

c) Relación V/H

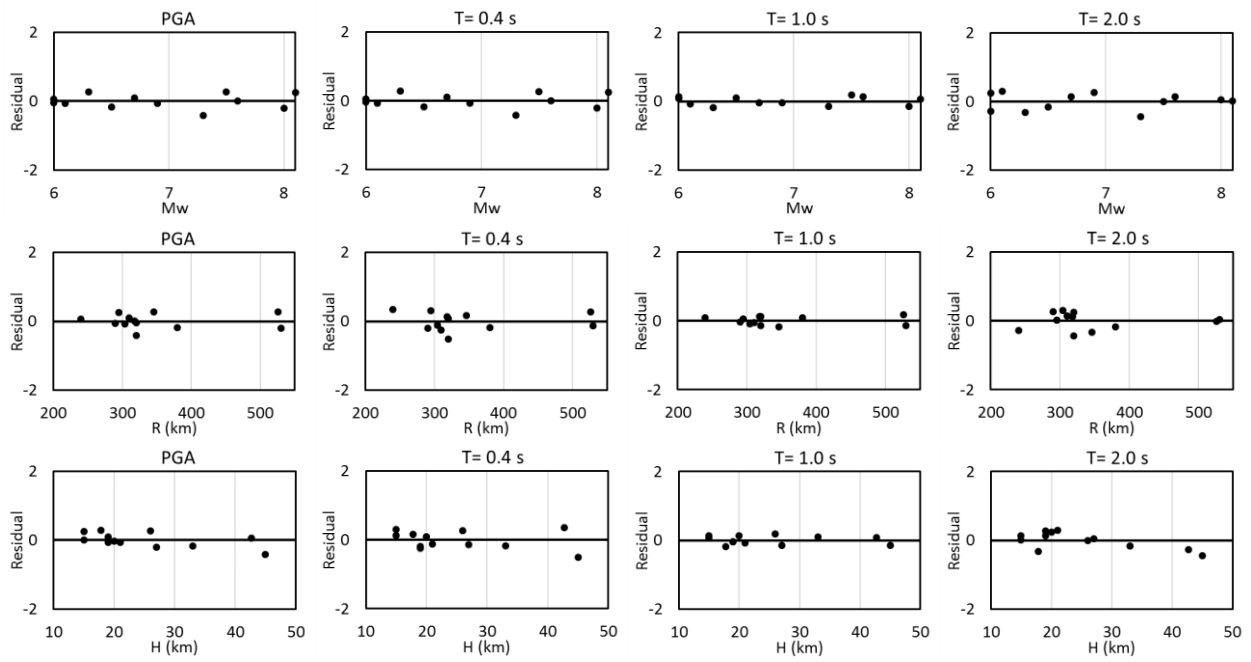
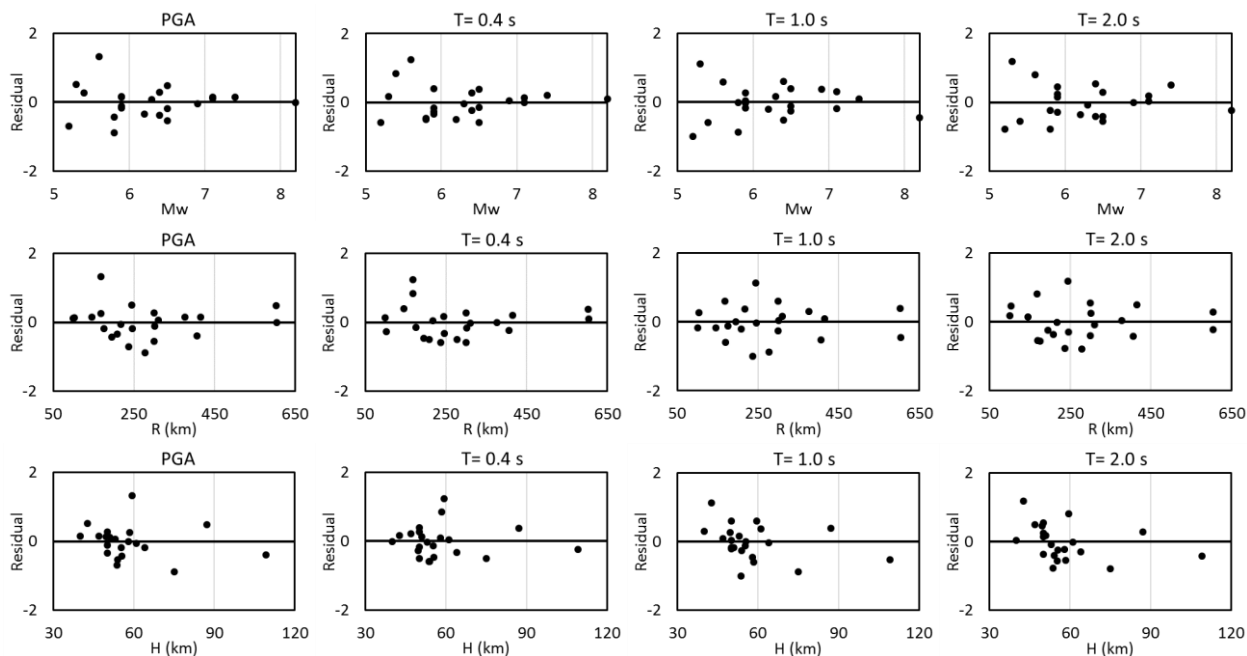


Figura F.4 Continuación.

a) Componente Horizontal



b) Componente Vertical

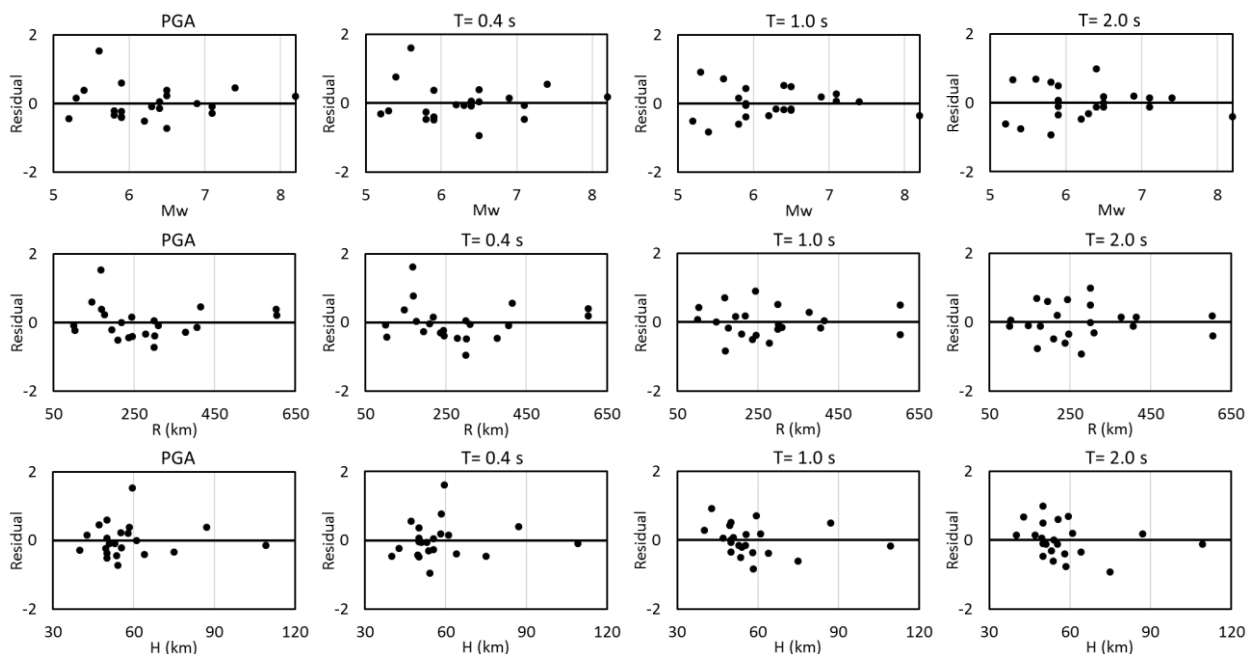


Figura F.5 Residual de la regresión para las componentes: a) horizontal, b) vertical y c) relación V/H, de la estación JC54 con eventos de profundidad intermedia, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la PGA y aceleración espectral de respuesta en T= 0.4, 1.0 y 2.0 s.

c) Relación V/H

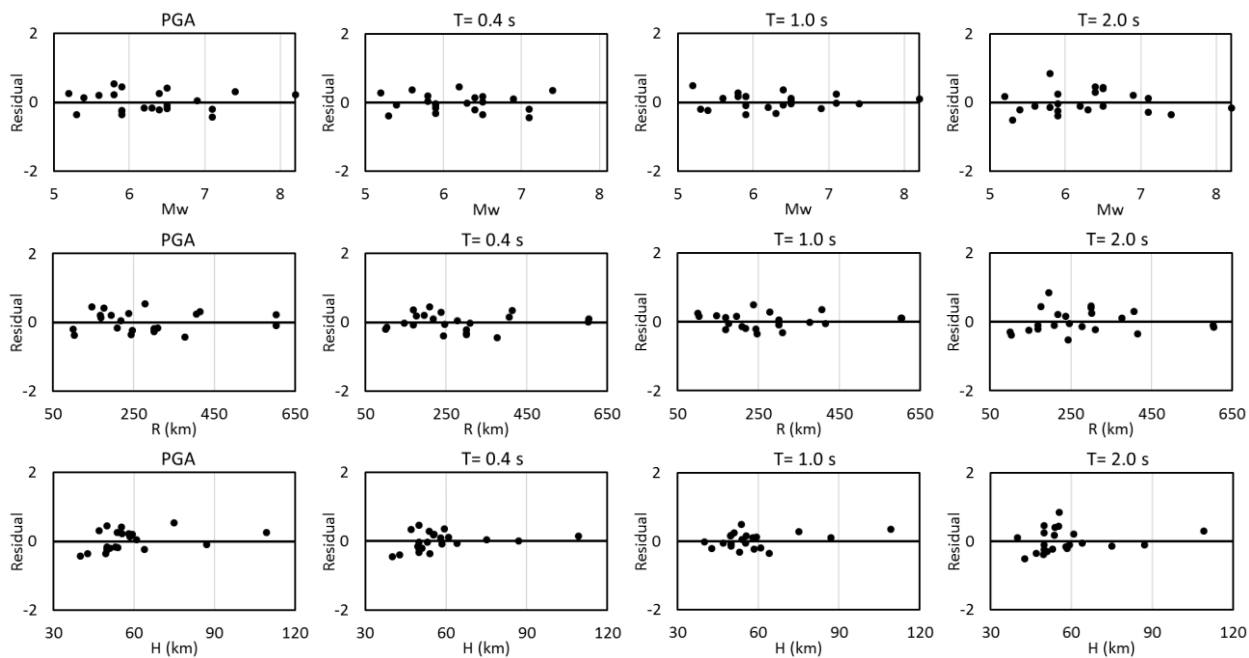
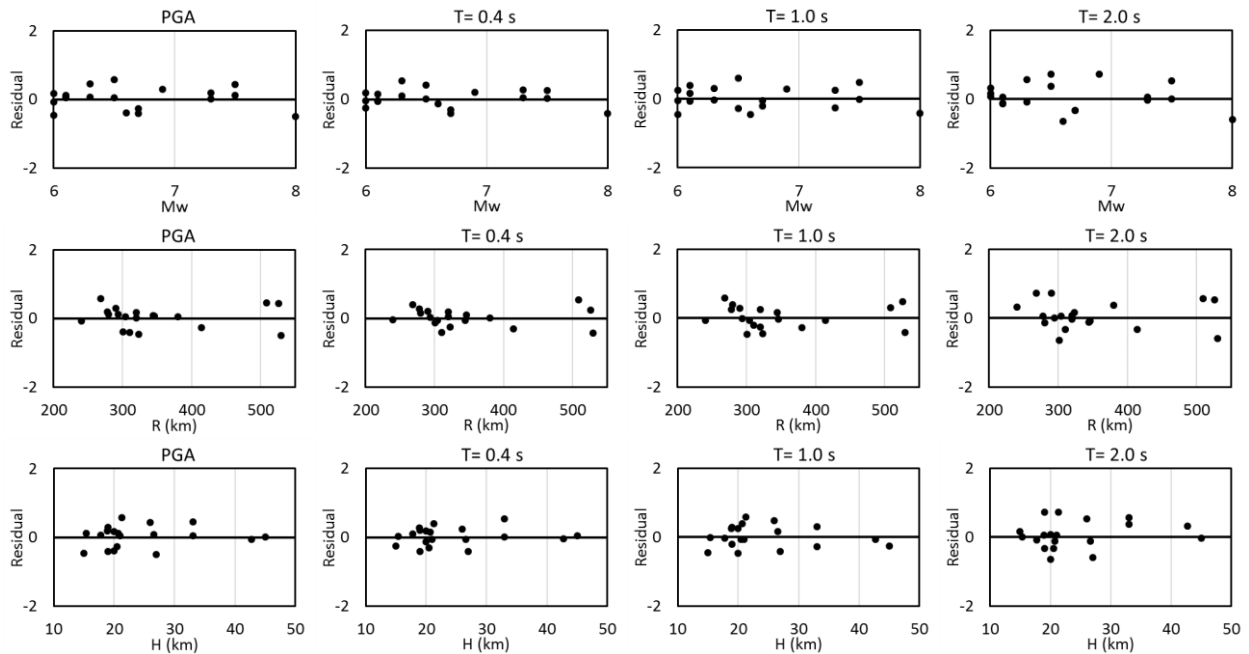


Figura F.5 Continuación.

a) Componente Horizontal



b) Componente Vertical

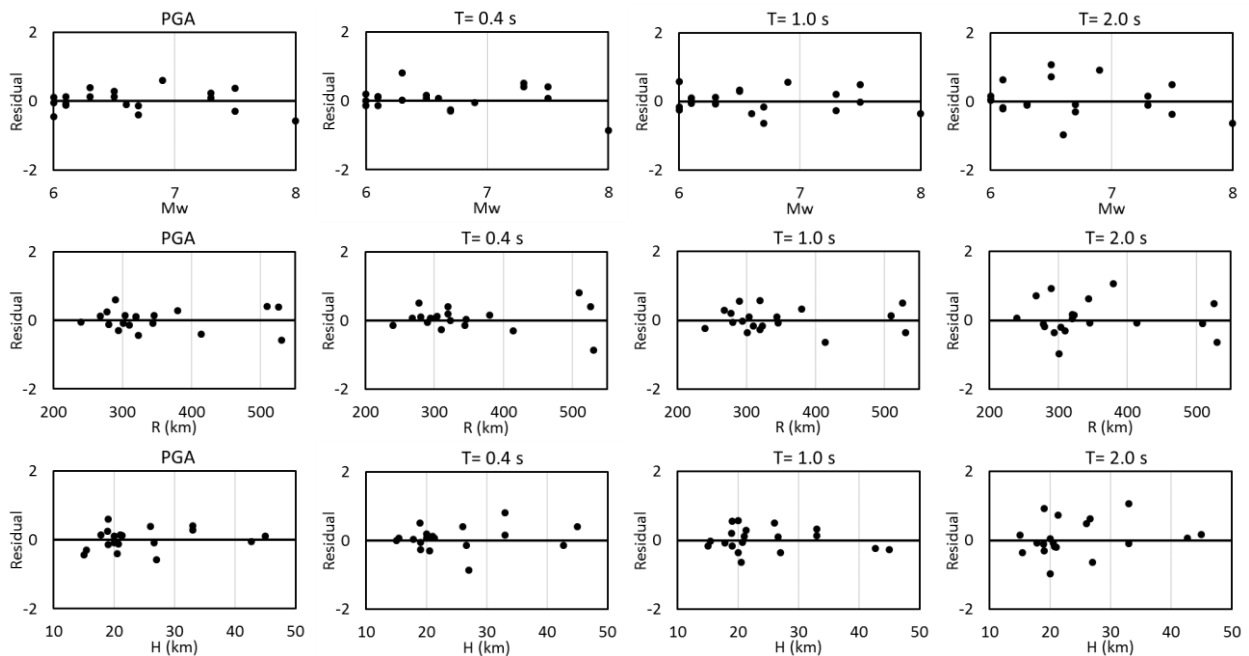


Figura F.6 Residual de la regresión para las componentes: a) horizontal, b) vertical y c) relación V/H, de la estación JC54 con eventos de subducción, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la PGA y aceleración espectral de respuesta en $T=0.4$, 1.0 y 2.0 s.

c) Relación V/H

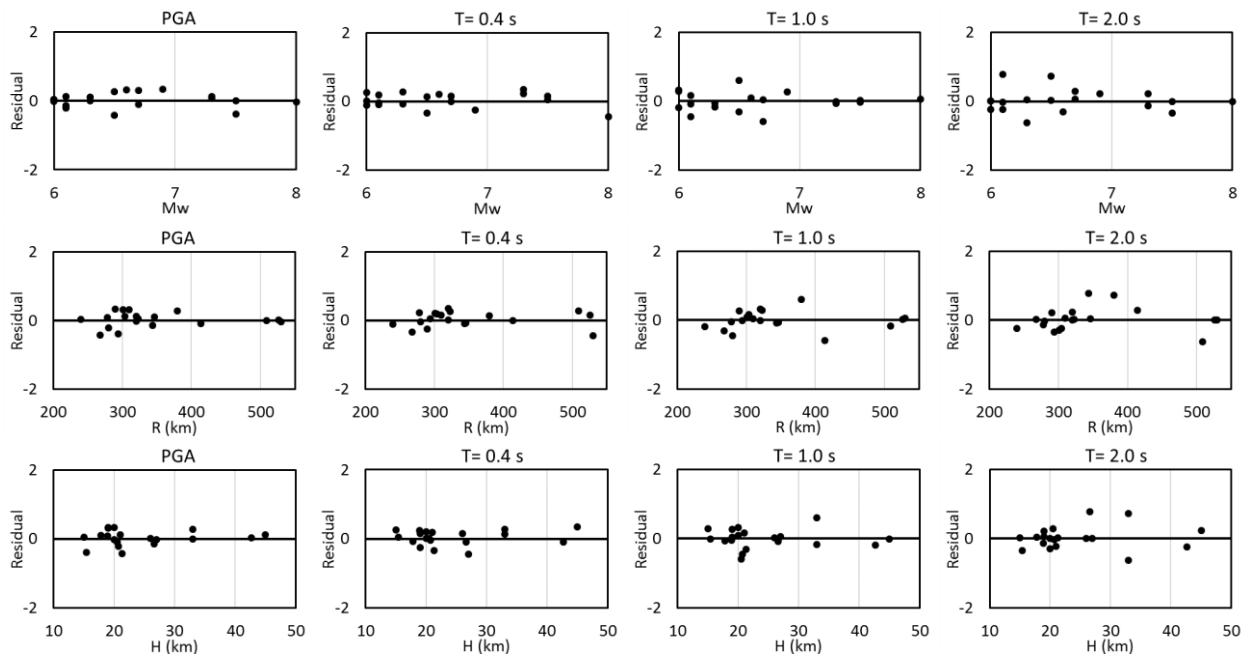
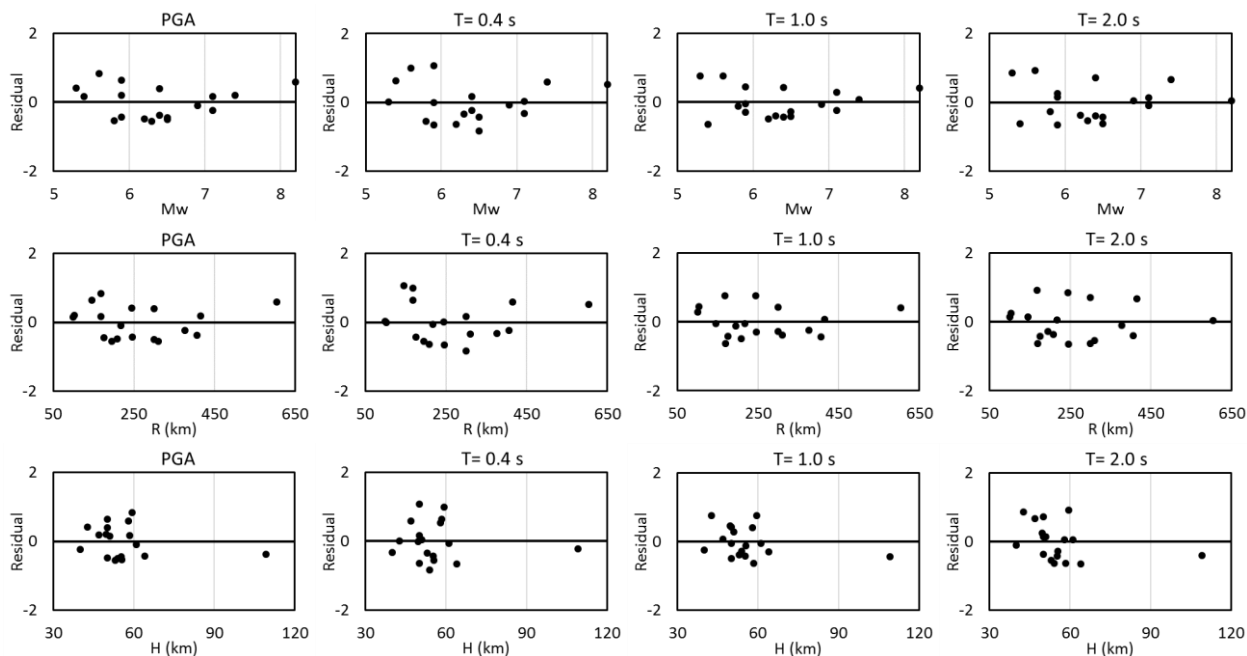


Figura F.6 Continuación.

a) Componente Horizontal



b) Componente Vertical

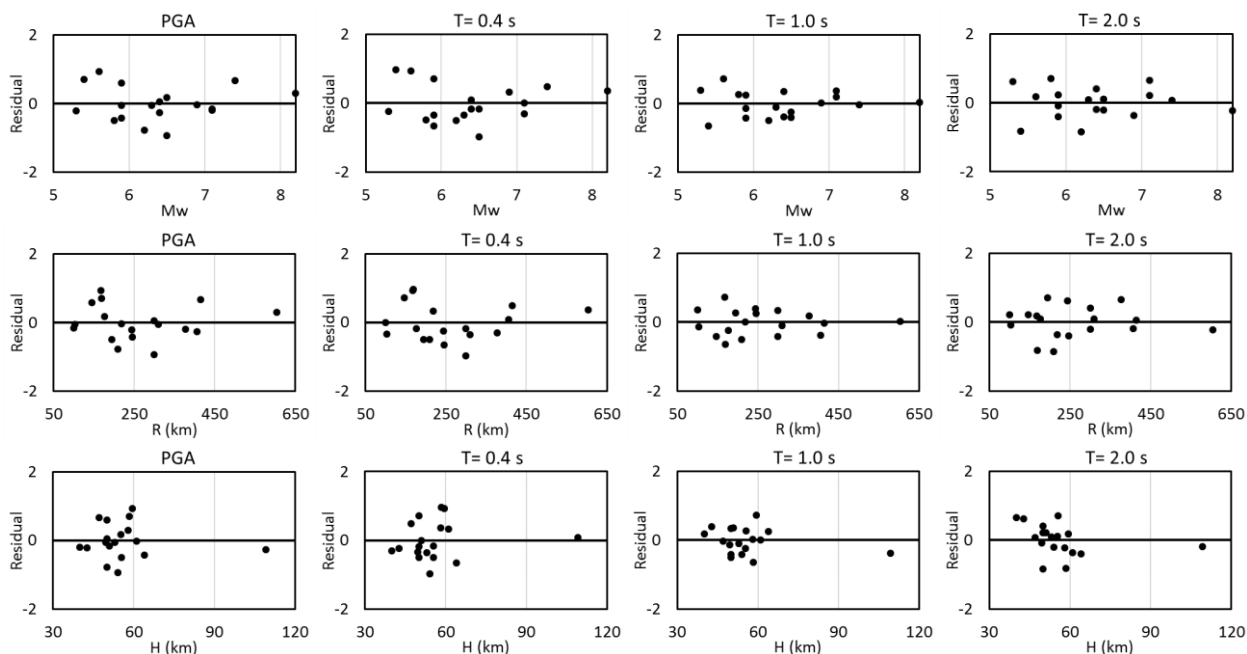


Figura F.7 Residual de la regresión para las componentes: a) horizontal, b) vertical y c) relación V/H, de la estación CH84 con eventos de profundidad intermedia, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la PGA y aceleración espectral de respuesta en $T=0.4, 1.0$ y 2.0 s.

c) Relación V/H

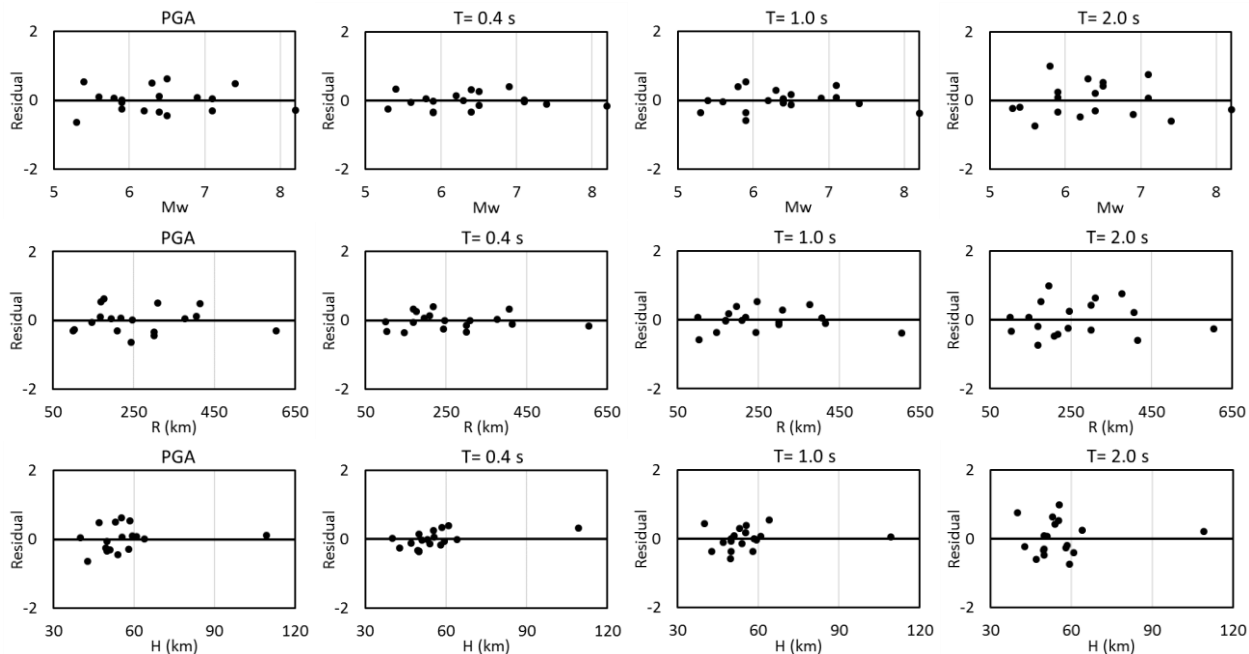
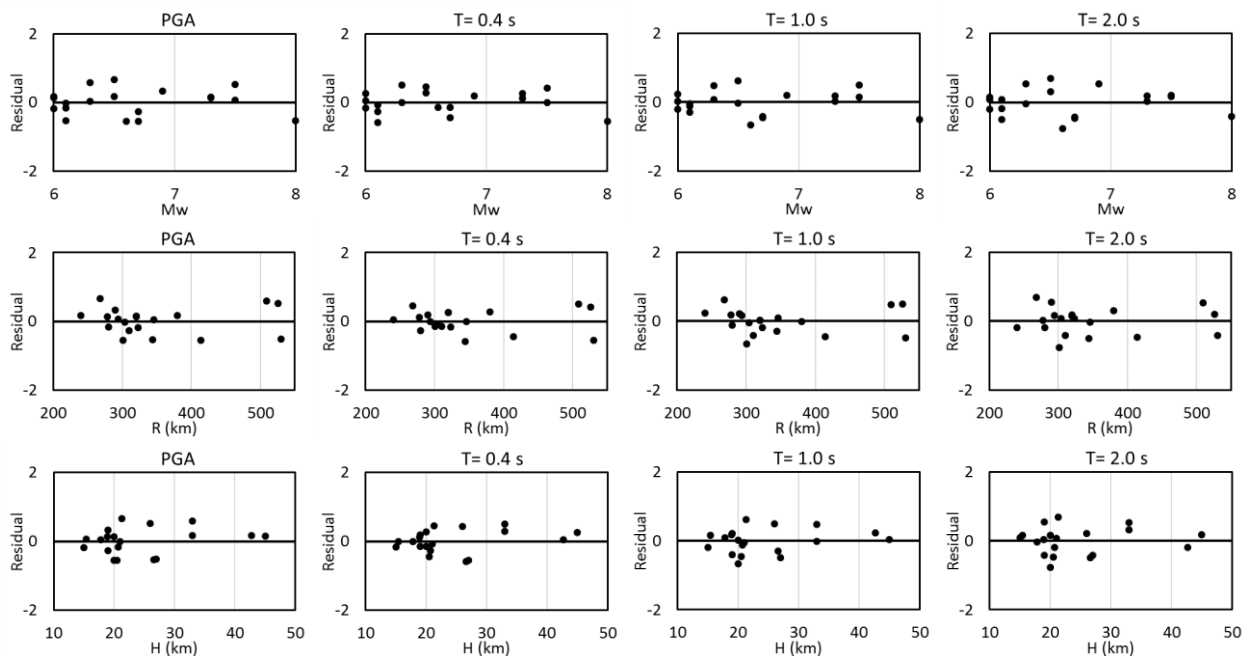


Figura F.7 Continuación.

a) Componente Horizontal



b) Componente Vertical

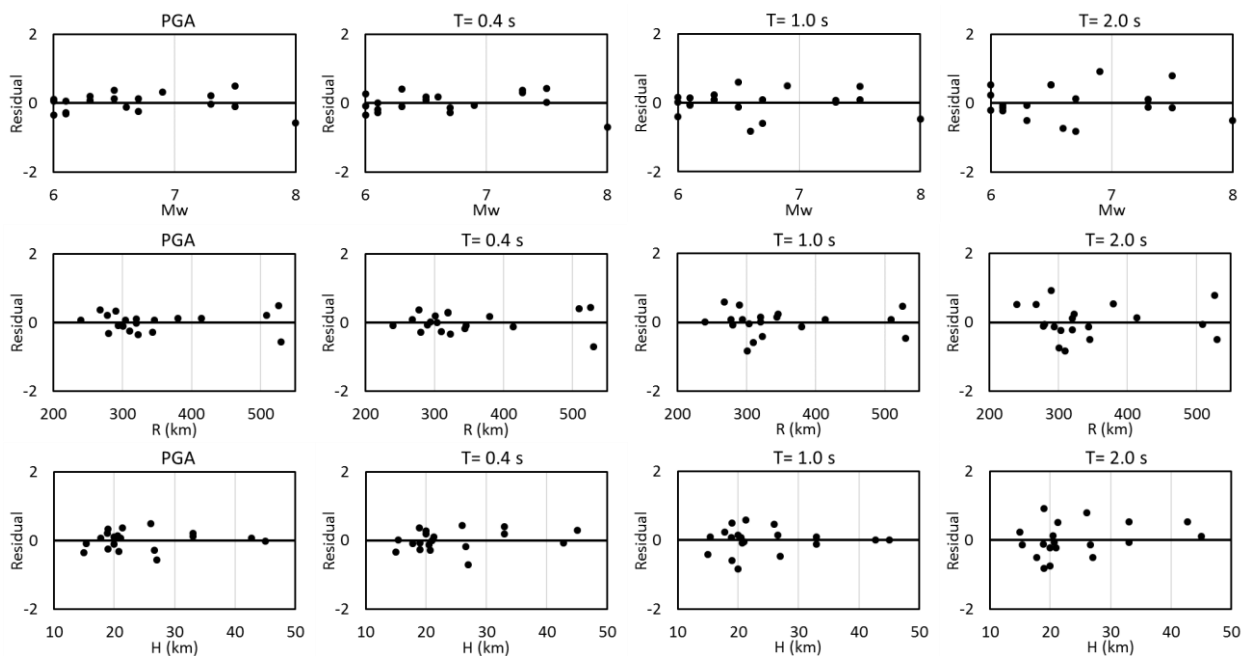


Figura F.8 Residual de la regresión para las componentes: a) horizontal, b) vertical y c) relación V/H, de la estación CH84 con eventos de subducción, agrupados en magnitud (arriba), distancia (en medio) y profundidad (abajo) para la PGA y aceleración espectral de respuesta en $T=0.4$, 1.0 y 2.0 s.

c) Relación V/H

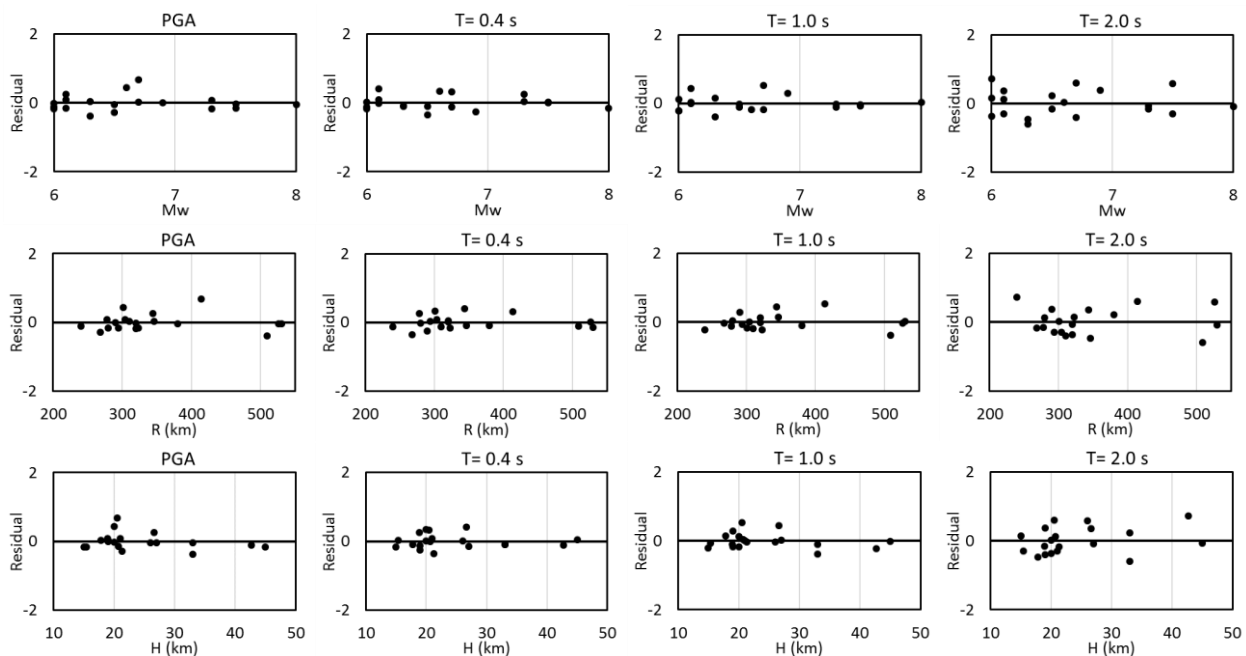


Figura F.8 Continuación.

Anexo G: Comparación de amplitudes V/H observados y estimados para eventos sísmicos en México durante el periodo de 1985-2017

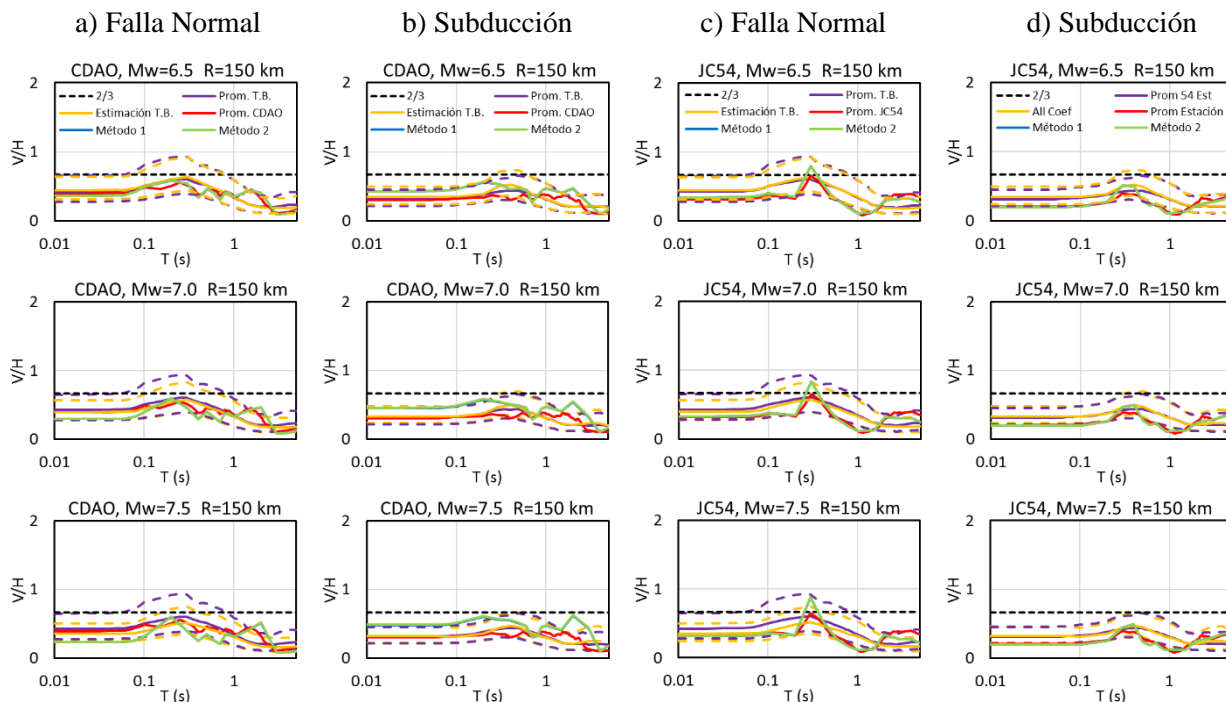


Figura G.1 Comparación de relaciones V/H respecto a distancia $R = 150$ km, con magnitudes $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para estaciones: CDAO (incisos a y b) y JC54 (incisos c y d).

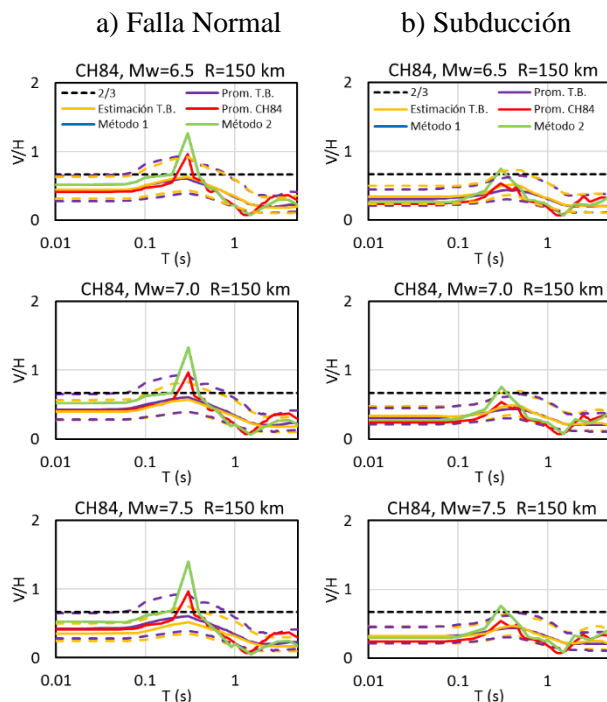


Figura G.2 Comparación de relaciones V/H respecto a distancia $R = 150$ km, con magnitudes $M_w = 6.5, 7.0$ y 7.5 para la estación CH84.