

Análisis de datos acelerográficos de Costa Rica para la generación de modelos de atenuación: periodo 1998 a 2021

Analysis of strong motion data from Costa Rica for the generation of attenuation models: 1998 to 2021 period

Víctor Schmidt-Díaz y Luis C. Esquivel-Salas*

Universidad de Costa Rica (UCR), Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS), Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII), San Pedro, San José, Costa Rica

*Autor para contacto: luiscarlos.esquivel@ucr.ac.cr

(Recibido: 03/03/2022; aceptado: 04/08/2022)

RESUMEN: Los modelos de atenuación de las ondas sísmicas se obtienen a partir de datos acelerográficos y representan uno de los insumos más importantes para los estudios de amenaza sísmica, la cual es fundamental para el diseño de estructuras y sistemas sismorresistentes cada vez más eficientes. En vista de que el registro de nuevos sismos aporta información sumamente valiosa para actualizar dichos modelos y estudios, es necesario que ambos se revisen y se replanteen con cierta periodicidad. En este trabajo se desarrolla un análisis descriptivo de datos acelerográficos registrados en estaciones de Costa Rica hasta el año 2021, como base para el posterior desarrollo de modelos de atenuación para el país. La investigación está motivada por el gran número de datos acelerográficos registrados en los últimos 11 años, gracias a la densificación de la red de instrumentos que administra el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica. Esto hace que, en el momento actual, se disponga de una base de datos acelerográficos suficientemente amplia y robusta, para poder generar ecuaciones de predicción del movimiento fuerte, conocidas como GMPEs (del inglés Ground motion prediction equations) que representen la atenuación en los tres regímenes tectónicos presentes en el país: cortical, subducción interfase y subducción intraplaca. En esta etapa de la investigación se analizan un total de 3192 registros asociados a 245 sismos, obtenidos después de aplicar una serie de filtros de selección sobre una base de datos compuesta inicialmente por 3981 registros. El análisis ha consistido en obtener las distribuciones del número de eventos y del número de registros en función de la magnitud, profundidad, régimen tectónico y tipo de suelo en la estación de registro, clasificando éste siguiendo los criterios del Código Sísmico de Costa Rica (CFIA, 2010). Entre los principales resultados de esta investigación, que condicionarán los rangos de aplicabilidad de los modelos que se desarrollen posteriormente, se destacan (1) la identificación de una escasez de registros en condiciones de suelo duro o roca (S1), así como de magnitudes altas a distancias hipocentrales cortas y de magnitudes bajas a distancias largas.; (2) el rango de distancias hipocentrales de los registros disponibles es (5-300 km) para sismos corticales, (15-300 km) para subducción interfase y (40-400 km) para subducción intraplaca. Finalmente, se estimaron dos medidas de distancia para fuentes extendidas, denominadas de ruptura, R RUP, y de Joyner y Boore, R J&B, empleadas cuando la ruptura no puede considerarse como puntual. Dichas distancias se han calculado a partir de las distancias para fuentes puntuales, epicentral e hipocentral, R EPI e R HYPO respectivamente, siguiendo la metodología propuesta por Thompson y Worden (2018).

Palabras clave: sismos; atenuación; suelos; magnitud; distancia; PGA; aceleraciones pico; hipocentro.



ABSTRACT: Seismic waves attenuation models are obtained from accelerographic data and represent one of the most important inputs for seismic hazard studies, which are essential for the design of increasingly efficient seismic-resistant structures and systems. Given that the recording of new earthquakes provides extremely valuable information to update these models and studies, it is necessary that both be reviewed and reconsidered periodically. In this work, a descriptive analysis of accelerographic data recorded in stations in Costa Rica until the year 2021 is presented, as a basis for the subsequent development of attenuation models for the country. The research is motivated by the large number of accelerographic data recorded in the last 11 years, thanks to the densification of the instrument network managed by the Seismic Engineering Laboratory of the University of Costa Rica. This means that, at the present time, there is a sufficiently broad and robust accelerographic database to be able to generate ground motion prediction equations, known as GMPEs, that represent the attenuation in the three tectonic regimes present in the country: crustal, interphase subduction and intraslab subduction. In this stage of the investigation, a total of 3,192 records associated with 245 earthquakes are analyzed, obtained after applying a series of selection filters on a database initially composed of 3,981 records. The analysis has consisted of obtaining the distributions of the number of events and the number of records based on the magnitude, depth, tectonic regime and type of soil at the recording station, classifying it following the criteria of the Seismic Code of Costa Rica (CFIA, 2010). Among the main results of this research, which will condition the ranges of applicability of the models that are developed later, are (1) the identification of a scarcity of records in conditions of hard soil or rock (S1), as well as of high magnitudes at short hypocentral distances and low magnitudes at long distances.; (2) The range of hypocentral distances from the available records is (5-300 km) for crustal earthquakes, (15-300 km) for interphase subduction, and (40-400 km) for intraslab subduction. Finally, two distance measurements were estimated for extended sources, called rupture, R RUP, and Joyner and Boore, R J&B, used when the rupture cannot be considered punctual. These distances have been calculated from the distances for point sources, epicentral and hypocentral, R EPI and R HYPO respectively, following the methodology proposed by Thompson y Worden (2018). **Keywords:** earthquakes; attenuation; soils; magnitude; distance; PGA; peak accelerations; hypocenter.

Introducción

Una de las técnicas más empleadas para la estimación de parámetros representativos del movimiento del suelo con propósitos ingenieriles es el uso de los GMPEs (modelos predictivos del movimiento del suelo, también llamadas ecuaciones de predicción del movimiento del suelo - GMPEs – o modelos de atenuación). Estos son modelos empíricos que se deducen ajustando datos de algún parámetro de intensidad del movimiento - usualmente aceleración pico del suelo (PGA por sus siglas en inglés) o aceleraciones espectrales (SA(T) por sus siglas en inglés) - a una forma funcional dada, en función de la magnitud (M) distancia (R) y tipo de suelo (S), que representan las características de la fuente, el medio de propagación y el efecto de sitio. Los coeficientes del modelo se estiman mediante análisis de regresión, tomando las aceleraciones PGA o SA(T) como variables dependientes y M, R y S como variables independientes (Douglas y Aochi, 2008). Las primeras GMPEs desarrolladas, en los años 80 respondían a ecuaciones sencillas, pero su complejidad ha ido aumentando con el paso de los años, al ir incluyendo nuevas variables en las correspondientes ecuaciones, con el fin de lograr modelos más robustos. También se han ido actualizando y completando las bases de datos y actualmente existen algunas de carácter mundial, compuestas por datos que provienen de entornos sismo- tectónicos muy diversos, a partir de los cuales se pueden desarrollar modelos aplicables a nivel global, no para una región específica.

La primera GMPM estimada para Centro América, de la que se tiene registro, es la de Taylor, Santos, Dahle y Bungum (1992), en donde se utilizaron datos de Nicaragua, El Salvador y Costa Rica. El modelo se desarrolló para la estimación de la PGA, utilizando 27 sismos de magnitudes M_s entre 3 y 7,6, con una distancia de tipo hipocentral y los coeficientes fueron deducidos por un método de regresión de un paso de mínimos cuadrados. Con estos mismos datos, en el año 1993, Singh, Gutiérrez, Arboleda y Ordaz (1993) generaron nuevos modelos, esta vez utilizando el método de regresión Bayesiano univariante.

En cooperación con NORSAR, se manejaron varios proyectos que involucraron la generación de GMPMs. Climent, Taylor, Strauch, Villagrán, Dahle y Bungum (1994) y Dahle et al. (1995) obtuvieron modelos para la estimación de PGA y pseudo velocidad espectral (PSV por sus siglas en inglés), utilizando registros de Costa Rica, Nicaragua, El Salvador y México, correspondientes a 72 sismos de magnitudes M_w entre 3 y 8 (de México solo sismos con $M_w \geq 6,5$), con una distancia de tipo hipocentral. Los coeficientes se obtuvieron mediante modelos de regresión de un paso, tanto de mínimos cuadrados como Bayesiano.

Bommer, Hernández, Navarrete y Salazar (1996) utilizaron registros de 20 sismos de El Salvador y Nicaragua, con magnitudes M_s entre 3,7 y 7,0, para producir nuevos modelos que predicen el movimiento utilizando como parámetros de intensidad el PGA y ordenadas espectrales, siempre usando como medida de distancia la hipocentral.

Schmidt-Díaz, Dahle y Bungum (1997) utilizaron registros de 57 sismos de Costa Rica, con magnitudes M_w entre 3,3 y 7,6, para la estimación de la PGA y distintas ordenadas espectrales. De nuevo se utilizó la distancia hipocentral como medida de distancia y se aplicaron métodos de regresión de mínimos cuadrados y Bayesiano de dos pasos para deducir los coeficientes de este modelo.

Un aspecto a resaltar es que los trabajos mencionados anteriormente han utilizado, total o parcialmente, registros provenientes de acelerógrafos analógicos, de calidad bastante inferior a la que actualmente se tiene con los registros digitales. Este ha sido un factor de consideración en esta investigación.

Finalmente, Schmidt-Díaz (2010) y Schmidt-Díaz (2014) utilizó 308 sismos con magnitudes M_w entre 4,0 y 7,5, provenientes de El Salvador, Costa Rica, Nicaragua y México para generar el modelo más reciente de la región, que permitiera estimar valores de PGA y PSA (pseudo aceleración espectral) para distintos periodos de vibración. Los registros correspondían a un periodo comprendido entre los años 1972 y 2010. En el caso de México solo se incluyeron registros de sismos con $M_w \geq 6,5$. La medida de distancia utilizada fue la hipocentral y los métodos de regresión considerados fueron de uno y dos pasos, tanto de mínimos cuadrados como de máxima verosimilitud. La mayoría de los registros utilizados provenían de equipos digitales. La clasificación de sitios se realizó siguiendo el método de Zhao et al. (2006).

Con base en los antecedentes mencionados se propone la presente investigación, con el fin de actualizar y analizar la base de datos acelerográficos con la cual se generarán modelos de atenuación para Costa Rica, motivada por el gran número de registros acelerográficos que se han obtenido en los últimos 11 años gracias a la densificación de la red de instrumentos que administra el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica.

Aplicando una serie de criterios de selección que se comentan más adelante, sobre una base de datos inicialmente compuesta por 4981 registros, se extrajeron finalmente 3192 registros asociados a 245 sismos ocurridos entre 1998 y 2021, lo que da una tasa promedio de 13 registros por sismo, muy superior a la que se tenía en el pasado.

Se analizan los datos según distintos criterios de clasificación como: régimen tectónico, rangos de magnitud, distancia, profundidad y tipo de suelo y se calculan medidas de distancia de fuente extendida del sitio de registro, i.e. estación acelerográfica a la fuente, específicamente las denominadas ruptura (R_{RUP}) y de Joyner y Boore ($R_{J\&B}$), que representan mejor la distancia que las tradicionales distancias de fuentes puntuales, epicentral (R_{EPI}) e hipocentral (R_{HYPO}) cuando no se puede asumir la hipótesis de fuente puntual.

Los datos

Debido a la promulgación del Transitorio 1 de la Ley Nacional de Emergencias (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 2006) se ha logrado incrementar la cantidad de instrumentos digitales adquiridos a partir del año 2006, lo que le ha permitido al LIS-UCR la sustitución de equipos obsoletos o bien, la creación de nuevas estaciones acelerográficas, por lo que la cantidad de registros disponibles a partir de ese año ha amentado de manera significativa.

A modo de comparación, en el estudio de Schmidt-Díaz (2014) se utilizaron 706 registros correspondientes a 308 sismos de América Central y del sur de México, mientras que en la presente investigación se analizan 3192 registros que provienen de 245 eventos en Costa Rica, pasando de un promedio de 2,29 a 13 registros por sismo.

Los datos utilizados corresponden a registros obtenidos desde 1998 hasta abril de 2021 por la red de acelerógrafos triaxiales de distintas marcas que posee el LIS-UCR, cuyas características principales se indican en el cuadro 1.

Cada estación acelerométrica transmite en tiempo real a los servidores del LIS-UCR en formato mini SEED. Cuando un sismo es lo suficientemente fuerte como para disparar 30 estaciones, el programa denominado "Sistema de monitoreo acelerográfico del LIS-UCR" extrae una ventana de tiempo predefinida y lo convierte en formato SAC. A los registros se les aplica una corrección de línea base, removiendo el valor medio. Después de aplicar un suavizado o "tapering" de manera automática a ambos lados de la ventana temporal extraída, se aplica un filtro paso banda de tipo Butterworth de segundo orden (Moya-Fernández, 2017), con frecuencias de corte de 0,05 y 25 Hz (20 y 0,04 s, respectivamente). El registro así procesado cubre bien el rango de frecuencias de interés ingenieril. Todos los registros considerados tienen un intervalo de muestreo de 200 muestras

Cuadro 1

Características de los acelerógrafos con los que se han obtenido los registros de esta investigación .

Marca	Modelo	Cantidad actual instalada
RefTek	130-SMHR, 130-SMA	68
Guralp	5TDE	34
Nanometrics	Titan SMA, Titan XT	64

por segundo y poseen un PGA mínimo de 2 gales en algunos de sus tres componentes (dos horizontales y uno vertical), este último para descartar señales ruidosas.

Debido a que el proceso anterior es automático, los datos fueron revisados posteriormente de manera manual, uno a uno, para identificar posibles problemas de procesamiento. Es importante agregar que también se tienen registros de sismos que no dispararon 30 estaciones, los cuales se procesaron manualmente. Además, se compararon los parámetros de los sismos registrados por el LIS-UCR (magnitud, profundidad, coordenadas, hora de ocurrencia) con los identificados por la Red Sismológica Nacional (RSN) que es de donde se tomaron todos los parámetros sismológicos para el presente estudio (Arroyo-Solórzano y Linkimer, 2021; RSN, 2021).

Esta base de datos contaba inicialmente con 3981 registros correspondientes a 407 eventos. Sin embargo, hubo que aplicar una serie de criterios de selección para obtener los registros de mejor calidad. Estos criterios fueron:

- i. Eliminación de los registros analógicos, debido a que tienen una calidad y resolución inferior a los registros digitales. Esta es una práctica común en los estudios de atenuación recientes.
- ii. Selección de acelerogramas de sismos que, al menos, fueran registrados por tres estaciones, ya que para representar bien la atenuación se requieren registros de un mismo evento a diferentes distancias y condiciones de suelo.
- iii. Consideración de registros cuyo intervalo de muestreo único sea de 200 muestras por segundo.
- iv. Registros con Magnitud mínima M_w de 2,5, filtrando los de magnitud inferior por considerarse que generan muy bajas intensidades de movimiento del suelo. Además, el cálculo de parámetros para sismos muy pequeños puede contener importantes fuentes de error.
- v. Eliminación de registros de otras redes acelerográficas, manteniendo únicamente los generados por la red del LIS-UCR.
- vi. Eliminación de registros de sismos corticales generados en la placa de Cocos y en la Zona de Fractura de Panamá (ZFP), debido a la complejidad en la localización de estos sismos por la menor cobertura de la red de estaciones.

Una vez aplicados los filtros mencionados, la base de datos resultante quedó constituida por 3195 registros de 245 eventos.

Distribuciones de eventos correspondientes a los registros analizados

Primeramente, se ha hecho un análisis de las distribuciones de eventos correspondientes a los registros analizados, frente a la magnitud y a la profundidad. Tras ello, se clasifican los eventos por régimen tectónico.

La magnitud M_w ha sido obtenida de Arroyo-Solórzano y Linkimer (2021) y Red Sismológica Nacional de Costa Rica (2021). La distribución del número de eventos por magnitud, o histograma de magnitudes, es mostrada en la figura 1.

Se observa que la mayor cantidad de eventos registrados corresponden a magnitudes entre 4 y 5 (más de 100 eventos), seguido por magnitudes entre 5 y 6 (más de 60 eventos) y en tercer orden, por magnitudes entre 3 y 4 (cerca de 55 eventos). Debido al filtro descrito de eliminación de registros correspondientes a $M_w < 2.5$, quedan pocos eventos en el rango de M_w de 2 a 3. También son pocos los eventos con $M_w > 7$, dado que son poco frecuentes.

La distribución de eventos según la profundidad es mostrada en la figura 2. Se observa que la mayoría de los eventos considerados son de foco superficial, encontrándose más de 140 eventos con profundidades iguales o inferiores a 20 km (la incertidumbre asociado estas estimaciones se puede consultar en RSN [2021]), lo que lleva a suponer que el número dominante de eventos correspondientes a los registros analizados es de origen cortical. Seguidamente, se observan alrededor de 65

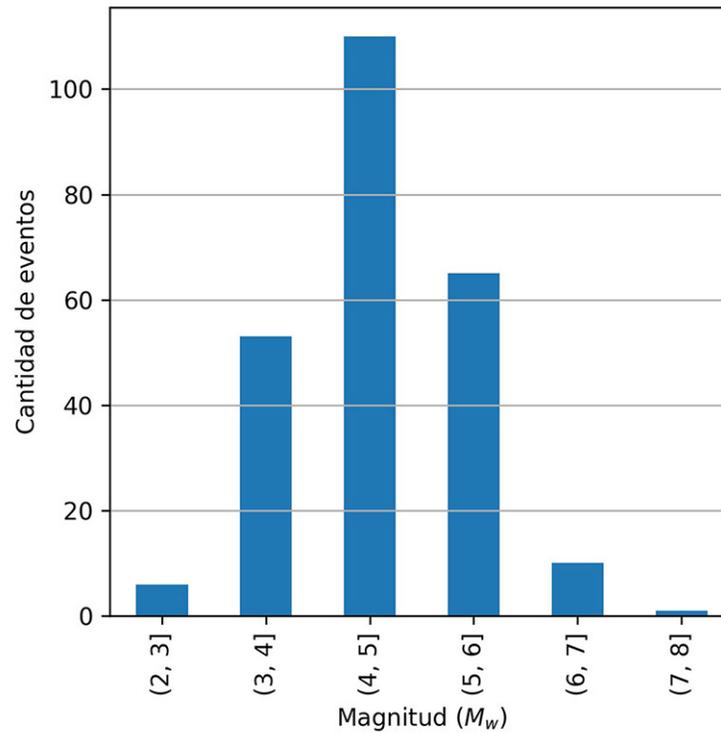


Fig. 1: Distribución del número de sismos por rangos de magnitud correspondientes a los registros analizados.

eventos con profundidades entre 20 y 40 km y cerca de 31 sismos con profundidades entre 40 y 80 km. En los demás rangos de profundidad diferenciados el número de eventos es inferior a 3.

Para la clasificación de eventos atendiendo al régimen tectónico se han seguido los criterios de Arroyo-Solórzano y Linkimer (2021) y RSN (2021), quienes tomaron en consideración los parámetros sismológicos correspondientes, evitando así asignar el tipo de fuente basándose exclusivamente en la ubicación del hipocentro. El cuadro 2 muestra el número de eventos que se clasifican en cada régimen. Se evidencia un predominio de eventos de origen cortical (113 en total). Seguidamente, se clasifican 89 eventos como de subducción somera o interplaca y solamente 43 corresponden a subducción profunda o intraplaca. Cabe recalcar que los eventos de origen cortical ocurridos dentro de la Placa de Cocos, no fueron tomados en cuenta para este estudio, según los filtros ya descritos.

En el siguiente mapa (Fig. 3) se muestra la distribución espacial de los eventos, se hace distinción entre el tipo de fuente y su magnitud. Se observa como los eventos de subducción interfase se ubican a lo largo de la zona de subducción, la Fosa

Cuadro 2

Distribución de eventos según régimen tectónico.

Región tectónica	Número de eventos	Porcentaje del total	Rango de magnitudes (M_w)
Corticales	113	46 %	2,8 – 6,2
Subducción interplaca o “interface”	89	36 %	2,7 – 7,6
Subducción intraplaca o “inslab”	43	18 %	3,4 – 6,6
Total	245	100 %	-

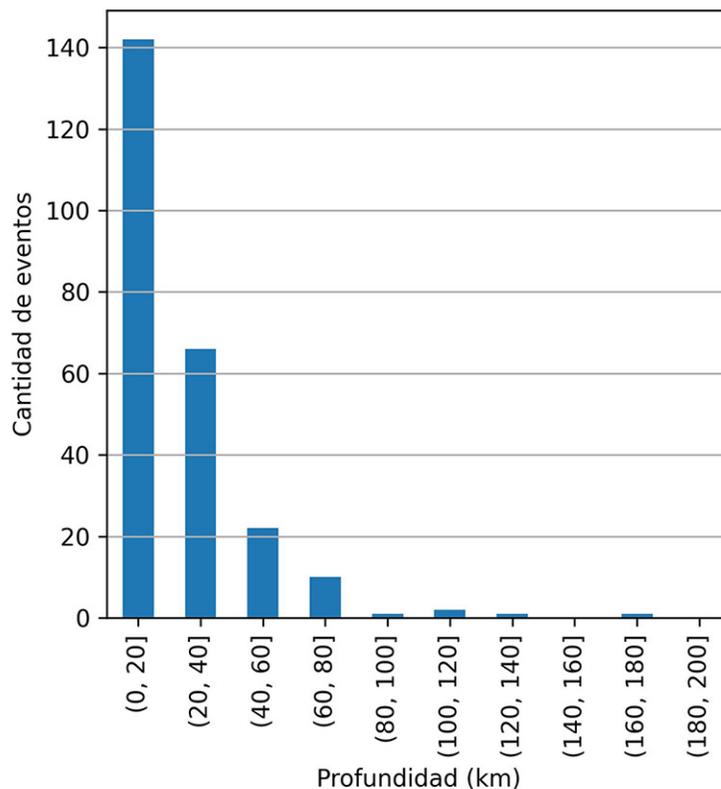


Fig. 2: Distribución del número de eventos por rangos de profundidad correspondientes a los registros analizados.

Mesoamericana, cerca de la costa Pacífica, mientras los epicentros de los de subducción intraplaca se ubican a lo interno del territorio nacional, entre la costa pacífica y la zona central. Los eventos corticales se presentan distribuidos en todo el territorio.

Distribuciones de los registros

Se ha analizado también la distribución de registros resultantes después de aplicar los filtros mencionados (3192 en total), atendiendo a los diferentes criterios considerados.

Primeramente, se analiza la distribución de registros por eventos, mostrando los resultados en la figura 4. Se observa que la mayor parte de los eventos, aproximadamente 160 de 245 sismos (65 %), han generado menos de 10 registros. Esto tiene sentido, ya que la mayor cantidad de eventos son de magnitudes bajas y moderadas y principalmente de origen cortical, por lo que son registrados por pocas estaciones. Además 66 eventos han generado entre 10 y 30 acelerogramas y hay muy pocos sismos con más de 30 registros, lo que se explica porque corresponden a sismos de magnitudes altas, que son poco frecuentes pero que generan altas intensidades de movimiento y, por lo tanto, son registrados por muchos instrumentos, aún ubicados a distancias lejanas de la zona epicentral.

En la siguiente figura (Fig. 5), se muestran tres sismos representativos de magnitudes bajas, medias y altas, para de tipo de fuente cortical. Se aprecia como el sismo de magnitud baja produce movimiento, y por lo tanto registros, en un radio de hasta 40 km, mientras que el sismo de magnitud media cubre un radio de 80 km con una cantidad considerable de registros, bajando drásticamente para distancias entre los 80 km y 200 km. Lo anterior puede deberse a que para largas distancias, las

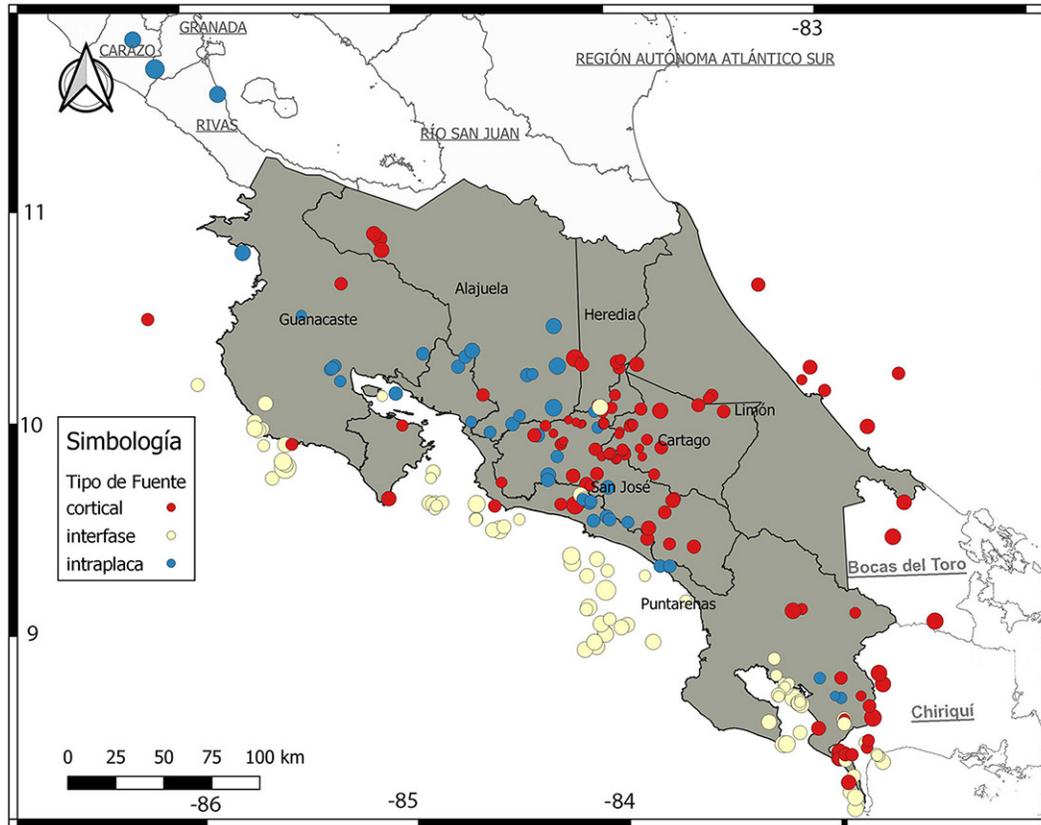


Fig. 3: Distribución espacial de los eventos estudiados. En rojo los de tipo de fuente cortical, en amarillos los de subducción interfase y en azul los de subducción intraplaca. El diámetro del círculo es en función de su magnitud.

estaciones que lograron registrar el evento corresponden a sitios con niveles de amplificación importantes. Como era de esperarse, el sismo de magnitud alta genera registros en distancias mayores, hasta los 180 km, e inclusive algunos en distancias hasta los 220 km.

Seguidamente se analiza la distribución de registros atendiendo a la magnitud de los correspondientes eventos, mostrando los resultados en la figura 6. Obviamente se observan semejanzas con las distribuciones encontradas para los eventos; el mayor número se encuentra para magnitudes M_w moderadas entre 4 y 6 y en bastante menor cantidad para magnitudes inferiores a 4 y superiores a 6 M_w (Fig. 6). La explicación es análoga a la expuesta anteriormente en el caso de la distribución de eventos.

Debe hacerse notar que en el caso de la distribución de registros, la mayoría se encuentran en el rango de magnitudes M_w de 5 a 6 (cerca de 1300 registros) y no en el rango de 4 a 5, como se observa en el caso de los eventos sísmicos. Esto tiene sentido, ya que los sismos de magnitudes mayores, aunque sean menos en cantidad, suelen ser registrados por un mayor número de estaciones. Esto es debido a que al ser mayor la energía liberada, ésta se propaga a distancias más largas, encontrando mayor número de estaciones en su recorrido con una cierta intensidad.

Al clasificar los registros según su origen tectónico, se observa en el cuadro 3 una distribución parecida a la encontrada en el caso de los eventos, la mayor parte de los registros corresponde a sismos corticales y de subducción interfase y es muy inferior el número correspondiente a sismos de subducción intraplaca.

Del catálogo de datos (Cuadro 3) se observa que existe menor cantidad de registros asociados a eventos corticales, aun cuando existen más eventos corticales respecto a los identificados como subducción somera. Esto puede deberse a que los sismos de corteza suelen tener profundidades y magnitudes menores que los intraplaca, esto último se precia en la columna de "Rango de magnitudes", por lo que su energía se atenúa a distancias más cortas, abarcando un número menor de posibles

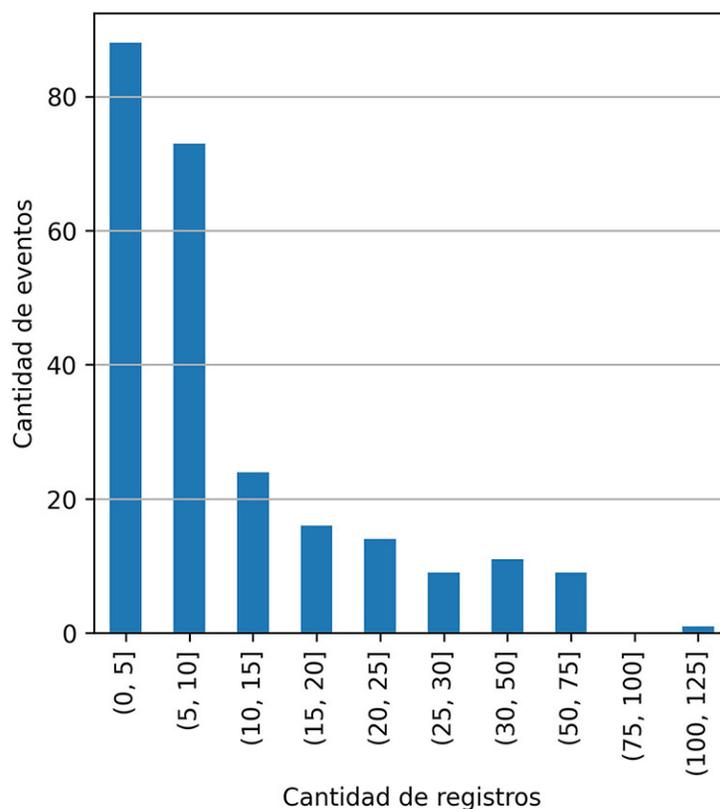


Fig. 4: Distribución de registros según eventos.

sitios de registro y por lo tanto, produciendo una cantidad menor de acelerogramas asociados a cada evento.

La distribución de registros según la distancia hipocentral se muestra en el cuadro 4 y en la figura 7. Se observa que la gran mayoría se concentran entre los 10 y 200 km, con la mayor cantidad entre 60 y 80 km, y ligeras variaciones en los demás intervalos comprendidos en ese rango. Pocos registros se encuentran a distancias mayores a 200 km y muy pocos sobre los 400 km, estos últimos originados por eventos con epicentro en Nicaragua.

La distribución de los datos según el tipo de suelo donde fueron registrados es mostrada en el cuadro 5, donde la clase de suelo corresponde a la clasificación dada por el Código Sísmico de Costa Rica (CFIA, 2010). Para determinar el tipo de suelo de cada sitio, se utilizó lo expuesto en Pinzón, Hidalgo-Leiva, Moya-Fernández, Schmidt-Díaz y Pujades (2021). S1 corresponde a roca o suelo rígido con V_{s30} mayor que 760 m/s, S2 a un suelo medianamente denso a rígido con V_{s30} entre 350 y 760 m/s, S3 a un perfil de arcilla de 6 a 12 m con V_{s30} de 180 a 350 m/s y S4 a un perfil de suelo que contenga un estrato de arcilla suave de más de 12 m de profundidad, con V_{s30} menor que 180 m/s. Es claramente notable la poca cantidad de registros obtenidos en roca o suelo rígido (S1), así como el predominio de los acelerogramas registrados en suelo tipo S3.

En el cuadro 6 se indican las estaciones que aportan a este estudio más de 50 registros, tres de las cuales llegan a un número igual o mayor a 70: SIAC (San José - San Ignacio de Acosta), SFRA (San José - Fráiles) y AFRA (Alajuela- Fráiles). Esto se justifica por características comunes a los tres sitios de esas estaciones: cercanía a varias fuentes sísmicas locales y con actividad significativa, potenciales efectos de amplificación por topografía debido a que se ubican en zonas montañosas y condiciones de sitio que pueden amplificar las ondas (condición de suelo S3 o S4).

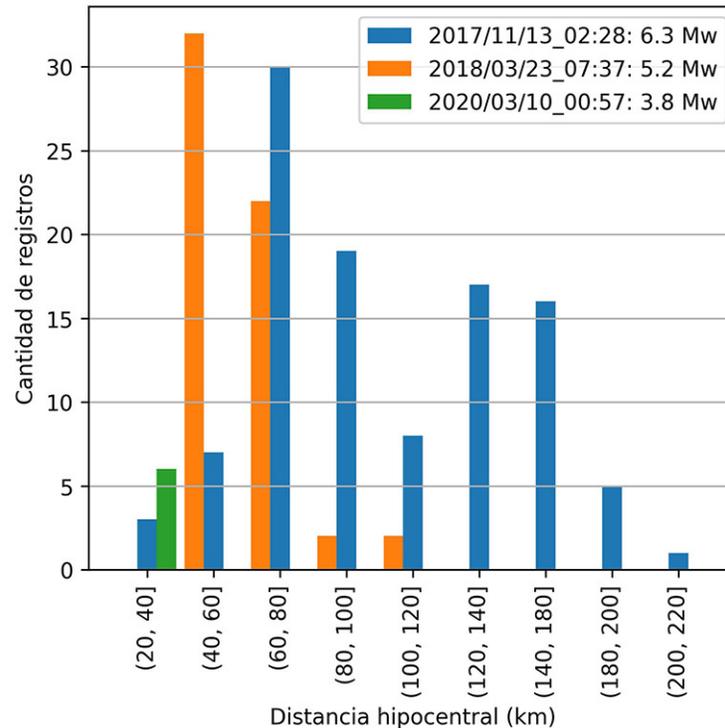


Fig. 5: Distribución de registros para tres eventos representativos de tipo de fuente cortical.

Completitud del catálogo de registros analizados correspondientes al periodo: 1998 a abril 2021

Una de las primeras revisiones que se debe hacer al plantear modelos de atenuación es la completitud del catálogo de datos, analizando las gráficas de magnitud Mw con respecto a alguna medida de distancia, para todos los registros considerados. Para los efectos de esta etapa del estudio, se tomará como medida de distancia la hipocentral.

La figura 8 muestra los gráficos de magnitud vs. distancia separados por región tectónica (Fig. 8a) y según clasificación de suelo (Fig. 8b). En general, se observa una distribución de los datos con pocos registros en la zona de magnitudes altas (Mw superiores a 6) y distancias hipocentrales cortas (inferiores a 30 km), así como escasez de acelerogramas correspondientes a magnitudes bajas (Mw inferiores a 4) y distancias largas (superiores a 100 km). Es usual que estas situaciones se presenten en los catálogos de datos disponibles, ya que por un lado, es poco frecuente registrar sismos de magnitudes altas en el campo cercano y por otro, los sismos de magnitudes bajas se atenúan a distancias cortas ya que, debido a las dimensiones de la falla desplazada, la energía mecánica liberada se da principalmente en forma de altas frecuencias, las cuales se atenúan rápidamente en función de la distancia., por lo que es poco probable registrarlos a distancias superiores a 100 km.

Al separar los datos según su región tectónica (Fig. 8a), se evidencia que muchos de éstos corresponden a magnitudes inferiores a 6 y distancias cortas y moderadas, entre 2 y 100 km (círculos azules), lo cual tiene sentido ya que corresponden a sismos corticales, que suelen ser de poca profundidad. En esa misma figura se observa que los registros correspondientes a subducción somera (círculos amarillos) se ubican en una zona intermedia del gráfico, entre 20 y 200 km de distancia hipocentral, mientras que los registros que provienen de sismos por subducción profunda (círculos en verde), aparecen a distancias mayores que 40 km y llegan hasta 500 km, lo que es congruente con lo que se espera para este origen tectónico.

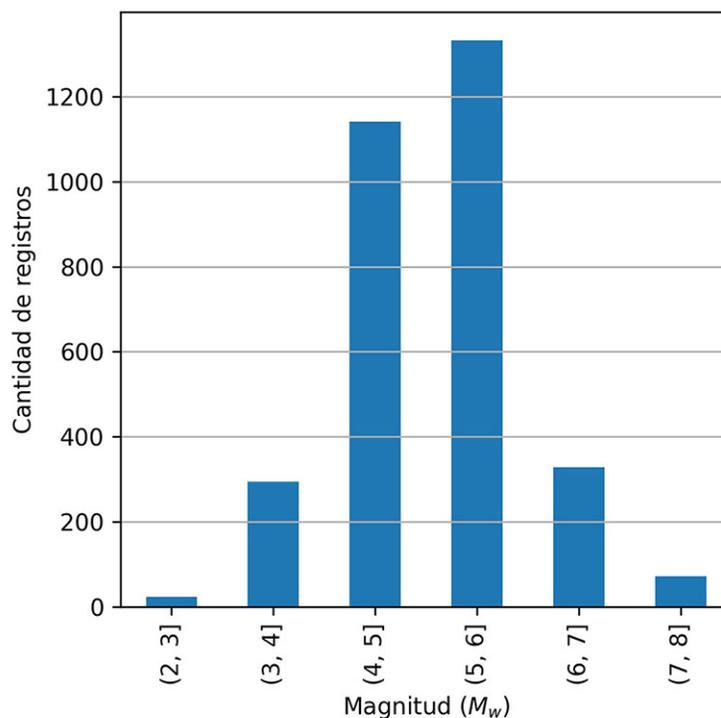


Fig. 6: Distribución de registros según magnitud.

La figura 8b presenta los registros en función del tipo de suelo en el sitio de registro. Del gráfico se puede identificar poca cantidad de datos correspondientes a condición S1 o roca. Sin embargo, no resulta sencillo observar la distribución de datos respecto a los otros tipos de suelo. Esto se verá más adelante.

Separando los datos según régimen tectónico (Fig. 9) se observa que para el caso de registros por eventos corticales (Fig. 9a), los datos van entre magnitudes 3 y 6 Mw. Para eventos de subducción somera (Fig. 9b), los registros corresponden a sismos de magnitudes mayores, en un rango de 3,5 a 7,7 Mw, lo que es concordante con que sismos de origen por subducción suelen tener magnitudes mayores que los debidos a procesos corticales. Esto también se evidencia en la figura 8c, donde procesos de subducción profunda generan sismos con magnitudes altas pero con poca cantidad de registros en superficie, precisamente debido a su gran profundidad.

Al separar los registros disponibles según el tipo de suelo y mostrarlos en figuras distintas (Fig. 10) se evidencia nuevamente la distribución de datos en forma diagonal, con escasez de los mismos en la zona de magnitudes altas a distancias cortas y en la de magnitudes bajas a distancias largas. Además, se percibe claramente la abundancia de datos asociados a suelos de tipo S2 y S3, menor cantidad de registros asociados a suelos tipo S4 y mucho menor número en caso de suelos S1.

Cuadro 3

Distribución de registros según región tectónica de los correspondientes eventos.

Región tectónica	Número de registros	Porcentaje del total	Rango de magnitudes (Mw)
Corticales	1171	37 %	2,8 – 6,2
Subducción interplaca o “interface”	1309	41 %	2,7 – 7,6
Subducción intraplaca o “inslab”	712	22 %	3,4 – 6,6
Total	3192	100 %	

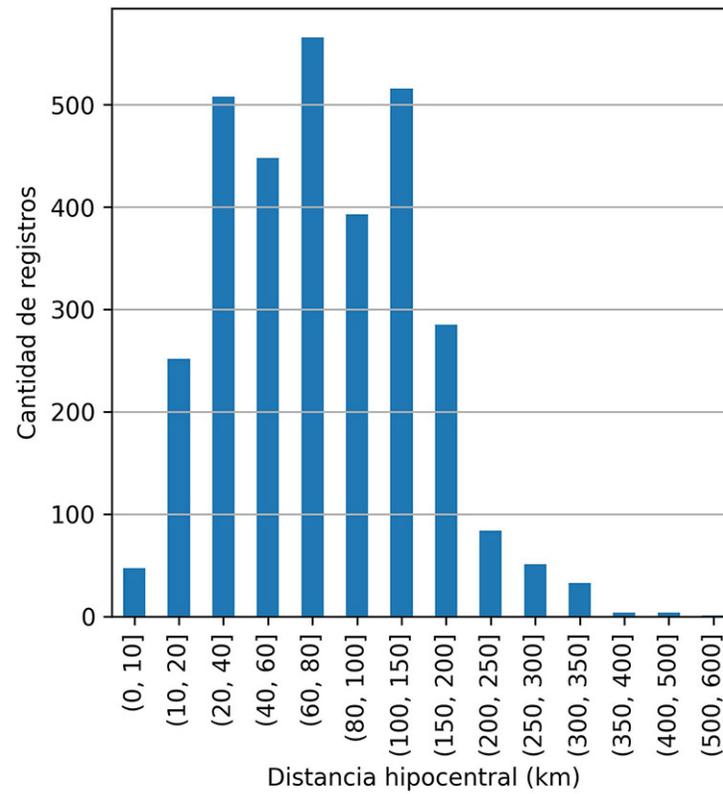


Fig. 7: Gráfico con la distribución de los registros según su distancia hipocentral.

Cuadro 4

Distribución de los registros según su distancia hipocentral.

Distancia hipocentral (rangos en km)	Número de registros
(0, 10]	47
(10,20]	252
(20, 40]	508
(40, 60]	448
(60, 80]	566
(80, 100]	393
(100, 150]	516
(150, 200]	285
(200, 250]	84
(250, 300]	51
(300, 350]	33
(350, 400]	4
(400, 500]	4
(500, 600]	1

Cuadro 5

Distribución de los registros acelerográficos según el tipo de suelo existente en las estaciones de registro, considerado la clasificación de CFIA (2010).

Clase del sitio	Número de registros	Porcentaje del total	Número de estaciones	Porcentaje del total	Rango de magnitudes (Mw)
S1	187	6 %	15	9 %	2,7 – 7,6
S2	943	29 %	53	32 %	2,7 – 7,6
S3	1628	51 %	70	42 %	2,7 – 7,6
S4	434	14 %	27	17 %	3,1 – 7,6
Total	3192	100 %	165	100 %	

Distribución del PGA (aceleración pico del suelo) respecto a la distancia hipocentral

Se presenta en este apartado el análisis de la distribución de los valores de PGA registrados frente a la distancia hipocentral y a la magnitud.

La figura 11 separa los datos según región tectónica y se observa a simple vista que los sismos de origen cortical fueron registrados a distancias más cortas que los de subducción somera y profunda. Este último caso es el que presenta registros a distancias más largas (Fig. 11b).

En cuanto a los valores de PGA registrados, no se identifica una predominancia de valores altos o bajos según el régimen asociado al sismo que los originó. Esto es debido a las diferentes combinaciones de magnitud, distancia y tipo de sitio que se pueden presentar en cada caso, que condicionan la aceleración registrada.

El análisis de las distribuciones según rangos de magnitud, separando los datos por régimen tectónico, es mostrado en la figura 12 y figura 13, permitiendo destacar los resultados que se exponen a continuación. Solo se tienen registros de PGA en campo próximo, para distancias inferiores a 20 km, para sismos corticales, lo que se explica obviamente por las mayores profundidades de los dos regímenes de subducción. En este régimen cortical hay predominio de valores bajos de PGA para magnitudes pequeñas $M_w < 4$ y cortas distancias, $R < 20$ km. Las magnitudes intermedias, M_w entre 4 y 5, dominan también el rango de distancias intermedias con valores de PGA entre 20 y 100 cm/s^2 , mientras que las mayores magnitudes presentan fundamentalmente registros a larga distancia con valores de PGA inferiores a 100 cm/s^2 .

Cuadro 6

Estaciones acelerográficas que aportan más de 50 registros a este estudio.

Código de estación	Número de registros
SIAC	85
SFRA	78
AFRA	70
CCDN	67
CPAR	60
CSRH	58
PPQR	54
PCNH	53
SHTH	53
PLRL	53
SBEB	51

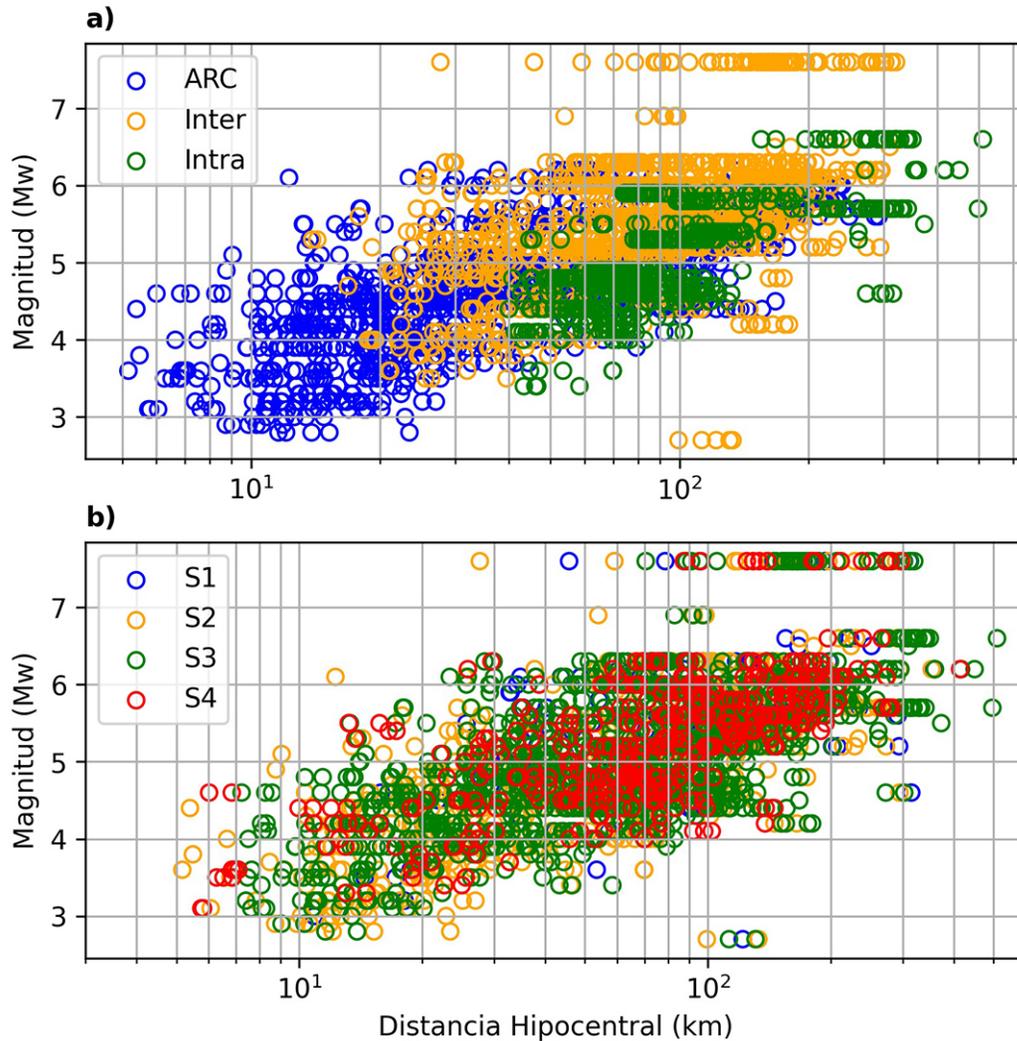


Fig. 8: Magnitud vs distancia hipocentral según región tectónica (a) y tipo de suelo (b).

En el caso de los sismos de subducción intermedia, se aprecian tendencias de valores de PGA en función de la magnitud y la distancia, registrándose las mayores aceleraciones para sismos de $M_w > 7$ aún a largas distancias. Para sismos de subducción profunda los mayores valores de PGA corresponden a magnitudes intermedias, $5 < M_w < 6$ a distancias hipocentrales intermedias, $80 < R < 100$ km.

En la figura 14 se muestran las distribuciones de valores de PGA según tipo de suelo y régimen tectónico. No es fácil observar patrones definidos en cuanto a la distribución de los datos. Sin embargo, se evidencia una vez más la escasez de registros en condición de roca o S1 y una distribución muy amplia de los asociados a S3 en todos los rangos de magnitud. Es evidente además la presencia significativa de datos asociados a suelo tipo S4 (blando) en el rango de magnitudes de 5 y 6 Mw entre 50 y 200 km (Fig. 13d).

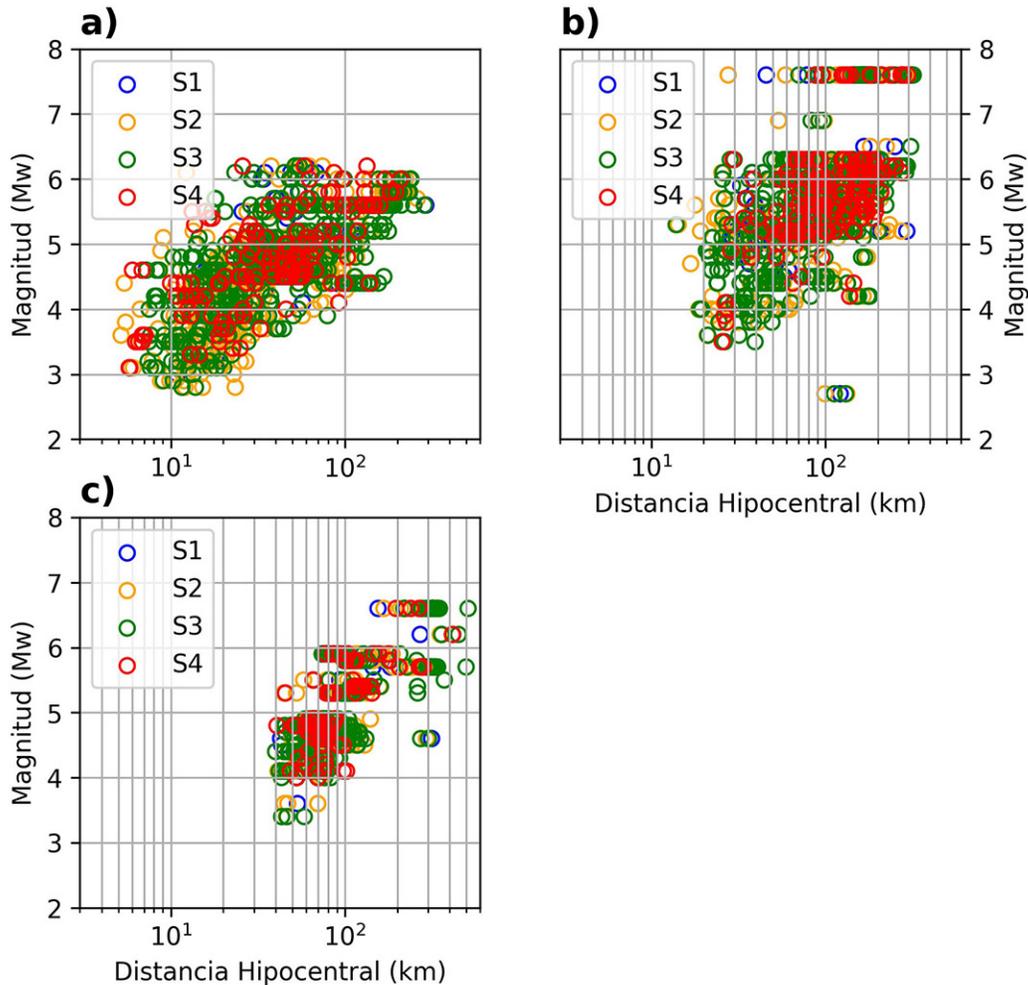


Fig. 9: Detalle de la distribución de datos según región tectónica: corticales (a), subducción somera (b), subducción profunda (c) y tipo de suelo.

Determinación de las medidas de distancia de fuente extendida

Aun cuando hasta el momento, en este estudio se ha escogido la distancia hipocentral para mostrar la forma en que se distribuyen los datos, estudios más recientes de modelos de atenuación utilizan otras medidas que representan de mejor manera esta variable, conocidas como medidas de distancia de fuente extendida, sobre todo para sismos con magnitudes altas (Douglas y Edwards, 2016), superiores a 6,5 Mw para los que no es válido considerar ruptura puntual.

Estas distancias son:

- i. R_{RUP} que se define como la distancia más corta desde el sitio a la zona de ruptura.
- ii. R_{JyB} , definida como la distancia más corta a la proyección en superficie de la zona de ruptura.

La comparación esquemática de las distancias anteriores respecto a la epicentral (R_{EPI}) y la hipocentral (R_{HYPO}) se muestra en la siguiente figura (Fig. 15), adaptada de Villaverde, (2009).

Para sismos con magnitudes moderadas y bajas, la fuente puede ser modelada como puntual, debido a que el área de ruptura es pequeña en relación a la distancia entre esta y las estaciones, por lo que la distancia R_{HYPO} es muy semejante a la

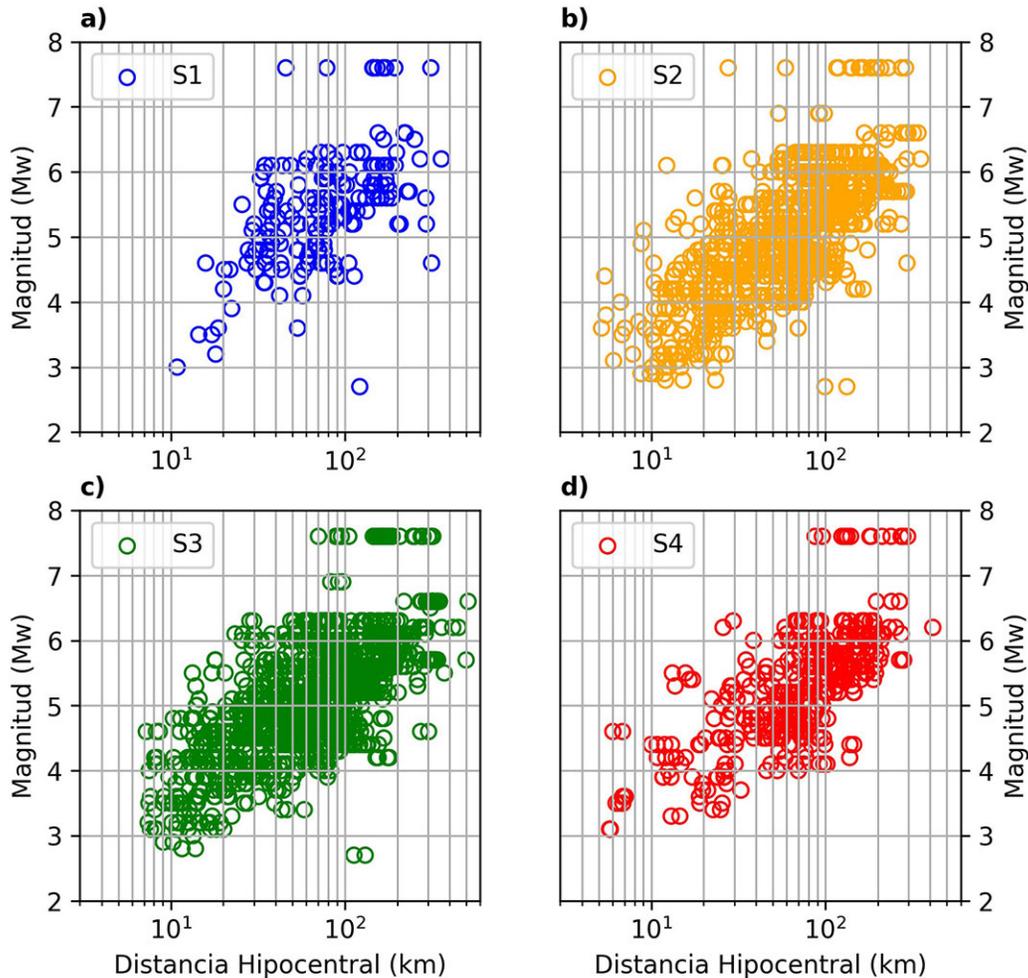


Fig. 10: Detalle de la distribución de datos por tipo de suelo: S1 (a), S2 (b), S3 (c) y S4 (d).

R_{RUP} y la R_{EPI} a la $R_{J\&B}$. Sin embargo, para sismos de magnitudes altas, estas distancias se diferencian significativamente ya que el área de ruptura es grande.

Las distancias R_{EPI} y R_{HYPO} son relativamente fáciles de obtener a partir de las coordenadas de la estación, de la profundidad del foco y de su proyección en superficie. Sin embargo, las distancias R_{RUP} y $R_{J\&B}$ son más complejas de calcular ya que para su obtención se requieren además de los parámetros ya mencionados, otros parámetros sismológicos específicos de cada evento, tales como como: mecanismo focal, área de ruptura y el ángulo de buzamiento del plano de falla.

En vista de la ausencia de estos datos para la mayoría de los sismos disponibles, se utilizó la metodología propuesta por Thompson y Worden (2018), en la que una vez obtenida la magnitud y profundidad de cada evento, se calcula el tamaño de la zona de ruptura usando relaciones empíricas. Cada estación acelerográfica se ubica a un ángulo y distancia específica con respecto al epicentro. Ese ángulo “theta” debe ser calculado, así como la R_{EPI} . El programa de cómputo creado por los autores permite obtener las razones R_{JB}/R_{EPI} y R_{RUP}/R_{EPI} para cada ángulo “theta” que varía entre 0 y 2π y cada distancia epicentral, entre 0 y 1000 km. Esto genera una matriz a partir de la cual se pueden leer los cocientes mencionados, en función de “theta” y R_{EPI} .

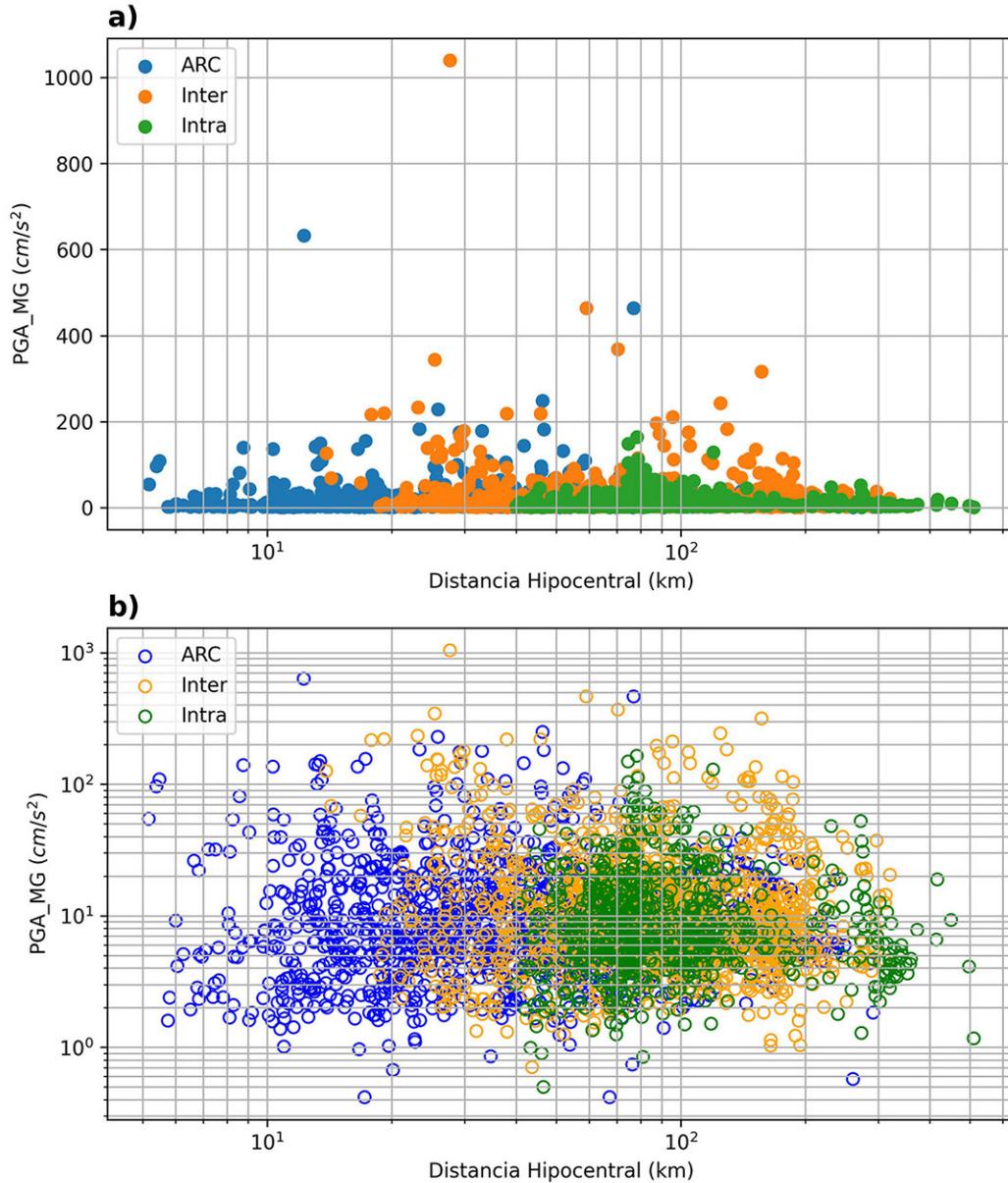


Fig. 11: Distribución de valores de PGA registrados respecto a distancia hipocentral según régimen tectónico, en escala lin-log (a) y en escala log-log (b). Tipo de fuente: ACR=cortical, Inter=subducción interfase, Intra=subducción intraplaca.

Como resultados, las figuras 16a y 16b muestran la comparación entre las distancias R_{JB} y R_{RUP} respecto a las distancias epicentral e hipocentral, respectivamente, calculadas a partir del procedimiento anteriormente descrito.

Los sismos considerados son aquellos del catálogo que tienen una magnitud igual o superior a 6,5 Mw. Sus características se citan en el cuadro 7:

En la figura 16a se aprecia que para el sismo de 1999 (Mw 6.9), todas las distancias R_{JB} son menores a las epicentrales, para el de 2012 (Mw 7,6) que es el de mayor magnitud de todos, las distancias R_{JB} son inferiores hasta los 300 km aproximadamente e igualan o superan ligeramente a la epicentral a partir de esa distancia. Por otro lado, el sismo de 2014 (Mw 6,6),

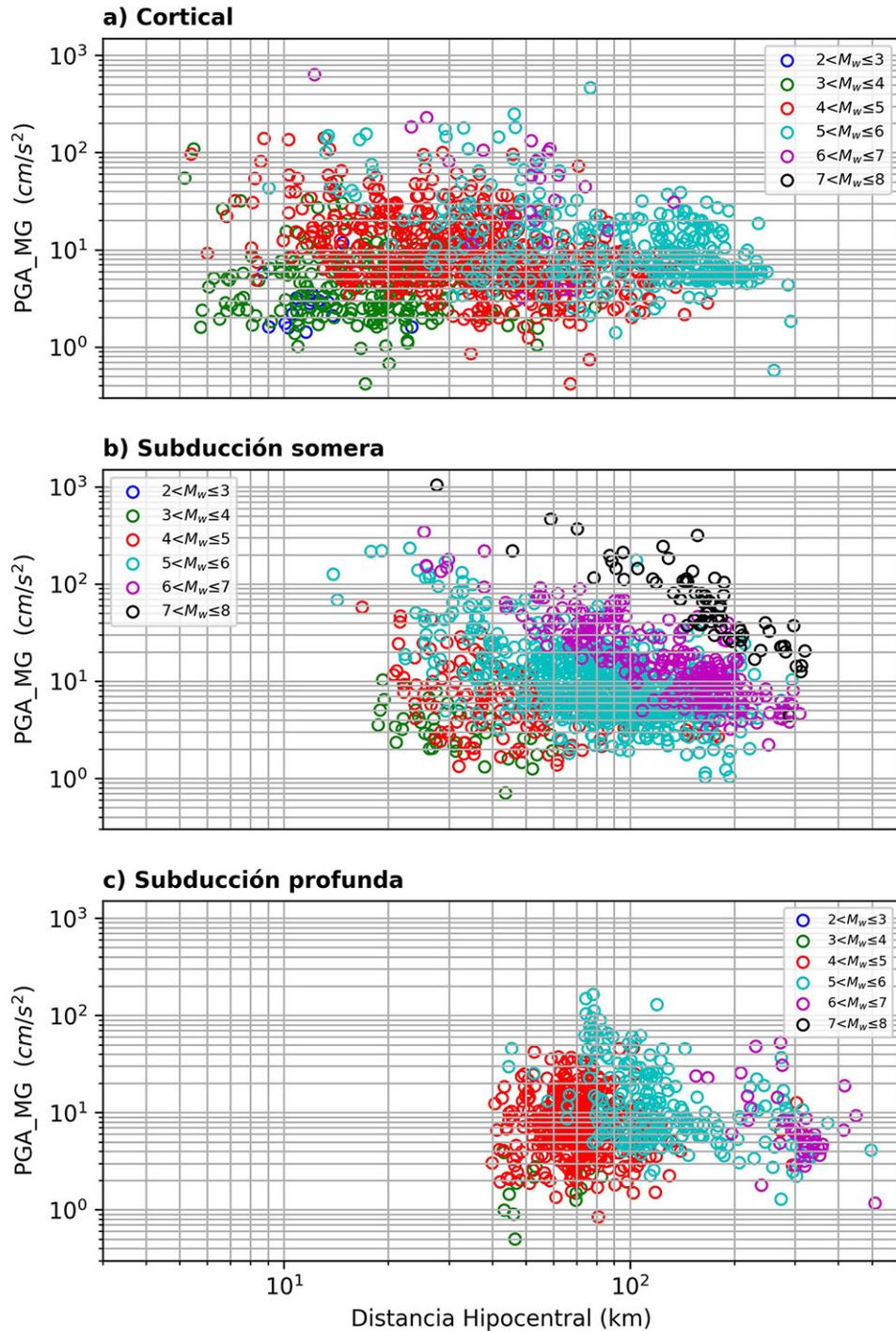


Fig. 12: Detalle de distribución de valores de PGA según régimen tectónico, con indicación del rango de magnitud. Registros de origen cortical (a), subducción somera (b) y subducción profunda (c).

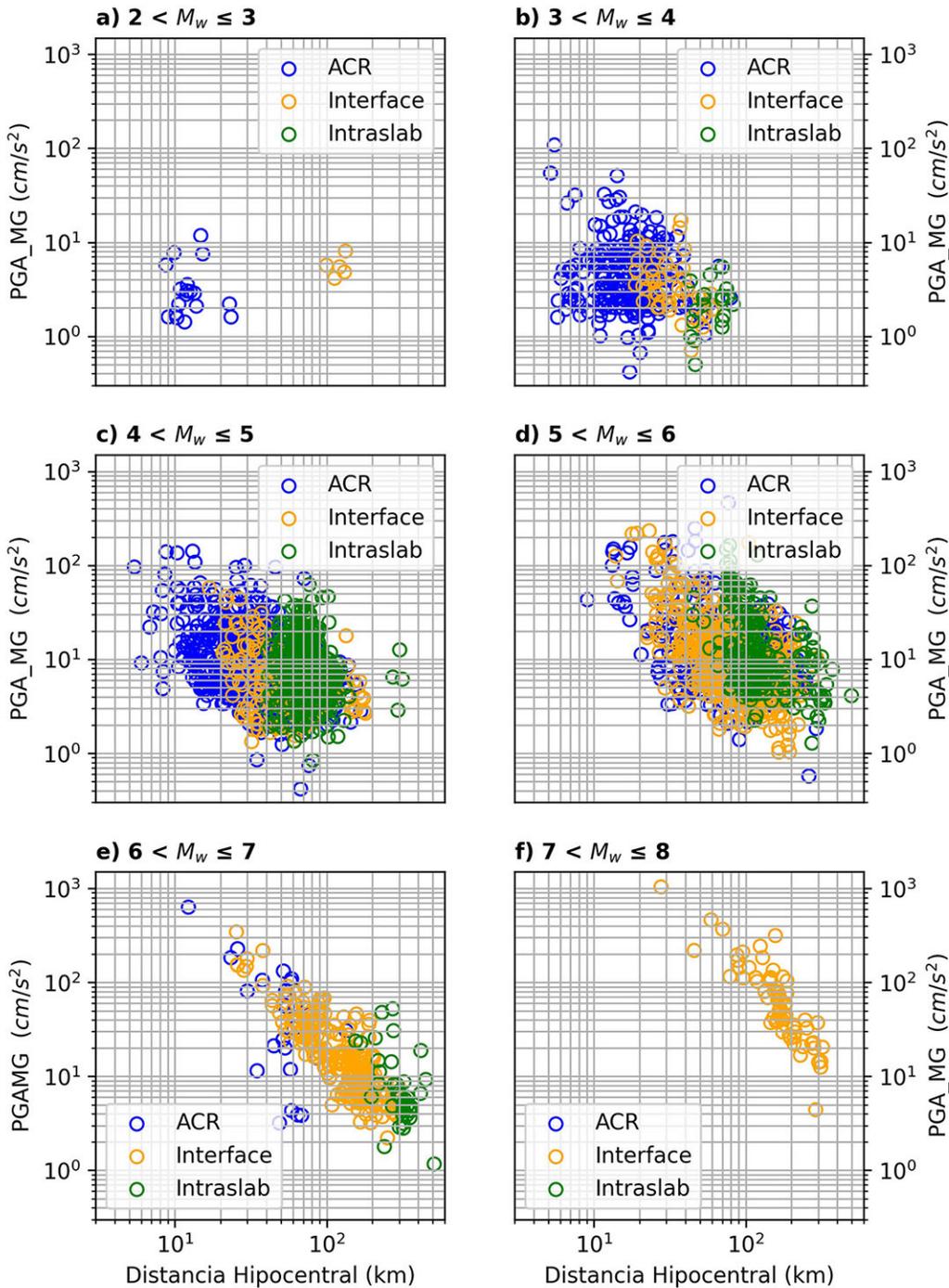


Fig. 13: Detalle de distribución de valores de PGA según rangos de magnitudes, con indicación del régimen tectónico. ACR = cortical; interface = subducción somera; intraslab = subducción profunda. De 2 a 3 Mw (a), de 3 a 4 Mw (b), de 4 a 5 Mw (c), de 5 a 6 Mw (c), de 6 a 7 Mw (d) y de 7 a 8 Mw (f).

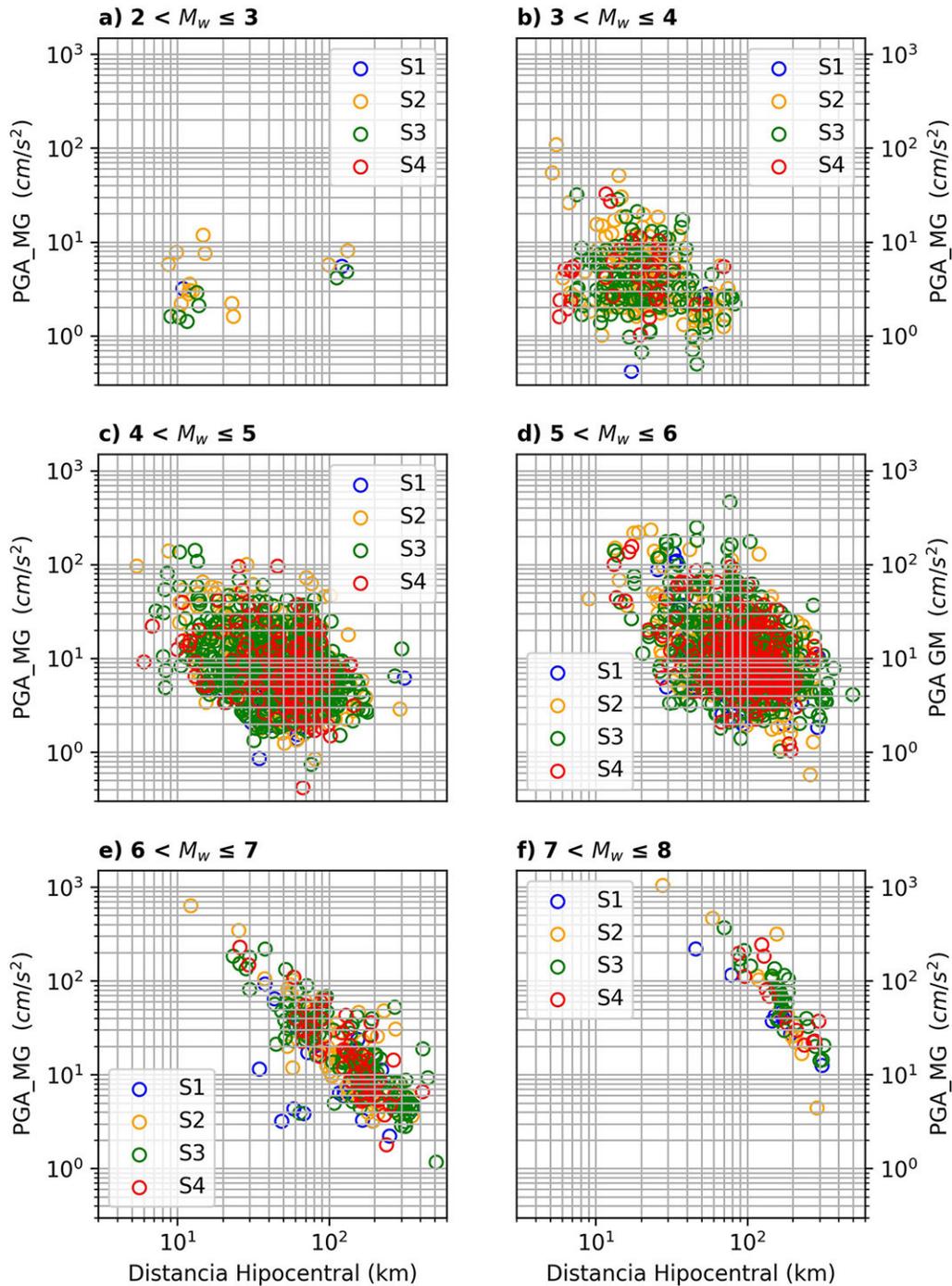


Fig. 14: Detalle según rangos de magnitudes y tipos de suelo. De 2 a 3 Mw (a), de 3 a 4 Mw (b), de 4 a 5 Mw (c), de 5 a 6 Mw (c), de 6 a 7 Mw (d) y de 7 a 8 Mw (9).

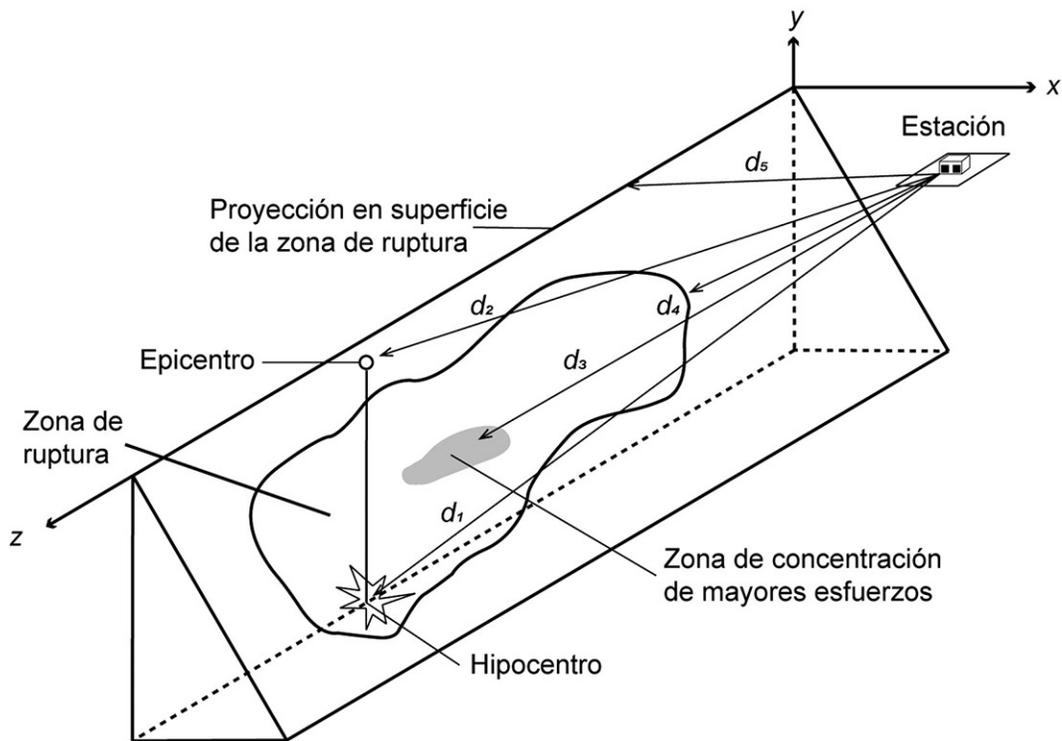


Fig. 15: Representación esquemática de medidas de distancia entre una estación y la fuente sísmica. d_1 = distancia hipocentral o focal (R_{HYPO}); d_2 = distancia epicentral (R_{EPI}); d_3 = distancia a la zona de concentración de mayores esfuerzos; d_4 = distancia más cercana a la zona de ruptura (R_{RUP}); d_5 = distancia más corta a la proyección en superficie de la zona de ruptura ($R_{J&B}$). Adaptada de Villaverde (2009).

que es de foco muy profundo, muestra valores semejantes o ligeramente superiores de la R_{JB} respecto a la R_{EPI} . En el caso del sismo de 2013 (Mw 6.5), tanto la R_{JB} como la R_{EPI} resultan ser muy semejantes en los pocos registros que aporta este evento.

En la figura 16b, en la que se comparan las distancias R_{RUP} con las R_{HYPO} , se evidencia un comportamiento muy semejante al del caso anterior: para los sismos de 1999 y 2012, las distancias más cortas a la zona de ruptura (R_{RUP}) muestran valores inferiores que las distancias hipocentrales, lo cual se explica porque la R_{HYPO} suele ser la mayor de todas las medidas de distancia definidas para sismos (Villaverde, 2009). Para el caso del sismo de 2014, las R_{RUP} igualan o superan ligeramente a las R_{HYPO} y para el ocurrido en el 2013, ambas distancias son prácticamente idénticas.

La distribución de los datos del sismo del 2014 para distancias mayores a 200 km es llamativa, ya que no forman una nube de puntos, sino grupos de datos alineados horizontalmente. La razón podría ser la siguiente: el hipocentro de este evento está localizado en Nicaragua, con una profundidad de 131 km, lo cual hace que varias de las distancias en superficie entre grupos de estaciones distantes del epicentro (e.g. Valle Central de Costa Rica) sean pequeñas en comparación a las distancias epicentrales e hipocentrales. Estas resultan entonces bastante similares para estos grupos de estaciones.

Conclusiones

Uno de los componentes más importantes para el cálculo de la amenaza sísmica en una región corresponde a los modelos de atenuación. Con base en estos es posible cuantificar la forma en que varían los parámetros de intensidad sísmica (variable dependiente), respecto a una serie de variables independientes, representadas por la magnitud, la distancia y el tipo de suelo en el sitio de registro, tipo de fuente del sismo, mecanismo focal, entre otras.

Cuadro 7

Características principales de los sismos cuyas magnitudes superan 6,5 Mw.

Sismo (año/mes/día - hora/minuto)	Profundidad (km)	Mag (Mw)	Región tectónica
1999/08/20 - 10:02	22	6,9	interplaca
2012/09/05 - 14:42	9	7,6	interplaca
2013/06/15 - 17:34	36	6,5	interplaca
2014/04/11 - 20:29	131	6,6	intraslab

Estos modelos pueden sufrir variaciones significativas a lo largo del tiempo, ya que su obtención depende de la calidad y cantidad de los registros acelerográficos disponibles al momento de su generación. Los acelerogramas se pueden obtener a partir de una densa cantidad de instrumentos distribuidos en una región (red acelerográfica), los cuales registran la intensidad del movimiento del suelo ante la ocurrencia de sismos de magnitudes pequeñas, moderadas y grandes. Estos últimos son poco frecuentes, por lo que suelen necesarios ser varios años de observación y registro para lograr una base de datos robusta.

Numerosos modelos de atenuación se han propuesto en los últimos 30 años para Costa Rica y para América Central, contabilizándose 8 modelos que preceden a esta investigación.

La cantidad de datos acelerométricos disponible en la actualidad justifica la actualización de las ecuaciones de atenuación existentes. El más reciente de los modelos anteriores fue propuesto en 2014 y utilizó registros hasta el año 2010, fue desarrollado partiendo de una base de datos que contaba, en promedio, con 2,29 registros por cada sismo. En la actualidad, esa proporción ha aumentado a 13 registros por evento.

En esta investigación se ha partido de una base de datos compuesta inicialmente por 3981 registros provenientes de la red acelerográfica del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica, correspondientes a 407 eventos cuyos parámetros sismológicos fueron determinados por la Red Sismológica Nacional de la Universidad de Costa Rica.

Sobre esa base de datos inicial se aplicaron algunos criterios de selección, a fin de extraer los datos de mejor calidad. Estos criterios fueron: eliminación de registros analógicos; consideración solo de registros correspondientes a eventos que al menos fueran registrados por 3 estaciones, con intervalo de muestreo de 200 muestras por segundo, y correspondientes a eventos de magnitud mínima Mw de 2,5; y finalmente la eliminación de registros de sismos de origen cortical generados en la Placa de Cocos y en la Zona de Fractura de Panamá (ZFP). Lo anterior permitió seleccionar 3192 registros correspondientes a 245 eventos.

El trabajo aquí presentado se ha focalizado en el análisis descriptivo de esta base de datos, obteniendo las distribuciones de los registros, de los eventos y de los valores de PGA, con respecto a la magnitud Mw, distancia epicentral e hipocentral, tipo de suelo y régimen tectónico.

Al analizar la distribución de los eventos respecto a la magnitud, se observa que más de 100 sismos tienen magnitudes Mw comprendidas entre 4 y 5; más de 60 sismos corresponden a Mw entre 5 y 6 y cerca de 55 eventos presentan Mw entre 3 y 4. Respecto a la profundidad (z), 140 eventos son superficiales, con $z < 20$ km, 65 sismos se encuentran en el rango $20 < z < 40$ km y solamente 31 eventos corresponden a $z > 40$ km. Esto se relaciona con el hecho de que el 46% de los sismos considerados se asocian a procesos corticales, un 36% a subducción somera o “*interface*” y solamente un 18% a subducción profunda o “*in slab*”.

Al referirnos propiamente a la distribución de los registros sísmicos seleccionados, a 66 eventos se les asocia entre 10 y 30 registros, lo que resulta muy conveniente en estudios de esta naturaleza, ya que permite un mejor análisis de la atenuación que sufre cada evento. Respecto a la magnitud, la mayoría de los registros se asocian a sismos con Mw entre 4 y 6. En lo referente al régimen tectónico, la cantidad de acelerogramas asociados a eventos corticales y a subducción somera es semejante, con un 37% y un 41%, respectivamente, del total de registros analizados, siendo menor el porcentaje para subducción profunda (22%).

Respecto a la distancia hipocentral, la gran mayoría de los registros se obtuvieron entre los 20 y 150 km. Al considerar el tipo de suelo para la clasificación de los datos, es claramente notable la poca cantidad asociada a S1 según criterios del CSCR-2010. Además, predominan los tipo S3 según esa misma referencia.

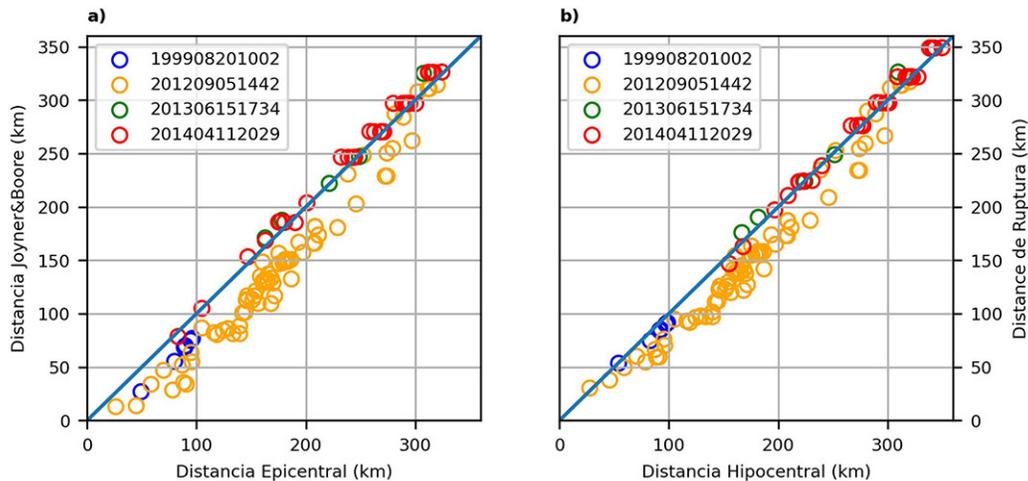


Fig. 16: Comparación entre distintas definiciones de distancia para sismos con magnitudes mayores o iguales que 6,5 Mw. R_{EPI} respecto a $R_{J\&B}$ (a) y R_{HYPO} respecto a R_{RUP} (b).

Si se analiza la distribución de los datos de magnitud ligada a cada registro vs. la distancia hipocentral, se observa una distribución con pocos registros en la zona de magnitudes altas (M_w superiores a 6) y distancias hipocentrales cortas (inferiores a 30 km), así como escasez de acelerogramas correspondientes a magnitudes bajas (M_w inferiores a 4) y distancias largas (superiores a 100 km).

En cuanto a la distribución de registros según rango de magnitud y régimen tectónico, se observa que para magnitudes M_w inferiores a 4, predominan registros de sismos de origen cortical, para M_w entre 4 y 6 predominan los registros de sismos de subducción profunda y para M_w superiores a 6 corresponden principalmente a subducción somera.

Uno de los retos afrontados en esta investigación fue utilizar medidas de distancia que representen mejor ese término en los modelos de atenuación, que la hipocentral o la epicentral. Al seguir la metodología propuesta por Thompson y Worden (2018), para 4 sismos cuya magnitud M_w es superior a 6,5, en general se observa que la distancia $R_{J\&B}$ (distancia más corta a la proyección en superficie de la zona de ruptura) es inferior a la R_{EPI} (distancia epicentral) y R_{RUP} (distancia más corta a la zona de ruptura) es inferior a R_{HYPO} (distancia hipocentral). Lo anterior confirma lo observado por otros autores y por la definición misma de estas diferentes medidas de distancia. El único sismo que muestra un comportamiento distinto al esperado tiene la particularidad de ser muy profundo (131 km) y distancias epicentrales bastante largas, ya que es un sismo con epicentro en territorio nicaragüense.

En una etapa posterior a esta investigación, se propondrán modelos de atenuación derivados a partir de los datos acelerográficos descritos en este estudio, los cuales complementarán los utilizados actualmente en el cálculo de la amenaza sísmica probabilística para el país. De esta manera, se aportarán insumos a la normativa vigente, contribuyendo a una caracterización actualizada del fenómeno sísmico en Costa Rica que tome en cuenta la gran cantidad de registros acelerográficos con que se cuenta a partir del 2006. Esto conllevará a lograr diseños de estructuras y sistemas sismorresistentes cada vez más eficientes y con un mejor desempeño ante la ocurrencia de sismos.

Financiamiento

Esta investigación se financió con fondos provenientes de: (1) Transitorio I de la Ley Nacional 715 de Emergencias (N° 8488) de la República de Costa Rica, (2) “Fondo de Mentoría 2020” de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica.

Agradecimientos

Los autores agradecen la labor de los revisores, la Dra. Belén Benito y el Dr. Esteban Chaves, por sus observaciones, comentarios y sugerencias, que elevaron la calidad de este documento. Además, a los estudiantes Juan Carlos Araya y Osvaldo Villalobos por su ayuda dando formato a este documento.

Referencias bibliográficas

- Arroyo-Solórzano, M., y Linkimer, L. (2021). Spatial variability of the b-value and seismic potential in Costa Rica. *Tectonophysics*, 814. doi: 10.1016/j.tecto.2021.228951
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica (2006). *Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo No 8488*. Recuperado de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=56178
- Bommer, J. J., Hernández, D. A., Navarrete, J., y Salazar, W. (1996). Seismic hazard assessment for El Salvador. *Geofísica Internacional*, 35(3), 227–244.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). (2010). *Código sísmico de Costa Rica 2010*. Recuperado de <https://www.codigosismico.or.cr/descargas/CSCR2010.pdf>
- Climent, Á., Taylor, W., Strauch, W., Villagrán, M., Dahle, A., y Bungum, H. (1994). Spectral strong motion attenuation in Central America. Technical report No. 2-17. Kjeller: NORSAR. Recuperado de <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/86657/1994%20Climent%20et%20al%20SpectralStrongMotionAttenuationinCentralAmericaNORSAR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dahle, A., Climent, Á., Taylor, W., Bungum, H., Santos, P., Ciudad-Real, M., Lindholm, C., Strauch, W., y Segura, F. (1995). New spectral strong motion attenuation models for Central America. Presentado en *Proceedings of the 5th International Conference on Seismic Zonation* (Vol. II, pp. 1005–1012). Nantes: Ouest Editions.
- Douglas, J., y Aochi, H. (2008). A survey of techniques for predicting earthquake ground motions for engineering purposes. *Surveys in Geophysics*, 29(3), 187–220. doi: 10.1007/s10712-008-9046-y
- Douglas, J., y Edwards, B. (2016). Recent and future developments in earthquake ground motion estimation. *Earth-Science Reviews*, 160, 203–219. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.07.005
- Moya-Fernández, A. (2017). Sistema de monitoreo acelerográfico del Laboratorio de Ingeniería Sísmica. *Revista Ingeniería*, 28(1), 96-114. doi: 10.15517/ri.v28i1.30874
- Pinzón, L. A., Hidalgo-Leiva, D. A., Moya-Fernández, A., Schmidt-Díaz, V., y Pujades, L. G. (2021). Seismic site classification of the Costa Rican Strong-Motion Network based on Vs30 measurements and site fundamental period. *Earth Sciences Research Journal*, 25(4), 383–389. doi: 10.15446/esrj.v25n4.93927
- Red Sísmológica Nacional de Costa Rica (RSN). (2021). *The Costa Rica National Seismological Network Catalog during 1975-2021*. doi: doi.org/10.15517/TC
- Schmidt-Díaz, V. (2010). *Avances para estudios del riesgo sísmico a escala regional y local: aplicación a América Central y a la Bahía de Cádiz (sur de España)* (Tesis de doctorado inédita). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Schmidt-Díaz, V. (2014). Ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para América Central, con datos de 1972 a 2010. *Revista Geológica de América Central*, 50, 7–37. doi: 10.15517/rgac.v0i50.15106
- Schmidt-Díaz, V., Dahle, A., y Bungum, H. (1997). *Costa Rican spectral strong motion attenuation. Technical report*. Kjeller: NORSAR.
- Singh, S. K., Gutiérrez, C., Arboleda, J., y Ordaz, M. G. (1993). *Peligro sísmico en El Salvador. Reporte técnico 74*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

- Taylor, W., Santos, P., Dahle, A., y Bungum, H. (1992). Digitalization of strong motion data and estimation of PGA Attenuation. *NORSAR Technical Report*, 24.
- Thompson, E. M., y Worden, C. B. (2018). Estimating rupture distances without a rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(1), 371–379. doi: 10.1785/0120170174
- Villaverde, R. (2009). *Fundamental concepts of earthquake engineering* (1ª ed., Vol. 1). Boca Raton, Florida: CRC Press.