

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y
Cartografía



**Enfoques metodológicos y modelización
de fallas activas para mejorar las
estimaciones de la peligrosidad sísmica.
Aplicación en Centroamérica (CA)**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Carlos José Gamboa Canté

Máster Oficial en Análisis del Riesgo Sísmico mediante Tecnologías
Geoespaciales

Madrid, septiembre 2025



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros en
Topografía, Geodesia y Cartografía

Doctorado en Ingeniería Geomática

**Enfoques metodológicos y modelización
de fallas activas para mejorar las
estimaciones de la peligrosidad sísmica.
Aplicación en Centroamérica (CA)**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Carlos José Gamboa Canté

Máster Oficial en Análisis del Riesgo Sísmico mediante Tecnologías
Geoespaciales

Bajo la dirección de:

Dra. María Belén Benito Oterino

Madrid, septiembre 2025

Título: Enfoques metodológicos y modelización de fallas activas para mejorar las estimaciones de la peligrosidad sísmica. Aplicación en Centroamérica (CA)

Autor: Carlos José Gamboa Canté

Programa de Doctorado: Doctorado en Ingeniería Geomática

Dirección de tesis:

Dra. María Belén Benito Oterino, Doctora en Ciencias Físicas,
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Topografía, Geodesia y Cartografía
(Directora)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

Esta tesis ha sido parcialmente financiada por Fundación Carolina a través de la beca del *Programa de Doctorado en la convocatoria 2021-2022*.



A mi padre, madre y hermana.
Por siempre apoyarme durante todo este proceso.
Lo logramos.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutora, Dra. María Belén Benito Oterino, por la orientación, apoyo y dedicación a lo largo de todo el proceso de esta tesis doctoral. Gracias por todo el conocimiento que me ha transmitido durante todos estos años y por impulsar en mí el deseo de seguir investigando los terremotos.

Seguidamente, quiero agradecer especialmente a mi compañera, Alicia Rivas Medina. Por darme un soporte, brindarme su conocimiento y apoyo para seguir adelante. Gracias por ayudarme a darle un enfoque maravilloso a este trabajo.

Por otro lado, quiero agradecer al ingeniero Omar Gilberto Flores Beltetón, porque desde inicio de mi carrera profesional, me ha apoyado durante todo este proceso para seguir especializándome en el campo de la ingeniería sísmica. Estaré siempre agradecido por el apoyo a la distancia y siempre darme motivos para seguir adelante, ya sea aquí en España o en Guatemala.

Asimismo, agradezco a todo el Grupo de Investigación de Ingeniería Sísmica (GIIS) por darme un gran recibimiento desde el principio y compartir grandes momentos, tanto en lo académico y profesional, como en los momentos de ocio fuera de la oficina. Gracias a cada uno de ellos.

También quiero agradecer a la Fundación Carolina por la ayuda concedida para realizar los estudios de doctorado, a través de la beca del Programa de Doctorado en la convocatoria 2021-2022.

Por supuesto, no puedo dejar de mencionar a mis amigos con quienes estuve recorriendo todo este camino durante mi doctorado: Jonathan Rivera, Mario Arroyo, Eliud Varela, Josseline Madrid, María de la Cruz, Andrea Gómez, Carlos Suazo, Andrei Saavedra. Gracias por cada uno de los buenos momentos que me han dado, los viajes, las reuniones y salidas espontáneas, las cuales han marcado en mi buenos recuerdos.

De igual forma, quiero agradecer a María Alejandra Bermeo Cevallos. Por darme su apoyo incondicional y siempre estar a mi lado en las buenas y en las malas. Porque fuiste un gran apoyo durante todo este proceso y me ayudaste a levantarme en los momentos de adversidad, así como también, a reflexionar en los momentos más decisivos. Estaré siempre agradecido contigo.

Por último, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a toda mi familia. A mis padres, Carlos Gamboa y Corina Canté, por siempre ser el faro de mi vida y

nunca abandonarme, por haber creído en mi desde el principio y en mi capacidad para sacar adelante todo lo que me propongo. A mi hermana, Katherinne Gamboa, por siempre estar a mi lado y estar al pendiente, por celebrar mis logros a pesar de la distancia y darme sus palabras de apoyo para nunca rendirme. A mis tíos, Wilson Canté y William Canté, por siempre estar al pendiente de mí y darme su apoyo incondicional durante todas las etapas de mi doctorado, a pesar de la distancia, gracias a ustedes he llegado hasta aquí.

Abstract

Central America is a tectonically active region, affected by the convergence of the Caribbean, Cocos, Nazca, and North American plates, which makes it a territory of high seismic hazard. Although significant regional efforts have been made in recent decades to assess seismic hazard—such as the RESIS I, RESIS II, and GEM-CCARA projects, among others—important limitations remain. Chief among these are the limited systematic incorporation of detailed local geological and geophysical data, as well as the lack of methodologies that explicitly integrate fault-type sources together with zone-type sources in probabilistic seismic hazard models.

The objective of this doctoral dissertation is to develop a comprehensive methodology for incorporating updated geological, geophysical, and seismological data into seismic hazard calculations in Central America. To this end, a unified regional seismic catalog was built, integrating fourteen databases from local and international seismic networks, covering the period 1520 to 2020. This catalog was declustered and homogenized through statistical and prioritization methods, and completeness periods for different magnitudes were analyzed. Based on this database, seismogenic sources were characterized, and a consensus regional tectonic model was adopted. In addition, different ground motion models (GMMs) and scaling relationships for maximum magnitude estimation were evaluated.

The findings were integrated into the KUKAHPÁN-25 model, which produced spectral acceleration maps (PGA and SA at 1.0s) for return periods of 475, 975, and 2475 years, uniform hazard spectra, and control earthquakes through seismic hazard disaggregation for the capitals of the six Central American countries. These results were compared with previous models, revealing significant differences in some regions.

One of the central methodological contributions was the update of the model proposed by Rivas-Medina et al. (2018), which allows for the distribution of seismic potential between zone-type and fault-type sources in a coherent manner, considering geometric, kinematic, and seismic parameters. This update was key to improving the representation of the regional seismogenic potential and reducing reliance on expert judgment in the application of the methodology. Furthermore, in the case study applied to Guatemala, a systematic comparison was carried out among methods that integrate fault-type sources. This comparison highlighted the

impact of methodological choice on the estimated acceleration levels, especially in highly exposed cities such as Huehuetenango, Río Hondo, and Morales.

Overall, the results of this dissertation demonstrate that the integration of enhanced seismic catalogs, the use of hybrid models with fault-type sources, and an adequate evaluation of epistemic uncertainties significantly improve seismic hazard estimates in Central America. The proposed methodology and its results provide a solid technical basis for future updates of national seismic codes, the development of official seismic hazard maps, and the design of seismic risk reduction policies in the region.

Resumen

Centroamérica es una región tectónicamente activa, afectada por la convergencia entre las placas del Caribe, Cocos, Nazca y América del Norte, lo que la convierte en un territorio con alta peligrosidad sísmica. Aunque en las últimas décadas se han realizado esfuerzos regionales significativos para evaluar la peligrosidad sísmica, como los proyectos RESIS I, RESIS II, GEM-CCARA, entre otros, persisten limitaciones importantes. Entre ellas destaca la escasa incorporación sistemática de datos geológicos y geofísicos locales detallados, así como la falta de metodologías que integren de manera explícita las fuentes tipo falla junto con las fuentes tipo zona en los modelos probabilistas de peligrosidad sísmica.

La presente tesis doctoral tiene como objetivo desarrollar una metodología integral para incorporar datos geológicos, geofísicos y sismológicos actualizados en los cálculos de peligrosidad sísmica en Centroamérica. Para ello, se construyó un catálogo sísmico regional unificado, que integra catorce bases de datos de redes sísmicas locales e internacionales, abarcando el periodo 1520 a 2020. Este catálogo fue depurado y homogenizado mediante métodos estadísticos y de priorización, y se analizaron los periodos de completitud para distintas magnitudes. A partir de esta base de datos, se caracterizaron las fuentes sismogénicas y se adoptó un modelo tectónico regional consensuado. Además, se evaluaron diferentes modelos de movimiento fuerte (GMM) y relaciones de escalamiento para la estimación de magnitud máxima.

Los hallazgos se integraron en el modelo *KUKAHPÁN-25*, el cual generó mapas de aceleración espectral (PGA y SA 1.0s) para periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años, espectros de amenaza uniforme y sismos de control mediante desagregación de la peligrosidad sísmica para las capitales de los seis países de Centroamérica. Estos resultados fueron comparados con modelos anteriores, mostrando diferencias significativas en algunas regiones.

Una de las contribuciones metodológicas centrales fue la actualización del modelo propuesto por Rivas-Medina et al. (2018), que permite distribuir el potencial sísmico entre fuentes tipo zona y tipo falla de forma coherente, considerando parámetros geométricos, cinemáticos y sísmicos. Esta actualización fue clave para mejorar la representación del potencial sismogénico regional y reducir la toma de decisiones (criterio de experto) para la aplicación de la metodología. Además, en el caso de estudio aplicado a Guatemala, se realizó una comparación sistemática entre métodos que integran las fuentes tipo falla. Esta comparación evidenció el

impacto que tiene la elección metodológica en los niveles de aceleración estimados, especialmente en ciudades con alta exposición como Huehuetenango, Rio Hondo y Morales.

En conjunto, los resultados de esta tesis evidencian que la integración de catálogos sísmicos mejorados, el uso de modelos híbridos con fuentes tipo falla y una adecuada evaluación de incertidumbres epistémicas permiten mejorar significativamente las estimaciones de peligrosidad sísmica en Centroamérica. La metodología propuesta y sus resultados ofrecen una base técnica sólida para futuras actualizaciones de los códigos sísmicos nacionales, la elaboración de mapas oficiales de peligrosidad sísmica y el diseño de políticas de reducción del riesgo sísmico en la región.

Tabla de Contenido

<i>Agradecimientos</i>	<i>v</i>
<i>Abstract</i>	<i>vii</i>
<i>Resumen</i>	<i>ix</i>
<i>Tabla de Contenido</i>	<i>xi</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>xiii</i>
<i>Lista de Tablas</i>	<i>xvii</i>
<i>Abreviaturas y acrónimos</i>	<i>xviii</i>
1. Introducción	1
1.1. Motivación y alcance del estudio.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Contexto sismotectónico de Centroamérica.....	4
1.4. Marco Teórico.....	7
1.4.1. Peligrosidad sísmica.....	7
2. Estudios de peligrosidad sísmica en Centroamérica: estado del arte	13
2.1. Estudios regionales.....	13
2.2. Estudios nacionales.....	15
3. Metodología	19
3.1. Catálogo sísmico regional para Centroamérica.....	19
3.1.1. Homogenización de bases de datos de agencias locales y regionales, y confección de un catálogo sísmico regional actualizado.....	21
3.1.2. Análisis de completitud espacial y temporal.....	26
3.2. Cálculo de la peligrosidad sísmica en Centroamérica.....	27
3.2.1. Análisis de sensibilidad de los parámetros input que integran el cálculo de la peligrosidad sísmica e impacto en los resultados finales.....	28
3.2.2. Asignación de pesos al árbol lógico.....	32
3.2.3. Mapas de peligrosidad sísmica para Centroamérica.....	32
3.2.4. Análisis de desagregación sísmica.....	33
3.3. Comparación de resultados del estudio actualizado con otros modelos de peligrosidad sísmica en Centroamérica.....	33
3.3.1. Comparación con estudios regionales.....	33
3.3.2. Comparación con estudios locales.....	34
3.3.3. Comparación con códigos sísmicos locales.....	34
3.4. Integración de las fuentes tipo falla y tipo zona en los cálculos de la peligrosidad sísmica en Centroamérica.....	35
3.4.1. Modelo propuesto por Rivas-Medina et al. (2018).....	35

3.4.2.	Aplicación caso de estudio en Guatemala	43
3.4.3.	Comparación con otros métodos que integran las fuentes tipo falla y tipo zona.....	46
4.	Colección de artículos científicos	49
5.	Discusión	121
5.1.	Discusión de los resultados del catálogo sísmico regional	121
5.2.	Discusión de los resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros inputs en los resultados finales de peligrosidad sísmica	126
5.3.	Discusión de los resultados de la comparativa con otros modelos regionales, locales y códigos sísmicos	137
5.4.	Discusión de los resultados de la actualización del método propuesto por Rivas-Medina et al. (2018)	146
5.5.	Discusión de la comparación de resultados entre diferentes métodos que integran las fuentes tipo falla y tipo zona	149
6.	Conclusiones	161
7.	Líneas futuras de investigación	165
	Referencias	166
	Anexos	183

Lista de Figuras

Figura 1: Entorno tectónico en Centroamérica..	6
Figura 2: Pauta temporal sobre estudios regionales y locales de peligrosidad sísmica para Centroamérica.	18
Figura 3: Entorno tectónico y principales redes sísmicas en Centroamérica.....	21
Figura 4: Polígonos utilizados para la homogenización de las bases de datos según el nivel de prioridad: (1) red local sísmica, (2) red local del país vecino, (3) catálogo sísmico de Alvarado et al. (2017), (4) catálogo sísmico de RESIS II, (5) catálogo sísmico de ISC-GEM, (6) catálogo sísmico del USGS y (7) catálogo sísmico del CMT.	24
Figura 5: Diagrama de flujo de la metodología actualizada propuesta por Rivas-Medina et al. (2018). (1) Se define el catálogo sísmico y el catálogo de fallas para la región, (2) la herramienta <i>HybridModel</i> (H_M) genera el equilibrio entre el potencial sísmico registrado (región) y el potencial sísmico de las fuentes tipo falla, (3) la herramienta <i>HybridModel</i> (H_M) muestra todas las combinaciones posibles para dicho equilibrio, (4) el usuario selecciona una combinación y la herramienta <i>HybridModel</i> (H_M) genera los archivos de salida de las fuentes sísmicas.	38
Figura 6: Flujo de trabajo del preprocesamiento de datos del <i>HybridModel</i> (H_M).	39
Figura 7: Flujo de trabajo de proceso iterativo para calcular las posibles soluciones utilizando la herramienta <i>HybridModel</i> (H_M), que ilustra los pasos para distribuir el potencial sísmico y la tasa sísmica acumulada entre fuentes de tipo zona y tipo falla.	40
Figura 8: Flujo de trabajo del proceso para mostrar soluciones gráficas con la herramienta <i>HybridModel</i> (H_M). El diagrama describe los pasos para estimar las tasas de sismicidad para las fuentes tipo zona y tipo falla para cada combinación de parámetros. El usuario selecciona una combinación específica mediante un identificador (ID), y la herramienta calcula la distribución magnitud-frecuencia (MFD) asociada para cada fuente sísmica.	42
Figura 9: Segmentos de fallas analizados en este estudio para Guatemala. Las líneas grises muestran la base de datos de fallas de Agate et al. (2024) del proyecto RIESCA	45
Figura 10: Distribución de sismicidad para la zona (a) G9, (b) G6 y (c) G4, según el catálogo sísmico regional de Gamboa-Canté et al. (2024).	48
Figura 11: Catalogo sísmico regional para Centroamérica (1520 – 2020).	121

Figura 12: Distribución de la magnitud de completitud (M_c) en las zonas sísmicas propuestas por Alvarado et al. (2017).	123
Figura 13: Completitud en el tiempo para Centroamérica calculada con el método de Stepp (1972) para el catálogo sísmico regional.	125
Figura 14: Variabilidad relacionada con los métodos de ajuste del b -valor y el método de depuración para la (a) zona cortical, (b) zona de interplaca y (c) zona intraplaca.	127
Figura 15: Variabilidad relacionada con las leyes de escalamiento para la (a) zona cortical, (b) zona de interplaca y (c) zona intraplaca.	128
Figura 16: Variabilidad relacionada con los modelos de movimiento fuerte (GMM) para la (a) zona cortical, (b) zona de interplaca y (c) zona intraplaca.	129
Figura 17: Valores de PGA proporcionados por diferentes GMM a lo largo de los perfiles dibujados para las zonas corticales en (a) <i>Backarc</i> , (b) <i>Volcanic arc</i> , (c) <i>Middle Forearc</i> y (d) <i>Ocean Forearc</i> propuestas por Alvarado et al. (2017). La nomenclatura corresponde a las zonas representadas en la Figura 12.....	130
Figura 18: Valores de PGA proporcionados por diferentes GMM a lo largo de los perfiles dibujados para las zonas de subducción en (a) las zonas interplaca y (b) las zonas de intraplaca propuestas por Alvarado et al. (2017). La nomenclatura corresponde a las zonas representadas en la Figura 12.....	131
Figura 19: Propuesta de árbol lógico para la evaluación de la peligrosidad sísmica en Centroamérica.	132
Figura 20: Mapas de peligrosidad sísmica para Centroamérica, para PGA y períodos de retorno de (a) 475 años, (b) 975 años y (c) 2475 años en condiciones de roca ($V_{s3} = 760$ m/s), según el modelo <i>KUKAHPÁN-25</i>	133
Figura 21: Terremotos de control asociados con posibles fuentes sísmicas en Centroamérica. Las líneas grises muestran la base de datos de fallas de Agate et al. (2024) y Denyer et al. (2003), y las líneas negras, la base de datos de fallas de Styron y Pagani (2020).	135
Figura 22: Espectros de peligrosidad uniforme (UHS) para períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años, según el modelo <i>KUKAHPÁN-25</i> . Los UHS se generaron para las seis capitales de Centroamérica: (a) Ciudad de Guatemala, (b) San Salvador, (c) Tegucigalpa, (d) Managua, (e) San José y (f) Ciudad de Panamá.	136
Figura 23: Mapa que muestra el cociente de aceleraciones PGA y PR=475 yrs del modelo <i>KUKAHPÁN-25</i> y el modelo de RESIS II (Benito et al., 2012).	138

Figura 24: Mapa de CV para PGA y periodo de retorno de 475 de los modelos KUKAHPÁN-25, GEM-23 y CCASH-22.....	139
Figura 25: Mapas de aceleración de razón para PGA y período de retorno de 475 en el mapa KUKAHPÁN-25 comparado con (a) el mapa GEM-23 y (b) el mapa CCASH-22.	140
Figura 26: Mapa de aceleración de razón para PGA y período de retorno de 475 bajo el mapa KUKAHPÁN-25 en comparación con todos los estudios recientes de peligro sísmico local: Kalakonas et al. (2020) – Guatemala, Mixco Durán (2020) – El Salvador, Castillo et al. (2008) – Honduras, Álvarez (2022) – Nicaragua, Hidalgo-Leiva et al. (2023) – Costa Rica, Benito et al. (2012) – Panamá.....	143
Figura 27: (a) Ubicación de algunas localidades en cada país centroamericano y (b) correlación de las aceleraciones del mapa de riesgo sísmico regional más reciente (Gamboa-Canté et al., 2025) con las aceleraciones del código sísmico local. PGA y PR = 475 yrs.	144
Figura 28: Mapa de peligro sísmico para Centroamérica en términos de PGA y períodos de retorno de 475 años utilizando los estudios locales recientes de peligro sísmico: Kalakonas et al. (2020) – Guatemala, Mixco Durán (2020) – El Salvador, Castillo et al. (2008) – Honduras, Álvarez (2022) – Nicaragua, Hidalgo-Leiva et al. (2023) – Costa Rica, Benito et al. (2012) – Panamá.....	145
Figura 29: <i>Izquierda</i> : Mapa de la sismicidad y los segmentos de falla en la franja transversal central de Guatemala. El mapa muestra la ubicación de los segmentos de falla P01, P02, M01 y M02 dentro de la Zona G6. El tamaño y el color de los círculos representan las magnitudes sísmicas, con una escala que indica magnitudes desde menos de Mw 4.0 hasta Mw 7.7. La línea negra gruesa delimita la zona sísmica G6, y las líneas amarillas continuas representan los segmentos de falla identificados. <i>Derecha</i> : La tabla muestra M_{maxC} , bt_f , bt_z y $M_{maxZone}$ para diferentes combinaciones de modelos.	146
Figura 30: <i>Arriba</i> : Modelos de recurrencia sísmica de Gutenberg-Richter para dos opciones de cálculo, ID01 e ID19. El eje X muestra la magnitud (Mw) y el eje Y la tasa acumulada de terremotos $[\dot{N}(m)]$ de magnitud mayor o igual a un valor dado. Las curvas de color representan diferentes segmentos de falla (M01, M02, P01 y P02) y la zona completa. <i>Abajo</i> : Mapas de la aceleración máxima esperada del suelo (media PGA) para un período de retorno de 475 años según las dos opciones de cálculo.	147
Figura 31: Mapa de la aceleración máxima promedio del suelo (PGA) y el coeficiente de variación (CV). Los colores del mapa PGA indican la intensidad de la aceleración del suelo, con los valores más altos cerca de la Falla de Motagua. El mapa de CV muestra la	

variabilidad de los datos PGA al analizar todas las combinaciones resueltas por el <i>HybridModel</i> (H_M), mostrando una menor variabilidad cerca de la Falla de Motagua y una mayor variabilidad en zonas alejadas de las fallas.....	148
Figura 32: MFD calculado para el método moment-slip, FiSH, SHERIFS y HybridModel en el (a) segmento IXC, (b) segmento JLP, (c) segmento P01, (d) segmento (P02), (e) segmento M01 y (f) segmento M02.....	150
Figura 33: Mapas de coeficiente de variación (CV) para la (a) zona G9, (b) zona G6 y (c) zona G4.	152
Figura 34: Perfiles de aceleración PGA en los segmentos de falla analizados para (a) falla Ixcán (perfil A-A'), (b) segmento E-O Polochic-Chixoy y Motagua (perfil B-B'), (c) segmento NS-O-E Polochic-Chixoy y Motagua (perfil C-C'), y (d) falla Jalpatagua (perfil D-D').	154
Figura 35: Mapa de peligrosidad sísmica para Guatemala para la ordenada PGA y PR = 475 yrs, incluyendo las fuentes tipo falla como unidades independientes.	157
Figura 36: Mapa que representa el cociente entre valores de PGA para periodo de retorno de 475 años, estimados con modelos de fuente tipo fallas y con el modelo clásico zonificado para Guatemala.	157
Figura 37: Comparación entre los espectros UHS y de diseño para las localidades de (a) Cubilhuitz, (b) Cobán, (c) Huehuetenango, (d) Rio Hondo, (e) Morales, (f) Ciudad de Guatemala y (g) Jalpatagua.	159

Lista de Tablas

Tabla 1: Bases de datos recopiladas para la elaboración del catálogo sísmico regional de Centroamérica	22
Tabla 2: Niveles de prioridad para unificar los catálogos sísmicos.....	24
Tabla 3: Orden de prioridad para analizar eventos sísmicos duplicados	25
Tabla 4: Geometría de los segmentos de fallas analizados en Guatemala.....	45
Tabla 5: Parámetros de recurrencia de las zonas sísmicas que contienen las fallas analizadas	46
Tabla 6: Número de terremotos y porcentaje respecto a todo el catálogo sísmico según ubicación geográfica y régimen tectónico.	122
Tabla 7: Análisis de completitud en el tiempo del catálogo sísmico de Centroamérica	124
Tabla 8: Sismos de control para las seis ciudades capitales de Centroamérica, obtenidos para los movimientos objeto identificados con las ordenadas espectrales PGA y SA (1.0s) para periodo de retorno de 475 años. Se indica la fuente sísmica asociada	134
Tabla 9: Valor $M_{maxFault}$ (M_w) de los métodos aplicados para fuentes tipo falla incorporadas en los cálculos de la peligrosidad sísmica	149

Abreviaturas y Acrónimos

NORAD	Agencia Noruega de Cooperación para el Desarrollo
CEPREDENAC	Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres en América Central y República Dominicana
IPGH	Instituto Panamericano de Geografía e Historia
USGS	Servicio Geológico de Estados Unidos
GSHAP	Programa Global de Evaluación de la Peligrosidad sísmica
GSHM	Mapa Global de Peligrosidad sísmica
SERCA	Regionalización Sismotectónica de Centroamérica
SAREC	Agencia Sueca de Cooperación para la Investigación
RESIS	Reducción del Riesgo Sísmico
CCARA	Evaluación del Riesgo Sísmico en el Caribe y América Central
USAID	Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
GEM	Modelo Global de Terremotos
KUK-AHPÁN	Estructura y Evolución 4D de la Litósfera en América Central
AGIES	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica
NORSAR	Conjunto Sísmico Noruego
IRIS	Instituciones de Investigación Incorporadas para Sismología
CA	Centroamérica
PSHA	Evaluación de la peligrosidad sísmica probabilista
PGA	Aceleración pico del suelo
UHS	Espectro de peligrosidad uniforme
GMM	Modelo de Movimiento Fuerte
CV	Coefficiente de Variación
MSE	Error Cuadrático Medio

RMSE	Raíz del Error Cuadrático Medio
LLH	Método de Verosimilitud Logarítmica
EDR	Método de Ranking basado en la Distancia Euclidiana
SCC	Coficiente de acoplamiento
\bar{x}	Media aritmética
σ	Desviación estándar
Mw	Magnitud momento
Mc	Magnitud de completitud
m	Magnitud
M_{min}	Magnitud mínima
M_{maxC}	Magnitud máxima de completitud
$M_{maxzone}$	Magnitud máxima para la fuente tipo zona
$M_{maxFault}$	Magnitud máxima para la fuente tipo falla
$M_{max obs}$	Magnitud máxima observada
bt_f	β -valor para la fuente tipo falla
bt_z	β -valor para la fuente tipo zona
$\dot{n}(m)$	Tasa simple de sismos
$\dot{N}(m)_{obs}$	Tasa acumulada de sismos observada
$\dot{N}(m)_{pred}$	Tasa acumulada de sismos predicha
M_o	Momento sísmico
M_o_{faults}	Momento sísmico de la fuente tipo falla
\dot{M}_o	Potencial sísmico
$\dot{M}(m)_{fault}$	Potencial sísmico de la fuente tipo falla
$\dot{M}(m)_{zone}$	Potencial sísmico de la fuente tipo zona
$\dot{M}(m)_{region}$	Potencial sísmico de la región

1. Introducción

Centroamérica constituye una de las regiones tectónicamente más complejas y sísmicamente más activas del continente americano. La interacción entre las placas del Caribe, Cocos, Nazca y Norteamérica genera una diversidad de regímenes tectónicos que dan lugar a frecuentes y, en ocasiones, destructivos terremotos. La elevada sismicidad, combinada con una alta exposición y vulnerabilidad de las poblaciones, convierte a esta región en un territorio prioritario para el estudio y la gestión del riesgo sísmico.

Desde los años noventa, se han desarrollado diversos estudios regionales de evaluación de la peligrosidad sísmica en Centroamérica —como los proyectos RESIS I y II (Rojas, Bungum, et al., 1993; Benito et al., 2012), el modelo GSHAP (Shedlock, 1999; Tanner & Shedlock, 2004), el modelo CCARA-GEM (García-Pelaez et al., 2019; Johnson et al., 2023) y más recientemente CCASH (Salgado-Gálvez et al., 2022)—, que han permitido construir mapas de referencia para el diseño estructural y la planificación territorial. Sin embargo, la mayoría de estos modelos se han basado principalmente en el uso de datos regionales que pueden derivar en resultados que no sean acordes con la tectónica local de cada país.

La presente tesis doctoral parte de este diagnóstico para desarrollar una propuesta metodológica integral orientada a mejorar los cálculos de la peligrosidad sísmica en Centroamérica, incorporando información geológica y geofísica local. Para ello, se propuso primero la confección de un catálogo sísmico regional actualizado partiendo de datos locales (Gamboa-Canté et al., 2024), la implementación de herramientas avanzadas de análisis probabilista, como árboles lógicos y análisis de sensibilidad de parámetros (Gamboa-Canté et al., 2025a), y por último, la comparación de los resultados con otros modelos regionales, locales y con los códigos sísmicos nacionales para su uso en futuras actualizaciones de estudios de peligrosidad sísmica para la región (Gamboa-Canté et al., 2025b).

Entre otras contribuciones destacadas se encuentra la actualización del método propuesto por Rivas-Medina et al. (2018), denominado aquí como *HybridModel* (H_M), permitiendo una distribución más coherente del potencial sísmico entre fuentes tipo falla y tipo zona que la del método original, así como también, una mejora en la implementación del método para la toma de decisiones por parte de los expertos. Además del enfoque metodológico regional, la tesis incorpora un caso

de estudio detallado en Guatemala, donde se realiza una comparación sistemática entre diferentes metodologías de cálculo de la peligrosidad sísmica que integran las fuentes tipo falla.

Este análisis no solo permite validar la metodología propuesta (*HybridModel*), sino que también identifica las diferencias clave entre métodos que integran las fuentes tipo falla, sus implicaciones en los niveles de aceleración esperados y su aplicabilidad a contextos urbanos con alta exposición. Los resultados muestran cómo la incorporación de datos geológicos detallados y el uso de modelos más adaptativos pueden modificar significativamente los niveles de peligrosidad sísmica estimados en las principales ciudades del país, destacando la necesidad de una revisión técnica de la normativa local basada en criterios científicos actualizados.

En resumen, esta tesis contribuye a avanzar en el desarrollo de metodologías más precisas, adaptadas y reproducibles para el cálculo de la peligrosidad sísmica en Centroamérica. Sus resultados tienen un impacto directo en la mejora de los códigos sísmicos, la planificación urbana y la gestión del riesgo de desastres. En particular, la experiencia comparativa desarrollada en Guatemala sienta un precedente técnico y metodológico que puede ser replicado en otros países de la región, facilitando la transición hacia modelos más integradores y realistas del comportamiento sísmico.

1.1. Motivación y alcance del estudio

La peligrosidad sísmica es elevada en toda Centroamérica debido a la interacción de las placas tectónicas que se encuentran alrededor de los países implicados: Norteamérica, Caribe y Cocos. El último estudio de peligrosidad sísmica en toda la región de Centroamérica, utilizando datos locales, fue hecho en el año 2009 como parte de los objetivos del proyecto RESIS II (Benito et al., 2012). Desde ese año hasta el momento presente se han realizado números trabajos de investigación que han aportado un importante volumen de datos geofísicos y geológicos, para mejorar el conocimiento de peligrosidad sísmica en la región de estudio.

La principal motivación de esta tesis es ahondar en el conocimiento de la peligrosidad sísmica en Centroamérica incorporando datos actualizados sobre los diferentes aspectos que intervienen, como sismicidad, tectónica, modelos de movimiento, etc.; tratando de cuantificar las incertidumbres inherentes a los datos y modelos, y valorando el impacto que tienen en los resultados de peligrosidad. Los

cálculos se abordan desde un enfoque regional, con el objetivo de obtener mapas del movimiento esperado que no presenten discontinuidades en las fronteras entre los países de la región. Se pretende además introducir innovaciones metodológicas tanto en el cálculo de parámetros que caracterizan la fuente sísmica como en la estimación final de la peligrosidad sísmica. A este respecto, la principal innovación es la modelización de fallas como fuentes independientes y el cálculo de peligrosidad basado en modelos híbridos de zonas y fallas, una línea de investigación actualmente en desarrollo.

En la actualidad, no existen metodologías suficientemente probadas que integren los datos geológicos de fallas activas y otros datos geofísicos disponibles en el cálculo de la peligrosidad sísmica, siendo ésta una línea de investigación a la que pretende contribuir este trabajo de tesis doctoral. Para ello se probaron algunas metodologías existentes basadas en modelos híbridos compuestos por *fuentes tipo zona y fuentes tipo falla*, que tratan de resolver el problema de reparto del potencial sísmico entre ambos tipos de fuentes. En ellas, las fallas con suficiente información geométrica y cinemática son modelizadas como fuentes independientes. Además, se actualiza una metodología basada en el modelo propuesto por Rivas-Medina et al. (2018), que trata de facilitar la estimación de parámetros sísmicos en los diferentes tipos de fuentes, evitando la asignación de valores prefijados mediante juicio de experto, minimizando por tanto la subjetividad que este procedimiento conlleva. Esta es una de las principales contribuciones de la tesis. La metodología a utilizar será previsiblemente de amplia aplicación hacia la revisión de los códigos sísmicos de los países de Centroamérica, así como en la elaboración de planes de emergencia que se beneficiarán de los aportes logrados en esta tesis, que en última instancia permiten la adopción de medidas de mitigación del riesgo sísmico.

1.2. Objetivos

- Actualizar la información geológica y geofísica de Centroamérica para su aplicación en los cálculos de peligrosidad sísmica.
- Elaborar una base de datos SIG con información sísmica y tectónica actualizada de Centroamérica.
- Analizar la sensibilidad de diferentes parámetros sísmicos que intervienen en el cálculo y estimar su impacto en los resultados finales de peligrosidad sísmica, obteniendo una medida de sus incertidumbres.

- Desarrollar un nuevo cálculo de peligrosidad sísmica regional partiendo de datos sísmicos y tectónicos actualizados con enfoques metodológicos acordes al estado actual del arte.
- Actualizar el método propuesto por Rivas-Medina et al. (2018), para su aplicabilidad a diferentes contextos tectónicos y para evitar la adopción de valores prefijados de los parámetros de las fuentes sísmicas.
- Aplicar diferentes metodologías híbridas para el cálculo de la peligrosidad sísmica en Centroamérica, que incluyan fuentes tipo fallas como unidades independientes, en combinación con fuentes zonales.
- Analizar la variabilidad de los resultados de peligrosidad en función de las metodologías aplicadas y obtener una medida de la incertidumbre inherente a la metodología de cálculo aplicada.

1.3. Contexto sismotectónico de Centroamérica

Centroamérica se encuentra en un entorno tectónico complejo, compuesto por las placas de América del Norte, del Caribe, de Cocos y de Nazca (Figura 1). Por un lado, la fosa Mesoamericana está formada por la subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe, lo que convierte a esta región en una de las más activas debido a sus altas tasas de deslizamiento (73.7 a 76.4 mm/año) (Garnier et al., 2022). Esto da lugar a tasas elevadas de eventos sísmicos de $M_w \geq 4.5$, que oscilan entre 5.6 y 12.2 sismos/año (Alvarado et al., 2017). Al norte, el límite entre las placas de América del Norte y del Caribe está definido por la Fosa de Caimán, una zona de fallas transformantes complejas con una pequeña dorsal divergente en su centro. Este sistema de fallas transformantes se extiende hacia el oeste desde el Caribe, formando la Falla Swan (SF), que afecta principalmente a las costas de Honduras. En Honduras, se produce una fracturación extensional en respuesta al movimiento de la placa del Caribe, dando lugar a la Depresión Hondureña (HD), donde la mayoría de los terremotos son moderados, con magnitudes M_w entre 5.0 y 6.5 (Alvarado et al., 2017). Por otro lado, se encuentra el sistema de fallas de Guayape (GF), que es la estructura más larga y continua en Honduras. Se trata de un cinturón complejo de fallas que varía entre 2.0 y 25.0 km de ancho, con una orientación NE y una longitud de 290.0 km (Finch & Ritchie, 1991).

Hacia el territorio guatemalteco, se ubican dos sistemas de fallas transformantes sinestrales en la parte transversal norte del país: el sistema de fallas Polochic-Chixoy y el sistema de fallas de Motagua (PMFS) (Figura 1) (Garnier et al., 2022).

Además, al sur de Guatemala se sitúa el inicio del cinturón volcánico centroamericano, en forma de la prominente Falla de Jalpatagua (JF), una falla dextral que se extiende unos ~70 km hacia la frontera Guatemala con El Salvador (Garnier et al., 2021).

Al suroeste de Centroamérica, el movimiento hacia el noreste de la fosa Mesoamericana respecto al Bloque Chortis, que forma parte de la placa de América del Norte, provoca un desplazamiento rápido a lo largo del arco volcánico de El Salvador, lo que da lugar a la formación de la Zona de Falla de El Salvador (ESFZ). Este es un grupo de fallas activas orientadas predominantemente E-O y ESE-OSO, con mecanismos de fallas de deslizamiento lateral con componentes dextrales, y longitudes que varían entre 20 y 30 km (Martínez-Díaz et al., 2021; Portela et al., 2024). Posteriormente, se forma la Depresión de Nicaragua (ND) en la región sur de Nicaragua. Se trata de una depresión geológica prominente del Cuaternario tardío, de aproximadamente 40-70 km de ancho, paralela al arco volcánico centroamericano (Figura 1), que se extiende unos 1000 km desde la frontera entre Nicaragua y Costa Rica hasta El Salvador (Funk et al., 2009).

Al sureste de Centroamérica, ocurre una interacción entre la placa de Cocos y un segmento de la placa de Nazca, que da lugar a la formación de la Zona de Fractura de Panamá (PFZ), con un movimiento de deslizamiento lateral dextral orientado N-S (Figura 1). Otra característica destacable en esta región es la Dorsal de Cocos, formada por el desplazamiento de la placa de Cocos sobre el punto caliente de Galápagos, lo que crea una estructura batimétrica de más de 1000 km de longitud con orientación SO-NE y un espesor aproximado de 25 km, tres veces el grosor normal de la corteza oceánica (Figura 1) (Lücke & Arroyo, 2015). El límite entre la placa de Nazca y la placa del Caribe forma el Cinturón Deformado del Sur de Panamá (SPDB), compuesto por fallas someras y complejas, debido al movimiento oblicuo de la placa de Nazca (Figura 1). El borde oriental de la placa de Nazca está definido por la Fosa Sudamericana (SAT) (Alvarado et al., 2017).

En el mar Caribe, se encuentra el Escarpe de Hess (HE). Este representa una fractura en la batimetría de la región, que se origina en Nicaragua (Carvajal-Arenas & Mann, 2018). Cerca de este escarpe, al norte de Panamá, se forma el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (NPDB), que se extiende hasta las costas de Costa Rica, formando el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CCRDB) (Figura 1) (Alvarado et al., 2017). En el sur de Centroamérica existe un entorno tectónico y una deformación cortical muy complejos, con una doble zona de subducción (Alvarado et al., 2017; I. G. Arroyo & Linkimer, 2021; Bourke et al.,

2023), delimitada por el Cinturón Deformado del Norte y del Sur de Panamá (NPDB y SPDB), en los lados caribeño y pacífico, respectivamente (Figura 1). La interacción entre estas estructuras tectónicas y la doble subducción genera un régimen compresivo de margen de colisión, reflejado principalmente por fallas inversas y de deslizamiento lateral en la región entre Costa Rica y Panamá (Alvarado et al., 2017; LaFemina et al., 2009).

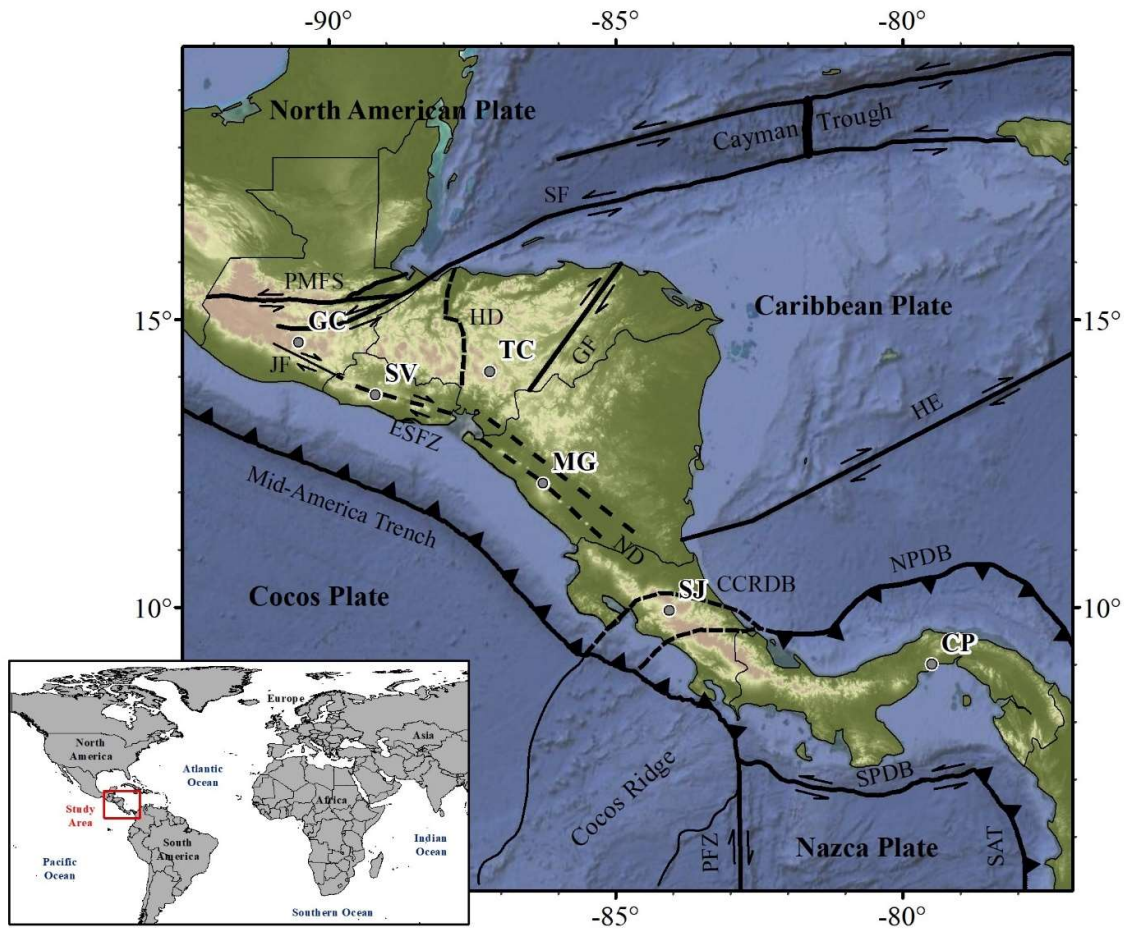


Figura 1: Entorno tectónico en Centroamérica. CCRDB: Cinturón deformado de Costa Rica Central; CP: Ciudad de Panamá; ESFZ: Zona de fallas de El Salvador; GC: Ciudad de Guatemala; GF: Falla de Guayape; HD: Depresión de Honduras; HE: Escarpe de Hess; JF: Falla de Jalpatagua; ND: Depresión de Nicaragua; NPDB: Cinturón deformado de Panamá Norte; MG: Managua; PFZ: Zona de fractura de Panamá; PMFS: Sistema de fallas Polochic-Motagua; SAT: Trinchera Sudamericana; SF: Falla de Swan; SJ: San José; SPDB: Cinturón deformado de Panamá Sur; SV: San Salvador; TC: Tegucigalpa.

1.4. Marco Teórico

1.4.1. Peligrosidad sísmica

El cálculo de la peligrosidad sísmica se viene abordando en los últimos 50 años a través de la metodología conocida como *Probabilistic Seismic Hazard Assessment* (PSHA) (Cornell, 1968), considerando modelos de zonas sismogénicas que contemplan el efecto de la fuente sísmica en los cálculos de la amenaza, deduciendo así el movimiento esperado en un emplazamiento dado con cierta probabilidad de excedencia ante sismos futuros. Por otro lado, también se ha abordado el problema del cálculo de la peligrosidad sísmica desde el punto de vista determinista, estimando los movimientos específicos que pueden generar ciertos escenarios sísmicos, identificados por un terremoto de determinada magnitud que se genera en una fuente dada. Este enfoque no lleva una probabilidad asociada, sino que estima generalmente los escenarios más críticos para un cierto emplazamiento.

1.4.1.1. Métodos zonificados y no zonificados

Los análisis probabilistas basados tradicionalmente en modelos de fuentes tipo zona respondían al hecho de no poder modelizar las fallas geológicas como fuentes independientes, debido a la falta de datos sobre su geometría y cinemática, esencialmente parámetros de orientación del plano de falla y de su mecanismo focal, tasa de deslizamiento e intervalo de recurrencia cubriendo el ciclo sísmico. En los métodos zonificados tradicionales, se consideran entonces grandes zonas como fuentes sísmicas, dentro de las cuales se asume que la sismicidad se distribuye aleatoriamente desde una perspectiva espacial y temporal, lo que supone a su vez asumir independencia entre eventos y ocurrencia poissoniana (Cornell, 1968).

A diferencia de los métodos zonificados tradicionales, los métodos no zonificados representan una evolución metodológica en el cálculo de la peligrosidad sísmica, al evitar la delimitación de zonas sismogénicas homogéneas y, en su lugar, utilizar enfoques basados en la distribución espacial continua de la sismicidad. Estos métodos aplican técnicas de suavizado espacial (*smoothing*), como funciones de densidad gaussianas, para estimar tasas sísmicas a partir de la localización de eventos históricos y recientes, lo que permite modelar la peligrosidad incluso en regiones con escasa información tectónica o sin una zonificación fiable. Entre los métodos más representativos se encuentra el propuesto por Frankel (1995), que

introdujo el concepto de sismicidad suavizada para modelar fuentes en regiones donde no es posible asociar los eventos a fuentes tipo falla o tipo zona.

1.4.1.2. Métodos que integran las fuentes tipo falla

La integración de fuentes tipo falla en las evaluaciones de peligrosidad sísmica se logra con frecuencia empleando la tasa de momento sísmico de la falla ($\dot{M}_o\text{ fault}$) como parámetro característico que representa su potencial sísmico. Este parámetro se determina utilizando la ecuación de Brune (1968), $\dot{M}_o = \mu \cdot A \cdot \dot{u}$, donde μ es el módulo de rigidez cortical, A es el área de ruptura y \dot{u} es la tasa de deslizamiento.

Esto plantea la cuestión de cómo se distribuye dicha tasa de momento a lo largo de la falla. Pueden considerarse diferentes enfoques de modelado, tales como el modelo de terremoto característico o un modelo basado en una distribución de magnitud-frecuencia (MFD, por sus siglas en inglés) (Cosentino et al., 1977; Youngs and Coppersmith, 1985). Este último, que es el más utilizado, implica que el momento acumulado en la falla se libera mediante terremotos de diferentes magnitudes, siguiendo una distribución determinada. Entre los posibles modelos, la distribución de Gutenberg–Richter es la más empleada (Gutenberg and Richter, 1944), dada por la ecuación $\ln N(m) = \alpha - \beta m$, donde $N(m)$ es el número acumulado de terremotos con magnitud mayor o igual a m , α está relacionado con el nivel general de actividad sísmica en la región y β representa la proporción relativa de sismos pequeños respecto a grandes.

El reto, entonces, radica en determinar el β – *valor* que caracteriza la recurrencia. En este marco, el β – *valor* no puede obtenerse simplemente ajustando los datos del catálogo sísmico a una línea recta y extrayendo su pendiente, como se hace típicamente al emplear fuentes del tipo zona (Weichert, 1980). En su lugar, el β – *valor* y la distribución magnitud–frecuencia (MFD) para fallas suelen ser predefinidos por expertos para construir modelos de recurrencia de terremotos, en la mayoría de los casos siguiendo el modelo de Gutenberg–Richter y utilizando los enfoques propuestos por Anderson (1979) o Kagan (2002a, 2002b).

Existen métodos donde se integran directamente las fallas geológicas como únicas fuentes capaces de generar los terremotos. Estos métodos asocian un modelo de recurrencia a la falla que asume una cierta distribución de magnitudes para liberar el potencial sísmico de la misma [$\dot{M}(m)\text{ fault}$] desde una magnitud mínima (M_{min}) hasta su magnitud máxima ($M_{maxFault}$).

La primera aportación de este tipo de métodos se hizo a través del modelo numérico *moment-slip* postulado por Bungum (2007). Este modelo utiliza las ecuaciones propuestas por Anderson and Luco (1983) y Youngs and Coppersmith (1985), para distribuir el potencial sísmico de la falla [$\dot{M}(m)_{fault}$] en tasas de actividad sísmica [$\dot{n}(m)$] para diferentes valores de magnitud (m). Estas ecuaciones están basadas en la relación publicada por Anderson (1979).

A pesar de la motivación existente en modelizar las fallas y de la evolución de la programación, no fue hasta mediados de la década pasada cuando se publica el siguiente método para la integración de fallas en los cálculos de peligrosidad sísmica llamado FiSH (*Faults in Seismic Hazard*) de Pace et al. (2016). Este método se basa en los modelos estadísticos propuestos por Kagan (2002a, 2002b) obtenidos de datos observados de diferentes catálogos sísmicos y aproximaciones estadísticas. Lo que caracteriza a FiSH es la capacidad para analizar la incertidumbre de la magnitud máxima para la falla ($M_{maxFault}$), utilizando diferentes aproximaciones para calcular dicha magnitud, que puede ser comparada con datos de paleosismicidad para un mejor control de las incertidumbres. Otra novedad es la capacidad del método para considerar la dependencia temporal de la actividad de la falla y generar el modelo de distribución magnitud-frecuencia (MFD) considerando el tiempo de recurrencia de la falla (Pace et al., 2016).

Años más tarde, se propone otro método denominado SHERIFS (*Seismic hazard and earthquake rate in fault systems*) de Chartier et al. (2019). En este caso regresamos al modelo clásico de recurrencia GR (Gutenberg & Richter, 1944) pero utilizando las funciones de densidad (PFD) con el modelo truncado, el modelo de terremoto característico, entre otros. El objetivo principal de SHERIFS es realizar un análisis riguroso de las incertidumbres epistémicas y aleatorias de los parámetros de la falla y de los que intervienen en el cálculo de la peligrosidad sísmica (tasa de deslizamiento y *b-valor falla*, por ejemplo), además de considerar diferentes hipótesis de ruptura *falla a falla* (FtF) según los segmentos de falla definidos, ya que considerar rupturas múltiples o de tipo cascada refleja de manera más “realista” el comportamiento de la peligrosidad sísmica de la región (Chartier et al., 2019).

Estudios recientes han considerado que estos métodos (*moment-slip*, FiSH, SHERIFS) se basan en el enfoque de modelar las fuentes tipo falla como segmentos restringidos, donde se condiciona en gran medida los resultados de la peligrosidad sísmica en la región al potencial sísmico que se puede liberar. Esto es así debido a

que cada segmento de falla se considera de manera independiente como una fuente sismogénica individual que puede romperse por completo durante un terremoto (Visini et al., 2020). Para evitar estas restricciones en la definición de las fuentes tipo falla, se propusieron dos métodos que evitan esta segmentación restringida de las fallas geológicas, denominados FRESH (*Floating-Rupture for Seismic Hazard*) y SUNFiSH (*Subsections of Fault in Seismic Hazard*) propuestos por Visini et al. (2020). FRESH emplea un enfoque de “ruptura flotante” que permite que las rupturas comiencen en cualquier punto a lo largo del plano de falla y pueden extenderse hasta alcanzar la longitud máxima permitida para el cálculo de las tasas de actividad sísmica $[\dot{n}(m)]$. Este método es adecuado cuando el objetivo es mantener una coherencia en el cálculo de la amenaza a través de diferentes secciones de una falla considerando la interacción entre segmentos adyacentes. Por otro lado, SUNFiSH calcula las tasas de actividad sísmica $[\dot{n}(m)]$ por medio de posibles combinaciones de subsecciones de la falla (escenarios de ruptura). Dicho enfoque ajusta la tasa de momento sísmico (\dot{M}_o) por medio de la suma de las tasas de todas las subsecciones de ruptura (Visini et al., 2020).

Por último, el método más reciente postulado es FaultQuake propuesto por Tavakolizadeh et al. (2024). El método es una mejora de FiSH y maneja la misma formulación, pero en este caso se implementa para incorporar fallas asísmicas en el cálculo de la peligrosidad sísmica. Por tal motivo, ahora se introduce en la formulación la metodología para integrar el coeficiente sísmico de acoplamiento (SCC) propuesto por Kanamori (1971). El integrar este coeficiente para el cálculo de las tasas de actividad sísmica $[\dot{n}(m)]$ en la falla permite considerar las componentes inelásticas (asísmicas) en la deformación de la falla, haciendo que la peligrosidad sísmica no sea sobreestimada.

1.4.1.3. Métodos híbridos que integran las fuentes tipo falla y tipo zona

Este problema se vuelve aún más complejo al combinar fuentes del tipo falla con fuentes del tipo zona, una práctica esencial en regiones donde no todas las fallas sismogénicas se conocen en detalle. En tales casos, las fuentes del tipo zona se utilizan para representar la sismicidad de fondo o los terremotos asociados a fallas no cartografiadas o desconocidas. Se han propuesto varios métodos que, bajo ciertos supuestos, permiten establecer la distribución de magnitudes a lo largo de las fallas, es decir, el modelo de recurrencia.

Aunque los datos de fallas activas son cada vez más numerosos, aún existe un déficit de información para poder modelizar todas las fallas de una región como

fuentes independientes, lo que obliga actualmente a proponer modelos combinados de fuentes tipo zona y tipo falla, conocidos como *métodos híbridos*. Estos métodos normalmente consideran la suma del potencial sísmico que puede generarse en las fallas conocidas [$\dot{M}(m)_{fault}$] y el potencial sísmico de todas aquellas fallas “ciegas” o sismicidad remanente que no está asociada a algún sistema de fallas en específico (*background*) [$\dot{M}(m)_{zone}$].

La primera postulación de este tipo de métodos fue realizada por Frankel (1995). Dicho autor propuso un enfoque innovador para la evaluación de la peligrosidad sísmica en regiones con poca información tectónica. Su metodología se basa en cuatro modelos principales que utilizan diferentes aproximaciones para definir las tasas de actividad sísmica [$\dot{n}(m)$] en una región. Los primeros dos modelos aplican una suavización espacial utilizando una función gaussiana para integrar eventos sísmicos de magnitud mayor o igual a 3.0. El tercer modelo adopta un enfoque opuesto a los dos primeros, asumiendo que los terremotos de magnitud moderada (entre 5.0 – 7.0) pueden ocurrir en cualquier lugar dentro de una fuente tipo zona (*background*) de manera uniforme. En lugar de suavizar la sismicidad histórica registrada, este modelo distribuye uniformemente la probabilidad de ocurrencia de los terremotos sobre toda la fuente tipo zona (*background*). El cuarto modelo está diseñado para considerar los eventos sísmicos de gran magnitud (mayores a 7.0), que se modelan como “terremotos característicos”, basados en evidencia histórica o paleosísmica (Frankel, 1995).

Años más tarde, se propuso el modelo numérico *moment-rate* de Bungum (2007). Este modelo sigue el principio de distribuir el potencial sísmico de la región [$\dot{M}(m)_{region}$] en diferentes fuentes tipo falla, a través de un porcentaje de reparto [$\% \dot{M}(m)$] que define el experto. Esto da como resultado los parámetros del modelo de recurrencia de la fuente tipo falla (*a-valor*, *b-valor*) según el porcentaje de reparto asignado, así como también, los valores del potencial sísmico remanente en la fuente tipo zona (*background*) [$\dot{M}(m)_{zone}$] y el que consume la fuente tipo falla [$\dot{M}(m)_{fault}$].

El enfoque propuesto por Rivas-Medina et al. (2018), es el modelo que más se asemeja al concepto de un modelo híbrido para los cálculos de peligrosidad sísmica. Se fundamenta en los conceptos definidos por Anderson (1979) para un modelo GR truncado según Cosentino et al. (1977), además de incluir el modelo de Brune (1968) para definir el potencial sísmico de la falla [$\dot{M}(m)_{fault}$]. Lo característico de este modelo es que el reparto del potencial sísmico de la región [$\dot{M}(m)_{region}$] entre

las fuentes tipo falla y las fuentes tipo zona (*background*), se hace a partir del catálogo sísmico en un intervalo de magnitudes donde se considera que el registro sísmico de la región está completo. El modelo analiza una combinación de diferentes parámetros β -valor para las fuentes tipo falla y tipo zona, magnitud máxima para la zona ($M_{\max zone}$) y diferentes magnitudes de completitud ($M_{\max C}$), donde se considera que el registro de la energía de la región [$\dot{M}(m)_{region}$] esta completo (Rivas-Medina et al., 2018). Esto da como resultado diferentes combinaciones de estos parámetros que hacen que el potencial sísmico de la región se distribuya entre las fuentes tipo fallas y tipo zona de manera equilibrada, caracterizando así la peligrosidad sísmica para la región.

Por último, cabe mencionar nuevamente el método de SHERIFS propuesto por Chartier et al. (2019). En este, aparte de considerar solamente las fuentes tipo falla, existe una forma de asignar parte del potencial sísmico de la falla [$\dot{M}(m)_{fault}$] hacia la fuente tipo zona (*background*) [$\dot{M}(m)_{zone}$]. Esto se hace por medio de valores de probabilidad (definidas por el usuario), para los diferentes *bin* de magnitudes (*bg_ratio*). Estos valores de probabilidad son aplicados al MFD final de las fuentes tipo falla, haciendo que parte de la energía de la fuente tipo falla se considere para la fuente tipo zona en los cálculos de peligrosidad sísmica (Chartier et al., 2019).

2. Estudios de peligrosidad sísmica en Centroamérica: estado del arte

2.1. Estudios regionales

Los primeros estudios a escala regional sobre peligrosidad sísmica en Centroamérica se llevaron a cabo mediante el proyecto RESIS I, con el apoyo de la Agencia Noruega de Cooperación para el Desarrollo (NORAD) y el Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en Centroamérica (CEPRENAC), entre 1990 y 2000 (Guéndel & Bungum, 1995; Rojas, Bungum, et al., 1993). Este proyecto se enfocó en establecer la base de datos regional inicial de movimiento fuerte (Taylor et al., 1992), la creación del primer catálogo regional de sismos (Rojas, Bungum, et al., 1993), la estimación de relaciones empíricas para la homogeneización de escalas de magnitud hacia la magnitud momento M_w (Rojas, Cowan, et al., 1993), entre otros aspectos. Durante la misma década, se desarrollaron una serie de programas para evaluar la peligrosidad sísmica en América Latina, destacando el proyecto de peligrosidad sísmica para Centroamérica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), ejecutado por la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, que dio como resultado mapas de peligrosidad sísmica para condiciones de roca con periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años para aceleración máxima del terreno (PGA) (Montero et al., 1997).

A finales de los años 1990, el *U.S. Geological Survey* (USGS) publicó mapas de peligrosidad sísmica para Norteamérica, Centroamérica y el Caribe con un periodo de retorno de 500 años en términos de PGA, como parte del Programa Global de Evaluación de la Peligrosidad sísmica (GSHAP, por sus siglas en inglés) (Shedlock, 1999). Posteriormente, en 2004, se completó el estudio del Mapa Global de Peligrosidad sísmica (GSHM), con los resultados de la evaluación de peligrosidad sísmica para México, el Caribe, Centroamérica y Suramérica. Este estudio generó mapas para las ordenadas espectrales PGA, SA(0.2s) y SA(1.0s), correspondientes a probabilidades de excedencia del 2%, 10% y 50% en 50 años, respectivamente (Tanner & Shedlock, 2004).

En 2002 se aplicó una metodología alternativa para la evaluación de la peligrosidad sísmica y estimación de pérdidas en Centroamérica, que dio como resultado un mapa de intensidad macrosísmica y un mapa de PGA para un periodo de retorno de 475 años, como parte del proyecto de Regionalización Sismotectónica de Centroamérica (SERCA), auspiciado por la Agencia Sueca de Cooperación para la Investigación (SAREC) (Yong et al., 2002).

Asimismo, mediante el proyecto RESIS II, nuevamente con el apoyo de NORAD y CEPREDENAC entre 2007 y 2010, se elaboraron mapas de peligrosidad sísmica para Centroamérica con periodos de retorno de 500, 1000 y 2500 años en ordenadas espectrales de PGA y SA (1.0s), curvas de amenaza, espectros de amenaza uniforme (UHS), y sismos de control deducidos mediante desagregación de la peligrosidad sísmica para las seis capitales principales de los países involucrados (Benito et al., 2010; Benito et al., 2012).

En 2016 se desarrolló un nuevo estudio para Centroamérica mediante el proyecto de Evaluación del Riesgo Sísmico en el Caribe y Centroamérica (CCARA, por sus siglas en inglés) (García-Pelaez et al., 2019), apoyado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), que produjo mapas para periodos de retorno de 475 y 2475 años en ordenadas espectrales de PGA, SA(0.2s), SA(0.3s), SA(0.6s), SA(1.0s) y SA(2.0s). Estos mapas forman parte del Modelo Global de Peligrosidad sísmica desarrollado por el *Global Earthquake Model* (GEM) en 2018 (Pagani et al., 2020). Este modelo integra información de eventos sísmicos provenientes de redes sísmicas globales y la caracterización de algunas fallas activas de Centroamérica, para el cálculo de peligrosidad sísmica mediante el método de sismicidad suavizada (Frankel, 1995). Cabe mencionar que, en 2023 el modelo GEM para Centroamérica fue actualizado con un nuevo árbol lógico que combina diferentes GMM y nuevas zonas sismogénicas (Johnson et al., 2023).

Además, Salgado-Gálvez et al. (2022) desarrollaron un modelo de peligrosidad sísmica para Centroamérica y el Caribe con fines de cobertura de seguros en 34 países. Los resultados incluyen mapas de peligrosidad sísmica para un periodo de retorno de 475 años y ordenadas espectrales de PGA y SA (0.2s), considerando efectos de sitio en toda la región.

Finalmente, en el marco del proyecto KUK-AHPÁN (2019 – 2023) se incorporó nueva información sísmica y tectónica, donde se desarrolló un análisis de sensibilidad para valorar el impacto de diferentes modelos y parámetros en los resultados de la evaluación probabilista de peligrosidad sísmica (PSHA) para

Centroamérica (Gamboa-Canté et al., 2025a). El resultado de este análisis es un mapa de peligrosidad sísmica en términos de PGA y Sa(1.0s) para un periodo de retorno de 475, 975 y 2475 años, junto con una medida de las incertidumbres epistémicas y aleatorias. El mapa ha sido comparado con su predecesor generado en el proyecto RESIS II (Benito et al., 2012).

2.2. Estudios nacionales

A escala nacional, la mayoría de los países de Centroamérica han realizado actualizaciones en sus mapas de peligrosidad sísmica, mejorando los cálculos con base a un mejor conocimiento sismotectónico. El objetivo es mejorar y actualizar los códigos de diseño para la construcción de nueva infraestructura sismorresistente y, con ello, ayudar a mitigar y reducir el riesgo sísmico en la región.

En el caso de Guatemala, los primeros estudios de peligrosidad sísmica se remontan a 1977 (Kiremidjian et al., 1982). Tras las importantes pérdidas ocasionadas por el terremoto de Guatemala de 1976 (Mw 7.5) (Plafker, 1976), el gobierno local creó los primeros mapas de peligrosidad sísmica del país, en términos de PGA y para periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años, basándose en una base de datos de aproximadamente 1150 sismos. Posteriormente, en 1995, a través del proyecto RESIS I, se llevó a cabo una evaluación de peligrosidad sísmica para la Ciudad de Guatemala, que resultó en curvas de peligrosidad sísmica con datos sísmicos locales (Villagran et al., 1997). Además, en 2019 se realizó un estudio probabilista de peligrosidad sísmica para explorar el impacto de las incertidumbres epistémicas en los modelos de riesgo sísmico, usando como caso de estudio a Guatemala (Kalakonas et al., 2020). Finalmente, la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES) actualizó el modelo de peligrosidad sísmica de Guatemala mediante métodos deterministas basados en el sismo máximo esperado de diversas fuentes sísmicas activas, con el objetivo de actualizar el código sísmico local (Rodas et al., 2021).

En El Salvador, los primeros estudios sobre peligrosidad sísmica datan de inicios de la década de 1990, debido a las significativas pérdidas humanas y económicas ocasionadas por el terremoto de San Salvador de 1986 (Mw 5.7) (White et al., 1987). Este estudio inicial implicó la creación de los primeros modelos de fuentes tipo zona, un modelo de atenuación específico con registros locales de movimiento fuerte, y los primeros mapas de peligrosidad sísmica para PGA con periodos de

retorno de 100, 500 y 1000 años (Alfaro et al., 1990). En 1993, el estudio fue actualizado mediante diferentes enfoques sobre modelos de atenuación y parámetros de las fuentes sísmicas para generar nuevos mapas de peligrosidad sísmica en términos de PGA (Singh et al., 1993). En 1996, se publicó un estudio probabilista de peligrosidad sísmica que comparó y analizó las incertidumbres con estudios previos en El Salvador, para incorporar esta información en las normativas sísmicas locales (Bommer et al., 1996). Además, en 1998 se llevó a cabo un estudio comparativo utilizando distintos enfoques para la evaluación de peligrosidad sísmica en El Salvador. Este estudio empleó tres modelos de “zonas libres” y el enfoque Cornell-McGuire para abordar sus implicaciones en la zonificación sísmica para fines de construcción y seguros (Bommer et al., 1998).

Hacia el año 2013, el catálogo sísmico de El Salvador había sido actualizado, incorporando nueva información sísmica para generar mapas de peligrosidad con énfasis en el análisis de incertidumbres (Salazar et al., 2013). Posteriormente, gracias a los avances en monitoreo y adquisición de nueva información sobre fallas activas en El Salvador, se incorporaron estudios deterministas en el área (Salazar, 2018). Finalmente, en 2020 se realizó el estudio más completo de peligrosidad sísmica para El Salvador. Este estudio integró información geológica y sísmica de diferentes fuentes mediante el método de sismicidad suavizada (Frankel, 1995), generando mapas de peligrosidad sísmica para el país considerando el efecto de fuentes cercanas de fallas activas en el país (Mixco Durán, 2020).

En el caso de Honduras, el primer estudio de peligrosidad sísmica publicado data de 1982. El fuerte impacto del terremoto de Guatemala de 1976 (Mw 7.5) (Plafker, 1976) afectó significativamente al país vecino. Estos efectos, junto con la falta de investigaciones para identificar fallas activas locales, impulsaron el primer estudio de peligrosidad sísmica en Honduras con fines de análisis y diseño estructural (Kiremidjian et al., 1982). Como resultado, se obtuvo el primer mapa de amenaza para un periodo de retorno de 500 años en términos de PGA, junto con las primeras curvas de amenaza que representan la probabilidad anual de excedencia del movimiento. Dos décadas más tarde, se actualizó la peligrosidad sísmica utilizando información de una nueva base de datos de mecanismos focales para definir fuentes sísmicas tipo zona. Además, se incluyeron incertidumbres epistémicas, considerando modelos de atenuación, magnitud de corte (Mc) y magnitud máxima probable (Cáceres & Kulháněk, 2000). En 2001, se realizó otro estudio de peligrosidad sísmica enfocado en Tegucigalpa, la capital de Honduras, caracterizando la peligrosidad del país y generando posteriormente curvas de

peligrosidad sísmica para la capital, junto con valores esperados de PGA en condiciones de roca para distintos periodos de retorno (Cruz Calderón et al., 2001).

En el caso de Nicaragua, tras recuperarse de los daños causados por el terremoto de Managua de 1972 (Mw 6.2) (Algermissen et al., 1974), el gobierno local invirtió en la realización del primer estudio de peligrosidad sísmica para el país en 1975. Este estudio inicial recopiló información sobre fallas activas, clasificación y espesores de suelos, y una base de datos regional de sismos. El estudio produjo mapas de peligrosidad sísmica para Nicaragua, así como curvas de peligrosidad sísmica para la ciudad de Managua en términos de PGA (Shah et al., 1975). En 1987, los mapas de peligrosidad sísmica fueron actualizados utilizando registros de la red sísmica local del país, empleando programas computacionales para reducir los tiempos de cálculo en la determinación de parámetros de las fuentes sísmicas (Larsson & Mattson, 1987). Posteriormente, en 1996, se presentó un estudio macrosísmico para Nicaragua, generando mapas de contorno que representan probabilidades de excedencia espacial en el territorio nicaragüense (Espinosa, 1996). Finalmente, el estudio más reciente de 2022 marcó un paso importante hacia la actualización del código sísmico local, con nuevos mapas de peligrosidad sísmica diseñados para distintos periodos de retorno y ordenadas espectrales para cubrir el diseño y análisis estructural de edificaciones. Además, este estudio implicó un análisis riguroso de las incertidumbres epistémicas (Álvarez, 2022).

En Costa Rica, las evaluaciones de peligrosidad sísmica comenzaron en 1977, cuando el gobierno local creó los primeros mapas de amenaza. En este estudio inicial, se definieron las primeras fuentes sísmicas tipo zona con base en la localización y agrupamiento de eventos sísmicos en los regímenes tectónicos corticales y de subducción. Además, se estableció el primer modelo de fuente, junto con un ajuste del modelo de atenuación usando registros de movimiento fuerte. Se obtuvieron mapas de peligrosidad sísmica para PGA con periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años (Mortgat et al., 1977). Posteriormente, en 1994, se llevó a cabo una actualización del estudio de peligrosidad sísmica usando una nueva base de datos local de sismos y registros de movimiento fuerte, lo que resultó en curvas de peligrosidad sísmica para la capital y nuevos mapas de amenaza (Laporte et al., 1994). Finalmente, en 2022 se desarrolló un nuevo Modelo de Peligrosidad sísmica para Costa Rica. Este modelo actualizó los parámetros de las fuentes corticales, interplaca e intraplaca. Además, se adoptó un árbol lógico que asigna diferentes pesos a los GMM ajustados con datos locales para diversas ordenadas espectrales.

Esto resultó en mapas de peligrosidad sísmica para la PGA con periodos de retorno de 475 y 2475 años. También se realizaron análisis de desagregación y se estimaron curvas de peligrosidad sísmica y Espectros de Amenaza Uniforme (UHS) para las ciudades de San José y Liberia (Hidalgo-Leiva et al., 2023).

En lo que respecta a Panamá, las primeras evaluaciones de peligrosidad sísmica datan de 1989, cuando se llevó a cabo un estudio inicial basado en una regionalización sismotectónica. Este estudio definió cuatro fuentes sísmicas tipo zona que abarcan el área de Azuero, el Cinturón Deformado del Sur de Panamá (SPDB), la Zona de Fractura de Panamá (PFZ) y la Zona de Sutura Panamá-Sudamérica (PSZ). Además, se obtuvieron los parámetros de recurrencia sísmica de estas fuentes y se estimaron las primeras curvas de peligrosidad sísmica en términos de PGA (Vergara Muñoz, 1989). Dos años después, se presentó el primer mapa probabilista de peligrosidad sísmica para Panamá en términos de Intensidad Modificada de Mercalli (MMI) para periodos de retorno de 5, 25 y 100 años (Vergara Muñoz, 1991). Posteriormente, estos mapas fueron actualizados en términos de PGA para periodos de retorno de 250, 500 y 1000 años (Camacho et al., 1997).

La Figura 2 resume la evolución de los diferentes estudios de peligrosidad sísmica en la región de Centroamérica.

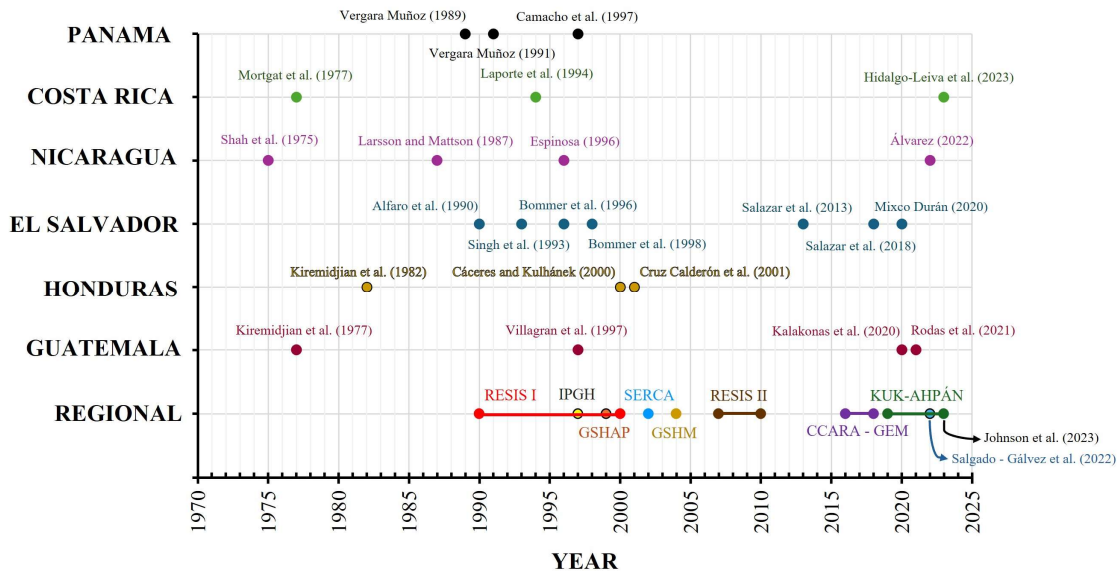


Figura 2: Pauta temporal sobre estudios regionales y locales de peligrosidad sísmica para Centroamérica.

3. Metodología

En este capítulo se exponen los enfoques metodológicos que se han seguido en el trabajo desarrollado para ahondar en el conocimiento de la amenaza sísmica de Centroamérica. El trabajo se desglosa en cuatro bloques que se presentan con los siguientes epígrafes:

3.1 Catálogo sísmico regional para Centroamérica

3.2 Cálculo de la peligrosidad sísmica en Centroamérica

3.3. Comparación de resultados del estudio actualizado con otros modelos de peligrosidad sísmica en Centroamérica

3.4. Integración de las fuentes tipo falla y tipo zona en los cálculos de la peligrosidad sísmica en Centroamérica.

Los trabajos correspondientes a los tres primeros epígrafes han sido publicados y se incluyen en el capítulo 4 de esta memoria. El desarrollo completo y los resultados de estos trabajos están contenidos en las publicaciones que se adjuntan, por lo que en este capítulo se incide únicamente en los aspectos metodológicos. El estudio correspondiente al cuarto epígrafe está en vías de publicación y su contenido se incluye de forma completa en el correspondiente apartado 3.4.

3.1. Catálogo sísmico regional para Centroamérica

Los procesos geodinámicos de la Tierra conducen a una liberación continua de energía, lo que da lugar a la generación de terremotos de distintas magnitudes. Esta información se recopila en bases de datos a partir de las cuales es posible analizar y cuantificar la cantidad de energía liberada en una región específica a lo largo del tiempo. Estas bases de datos se conocen como *catálogos sísmicos* y contienen información sobre los terremotos, incluyendo su localización, magnitud, tiempo de origen y profundidad. Así mismo, proporcionan información valiosa sobre la secuencia de los eventos sísmicos y sus posibles fuentes sismogénicas asociadas en una región determinada (Ammon et al., 2021). La importancia de un catálogo sísmico radica en sus múltiples aplicaciones, tales como el análisis del comportamiento de fallas sísmicas activas. Los detalles sobre cuándo, cómo y dónde se libera la energía permiten a los investigadores mejorar la comprensión de la actividad sísmica en una región, y con ello fortalecer el conocimiento sobre la peligrosidad sísmica (Lubbers et al., 2018).

Los avances científicos relacionados con los terremotos en Centroamérica han contribuido a comprender y evaluar la peligrosidad sísmica de la región. En 1993, se publicó el primer catálogo sísmico regional de Centroamérica, el cual recopiló 17,000 sismos ocurridos entre los años 1500 y 1992 (Rojas, Bungum, et al., 1993). Este catálogo fue elaborado durante el desarrollo del proyecto RESIS I, liderado por la Red Sísmica Noruega (NORSAR) y el Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres en Centroamérica (CEPREDENAC), cuyo objetivo fue realizar las primeras evaluaciones de peligrosidad sísmica en la región. Varios años después, se llevó a cabo otro estudio regional sobre el contexto tectónico, geofísico y sismológico de Centroamérica bajo el proyecto RESIS II (Benito et al., 2012). Este proyecto permitió actualizar el catálogo sísmico regional, generar mapas de movimiento del suelo esperado para diferentes probabilidades de excedencia a lo largo de todo el territorio centroamericano, curvas de amenaza y espectros amenaza uniformes (UHS) para las ciudades capitales. RESIS II fue el último proyecto regional enfocado en la evaluación de la peligrosidad sísmica, recopilando y analizando bases de datos provenientes de redes sísmicas locales.

Durante la última década, cada país centroamericano ha fortalecido sus redes sísmicas, lo cual ha permitido mejoras significativas en la adquisición, análisis y visualización de datos sísmicos. Esto se ha logrado mediante la revisión de eventos sísmicos registrados en sus bases de datos y la relocalización de terremotos, mejorando así los catálogos sísmicos locales de cada país (Álvarez, 2021; Arroyo-Solórzano & Linkimer, 2021; Linkimer et al., 2018; Salazar et al., 2013).

Como resultado, se ha incrementado notablemente el volumen de datos sísmicos disponibles a lo largo de los años, lo que ha generado la necesidad de revisar y actualizar los catálogos sísmicos regionales con fines de evaluación de la peligrosidad sísmica. En este contexto, se ha observado una mejora sustancial en la cobertura y en el número de estaciones sísmicas compartidas por el consorcio *Incorporated Research Institutions of Seismology* (IRIS) (Figura 3).

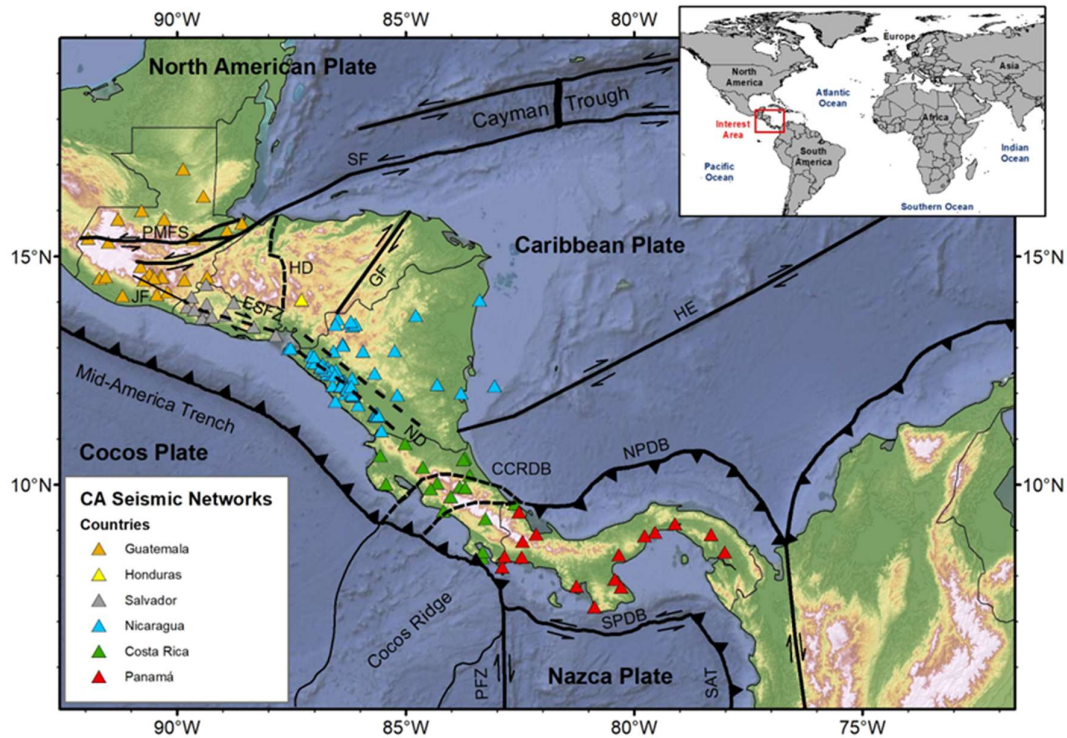


Figura 3: Entorno tectónico y principales redes sísmicas en Centroamérica. CCRDB: Cinturón deformado de Costa Rica Central; ESFZ: Zona de fallas de El Salvador; GF: Falla de Guayape; HD: Depresión de Honduras; HE: Escarpe de Hess; JF: Falla de Jalpatagua; ND: Depresión de Nicaragua; NPDB: Cinturón deformado de Panamá Norte; PFZ: Zona de fractura de Panamá; PMFS: Sistema de fallas Polochic-Motagua; SAT: Trinchera Sudamericana; SF: Falla de Swan; SPDB: Cinturón deformado de Panamá Sur. También están representadas las estaciones de la red sísmica IRIS de los seis países.

3.1.1. Homogenización de bases de datos de agencias locales y regionales, y confección de un catálogo sísmico regional actualizado

En años recientes, se han enfocado esfuerzos en mejorar el equipamiento sismológico de las redes sísmicas en Centroamérica, con el fin de recopilar y analizar datos que permitan compilar bases de datos de la más alta calidad. Cada institución reporta información sísmica común en sus registros, como coordenadas geográficas, magnitud, tiempo origen y profundidad, entre otros. En este estudio, se integraron y unificaron la mayoría de las bases de datos nacionales e internacionales en un catálogo sísmico regional para Centroamérica, con el objetivo de maximizar su utilidad en futuras evaluaciones de peligrosidad sísmica en la región. El primer paso fue reunir todas las bases de datos disponibles, tanto locales

como regionales. La Tabla 1 presenta las bases de datos recopiladas y utilizadas para la creación del catálogo sísmico regional.

Tabla 1: Bases de datos recopiladas para la elaboración del catálogo sísmico regional de Centroamérica

No.	Referencia del catálogo sísmico	País	Periodo
1	MARCA-GEHN, Catálogo macrosísmico (Peruzza et al., 2021)	Guatemala	1522 – 2018
2	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH)	Guatemala	2010 – 2020
3	Comisión Permanente de Contingencias (COPECO)	Honduras	1918 – 2020
4	Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET)	El Salvador	1522 – 2020
5	Un nuevo catálogo sísmico para la República de Nicaragua (Álvarez, 2021)	Nicaragua	1520 – 2018
6	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER)	Nicaragua	1975 – 2017
7	Red Sismológica Nacional (RSN)	Costa Rica	1522 – 2020
8	Universidad de Panamá (UPA)	Panamá	2016 – 2020
9	Servicio Geológico Colombiano (SGC)	Colombia	1993 – 2020
10	Catálogo sísmico de RESIS II (Benito et al., 2012)	Global	1522 – 2011
11	La nueva zonificación sísmica para Centroamérica (Alvarado et al., 2017)	Global	2011 – 2016
12	El Catálogo sísmico ISC-GEM (Di Giacomo et al., 2018)	Global	1904 – 2018
13	Catálogo sísmico del USGS	Global	1902 – 2020
14	Catálogo del <i>Global Centroid Moment Tensor</i> (CMT) ((Dziewonski et al., 1981; Ekström et al., 2012)	Global	1976 – 2020

Los catálogos locales recopilados ya habían sido homogeneizados a magnitud momento (M_w), tarea realizada por las agencias nacionales correspondientes. Sin embargo, los catálogos regionales contenían diferentes tipos de magnitud (por ejemplo, catálogos del USGS o del CMT). En este caso se utilizaron las ecuaciones propuestas por Rojas et al. (1993b), específicas para Centroamérica, para convertir las magnitudes M_d , M_C , M_l , M_s y m_b a M_w . Tras homogeneizar todas las bases de datos a M_w , se procedió a unificar los catálogos sísmicos para analizar y detectar eventos sísmicos duplicados. Este problema se presenta porque un mismo evento puede estar incluido con diferentes soluciones de localización o magnitud según la agencia. Es necesario entonces detectar esos eventos y elegir la solución dada por una de las agencias; en principio la que se considere más fiable.

Dada la gran cantidad de eventos sísmicos que se manejan, se propuso un enfoque de unificación de bases de datos basado en establecer niveles de prioridad para considerar válida una solución hipocentral, eligiendo la agencia según la ubicación del evento sísmico. Se definió un área de cobertura con coordenadas geográficas entre las longitudes -92.50° y -75.00° , y las latitudes 4.00° y 18.00° , aproximadamente, con el fin de incluir a todos los países involucrados en el estudio (Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá), así como sus áreas circundantes, considerando países vecinos (México y Colombia). A partir de esta área de cobertura se definieron polígonos a los que se asignaron los eventos sísmicos de las bases de datos nacionales. El tamaño y la forma de los polígonos fueron determinados para cubrir adecuadamente a cada uno de los países del estudio. La Figura 4 muestra los polígonos utilizados para la integración espacial de las bases de datos por país, y la Tabla 2 presenta el orden de los niveles de prioridad aplicados a estos datos para elegir la solución hipocentral que se considera más certera.

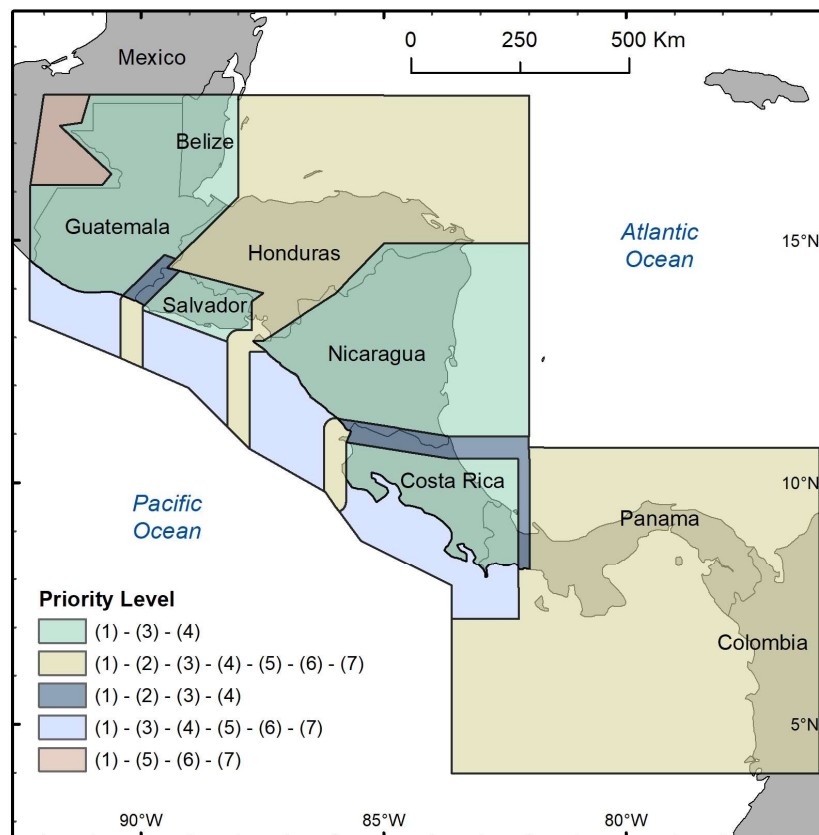


Figura 4: Polígonos utilizados para la homogenización de las bases de datos según el nivel de prioridad: (1) red local sísmica, (2) red local del país vecino, (3) catálogo sísmico de Alvarado et al. (2017), (4) catálogo sísmico de RESIS II, (5) catálogo sísmico de ISC-GEM, (6) catálogo sísmico del USGS y (7) catálogo sísmico del CMT.

Tabla 2: Niveles de prioridad para unificar los catálogos sísmicos

Nivel de Prioridad	Descripción
1	Red sísmica local
2	Red sísmica local del país vecino
3	Catálogo sísmico de Alvarado et al. (2017)
4	Catálogo sísmico de RESIS II
5	Catálogo sísmico de ISC-GEM
6	Catálogo sísmico del USGS
7	Catálogo sísmico del CMT

Al fusionar múltiples bases de datos dentro de un mismo polígono, existe inevitablemente la posibilidad de duplicidad de eventos sísmicos si estos están registrados en dos o más de los catálogos utilizados. Para llevar a cabo el análisis

y eliminar los posibles duplicados dentro de los polígonos de fusión, se estableció una tabla adicional de orden de prioridades (Tabla 3).

Tabla 3: Orden de prioridad para analizar eventos sísmicos duplicados

Orden de Prioridad	Descripción
1	Valor RMS (≤ 1.5 s) – redes sísmicas con menos cobertura Valor RMS (≤ 1.0 s) – redes sísmicas con mayor cobertura
2	Valor de profundidad (Km)
3	Ubicación epicentral
4	Valor de magnitud (Mw)

Primero, se analizó el error cuadrático medio (RMS) de cada evento sísmico, definiendo un valor de $\text{RMS} \leq 1.50$ s como criterio para regiones con menor robustez instrumental o redes sísmicas locales en desarrollo (por ejemplo, en Guatemala, Honduras y Panamá). Aunque este valor de RMS es relativamente alto respecto a los valores recomendados para la localización de eventos, en países con limitaciones instrumentales y mejoras recientes en la densificación de sus redes, se consideró razonablemente aceptable. Para redes sísmicas más densificadas (por ejemplo, en El Salvador, Nicaragua y Costa Rica), se aplicó un criterio más estricto: $\text{RMS} \leq 1.0$ s.

Como segundo nivel de prioridad, se evaluó la profundidad del sismo, verificando que la localización estuviera dentro del espesor cortical adecuado, de acuerdo con autores como MacKenzie et al. (2008), Lücke (2014), Lücke and Arroyo (2015), Alvarado et al. (2017), Hayes et al. (2018) y Barrera-Lopez et al. (2022). Posteriormente, se examinó la localización epicentral, determinando la ubicación más congruente del evento duplicado con base en reportes disponibles de redes locales o fuentes científicas y periodísticas. Si alguno de los eventos duplicados se encontraba alejado de las referencias geográficas mencionadas en los reportes, este era descartado. Finalmente, se verificó la magnitud del evento sísmico mediante el análisis de la consistencia de la magnitud reportada en el catálogo, comparándola con información de boletines sísmicos de redes locales. Con base en estos criterios, si dos o más bases de datos presentaban el mismo valor para el primer nivel de prioridad, se evaluaba el siguiente nivel, y así sucesivamente, hasta seleccionar la solución más apropiada según los informes de las redes sísmicas.

Por ejemplo, de acuerdo con lo anterior, los polígonos que incluyen los países de Guatemala, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica tienen niveles de prioridad (1) -

(3) - (4) (Figura 4). Esto implica que, en las áreas cubiertas por dichos polígonos, los terremotos se asignarán a partir de los catálogos de las redes locales, Alvarado et al. (2017) y RESIS II (M. B. Benito et al., 2012). Posteriormente, los eventos considerados como duplicados se someten al análisis descrito en la Tabla 3: primero se evalúa el RMS, seguido de la profundidad, la localización epicentral y, por último, la magnitud M_w . De esta manera se elige para el evento la solución que se considera más fiable.

3.1.2. Análisis de completitud espacial y temporal

La magnitud de completitud (M_c) se define como la magnitud mínima a partir de la cual se detecta el 100% de los eventos sísmicos ocurridos en una región y periodo determinados (Rydelek & Sacks, 1989; Woessner & Wiemer, 2005). Su determinación en los catálogos sísmicos es fundamental, ya que permite un mejor ajuste de los datos observados al investigar los parámetros de la fuente en una región específica (Arroyo-Solórzano & Linkimer, 2021).

Dado que M_c varía en el tiempo y en el espacio, se realizó primero un análisis de las distribuciones simple y acumulada del número de eventos por intervalo de magnitud, utilizando el método de Curvatura Máxima (Woessner & Wiemer, 2005). Este método se basa en la distribución magnitud-frecuencia (MFD) de los terremotos, identificando el punto de mayor incremento en la sismicidad. Se aplicó este método a cada una de las zonas sísmicas propuestas por Alvarado et al. (2017) para comprender las variaciones en la completitud del catálogo en los distintos sectores de Centroamérica.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de completitud temporal mediante el método de Stepp (1972), utilizando dos enfoques. El primer enfoque consistió en examinar el ajuste de la desviación estándar $[\sigma]$ del número acumulado de eventos sísmicos $[N(m)]$ frente a una curva $1/\sqrt{T}$, en intervalos de cinco años (T) (Arroyo et al., 2017). El intervalo de tiempo de registro completo para un rango de magnitud determinado se estableció cuando el coeficiente de determinación (R^2) no se desviaba más de 0.04 de la relación lineal de los datos. Es decir, se consideraron con registro completo aquellos intervalos de tiempo (T) con un $R^2 \geq 0.96$.

El segundo enfoque consistió en evaluar el porcentaje acumulado de eventos sísmicos $[\%N(m)]$ para distintos intervalos de magnitud (M_w), con el fin de detectar incrementos en la pendiente del porcentaje acumulado por intervalo de magnitud,

usando inspección visual como criterio original propuesto por Stepp (1972). El utilizar estos dos enfoques distintos ayuda a contrastar si los años de completitud calculados para los diferentes intervalos de magnitud (M_w) eran consistentes.

3.2. Cálculo de la peligrosidad sísmica en Centroamérica

Los inputs que interactúan en los cálculos de peligrosidad sísmica están sujetos a incertidumbres relacionadas con la forma en que se integran dentro de dichos cálculos. Por ejemplo, la definición de las fuentes sísmicas, los modelos de recurrencia, los parámetros sísmicos o los Modelos de Movimiento Fuerte (GMM) están influenciados por incertidumbres que tienen un impacto importante en los resultados finales de peligrosidad. Estas incertidumbres pueden ser epistémicas, inherentes a los modelos, y aleatorias, asociadas con la desviación estándar de los parámetros en los modelos.

Generalmente, se utilizan árboles lógicos para controlar las incertidumbres epistémicas, los cuales integran diferentes modelos posibles en los cálculos de peligrosidad sísmica, que se ponderan en función de su credibilidad (Ghods & Rofooei, 2022; Gurjar & Basu, 2022). Para asignar los pesos que se otorgan a las diferentes ramas del árbol lógico, se pueden aplicar métodos estadísticos.

En este sentido, el estudio se centra en el análisis de sensibilidad de diferentes modelos y parámetros de entrada en los cálculos de amenaza, relacionados con la caracterización de las fuentes sísmicas (depuración, método de ajuste del modelo de recurrencia, relaciones de escala) y los GMM. El objetivo es alcanzar una comprensión más clara de las incertidumbres y establecer una guía de selección de opciones, junto con una propuesta de ponderación del árbol lógico que sea replicable en futuros estudios de peligrosidad sísmica en Centroamérica (CA).

Con base en el análisis de sensibilidad, se generaron mapas que representan los coeficientes de variación (CV) de los resultados para las distintas opciones de entrada, proporcionando una idea de las zonas y condiciones que convergen para ofrecer resultados más o menos robustos.

Se utilizó el catálogo sísmico regional actualizado de Centroamérica, generado a partir de 14 bases de datos de redes sísmicas locales y regionales (Gamboa-Canté et al., 2024). También empleamos la zonificación sísmica propuesta por Alvarado et al. (2017) para caracterizar las fuentes sísmicas tipo zona en la región. Esta zonificación es una actualización de la propuesta por Benito et al. (2012) en el proyecto RESIS II. Las zonas sísmicas en el modelo de zonificación más reciente

fueron definidas mediante un análisis integral de información geológica, geodésica y sismológica de la región.

Una característica importante de la zonificación de Alvarado et al. (2017) es el cambio introducido en la subducción con respecto a otros modelos de zonificación anteriores (Benito et al., 2012). El ángulo de subducción a lo largo de la Fosa Mesoamericana (MAT) varía significativamente en Centroamérica, lo que influye tanto en la profundidad como en las características de la sismicidad en la región. Este modelo representa un consenso entre los sismólogos centroamericanos, evitando discontinuidades en las fronteras nacionales y fomentando un enfoque regional en la gestión del riesgo sísmico (Alvarado et al., 2017).

Esta integración regional de datos sísmicos, tectónicos y GPS ha permitido una demarcación más precisa de las zonas sísmicas, lo cual favorece el análisis probabilista de peligrosidad sísmica en la región.

3.2.1. Análisis de sensibilidad de los parámetros input que integran el cálculo de la peligrosidad sísmica e impacto en los resultados finales

Un análisis de sensibilidad ayuda a controlar la variabilidad que pueden introducir los parámetros o modelos de entrada en el cálculo, en los resultados finales de peligrosidad. Esa variabilidad refleja las incertidumbres, tanto epistémicas como aleatorias de los modelos y parámetros input (Ghods & Rofooei, 2022; Gurjar & Basu, 2022).

Estos análisis de sensibilidad pueden realizarse utilizando métodos estadísticos clásicos, donde los resultados permiten una comprensión más clara de la variabilidad de los resultados de amenaza para diferentes opciones de cálculo en un árbol lógico, mostrando así la incertidumbre epistémica (Gaspar-Escribano et al., 2015; Hamdache et al., 2022; Lombardi et al., 2005).

Desarrollamos este análisis de sensibilidad mediante la evaluación del coeficiente de variación (CV), el cual indica el grado de variabilidad en los resultados de amenaza, y se define como:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

donde σ es la desviación estándar del conjunto de resultados analizados y \bar{x} es el valor medio de dichos resultados.

Algunos autores sugieren que para valores bajos de CV (< 0.15), la dispersión de los datos se considera insignificante, resultando en un bajo impacto de las opciones o modelos de cálculo manejados. En cambio, valores de CV altos (≥ 0.15) representan una dispersión notable de los resultados según las opciones seguidas, y por lo tanto, resultados poco robustos en las áreas donde están presentes estos valores altos de CV (Gaspar-Escribano et al., 2015; Scheingraber & Käser, 2020). En este caso el impacto de los parámetros o modelos de entrada es alto.

3.2.1.1. Métodos de depuración

El análisis de peligrosidad sísmica independiente del tiempo, basado en modelos poissonianos, asume que la ocurrencia de sismos dentro de un periodo de tiempo dado y en una zona determinada es aleatoria. Para aplicar estos modelos, el catálogo sísmico debe contener eventos sísmicos independientes en el tiempo y el espacio, lo que requiere la eliminación de aquellos considerados como sismicidad dependiente (por ejemplo, réplicas, precursores y enjambres) mediante métodos de depuración.

La depuración del catálogo sísmico, dependiendo del método utilizado, resultará en variaciones en los cálculos de los parámetros de las fuentes sísmicas (Mizrahi et al., 2021; Perry & Bendick, 2024; Taroni & Akinci, 2021). En este estudio se utilizaron dos métodos de depuración para este análisis. El primero es el método de Reasenberg (1985) (RSB), que emplea un algoritmo para agrupar eventos sísmicos en una zona de interacción, analizando aquellos eventos considerados réplicas o premonitores en función de su ubicación espaciotemporal. El segundo método empleado es el propuesto por Gardner and Knopoff (1974) y modificado por Uhrhammer (1986) (UHR). Está basado en la definición de ventanas espacio temporales, dependiendo de la magnitud del evento principal, dentro de las cuales se considera que la sismicidad es dependiente de dicho evento.

Estos dos métodos de depuración fueron seleccionados porque son los más utilizados en la región centroamericana para estudios de peligrosidad sísmica (Álvarez, 2022; Arroyo-Solórzano & Linkimer, 2021; M. B. Benito et al., 2012; Garcia-Pelaez et al., 2019; Mixco Durán, 2020).

El método RSB fue aplicado usando el programa ZMAP, desarrollado por Wiemer (2001), mientras que el algoritmo UHR fue ejecutado con el Hazard Model Toolkit (Weatherill et al., 2014), incluido en el programa OpenQuake, desarrollado por la Global Earthquake Model Foundation (GEM) (Pagani et al., 2014; Silva et al.,

2014). El análisis de sensibilidad de estos dos métodos de depuración en los resultados de amenaza fue realizado conjuntamente con el método de ajuste del modelo de recurrencia, explicado en la siguiente sección.

3.2.1.2. Métodos de ajuste para el cálculo de *b*-valor

El modelo de recurrencia utilizado en las fuentes sísmicas es el modelo propuesto por Gutenberg and Richter (1944). Se usaron dos métodos de ajuste para este modelo: Mínimos cuadrados (bLS), y Máxima verosimilitud (bML), propuesto por Aki (1965), con el análisis de completitud definido por Weichert (1980).

Posteriormente, se calculó el coeficiente de variación (CV) para entender la variabilidad espacial en los resultados de peligrosidad para los regímenes cortical, interplaca e intraplaca, usando diferentes combinaciones de métodos de depuración y ajuste: (1) RSB–bLS, (2) RSB–bML, (3) UHR–bLS, (4) UHR–bML.

3.2.1.3. Relaciones de escalamiento de la magnitud máxima (M_{max})

La magnitud máxima posible (M_{max}) calculada a partir de la geometría del plano de falla, y representada en una fuente tipo zona, está condicionada por la relación de escalamiento aplicada y el régimen tectónico bajo análisis (Shaw, 2023).

Recientemente se realizó un análisis específico para Centroamérica. Arroyo-Solórzano et al. (2024) definieron relaciones de escalamiento para sismos someros corticales a partir de datos de 56 terremotos con epicentro en alguno de los países de Centroamérica. Además, los autores llevaron a cabo un análisis de residuos para identificar otras relaciones de escalamiento que se ajustaran a los datos observados, y definieron un árbol lógico para establecer M_{max} a partir de distintos parámetros, como longitud de ruptura en superficie (LRSup), longitud de ruptura en profundidad (LRSub), ancho (W) y área (A).

Este estudio se centró en relaciones de escalamiento que usan el área de ruptura (A). Para el régimen cortical, se siguió la propuesta del árbol lógico de Arroyo-Solórzano et al. (2024) y se compararon los valores de M_{max} obtenidos con las relaciones de escalamiento propuestas en dicho estudio y las propuestas por Thingbaijam et al. (2017) y Papazachos et al. (2004). Para el régimen de interplaca, se compararon las relaciones propuestas por Wells and Coppersmith (1994), Strasser et al. (2010), Allen and Hayes (2017) y Thingbaijam et al. (2017). Finalmente, para el régimen intraplaca, se compararon solo aquellas propuestas por Strasser et al. (2010) y Allen and Hayes (2017).

La comparación entre los resultados de amenaza utilizando diferentes relaciones de escalamiento para cada régimen tectónico se llevó a cabo utilizando el coeficiente de variación (CV), con el fin de evaluar su variabilidad espacial y determinar si la aplicación de estas relaciones afecta significativamente a las aceleraciones que representan la peligrosidad en el territorio de CA.

3.2.1.4. Modelos de Movimiento Fuerte (GMM)

Los Modelos de Movimiento Fuerte (GMM) influyen significativamente en los resultados del cálculo de peligrosidad sísmica. Lo ideal es disponer de modelos ajustados con datos acelerométricos de la región de estudio, que representen de forma fiable la atenuación. Sin embargo, hasta que se desarrolle y calibre un modelo adecuado para CA, es necesario identificar el modelo GMM más apropiado entre los publicados en la literatura especializada.

La forma más efectiva de analizar e identificar el modelo GMM más adecuado para una región es mediante un análisis de residuos, que mide la diferencia entre los valores de aceleración predichos por el modelo y los observados en la región. Este enfoque tiene como objetivo determinar qué GMM caracteriza mejor la atenuación en la región (Gurjar & Basu, 2022).

En estudios de peligrosidad sísmica a nivel nacional para El Salvador y Costa Rica, ya se han identificado varios GMM que mejor se ajustan a los datos registrados (Hidalgo-Leiva et al., 2023; Mixco Durán, 2020). Estos estudios emplearon dos enfoques: el método de verosimilitud logarítmica (LLH) propuesto Scherbaum et al. (2009), y el método de ranking basado en la distancia euclidiana (EDR), propuesto por Kale and Akkar (2013). En este trabajo, se han tomado los GMM calibrados en esos estudios para el cálculo regional de la peligrosidad.

Para el régimen cortical se seleccionaron los modelos de Kanno et al. (2006), Atkinson and Boore (2011), Akkar et al. (2014), Boore et al. (2014) y Cauzzi et al. (2015). Para el régimen de interplaca, se seleccionaron los modelos de Youngs et al. (1997), Kanno et al. (2006), Zhao et al. (2006) y Abrahamson et al. (2016). Finalmente, para el régimen intraplaca, se seleccionaron los modelos propuestos por Youngs et al. (1997), Kanno et al. (2006), Abrahamson et al. (2016) y Montalva et al. (2017).

3.2.2. Asignación de pesos al árbol lógico

Para asignar pesos en el árbol lógico a los inputs de cálculo obtenidos con métodos de depuración y ajuste del *b-valor*, se propone el enfoque desarrollado por Gurjar and Basu (2022). Se estimaron las tasas sísmicas observadas $[\dot{N}(m)_{obs}]$ durante todo el período de registro y para cada intervalo de magnitud M_w , utilizando los métodos de depuración de Reasenberg (RSB) y Uhrhammer (UHR), respectivamente. Así mismo, se estimaron las tasas sísmicas predichas $[\dot{N}(m)_{pred}]$ utilizando los métodos de ajuste por máxima verosimilitud (bML) y mínimos cuadrados (bLS). Finalmente, se calcularon el error cuadrático medio (MSE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre los datos observados y predichos, partiendo de la magnitud de completitud (M_c).

Los pesos asociados a cada método en el enfoque del árbol lógico se propusieron como inversamente proporcionales al error cuadrático medio en todas las fuentes zonificadas (Gurjar & Basu, 2022). Esto significa que se pueden comparar los errores cuadráticos medios (MSE) de ambos métodos, y se construye la relación lineal de mejor ajuste, con la restricción de que el intercepto sea cero, es decir, $MSE_y = \theta \times MSE_x$, donde θ es la pendiente de la recta de mejor ajuste con intercepto cero, MSE_y es el error cuadrático medio en el eje de ordenadas y MSE_x es el error cuadrático medio en el eje de abscisas.

Para los inputs de relaciones de escalamiento de la magnitud máxima (M_{max}), se establecieron los pesos según los criterios fijados por Arroyo-Solórzano et al. (2024) para el régimen cortical, y para los demás regímenes tectónicos se analizaron los mapas de coeficiente de variación (CV), y a través de juicio de experto, se determinó el peso más conveniente.

En el caso de los modelos de movimiento fuerte (GMM), se analizaron mapas de coeficiente de variación (CV) y se contrastó el análisis por medio de perfiles de aceleración en las diferentes zonas sísmicas propuestas por Alvarado et al. (2017). Observando y analizando la variabilidad de las aceleraciones, se seleccionaron y determinaron los pesos más convenientes para los GMM.

3.2.3. Mapas de peligrosidad sísmica para Centroamérica

Con base en el árbol lógico propuesto, se generó un mapa de peligrosidad sísmica para Centroamérica en términos de ordenadas espectrales de PGA y SA(1.0s) para periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años. Para ello, se utilizó el programa

OpenQuake de la Fundación Global Earthquake Model (GEM) para llevar a cabo los cálculos de peligrosidad sísmica (Pagani et al., 2014; Silva et al., 2014).

3.2.4. Análisis de desagregación sísmica

Los mapas de peligrosidad sísmica no muestran los eventos sísmicos que tienen mayor probabilidad de afectar a las capitales de los países centroamericanos. Para identificar los eventos que más contribuyen a la peligrosidad en las capitales, se realizó un análisis de desagregación de la peligrosidad tomando como movimiento objeto las ordenadas espectrales de PGA y Sa(1.0s) resultantes del cálculo para un periodo de retorno de 475 años. Se identificaron así los sismos de control que más contribuyen a la peligrosidad en términos de magnitud – distancia – épsilon ($M_w - R_{rup} - \epsilon$). En todos los casos se fijó el valor de épsilon en la unidad, por lo que el análisis se limitó a la interpretación de los pares ($M_w - R_{rup}$).

También se generaron curvas de peligrosidad sísmica para las seis capitales, para la PGA y diferentes ordenadas espectrales, SA(T). A partir de estas curvas, se establecieron los espectros de amenaza uniforme (UHS) para periodo de retorno de 475 años, los cuales pueden compararse con los espectros de diseño establecidos en los códigos sísmicos locales de cada país y utilizarse para futuras actualizaciones.

3.3. Comparación de resultados del estudio actualizado con otros modelos de peligrosidad sísmica en Centroamérica

3.3.1. Comparación con estudios regionales

A nivel regional, se han publicado dos mapas para toda la región centroamericana en los últimos diez años: 1) el mapa desarrollado en el marco del proyecto CCARA-GEM (García-Pelaez et al., 2019) por la Fundación Global Earthquake Model (GEM) y actualizado por Johnson et al. (2023), en adelante referido como GEM-23, y 2) el modelo de peligrosidad sísmica para el Caribe y Centroamérica con fines de seguros paramétricos (Salgado-Gálvez et al., 2022), en adelante referido como CCASH-22.

Se comparó el mapa KUKAHPÁN-25 con los otros dos mapas regionales, GEM-23 y CCASH-22, con el objetivo de identificar las áreas con mayor coincidencia entre los resultados, así como aquellas con mayor variabilidad. Esto se realizó mediante un mapa de coeficiente de variación (CV) y un mapa de relación de aceleraciones.

3.3.2. Comparación con estudios locales

Se seleccionaron los estudios locales más recientes de cada país que cuentan con un mapa actualizado de peligrosidad sísmica a nivel nacional. En el caso de Guatemala, se utilizó el mapa propuesto por Kalakonas et al. (2020); para El Salvador, el mapa propuesto por Mixco Durán (2020); en Honduras, el mapa de Castillo et al. (2008); para Nicaragua, el mapa resultante del nuevo estudio de peligrosidad sísmica realizado por Álvarez (2022); y finalmente, para Costa Rica, el modelo de peligrosidad sísmica propuesto por Hidalgo-Leiva et al. (2023). En el caso de Panamá no existen estudios probabilistas recientes a nivel nacional, por lo que no fue posible realizar comparaciones a esa escala. El último estudio oficial publicado para el país fue realizado en 1997, que dada su antigüedad se consideró poco confiable para comparar con este estudio regional (Camacho et al., 1997).

Se hace énfasis en la importancia de mantener actualizados los estudios de peligrosidad sísmica para cada país, que hagan uso de nuevas metodologías e incorporen bases de datos actualizadas, permitiendo así entender con mayor precisión la amenaza real que representan las fuentes sísmicas activas en la región. Además, contar con estudios actualizados contribuye significativamente a la mejora de los códigos de construcción sísmica de cada país. Para evaluar el impacto de los mapas nacionales de peligrosidad sísmica frente al mapa KUKAHPÁN-25, se elaboró un mapa de relación de valores de PGA para un periodo de retorno de 475 años.

3.3.3. Comparación con códigos sísmicos locales

La mayoría de los códigos sísmicos incluyen un mapa de zonificación sísmica que muestra los valores de aceleración pico PGA en condiciones de suelo duro o roca. En este trabajo, se realizó una comparación entre las aceleraciones del último mapa regional de peligrosidad sísmica para Centroamérica (Gamboa-Canté et al., 2025a) y las aceleraciones establecidas en el código sísmico más reciente de cada país involucrado (Acuña et al., 2011; Castillo et al., 2008; Delgado Carranza et al., 2021; Kiamco et al., 2022; López et al., 2021; Paiz Aragón et al., 2024). Para ello, se generó un gráfico de correlación que compara las aceleraciones del mapa KUKAHPÁN-25 con aquellas calculadas para varias ciudades de cada país según su respectivo código sísmico local.

3.4. Integración de las fuentes tipo falla y tipo zona en los cálculos de la peligrosidad sísmica en Centroamérica

Este subcapítulo constituye un aporte metodológico adicional realizado en la tesis doctoral como parte de los objetivos planteados, donde se realiza la actualización del método propuesto por Rivas-Medina et al. (2018), y se aplica a un caso de estudio en Guatemala. Además, se realiza una comparación con los resultados de otras metodologías que integran las fuente tipo falla y tipo zona a los cálculos de la peligrosidad sísmica.

3.4.1. Modelo propuesto por Rivas-Medina et al. (2018)

El modelo propuesto por Rivas-Medina et al. (2018) es un método que combina fuentes sísmicas tipo zona y tipo falla. Este método diferencia los conceptos de *región* y *zona*, aunque geográficamente son coincidentes. Se entiende por *región* el polígono que engloba todo el potencial sísmico tanto de las fallas, contenidas en él, como la sismicidad residual. La *zona* corresponde al mismo polígono, pero solo representa el potencial sísmico de la sismicidad residual, es decir, excluye las fallas.

Este método cuantifica el potencial sísmico total de la región ($\dot{M}_{o_{region}}$) a partir de los registros de sismos en el catálogo sísmico, mientras que el potencial sísmico de las fallas ($\dot{M}_{o_{faults}}$) se calcula utilizando su tasa de deslizamiento y el tamaño del plano de falla (Brune, 1968). Para estimar el potencial sísmico de la zona ($\dot{M}_{o_{zone}}$), se resta el potencial sísmico de las fallas ($\dot{M}_{o_{faults}}$) del potencial sísmico total de la región ($\dot{M}_{o_{region}}$). Esto permite determinar el porcentaje del potencial sísmico distribuido entre fuentes tipo zona y tipo falla, en lugar de predefinirlo como en métodos anteriores (Bungum, 2007; Chartier et al., 2019).

Es crucial recordar que los registros sísmicos no son completos para todos los rangos de magnitud y periodos de tiempo, por lo que es esencial definir previamente los periodos de completitud del catálogo para cada intervalo de magnitud, lo cual es una práctica común en estudios de peligrosidad sísmica (Stepp, 1972; Weichert, 1980). Además, es necesario establecer un rango de magnitudes para el cual el catálogo registra todos los sismos de forma completa (Rydelek & Sacks, 1989; Woessner & Wiemer, 2005). Este análisis, aunque menos común, es esencial para la correcta implementación del método y se realiza

identificando la magnitud máxima de completitud ($M_{max}C$) para la distribución del potencial. Para más detalles sobre este proceso, véase Rivas-Medina et al. (2018).

Este método híbrido no solo estima el porcentaje de distribución del potencial sísmico —en lugar de predefinirlo anticipadamente—, sino que también calcula el b – *valor* de las fuentes tipo falla asociadas al modelo de recurrencia de sismos. Esto reduce significativamente la dependencia del juicio experto para tomar decisiones previas al cálculo, entre ellas la asignación del b – *valor* de las fallas. No obstante, sigue siendo necesario definir algunos parámetros preliminares, como $M_{max}C$ y el b – *valor* de la fuente tipo zona (*btz*) asociada al modelo de recurrencia de sismos.

Debe aclararse que el método propuesto por Rivas-Medina et al. (2018) utiliza internamente el parámetro β del modelo de Gutenberg-Richter [$\beta = b * \ln(10)$]. A partir de aquí nos referiremos a él como β – *valor*. Asimismo, emplea el modelo modificado de Gutenberg-Richter, que aplica el modelo exponencial doblemente modificado propuesto por Cosentino et al. (1977).

3.4.1.1. Problema y actualización

El método propuesto por Rivas-Medina et al. (2018) permite una implementación en la que no es necesario preestablecer tantos parámetros como en otros métodos propuestos. Los parámetros $M_{max}C$ y el β – *valor* de la fuente tipo zona tienen una influencia significativa en la distribución de la tasa de momento sísmico (\dot{M}_o). El valor de estos parámetros debe estar bien fundamentado y justificado; de lo contrario, el sistema no encuentra un equilibrio en la distribución del potencial sísmico entre zonas y fallas, y el modelo no puede ser aplicado. Un ejemplo de esta situación se presenta cuando una región contiene fallas con altas tasas de deslizamiento, pero el catálogo sísmico no registra una actividad sísmica proporcional. En estos casos, al intentar distribuir el momento sísmico (M_o), no se puede obtener un β – *valor* coherente, ya que las fallas tienen una tasa de momento sísmico asociada mayor a la registrada ($\dot{M}_{ofaults} \gg \dot{M}_{oregion}$). Esta falta de convergencia en el equilibrio del método suele ser provocada por imprecisiones en los datos predefinidos inicialmente, especialmente en los parámetros que determinan la completitud del catálogo sísmico, como la $M_{max}C$ (Rivas-Medina et al., 2018).

Ante esta problemática y con el objetivo de facilitar la aplicación de dicho método, se propone una modificación en su implementación (Figura 5). En lugar de

establecer previamente el valor de $M_{max}C$, la magnitud máxima de la zona ($M_{max}zone$) y el β – valor de la fuente tipo zona (btz), para estimar modelos de recurrencia, la herramienta del *HybridModel* (H_M) identifica todas las combinaciones posibles de valores para $M_{max}C$, $M_{max}zone$, β – valor de las fallas (btf) y el β – valor de la zona (btz) que generan un equilibrio entre el potencial sísmico registrado (en los periodos completos) y el potencial sísmico que pueden generar las fallas. El resultado de esta búsqueda es una combinación de soluciones posibles para que la distribución de la energía sísmica se mantenga en equilibrio dentro del sistema (fallas + zona).

A partir de los resultados, el experto debe analizar las soluciones proporcionadas por el *HybridModel* (H_M) y seleccionar una o más soluciones probables según el conocimiento sismotectónico de la región, para luego incorporarlas en un árbol lógico. El juicio experto sigue siendo fundamental, pero las decisiones se toman entre varias opciones posibles.

Para orientar el proceso de toma de decisiones del experto, dado que el β – valor no es un parámetro fácil de seleccionar o suponer, puede utilizarse $M_{max}C$ como parámetro de referencia. Esta magnitud puede definirse en función del catálogo sísmico y del potencial sísmico que pueden liberar las fallas. Por ejemplo, en áreas con fallas de baja tasa de deslizamiento y catálogos sísmicos con pocos registros de terremotos de gran magnitud, es probable que se presenten valores bajos de $M_{max}C$. Por el contrario, áreas con fallas rápidas (altas tasas de deslizamiento) y catálogos sísmicos con muchos registros de terremotos de gran magnitud pueden tener valores más altos de $M_{max}C$.

Finalmente, al decidir entre las combinaciones posibles, debe recordarse que todas provienen de los mismos datos de partida: la misma tasa de sismos registrados [$\dot{n}(m)$] y el mismo potencial sísmico de las fallas ($\dot{M}o_{faults}$). Por tanto, las distintas combinaciones posibles mantienen constante el potencial sísmico total de la región ($\dot{M}o_{region}$), variando únicamente su distribución dentro de la región. Si el potencial sísmico aumenta en las fallas, disminuirá en la zona de fondo, y viceversa.

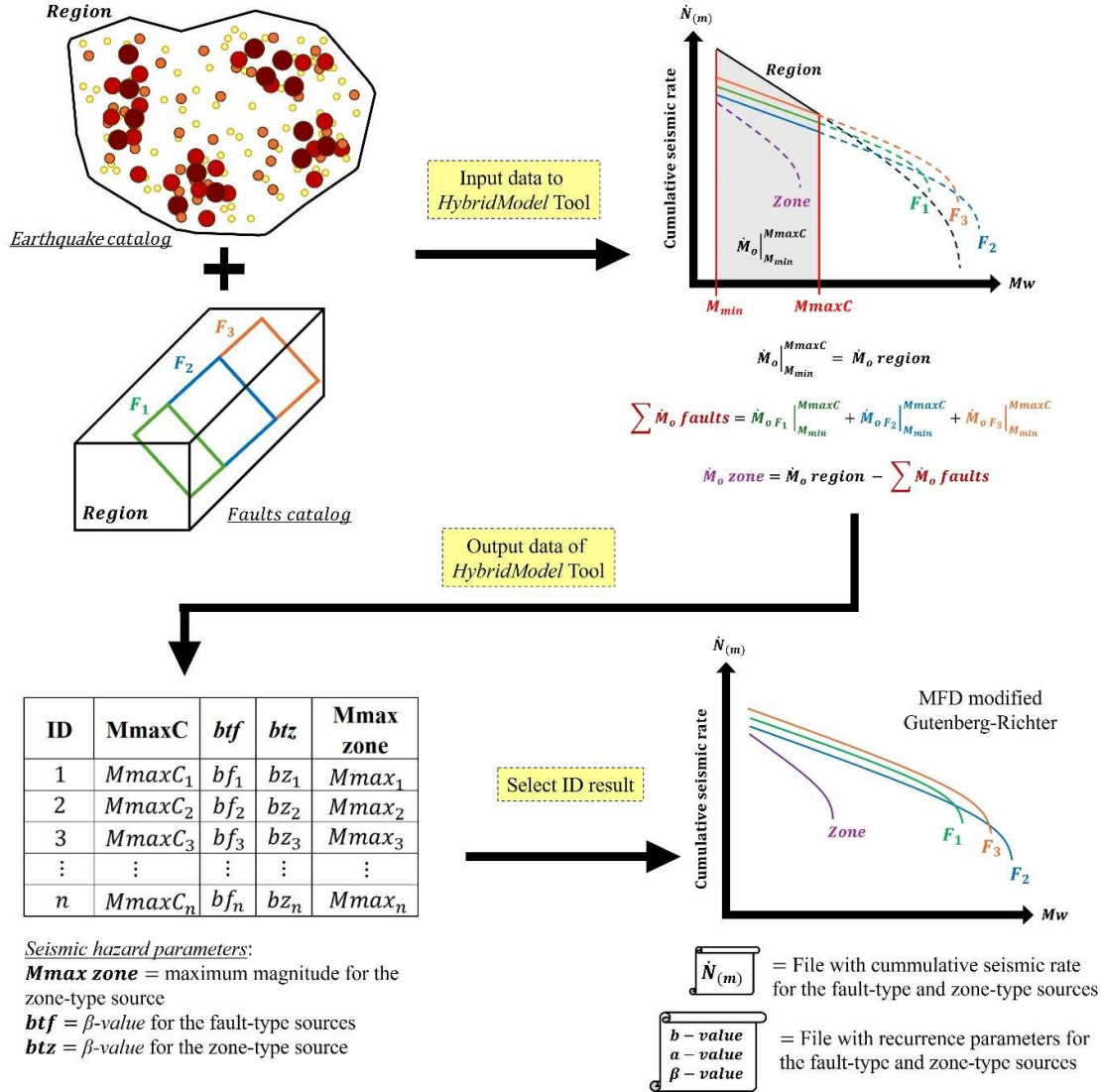


Figura 5: Diagrama de flujo de la metodología actualizada propuesta por Rivas-Medina et al. (2018). (1) Se define el catálogo sísmico y el catálogo de fallas para la región, (2) la herramienta *HybridModel* (H_M) genera el equilibrio entre el potencial sísmico registrado (región) y el potencial sísmico de las fuentes tipo falla, (3) la herramienta *HybridModel* (H_M) muestra todas las combinaciones posibles para dicho equilibrio, (4) el usuario selecciona una combinación y la herramienta *HybridModel* (H_M) genera los archivos de salida de las fuentes sísmicas.

3.4.1.2. Diagrama de trabajo de la herramienta *HybridModel* (H_M)

La herramienta *HybridModel* (H_M) está dividida en dos secciones. La primera sección del código realiza cálculos iterativos para mostrar todas las combinaciones posibles de manera que la distribución del potencial sísmico entre las fuentes tipo zona y las fuentes tipo falla esté en equilibrio. La segunda sección toma la combinación seleccionada como entrada para el cálculo de peligrosidad sísmica y

muestra la interfaz gráfica con el modelo de recurrencia de sismos para dicha combinación.

La Figura 6 ilustra el diagrama de flujo del preprocesamiento utilizado por el *HybridModel* (H_M) antes de iniciar el proceso iterativo:

El código lee y almacena los archivos de entrada que contienen el catálogo sísmico y el catálogo de fallas, junto con los parámetros de entrada definidos al inicio. Además, usando el catálogo sísmico, se calcula el momento sísmico M_o y la tasa \dot{M}_o registrada durante los periodos de observación completa (para cada intervalo de magnitud) dentro del rango de magnitudes $M_{min} - M_{max\ obs}$ (Brune, 1968; Hanks & Kanamori, 1979). Luego, simultáneamente, calcula el momento sísmico ($M_{ofaults}$) para la magnitud máxima esperada ($M_{max\ faults}$) y la tasa de momento sísmico para cada falla ($\dot{M}_{ofaults}$).

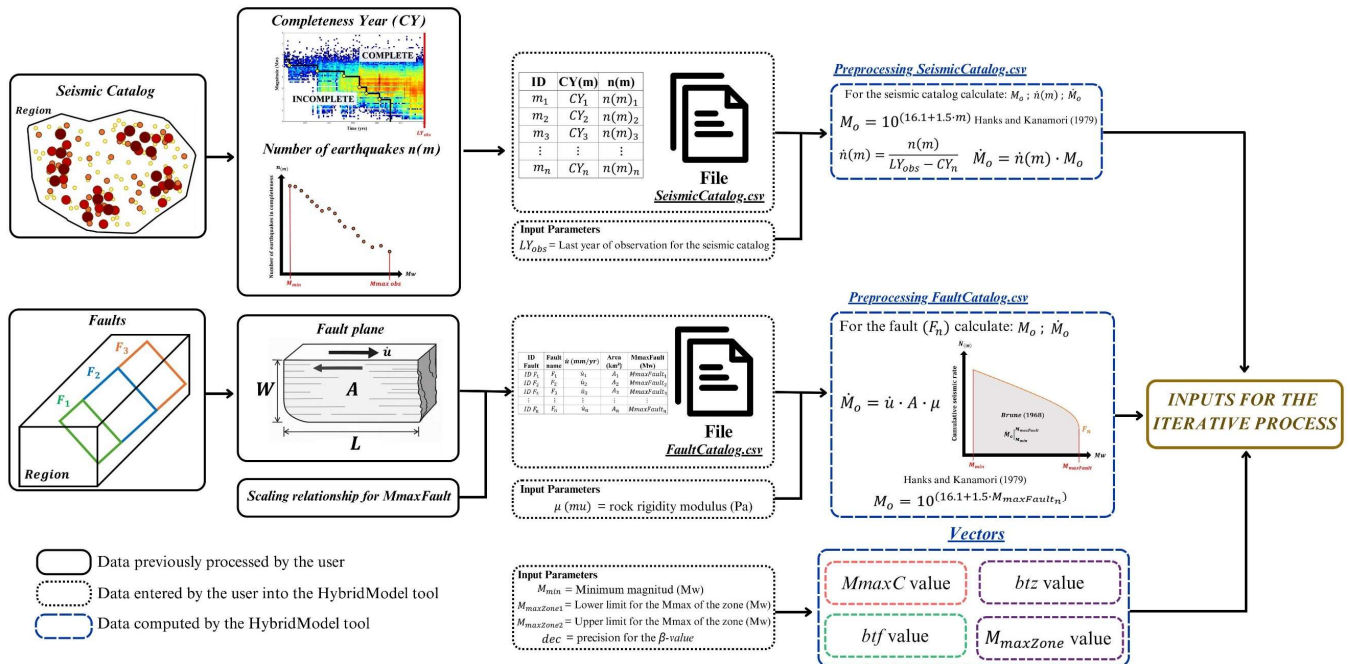


Figura 6: Flujo de trabajo del preprocesamiento de datos del *HybridModel* (H_M).

La Figura 7 ilustra el diagrama de trabajo del proceso iterativo del *HybridModel* (H_M) para calcular las posibles soluciones:

Los parámetros del preprocesamiento se almacenan y se inicia un bucle para calcular la tasa acumulada de terremotos ($\dot{N}M_{min}$) y la tasa acumulada de momento sísmico (\dot{M}_o) registrada en el catálogo sísmico y acumulada en las fallas dentro del rango de magnitudes $M_{min} - M_{maxC}$ (Anderson, 1979; Cosentino et al., 1977). Para asegurar que el bucle sea funcional y pueda evaluar todos los valores que pueden

generar una solución confiable, se analiza un vector que contiene diferentes valores de btf . Este vector btf está compuesto por valores de β en el rango de 1.0 – 3.0, típicos para caracterizar el modelo de recurrencia de fuentes sísmicas corticales, aunque el usuario puede ampliar este rango (desde la raíz del código), según su conocimiento de la sismotectónica del área. Además, el vector btf depende de la precisión decimal (n) definida en los parámetros de entrada. Adicionalmente, se considera otro vector para $M_{max}C$, que contiene valores de magnitud que aumentan en incrementos de Mw 0.1 desde la magnitud mínima (M_{min}) hasta la magnitud máxima observada en el catálogo sísmico ($M_{max\ obs}$). Cabe mencionar que en el vector $M_{max}C$, se suma una unidad de magnitud a M_{min} , ya que se debe contar al menos con un orden de magnitud (Mw) superior para poder distribuir el potencial sísmico entre la zona y las fallas.

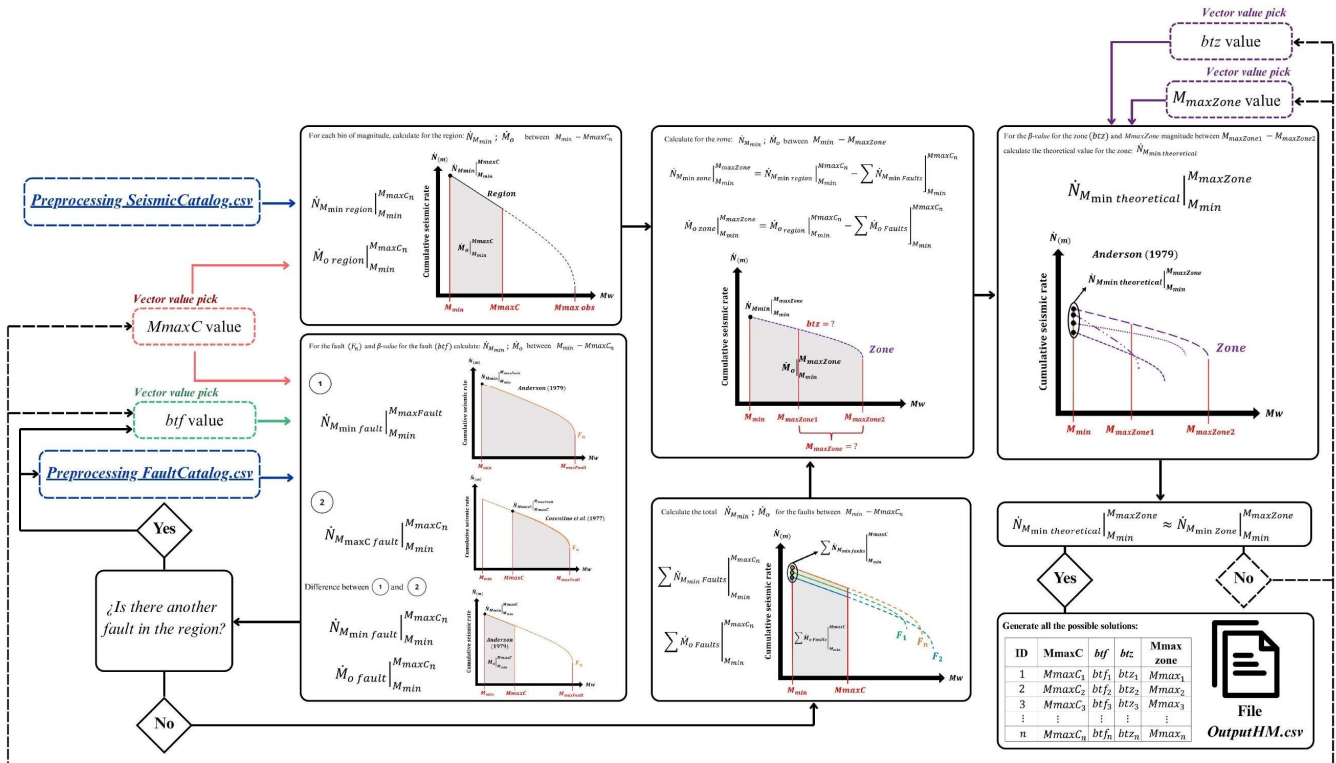


Figura 7: Flujo de trabajo de proceso iterativo para calcular las posibles soluciones utilizando la herramienta *HybridModel* (H_M), que ilustra los pasos para distribuir el potencial sísmico y la tasa sísmica acumulada entre fuentes de tipo zona y tipo falla.

Después de calcular la $\dot{N}M_{min}$ y la \dot{M}_0 registradas en el catálogo sísmico y acumuladas en las fallas, se calcula la $\dot{N}M_{min}$ y la \dot{M}_0 asociadas a la fuente tipo zona como la diferencia entre esos dos valores.

Luego, la $\dot{N}M_{min}$ y la \dot{M}_o para la fuente tipo zona se almacenan para su posterior comparación con la tasa teórica acumulada de terremotos mayores o iguales a la magnitud mínima ($\dot{N}M_{min\ theoretical}$). Esta $\dot{N}M_{min\ theoretical}$ se calcula mediante un bucle que contiene tres vectores con diferentes valores de $M_{max}C$, el valor β para la fuente tipo zona (*btz*) y aumentos de magnitud de Mw 0.1 dentro del rango de $M_{maxZone1}$ a $M_{maxZone}$. Para calcular los diferentes valores de $\dot{N}M_{min\ theoretical}$ dentro del rango de M_{min} a $M_{maxzone}$ para la fuente tipo zona, se utiliza la ecuación de Anderson (1979).

El código muestra todas las combinaciones de parámetros que generan convergencia en la distribución de energía entre la fuente tipo zona y las fuentes tipo falla, satisfaciendo tres condiciones:

- (1) La diferencia entre la $\dot{N}M_{min}$ observada y la $\dot{N}M_{min\ theoretical}$ calculada para la fuente tipo zona debe ser menor a 0.001, lo cual indica que el valor observado es aproximadamente igual al valor teórico.
- (2) El valor de $\dot{N}M_{min}$ para la fuente tipo zona debe ser mayor que cero, indicando la presencia de sismicidad de fondo.
- (3) El valor de \dot{M}_o para la fuente tipo zona debe ser mayor que cero, indicando que aún hay energía sísmica residual asignada a la fuente tipo zona después de realizar la distribución del potencial sísmico.

La Figura 8 muestra el diagrama de flujo del proceso que sigue el *HybridModel* (H_M) para estimar los modelos de recurrencia de sismos tanto para la fuente tipo zona como para las fuentes tipo falla para cada combinación de parámetros que genera convergencia. El usuario selecciona la combinación resultante (por su identificador ID), y el código calcula el modelo asociado de Gutenberg-Richter para cada fuente sísmica (Cosentino et al., 1977).

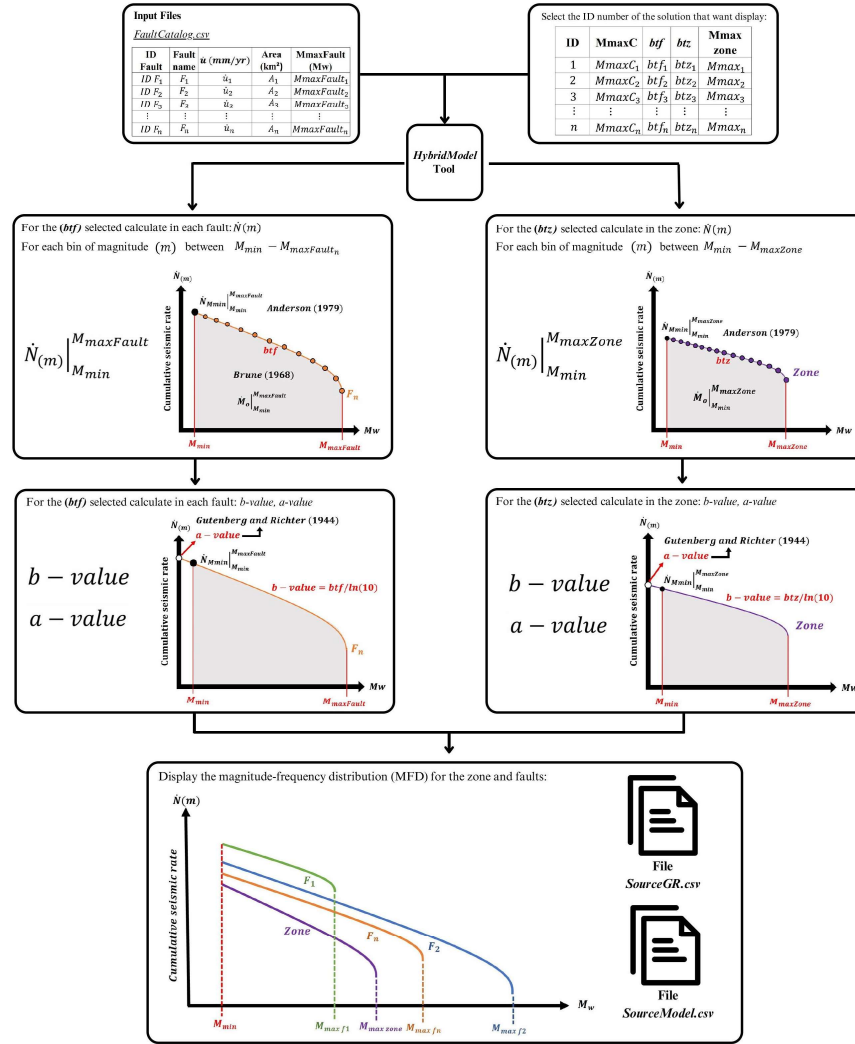


Figura 8: Flujo de trabajo del proceso para mostrar soluciones gráficas con la herramienta *HybridModel* (H_M). El diagrama describe los pasos para estimar las tasas de sismicidad para las fuentes tipo zona y tipo falla para cada combinación de parámetros. El usuario selecciona una combinación específica mediante un identificador (ID), y la herramienta calcula la distribución magnitud-frecuencia (MFD) asociada para cada fuente sísmica.

Los archivos de salida más importantes tras ejecutar el *HybridModel* (H_M) son:

1. *OutputHM.csv*: Este archivo contiene todas las combinaciones de parámetros que generan convergencia en la distribución de energía entre la fuente tipo zona y las fuentes tipo falla. Los parámetros incluidos en este archivo son la magnitud máxima de completitud (M_{maxC}), el valor β para la falla (*btf*), el valor β para la zona (*btz*) y la magnitud máxima para la zona ($M_{max\ zone}$). Este archivo corresponde a la salida del diagrama de flujo mostrado en la Figura 7.

Salidas tras seleccionar una combinación de parámetros (correspondiente a la salida del diagrama de flujo mostrado en la Figura 8). En base al ID seleccionado de la combinación de parámetros:

2. *SourceGR.csv*: Este archivo contiene los valores de la magnitud máxima (M_{max}), la tasa sísmica acumulada para la magnitud mínima ($\dot{N}M_{min}$), el valor β , el b – valor y el a – valor para la fuente tipo zona y para las fuentes tipo falla.
3. *SourceModel.csv*: Este archivo contiene las tasas sísmicas acumuladas [$\dot{N}(m)$] en el rango de M_{min} a M_{max} para la fuente tipo zona y las fuentes tipo falla.
4. Se genera un gráfico que muestra el modelo de Gutenberg-Richter para la fuente tipo zona y las fuentes tipo falla.

3.4.2. Aplicación caso de estudio en Guatemala

Guatemala es el país más activo de la región, debido a que se encuentra próximo al punto triple de contacto de las tres placas tectónicas previamente mencionadas (Guzmán-Speziale & Molina, 2022). La alta actividad sísmica en esta zona ha afectado particularmente a la ciudad capital, causando destrucción total o parcial de su infraestructura a lo largo de su historia. Esto ha llevado a la necesidad de trasladar la capital hasta tres veces de sitio geográfico como consecuencia de los grandes terremotos históricos que han ocurrido en el pasado (Sáenz Bravo, 2013). La intensa actividad sísmica ha afectado también a otras poblaciones del país. Entre los terremotos que más impacto han tenido en el territorio guatemalteco se pueden destacar los siguientes: Santa Marta de 1773 Mw 7.5, Alta Verapaz de 1785 Mw 7.4 (White, 1984), Chixoy-Polochic de 1816 Mw 7.5 (White, 1985), Ciudad de Guatemala de 1917 y 1918 Mw 5.6 (Guzmán-Speziale & Molina, 2022), Motagua de 1976 Mw 7.5 (Plafker, 1976), Champerico de 2012 Mw 7.4 (Ellis et al., 2015) y San Marcos de 2017 Mw 6.9.

En los últimos años se han desarrollado numerosos avances, tanto metodológicos como de captura de datos, que permiten una mejor caracterización de las tres componentes que integran el riesgo sísmico (amenaza, exposición y vulnerabilidad), lo que permite a su vez definir escenarios de riesgo cada vez más precisos, con mayor resolución y menor incertidumbre. Por una parte, es de destacar el creciente volumen de datos de fallas activas en Guatemala (Agate et al., 2024; Guzmán-Speziale & Molina, 2022), gracias al desarrollo de proyectos de

paleosimicidad (Authemayou et al., 2012), campañas de GNSS (A. Ellis et al., 2018, 2019; Garnier et al., 2021, 2022; Lyon-Caen et al., 2006) y aplicaciones INSAR (García-Lanchares et al., 2023, 2025), que aportan una valiosa información sobre la cinemática de las fallas permitiendo conocer las tasas de deslizamiento, además de su geometría. Esto posibilita la modelización de fallas geológicas como fuentes independientes en el cálculo probabilista de la peligrosidad sísmica, lo que supone una notable mejora respecto a los cálculos tradicionales basados únicamente en fuentes tipo zona.

Para este estudio, se han definido seis segmentos de falla para representar las fallas activas más estudiadas en Guatemala: el sistema de fallas de Motagua, el sistema de fallas Polochic-Chixoy, falla de Jalpatagua y la falla de Ixcán. Los segmentos de fallas fueron definidos de la siguiente manera:

1. Segmento IXC – segmento de la falla de Ixcán (Agate et al., 2024).
2. Segmento JLP – segmento de la falla de Jalpatagua (Garnier et al., 2021).
3. Segmento M01 – segmento de igual longitud al generado en el terremoto de Motagua de 1976 Mw 7.5 (Plafker, 1976).
4. Segmento M02 – GAP sísmico en el sistema de fallas de Motagua (Graham et al., 2012).
5. Segmento P01 – segmento E-W de igual longitud al generado por el terremoto de 1816 Mw 7.7 (White, 1985).
6. Segmento P02 – segmento NE-SW de igual longitud al generado por el terremoto de 1785 Mw 7.4 (Authemayou et al., 2012; White, 1984).

La Tabla 4 resume los parámetros geométricos y cinemáticos de los segmentos de fallas definidos para este estudio. Así mismo, la Figura 9 muestra la ubicación de estos segmentos de falla utilizados.

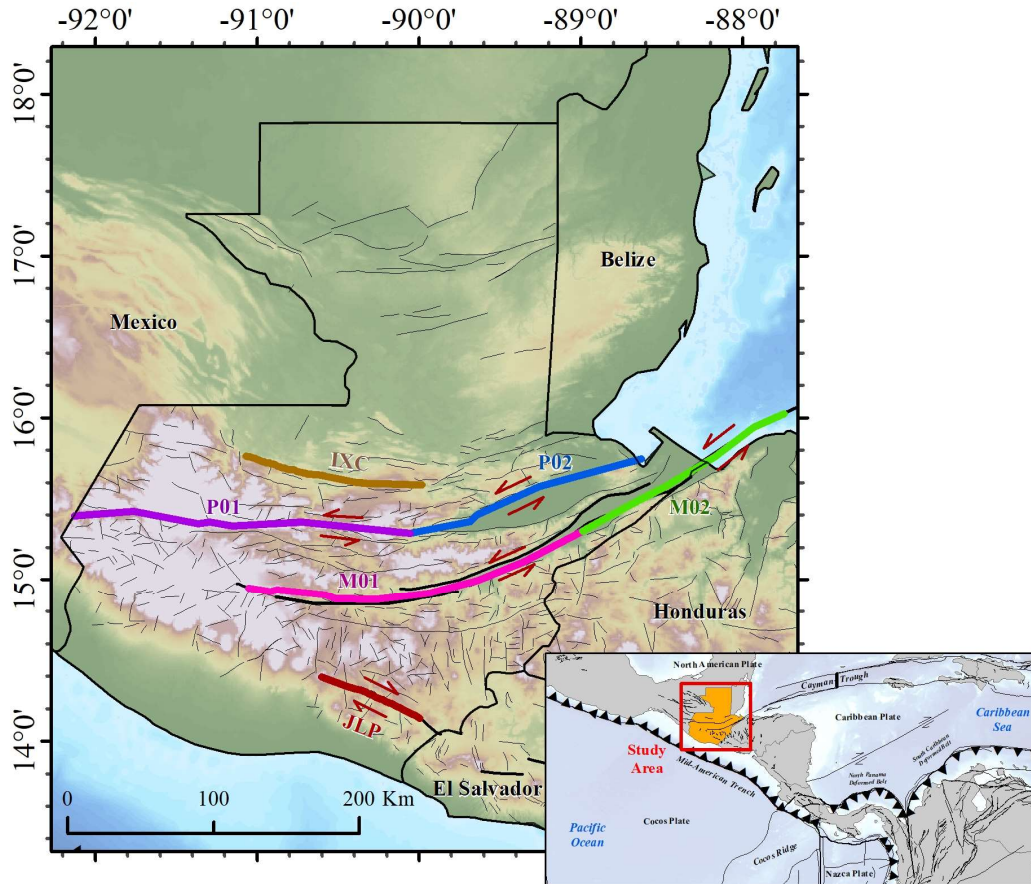


Figura 9: Segmentos de fallas analizados en este estudio para Guatemala. Las líneas grises muestran la base de datos de fallas de Agate et al. (2024) del proyecto RIESCA. IXC – Falla de Ixcán, P01 – Segmento Polochic-Chixoy con orientación E-W, P02 – Segmento Polochic-Chixoy con orientación NE-SW, M01 – Segmento del Motagua con la misma longitud que el terremoto del 4 de febrero de 1976, M02 – Segmento del GAP sísmico del sistema de fallas de Motagua, JLP – Falla de Jalpatagua.

Tabla 4: Geometría de los segmentos de fallas analizados en Guatemala

Código	Segmento	Tipo falla	Angulo Dip - Rake	Longitud (Km)	Ancho (Km)	L/W	Slip rate (mm/yr)	Referencia
IXC	Ixcán Fault	Sinistral strike-slip	(90°, 0°)	125.00	18.00	6.94	1.0 ± 0.9	Styron et al. (2020)
P01	E – W segment Polochic-Chixoy	Sinistral strike-slip	(90°, 0°)	278.66	18.00	15.48	3.7 ± 1.2	Garnier et al. (2022)

P02	NE – SW segment Polochic- Chixoy	Sinistral strike- slip	(90°, 0°)	189.72	18.00	10.54	3.7 ± 1.2	Garnier et al. (2022)
M01	E – W segment Motagua	Sinistral strike- slip	(90°, 0°)	232.61	18.00	12.92	12.0 ± 1.9	Garnier et al. (2022)
M02	NE – SW segment Motagua	Sinistral strike- slip	(90°, 0°)	155.74	18.00	8.65	14.0 ± 1.9	Garnier et al. (2022)
JLP	Jalpatagua Fault	Dextral strike- slip	(90°, 0°)	73.08	15.00	4.87	7.1 ± 1.8	Garnier et al. (2021)

3.4.3. Comparación con otros métodos que integran las fuentes tipo falla y tipo zona

Para realizar la comparación con otros métodos, el análisis se centró en la zona sísmica G9 que contiene la falla de Ixcán, la zona G6 la cual contiene el sistema de fallas de Polochic-Chixoy y Motagua, y por último, la zona G4 que contiene la falla de Jalpatagua (Alvarado et al., 2017). La Tabla 5 muestra la información de los parámetros de recurrencia de estas zonas sísmicas, calculados a partir del análisis de sensibilidad hecho para Centroamérica (Gamboa-Canté et al., 2025a).

Tabla 5: Parámetros de recurrencia de las zonas sísmicas que contienen las fallas analizadas

Nombre de la zona	Codigo	Prof. Min. (Km)	Prof. Max. (Km)	M1 ¹	M2 ²	a	aσ	b	bσ	$\dot{N}(M_{min})$ ³
Guatemala North-West	G9	0.0	25.0	7.1	7.3	6.05	0.04	1.29	0.12	1.81
Guatemala, Polochic- Motagua W	G6	0.0	25.0	7.7	8.0	5.29	0.02	1.08	0.04	2.86
Guatemala, Volcanic Arc E	G4	0.0	20.0	6.9	7.4	4.08	0.02	0.86	0.02	1.68

¹ M1 = Mmax observed from the regional seismic catalog.

² M2 = Mmax expected defined by expert criteria.

³ $\dot{N}(M_{min})$ = Cumulative seismic rate for $M_w \geq 4.5$

Se hizo un análisis exhaustivo de los métodos que integran las fallas geológicas en los cálculos de peligrosidad sísmica, y se consideró aplicar aquellos métodos donde se utiliza el modelo GR truncado para la MFD y las relaciones de escalamiento de Wells and Coppersmith (1994) para definir la magnitud máxima de los segmentos de falla (M_{max}). Esto con el objetivo de que los resultados de cada método sean

igualmente comparables y poder así controlar las incertidumbres epistémicas de los modelos de recurrencia. En tal sentido, los métodos que cumplían estas características y que se han utilizado para este estudio han sido: *moment-slip* (Bungum, 2007), FiSH (Pace et al., 2016), la actualización del *HybridModel* (H_M) (Rivas-Medina et al., 2018) y SHERIFS (Chartier et al., 2019).

Cabe mencionar que en la mayoría de estos métodos se necesita establecer el *b – valor* que será utilizado para las fuentes tipo falla. Dado que este parámetro está sujeto al juicio de expertos y es un valor que condiciona en gran medida los resultados que se obtienen, esto supone un serio limitante de estos métodos. Se ha optado por utilizar el *b – valor* de la región para aquellas fallas que están contenidas en ella. Se utilizan entonces los mismos valores de los parámetros de recurrencia de las regiones G9, G6 y G4, respectivamente (Tabla 5). La Figura 10 muestra la sismicidad asociada en cada región de análisis y los respectivos segmentos de fallas que se consideraron para este trabajo, así como la sismicidad residual que no está asociada a estos segmentos de falla (*background*).

Para determinar si la aplicabilidad y la manera en que trabaja cada método, afectan a los resultados finales de cálculo de la peligrosidad sísmica, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad de las aceleraciones que se pueden producir en cada zona sísmica a través del coeficiente de variación (CV). Así mismo, se generaron perfiles y se analizaron los valores de PGA para PR 475 años obtenidos a lo largo de los mismos con cada uno de los métodos aplicados, así como con el método clásico zonificado. Estos resultados han sido comparados, obteniendo la variabilidad que se presenta en función del método, el aumento promedio de las aceleraciones en la proximidad de la falla al modelizar ésta como fuente sísmica independiente, y la distancia de impacto. Estos resultados pueden tener interés para regular en los códigos sísmicos los factores de amplificación por proximidad de falla, así como las distancias a las que deben aplicarse.

La discusión crítica de los resultados obtenidos en esta parte del trabajo se presenta en el apartado 5.4. Así mismo, para más detalle sobre la formulación del *HybridModel* (H_M) consultar el apartado de los Anexos de esta tesis doctoral.

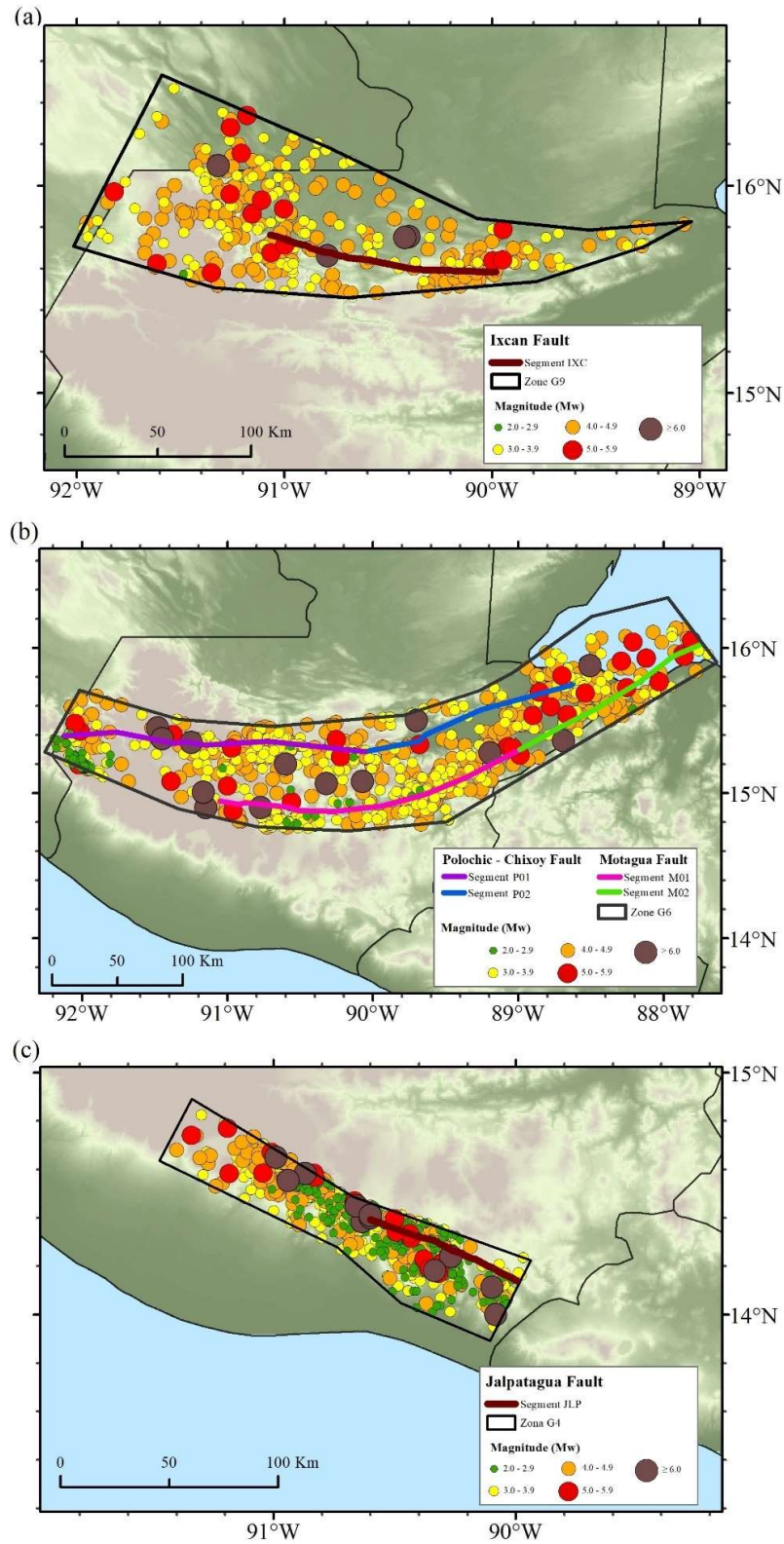


Figura 10: Distribución de sismicidad para la zona (a) G9, (b) G6 y (c) G4, según el catálogo sísmico regional de Gamboa-Canté et al. (2024)

4. Colección de artículos científicos



Seismicity in Central America (1520–2020) and Earthquake catalog compilation for seismic hazard assessments

Carlos Gamboa-Canté¹ · Mario Arroyo-Solórzano² · Belén Benito¹ · Jorge Aguilar³ · Ivonne G. Arroyo⁴ · Eduardo Camacho-Astigarrabia⁵ · Diego Castro⁶ · Omar Flores⁷ · Lepolt Linkimer⁴ · Martha Griselda Marroquin⁸ · Luis Mixco-Durán⁸ · Wilfried Strauch⁹ · Emilio Talavera⁹ · Gerson Valle³ · Robin Yani-Quiyuch⁶

Received: 19 December 2023 / Accepted: 29 October 2024 / Published online: 12 November 2024
© The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature B.V. 2024

Abstract

Central America is a seismically active region located in a tectonic setting dominated by the subduction zone between the Cocos and Caribbean plates, transform boundaries between the North American and Caribbean plates, and local or crustal faulting with some of the most important fault systems aligned with the volcanic arc. Combining seismic data from various Central American seismic agency catalogs covering the period from 1520 to 2020, we present an updated regional earthquake catalog for the region. Fourteen databases containing seismic events from local and regional agencies were collected for different time periods, homogenized to moment magnitude (M_w), and subsequently unified using a prioritization criteria approach. We analyzed the data to identify and remove duplicate earthquakes, prioritizing records with the lowest RMS value, depth consistent with their location based on the region's crustal thickness, and magnitudes in accordance with historical reports or bibliographic sources. Additionally, significant seismic events ($M_w \geq 6.0$) were carefully reviewed based on their epicentral locations and magnitudes, according to reliable publications. The earthquake catalog compiled includes a total of 260 548 earthquakes, for which we conducted a descriptive, spatiotemporal statistical analysis, as well as estimations of the magnitude of completeness (M_c) and declustering. Among the most important results, we highlight recent completeness periods for magnitudes $M_w < 5.0$. Geographically, seismic zones with better M_c are directly related to either good seismic network coverage or high seismicity rates in the region. As regards declustering, the Reasenber method considers several main shocks with ~76% of the earthquakes compared to the initial catalog and the Uhrhammer method considers ~51% as main shocks.

Keywords Earthquake catalog · Seismic networks · Seismic hazard · Central America

1 Introduction

The geodynamic processes of the Earth lead to a continuous release of energy, resulting in the generation of earthquakes of different magnitudes. This information is compiled in databases from which the amount of energy released within a specific region over time can be analyzed and quantified. These databases are known as *earthquake catalogs* and contain information on earthquakes, including their location, magnitude, time of origin, and depth. They also provide valuable insights into the sequence of earthquakes and their possible associated seismic sources in a given region. (Ammon et al. 2021). The importance of an earthquake catalog resides in its multiple applications, such as analyzing the behavior of active seismic faults. Details regarding when, how, and where the energy is released help researchers improve their understanding of the seismic activity in a region, thereby enhancing awareness of seismic hazards. (Lubbers et al. 2018).

Scientific advances related to earthquakes in Central America have contributed towards understanding and assessing the seismic hazards of the region. In 1993, the first regional earthquake catalog of Central America was published, compiling 17,000 earthquakes between 1500 and 1992 (Rojas et al. 1993a). This catalog was created during the development of the RESIS I project, led by the Norwegian Seismic Array (NORSAR) and the Coordination Center for the Reduction of Disasters in Central America (CEPREDENAC), whose objective was to conduct the first assessments of seismic hazard in the region. Several years later, another regional study was conducted into the tectonic, geophysical, and seismological setting of Central America under the RESIS II project. (Benito et al. 2012). This project resulted in an update to the regional earthquake catalog, the generation of maps showing expected ground motion for different exceedance probabilities across the entire territory of Central America, hazard curves, and seismic design spectra obtained through seismic disaggregation for capital cities. RESIS II was the most recent regional project for seismic hazard assessment, collecting and analyzing databases from local seismic networks. Over the last decade, each Central American country has improved its seismic networks, allowing significant improvements in seismic data acquisition, analysis, and visualization. This has been achieved through a review of seismic events recorded in their databases and relocation of earthquakes, thus improving the local earthquake catalogs of each country (Salazar et al. 2013; Linkimer et al. 2018; Arroyo-Solórzano and Linkimer 2021; Álvarez 2021).

Hence, a greater volume of earthquake data has become available over the years, leading to the need to review and update regional earthquake catalogs for seismic hazard assessments. In this regard, there has been a notable improvement in coverage and increase in number of seismic stations shared by the Incorporated Research Institutions of Seismology -IRIS- (Fig. 1). In response to this need for updated information, this study presents part of the results from the first phase of the KUK-AHPÁN project, which aims to incorporate geological, geophysical, seismological and tectonic information for the region in order to improve the seismic hazard and risk calculations for Central America. We present the compilation, integration, and updating of the seismic database to produce a regional earthquake catalog for Central America for the historical period (1520–1974) and the instrumental period (1975–2020), including earthquakes recorded by local and regional networks. In addition to compiling the most extensive earthquake catalog for Central America, we conducted a spatiotemporal analysis of the seismicity, estimated the Magnitude of Completeness (M_c) for the catalog, and applied event-dependent analysis (*declustering*) using two

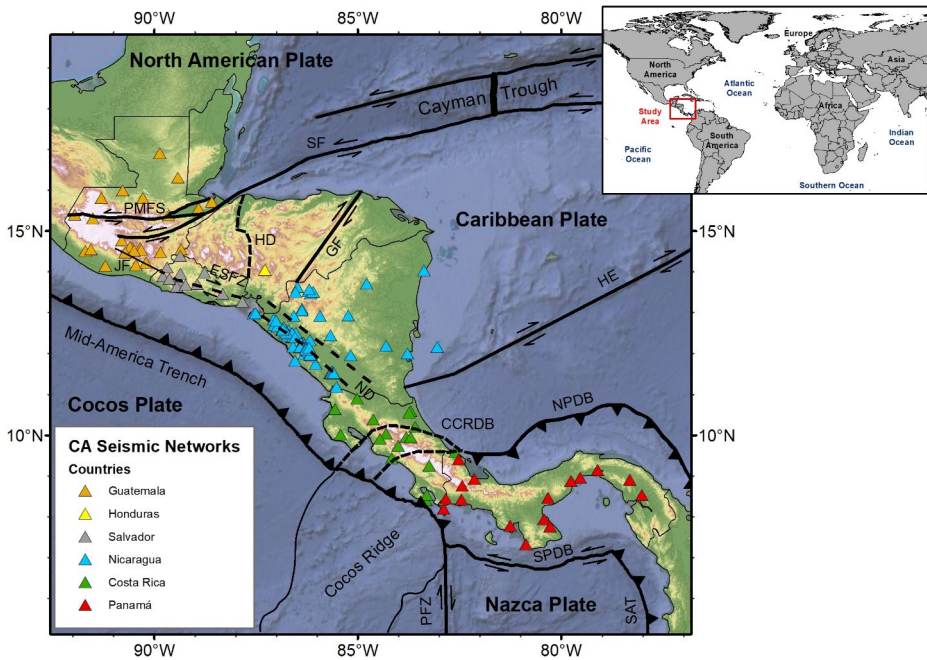


Fig. 1 Tectonic setting and main seismic networks in Central America. *CCRDB* – Central Costa Rica deformed belt, *ESFZ* – El Salvador fault zone, *GF* – Guayape fault, *HD* – Honduras depression, *HE* – Hess escarpment, *JF* – Jalpatagua fault, *ND* – Nicaragua depression, *NPDB* – North Panama deformed belt, *PFZ* – Panama Fracture zone, *SAT* – South America Trench, *SF* – Swan fault, *SPDB* – South Panama deformed belt. The stations of the IRIS seismic network of the 6 countries are also represented

different methods. These results are particularly significant in order to understand the seismotectonic framework, allowing improved estimation of the seismic recurrence parameter and in turn, better seismic hazard assessment for Central America.

2 Seismotectonic framework

Central America is located in a complex tectonic setting, composed of the North American, Caribbean, Cocos, and Nazca plates (Fig. 1). On the one hand, the *Mid-American trench* is formed by the subduction of the Cocos plate beneath the Caribbean plate, making this region the most seismically active due to its high slip rates (73.7 to 76.4 mm/yr) (Garnier et al. 2022). Hence, this results in high rates of seismic events of $M_w \geq 4.5$, ranging from 5.6 to 12.2 earthquakes per year (Alvarado et al. 2017). To the north, the boundary between the North American and Caribbean plates is defined by the *Cayman Trough*, which is a zone of complex transform faults with a small divergent ridge at its center. This system of transform faults extends westward from the Caribbean, forming the *Swan Fault* (SF), which primarily affects the coasts of Honduras. In Honduras, transensional fault systems are generated in response to the movement of the Caribbean plate, creating the *Honduras Depression* (HD), where most earthquakes are moderate with M_w between 5.0 to 6.5 (Alvarado et al. 2017).

On the other hand, there is the Guayape fault system (GF), which is the longest and most continuous structure in Honduras. It is a complex belt of faults that varies from 2.0 to 25.0 km in width, oriented N-E with a length of 290.0 km (Finch and Ritchie 1991).

In Guatemala, two sinistral transform fault systems are located in the northern transverse part of the country: the Polochic-Chixoy and the Motagua fault system (PMFS) (Fig. 1) (Garnier et al. 2022). Similarly, to the south of the country lies the beginning of the Central American volcanic arc, where the Jalpatagua Fault (JF) stands out, being a dextral fault extends along ~70 km to the Guatemala–El Salvador border (Garnier et al. 2021).

In El Salvador, the northeast movement of the *Mid-American trench* with respect to the Chortis Block, formed by the North American plate, results in rapid displacement at the contact of the regional volcanic arc, leading to the formation of the El Salvador Fault Zone (ESFZ), which is a group of active faults oriented E-W and ESE-WSW, mostly exhibiting strike-slip faulting mechanisms with dextral components and ranging in length from 20.0 to 30.0 km (Staller et al. 2016; Martínez-Díaz et al. 2021). Subsequently, in the southern region of Nicaragua, is formed the Nicaragua Depression (ND), a prominent geological depression of the late Quaternary, ranging 40.0 to 70.0 km in width and parallel to the Central American volcanic arc (Fig. 1), extending ~1000 km from the Nicaragua-Costa Rica border to El Salvador (Funk et al. 2009).

To the southeast of Central America trench, an interaction between the Cocos plate and a segment of the Nazca plate forms the Panama Fracture Zone (PFZ), which exhibits dextral strike-slip motion-oriented N-S (Fig. 1). Another notable feature in this region is the *Cocos Ridge*, created by the displacement of the Cocos plate over the Galápagos hot spot, resulting in this bathymetric feature over 1000 km in length with a southwest-northeast orientation and an approximate thickness of 25.0 km, triple the normal thickness of oceanic crust (Fig. 1) (Lücke and Arroyo 2015). The contact of the Nazca plate and the Caribbean plate forms the South Panama Deformed Belt (SPDB), where the oblique motion of the Nazca plate results in this belt being composed of complex faults with shallow seismicity (Fig. 1). The edge of the Nazca plate to the east is defined by the South America Trench (SAT) (Alvarado et al. 2017).

In the Caribbean Sea, the Hess Escarpment (HE) represents a fracturing in the bathymetry of the region starting from Nicaragua (Fig. 1) (Carvajal-Arenas and Mann 2018). Near this escarpment, to the north of Panama, the North Panama Deformed Belt (NPDB) extends along to the coasts of Costa Rica, forming the Central Costa Rica Deformed Belt (CCRDB) (Fig. 1) (Alvarado et al. 2017). In southern Central America there is a very complex tectonic setting and crust deformation, with a double subduction zone (Alvarado et al. 2017; Arroyo and Linkimer 2021; Bourke et al. 2023) delimited by the North and South Panama Deformed Belt (NPDB and SPDB), on the Caribbean and Pacific sides, respectively (Fig. 1). The interaction between these tectonic structures and the double subduction, generates a compressional regime of collisional margin, reflected mostly by thrust and strike-slip faults in the region between Costa Rica and Panama (LaFemina et al. 2009; Alvarado et al. 2017).

Based on the tectonic setting described above, Alvarado et al. (2017) carried out a seismic zoning for Central America, which helped to delineate tectonic regimes in the region, dividing it into 58 seismic zones. These authors identified three main seismic regions: upper plate, interface and in-slab zones. Our study uses this seismic zoning, as well as the abbreviations established by Alvarado et al. (2017), primarily for the spatial analysis of M_c in Central America. This zoning is important as it allows significant advances in the analysis of

seismic source behavior and estimation of seismic parameters, thus making it of particular interest for conducting seismic hazard assessments.

3 Local seismic networks

In the early 20th century, the first mechanical seismometers were installed in Guatemala, El Salvador, Costa Rica, and Panama, with the aim of recording seismic events of $M_w \geq 5.0$ (Morales 1986; Rojas et al. 1993a; Peruzza et al. 2021). Subsequently, in the mid-20th century, such was the interest of the scientific community in studying the tectonics and seismicity of Central America, that the first teleseismic networks and main seismological institutions were established. During this time, the *Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología* -INSIVUMEH- was created in Guatemala (INSIVUMEH, 2023); the *Centro de Estudios e Investigaciones Geotécnicas* -CIG- was established in El Salvador, which in 2002 would pass the responsibility to the *Servicio Nacional de Estudios Territoriales* -SNET- (SNET, 2023); the *Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales* -INETER- was founded in Nicaragua (Segura 2018); the National Seismological Network -RSN- through the School of Geology at the University of Costa Rica -UCR- (Linkimer et al. 2018), and the *Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica* -OVSICORI- through the *Universidad Nacional* -UNA- were established in Costa Rica; and finally, the *Instituto de Geociencias* -IGC- at the *Universidad de Panama* -UPA- was established in Panama (UPA, 2023).

By the end of the 20th century, there had been a significant improvement in seismic recording through the upgrading of seismic equipment in the seismic networks of each country, transitioning from analog to digital stations and establishing telemetric networks including real-time communication with the seismic instruments. The updating and digitization of local seismic networks has led to an improvement in the recording of seismic events, providing extensive coverage not only within the local country but also in neighboring countries in real-time. Many of the data from local seismic stations are publicly available, although, some are only accessible through the local country's database, which is subject to permissions granted by the responsible institutions in each country. The evolution and growth of the local seismic networks in each country for the instrumental period 1975 to 2020 are shown in Fig. 2.

4 Earthquake catalog conformation

In the recent past, efforts have been focused on improving seismological equipment in the seismic networks in Central America so that databases of the highest standard can be compiled from the data collected and analyzed. Each institution reports the common seismic information for their seismic records, such as geographic coordinates, magnitude, time of origin and depth, among others. We have integrated and unified most of the national and international databases into a regional earthquake catalog for Central America so as to maximize its usefulness in future seismic hazard assessments for the region. The first step was to gather all available databases, both local and regional. Table 1 lists the databases collected and used for the creation of the regional earthquake catalog in this study.

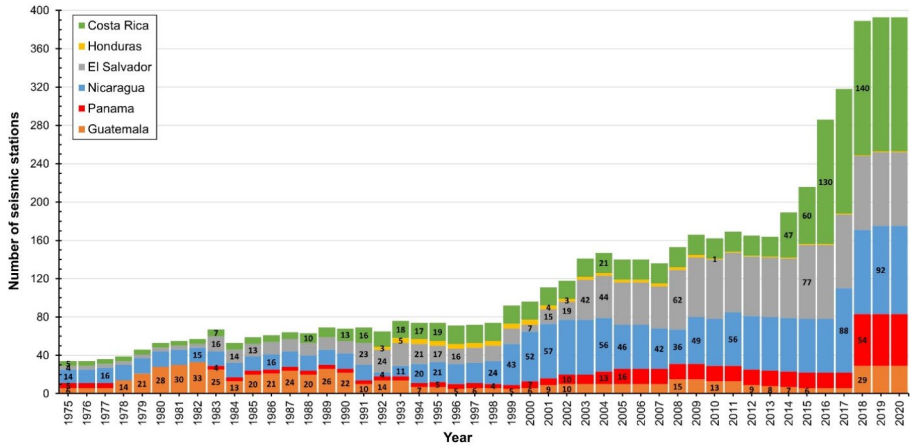


Fig. 2 Evolution of the local seismic networks of each Central American country from 1975 to 2020. The numbers in the histogram are only shown for the years in which a change occurs in the number of seismic stations available in each country

Table 1 Seismic databases collected for this study

No.	Reference earthquake catalog	Country	Period
1	MARCA-GEHN, macroseismic catalog (Peruzza et al. 2021)	Guatemala	1522–2018
2	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH)	Guatemala	2010–2020
3	Comisión Permanente de Contingencias (COPECO)	Honduras	1918–2020
4	Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET)	El Salvador	1522–2020
5	A new earthquake catalog for Nicaragua Republic (Álvarez 2021)	Nicaragua	1520–2018
6	Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER)	Nicaragua	1975–2017
7	Red Sismológica Nacional (RSN)	Costa Rica	1522–2020
8	Universidad de Panamá (UPA)	Panamá	2016–2020
9	Servicio Geológico Colombiano (SGC)	Colombia	1993–2020
10	Earthquake catalog of RESIS II (Benito et al. 2012)	Global	1522–2011
11	The new Central American seismic hazard zonation (Alvarado et al. 2017)	Global	2011–2016
12	The ISC-GEM Earthquake Catalog (Giacomo et al. 2018)	Global	1904–2018
13	Data Earthquake Catalog (USGS)	Global	1902–2020
14	The Global Centroid Moment Tensor Catalog (CMT) ((Dziewonski et al. 1981; Ekström et al. 2012)	Global	1976–2020

The compilation of each catalog includes all or most of the parameters of seismic events. From these parameters, we extracted: year (YEAR); month (MONTH); day (DAY); hour (HOUR); minute (MIN); second (SEC); latitude (LAT); longitude (LON); depth in km (DEP); magnitude (MAG); magnitude type Md, MC, MI, Ms, mb, Mw (MAGTYPE); root mean square error (RMS); country of seismic event registration (COUNTRY); source from which the seismic event was obtained (SOURCE); reference of the earthquake catalog (REFERENCE).

The local catalogs collected had already been homogenized to moment magnitude (M_w), these databases were homogenized by the corresponding country agency. However, for

those regional catalogs with different magnitudes (i.e. USGS catalog, CMT catalog), we used the equations proposed by Rojas et al. (1993b), specifically for Central America, to convert magnitudes from M_d , M_C , M_I , M_s and m_b to M_w . Having homogenized all the databases to M_w , we unified the earthquake catalogs to analyze and detect duplicate seismic events.

Due to the large number of earthquakes, an approach was proposed to unify all the databases based on priority levels according to the location where the seismic event originated. We then defined a coverage area with geographic coordinates ranging from longitude -92.5° to -75.0° and latitude 4.0° to 18.0° , approximately, to cover all countries involved in the study (Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, and Panama) as well as their surrounding areas, considering neighboring countries (Mexico and Colombia). From this coverage area, polygons were defined to assign seismic events from the databases. We determined the size and shape of the polygons such that all countries involved in the study were covered. Figure 3 shows the polygons used for spatial merging of the databases for each country, and Table 2 presents the order of priority levels applied to these data.

When merging multiple databases within the same polygon, there is inevitably a possibility of seismic events being duplicated if they are recorded in two or more of the catalogs which we used. To conduct the analysis and eliminate potential duplicates within the merging polygons, we established another priority order table (Table 3).

First, we analyzed the root mean square error (RMS) of each seismic event, defining an $RMS < 1.50s$ as the criterion for less robust activity or for the development of local seismic networks (e.g. in Guatemala, Honduras, and Panama). Although this RMS value is relatively high compared to the recommended values for seismic event location; in countries with limited instrumentation, recent improvements and densification, we considered it to be reasonably acceptable. However, for the more densified seismic networks (e.g. in El Salvador, Nicaragua, and Costa Rica), the criteria was an $RMS < 1.0s$.

As a second priority order, we assessed the earthquake depth, evaluating whether earthquake location was consistent with the crustal thickness in that sector according to other authors (MacKenzie et al. 2008; Lücke 2014; Lücke and Arroyo 2015; Alvarado et al. 2017; Hayes et al. 2018; Barrera-López et al., 2022). We then examined the epicentral location, determining the most congruent location of the duplicated seismic event occurrence according to available reports from local networks or scientific/journalistic sources. If any of the potential duplicate earthquakes were found to be distant from the geographical references mentioned in the reports or records, they were discarded. Finally, the magnitude of the seismic event was verified by analyzing the consistency of the magnitude reported in the earthquake catalog through information from seismic reports or bulletins from local networks. Based on these criteria, if two or more databases presented the same value for the first priority level, the next priority level was analyzed, and so on, until the appropriate seismic event was selected according to the information in the seismic network reports.

For example, in accordance with the above, the polygons containing the countries of Guatemala, El Salvador, Nicaragua, and Costa Rica have priority levels (1)–(3)–(4) (Fig. 3). This means that earthquakes from the local network earthquake catalog, Alvarado et al. (2017) and RESIS II (Benito et al. 2012) will be assigned in the areas covered by these polygons. Subsequently, the earthquakes considered as duplicates undergo the analysis described in Table 3. First, the RMS will be evaluated, followed by the depth, epicentral location, and lastly, the magnitude M_w .

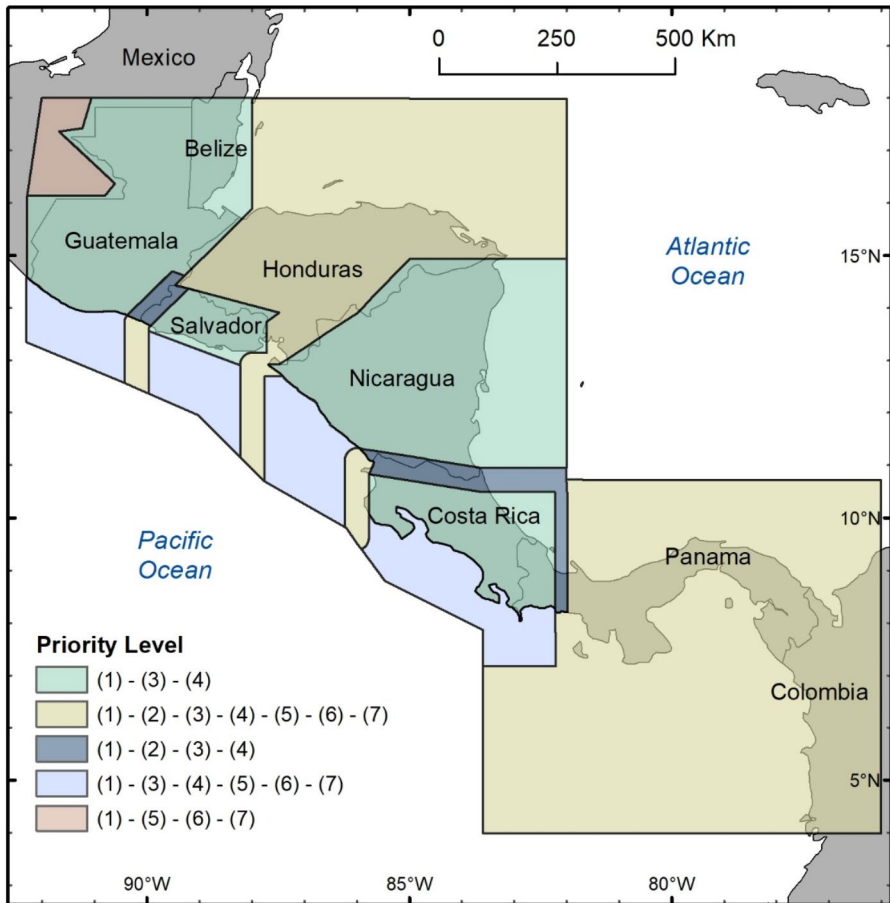


Fig. 3 Polygons used to assign the databases of the earthquake catalog according to the priority level: (1) seismic local network, (2) neighbor country local network, (3) earthquake catalog of Alvarado et al. (2017), (4) earthquake catalog of RESIS II, (5) earthquake catalog of ISC-GEM, (6) earthquake catalog of USGS and (7) earthquake catalog of CMT

Table 2 Priority levels for merging earthquake catalogs

Priority level	Source
1	Local network
2	Neighbor country local network
3	Alvarado et al. (2017)
4	RESIS II (Benito et al. 2012)
5	ISC-GEM (Giacomo et al. 2018)
6	USGS
7	CMT (Dziewonski et al. 1981; Ekström et al. 2012)

Table 3 Order of priority for analyze duplicate seismic event analysis

Order of priority	Description
1	RMS value ($\leq 1.5s$)– less dense seismic network RMS value ($\leq 1.0s$)– dense seismic network
2	Depth (Km) value
3	Epicentral ubication
4	Magnitude Mw value

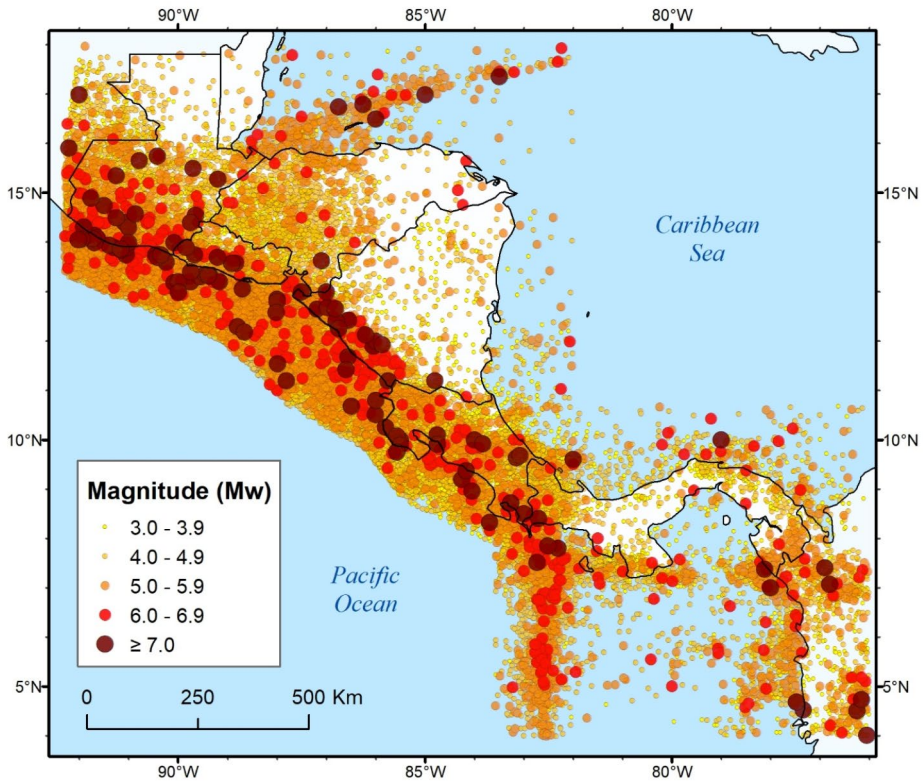


Fig. 4 Regional earthquake catalog for Central America (1520–2020)

After performing the above steps on the initial database containing 278 564 earthquakes, the resulting catalog comprises 260 548 earthquakes which occurred from 1520 to 2020, ranging from M_w 1.0 to M_w 7.9, and depths up to 300 km (Alvarado et al. 2017; Hayes et al. 2018; Barrera-López et al. 2022). Figure 4 presents the regional earthquake catalog developed in this study, including earthquakes of $M_w \geq 3.0$. Furthermore, Fig. 5 illustrates the divided earthquake catalog based on the associated seismic sources, categorized according to each tectonic regime proposed by Alvarado et al. (2017). The percentage distribution according to tectonic regime and geographic location is presented in Table 4.

In general, it can be observed that the countries of El Salvador and Costa Rica have the highest number of earthquakes in the entire earthquake catalog, accounting for approximately 58% (Table 4). Next is Nicaragua with about 18%, followed by Panama and Guatemala with

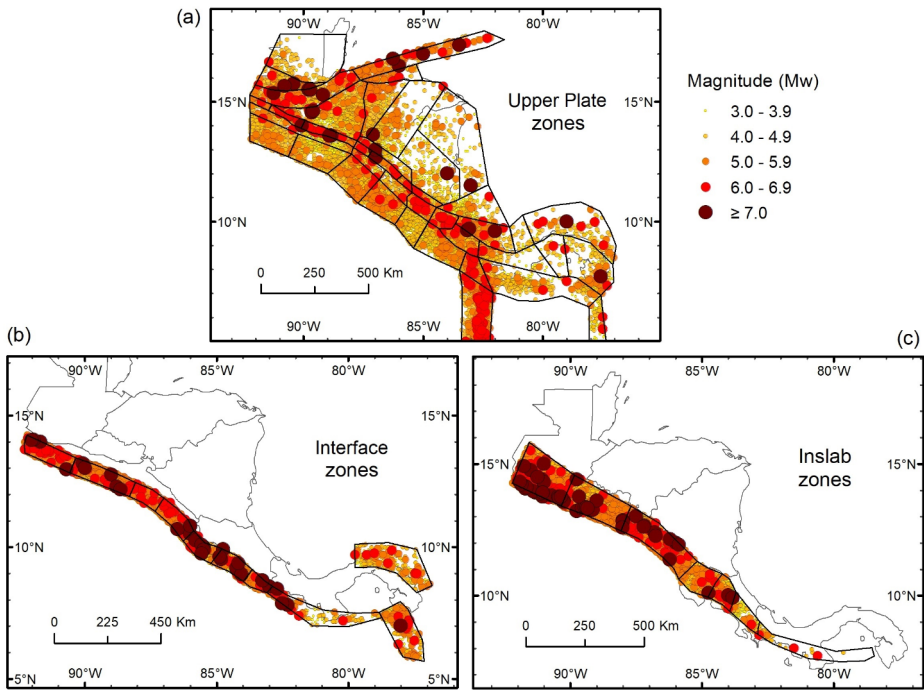


Fig. 5 Seismic events ($M_w \geq 3.0$) in the seismic zones proposed by Alvarado et al. (2017) for the **a** upper plate zones, **b** interface zones and **c** inslab zones

Table 4 Number of earthquakes and percentage with respect to the entire catalog according to geographic location and tectonic regime origin

Country	Number of events	Percentage	Tectonic regime	Number of events	Percentage
Guatemala	27 909	10.71%	Upper plate	110,262	42.32%
Honduras	4117	1.58%	Volcanic Arc	55,692	21.37%
El Salvador	74 715	28.68%	Transform boundaries	6162	2.37%
Nicaragua	47 322	18.16%	Others	48,408	18.58%
Costa Rica	76 030	29.18%	Interface	91,786	35.23%
Panama	30 455	11.69%	Inslab	58,500	22.45%

12% and 11%, respectively. Lastly, Honduras stands out with the fewest earthquakes in its territory (less than 2%), this because Honduras does not have the best conditions in terms of seismic instrumentation or expert working groups in seismic networks compared to other Central American countries. The currently available network is very sparse, which means that fewer events are detected (Fig. 2). Additionally, the country is the less seismic than other ones in the region due to it has not the influence of the subduction zone. Its seismicity is mostly associated with the North American Caribbean border, where the Swan Fault is located, where the most important earthquakes in the country are generated, although most of them in the offshore zone (Fig. 1). However, the catalog in this region has been completed with data provided by the network of Guatemala, El Salvador and Nicaragua.

5 Spatiotemporal analysis of the earthquake catalog

Our results reveal interesting aspects about the composition and evolution of the earthquake catalog for both the historical and instrumental periods. One noteworthy feature is that before 1962, there were few records of seismic events of $M_w \leq 5.0$. The incorporation of new seismological instruments in the mid-1970s resulted in an increased detection of earthquakes of smaller magnitudes. This marks the beginning of what we refer to as the instrumental period of the earthquake catalog starting from 1975 (Fig. 6).

Despite not having a very dense seismic network, Guatemala has continuously recorded seismic events over time and has improved the acquisition of these data, particularly since 2010 (Fig. 6a). In El Salvador, a dense acquisition of seismic data can be observed over time since 1984 (Fig. 6a), with a greater accumulation of earthquakes observed in the longitude range from -89.5° to -88.5° , corresponding to the seismic activity of the El Salvador Fault Zone (ESFZ) and the volcanic arc (Fig. 6b). In contrast, Honduras has the fewest seismic records in the earthquake catalog, as evidenced by the limited collection of events in the longitude range from -89.5° to -86.0° (Fig. 6b). This hampers the recording of seismic activity in this country and is due to the lack of a local seismic network.

An unusual case is that observed in Nicaragua, where the evident lack of data may be due to sociopolitical conflicts during the 1980s to 1990s. However, the country does have a continuous record with high density starting from 1992 (Fig. 6a). In contrast, Costa Rica has one of the best seismic networks in the region, hence presents the best coverage of seismic events within its territory, with the highest number of events recorded of magnitudes $M_w \geq 3.0$ in the longitude range from -84.5° to -83.5° , corresponding to the seismic activity of the Central Costa Rica Deformed Belt (CCRDB) (Fig. 6b). Finally, Panama is one of the countries with the lowest seismic activity in the region and lower density of events. However, two periods with increased density of records are observed for the years 1990 and 2012, which may be due to improvements in the network and in detection capability (Fig. 6a). However, high seismic activity persists in the Panama Fracture Zone (PFZ) due to the high seismic rates and complex tectonic situation which exists there, the data record over time between the longitudes -83.0° to -82.0° being high (Fig. 6b).

The earthquake depth distribution shows a clear trend, the only events recorded prior to the instrumental period being those of $M_w \geq 5.0$, many of which were situated from macroseismic data with high uncertainty in the depth estimation (Fig. 7a). Furthermore, these records correspond mainly to shallow events (<40 km depth), suggesting that most of the local networks in the different countries had limited capability to detect earthquakes beyond that depth. Subsequently, with the improvement of seismic networks, there was a rapid increase in the recording of low-magnitude earthquakes, as well as an increase in the recording of events at greater depths (≥ 40 km), thus allowing improved definition of the behavior of the slab and crust thickness in Central America (White et al. 2004; Arango et al. 2011; Lücke and Arroyo 2015; Quintero et al. 2023).

An analysis of the distribution of earthquakes of $M_w \geq 3.0$ reveals a predominance of those with shallow local faulting origins (0 to 25 km) and interface subduction (25 to 40 km) (Fig. 7b). A trend towards a decreasing number of events at depths greater than 40 km can also be observed, which corresponds to in-slab faulting within the subducting slab (Fig. 7b). In comparison to the macroseismic and global catalogs (Ekström et al. 2012; Peruzza et al. 2021; Giacomo et al. 2018), our catalog provides greater detail and densification of

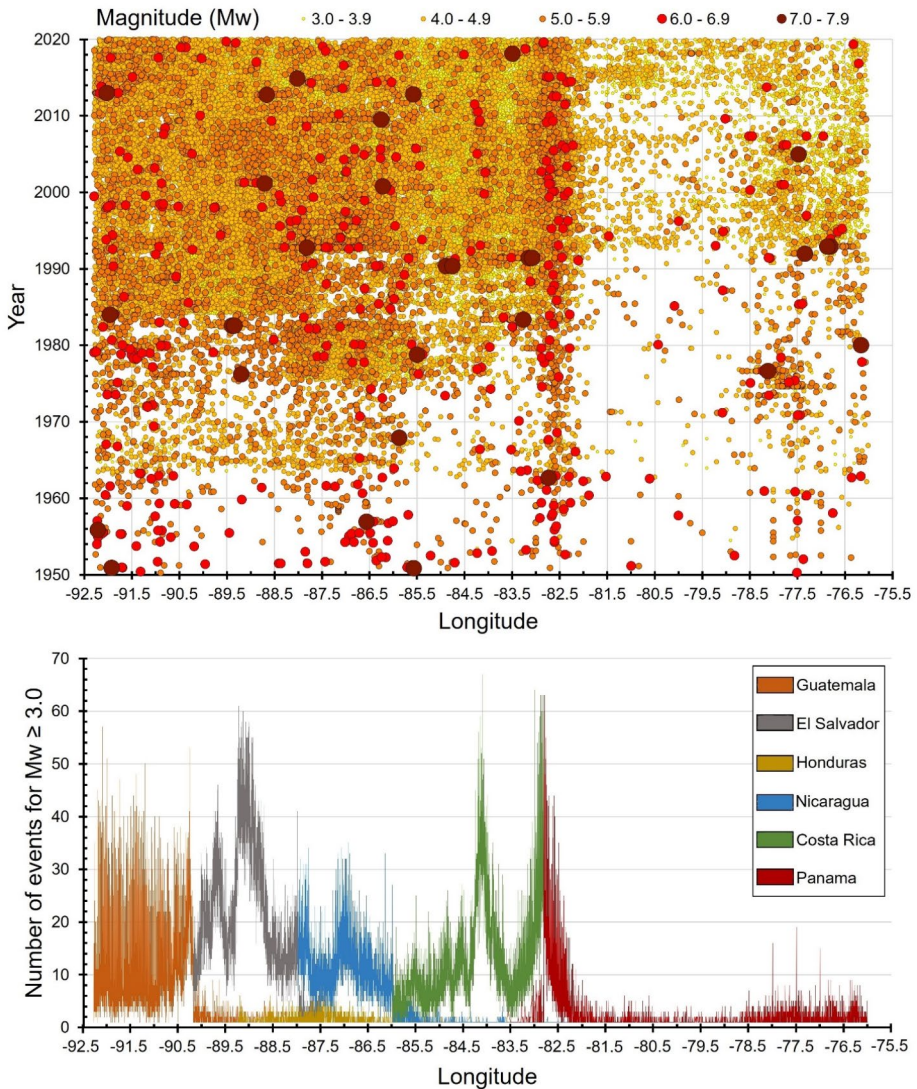


Fig. 6 **a** Space-time distribution of the entire earthquake catalog. The spatial distribution is around the entire longitudinal geographic axis that covers Central America. **b** Number of events for $M_w \geq 3.0$ per bin of longitude coordinate

upper plate earthquakes associated with active local faults (e.g., foreshocks, aftershocks, and swarms). This allows a broader record of low-magnitude earthquakes ($M_w < 5.0$). The earthquake catalog we present provides data which could facilitate multiple seismological tasks, such as the analysis of seismic series and earthquake activity rates (ETAS), incorporation of active faults in seismic hazard calculations, and updates in subduction slab modeling, among others.

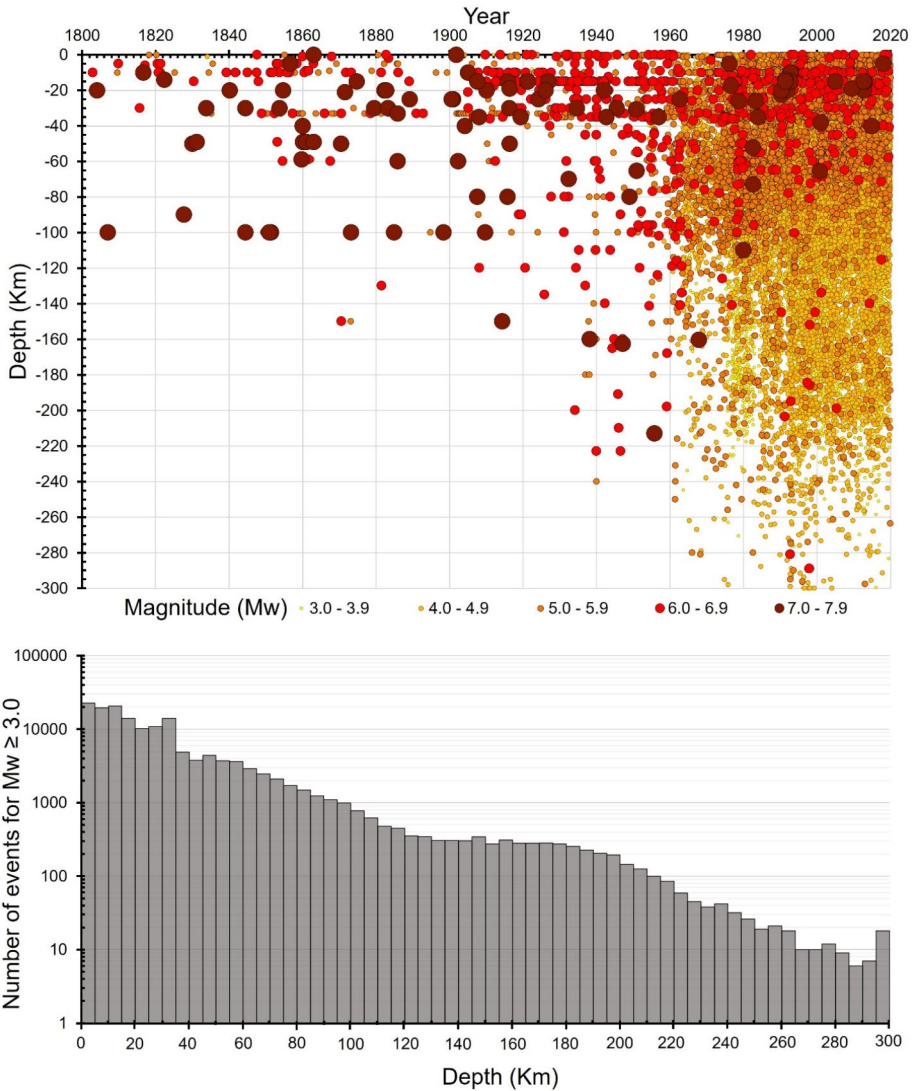


Fig. 7 **a** Depth distribution over time in the earthquake catalog for $M_w \geq 3.0$. **b** Number of events for $M_w \geq 3.0$ in bins of 5.0 km depth

To determine the areas with the highest density of earthquakes of $M_w \geq 3.0$, we created a 10×10 km grid covering the entire region, and the cumulative number of earthquakes $[N(m)]$ was calculated in 100 km^2 cells (Fig. 8). As expected, our earthquake catalog shows a higher concentration of events along the entire Central American volcanic arc and the subduction zone (Fig. 8a). El Salvador and Costa Rica show the highest accumulation of seismic events, thanks to their comprehensive seismic station networks, allowing them to record a greater number of earthquakes, including those of lower magnitudes (Fig. 8b, c) (Fernández et al. 2004; Linkimer et al. 2018).

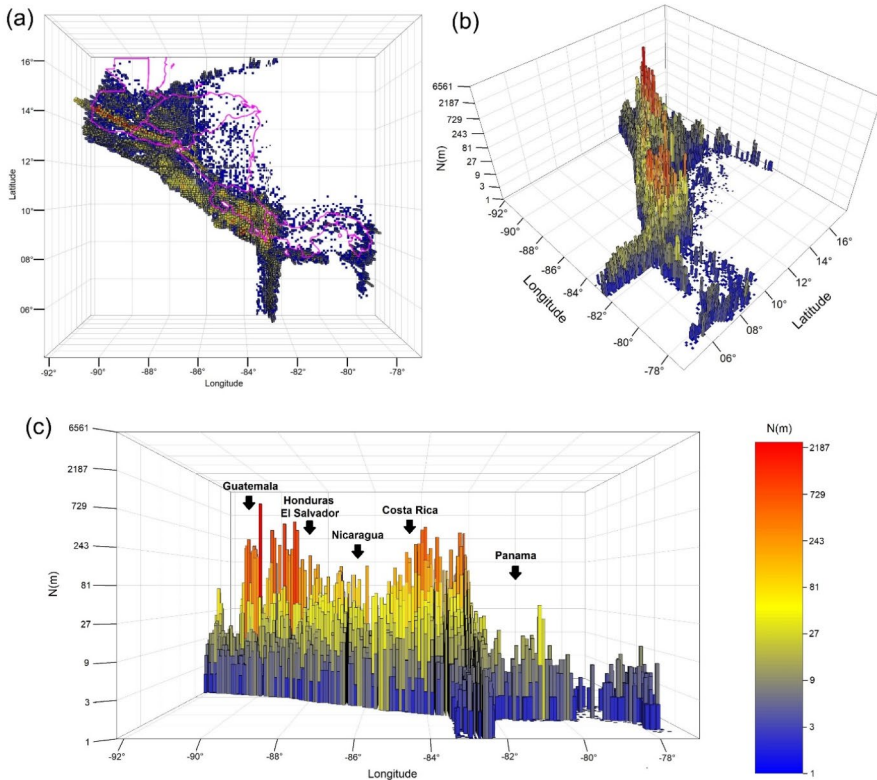


Fig. 8 Number of cumulative events $N(m) \geq 3.0 M_w$ per 10×10 km cells for the entire earthquake catalog. **a** Aerial view, **b** diagonal view and **c** profile view

In the RESIS II project (Benito et al. 2012), there was analyzed information related to the historical large-magnitude earthquakes that had occurred in the region until then. As a result, they compiled 138 historical earthquakes that have greatly impacted the region between 1516 and 2004, which were revised and analyzed by different publications (White 1984; Rojas et al. 1993b; Ambraseys and Adams 2001; White et al. 2004).

In the last years most of the seismological networks of the region have improved in terms of seismic instrumentation and documentation. This led to a more detailed analysis of historical earthquakes in terms of seismic intensity stands out for five countries in the region (Peruzza et al. 2021, 2023), relocation and a better estimation of the earthquakes in Guatemala and El Salvador (Martínez-Díaz et al. 2021; Guzmán-Speziale and Molina 2022), densification of the historical records in Nicaragua (Álvarez 2021). Also, analysis of the historical and instrumental seismicity of Costa Rica for use in estimating seismic hazard parameters (Arroyo et al. 2017; Arroyo-Solórzano and Linkimer 2021), and finally, the relocation of historical earthquakes that occurred on local faults in Panama (Camacho Astigarrabía and Alvarado 2024). All this new information has been compiled, analyzed and provided by the local agencies of each country and has been incorporated into this regional

Table 5 Largest historical earthquakes that have occurred in central American region since 2004 to 2020

No.	Date	Latitude	Longitude	Magnitude (M _w)	References
1	2009–05–28	16.800	– 86.254	7.3	Graham et al. (2012)
2	2012–09–05	9.752	– 85.572	7.6	Linkimer et al. (2013)
3	2012–11–07	14.056	– 92.026	7.4	Ellis et al. (2015)
4	2012–08–27	12.189	– 88.654	7.3	Geirsson et al. (2015)
5	2014–10–14	12.58	– 88.017	7.3	Hayes et al. (2017)
6	2016–11–24	11.917	– 88.873	6.9	Tanioka et al. (2018)
7	2018–01–10	17.366	– 83.488	7.5	Cheng and Wang (2020)

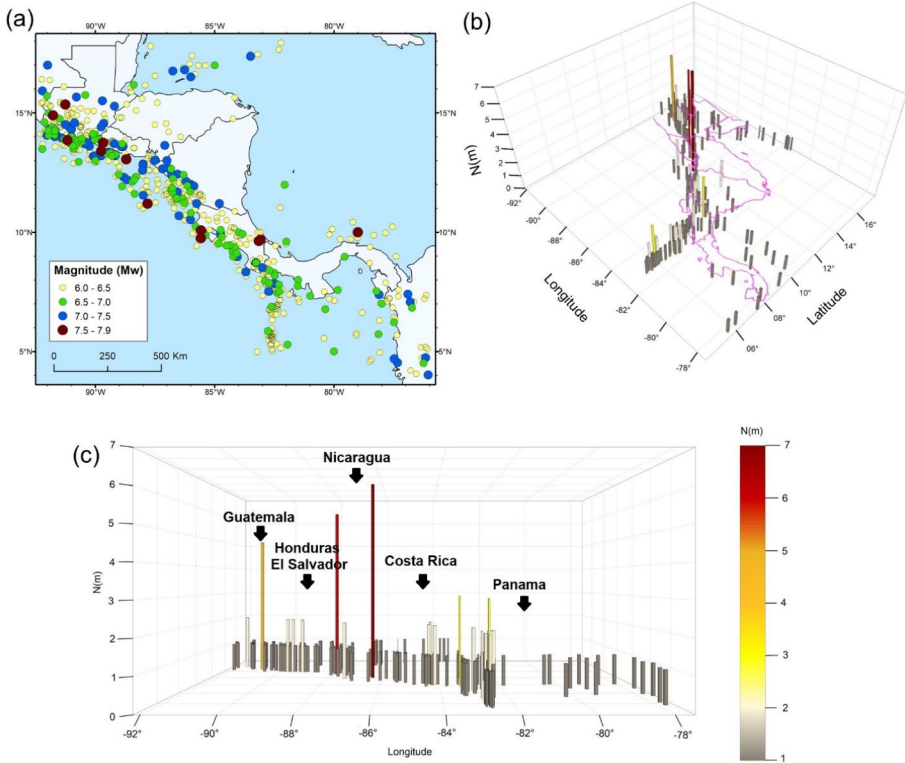


Fig. 9 a Spatial distribution of earthquakes of $M_w \geq 6.0$., and number of cumulative events $N(m) \geq 6.0 M_w$ per 10×10 km cells for the entire earthquake catalog b diagonal view and c profile view

earthquake catalog. Table 5 shows the largest earthquakes that have occurred in the Central American region since the last analysis by the RESIS II project (Benito et al. 2012):

It is important to highlight the areas with the highest concentration of earthquakes of $M_w \geq 6.0$, as these are potentially the most dangerous for cities and significantly increase the seismic hazard in the region (Fig. 9). The Swan Fault (SF), the Polochic-Chixoy-Motagua fault system (PMFS), the Jalpatagua Fault (JF), the El Salvador Fault Zone (ESFZ), the Nicaragua Depression (ND), the Central Costa Rica Deformed Belt (CCRDB), and the Pan-

ama Fracture Zone (PFZ) are the regions with the highest occurrence of large magnitude seismic events (Fig. 9a). The region of the volcanic arc in Guatemala, El Salvador, and Nicaragua has the highest accumulation of earthquakes of $M_w \geq 6.0$ within a 100 km^2 area (Fig. 9b and c).

To detail the distribution of seismicity along the volcanic arc and the behavior of the subduction zone, separate profiles were generated every 250 km along the entire length of the *Mid-American trench* (Fig. 10). These profiles are accompanied by the regional subduction model proposed by Hayes et al. (2018) from the US Geological Survey (USGS) for Central America, with the aim of comparing and verifying the behavior of the subduction slab geometry with the seismic events recorded by the seismic networks of each country.

In general, the data show a good fit with the regional subduction model proposed by Hayes et al. (2018), where the outline of the subducting slab is followed along the entire trench. The seismicity associated with Guatemala (profile A–A') clearly shows the trend of the subduction slab down to a depth of 100 km, highlighting the three most significant historical inslab earthquakes: the San Miguel earthquake of 1717, the earthquake of 1860, and the San Perfecto earthquake of 1902 (Fig. 10a) (Eisen 1903; White et al. 2004). Likewise, there is a high concentration of shallow earthquakes ($< 20 \text{ km}$ depth) resulting from volcanic activity in the region, indicating a continuous seismic activity in that area. El Salvador (profile B–B') has recorded many events associated with the subduction slab, with most of them having $M_w < 5.0$ (Fig. 10b). This dense number of events suggests that the dip angle of the subduction slab may be steeper compared to the angle registered in the regional model by

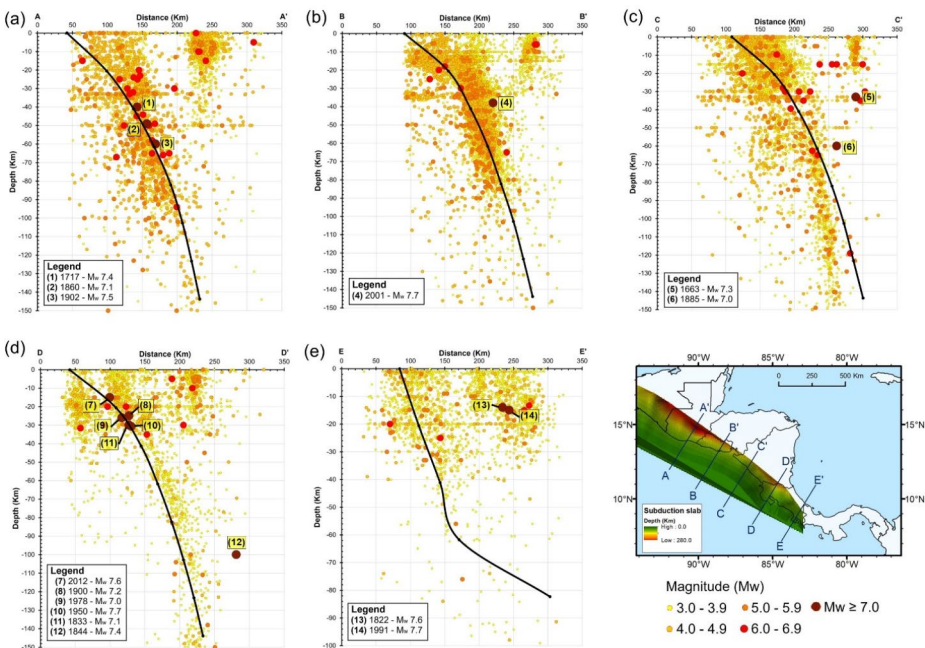


Fig. 10 Subduction slab profiles each 250 km along the Mid-American trench, black line represented the subduction model proposed by Hayes et al. (2018). **a** profile A–A' Guatemala subduction, **b** profile B–B' El Salvador subduction, **c** profile C–C' Nicaragua subduction, **d** profile D–D' northwest Costa Rica subduction and **e** profile E–E' southeast Costa Rica subduction

Hayes et al. (2018). In this region, the earthquake of January 13, 2001, stands out (Bommer et al. 2002; White et al. 2004), where it can be observed that these interface event clusters along the edge of the subduction slab seismicity.

In the case of Nicaragua (profile C–C'), a slight discrepancy in the dip angle is noticeable between the USGS regional model and the one derived from our data (Fig. 10c). The USGS model shows a dip angle of 40° starting at 60 km depth, increasing to 60° from 90 km depth onward. However, our earthquake catalog indicates that this dip angle could be even steeper. Additionally, two of the largest damage causing earthquakes in the country are worthy of note, the León earthquake of 1663, and the Managua earthquake of 1885, which may be associated with the inslab regime (Kates et al. 1973; Leeds 1974).

In the northwest area of Costa Rica (profile D–D'), our data follows the same trend as the USGS regional model. Additionally, the shallow seismicity associated with the Nicoya Peninsula, which lies just above the onset of the bending of the subducting slab, is clearly identified (Fig. 10d). Notably, the most significant earthquakes occurred in this zone are the Nicoya earthquakes of 1833, 1900, 1950, and the Samara earthquakes of 1978 and 2012 (Yue et al. 2013; Protti et al. 2014). Although our records do not reveal a clear trend of the subducting slab southeast of Costa Rica (profile E–E') (Fig. 10e), this may be explained by various theories relating to the behavior of the slab at intermediate depths in this sector. Some authors describe it as a flat slab that becomes seismically quiet at a depth of ~75 km due to reduced mantle hydration resulting from serpentinization of the *Cocos Ridge* (Lücke and Arroyo 2015). Nonetheless, the seismicity is evident in the North Panama Deformed Belt (NPDB), where two major earthquakes have occurred, namely, the San Estanislao-Limón earthquake of 1822 and the Limón earthquake of 1991 (Suárez et al. 1995).

6 Completeness analysis

The Magnitude of completeness (M_c) is defined as the lowest magnitude at which 100% of earthquakes are successfully detected within a specific region and period (Rydelek and Sacks 1989; Woessner and Wiemer 2005). Its determination for earthquake catalogs is important because it ensures a more accurate fit of the observed data when investigating source parameters in a specific region (Arroyo-Solórzano and Linkimer 2021).

M_c varies in time and space, so we first conducted an analysis of the simple and cumulative distributions of the number of events per magnitude interval using the Maximum Curvature method (Woessner and Wiemer 2005). This method is based on the magnitude-frequency distribution (MFD) of earthquakes, where the peak with the greatest increase in seismicity is identified (Fig. 11). We applied this method to each of the seismic zones proposed by Alvarado et al. (2017) to understand the variations in catalog completeness in different sectors of Central America (Table 6). Figure 11 provides examples of how we determined the maximum curvature to define the magnitude of completeness (M_c). Only some of the seismic zones in different tectonic regimes are presented (C6, G4, Ssi5, Gsp10), and Fig. 12 summarizes the resulting spatial distribution of M_c in Central America.

The spatial variation of M_c shows that the seismic zones corresponding to the volcanic arc of Central America have the best completeness, with $M_c = M_w \leq 3.0$. Additionally, it can be observed that the zones with better recording are those with $M_c = M_w \leq 2.5$, corresponding to sectors with better seismic station coverage for the local seismic networks. This is evi-

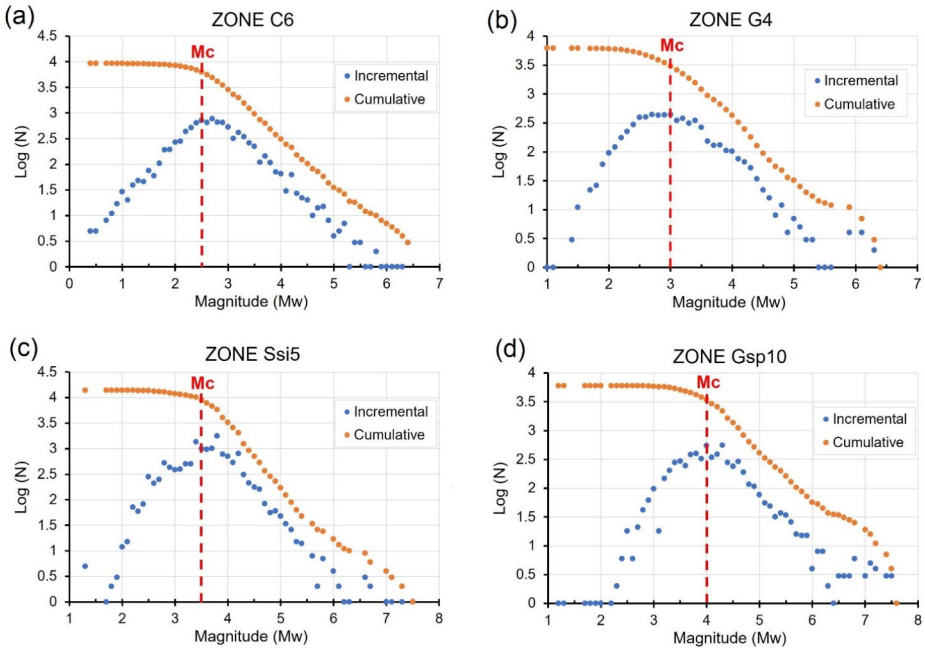


Fig. 11 Magnitude-frequency distribution -MFD- for some of the seismic zones proposed by Alvarado et al. (2017). Dashed vertical lines represent the magnitude of completeness (M_c) estimated by the maximum curvature method: (a) $M_c=2.5$ Mw, (b) $M_c=3.0$ Mw, (c) $M_c=3.5$ Mw and (d) $M_c \geq 4.0$ Mw

dent in the volcanic arc zones of Nicaragua and Costa Rica, as well as the areas bordering Colombian territory to the east of Panama (Fig. 12a). In contrast, seismic zones in Honduras have the highest M_c ($M_w \geq 4.0$), due to the lack of a local seismic network and the limited collection of seismic events in that sector compared to the rest of the region (Fig. 12a). A similar situation occurs in the northern regions of Guatemala and Nicaragua, with poor completeness and high M_c values (Fig. 12a).

In general, the zones belonging to the upper margin of the subducting slab in Central America exhibit a homogeneous completeness with $M_c=M_w$ 3.5. However, some areas in Guatemala have higher M_c values ($M_w \geq 4.0$) and therefore, deficient completeness compared to the rest of the countries in the region (Fig. 12a). Panama also shows deficient completeness in the southern regions of the country (C4, P1, P2), which can be attributed to the low completeness in these seismic zones because of the coverage gap. This is due to their predominantly offshore location, which makes it difficult to register small-magnitude earthquakes (Fig. 12a).

Lastly, the interface and in-slab zones present M_c values with a geographically discontinuous trend, although the value is the same for each country (Fig. 12b). Guatemala and Panama present the most deficient completeness, with the factors causing the highest values being the same as those set out previously for upper plate seismicity. El Salvador shows a homogeneous completeness ($M_c=M_w$ 3.5) in the subduction zone (Ssi5, Ssp6) (Fig. 12b), while Nicaragua and Costa Rica present the best completeness in the subduction zone, with a $M_c = M_w$ 3.0, thus evidencing that the proximity of the trench to the peninsulas, as well as

Table 6 Magnitude of completeness (M_c) for the seismic zones proposed by Alvarado et al. (2017)

Zone name/Code	M_c (M_w)	Zone name/Code	M_c (M_w)
<i>Upper Plate Seismicity</i>		<i>Upper Plate Seismicity</i>	
Guatemala Pacific (G1)	4.0	Costa Rica, Backarc North (C9)	3.0
Guatemala-El Salvador forearc (G2-S2)	3.0	Costa Rica, Central Caribe Parismina (C10)	3.5
Guatemala, Volcanic Arc W (G3)	3.0	Panama Fracture Zone (P1)	4.5
Guatemala, Volcanic Arc E (G4)	3.0	Panama, Deformed Belt South of Panama (P2)	4.0
Guatemala-El Salvador-Honduras, Central Depression (G5-S5-H1)	4.0	Panama, Colombia forearc North (P3)	2.5
Guatemala, Polochic-Motagua W (G6)	4.0	Panama, West (P5)	3.5
Guatemala, Polochic-Motagua NE (G7)	4.5	Panama, Central (P6)	3.5
Guatemala, North (Peten-Belice) (G8)	4.0	Panama, East-Darien (P7)	2.5
Guatemala North-West (G9)	4.5	Panama, North Panama Deformed Belt North East (P8)	4.0
Honduras, Central Highlands (H2)	4.5	Panama– North Panama Deformed Belt Central (P9)	4.0
Honduras-Nicaragua, Guayape fault system (H3-N11)	4.5	Panama, North Panama Deformed Belt West (P10-C8)	3.0
North Coast Honduras (H4)	4.5	<i>Interface Seismicity</i>	
El Salvador, Central Pacific (S1)	3.5	Guatemala, Interface (Gsi9)	4.0
El Salvador, Central Volcanic Arc (S3)	3.0	El Salvador, Interface (Ssi5)	3.5
El Salvador-Nicaragua, Volcanic Arc (Fonseca Gulf) (S4-N5)	3.0	Nicaragua, Interface NW (Nsi15)	4.0
Nicaragua, Pacific West (N1)	3.5	Nicaragua, Interface SE (Nsi16)	3.0
Nicaragua, Pacific South– Costa Rica, Papagayo Gulf (N2-C1)	3.5	Costa Rica, Interface Nicoya (Csi11)	3.0
Nicaragua, forearc West (N3)	3.0	Costa Rica, Interface Quepos (Csi12)	3.0
Nicaragua, forearc East (N4)	3.0	Costa Rica, Interface Osa (Csi13)	3.0
Nicaragua, Volcanic Arc West-Central (N6-7)	2.5	Panama, Interface South (Psi9)	3.5
Nicaragua, Volcanic Arc SE (N8)	2.5	Panama, Interface San Blas, Darien, Choco (Psi10)	4.0
Nicaragua Depression (N9-10)	2.5	Panama Southeast (Psi11)	4.5
Nicaragua, Caribe South (N12)	3.5	<i>Inslab Seismicity</i>	
Nicaragua, Caribe North (N13-14)	4.0	Guatemala (Gsp10)	4.0
Costa Rica, forearc NW (C2)	3.5	El Salvador (Ssp6)	3.5
Costa Rica, forearc Pacific Central (C3)	3.5	Nicaragua (Nsp17)	3.0
Panama-Costa, Burica peninsula (C4)	4.0	Costa Rica NW (Csp14)	3.0
Costa Rica, Guanacaste Volcanic Arc (C5)	3.0	Costa Rica Central (Csp15)	3.0
Costa Rica, Central Volcanic Range (C6)	3.0	Costa Rica SE (Csp16)	3.0
Costa Rica - Talamanca (C7)	3.0	Panama South (Psp11)	3.5

the processes of improving coverage and densification of these local seismic networks help to enhance the spatial completeness in these sectors (Fig. 12b).

An analysis of completeness over time was then conducted by the Stepp (1972) method using two approaches. The first approach involved examining the fit of the cumulative seismic event $[N(m)]$ standard deviation (σ) against a $1/\sqrt{T}$ curve, within five-year time intervals (T) (Fig. 13a) (Arroyo et al. 2017). The completeness time interval within the analyzed

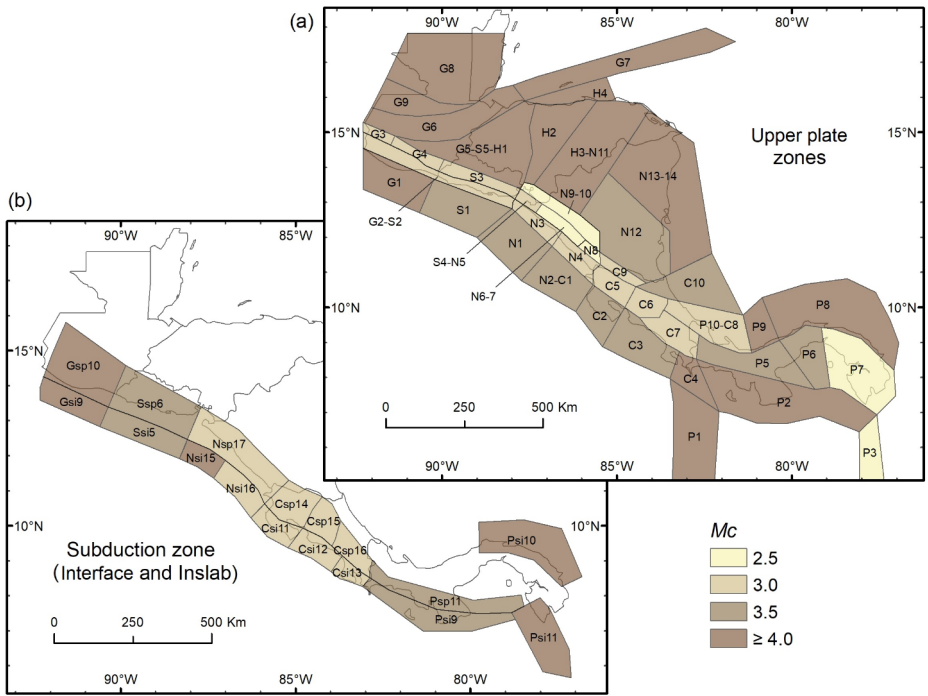


Fig. 12 Magnitude of completeness (M_c) for the **a** upper plate zones, **b** interface zones and **c** inslab zones proposed by Alvarado et al. (2017)

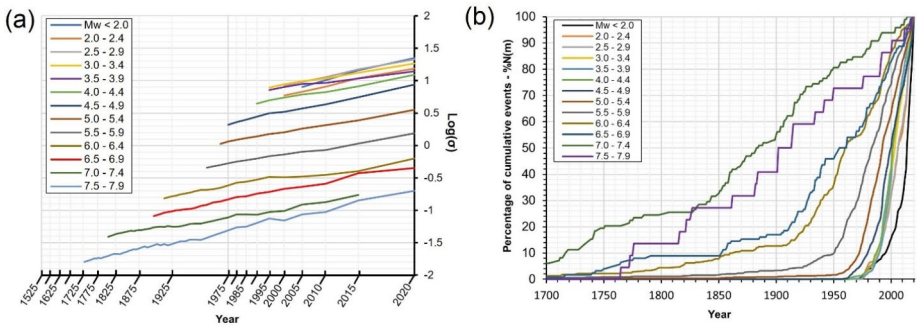


Fig. 13 Completeness analysis by the Stepp (1972) method using **a** statistical approach based on standard deviation $-\sigma-$ and **b** visual inspection of the percentage of cumulative events $\%N(m)$

magnitude range was determined when the coefficient of determination (R^2) did not deviate from the linear relationship of the data beyond 0.04. In other words, time intervals (T) with an $R^2 \geq 0.96$ were considered complete for the analyzed magnitude interval. The second approach involved assessing the percentage of accumulated seismic events [$\%N(m)$] for different magnitude intervals (M_w) to detect an increase in the slope of the cumulative percentage for each assigned magnitude interval, using visual inspection as the original criterion

proposed by Stepp (1972) (Fig. 13b). Table 7 summarizes the results obtained from both approaches.

The results for the temporal evolution of completeness show that for the lower ranges of M_w , it is not possible to ensure with sufficient certainty the time interval and year in which completeness is achieved (Table 7). We define it in this way because the detection of seismic events of $M_w < 3.0$ mainly began in the late 20th century, and even today, some countries still lack sufficiently dense coverage of seismic stations to capture these magnitudes. As shown in Fig. 14, the magnitude spectrogram for the instrumental period does not clearly indicate the concentration of seismic events for $M_w < 3.0$. Therefore, it is inferred that the years of completeness for these magnitudes extend until the early 21st century, which is when the updating of local seismic networks with digital equipment began. In contrast, seismic events with magnitudes $M_w \geq 7.5$ were mostly recorded in the historical period prior to the seismic instrumentation era, making it difficult to determine with certainty when the complete registration of these events began.

Comparing our results with those from previous studies conducted in the region (Benito et al. 2012; Alvarado et al. 2017; Arroyo-Solórzano and Linkimer 2021), it can be observed that most of the magnitude intervals achieve completeness during the instrumental period starting from $M_w < 5.0$, as reported in the latest regional study for Central America (Benito et al. 2012). However, the years in which completeness is achieved for each magnitude interval in our study are more recent. This is because the most complete records for these magnitudes are predominantly concentrated from the mid-20th century onwards (Fig. 14), which could affect the estimation of earthquake occurrence rates $[\hat{n}(m)]$ in the region (Table 8). This fact should be taken into consideration for future seismic hazard assessments in Central America. In addition, our results closely align with those estimated by Arroyo-Solórzano and Linkimer (2021) in a study conducted for Costa Rica, indicating that the regional earthquake catalog data regarding the years in which completeness is achieved, are consistent and reliable for use in seismic hazard studies for the countries of Central America.

Table 7 Analysis of completeness over time for the earthquake catalog of Central America

Mw range	Time of completeness	
	Statistical analysis of the standard deviation (σ)	Percentage of cumulative seismic events [%N(m)]
Mw < 2.0	¿2001–2005?	¿2005?
2.0–2.4	¿1996–2000?	¿2000?
2.5–2.9	¿1996–2000?	¿1995?
3.0–3.4	1991–1995	1992
3.5–3.9	1991–1995	1992
4.0–4.4	1986–1990	1985
4.5–4.9	1971–1975	1975
5.0–5.4	1966–1970	1963
5.5–5.9	1956–1960	1950
6.0–6.4	1911–1915	1915
6.5–6.9	1896–1900	1900
7.0–7.4	1801–1805	1830
7.5–7.9	¿1726–1730?	¿1765?

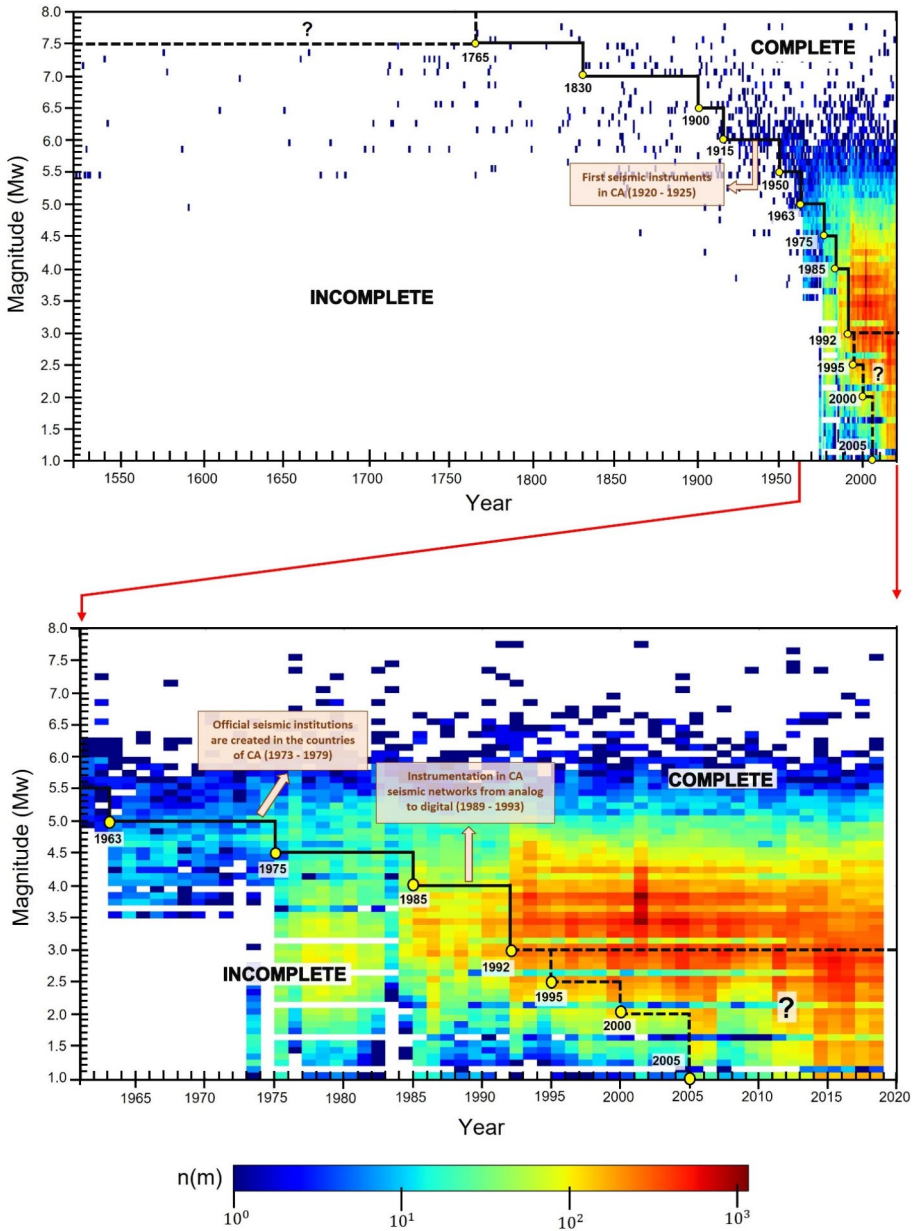


Fig. 14 Completeness over time for Central America calculated with the Stepp (1972) method for the earthquake catalog

By considering earthquakes throughout the complete period, it is possible to calculate the cumulative seismic rate $\dot{N}(m)$ for the complete catalog (Table 8). Using this information, it becomes feasible to extrapolate this seismic rate to the entire observation period of the earthquake catalog (1520–2020), resulting in hypothetical cumulative events $N(m)$ that

Table 8 Cumulative events $N(m)$ and cumulative seismic rates $\dot{N}(m)$ for the entire period (1520–2020) of the initial catalog and the estimated completeness projections for the catalog

Magnitude	Cumulative events $N(m)$		Cumulative seismic rate $\dot{N}(m)$	
	Initial catalog	Complete catalog	Initial catalog	Complete catalog
$M_w \geq 3.0$	154,972	2,270,925	2748.11	4541.85
$M_w \geq 3.5$	93,644	1,314,285	1366.27	2628.57
$M_w \geq 4.0$	42,262	503,230	550.86	1006.46
$M_w \geq 4.5$	16,445	157,015	154.95	314.03
$M_w \geq 5.0$	5148	38,705	35.17	77.41
$M_w \geq 5.5$	1574	8496	6.37	16.97
$M_w \geq 6.0$	567	1970	2.15	3.94
$M_w \geq 6.5$	244	660	0.86	1.32
$M_w \geq 7.0$	120	235	0.33	0.47
$M_w \geq 7.5$	22	45	0.09	0.09

should be recorded for the complete catalog. These results demonstrate that the increase in cumulative seismic rates $\dot{N}(m)$ across all of Central America with the new completeness periods has had a significant impact on the earthquake count in the region and directly influences the calculation of seismic source parameters in seismic hazard studies.

7 Declustering

When evaluating seismic hazard, it is commonly considered that seismicity occurs independently within a seismic zone and follows a Poissonian distribution, which involves removing all seismic events dependent on the main earthquake (e.g., foreshocks, aftershocks, and swarms). Taking into account our earthquake catalog as input for seismic hazard calculations, two declustering methods were employed and compared: the Reasenberg (1985) (RSB) declustering method and the Gardner and Knopoff (1974) spatiotemporal window-based declustering method modified by Uhrhammer (1986) (UHR). We applied the RSB method algorithm to the regional earthquake catalog using the ZMAP software developed by Wiemer (2001), while the UHR algorithm was executed through the Hazard Model Toolkit (Weatherill et al. 2014) included in the OpenQuake software developed by the Global Earthquake Model Foundation (GEM).

The number of earthquakes obtained through each of the declustering methods shows the percentage of earthquakes considered mainshocks, as well as those eliminated (Fig. 15; Table 9). The RSB method considered approximately 76% of seismic events from the initial earthquake catalog as mainshocks, while the UHR method identified ~51% as mainshocks (Table 9). A significant number of seismic events were removed in the magnitude range $M_w < 3.0$, mainly because most of the aftershocks, swarms, and foreshocks are presented in this range. The RSB method removed ~27% of seismic events, and the UHR method removed about ~45% of events in this magnitude range from the initial catalog (Table 9). Similarly, in the magnitude range M_w 3.0–3.9, the UHR method removed more events, leaving only 46% of seismic events from the initial catalog (Table 9). For the magnitude ranges of M_w 4.0–4.9 and M_w 5.0–5.9 similar percentages were considered mainshocks, with 83% of seismic events being retained by the RSB method (Table 9). Finally, for seismic events with

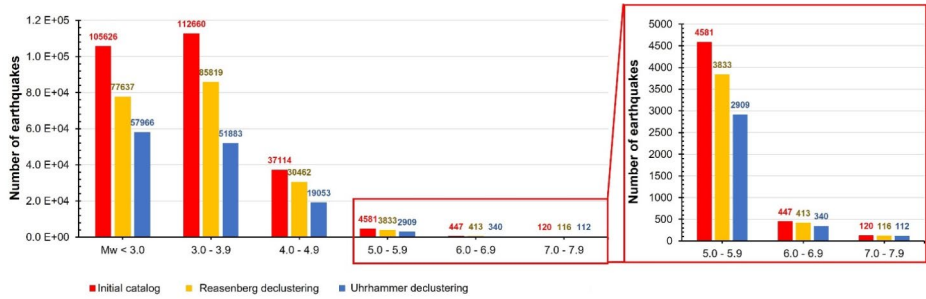


Fig. 15 Number of earthquakes per Mw interval in the initial catalog and number of events identified as main shocks according to the Reasenberg and Uhrhammer declustering methods

Table 9 Percentage of earthquakes represented under both declustering methods

Interval Magnitude	RSB method		UHR method	
	% Events considered main shocks	%Events removed	% Events considered main shocks	%Events removed
$M_w < 3.0$	73.50%	26.50%	54.88%	45.12%
3.0–3.9	76.18%	23.82%	46.05%	53.95%
4.0–4.9	82.08%	17.92%	51.34%	48.66%
5.0–5.9	83.67%	16.33%	63.50%	36.50%
6.0–6.9	92.39%	7.61%	76.06%	23.94%
7.0–7.9	96.67%	3.33%	93.33%	6.67%
TOTAL CATALOG	76.10%	23.90%	50.76%	49.24%

$M_w \geq 6.0$, we observed a smaller declustering effect, with more than 90% of seismic events being retained under both methodologies compared to the initial catalog (Table 9).

The declustering trend of the earthquake catalog reveals that it mainly affects seismic events associated with the subduction zone and the volcanic arc of Central America (Fig. 16a). Furthermore, the criteria used in the RSB and UHR methods to eliminate seismic events, foreshocks, and aftershock sequences are quite consistent across all clusters in the region. However, the results obtained through each approach differ significantly as regards the identification of mainshock events, as can be clearly observed from the concentration clusters determined under the two methods (Fig. 16b and c).

The RSB method uses a simple circular fault model and time windows, allowing for the grouping of higher-order aftershocks and their subsequent removal by identifying the mainshock (Reasenberg 1985). However, it is important to consider that the effectiveness of declustering highly dependent on accurate hypocentral location and temporal recording of dependent seismic events, such as foreshocks and aftershocks. Only through correct identification and elimination of these seismic events can appropriate declustering be achieved. Therefore, if the locations of the dependent seismic events are widely scattered relative to the main event, it is possible that the algorithm will not fully remove these events in the clusters. This could be the reason why the percentages of declustering using the RSB method are relatively low compared to the initial catalog. Additionally, it is important to highlight the fact that cluster formation persists despite the application of the RSB method (Fig. 16b).

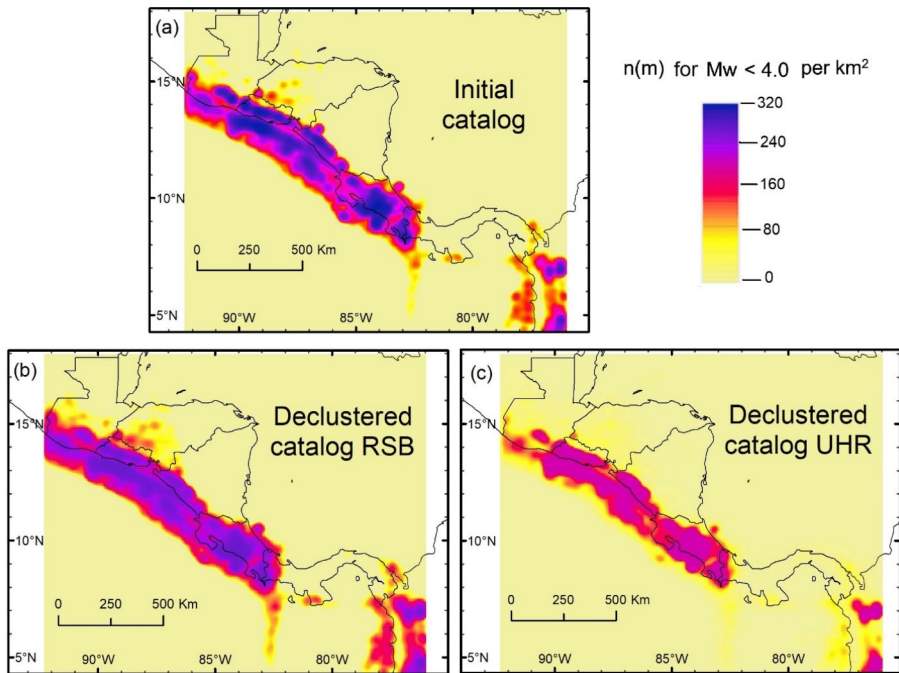


Fig. 16 Spatial representation of the number of earthquakes of less than 4.0 Mw per km² with the **a** initial catalog, **b** Reasenberg declustering and **c** Uhrhammer declustering

In general, it is observed that the UHR method is that which removes the most earthquakes from the earthquake catalog (Fig. 16c). The UHR method is based on an estimation of spatiotemporal windows calculated from the magnitude of the main seismic event (Uhrhammer 1986). This implies that if most of the mainshocks are of high magnitude, the UHR method formulation estimates a large distance for possible aftershocks and foreshocks within the analyzed time interval. Therefore, this could explain why the UHR method removes nearly half of the seismic events from the initial earthquake catalog, drastically reducing the perception of the clusters or making them almost completely disappear (Fig. 16c). Moreover, it should be considered that the spatiotemporal windows used in the UHR method were initially calibrated for the tectonic setting of California and are now being implemented in the region of Central America (Uhrhammer 1986).

The continued development of these and other declustering approaches, along with the study of spatiotemporal parameters or the analysis of seismic series and earthquake occurrence rates (ETAS), is of particular importance in order to determine which seismic events are truly independent. Hence, we suggest that for future studies on seismic hazard in Central America, spatiotemporal window parameters should be obtained, calibrated and incorporated into regional earthquake catalog declustering methods.

Finally, our results suggest that it can be determined that it is very important to carefully consider the choice of declustering method applied to an earthquake catalog for seismic hazard assessment purposes. The declustering method applied will significantly influence the calculations of seismic hazard in a region, as it directly modifies the seismic event

occurrence rates for certain magnitudes. This, in turn, affects the subsequent estimation of source parameters to avoid significantly overestimating or underestimating the hazard in a region. Moreover, it should be noted that a large earthquake can trigger equally significant aftershocks, which are relevant in terms of their effects on ground acceleration, leading to a conceptual discussion about whether it is appropriate to completely remove all dependent seismic events in probabilistic seismic hazard studies. These points have previously been addressed and discussed in other studies, highlighting the fact that the final hazard results can vary considerably, and source parameters can be overestimated when using more “aggressive” declustering algorithms (Eroglu Azak et al. 2018; Mizrahi et al. 2021; Taroni and Akinici 2021).

8 Conclusions

The regional earthquake catalog for Central America is the outcome of homogenizing a variety of databases with local and global seismic records, which, in turn, has enhanced the understanding of the spatial and temporal distribution of seismicity in Central America. Therefore, it is essential to consider the following key points of this updating and integration of seismic information in the resulting database:

1. This is the most extensive regional earthquake catalog of Central America in terms of time and number of seismic events, compiled from 14 databases of local and global agencies.
2. The method used to merge all the databases has resulted in a regional earthquake catalog with 260 548 earthquakes, covering the period from 1520 to 2020, ranging from Mw 1.0 to Mw 7.9, and depths of up to 300.0 km. This number includes mainshocks, foreshocks, aftershocks, and swarms. This information is highly valuable for probabilistic seismic hazard assessment and other studies related to seismicity and tectonics in Central America.
3. The increase in the recording of seismic events in each country reflects the increment in the number of seismic stations and the densification of the local seismic networks to detect the seismic activity of the region. Guatemala has continuously recorded seismic events over time and has improved the acquisition of these data, particularly since 2010. In El Salvador, a dense acquisition of seismic data can be observed over time since 1984. Honduras has the fewest earthquake records in the earthquake catalog, as evidenced by the limited collection of events in the country due to the lack of a local seismic network. Nicaragua has a continuous record with greater density since 1992. Costa Rica has one of the best seismic networks in the region, resulting in the best coverage of seismic events within its territory, with the largest number of events recorded of magnitudes $M_w \geq 3.0$. Panama is one of the countries with the lowest seismic activity in the region and the lowest density of events. However, two periods with higher density of records are observed in 1990 and 2012, which can be attributed to improvements in the network and an increase in detection capacity.
4. The distribution of the magnitude of completeness (M_c) highlights the importance of the level of coverage of local networks and the spatial seismic activity. Lower M_c values ($\leq 3.5 M_w$) indicating better earthquake detection are associated with excellent

- coverage by the seismic network to capture events. This can be observed in the seismic zones along the volcanic arc of Central America. In contrast, higher M_c values ($\geq 4.0 M_w$), where limited seismic network coverage exists, mean that complete seismic event recording is only available for relatively high magnitudes, as observed in the northern region of Guatemala, Honduras, and the center-south area of Panama.
5. The temporal evolution of completeness shows that our catalog has more recent completeness periods for magnitudes $M_w < 5.0$ compared to those determined by other authors in similar studies of Central America. This may be due to the incorporation of new information in the analysis and the two different approaches used to estimate completeness over time. As a result, these new completeness periods lead to higher as well as more realistic earthquake occurrence rates [$\dot{n}(m)$] in Central America.
 6. The seismic events considered mainshocks according to each declustering method, differ significantly in quantity and spatial distribution. The UHR method performs the most extensive declustering, considered 51% of the initial catalog as mainshocks, while the RSB method considered 76%. This implies that the declustering method applied can strongly influence the seismic hazard calculation results when estimating source parameters.
 7. The development of this earthquake catalog represents a crucial step forward and provides an essential starting point for future studies on seismic hazard and risk in the region, as well as for research on seismic-tectonic behavior and spatiotemporal earthquake analysis in Central America.

Appendix

Appendix A: format catalog

See Table 10; Fig. 17.

Table 10 Format of the regional earthquake catalog

Column	Description	Column	Description
1–4	Year	33	Blank space
5	Blank space	34–38	Depth (Km)
6–7	Month	39	Blank space
8	Blank space	40–42	Magnitude
9–10	Day	43	Blank space
11	Blank space	44–45	Magnitude type (M_w)
12–13	Hour	46	Blank space
14	Blank space	47–49	Root means square error (RMS)
15–16	Minute	50	Blank space
17	Blank space	51–59	Source information of the earthquake
18–19	Second	60	Blank space
20	Blank space	61–64	Country of registration
21–25	Latitude coordinate (degrees)	65	Blank space

YEAR	MONTH	DAY	HOUR	MIN	SEC	LAT	Lon	DEPTH (KM)	MAG	MAGTYPE	RMS	SOURCE	COUNTRY	REFERENCE
1520	0	0	0	0	0	11.95	-86.15	33	5.4	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1522	0	0	0	0	0	12.42	-86.55	33	5.4	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1524	0	0	0	0	0	11.95	-86.15	33	5.4	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1526	1	1	0	0	0	13.6	-90.24	60	7.1	Mw	1.5	SNET	SALV	SNET
1527	0	0	0	0	0	12.6	-86.86	33	5.4	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1528	5	0	0	0	0	12.42	-86.55	33	5.8	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1529	0	0	0	0	0	12.6	-86.86	33	5.4	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1529	7	25	0	0	0	11.95	-86.15	33	5.4	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1530	0	0	0	0	0	12.6	-86.86	33	5.4	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1536	6	12	0	0	0	11.95	-86.15	33	5.4	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1539	11	24	0	0	0	16.5	-86	9	7.2	Mw		SNET	SALV	SNET
1541	11	21	0	0	0	9.7	-79.3	30	6.2	Mw	1	RESIS	CR	"RESIS-II (Benito et al., 2012) "
1575	1	1	0	0	0	13.2	-91.5	60	7.3	Mw		SNET	SALV	SNET
1577	11	30	0	0	0	14.75	-91.5	125	7	Mw	1.5	VILLAGRAN	GUA	"MARCA-GEHN (Peruzza et al., 2021)"
1586	6	13	0	0	0	11.95	-85.95	33	5.8	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1590	0	0	0	0	0	15.3	-89.85	0	4.9	Mw	1.5	VILLAGRAN	GUA	"MARCA-GEHN (Peruzza et al., 2021)"
1609	0	0	0	0	0	12.42	-86.55	33	6.4	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1621	5	2	21	35	0	8.97	-79.55	10	6.9	Mw	1	RESIS	CR	"RESIS-II (Benito et al., 2012) "
1648	0	0	0	0	0	12.42	-86.55	33	6.4	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1651	2	13	0	0	0	14.23	-90.38	0	5.9	Mw	1.5	VILLAGRAN	GUA	"MARCA-GEHN (Peruzza et al., 2021)"
1658	11	3	0	0	0	13.2	-89.75	60	7.2	Mw		SNET	SALV	SNET
1663	0	0	0	0	0	12.42	-86.55	33	7.3	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1670	0	0	0	0	0	11.95	-86.15	33	5.4	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1676	0	0	0	0	0	14.584	-90.834	5	5.9	Mw	1.5	VILLAGRAN	GUA	"MARCA-GEHN (Peruzza et al., 2021)"
1680	0	0	0	0	0	12.7	-87.02	33	5.4	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1685	8	8	0	0	0	12.7	-87.02	33	5.4	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1697	3	18	0	0	0	12.52	-86.83	33	5.8	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1702	0	0	0	0	0	15.2	-90.6	10	6.2	Mw	1.5	VILLAGRAN	GUA	"MARCA-GEHN (Peruzza et al., 2021)"
1702	10	28	0	0	0	11.95	-86.05	33	5.8	Mw		CHUY	NIC	Leonardo Álvarez (2021)
1711	1	1	0	0	0	13.3	-89.55	45	7	Mw		SNET	SALV	SNET
1712	12	14	0	0	0	13.583	-88.833	9	7.1	Mw		SNET	SALV	SNET
1713	8	12	0	0	0	14.9	-90.77	5	6.2	Mw	1.5	VILLAGRAN	GUA	"MARCA-GEHN (Peruzza et al., 2021)"
1714	5	5	0	0	0	15.45	-92.2	10	6.2	Mw	1.5	VILLAGRAN	GUA	"MARCA-GEHN (Peruzza et al., 2021)"
1717	9	29	0	0	0	14.4	-91.083	60	7.4	Mw	1.5	VILLAGRAN	GUA	"MARCA-GEHN (Peruzza et al., 2021)"

Fig. 17 Excerpt from the earthquake catalogAppendix B: source information

The description of the information sources for the earthquakes with their respective references is as follows (Table 11):

Table 11 Description of the source information in the earthquake catalog

Source	Description	References
COPECO	Comision Permanente de Contingencias, Honduras	COPECO
CMT	Global Centroid Moment Tensor Catalog	Global Centroid Moment Tensor (CMT)
ISC-GEM	Global Instrumental Earthquake Catalogue (1904–2018)	ISC-GEM (Giacomo et al. 2018)
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Nicaragua	INETER
INSIVUMEH	Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Guatemala	INSIVUMEH

Table 11 Description of the source information in the earthquake catalog

Source	Description	References
ALVA	A new earthquake catalog for Nicaragua Republic (Álvarez 2021)	Álvarez (2021)
AMB	Amboy Station of the EE.UU	
AMIL	Relocations of NIC network events carried out by Amilcar Cabrera (INETER)	
CADC	Central America Data Centre	
CAM	Regional database by the CASC	
CASC	Central American Seismic Center, Costa Rica	
CHUY	Re-evaluation of existing macroseismic information in Nicaragua until 1980 (Chuy, 1985)	
DNA	One of the agencies used in the formation of the NOAA catalogs	
EHB	Event relocations by the ISC using the EHB algorithm	
EIDC	Experimental (GSETT3) International Data Center, EE.UU	
HDC	Volcanological and Seismological Observatory of Costa Rica	
IDC	International Data Centre, CTBTO, Austria	
ISC	International Seismological Centre	
ISS	International Seismological Summary Catalog until 1963	
LAO	Large Aperture Seismic Array, EE.UU	
LEED	First macroseismic catalog of Nicaragua (Leeds 1974)	
NIC	Catalog of the seismological network of Nicaragua	
SJS	Costa Rican Institute of Electricity	
SNET	Servicio Nacional de Estudios Territoriales, El Salvador	
UCR	Section of Seismology, Volcanology and Geophysical Exploration, Costa Rica	
WARD	Results of a portable network installed in Managua and its surroundings in 1973 (Ward, 1973)	
MEXICO	<i>Servicio Sismológico Nacional</i> , México	MARCA-GEHN (Peruzza et al. 2021)
VILLAGRAN	Seismic risk assessment for Guatemala City (Villagran et al., 1994)	
SNET	<i>Servicio Nacional de Estudios Territoriales</i> , El Salvador	SNET
RESIS	RESIS II Project: Seismic Hazard Assessment in Central America	RESIS-II (Benito et al. 2012)
RSN	<i>Red Sismológica Nacional</i> , Costa Rica	RSN
SGC	<i>Servicio Geológico Colombiano</i> , Colombia	SGC
UPA	<i>Red Sismológica Nacional</i> , Panama	UPA
USGS	Global Earthquake Catalog of the United States Geological Survey (USGS)	USGS

Appendix C: reference description

The description of the references in the sources is as follows (Table 12):

Table 12 Description of the references in the earthquake catalog

References	Description
COPECO	Comisión Permanente de Contingencias (COPECO). (1974). https://copeco.gob.hn/

Table 12 Description of the references in the earthquake catalog

References	Description
Global Centroid Moment Tensor (CMT)	Ekström, G., Nettles, M., and Dziewoński, A. M.: The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, <i>Physics of the Earth and Planetary Interiors</i> , 200–201, 1–9, https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002 , 2012
ISC-GEM (Giacomo et al. 2018)	Di Giacomo, D., Engdahl, E. R., and Storchak, D. A.: The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the Extension Project, <i>Earth Syst Sci Data</i> , 10, 1877–1899, https://doi.org/10.5194/essd-10-1877-2018 , 2018.
INETER	Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER). (1975). Nicaraguan Seismic Network [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. https://doi.org/10.7914/SN/UN
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). (1976). Red Sismológica Nacional [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. https://doi.org/10.7914/SN/GI
Álvarez (2021)	Álvarez, L.: A new earthquake catalog for Nicaragua Republic, <i>Investigaciones Geográficas</i> , 62, 43–68, https://doi.org/10.5354/0719-5370.2021.64948 , 2021.
MARCA-GEHN (Peruzza et al. 2021)	Peruzza, L., Esposito, E., Rodríguez García, F. E., García Castro, R. A., Santos, P., Marroquín, G., Mixco, L., Torres Bernhard, L., Torres, R., Hernandez, D. A., Rubi Tellez, C., Guevara, S., Castrillo-Osorio, N., Monterroso, D., Ordóñez Martínez, T., Ruiz, M., Tenorio, C., Flores, O., Luna, J., Argueta Platero, A. A., and Giunta, G.: MARCA-GEHN, a prototype macroseismic archive of four Central America countries, <i>Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata</i> , 62, s1–s198, https://doi.org/10.4430/bgta0355 , 2021.
SNET	Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). (2004). Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), El Salvador (SNET-BB) [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. https://www.fdsn.org/networks/detail/SV/
RESIS-II (Benito et al. 2012)	Benito, M. B., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, A., Marroquín, G., Molina, E., Rojas, W., Escobar, J. J., Talavera, E., Alvarado, G. E., and Torres, Y.: A new evaluation of seismic hazard for the Central America Region, <i>Bulletin of the Seismological Society of America</i> , 102, 504–523, https://doi.org/10.1785/0120110015 , 2012.
RSN	Red sismológica Nacional de Costa Rica. (1973). Red Sismologica Nacional de Costa Rica (RSN: UCR-ICE) [Data set]. https://doi.org/10.15517/TC
SGC	Servicio Geológico Colombiano. (1993). Red Sismologica Nacional de Colombia [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. https://doi.org/10.7914/SN/CM
UPA	Universidad de Panama. (2002). Universidad de Panama Seismic Network [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. https://www.fdsn.org/networks/detail/RP/
USGS	Albuquerque Seismological Laboratory/USGS. (2014). Global Seismograph Network (GSN - IRIS/USGS) [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. https://doi.org/10.7914/SN/IU

Acknowledgements The authors would like to acknowledge all their colleagues involved in the KUK-AHPÁN Project from Central America. The data for Costa Rica come from the earthquake catalog of the *Programa de Investigación RSN de la Universidad de Costa Rica* (no. 113-B9-911) and the research project *Vigilancia Sísmica de Costa Rica* (no. 113-B5-704).

Author contribution Material preparation was performed by J. Aguilar, I.G. Arroyo, E. Camacho Astigarabia, D. Castro, O. Flores, L. Linkimer, G. Marroquín, L. Mixco Durán, W. Strauch, J.E. Talavera, G. Valle and R. Yani-Quiyuch. Data collection, data processing, analysis and interpretation were performed by C. Gamboa-Canté, M. Arroyo-Solórzano and B. Benito. The first draft of the manuscript was written by C. Gamboa-Canté. All authors read and approved the final manuscript.

Funding This work was supported by the KUK-APHÁN Project (RTI2018-094827-B-C21/C22) funded by *Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno de España* and MCIN/ AEI/10.13039/501100011033 and, if applicable, by “FEDER A way to do Europe”.

Data availability The datasets generated during and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Declarations

Competing interests The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose.

References











- Alvarado GE, Benito B, Staller A et al (2017) The new central American seismic hazard zonation: mutual consensus based on up to day seismotectonic framework. *Tectonophysics* 721:462–476. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.013>
- Álvarez L (2021) A new earthquake catalog for Nicaragua Republic. *Investigaciones Geográficas* 62:43–68. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2021.64948>
- Ambraseys NN, Adams RD (2001) *The seismicity of Central America: a descriptive catalogue 1898–1995*. published by Imperial College Press and distributed by World Scientific Publishing Co.
- Ammon CJ, Velasco AA, Lay T, Wallace TC (2021) Earthquake size & descriptive earthquake statistics. *Foundations of Modern Global Seismology*. Elsevier, pp 197–222
- Arango MC, Strasser FO, Bommer JJ et al (2011) A strong-motion database from the Central American subduction zone. *J Seismol* 15:261–294. <https://doi.org/10.1007/s10950-010-9223-6>
- Arroyo M, Godínez K, Linkimer L (2017) Completitud Del catálogo de la red sismológica Nacional De Costa Rica Durante 1975–2014. *Bol De Geología* 39:87–98. <https://doi.org/10.18273/revbol.v39n3-2017006>
- Arroyo-Solórzano M, Linkimer L (2021) Spatial variability of the b-value and seismic potential in Costa Rica. *Tectonophysics* 814. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228951>
- Barrera-Lopez CV, Mooney WD, Kaban MK (2022) Regional Geophysics of the Caribbean and Northern South America: Implications for Tectonics. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 23:. <https://doi.org/10.1029/2021GC010112>
- Benito MB, Lindholm C, Camacho E et al (2012) A new evaluation of seismic hazard for the Central America Region. *Bull Seismol Soc Am* 102:504–523. <https://doi.org/10.1785/0120110015>
- Bommer J, Benito M, Ciudad-Real M et al (2002) The El Salvador earthquakes of January and February 2001: context, characteristics and implications for seismic risk. *Soil Dyn Earthq Eng* 22:389–418. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00024-6)
- Bourke JR, Levin V, Arroyo IG, Linkimer L (2023) Evidence for Caribbean plate subduction in southern Costa Rica. *Geology* 51:408–412. <https://doi.org/10.1130/G50796.1>
- Camacho Astigarrabía E, Alvarado M (2024) Local faults earthquakes reported as strong in Central Panama. *Panama REICIT* 3:95–118. <https://doi.org/10.48204/reict.v3n2.4679>
- Carvajal-Arenas LC, Mann P (2018) Western caribbean intraplate deformation: defining a continuous and active microplate boundary along the San Andres rift and Hess Escarpment fault zone, Colombian Caribbean Sea. *Am Assoc Pet Geol Bull* 102:1523–1563. <https://doi.org/10.1306/12081717221>
- Cheng C, Wang D (2020) Imaging the rupture process of the 10 January 2018 mw7.5 swan island, Honduras earthquake. *Earthq Sci* 33:194–200. <https://doi.org/10.29382/EQS-2020-0194-03>
- Dziewonski AM, Chou TA, Woodhouse JH (1981) Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J Geophys Res* 86:2825–2852. <https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825>
- Eisen G (1903) The earthquake and volcanic eruption in Guatemala in 1902. *Bull Am Geographical Soc* 35:325–352. <https://doi.org/10.2307/197952>
- Ekström G, Nettles M, Dziewonski AM (2012) The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Phys Earth Planet Inter* 200–201:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
- Ellis AP, Demets C, Briole P et al (2015) Geodetic slip solutions for the mw=7.4 Champerico (Guatemala) earthquake of 2012 November 7 and its postseismic deformation. *Geophys J Int* 201:856–868. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu484>
- Eroglu Azak T, Kalafat D, Şeşetyan K, Demircioğlu MB (2018) Effects of seismic declustering on seismic hazard assessment: a sensitivity study using the Turkish earthquake catalogue. *Bull Earthq Eng* 16:3339–3366. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0174-y>
- Fernández M, Escobar CD, Redondo CA (2004) Seismograph networks and seismic observation in El Salvador and Central America. *Geol Soc Am* 375:257–267. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2375-2.257>

- Finch RC, Ritchie AW (1991) The Guayape fault system, Honduras, Central America. *J South Am Earth Sci* 4:43–60. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(91\)90017-F](https://doi.org/10.1016/0895-9811(91)90017-F)
- Funk J, Mann P, McIntosh K, Stephens J (2009) Cenozoic tectonics of the Nicaraguan depression, Nicaragua, and median trough, El Salvador, based on seismic-reflection profiling and remote-sensing data. *Bull Geol Soc Am* 121:1491–1521. <https://doi.org/10.1130/B26428.1>
- Gardner JK, Knopoff L (1974) Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed. Poissonian? *Bull Seismological Soc Am* 64:1363–1367. <https://doi.org/10.1785/BSSA0640051363>
- Garnier B, Tikoff B, Flores O et al (2021) An integrated structural and GPS study of the Jalpatagua fault, southeastern Guatemala. *Geosphere* 17:201–225. <https://doi.org/10.1130/GES02243.1>
- Garnier B, Tikoff B, Flores O et al (2022) Deformation in Western Guatemala Associated with the NAFCA (North America-Central American Forearc-Caribbean) Triple Junction: neotectonic strain localization into the Guatemala City Graben. *Tectonics* 41. <https://doi.org/10.1029/2021TC006739>
- Geirsson H, Lafemina PC, Demets C et al (2015) The 2012 August 27 Mw7.3 El Salvador earthquake: expression of weak coupling on the Middle America subduction zone. *Geophys J Int* 202:1677–1689. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv244>
- Graham SE, Demets C, Deshon HR et al (2012) GPS and seismic constraints on the M=7.3 2009 Swan Islands earthquake: implications for stress changes along the Motagua fault and other nearby faults. *Geophys J Int* 190:1625–1639. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05560.x>
- Guzmán-Speziale M, Molina E (2022) Seismicity and seismically active faulting of Guatemala: a review. *J South Am Earth Sci*. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103740>. 115:
- Hayes GP, Myers EK, Dewey JW et al (2017) Tectonic summaries of magnitude 7 and Greater earthquakes from 2000 to 2015. Open-File Report 2016–1192
- Hayes GP, Moore GL, Portner DE et al (2018) Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Sci* (1979) 362:58–61. <https://doi.org/10.1126/science.aat4723>
- Instituto Nacional de Sismología y Vulcanología (INSIVUMEH) breve historia del Desarrollo de la Sismología en Guatemala <https://insivumeh.gob.gt/?p=1883>. Accessed 12 May 2023
- Kates RW, Haas JE, Amaral DJ et al (1973) Human Impact of the Managua. *Science* (1979) 182:981–990
- LaFemina P, Dixon TH, Govers R et al (2009) Fore-arc motion and Cocos Ridge collision in Central America. *Geochem Geophys Geosyst* 10:1–21. <https://doi.org/10.1029/2008GC002181>
- Leeds DJ (1974) Catalog of Nicaraguan earthquakes. *Bull Seismol Soc Am* 64:1135–1158. <https://doi.org/10.1785/BSSA0640041135>
- Linkimer L, Arroyo I, Mora M et al (2013) The Samara (COSTA RICA) earthquake of 5 September 2012 (mw 7.6). *Revista geológica De América. Central* 49:73–82. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i49.13104>
- Linkimer L, Arroyo IG, Alvarado GE et al (2018) The national seismological network of Costa Rica (RSN): an overview and recent developments. *Seismol Res Lett* 89:392–398
- Lubbers N, Bolton DC, Mohd-Yusof J et al (2018) Earthquake Catalog-Based Machine Learning Identification of Laboratory Fault States and the effects of Magnitude of Completeness. *Geophys Res Lett* 45:13,269–13,276. <https://doi.org/10.1029/2018GL079712>
- Lücke OH (2014) Moho structure of Central America based on three-dimensional lithospheric density modeling of satellite-derived gravity data. *Int J Earth Sci* 103:1733–1745. <https://doi.org/10.1007/s00531-012-0787-y>
- Lücke OH, Arroyo IG (2015) Density structure and geometry of the Costa Rican subduction zone from 3-D gravity modeling and local earthquake data. *Solid Earth* 6:1169–1183. <https://doi.org/10.5194/se-6-1169-2015>
- MacKenzie L, Abers GA, Fischer KM et al (2008) Crustal structure along the southern Central American volcanic front. *Geochemistry. Geophys Geosyst* 9. <https://doi.org/10.1029/2008GC001991>
- Martínez-Díaz JJ, Álvarez-Gómez JA, Staller A et al (2021) Active faults of El Salvador. *J South Am Earth Sci* 105. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103038>
- Mizrahi L, Nandan S, Wiemer S (2021) The Effect of Declustering on the size distribution of Mainslocks. *Seismol Res Lett* 92:2333–2342. <https://doi.org/10.1785/0220200231>
- Morales LD (1986) Historia de la sismología en Costa Rica. *Revista De Filosofía De La. Universidad De Costa Rica* 59:93–104
- Peruzza L, Esposito E, Rodríguez García FE et al (2021) MARCA-GEHN, a prototype macroseismic archive of four Central America countries. *Bollettino Di Geofis Teorica Ed Appl* 62:s1–s198. <https://doi.org/10.4430/bgta0355>
- Peruzza L, Esposito E, Enrique Rodríguez García F, Giunta G (2023) A tool for archiving and updating knowledge about past earthquakes in Central America. In: *Earthquake Ground Motion*. IntechOpen, pp 1–21
- Protti M, González V, Newman AV et al (2014) Nicoya earthquake rupture anticipated by geodetic measurement of the locked plate interface. *Nat Geosci* 7:117–121. <https://doi.org/10.1038/ngeo2038>

- Quintero R, Zahradník J, Güendel F et al (2023) Subduction transition and relation to upper plate faults revealed by the 2019 mw 6.0 and 6.2 Costa Rica-Panama border earthquakes. *Tectonophysics* 851. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229759>
- Reasenber P (1985) Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982. *J Geophys Res* 90:5479–5495
- Rojas W, Bungum H, Lindholm C (1993a) Historical and recent earthquakes in Central America. *Revista Geológica De América Cent* 16:5–22. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i16.13242>
- Rojas W, Cowan A, Lindholm C et al (1993b) Regional seismic zonation for Central America: a preliminary model, program of reduction of natural disasters in Central America. Report of the Research Council of Norway (NORSAR, pp 1–40)
- Rydelek PA, Sacks IS (1989) Testing the completeness of earthquake catalogues and the hypothesis of self-similarity. *Nature* 337:251–253. <https://doi.org/10.1038/337251a0>
- Salazar W, Brown L, Hernández W, Guerra J (2013) An earthquake catalogue for El Salvador and neighboring Central American Countries (1528–2009) and its implication in the Seismic Hazard Assessment. *J Civil Eng Archit* 7:1018–1045. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2013.08.011>
- Segura FF (2018) Reseña de la sismicidad en Nicaragua con énfasis en la Depresión Nicaraguense
- Staller A, Martínez-Díaz JJ, Benito B et al (2016) Present-day crustal deformation along the El Salvador Fault Zone from ZFESNet GPS network. *Tectonophysics* 670:66–81. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.12.017>
- Steph JC (1972) Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and Its Effect on Statistical Estimates of Earthquake Hazard. In: *Proceedings of the International Conference on Microzonation*. Boulder, Colorado, pp 897–910
- Suárez G, Pardo M, Domínguez J et al (1995) The Limón, Costa Rica earthquake of April 22, 1991: back arc thrusting and collisional tectonics in a subduction environment. *Tectonics* 14:518–530. <https://doi.org/10.1029/94TC02546>
- Tanioka Y, Ramirez AGC, Yamanaka Y (2018) Simulation of a Dispersive Tsunami due to the 2016 El Salvador–Nicaragua outer-rise earthquake (mw 6.9). *Pure Appl Geophys* 175:1363–1370. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1773-5>
- Taroni M, Akinci A (2021) Good practices in PSHA: Declustering, b-value estimation, foreshocks and after-shocks inclusion; a case study in Italy. *Geophys J Int* 224:1174–1187. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa462>
- Torres SNET RE Evolución histórica del instrumental sismológico en El Salvador. In: *Centro de Investigaciones Geotécnicas*. <https://www.snet.gov.sv/Geologia/Sismologia/1vigsis.htm>. Accessed 12 May 2023
- Uhrhammer RA (1986) Characteristics of Northern and Central California Seismicity. *Earthquakes Notes* 57:21
- UPA Historia Red Sismológica de la Universidad de Panamá (UPA) (2023) <https://www.panamaigc-up.com/evolucion-y-investigaciones/nosotros/>. Accessed 12
- Weatherill G, Rodríguez L, Pagani M (2014) The Seismic Hazard modeller’s toolkit: an open-source library for the construction of probabilistic seismic hazard models. In: *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Istanbul, pp 1–12
- White RA (1984) Catalog of historic seismicity in the vicinity of the Chixoy-Polochic and Motagua faults, Guatemala. Guatemala City
- White RA, Ligorria JP, Cifuentes IL (2004) Seismic history of the Middle America subduction zone along El Salvador, Guatemala, and Chiapas. *Geol Soc Am* 379–396 1526–2000. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2375-2.379>
- Wiemer S (2001) A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismol Res Lett* 72:373–382. <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>
- Woessner J, Wiemer S (2005) Assessing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bull Seismol Soc Am* 95:684–698. <https://doi.org/10.1785/0120040007>
- Yue H, Lay T, Schwartz SY et al (2013) The 5 September 2012 Nicoya, Costa Rica Mw 7.6 earthquake rupture process from joint inversion of high-rate GPS, strong-motion, and teleseismic P wave data and its relationship to adjacent plate boundary interface properties. *J Geophys Res Solid Earth* 118:5453–5466. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50379>
- Arroyo IG, Linkimer L (2021) *Geofísica Int* 60:51–75. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2021.60.1.2026>. Geometría de la zona sismogénica interplacas en el Sureste de Costa Rica a la luz de la secuencia sísmica de Golfito del 2018

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.

Authors and Affiliations

Carlos Gamboa-Canté¹  · Mario Arroyo-Solórzano²  · Belén Benito¹  · Jorge Aguilar³  · Ivonne G. Arroyo⁴  · Eduardo Camacho-Astigarrabia⁵  · Diego Castro⁶  · Omar Flores⁷ · Lepolt Linkimer⁴  · Martha Griselda Marroquin⁸ · Luis Mixco-Durán⁸ · Wilfried Strauch⁹  · Emilio Talavera⁹ · Gerson Valle³ · Robin Yani-Quiyuch⁶ 

✉ Carlos Gamboa-Canté
carlosjose.gamboa@alumnos.upm.es

¹ Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid 28031, Spain

² Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences and University of Potsdam, Potsdam, Germany

³ Secretaría de Estado en los Despachos de Gestión de Riesgos y Contingencias Nacionales (COPECO), Tegucigalpa, Honduras

⁴ Escuela Centroamericana de Geología (ECG) y Red Sismológica Nacional (RSN), Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

⁵ Departamento de Física, Universidad de Panamá, Panama City, Panama

⁶ Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), Guatemala City, Guatemala


⁷ Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM), Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala City, Guatemala

⁸ Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), San Salvador, El Salvador

⁹ Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), Managua, Nicaragua

Article

Sensitivity Analysis on the Impact of Input Parameters on Seismic Hazard Results: A Case Study of Central America

Carlos Gamboa-Canté ^{1,*} , Mario Arroyo-Solórzano ², Alicia Rivas-Medina ¹ and Belén Benito ¹

¹ Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, 28031 Madrid, Spain; alicia.rivas@upm.es (A.R.-M.); mariabelen.benito@upm.es (B.B.)

² Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences and University of Potsdam, 14473 Potsdam, Germany; marroyo@gfz-potsdam.de

* Correspondence: carlosjose.gamboa@alumnos.upm.es

Abstract: We present a sensitivity analysis on the impact of input parameters and methods used on the results of a probabilistic seismic hazard assessment (PSHA). The accurate estimation of the parameters in recurrence models (declustering and fitting methods), along with the selection of scaling relationships for determining maximum magnitude and the selection of ground motion models (GMMs), enhance control over epistemic uncertainties when constructing the logic tree, minimizing final calculation errors and producing credible results for the study region. This study focuses on Central America, utilizing recent data from seismic, geological, and geophysical studies to improve uncertainty analyses through classic statistical methods. The results demonstrate that proper fitting of the recurrence model can stabilize acceleration variations regardless of the declustering method or *b-value* fitting method used. Regarding scaling relationships, their low impact on the final results is noted, provided the models are tailored to the tectonic regime under study. Finally, it is shown that the GMM contributes the most variability to seismic hazard results; therefore, their selection should be conditioned on calibration with observed data through residual analysis where region-specific models are not available.

Keywords: sensitivity analysis; recurrence parameters; GMM; scaling relationships; seismic hazard; Central America



Academic Editor: Ioannis Koukouvelas

Received: 12 November 2024

Revised: 14 December 2024

Accepted: 27 December 2024

Published: 29 December 2024

Citation: Gamboa-Canté, C.; Arroyo-Solórzano, M.; Rivas-Medina, A.; Benito, B. Sensitivity Analysis on the Impact of Input Parameters on Seismic Hazard Results: A Case Study of Central America. *Geosciences* **2025**, *15*, 4. <https://doi.org/10.3390/geosciences15010004>

Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The inputs that interact to arrive at seismic hazard calculations are subject to uncertainties related to how they are integrated or analyzed in the calculations. For instance, the definitions of seismic sources, recurrence models, seismic parameters, or ground motion models (GMMs) are influenced by uncertainties that have an important impact on the final hazard results. These uncertainties may be *epistemic*, inherent to the models, or *aleatoric*, associated with the standard deviation of the parameters in the models. Logic trees are usually used to control epistemic uncertainties, which integrate possible models for seismic hazard calculations [1,2]. Furthermore, statistical methods can be applied to control the weights of different branches in the logic tree. In this regard, we focused on the sensitivity analysis of different models and input parameters in hazard computations related to the characterization of seismic sources (declustering, fitting method for recurrence model, scaling relationships) and GMMs, taking the Central America (CA) region as a case study. Our aim is to reach a clearer understanding of the uncertainties and to establish a selection guide along with a logic tree weighting proposal replicable in future seismic hazard studies of CA. Based on the sensitivity analysis, an index of the impact of different options (models

and parameters) on the hazard results was obtained. In addition, maps were generated representing the coefficient of variation (CV) of the results for different input options, giving an idea of the zones and conditions that converge to provide more or less robust results. Additionally, we generated a seismic hazard map for peak ground acceleration (PGA) and a return period of 475 years, which was compared with the RESIS II map [3] in order to compare the results of this study with those from a previous regional study based on local seismic data.

2. Seismotectonic Framework

The interactions between the North American, Caribbean, Cocos, and Nazca plates make the tectonic environment of Central America highly active (Figure 1). The boundary between the North American and Caribbean plates gives rise to the Cayman Trough, which is a zone of complex transform faults with a small divergent ridge at its center [4]. This system of transform faults extends westward from the Caribbean, forming the Swan fault (SF), which primarily affects the coasts of Honduras. In Honduras, transtensional fault systems are generated in response to the movement of the Caribbean plate, creating the Honduras Depression (HD) (Figure 1). Additionally, the Guayape fault system (GF), which is the longest and most continuous structure in Honduras, constitutes a complex fault zone ranging from 2 to 25 km in width, oriented N-E, with a length of 290 km [5].

In Guatemala, two sinistral transform fault systems are located in the northern transverse part of the country: the Polochic–Chixoy fault system and the Motagua fault system (PMFS) (Figure 1) [6]. Similarly, to the south of the country lies the beginning of the Central American volcanic arc, the Jalpatagua fault (JF) being a prominent dextral fault with an extension of ~70 km to the Guatemala–El Salvador border [7].

In El Salvador, the northeast movement of the Mid-American Trench (MAT) with respect to the Chortis Block, formed by the North American plate, results in rapid displacement at the point of contact with the regional volcanic arc, leading to the formation of the El Salvador Fault Zone (ESFZ), which is a group of active faults oriented E-W and ESE-WSW, mostly exhibiting strike-slip faulting mechanisms with dextral components and ranging in length from 20 to 30 km [8,9]. Subsequently, the Nicaragua Depression (ND) is formed in the southern region of Nicaragua, this being a prominent geological depression of the late Quaternary, ranging from 40 to 70 km in width and parallel to the Central American volcanic arc (Figure 1), extending ~1000 km from the Nicaragua–Costa Rica border to El Salvador [10].

The subduction of the Cocos plate beneath the Caribbean plate initiates the Mid-American Trench (MAT), which is the most seismically active zone due to its high slip rates from 73.7–76.4 mm/yr in the northwest [6] to 83.0–89.0 mm/yr in the southeast [11], as well as its high rate of seismic events of $M_w \geq 4.5$, ranging from 5.6 to 12.2 earthquakes per year [12]. Southeast of the trench, an interaction between the Cocos plate and a segment of the Nazca plate forms the Panama Fracture Zone (PFZ), which exhibits dextral strike-slip motion-oriented N-S (Figure 1). Another notable feature in this region is the Cocos Ridge, created by the displacement of the Cocos plate over the Galápagos hot spot, resulting in this bathymetric feature extending over 1000 km in length with a southwest–northeast orientation and an approximate thickness of 25 km, triple the normal thickness of the oceanic crust (Figure 1) [13]. The contact of the Nazca plate with the Caribbean plate forms the Southern Panama Deformed Belt (SPDB), where the oblique motion of the Nazca plate results in this belt being composed of complex faults with shallow seismicity (Figure 1) [14].

Furthermore, in the Caribbean Sea, the Hess Scarp (HE) (Figure 1) represents a fracturing in the bathymetry of the region, starting from Nicaragua [15]. Near this scarp, to the

north of Panama, the North Panama Deformed Belt (NPDB) extends along the coasts of Costa Rica, forming the Central Costa Rica Deformed Belt (CCRDB) (Figure 1) [12].

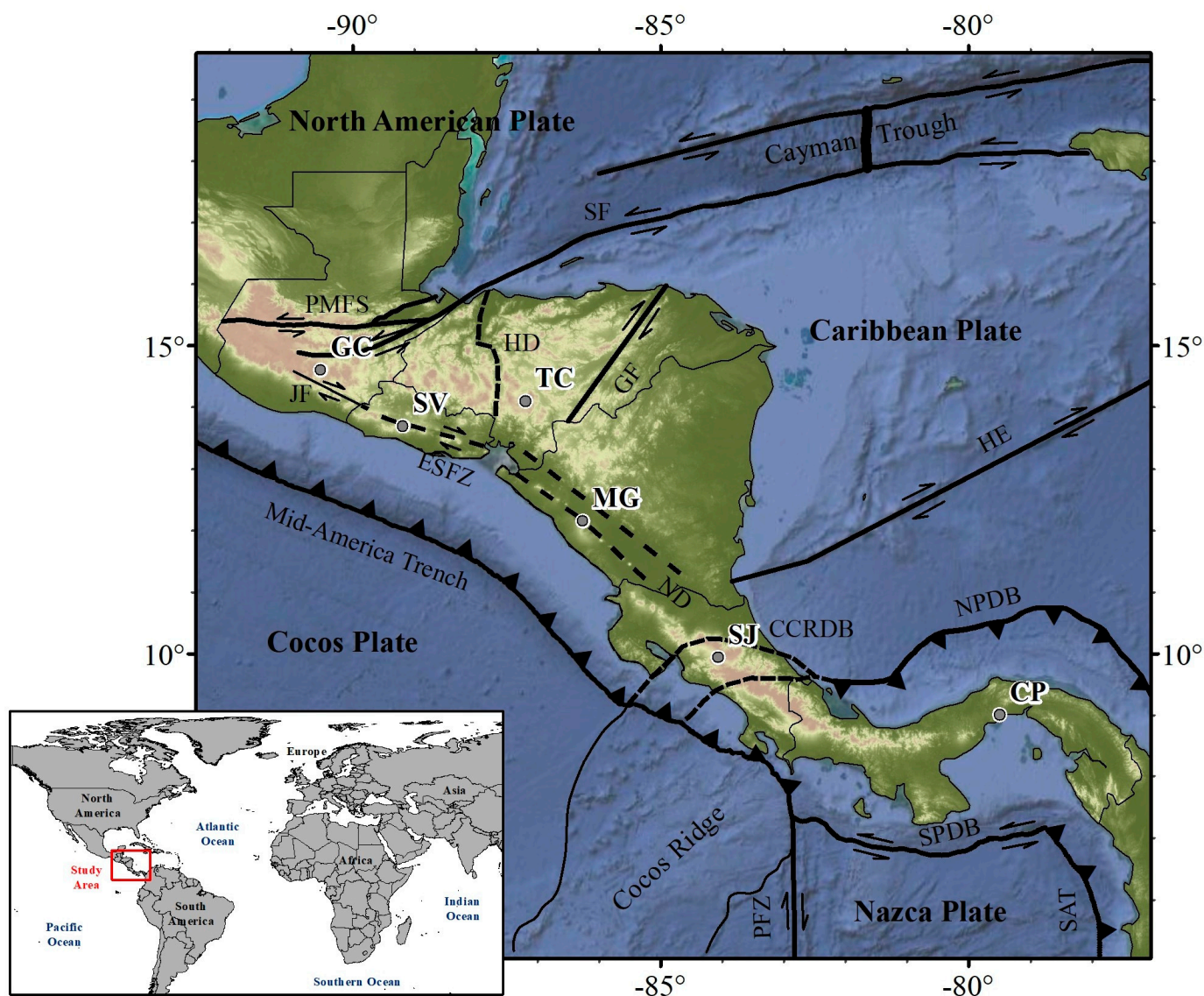


Figure 1. Tectonic framework of Central America. CCRDB—Central Costa Rica Deformed Belt, ESFZ—El Salvador Fault Zone, GC—Guatemala City, GF—Guayape fault, CP—Panama City, HD—Honduras Depression, HE—Hess Scarp, JF—Jalpatagua fault, MG—Managua, ND—Nicaragua Depression, NPDB—North Panama Deformed Belt, PFZ—Panama Fracture Zone, PMFS—Polochic–Motagua fault system, SAT—South American Trench, SF—Swan fault, SJ—San Jose, SPDB—South Panama Deformed Belt, SV—San Salvador, TC—Tegucigalpa.

3. Seismic Hazard Assessment

3.1. Earthquake Catalog

We used the updated regional earthquake catalog of Central America generated from 14 databases of local and regional seismic networks as part of the results of the KUK-AHPÁN project. This earthquake catalog comprises 260 548 seismic events ranging from Mw 1.0 to 7.9 and of depths up to 300 km in the period from 1520 to 2020 [16]. Figure 2 shows the seismicity map used in this study derived from the regional earthquake catalog for seismic events of more than Mw 3.0.

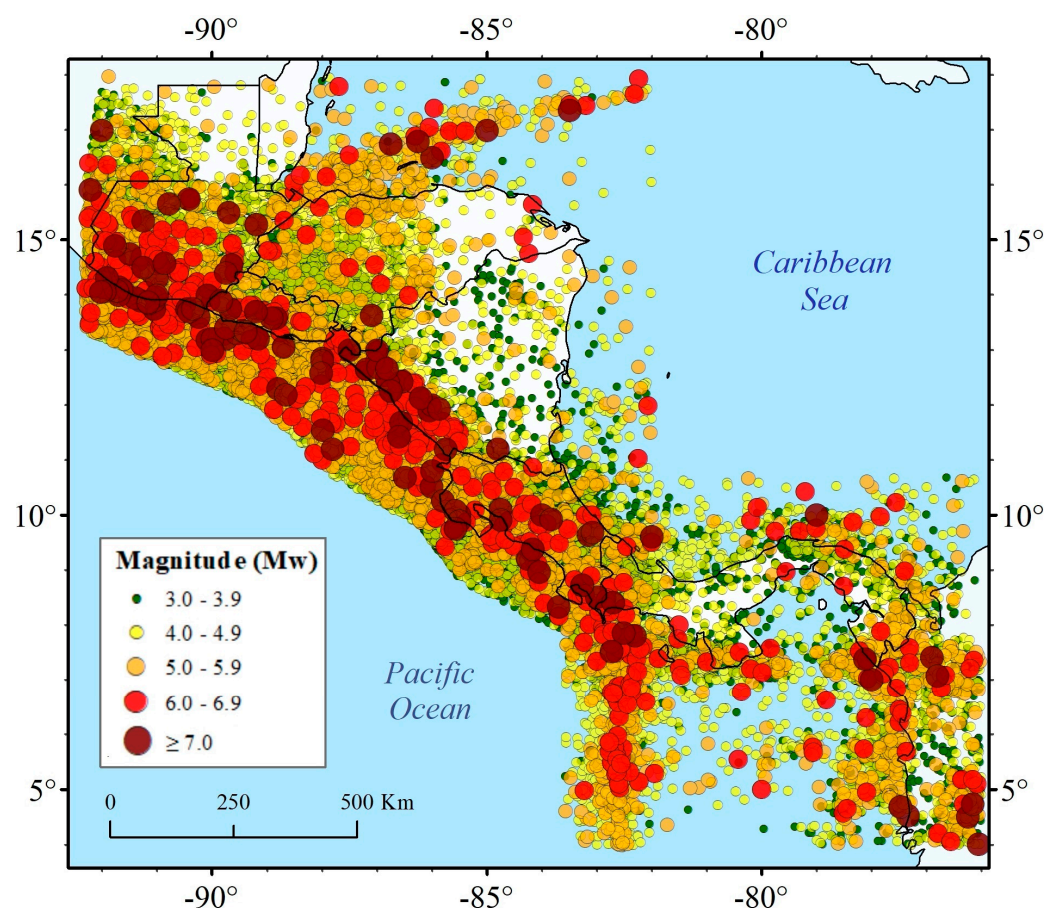


Figure 2. Regional earthquake catalog for Central America in 1520–2020 [16].

Since the earthquake catalog covers a period of 500 years, it was necessary to conduct a temporal completeness analysis for the different magnitude ranges. This analysis evaluates variations in magnitude ranges over time to identify the periods during which earthquakes were considered to have been completely recorded. Gamboa-Canté et al. (2024) [16] performed this analysis using the method proposed by Stepp (1972) [17], which examines the cumulative percentage of seismic events [%N(m)] for different magnitude ranges (Mw). By visually inspecting the slope increases in the cumulative percentages, researchers identify periods where data recording becomes complete, marking these as completeness periods. Table 1 presents the reference years that mark the period of completeness for each magnitude range proposed by Gamboa-Canté et al. (2024) [16].

Table 1 indicates that it is not possible to reliably determine the completeness periods for magnitudes $M_w < 3.0$. This is because detecting seismic events of such magnitudes only began in the late 1990s, and local seismic agencies in each country continue to enhance the density and coverage of seismic networks to detect these events [16]. Conversely, most seismic events with magnitudes $M_w \geq 7.5$ are historical records not captured during the instrumental period, complicating the determination of complete recording periods for these events. The seismicity rates are determined taking into account these reference years and the periods where the earthquake catalog is complete for each magnitude range.

Table 1. Reference years marking the beginning of the period of completeness for each magnitude range for the regional earthquake catalog of Central America.

Magnitude Range (Mw)	Percentage of Cumulative Seismic Events [%N(m)]
Mw < 2.0	¿2005?
2.0–2.4	¿2000?
2.5–2.9	¿1995?
3.0–3.4	1992
3.5–3.9	1992
4.0–4.4	1985
4.5–4.9	1975
5.0–5.4	1963
5.5–5.9	1950
6.0–6.4	1915
6.5–6.9	1900
7.0–7.4	1830
7.5–7.9	¿1765?

3.2. Characterization of the Seismic Sources

We employed the seismic zoning proposed by Alvarado et al. (2017) [12] to characterize the zone-type seismic sources in the region. This zoning is an update of the proposal by Benito et al. (2012) [3] in the RESIS II project, where seismic zones in the more recent zoning model were defined through a comprehensive analysis of geological, geodetic, and seismological information from the region. These seismic zones are distributed as follows: (1) 41 seismic sources in the upper plate regime extending up to a depth of 25.0 km (Figure 3a), (2) 10 seismic sources in the interface regime ranging from depths of 10.0 to 40.0 km (Figure 3b), and (3) 7 seismic sources in the inslab regime with depths exceeding 40.0 km (Figure 3b).

An important characteristic of the Alvarado et al. (2017) [12] zoning is the changes introduced in the subduction with respect to other previous zoning models [3]. The angle of subduction along the Mid-American Trench (MAT) varies significantly across Central America, influencing both the depth and characteristics of seismicity in the region. In Guatemala, a steeper subduction angle allows earthquakes to reach depths of up to 250 km, while in Costa Rica, a shallower angle restricts seismic events to a maximum depth of approximately 70 km [12]. This variation results in a segmented subduction zone, with each segment potentially experiencing differences in the frequency and magnitude of large earthquakes. Additionally, in southern Panama, where the Nazca plate converges at an oblique angle with a shallow subduction dip of less than 20°, seismic activity is predominantly shallow (less than 20 km) but capable of generating events of significant magnitude. These differences in the subduction angle not only shape the regional distribution of seismicity but also impact focal mechanisms and potential energy release across the tectonic boundaries of Central America [12].

This model represents a consensus among Central American seismologists, avoiding national boundary discontinuities and fostering a regional approach to seismic risk management [12]. This regional integration of seismic, tectonic, and GPS data has enabled a more precise demarcation of seismic zones, supporting a probabilistic seismic hazard analysis across the region.

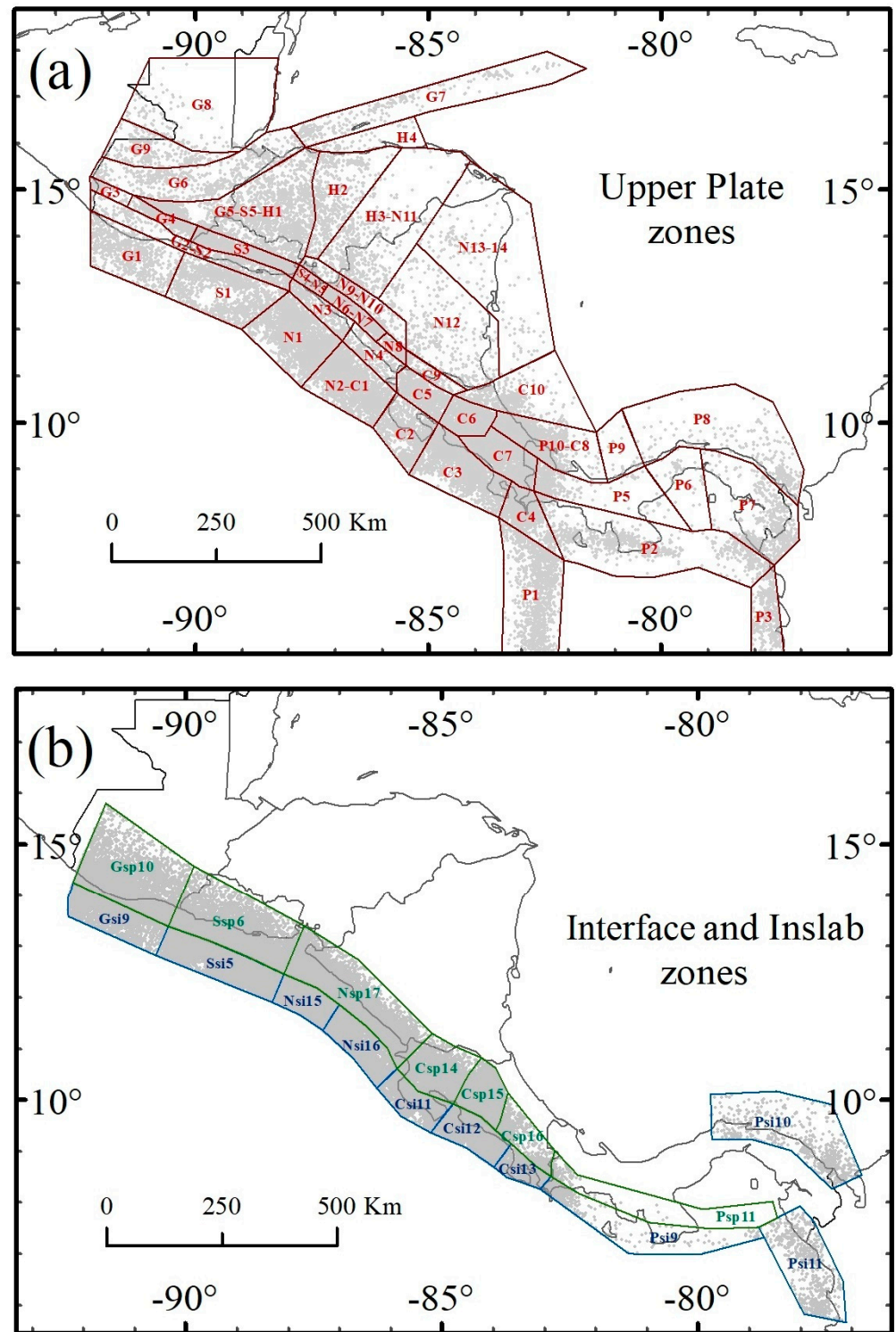


Figure 3. Seismic zones for Central America proposed by Alvarado et al. (2017) [12] for the (a) upper plate zones (red color), (b) interface zones (blue color), and inslab zones (green color). Gray dots represent the spatial distribution of seismicity within each seismic zone.

3.3. Ground Motion Models (GMMs)

Ground Motion Models (GMMs) significantly influence the acceleration outcomes in seismic hazard calculations. Therefore, it is preferable to develop GMMs specific to the study area. However, until a suitable model for CA is developed and calibrated, we need to identify the most suitable GMMs among those published in the specialized literature.

The most effective way to analyze and identify the most suitable GMMs for a given region is by conducting a residual analysis, measuring the difference between the predicted and observed acceleration values in the region. This approach aims to determine which GMM best characterizes the attenuation in the region [2]. In national-level seismic hazard studies for El Salvador and Costa Rica, several GMMs have already been identified as those which best fit to the observed data [18,19]. These studies employed two approaches: the Log-likelihood (LLH) approach proposed by Scherbaum et al. (2009) [20], and the ranking approach based on Euclidean Distance (EDR) proposed by Kale and Akkar (2013) [21]. In this regard, we have taken the calibrated GMMs from these two national studies to be used in this regional study.

For the upper plate regime, we selected the GMMs of Kanno et al. (2006) [22], Atkinson and Boore (2011) [23], Akkar et al. (2014) [24], Boore et al. (2014) [25], and Cauzzi et al. (2015) [26]. In the interface regime, we selected the models proposed by Youngs et al. (1997) [27], Kanno et al. (2006) [22], Zhao et al. (2006) [28], and Abrahamson et al. (2016) [29]. Lastly, in the in-slab regime, the models proposed by Youngs et al. (1997) [27], Kanno et al. (2006) [22], Abrahamson et al. (2016) [29], and Montalva et al. (2017) [30] were selected.

3.4. Sensitivity Analysis of Methods, Models, and Input Parameters in the Seismic Hazard Results

A sensitivity analysis helps to control the variability that the results of seismic hazard calculations may exhibit due to the epistemic uncertainty of the models applied to define the input parameters or the aleatory errors [1,2]. These sensitivity analyses can be conducted using classical statistical methods, where the results allow a clearer understanding of the variability of the hazard results for different calculation options in a logical tree, thus showing the epistemic uncertainty [31–33].

We developed this sensitivity analysis through the evaluation of the coefficient of variation (CV), which indicates the degree of variability in the hazard results and is defined as follows:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (1)$$

where σ is the standard deviation of the set of results being analyzed and \bar{x} the mean value of those results. Some authors suggest that for low CV values (<0.15), data dispersion is considered insignificant, resulting in a homogeneous behavior of the calculation options or models handled. In contrast, higher CV values (≥ 0.15), represent a notable dispersion of the results depending on the options followed and are therefore not very robust results in the areas where these high CV values are present [32,34].

The sensitivity analysis was focused on evaluating the impact on the results of the following inputs and methods integrated into the seismic hazard calculations: (1) declustering methods, (2) methods for fitting the recurrence models (*b-value* and *a-value*), (3) scaling relationships for estimating M_{max} , and (4) application of different GMMs.

3.4.1. Declustering Method

Time-independent seismic hazard analysis based on Poissonian models assumes that earthquake occurrence within a given time period and a certain zone is random. To apply these models, the earthquake catalog must contain independent seismic events over time and space, requiring the removal of those considered *dependent seismicity* (e.g., aftershocks, foreshocks, and swarms) through declustering methods.

The declustering of the earthquake catalog, depending on the method used, will result in variations in the calculations of seismic source parameters [35–37]. In this paper, we used two declustering methods for this analysis: (1) the Reasenber (1985) [38] declustering method (RSB), which employs an algorithm to group seismic events in an interaction zone, analyzing events considered aftershocks based on their spatiotemporal location; and (2) the

spatiotemporal window-based method by Gardner and Knopoff (1974) [39] and modified by Uhrhammer (1986) [40] (UHR), identifying distance and time windows according to the magnitude of the main event to remove aftershocks. These two declustering methods were selected because they are the most widely used in the Central American region for seismic hazard studies [3,18,41–43].

The RSB method was applied using the ZMAP program developed by Wiemer (2001) [44], while the UHR algorithm was executed using the Hazard Model Toolkit [45] included in the OpenQuake program developed by the Global Earthquake Model Foundation (GEM) [46,47]. The sensitivity analysis of these two declustering methods in the hazard results was performed in conjunction with the method for fitting the recurrence model explained in the following section.

3.4.2. Estimation of Recurrence Parameters

The recurrence model used in the seismic sources was based on the recurrence model proposed by Gutenberg and Richter (1944) [48]. We used two fitting methods in the recurrence models, (1) least squares (bLS) and (2) maximum likelihood (bML), proposed by Aki (1965) [49], along with the completeness analysis defined by Weichert (1980) [50].

We then calculated the coefficient of variation (CV) to understand the spatial variability in the hazard results for the upper plate, interface, and inslab regimes using different combinations of the declustering–fitting methods: (1) RSB-bLS, (2) RSB-bML, (3) UHR-bLS, and (4) UHR-bML. Figure 4 shows the CV map in the analyzed tectonic regimes.

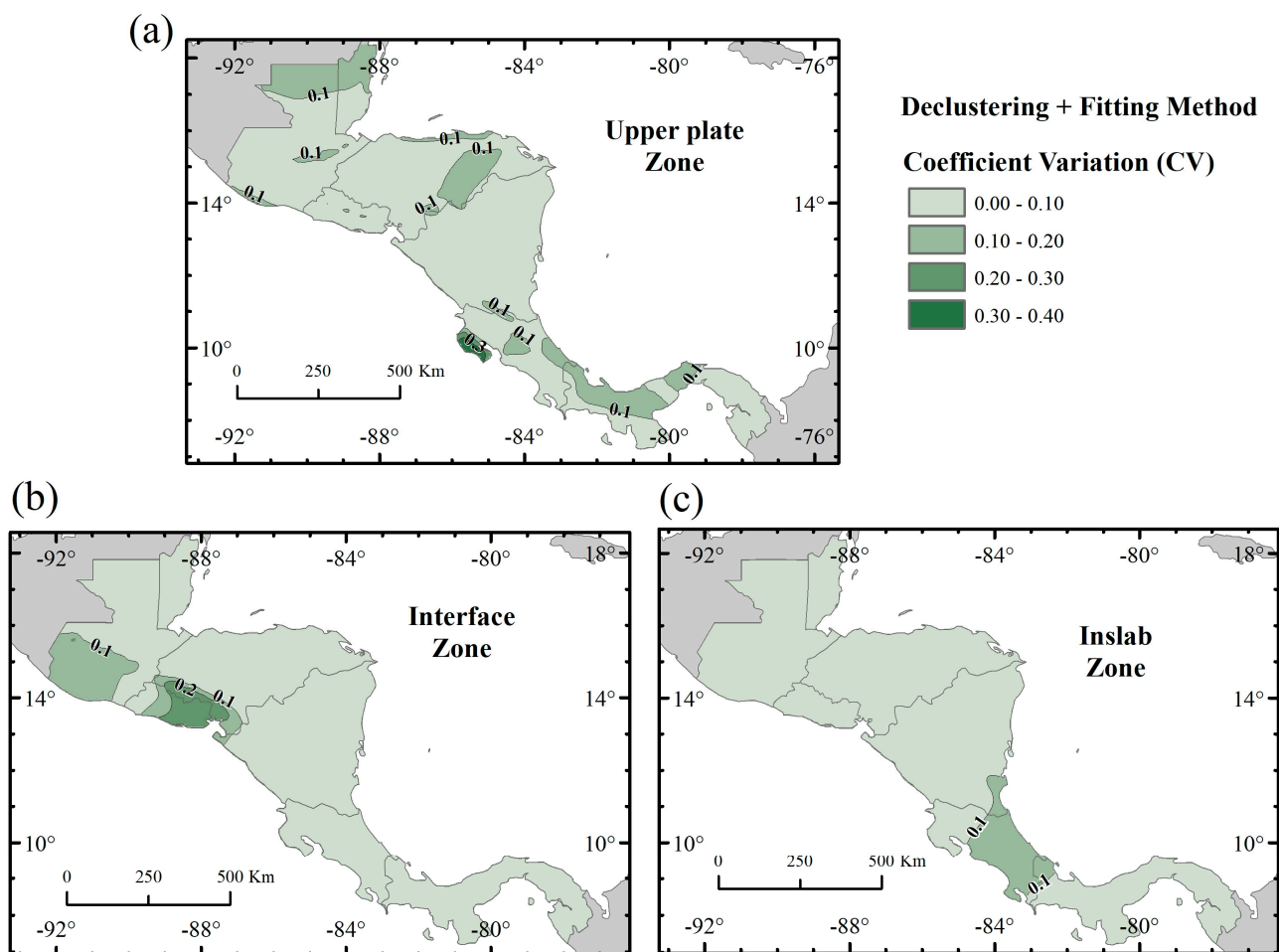


Figure 4. Variability related to recurrence parameters and declustering method for the (a) upper plate zone, (b) interface zone, and (c) inslab zone.

In most of the seismic zones of the upper plate, interface, and inslab regimes, the variability was very low ($CV \leq 0.10$) (Figure 4). However, there were some zones with greater variation in acceleration ($CV > 0.10$), e.g., in the upper plate regime of the Backarc zone of north Guatemala (G8) and Honduras (H4; H3-N11), the Forearc zone of Costa Rica (C2), and the volcanic arc zones of Panama (P5; P6) (Figure 4a). In the case of the interface regime, this was found in the zones of Guatemala (Gsi9), El Salvador (Ssi5), and the Gulf of Fonseca (Nsi15) (Figure 4b). Finally, the inslab regime showed a high CV in the transition region of the Costa Rica and Panama subduction (Csp15, Csp16) (Figure 4c).

According to the results obtained, the low CV values ($CV < 0.10$) in most areas of Central America indicate a consistency in the accelerations calculated under the different combinations of the declustering and fitting methods for the recurrence parameters. This indicates the stability of the accelerations predicted by the different combinations. This implies that the earthquake recurrence rate in these areas is relatively stable and predictable, regardless of the declustering method and fitting method used.

For areas with a relatively high coefficient of variation ($CV > 0.10$), various factors may contribute, depending on the seismotectonic context of each zone. For instance, the Backarc zones of Guatemala (G8) and Honduras (H4; H3-N11) are characterized by low seismic activity, with a predominance of earthquakes of magnitudes $M_w \leq 5.5$. When data are applied using declustering methods, the latter can condition the recorded seismic activity in these low magnitudes, affecting the calculation of the recurrence parameters. Additionally, the lack of records of these low-magnitude earthquakes in the earthquake catalog can significantly impact the *b-value* fitting method.

A similar situation occurs in the Forearc zone of Costa Rica (C2) and the interface zone of El Salvador (Ssi5). Despite their high activity due to their location in the subduction zone, the declustering method tended to remove a significant proportion of their small events, leading to a reduction in the *b-value* in the processed catalog [35,37]. This reduction pattern in the *b-value* introduced a deviation in the recurrence rate, resulting in variability in the calculated accelerations, and, ultimately, increasing the CV for these zones.

For zones like Panama's volcanic arc (P5; P6) and the interface zones of Guatemala (Gsi9) and the Gulf of Fonseca (Nsi15), their high variability was mainly due to their lack of records for low-magnitude earthquakes. Even when the best completeness magnitude (M_c) was selected for the *b-value* fitting method, the lack of small earthquake records could affect the maximum likelihood fitting method, complicating the weighting of these magnitudes and resulting in discrepancies with the least squares method. This impacted the acceleration calculations for these zones.

In the inslab zones of the transition zone between Costa Rica and Panama (Csp15, Csp16), tectonic complexity and the depth at which these earthquakes occurred affected the consistency of the recurrence parameters. Capturing a comprehensive record of all earthquakes in such deep zones is difficult. Additionally, some researchers suggest that declustering methods do not always adequately represent event rates in inslab or deep zones, resulting in models with high variability in seismic acceleration prediction [35,36].

3.4.3. Scaling Relationships for Estimation of M_{max}

The maximum possible magnitude (M_{max}) calculated from the fault plane geometry, representing in the zone-type source, is conditioned by the scaling relationship applied and the tectonic regime under analysis [51].

An analysis was recently conducted in Central America. Arroyo-Solórzano et al. (2024) [52] defined the scaling relationships for shallow earthquakes of the upper plate in CA based on data from 56 earthquakes. Additionally, they conducted a residual analysis to identify other scaling relationships that fit the observed data and defined a logic tree

to establish the M_{max} from different rupture parameters, such as surface rupture length (LRSup), subsurface rupture length (LRSub), width (W), and area (A).

For this study, we focused on scaling relationships using the rupture area (A). For the upper plate regime, we followed the logic tree proposal by Arroyo-Solórzano et al. (2024) [52] and compared the M_{max} values given by the scaling relationships from their study with those of Thingbaijam et al. (2017) [53] and Papazachos et al. (2004) [54]. For the interface regime, we compared the results with the relationships proposed by Wells and Coppersmith (1994) [55], Strasser et al. (2010) [56], Allen and Hayes (2017) [57], and Thingbaijam et al. (2017) [53]. Finally, for the inslab regime, we compared only those proposed by Strasser et al. (2010) [56] and Allen and Hayes (2017) [57]. The comparison among the hazard results using different scaling relationships for each tectonic regime was conducted using the coefficient of variation (CV) to assess their spatial variability and whether the application of these relationships significantly affects the accelerations generated across the territory of CA. Figure 5 shows the CV maps for each tectonic regime.

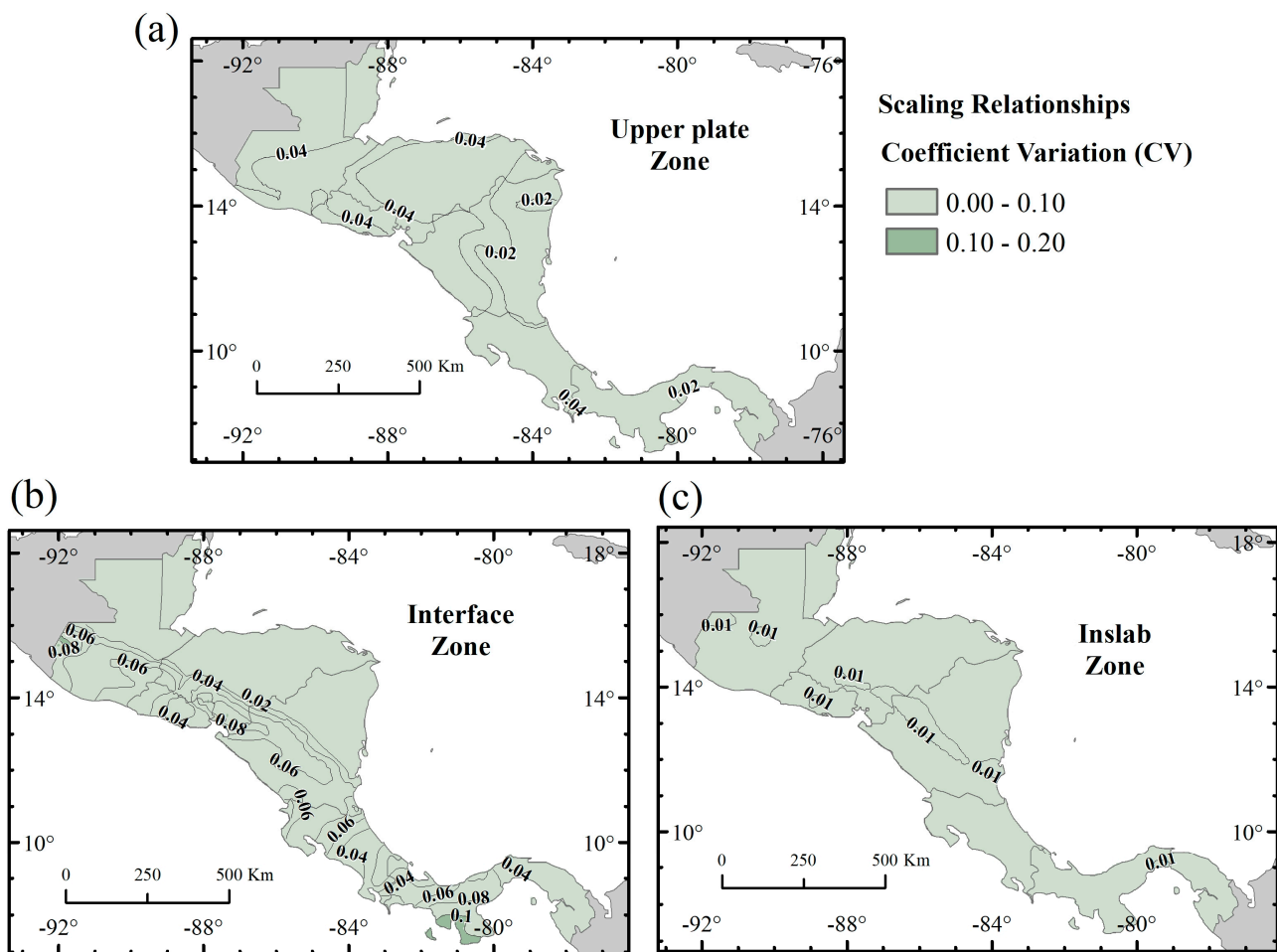


Figure 5. Variability related to scaling relationships for the (a) upper plate zone, (b) interface zone, and (c) inslab zone.

The scaling relationships analyzed in the upper plate regime show no significant variability affecting the seismic hazard calculations because the CV does not exceed 5% (Figure 5a). The interface regime exhibits the greatest data variability, notably in the west of Guatemala and the southern region of the Panama (Azüero Peninsula), with a CV value of up to 10% (Figure 5b). Finally, in the inslab regime, there is no apparent variability according to the spatial distribution of the CV as it does not exceed 1% (Figure 5c).

In general, for the upper plate and in-slab regimes, the selected scaling relationships were more consistent and suitable for the analyzed tectonic contexts, which reduced the variability in the M_{max} estimations. For example, the relationships developed by Arroyo-Solórzano et al. (2024) [52] focused on regional data from Central America, which minimized variability compared to global relationships such as those proposed by Papazachos (2004) [54] and Thingbajam et al. (2017) [53]. For the in-slab regime, the scaling relationships of Allen and Hayes (2017) [57] and Strasser (2010) [56] were specifically designed for subduction seismic events, capturing the characteristics of the deep ruptures typical of subduction earthquakes.

For the interface regime, notable variations can be observed, probably due to the inclusion of multiple scaling relationships that were calibrated with different data and that focus on distinct aspects. The Wells and Coppersmith (1994) [55] relationships are based primarily on data from continental faults, and while they are widely used, they may not fully represent the behavior of subduction zones. Strasser et al. (2010) [56] and Allen and Hayes (2017) [57] focus on subduction earthquakes and are better suited for the interface regime, especially in the Central American region. However, Thingbajam (2017) [53] provides a global scaling relationship that covers a wide variety of tectonic regimes, such as continental faults and subduction zones, meaning their scaling relationship is fitted to global averages as in Wells and Coppersmith (1994) [55].

3.4.4. Ground Motion Models (GMMs)

The selected GMMs were compared using the coefficient of variation (CV). Figure 6 shows the CV maps for the results obtained with the GMMs considered for each tectonic regime.

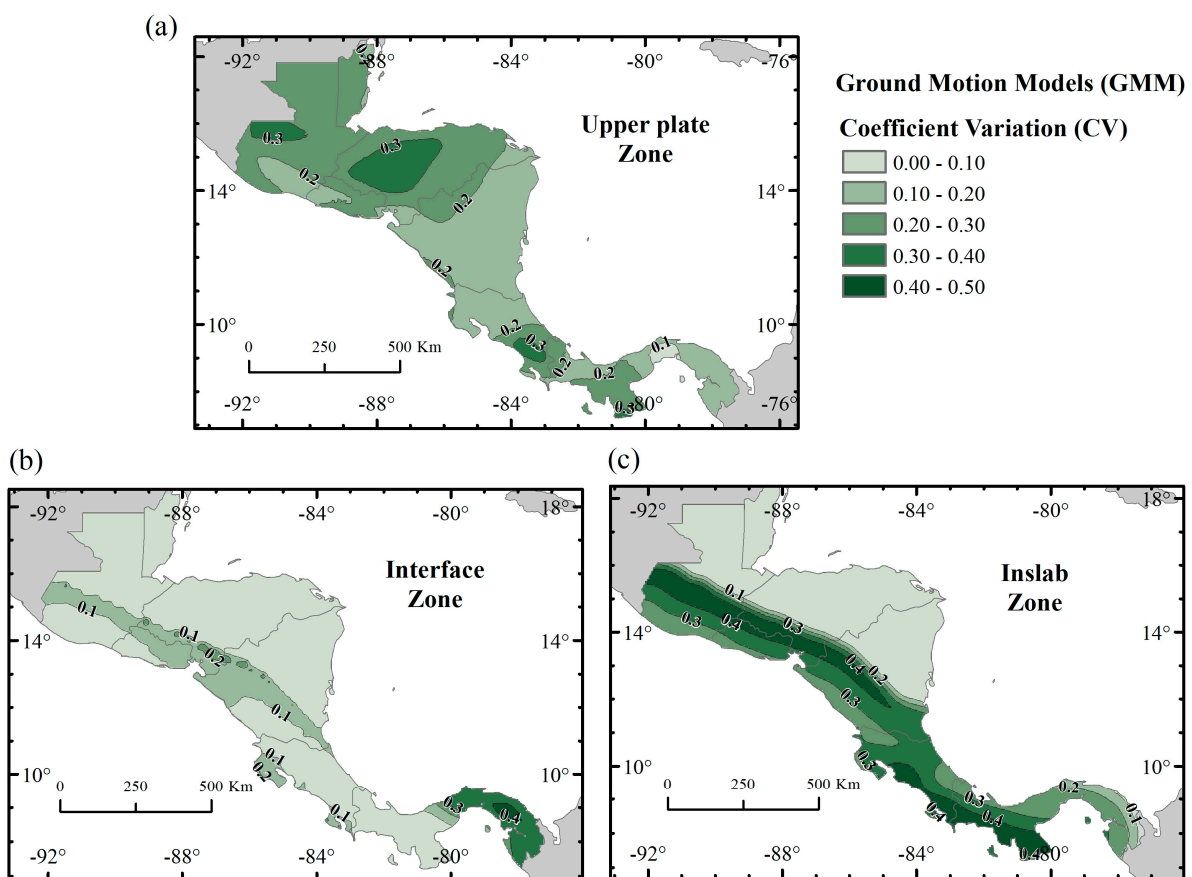


Figure 6. Variability related to GMMs for the (a) upper plate zone, (b) interface zone and (c) in-slab zone.

Due to the fact that the GMMs present the greatest variability (Figure 6), we conducted an analysis complementary to the CV, which consisted of studying the variations in accelerations predicted by different GMMs along certain profiles drawn in the CA region. Figure 7 shows the profiles for the upper plate zones and Figure 8 shows the profiles for the interface and inslab zones.

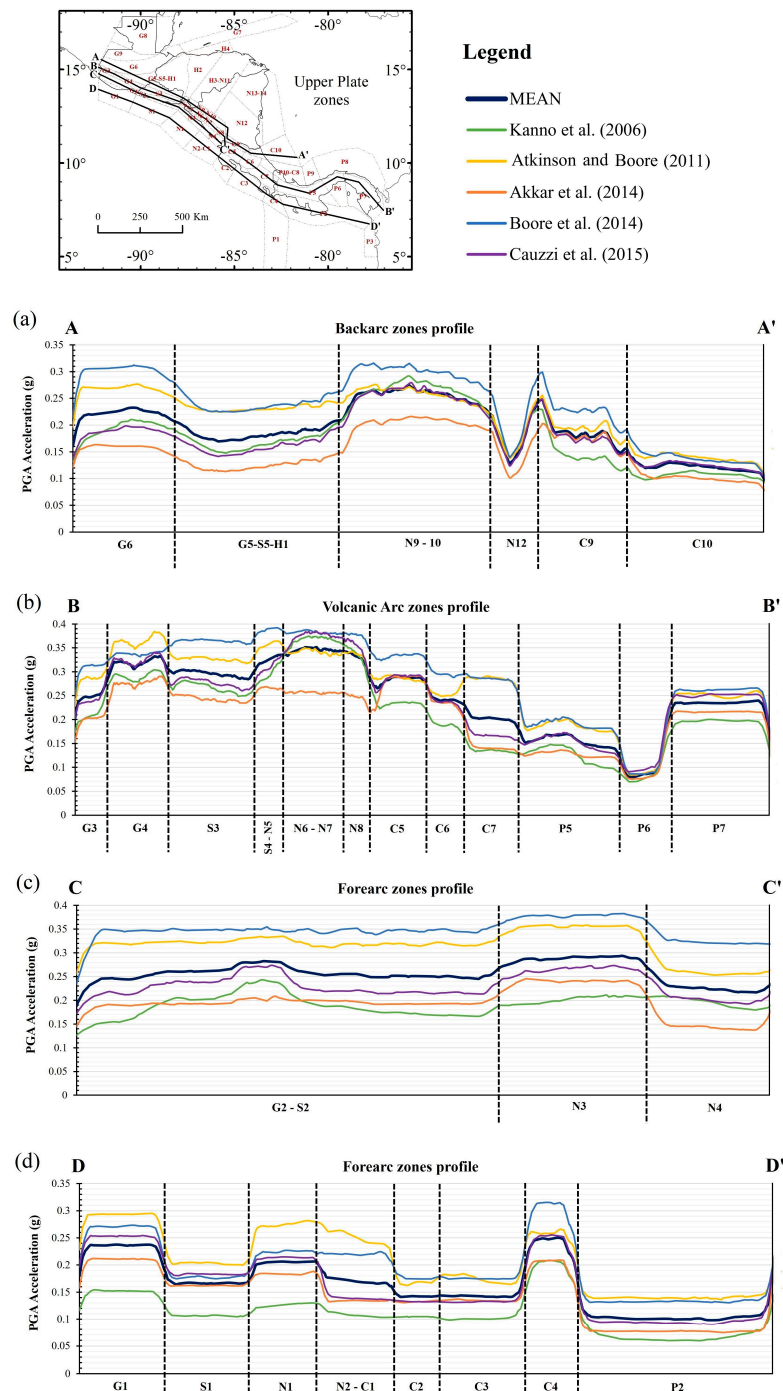


Figure 7. PGA values provided by different GMMs along the profiles drawn for the upper plate zones in (a) Backarc, (b) volcanic arc, (c) middle Forearc, and (d) ocean Forearc zones as proposed by Alvarado et al. (2017) [12]. The nomenclature corresponds to the zones represented in Figure 3 and the vertical dashed lines represent the limits of each seismic zone. The GMMs used in this analysis were Kanno et al. (2006) [22], Atkinson and Boore (2011) [23], Akkar et al. (2014) [24], Boore et al. (2014) [25], and Cauzzi et al. (2015) [26].

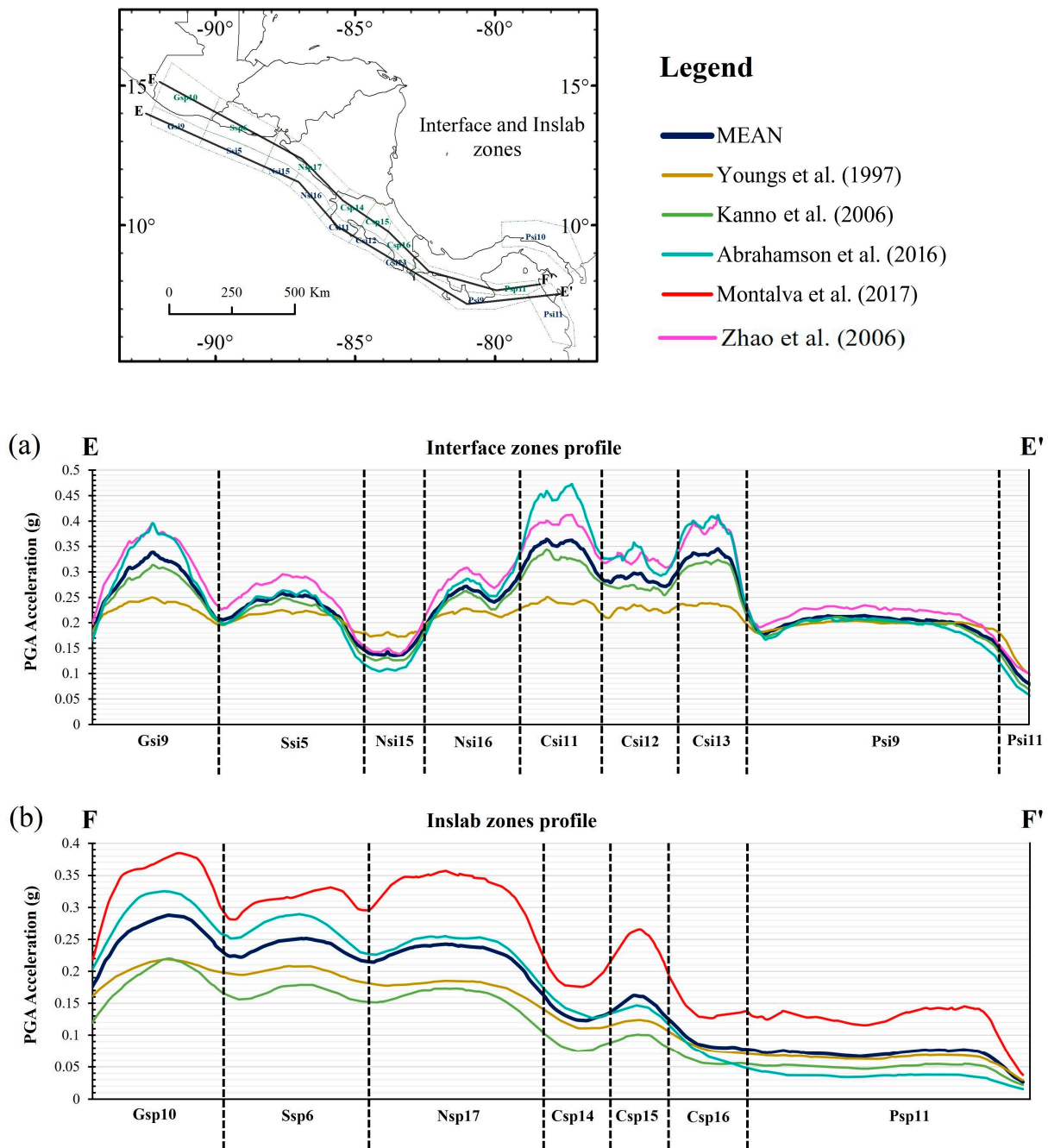


Figure 8. PGA values provided by different GMMs along the profiles drawn for subduction zones in the (a) interface zones and (b) inslab zones as proposed by Alvarado et al. (2017) [12]. The nomenclature corresponds to the zones represented in Figure 3 and the vertical dashed lines represent the limits of each seismic zone. The GMMs used in this analysis were Youngs et al. (1997) [27], Kanno et al. (2006) [22], Zhao et al. (2006) [28], Abrahamson et al. (2016) [29], and Montalva et al. (2017) [30].

In the upper plate regime, high CV values ($CV > 0.30$) are observed in certain Backarc zones of Guatemala and Honduras (G6; G5-S5-H1), the volcanic arc of Costa Rica (C7), and the Forearc of Panama (P2) (Figure 6a). This dispersion is also evident in the Backarc zone profile, where in the cases of zones G6 and G5-S5-H1, the models by Atkinson and Boore (2011) [23] and Boore et al. (2014) [25] tend to estimate high accelerations compared to the mean, while the model by Akkar et al. (2014) [24] tends to slightly underestimate them (Figure 7a). For the remaining Backarc zones (N9-10; N12; C9; C10), the GMMs tend to align more closely with the mean, progressively reducing variability to within the range of

0.10–0.20 CV (Figure 6a). Notably, the model by Cauzzi et al. (2015) [26] is that which best aligns with the mean, proving stable for the Backarc zones, followed by the Kanno et al. (2006) [22] model, which slightly underestimates accelerations in some zones (Figure 7a).

For the volcanic arc, the contrast between the profiles and the CV map is notable in zones such as G3, G4, S3, N6-7, C5, and particularly C7, where the acceleration behavior in these volcanic seismic zones tends to produce high dispersion values (Figures 6a and 7b). The models by Boore et al. (2014) [25] and Atkinson and Boore (2011) [23] tend to overestimate accelerations in these zones, particularly in G3, S3, and C7. Conversely, the model by Cauzzi et al. (2015) [26] aligns better with the average accelerations in most of these zones (Figure 7b). Meanwhile, the models by Kanno et al. (2006) [22] and Akkar et al. (2014) [24] slightly underestimate accelerations, though Akkar et al. (2014) [24] generally stabilizes more effectively across most seismic zones (Figure 7b).

For the Forearc zones, particularly those near the Pacific coast, all GMMs show evident dispersion (Figure 7c). This variability is reflected in the map, with CV values around 0.2–0.3 along the coasts of Guatemala, El Salvador, and Nicaragua (Figure 6a). However, in the Forearc zones associated with the Mid-American Trench (MAT), the models by Cauzzi et al. (2015) [26] and Akkar et al. (2014) [24] tend to align more closely with the mean, making these models suitable for these Forearc zones (Figure 7d). In contrast, the models by Boore et al. (2014) [25] and Atkinson and Boore (2011) [23] tend towards slight overestimation in zones such as G1, N1, N2-C1, C4, and P2 (Figure 7d).

In the interface regime, most of the region exhibits relatively low variations (CV < 0.20) (Figure 6b). This aligns with the acceleration profile, where most GMMs fit well with the data mean (Figure 8a). However, zones like Csi11, Csi12, and Csi13 show high dispersion, possibly due to the complexity in the subduction geometry for these areas where the slab is a flat plate with shorter emplacement depths (Figure 8a) [13,19]. The overall behavior of the GMMs of Youngs et al. (1997) [27] and Kanno et al. (2006) [22] tends towards underestimation for the abovementioned zones as these are conservative models, although they stabilize with the models by Abrahamson et al. (2016) [29] and Zhao et al. (2006) [28], which slightly overestimate the accelerations for these interface zones of Costa Rica (Figure 8a).

Finally, the inslab regime presents the highest variations across most of the region due to its deep subduction geometry (Figure 6c). On the one hand, the model by Montalva et al. (2017) [30] shows significant overestimation across all seismic zones, attributed to its calibration for the deep subduction in Chile. On the other hand, the model by Abrahamson et al. (2016) [29] offers a more balanced fit, capturing variations without excessive accelerations and aligning better with the mean in various inslab zones (Figure 8b). The models by Youngs et al. (2017) [27] and Kanno et al. (2006) [22] present slightly low accelerations in deeper subduction zones (Gsp10; Ssp6; Nsp17) (Figure 8b). For a more detailed analysis of the accelerations produced by each of the GMM analyzed, refer to the Supplementary Materials that accompany this article.

3.5. Logic Tree Proposal

We propose a logic tree composed of four nodes related to the methods for defining the aforementioned input parameters: declustering, fitting methods, scaling relationships, and GMMs. At each node, we consider different branches, and the weight for each one is derived from the sensitivity analysis conducted.

As discussed in the previous section, regardless of the declustering method or the *b-value* fitting method, these do not strongly influence the predicted acceleration calculations for Central America. Specific exceptions exist in certain seismic zones where the

declustering and fitting methods are influenced by the completeness of the earthquake catalog derived from the detection level of the corresponding seismic networks [16].

To assign weights to these methods in the logic tree, the approach developed by Gurjar and Basu (2022) [2] is proposed. Following this approach, we estimated the predicted seismic rates [$\dot{N}(m)_{\text{pred}}$] using the maximum likelihood (bML) and least squares (bLS) fitting method. Finally, we calculated the mean squared error (MSE) and the root mean squared error (RMSE) of the observed and predicted data starting from the completeness magnitude (M_c).

Gurjar and Basu (2022) [2] established that the weights for the logic tree are inversely proportional to the mean squared error (MSE) of all analyzed seismic zones. To achieve this, the MSEs of all seismic zones were plotted according to the declustering method and the fitting method used in the recurrence models. Subsequently, the errors were fitted to a line from the origin, and finally, the equations by Gurjar and Basu (2022) [2] were applied to assign the weights in the logic tree. For more details, refer to the Supplementary Materials that accompany this article.

Regarding the scaling relationships, for the upper plate regime, we used the weights proposed by Arroyo-Solórzano et al. (2024) [52]. For the interface regime, a higher weight was assigned to the models by Strasser et al. (2010) [56] and Allen and Hayes (2017) [57], as they were specifically calibrated for this tectonic regime and based on Central American data, followed by a smaller weight for the model by Thingbaijam et al. (2017) [53]. Finally, for the in-slab regime, equal weight was assigned to both models since the variability was insignificant and less than 1% (Figure 5c).

The structure of the proposed logic tree for GMMs was based on the combined analysis of the profiles and CV maps for each tectonic regime. In the upper plate regime, Cauzzi et al. (2015) [26] was selected as the primary model with a higher weight because it achieves a balanced fit across nearly all seismic zones in the Backarc, volcanic arc, and Forearc, aligning well with the mean in zones of both high and low acceleration. Boore et al. (2014) [25] and Akkar et al. (2014) [24] each received the same weight and were selected because they could also provide a balanced fit for some seismic zones, avoiding overestimation or underestimation of the accelerations. Kanno et al. (2006) [22] was not included in the logic tree for the upper plate due to its tendency to underestimate in volcanic zones and its lack of fit with the attenuation conditions in most seismic zones of the upper plate regime. Similarly, Atkinson and Boore (2011) [23] model was excluded due to its tendency to overestimate accelerations in most upper plate zones.

In the interface regime, equal weight was assigned to Kanno et al. (2006) [22], Zhao et al. (2006) [28], Abrahamson et al. (2016) [29], and Youngs et al. (1997) [27]. This balanced choice reflects the significant dispersion observed in the CV and the need to integrate moderate and conservative models.

In the in-slab regime, Abrahamson et al. (2016) [29] received a higher weight due to its ability to capture variability in deep subduction conditions without the overestimations observed in other models. The model by Kanno et al. (2006) [22] also received significant weight, acting as a conservative model useful for representing zones with lower acceleration. Finally, the model by Youngs et al. (1997) [27], with a lower weight, complemented the logic tree by providing an additional perspective in areas where attenuation was more pronounced, which is essential to fully capture the variability of the in-slab zones. Montalva et al. (2017) [30] model was excluded due to its tendency to overestimate the accelerations in all in-slab zones. Figure 9 shows the proposed logic tree based on this analysis.

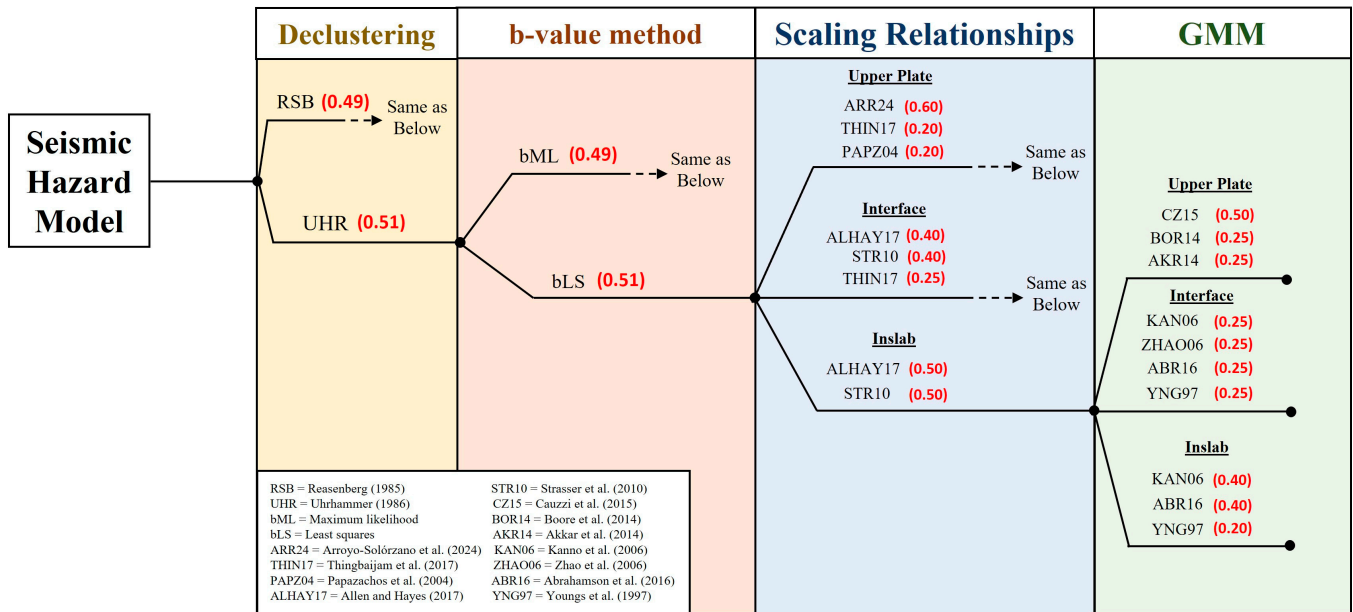


Figure 9. Logic tree proposed for seismic hazard assessments in Central America. RSB—Reasenber (1985) [38], UHR—Uhrhammer (1986) [40], bML—maximum likelihood fitting method, bLS—least squares fitting method, ARR24—Arroyo-Solórzano et al. (2024) [52], THIN17—Thingbaijam et al. (2017) [53], PAPZ04—Papazachos et al. (2004) [54], STR10—Strasser et al. (2010) [56], ALHAY17—Allen and Hayes (2017) [57], CZ15—Cauzzi et al. (2015) [26], BOR14—Boore et al. (2014) [25], AKR14—Akkar et al. (2014) [24], KAN06—Kanno et al. (2006) [22], ZHAO06—Zhao et al. (2006) [28], ABR16—Abrahamson et al. (2016) [29], YNG97—Youngs et al. (1997) [27].

4. Results

Based on the proposed logic tree, a seismic hazard map for Central America was generated in the form of a spectral ordinate of PGA for return periods of 475 years. For this purpose, we used the OpenQuake program from the Global Earthquake Model (GEM) to conduct seismic hazard calculations [46,47]. The hazard map is shown in Figure 10.

The seismic hazard map for Central America uniformly distributes accelerations across the involved countries, eliminating boundary conditions between them. In general terms, moderate to high accelerations can be observed along the Central American volcanic arc, where the highest accelerations in seismic zones are found in Guatemala (G4), Nicaragua (N6-7), and Costa Rica (C6; C7), with ranges between 0.6 g and 0.7 g (Figure 10). Additionally, the Central Costa Rica Deformed Belt (CCRDB) (P10-C8) shows relatively high accelerations (0.5 g–0.6 g) due to an increased rate of seismic activity recorded in the regional earthquake catalog, which highlights this area (Figure 10).

Furthermore, implementing the seismic zonation by Alvarado et al. (2017) [12] improved the adjustment of the depths in the interface and inslab seismic zones, resulting in a more realistic representation of the accelerations induced by the dip angle variations along the Mid-American Trench (MAT). This adjustment produced higher accelerations along the coasts of Guatemala, El Salvador, Nicaragua, and Costa Rica, where values reached between 0.6 g and 0.9 g (Figure 10). Additionally, this zonation refined the geometry of the South Panama Deformed Belt (SPDB), leading to more realistic acceleration values in the Azuero Peninsula, reaching up to 0.5 g (Figure 10).

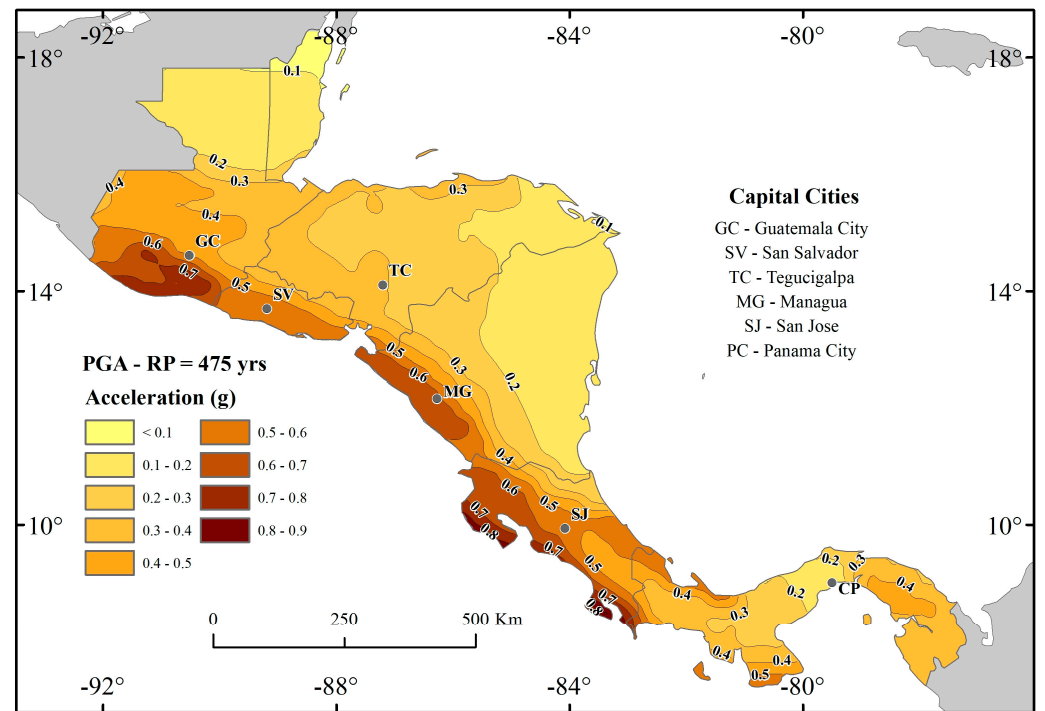


Figure 10. Seismic hazard map for Central America for PGA and return period of 475 years on rock conditions ($V_{S30} = 760$ m/s).

5. Discussion and Conclusions

A sensitivity analysis of the parameters and methods interacting in seismic hazard calculations provided better control of epistemic uncertainties, selecting the optimal parameters and methods for the tectonic characteristics of Central America. This sensitivity analysis focused on evaluating the impact on the results of the following inputs and methods integrated into seismic hazard calculations in classical zoned methods: (1) declustering methods for identifying fore and aftershocks, (2) methods for fitting the recurrence models (*b-value* and *a-value*), (3) scaling relationships for estimating M_{max} , and (4) the application of different ground motion models (GMMs).

Two statistical approaches were used for the sensitivity analysis. The first consists of calculating the coefficient of variation (CV) of the results, achieved through different calculation options, which indicates the degree of variability in the hazard results depending on the analyzed input data and models. The coefficient of variation (CV) is a particularly useful statistical parameter when identifying specific areas where significant variability may impact the final seismic hazard assessment, allowing researchers to identify causes for these variations and ways to manage them to reduce epistemic uncertainties.

The second approach is based on statistical methods that determine the mean squared error (MSE) and root mean squared error (RMSE) of the observed and predicted data. Metrics like the MSE and RMSE are useful for selecting the most appropriate predictive model that fits the observed data, aiding in the more precise assignment of weights within the logic tree [2].

These approaches were carried out to evaluate the impact of parameters and models in the successive phases of hazard calculation using classical zoned methods, which consider the seismicity randomly distributed within each seismic zone. In a first step, these methods require the aftershocks and premonitors to be identified and eliminated, thus considering only main events, for which this hypothesis of randomness can be assumed. For this purpose, two methods were used: (1) the Reasenberg (1985) [38] declustering method (RSB) and (2) Uhrhammer (1986) [40] declustering (UHR). In a second step, a recurrence model

for the seismicity of each seismic source must be estimated. We adopted the recurrence model proposed by Gutenberg and Richter (1944) [48] and we used two methods to fit the model: (1) least squares (bLS) and (2) maximum likelihood (bML).

A joint sensitivity analysis was performed for the four combinations of the declustering–fitting methods: (1) RSB-bLS, (2) RSB-bML, (3) UHR-bLS, and (4) UHR-bML. According to the results obtained, the low CV value ($CV < 0.10$) in most areas of Central America indicates the low impact of these methods on the hazard results. On the contrary, high consistency was found in the accelerations calculated under the different combinations of declustering and fitting methods for the recurrence model. This indicates the stability of the accelerations predicted by the different combinations regardless of the method used in this calculation phase.

The third aspect analyzed was the impact of the scaling relationships to obtain the M_{max} of the zones in the final hazard results. In this case, the CV values did not exceed 5% in the upper plate regime, showing that there is no significant variability in the hazard results depending on the scaling relationship used, or ultimately on the M_{max} corresponding to each zone. The interface regime exhibited the greatest data variability, notably in the west of Guatemala and the southern region of Panama (Azucero Peninsula), with a CV value of up to 10%. Finally, in the inslab regime, there was no apparent variability according to the spatial distribution of the CV, as it did not exceed 1%. This may be due to the fact that the available relationships included in this analysis were more suitable to upper plate and inslab contexts than to the interface regimes. In any case, it can be concluded from the analysis that these scaling relationships have a low impact on the hazard results.

The final issue addressed in the sensitivity analysis was the impact of GMMs. These models had the greatest impact on the hazard results among all the variables analyzed. In the upper plate regime, high CV values ($CV > 0.30$) were observed in certain Backarc zones of Guatemala and Honduras, the volcanic arc of Costa Rica, and the Forearc of Panama. This dispersion was also evident in some Backarc zones, while in others the variability was reduced with a lower dispersion between the results given by the different models, with CV values in the range of 0.10–0.20.

For the Forearc zones, particularly those near the Pacific coast, all GMMs showed evident dispersion. This variability is reflected in the map, with CV values around 0.2–0.3 along the coasts of Guatemala, El Salvador, and Nicaragua. However, in the Forearc zones associated with the Mid-American Trench (MAT), the models by Cauzzi et al. (2015) [26] and Akkar et al. (2014) [24] tended to align more closely with the mean, making these models more suitable for these Forearc zones. In contrast, the models by Boore et al. (2014) [25] and Atkinson and Boore (2011) [23] tended to slightly overestimate.

In the interface regime, most of the region exhibited relatively low variations ($CV < 0.20$). Most GMMs fit well with the data mean. However, the zones of Costa Rica showed high dispersion, possibly due to the complexity in the subduction geometry for these areas where the slab is a flat plate with shorter emplacement depths.

Finally, the inslab regime presented the highest variations across most of the region due to its deep subduction geometry. On the one hand, the model by Montalva et al. (2017) [30] showed significant overestimation across all seismic zones, which can be attributed to its calibration for the deep subduction in Chile. On the other hand, the model by Abrahamson et al. (2016) [29] offered a more balanced fit, aligning better with the mean in various inslab zones.

The sensitivity analysis concluded with the proposal for a logic tree composed of four nodes related to the methods for defining the input parameters: declustering methods, methods for fitting of the Gutenberg–Richter model, scaling relationships, and GMMs. At each node, we considered different branches, and the weight for each one was derived

from the sensitivity analysis carried out, particularly taking into account the CV values, the mean squared error (MSE), and the root mean squared error (RMSE) of the observed and predicted data.

Using this logic tree, a new regional hazard calculation for CA was performed, and a map was generated to update the one published in 2012 in the frame of the RESIS II project [3]. The main novelties included in this new map are the implementation of the seismic zonation by Alvarado et al. (2017) [12], the update of the regional earthquake catalog with data from local agencies up to 2020 [16], the implementation of scaling relationships specific to Central America [52], and the control of epistemic uncertainties through a logic tree proposal derived from a sensitivity analysis of the model parameters in the hazard results.

When comparing the seismic hazard map from the RESIS II project [3] with the one generated in this study through a map representing the ratio of accelerations between this study and that of RESIS II, we can identify specific areas where accelerations have increased or decreased (Figure 11). Overall, there is a general increase of 10% to 50% in accelerations compared to the RESIS II map. This increase is largely attributable to the expanded records in the regional earthquake catalog, improvements in recurrence models, and the use of seismic zonation by Alvarado et al. (2017) [12]. Otherwise, some areas remain stable across both seismic hazard maps, showing that the results are robust in these areas and are hardly affected by the variations included in this new study (Figure 11).

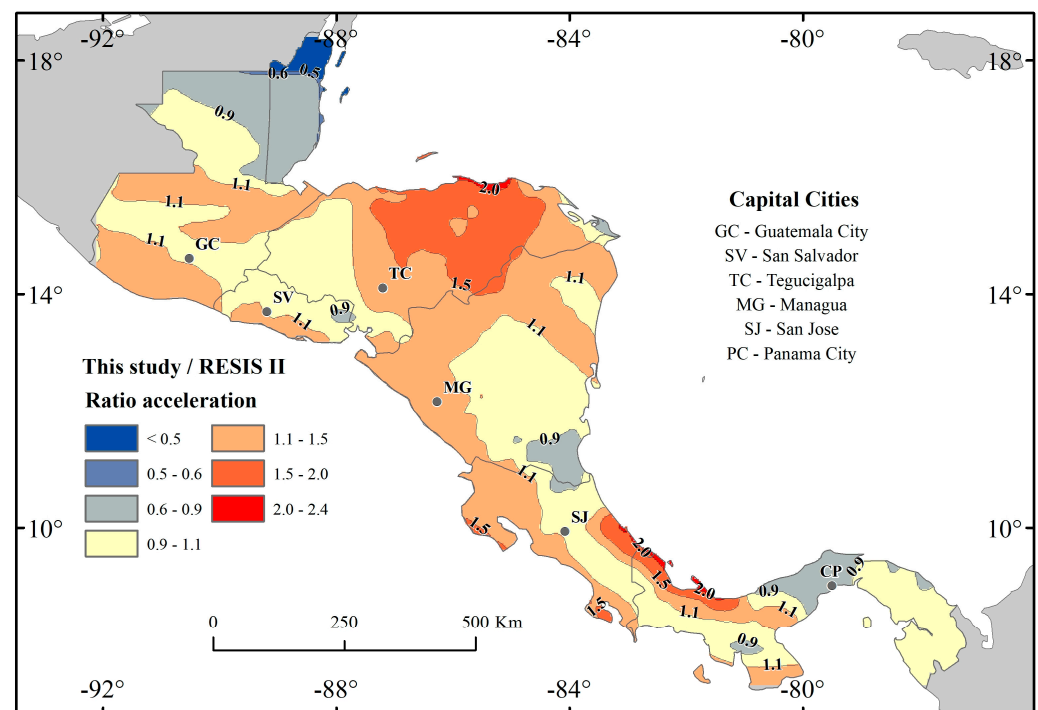


Figure 11. Map showing the ratio of acceleration in this study and the RESIS II project [3].

Additionally, areas of interest can be observed where the increase in acceleration values exceeds 50% compared to those reflected in the previous RESIS II map, particularly in northern Honduras and the Northern Costa Rica Deformed Belt (CCRDB). This increase is attributed to the improved capture of seismic events in these areas, where these events have been incorporated into the updated regional earthquake catalog, significantly enhancing the parameters of the seismic source [16]. Likewise, small areas with a reduction in accelerations of up to almost 30% can be appreciated, especially in northern Guatemala and central Panama. This reduction is mainly due to the seismic zonation by Alvarado et al.

(2017) [12], where modifications and improvements in the definition of seismic zones are more closely aligned with the tectonic behavior occurring in these areas.

In conclusion, this sensitivity analysis conducted on the parameters and methods involved in seismic hazard calculations has provided improved control over epistemic uncertainties, leading to a logic tree proposal based on the results of the analysis, both with regard to CV values as well as other statistical parameters, such as the MSE and RMSE.

This rigorous analysis has led to a seismic hazard map that can be considered an update to the RESIS II hazard map [3], since it enhances the representation of accelerations in the region by incorporating new seismic information from the latest studies for Central America. This includes the seismic zonation by Alvarado et al. (2017) [12] and the scaling relationships for the upper plate regime by Arroyo-Solórzano et al. (2024) [52], which are specific to this region.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/geosciences15010004/s1>.

Author Contributions: Conceptualization, C.G.-C. and B.B.; methodology, C.G.-C., M.A.-S., A.R.-M. and B.B.; software, C.G.-C.; validation, M.A.-S., A.R.-M. and B.B.; formal analysis, C.G.-C., A.R.-M., M.A.-S. and B.B.; writing—original draft preparation, C.G.-C.; writing—review and editing, M.A.-S., A.R.-M. and B.B.; supervision, A.R.-M. and B.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the KUK-APHÁN project (RTI2018-094827-B-C21/C22), the Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno de España, and MCIN/AEI/10.13039/501100011033, and, if applicable, by “FEDER A way to do Europe”.

Data Availability Statement: The original contributions presented in the study are included in the article/Supplementary Material; further inquiries can be directed to the corresponding author.

Acknowledgments: The authors would like to acknowledge all their colleagues involved in the KUK-AHPÁN project from Central America.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Ghods, B.; Rofooei, F.R. Addressing the Epistemic Uncertainty in Seismic Hazard Analysis as a Basis for Seismic Design by Emphasizing the Knowledge Aspects and Utilizing Imprecise Probabilities. *Bull. Earthq. Eng.* **2022**, *20*, 741–764. [CrossRef]
2. Gurjar, N.; Basu, D. Epistemic Uncertainty in PSHA and Seismic Hazard Characterization Using the Logic Tree Approach: Part I, Developing the Framework. *Pure Appl. Geophys.* **2022**, *179*, 3647–3676. [CrossRef]
3. Benito, M.B.; Lindholm, C.; Camacho, E.; Climent, A.; Marroquín, G.; Molina, E.; Rojas, W.; Escobar, J.J.; Talavera, E.; Alvarado, G.E.; et al. A New Evaluation of Seismic Hazard for the Central America Region. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **2012**, *102*, 504–523. [CrossRef]
4. Peirce, C.; Grevemeyer, I.; Hayman, N.W.; Van Avendonk, H.J.A. Active Ocean-Continent Transform Margins: Seismic Investigation of the Cayman Trough-Swan Island Ridge-Transform Intersection. *Geophys. J. Int.* **2022**, *229*, 1604–1627. [CrossRef]
5. Finch, R.C.; Ritchie, A.W. The Guayape Fault System, Honduras, Central America. *J. S. Am. Earth Sci.* **1991**, *4*, 43–60. [CrossRef]
6. Garnier, B.; Tikoff, B.; Flores, O.; Jicha, B.; DeMets, C.; Cosenza-Murallas, B.; Hernandez, W.; Greene, D. Deformation in Western Guatemala Associated With the NAFCA (North America-Central American Forearc-Caribbean) Triple Junction: Neotectonic Strain Localization Into the Guatemala City Graben. *Tectonics* **2022**, *41*, 1–34. [CrossRef]
7. Garnier, B.; Tikoff, B.; Flores, O.; Jicha, B.; DeMets, C.; Cosenza-Murallas, B.; Hernandez, D.; Marroquin, G.; Mixco, L.; Hernandez, W. An Integrated Structural and GPS Study of the Jalpatagua Fault, Southeastern Guatemala. *Geosphere* **2021**, *17*, 201–225. [CrossRef]
8. Staller, A.; Martínez-Díaz, J.J.; Benito, B.; Alonso-Henar, J.; Hernández, D.; Hernández-Rey, R.; Díaz, M. Present-Day Crustal Deformation along the El Salvador Fault Zone from ZFESNet GPS Network. *Tectonophysics* **2016**, *670*, 66–81. [CrossRef]
9. Martínez-Díaz, J.J.; Álvarez-Gómez, J.A.; Staller, A.; Alonso-Henar, J.; Canora, C.; Insúa-Arévalo, J.M.; Tsige, M.; Villamor, P.; Herrero-Barbero, P.; Hernández-Moreno, C.; et al. Active Faults of El Salvador. *J. S. Am. Earth Sci.* **2021**, *105*, 1–20. [CrossRef]

10. Funk, J.; Mann, P.; McIntosh, K.; Stephens, J. Cenozoic Tectonics of the Nicaraguan Depression, Nicaragua, and Median Trough, El Salvador, Based on Seismic-Reflection Profiling and Remote-Sensing Data. *Bull. Geol. Soc. Am.* **2009**, *121*, 1491–1521. [[CrossRef](#)]
11. DeMets, C.; Gordon, R.G.; Argus, D.F. Geologically Current Plate Motions. *Geophys. J. Int.* **2010**, *181*, 1–80. [[CrossRef](#)]
12. Alvarado, G.E.; Benito, B.; Staller, A.; Climent, Á.; Camacho, E.; Rojas, W.; Marroquín, G.; Molina, E.; Talavera, J.E.; Martínez-Cuevas, S.; et al. The New Central American Seismic Hazard Zonation: Mutual Consensus Based on up to Day Seismotectonic Framework. *Tectonophysics* **2017**, *721*, 462–476. [[CrossRef](#)]
13. Lücke, O.H.; Arroyo, I.G. Density Structure and Geometry of the Costa Rican Subduction Zone from 3-D Gravity Modeling and Local Earthquake Data. *Solid Earth* **2015**, *6*, 1169–1183. [[CrossRef](#)]
14. Westbrook, G.K.; Hardy, N.C.; Heath, R.P. *Structure and Tectonics of the Panama-Nazca Plate Boundary*; GSA Special Papers; Geological Society of America: Boulder, CO, USA, 1995; Volume 295, pp. 91–110.
15. Carvajal-Arenas, L.C.; Mann, P. Western Caribbean Intraplate Deformation: Defining a Continuous and Active Microplate Boundary along the San Andres Rift and Hess Escarpment Fault Zone, Colombian Caribbean Sea. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* **2018**, *102*, 1523–1563. [[CrossRef](#)]
16. Gamboa-Canté, C.; Arroyo-Solórzano, M.; Benito, B.; Aguilar, J.; Arroyo, I.G.; Camacho-Astigarrabia, E.; Castro, D.; Flores, O.; Linkimer, L.; Marroquin, M.G.; et al. Seismicity in Central America (1520–2020) and Earthquake Catalog Compilation for Seismic Hazard Assessments. *Bull. Earthq. Eng.* **2024**, *22*, 7201–7234. [[CrossRef](#)]
17. Stepp, J.C. Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and Its Effect on Statistical Estimates of Earthquake Hazard. In Proceedings of the International Conference on Microzonation, Boulder, CO, USA, 1972; pp. 897–910.
18. Mixco Durán, L.E. *Evaluación Probabilística de Amenaza Sísmica de El Salvador*; Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Dirección General del Observatorio Ambiental: San Salvador, El Salvador, 2020.
19. Hidalgo-Leiva, D.A.; Linkimer, L.; Arroyo, I.G.; Arroyo-Solórzano, M.; Piedra, R.; Climent, A.; Díaz, V.S.; Esquivel, L.C.; Alvarado, G.E.; Castillo, R.; et al. The 2022 Seismic Hazard Model for Costa Rica. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **2023**, *113*, 23–40. [[CrossRef](#)]
20. Scherbaum, F.; Delavaud, E.; Riggelsen, C. Model Selection in Seismic Hazard Analysis: An Information-Theoretic Perspective. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **2009**, *99*, 3234–3247. [[CrossRef](#)]
21. Kale, O.; Akkar, S. A New Procedure for Selecting and Ranking Ground-Motion Prediction Equations (GMPEs): The Euclidean Distance-Based Ranking (EDR) Method. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **2013**, *103*, 1069–1084. [[CrossRef](#)]
22. Kanno, T.; Narita, A.; Morikawa, N.; Fujiwara, H.; Fukushima, Y. A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **2006**, *96*, 879–897. [[CrossRef](#)]
23. Atkinson, G.M.; Boore, D.M. Modifications to Existing Ground-Motion Prediction Equations in Light of New Data. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **2011**, *101*, 1121–1135. [[CrossRef](#)]
24. Akkar, S.; Sandikkaya, M.A.; Bommer, J.J. Empirical Ground-Motion Models for Point- and Extended-Source Crustal Earthquake Scenarios in Europe and the Middle East. *Bull. Earthq. Eng.* **2014**, *12*, 359–387. [[CrossRef](#)]
25. Boore, D.M.; Stewart, J.P.; Seyhan, E.; Atkinson, G.M. NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes. *Earthq. Spectra* **2014**, *30*, 1057–1085. [[CrossRef](#)]
26. Cauzzi, C.; Faccioli, E.; Vanini, M.; Bianchini, A. Updated Predictive Equations for Broadband (0.01–10 s) Horizontal Response Spectra and Peak Ground Motions, Based on a Global Dataset of Digital Acceleration Records. *Bull. Earthq. Eng.* **2015**, *13*, 1587–1612. [[CrossRef](#)]
27. Youngs, R.R.; Chiou, S.-J.; Silva, W.J.; Humphrey, J.R. Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismol. Res. Lett.* **1997**, *68*, 58–73. [[CrossRef](#)]
28. Zhao, J.X.; Zhang, J.; Asano, A.; Ohno, Y.; Oouchi, T.; Takahashi, T.; Ogawa, H.; Irikura, K.; Thio, H.K.; Somerville, P.G.; et al. Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **2006**, *96*, 898–913. [[CrossRef](#)]
29. Abrahamson, N.; Gregor, N.; Addo, K. BC Hydro Ground Motion Prediction Equations For Subduction Earthquakes. *Earthq. Spectra* **2016**, *32*, 23–44. [[CrossRef](#)]
30. Montalva, G.A.; Bastias, N.; Rodriguez-Marek, A. Ground-Motion Prediction Equation for the Chilean Subduction Zone. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **2017**, *107*, 901–911. [[CrossRef](#)]
31. Lombardi, A.M.; Akinci, A.; Malagnini, L.; Mueller, C.S. Uncertainty Analysis for Seismic Hazard in Northern and Central Italy. *Ann. Geophys.* **2005**, *48*, 853–865. [[CrossRef](#)]
32. Gaspar-Escribano, J.M.; Rivas-Medina, A.; Parra, H.; Cabañas, L.; Benito, B.; Ruiz Barajas, S.; Martínez Solares, J.M. Uncertainty Assessment for the Seismic Hazard Map of Spain. *Eng. Geol.* **2015**, *199*, 62–73. [[CrossRef](#)]
33. Hamdache, M.; Pelaéz, J.A.P.; Henares, J.; Sawires, R. Seismic Hazard Assessment and Its Uncertainty for the Central Part of Northern Algeria. *Pure Appl. Geophys.* **2022**, *179*, 2083–2118. [[CrossRef](#)]
34. Scheingraber, C.; Käser, M. Spatial Seismic Hazard Variation and Adaptive Sampling of Portfolio Location Uncertainty in Probabilistic Seismic Risk Analysis. *Nat. Hazard. Earth Syst. Sci.* **2020**, *20*, 1903–1918. [[CrossRef](#)]

35. Mizrahi, L.; Nandan, S.; Wiemer, S. The Effect of Declustering on the Size Distribution of Mainshocks. *Seismol. Res. Lett.* **2021**, *92*, 2333–2342. [[CrossRef](#)]
36. Taroni, M.; Akinici, A. Good Practices in PSHA: Declustering, b-Value Estimation, Foreshocks and Aftershocks Inclusion; A Case Study in Italy. *Geophys. J. Int.* **2021**, *224*, 1174–1187. [[CrossRef](#)]
37. Perry, M.; Bendick, R. A Comparative Analysis of Five Commonly Implemented Declustering Algorithms. *J. Seism.* **2024**, *28*, 829–842. [[CrossRef](#)]
38. Reasenber, P. Second-Order Moment of Central California Seismicity, 1969–1982. *J. Geophys. Res.* **1985**, *90*, 5479–5495. [[CrossRef](#)]
39. Gardner, J.K.; Knopoff, L. Is the Sequence of Earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian? *Bull. Seismol. Soc. Am.* **1974**, *64*, 1363–1367. [[CrossRef](#)]
40. Uhrhammer, R.A. Characteristics of Northern and Central California Seismicity. *Earthq. Notes* **1986**, *57*, 21.
41. Garcia-Pelaez, J.; Gee, R.; Styron, R.; Poggi, V. *PSHA Input Model Documentation for Caribbean and Central America (CCA)*; Global Earthquake Model: Pavia, Italy, 2019.
42. Álvarez, L. Nueva Estimación de La Amenaza Sísmica Para Nicaragua. *Rev. Tierra* **2022**, *2*, 1–18.
43. Arroyo-Solórzano, M.; Linkimer, L. Spatial Variability of the B-Value and Seismic Potential in Costa Rica. *Tectonophysics* **2021**, *814*, 1–18. [[CrossRef](#)]
44. Wiemer, S. A Software Package to Analyze Seismicity: ZMAP. *Seismol. Res. Lett.* **2001**, *72*, 373–382. [[CrossRef](#)]
45. Weatherill, G.; Rodríguez, L.; Pagani, M. The Seismic Hazard Modeller’s Toolkit: An Open-Source Library for the Construction of Probabilistic Seismic Hazard Models. In Proceedings of the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turkey, 25 August 2014; pp. 1–12.
46. Pagani, M.; Monelli, D.; Weatherill, G.; Danciu, L.; Crowley, H.; Silva, V.; Henshaw, P.; Butler, L.; Nastasi, M.; Panzeri, L.; et al. Openquake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. *Seismol. Res. Lett.* **2014**, *85*, 692–702. [[CrossRef](#)]
47. Silva, V.; Crowley, H.; Pagani, M.; Monelli, D.; Pinho, R. Development of the OpenQuake Engine, the Global Earthquake Model’s Open-Source Software for Seismic Risk Assessment. *Nat. Hazards* **2014**, *72*, 1409–1427. [[CrossRef](#)]
48. Gutenberg, B.; Richter, C.F. Frequency of Earthquakes in California. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **1944**, *34*, 185–188. [[CrossRef](#)]
49. Aki, K. Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\log N = a - bM$ and Its Confidence Limits. *Bull. Earthq. Res. Inst.* **1965**, *43*, 237–239.
50. Weichert, D.H. Estimation of the Earthquake Recurrence Parameters for Unequal Observation Periods for Different Magnitudes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **1980**, *70*, 1337–1346. [[CrossRef](#)]
51. Shaw, B.E. Magnitude and Slip Scaling Relations for Fault-Based Seismic Hazard. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **2023**, *113*, 924–947. [[CrossRef](#)]
52. Arroyo-Solórzano, M.; Belén Benito, M.; Alvarado, G.E.; Climent, A. Empirical Earthquake Source Scaling Relations for Maximum Magnitudes Estimations in Central America. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **2024**, *114*, 1539–1567. [[CrossRef](#)]
53. Thingbaijam, K.K.S.; Mai, P.M.; Goda, K. New Empirical Earthquake Source-Scaling Laws. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **2017**, *107*, 2225–2246. [[CrossRef](#)]
54. Papazachos, B.C.; Scordilis, E.M.; Panagiotopoulos, D.G.; Papazachos, C.B.; Karakaisis, G.F. Global Relations between Seismic Fault Parameters and Moment Magnitude of Earthquakes. *Bull. Geol. Soc. Greece* **2004**, *36*, 1482–1489. [[CrossRef](#)]
55. Wells, D.L.; Coppersmith, K.J. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **1994**, *84*, 974–1002. [[CrossRef](#)]
56. Strasser, F.O.; Arango, M.C.; Bommer, J.J. Scaling of the Source Dimensions of Interface and Intraslab Subduction-Zone Earthquakes with Moment Magnitude. *Seismol. Res. Lett.* **2010**, *81*, 941–950. [[CrossRef](#)]
57. Allen, T.I.; Hayes, G.P. Alternative Rupture-Scaling Relationships for Subduction Interface and Other Offshore Environments. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **2017**, *107*, 1240–1253. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.



Overview of seismic hazard studies in Central America: A comparative analysis of results

Gamboa-Canté Carlos^{a,*} , Arroyo-Solórzano Mario^{b,c}, Rivas-Medina Alicia^a, Benito María Belén^a

^a Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 28031, Spain

^b GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, Telegrafenberg, D-14473, Potsdam, Germany

^c Institute of Geosciences, University of Potsdam, Potsdam, Germany

A B S T R A C T

We present an overview of seismic hazard studies in Central America, evaluating all the probabilistic seismic hazard studies (PSHA) published at the national and regional scale, as well as an updated model recently developed (Gamboa-Canté et al., 2025). The key factors in the study for obtaining the updated model are the use of a regional earthquake catalog from 1520 to 2020; the implementation of the last seismic zoning for the region, taking into account the change of the subduction angle along the Central America trench; the implementation of the scaling relationships specific to the Central American upper-plate, and the more suitable ground motion models (GMM) for the region identified using local data. We use the updated model as a reference, comparing the results with previous seismic hazard studies. As a general conclusion, we find that seismic hazard studies undertaken over the last 10 years period at regional or national scales point to an increase in the hazard compared to studies in previous periods, with maximum PGA values now reaching around 0.8g–1.0g for a return period of 475 years in the Costa Rica peninsulas and south of Guatemala. The updated seismic hazard map is consistent with the latest local models generated for each country in the region with variability in PGA values of less than 20 %, although there are some local exceptions. The advantage of the updated map is that it reflects the trend of increasing hazard expressed in recent local studies, but it is a regional map, there is no lack of continuity at the borders between countries, as occurs when a regional map is configured from national maps. We suggest that this regional hazard map be used for Central America (Gamboa-Canté et al., 2025) as a reference map for updating the seismic hazard models or seismic codes of the countries.

1. Introduction

In recent decades, seismic hazard studies in Central America have evolved to allow better understanding of the seismotectonic behavior of the region and the expected ground motion resulting from the constant seismic activity. It is important to recognize that this region presents high seismic activity, as the convergence of the North American, Cocos, Caribbean, Nazca, and South American tectonic plate forms complex fault systems. Large earthquakes associated with subduction processes have occurred in this region, such as those in 1982 and 2001 in El Salvador, which caused extensive damage (Ambraseys and Adams, 2001; White et al., 2004). Furthermore, destructive earthquakes of high-moderate magnitude have occurred, Mw (5.5–7.5) associated with local faulting, such as those in Managua (1972); Guatemala City (1976); San Salvador (1986) or Limón (1991) in Costa Rica (Algermissen et al., 1974; Plafker, 1976; Suárez et al., 1995; White et al., 1987).

A better understanding of the seismic sources existing under the three tectonic regimes present in the region (upper-plate, interplate and

in slab subduction) has been key to the evolution of probabilistic studies of seismic hazard, starting with the use of the classical zoned methodology proposed by Cornell (1968) or the method based on non-zoned models such as that of Frankel (1995).

More recently, some methods have incorporated geological faults as seismic sources, known as “fault-type” source models (Danciu et al., 2024; Gerstenberger et al., 2024; Milner and Field, 2024). These models are frequently combined with models of seismogenetic zones, which host seismicity that cannot be associated with known faults, thus resulting in hybrid models of “zone-type” sources and “fault-type” sources (Bungum, 2007; Rivas-Medina et al., 2018; Chartier et al., 2019). There has also been a trend towards implementing spatio-temporal earthquake rate forecast techniques for regional seismic hazard models (Danciu et al., 2024; Llenos et al., 2024; Mancini and Marzocchi, 2024; Mizrahi et al., 2024). Hence, by updating seismic hazard models for a region using new techniques for interpreting the seismic source, wave propagation, and site effects a more accurate understanding is obtained of the actual ground motion and the

* Corresponding author.

E-mail address: carlosjose.gamboa@alumnos.upm.es (G.-C. Carlos).

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105630>

Received 8 April 2025; Received in revised form 3 June 2025; Accepted 3 June 2025

Available online 5 June 2025

0895-9811/© 2025 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

accelerations that can be generated.

There is currently an absence of homogeneous information on the main fault systems in the Central American region, as well as insufficient data to model these systems as independent sources in a regional hazard study. Therefore, the latest study undertaken to develop a new hazard map (Gamboa-Canté et al., 2025) was based on a zonal model of sources which is more recent than that used in Benito et al. (2010, 2012), which made use of the most recent seismic and tectonic data, and which also brought together a consensus of specialists from all the countries in the region (Alvarado et al., 2017).

The map of PGA values resulting from this study for a return period of 475 years was published in Gamboa-Canté et al. (2025). Additional results are now presented, such as the PGA maps for return periods of 975 and 2475 years, the uniform hazard spectra (UHS) for return periods (RP) of 475, 975 and 2475 years in the capitals of the Central American countries and the control earthquakes that result from the disaggregation in the capital cities of Central American countries. Possible scenarios capable of generating these control earthquakes are also identified. This set of results constitutes an update to the seismic hazard model for the region; hereafter referred to as the KUKAHPÁN-25 model.

The KUKAHPÁN-25 model results are compared with recent seismic hazard maps from each country (Castillo et al., 2008; Kalakonas et al., 2020; Mixco Durán, 2020; Álvarez, 2022; Hidalgo-Leiva et al., 2023), as well as with the latest regional seismic hazard maps for Central America (Salgado-Gálvez et al., 2022; Johnson et al., 2023). Furthermore, we compared the accelerations provided by the seismic design codes of each country with KUKAHPÁN-25 model results by analyzing the peak ground acceleration (PGA) for a return period of 475 years (Castillo et al., 2008; Acuña et al., 2011; Delgado Carranza et al., 2021; López et al., 2021; Kiamco et al., 2022; Paiz Aragón et al., 2024).

This comparison was performed through a sensitivity analysis using the coefficient of variation (CV) and the ratio between the PGA values of the updated maps and values resulting from other studies. Thus, we identify areas where the results are more robust or consistent (less variability) and areas with less consistency (greater dispersion between different studies).

The following sections present an overview of the different probabilistic studies developed at both local and regional level in Central America, the updated results of the recent study and the conclusions of the comparison with results from other Probabilistic Seismic Hazard Assessments (PSHA) developed.

2. Review of seismic hazard studies in Central America: state of the art

2.1. Regional seismic hazard studies

The first regional-scale studies on seismic hazard were conducted through the RESIS I project, supported by the Norwegian Agency for Development Cooperation (NORAD) and the Coordination Center for the Prevention of Natural Disasters in Central America (CEPRENAC) between 1990 and 2000 (Rojas et al., 1993a; Güendel and Bungum, 1995). The project focused on establishing the initial regional strong-motion database (Taylor et al., 1992), creating the first regional earthquake catalog (Rojas et al., 1993a), the estimating empirical relationships for the homogenization of magnitude scales to moment magnitude M_w (Rojas et al., 1993b), among others aspects. During the same decade, a series of programs aimed at assessing seismic hazard in Latin America began, with the seismic hazard project for Central America by the Pan American Institute of Geography and History (IPGH) executed by the Central American School of Geology at the University of Costa Rica, resulting in the generation of seismic hazard maps for rock with return periods of 50, 100, 500, and 1000 years for peak ground acceleration (PGA) (Montero et al., 1997).

By the late 1990s, the United States Geological Survey (USGS) published seismic hazard maps for North America, Central America, and the

Caribbean for 500 years return period in PGA, as part of the Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) (Shedlock, 1999). Subsequently, in 2004 the Global Seismic Hazard Map (GSHM) study was completed with the results of the seismic hazard assessment for Mexico, the Caribbean, and Central and South America. This study produced maps for PGA, SA (0.2s), and SA (1.0s) ordinates, corresponding to probabilities of exceedance of 2 %, 10 %, and 50 % in 50 years, respectively (Tanner and Shedlock, 2004).

In 2002 an alternative methodology was applied for seismic hazard assessment and loss estimation in Central America, resulting in the generation of a macro-seismic intensity map and a map of PGA with 475 years return period, as part of the project Seismotectonic Regionalization of Central America (SERCA), sponsored by the Swedish Agency for Research Cooperation (SAREC) (Yong et al., 2002).

In addition, seismic hazard maps for Central America for return periods of 500, 1000, and 2500 years in spectral ordinates of PGA and SA (1.0s), hazard curves, uniform hazard spectra (UHS), and seismic disaggregation analysis for the six main capitals of the countries involved were elaborated through the RESIS II project, again supported by NORAD and CEPREDENAC between 2007 and 2010 (Benito et al., 2010, 2012).

In 2016, a new study was conducted in Central America through the Caribbean and Central America Earthquake Risk Assessment Project (CCARA) (García-Pelaez et al., 2019), supported by the United States Agency for International Development (USAID), which led to maps for return periods of 475 and 2475 years in spectral ordinates of PGA, SA (0.2s), SA (0.3s), SA (0.6s), SA (1.0s), and SA (2.0s). These form part of the Global Seismic Hazard Model developed by the Global Earthquake Model (GEM) in 2018 (Pagani et al., 2020). This model integrates information on seismic events from global seismic networks and the characterization of some active faults in Central America, for seismic hazard calculation through the smoothed seismicity method (Frankel, 1995). It is worth mentioning that, in 2023, the GEM model for Central America was updated with a new logical tree of GMPE models and integration of new seismogenic zones (Johnson et al., 2023).

Furthermore, Salgado-Gálvez et al. (2022) developed a seismic hazard model for Central America and the Caribbean for insurance coverage in 34 countries. The results comprised seismic hazard maps for a return period of 475 years and spectral ordinates of PGA and SA (0.2s), considering site effects across the entire region.

Lastly, in the framework of the KUK-AHPÁN project (2019–2023) the incorporation of new seismic and tectonic information was applied in a Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA) for Central America (Gamboa-Canté et al., 2025), developing a sensitivity analysis of epistemic uncertainties linked to different models and parameters. The result of this analysis is a seismic hazard map in terms of PGA for a return period of 475 years that has been compared with its predecessor hazard map generated in the RESIS II project (Benito et al., 2012). Another set of results that make up the KUKAHPÁN-25 model will be presented in the following sections.

2.2. National seismic hazard studies

At national scale, most of the countries in Central America have carried out updates to their seismic hazard maps, enhancing calculations based on adapting to observations and better seismotectonic knowledge. The aim is to improve and update design codes for the construction of new earthquake-resistant infrastructure and therefore help mitigate and reduce the seismic risk in the region.

In the case of Guatemala, the first seismic hazard studies date back to 1977 (Kiremidjian et al., 1977). Following the significant losses resulting from the 1976 M_w 7.5 Guatemala earthquake (Plafker, 1976), the local government created the first seismic hazard maps for the country, encompassing PGA and return periods of 50, 100, 500, and 1000 years based on a database of approximately 1150 earthquakes. Subsequently, in 1995, through the RESIS I project, a seismic hazard assessment for

Guatemala City was conducted, resulting in seismic hazard curves with local seismic data (Villagran et al., 1997). Furthermore, in 2019 a probabilistic seismic hazard study was conducted to explore the impact of epistemic uncertainties on seismic risk models, with Guatemala as the case study (Kalakonas et al., 2020). Finally, the Guatemalan Association of Seismic and Structural Engineering (AGIES) updated the seismic hazard model for Guatemala using deterministic methods based on the maximum expected earthquake from various active seismic sources, aiming to update the local seismic code (Rodas et al., 2021).

In El Salvador, the first records of seismic hazard come from the early 1990s due to the significant economic and human losses resulting from the 1986 Mw 5.7 San Salvador earthquake (White et al., 1987). This initial study involved the creation of the first zone-type source models, a specific attenuation model with local strong-motion records, and the initial hazard maps for PGA and return periods of 100, 500, and 1000 years (Alfaro et al., 1990). In 1993, the study was updated through different approaches to attenuation models and seismic source parameters to generate new seismic hazard maps for PGA spectral ordinates (Singh et al., 1993). In 1996, a probabilistic seismic hazard study was published, comparing and analyzing uncertainties with previous studies conducted in El Salvador to incorporate this information into local seismic standards (Bommer et al., 1996). Additionally, in 1998 a comparative study was conducted using different approaches for seismic hazard assessment in El Salvador. This study employed three "free-zone" methods and the Cornell-McGuire approach to address their implications for seismic zonation for construction and insurance purposes (Bommer et al., 1998).

By 2013, the seismic catalog for El Salvador had been updated, incorporating new seismic information to generate seismic hazard maps with a focus on analyzing uncertainties in the seismic hazard modeling (Salazar et al., 2013). Subsequently, thanks to advancements in monitoring and the acquisition of new information on active fault systems in El Salvador, deterministic studies were incorporated in the area (Salazar, 2018). Finally, in 2020, the most comprehensive seismic hazard study for El Salvador was conducted. This study integrates geological and seismic information from different sources through the smoothed seismicity method (Frankel, 1995), generating seismic hazard maps for El Salvador taking into consideration the effect of the nearby sources of the active faults in the country (Mixco Durán, 2020).

In the case of Honduras, the first published seismic hazard study dates from 1982. The strong impact of the 1976 Mw 7.5 Guatemala earthquake (Plafker, 1976) significantly affected the neighboring country. These effects and the lack of research to identify local active faults, prompted the first seismic hazard study in Honduras for structural analysis and design purposes (Kiremidjian et al., 1982). As a result, the first hazard map for a 500-year return period for PGA was obtained, along with the first hazard curves depicting the annual probability of exceeding the motion. Two decades later, the seismic hazard was updated using information from a new focal mechanism database to define zone-type seismic sources. Additionally, epistemic uncertainties were included, considering attenuation models, cutoff magnitude (M_c), and maximum probable magnitude (Cáceres and Kulhánek, 2000). In 2001, another seismic hazard study focused on Tegucigalpa, the capital city of Honduras, characterizing the seismic hazard of the country and subsequently generating seismic hazard curves for the capital city along with expected PGA in rock conditions for different return periods (Cruz Calderón et al., 2001).

In the case of Nicaragua, after recovering from the damage caused by the 1972 Mw 6.2 Managua earthquake (Algermissen et al., 1974), the local government invested in conducting the first seismic hazard study for the country in 1975. This initial study compiled information on active faults, soil classification, soil thicknesses, and a regional earthquake database. This study produced seismic hazard maps for Nicaragua, as well as seismic hazard curves for the capital city of Managua for 500 years return period and PGA (Shah et al., 1975). In 1987, seismic hazard maps were updated using records from the

country's local seismic network, employing computer programs to reduce calculation times for determining seismic source parameters (Larsson and Mattson, 1987). Subsequently, in 1996, a macro-seismic study for Nicaragua was presented, generating contour maps representing spatial exceedance probabilities across the Nicaraguan territory (Espinosa, 1996). Finally, the most recent study in 2022 marked a significant step towards updating the local seismic code, with new seismic hazard maps designed for different return periods and spectral ordinates to cover structural design and analysis of buildings. Moreover, this study involved a rigorous analysis of epistemic uncertainties (Álvarez, 2022).

In Costa Rica, the seismic hazard assessments began in 1977 when the local government created the first hazard maps. In this initial study, the first zone-type seismic sources were defined based on the localization and grouping of seismic events in the upper-plate and subduction tectonic regimes. Additionally, the first source model was established, along with an attenuation model adjustment using strong-motion records. Seismic hazard maps for PGA were obtained for return periods of 50, 100, 500, and 100 years (Mortgat et al., 1977). Subsequently, in 1994, an update of the seismic hazard study was carried out using a new local earthquake database and strong-motion records, resulting in seismic hazard curves for the capital city and new seismic hazard maps (Laporte et al., 1994). Finally, a new Seismic Hazard Model for Costa Rica was developed in 2022. This model updated the parameters of upper-plate, interface, and intraplate sources. Furthermore, a logic tree assigning different weights to the GMM adjusted by local data for various spectral ordinates was estimated. This resulted in seismic hazard maps for the PGA spectral ordinate for return periods of 475 and 2475 years. A disaggregation analysis along with seismic hazard curves, and Uniform Hazard Spectra (UHS) were also estimated for the cities of San José and Liberia (Hidalgo-Leiva et al., 2023).

As regards Panama, the first seismic hazard assessments date back to 1989 when an initial study based on a seismotectonic regionalization was undertaken. This study defined four zone-type seismic sources covering the Azuero area, the South Panama Deformed Belt (SPDB), the Panama Fracture Zone (PFZ), and the Panama-South America Suture Zone (PSZ). Moreover, the seismic recurrence parameters of these sources were obtained, and the first seismic hazard curves were estimated for PGA with a 500-year return period (Vergara Muñoz, 1989). Two years later, the first probabilistic seismic hazard map for Panama was presented in terms of Modified Mercalli Intensity (MMI) for return periods of 5, 25, and 100 years (Vergara Muñoz, 1991). These maps were subsequently updated in terms of PGA for return periods of 250, 500, and 100 years (Camacho et al., 1997).

Fig. 1 summarizes the evolution of the different probabilistic studies in the Central American region.

3. The updated model for Central America: KUKAHPÁN-25 model

The KUK-AHPÁN Project updated the seismic hazard maps for Central America, generating maps that integrate new seismic and geological information from the region (Gamboa-Canté et al., 2025). The development of the KUKAHPÁN-25 model included important updates in comparison to previous studies. A new database was compiled, homogenized, and consolidated, containing the regional earthquake catalog for Central America from 1520 to 2020, using national data provided by local agencies from the countries involved (Gamboa-Canté et al., 2024). The seismic zoning proposed by Alvarado et al. (2017) was also implemented, more accurately defining the depth and dip angle of the subduction zone, as well as the shapes of the upper plate seismic zones in the region based on observed seismic data. Furthermore, region-specific scaling relationships for Central America were employed. The latter were developed from a database comprising 64 earthquakes with rupture parameter information for the region (Arroyo-Solórzano et al., 2024). Finally, ground motion models (GMMs) calibrated for the region were used. These were based on local data collected in El Salvador

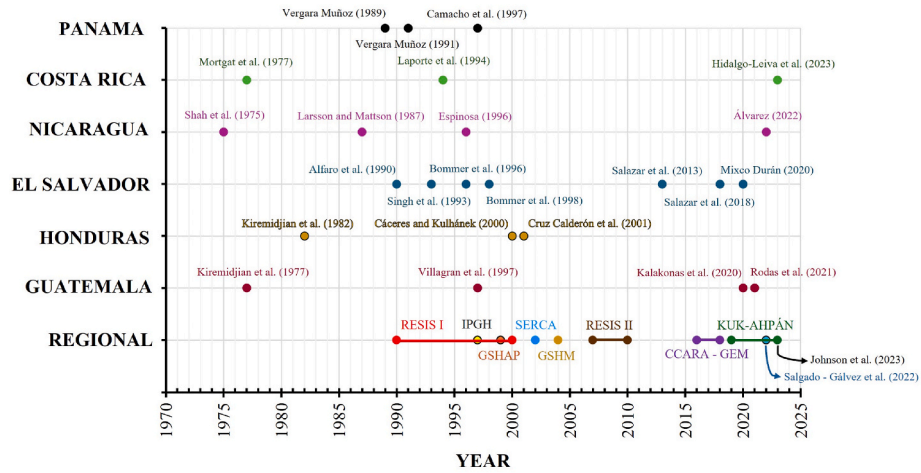


Fig. 1. Timeline of seismic hazard assessment in Central America, for regional and national studies.

(Mixco Durán, 2020) and Costa Rica (Hidalgo-Leiva et al., 2023).

The abovementioned developments allowed a rigorous analysis of the input parameters used in seismic hazard calculations to be conducted (e.g. declustering, recurrence model fitting method, scaling relationships, GMM), with the aim of improving control of epistemic uncertainties and determining appropriate weights for the logic tree through statistical methods (Gurjar and Basu, 2022).

3.1. Seismic hazard maps

Fig. 2 shows the seismic hazard maps for Central America in terms of PGA for return periods of 475, 975, and 2475 years, according to the updated KUKAHPÁN-25 model. Further details of the study leading to KUKAHPÁN-25 model can be found in Gamboa-Canté et al. (2025). For detailed information of SA (1.0s) maps, please refer to the Supplementary Materials of this article.

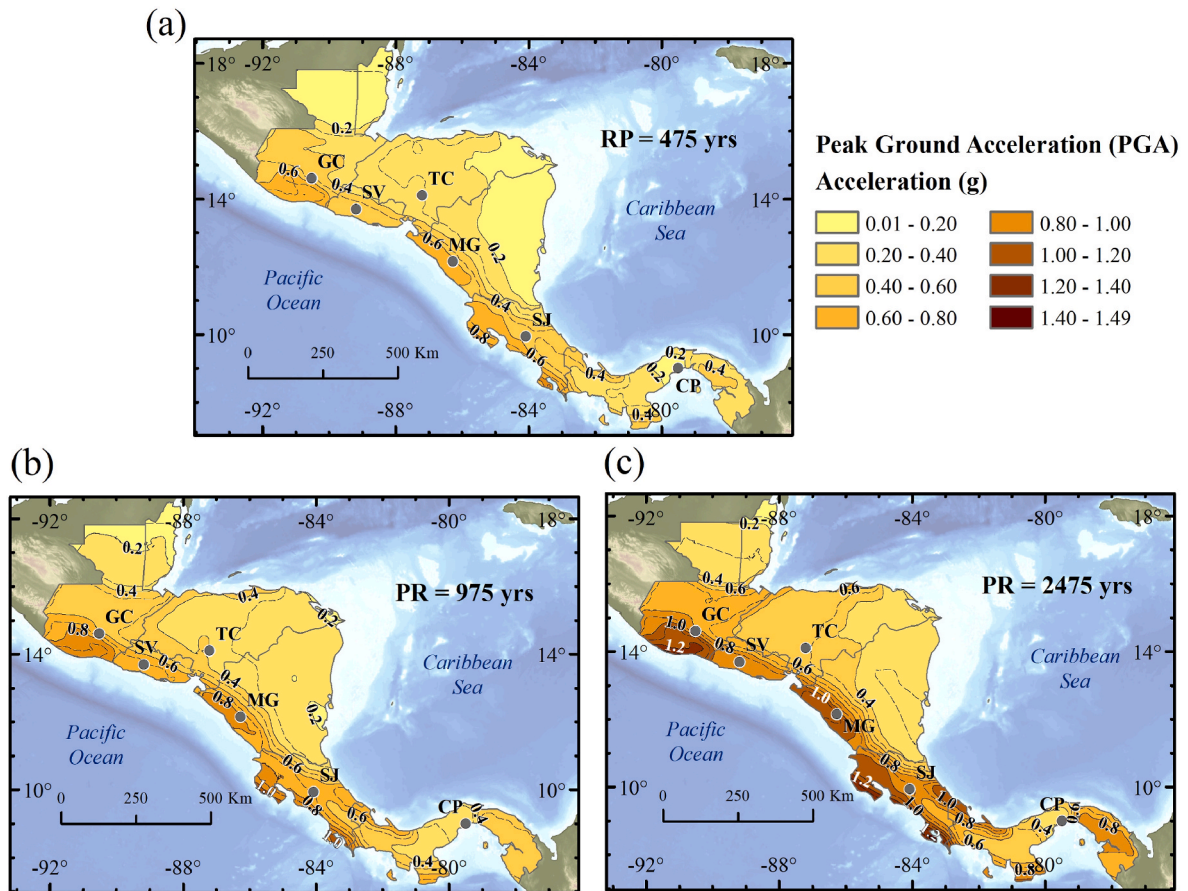


Fig. 2. Seismic hazard maps for Central America, for PGA and return periods of (a) 475 years, (b) 975 years and (c) 2475 years in rock conditions ($V_{s30} = 760$ m/s), according to the KUKAHPÁN-25 model. Capital cities of the countries are shown: GC – Guatemala City, SV – San Salvador, TC – Tegucigalpa, MG – Managua, SJ – San José, CP – Panama City.

3.2. Uniform hazard spectra in the capital cities

Seismic hazard curves were generated for the six capitals in different spectral accelerations $SA(T)$, to illustrate the expected ground motion for different return periods. From these hazard curves, uniform hazard spectra (UHS) were established, which can be compared with the design spectra of each country's local seismic codes and used for future updates (Fig. 3).

3.3. Disaggregation in capital cities and control earthquakes

The seismic hazard maps do not depict the seismic events that are most likely to affect the capital cities of Central American countries. To identify the events that contribute most to the hazard in the capitals of the Central America countries, *seismic disaggregation* analysis was conducted for the spectral ordinates of PGA and SA (1.0s), obtained in the KUKAHPÁN-25 model, for the return period of 475 years, aiming to identify the control earthquakes that could cause the greatest damage in terms of magnitude – distance – epsilon cells (M_w – R_{rup} – ϵ). In all cases the value of epsilon was set to unity, so this limited the subsequent analysis to interpreting the pairs (M_w – R_{rup}). For more details of the

control earthquakes analysis for Central America please refer to the Supplementary Materials of this article.

Possible sources compatible with the resulting pairs (M_w – R_{rup}) were identified for each capital, essentially faults that can generate these magnitudes and which are within a given radius of action with respect to each capital as given by R_{rup} . Table 1 summarizes the control earthquakes in each capital city of Central America for short periods (PGA) and for long periods [SA (1.0s)], showing the possible association of the control earthquake with a seismic source capable of generating it with greatest probability. Fig. 4 also shows the control earthquakes associated with the possible seismic sources in the region.

4. Comparative analysis between the KUKAHPÁN-25 model and other hazard results

4.1. Comparison with regional studies

On a regional scale, two maps have been published for the entire Central American region in the last five years: 1) the map developed in the framework of CCARA-GEM project (García-Pelaez et al., 2019) by the Global Earthquake Model (GEM) and updated by Johnson et al.

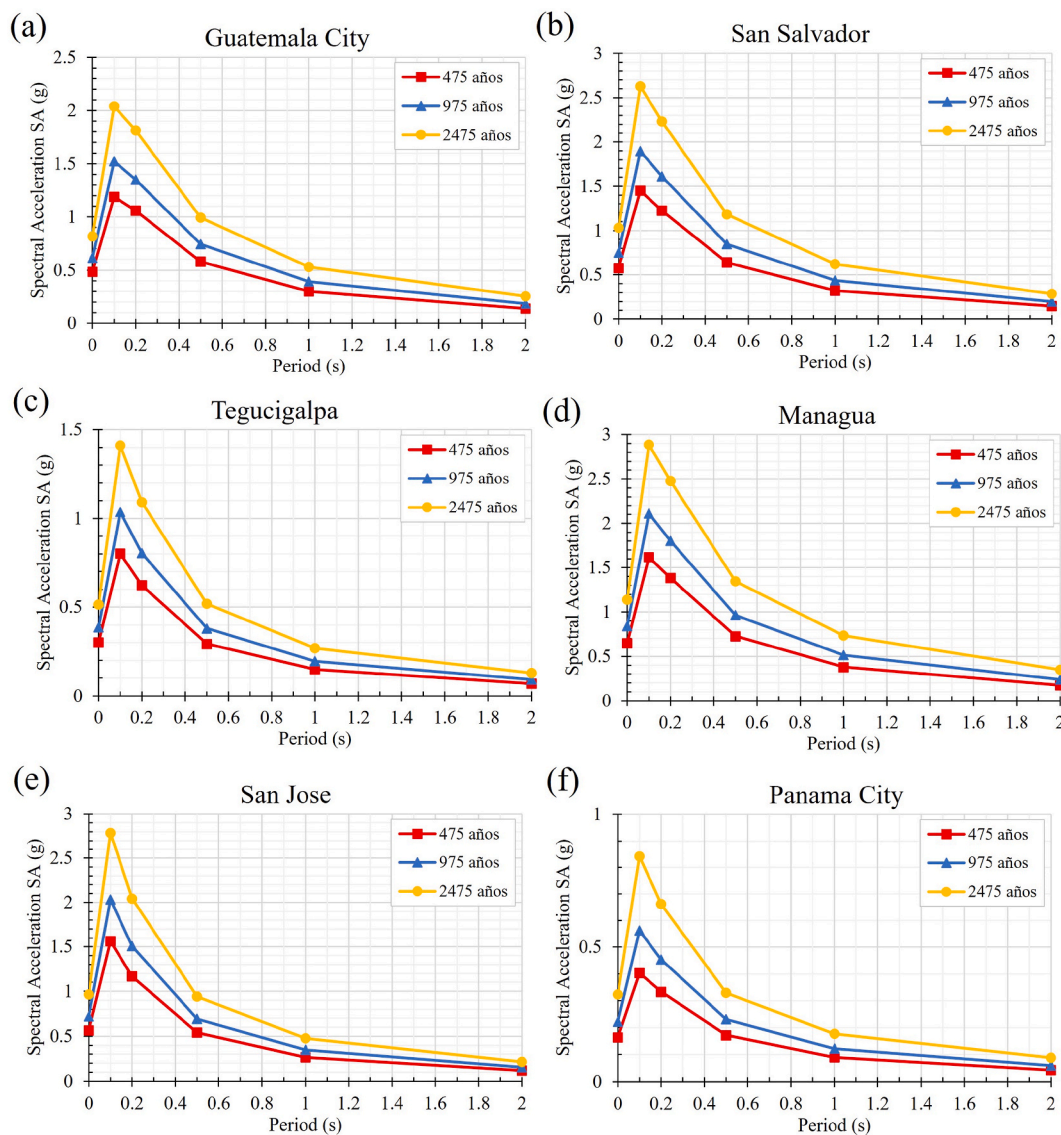


Fig. 3. Uniform hazard spectra (UHS) for return periods of 475, 975, and 2475 years, according to the KUKAHPÁN-25 model. The UHS were generated for the six capital cities of Central America: (a) Guatemala City, (b) San Salvador, (c) Tegucigalpa, (d) Managua, (e) San José and (f) Panama City.

Table 1

Control earthquakes for the six capital cities of Central America for PGA and SA (1.0s).

Capital city	Code	Magnitude (Mw)	Rrup (Km)	Seismic source associated
<u>Guatemala City</u>	G1 – PGA	6.5–7.0	20–30	Motagua fault system; Jalpatagua fault
	G2 – SA (1.0s)	7.5–8.0	40–50	Motagua fault system; Polochic-Chixoy fault system; Subduction
<u>San Salvador</u>	S1 – PGA	5.5–6.0	0–10	Guaycume fault; San Vicente fault
	S2 – SA (1.0s)	7.5–8.0	40–50	Subduction
<u>Tegucigalpa</u>	H1 – PGA	5.0–5.5	10–20	Guayape fault; Honduras depression fault system
	H2 – SA (1.0s)	6.0–6.5	10–20	Guayape fault; Honduras depression fault system
<u>Managua</u>	N1 – PGA	7.0–7.5	0–10	Subduction zone
	N2 – SA (1.0s)	7.0–7.5	0–10	Nicaragua depression fault system
<u>San Jose</u>	CR1 – PGA	6.0–6.5	0–10	Central Costa Rica deformed belt system
	CR2 – SA (1.0s)	7.0–7.5	30–40	Subduction
<u>Panama City</u>	P1 – PGA	5.0–5.5	10–20	Gatun fault; Azota fault; Limon fault; Pedro Migue fault; Miraflores fault
	P2 – SA (1.0s)	6.0–6.5	40–50	Gatun fault; Pedro Migue fault
	P3 – SA (1.0s)	6.5–7.0	40–50	Subduction

(2023), hereinafter referred to as GEM-23, and 2) the Caribbean and Central America Seismic Hazard Model for Sovereign Parametric Insurance Coverage (Salgado-Gálvez et al., 2022), hereinafter referred to as CCASH-22.

We compared the KUKAHPÁN-25 map with the other two regional maps, GEM-23 and CCASH-22, in order to determine the areas with

greater agreement among the results and also to identify those areas with greater variability.

Fig. 5 illustrates a variability map (CV) for PGA – 475 years from these regional studies. To correctly interpret this map, it should be borne in mind that the coefficient of variation (CV) indicates the degree of variability in the hazard results depending on the analyzed data. The CV is defined as:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (1)$$

where σ is the standard deviation between the compared data and \bar{x} the mean of these data. Some authors suggest that for low CV values (<0.20), data dispersion is considered insignificant, resulting in homogeneous behavior. In contrast, for higher CV values (≥ 0.35), this variation becomes notable, potentially leading to heterogeneous behavior and influencing the results.

In general, for most of the Central America territory, the CV values among the three maps compared do not exceed 30 % (Fig. 5). There are localized areas where the variation in accelerations exceeds 30 %, and these sectors are prominent in the northern zone of Guatemala, the northern border between Honduras and Nicaragua, and lastly, in the central zone of Panama (Fig. 5). The results in these areas are less robust than for the rest of the territory.

To examine these variations in detail, the maps of the ratio between the PGA values in KUKAHPÁN-25/GEM-23 and KUKAHPÁN-25/CCASH-22 were computed and drawn up separately (Fig. 6).

Compared with the GEM-23 map, the KUKAHPÁN-25 map presents greater accelerations in specific sectors of the region, in many cases doubling the PGA values in the northern zone of Guatemala, the Honduras-Nicaragua border and the eastern zone of Panama (Fig. 6a). In addition, accelerations shown on the GEM-23 map are consistent with those of the KUKAHPÁN-25 map in those areas with high seismic activity, such as the coastal zone of Guatemala, Nicaragua and Costa Rica (Fig. 6a). Furthermore, the GEM-23 map exhibits higher acceleration values compared to those calculated in the latest regional map for zones across much of the central strip of Guatemala, Honduras, Nicaragua, and Costa Rica (Fig. 6a). The CCASH-22 map, in contrast, shows lower values

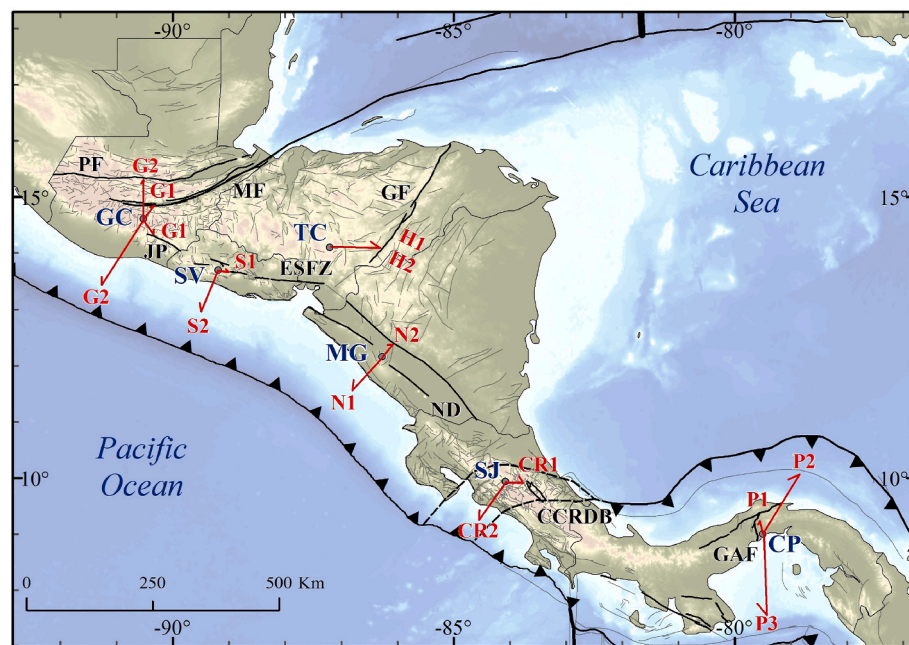


Fig. 4. Control earthquakes associated with possible seismic sources in Central America, the gray lines show the fault database of Agate et al. (2024), Denyer et al. (2003) and black lines the fault database of Styron and Pagani (2020). The acronyms noted in red correspond to the control earthquakes indicated in Table 1. CCRDB – Central Costa Rica deformed belt, ESFZ – El Salvador fault zone, GC – Guatemala City, GAF – Gatun fault, GF – Guayape fault, CP – Panama City, JP – Jalpatagua fault, MF – Motagua fault system, MG – Managua, ND – Nicaragua depression, PF – Polochic-Chixoy fault system, SJ – San Jose, SV – San Salvador, TC – Tegucigalpa.

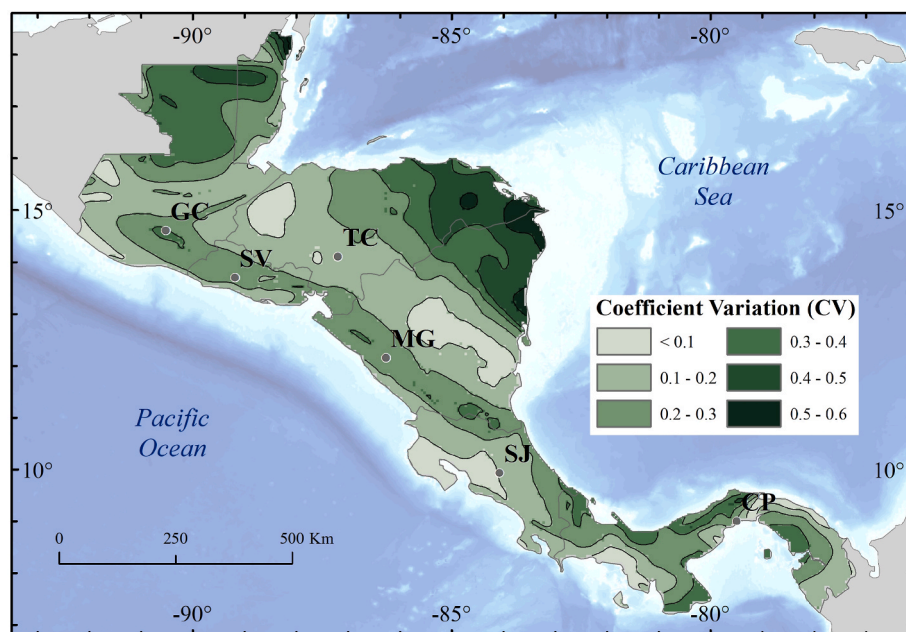


Fig. 5. CV map for PGA and 475 return period of KUKAHPÁN-25, GEM-23 and CCASH-22 models. Significant variations can be observed in areas with low seismic hazard and around the Central American volcanic arc. Capital cities for the countries are shown: GC – Guatemala City, SV – San Salvador, TC – Tegucigalpa, MG – Managua, SJ – San José, CP – Panama City.

for almost all the territory in comparison to those shown on the KUKAHPÁN-25 map (Fig. 6b).

4.2. Comparison with local studies

For the purposes of the comparison, the most recent local studies were selected from each country for which an updated seismic hazard map has been produced at national level. In the case of Guatemala, the map proposed by Kalakonas et al. (2020) was used; for El Salvador the map proposed by Mixco Durán (2020); in Honduras the map proposed by Castillo et al. (2008); for Nicaragua the map resulting from the new seismic hazard study carried out by Álvarez (2022) and, finally, for Costa Rica the map of the new 2022 hazard model proposed by Hidalgo-Leiva et al. (2023). In the case of Panama there are no recent local probabilistic studies, so we were not able to draw comparisons at national scale. The last official study published for the country was conducted in 1997, so it was considered unreliable for comparison with this regional study (Camacho et al., 1997). We emphasize the importance of keeping seismic hazard studies updated for each country so that new methodologies can be applied that help us to understand the behavior of accelerations at specific sites and to better comprehend the true hazard posed by active seismic sources in the region. Additionally, maintaining updated studies greatly aids in improving the seismic building codes of each country.

Fig. 7 presents a map of Central America, overlaid with seismic hazard maps from each local study conducted in the respective countries. In the case of Panama, due to the lack of recent local studies as mentioned above, the comparison was undertaken based on the regional map from the RESIS II project (Benito et al., 2010, 2012). As shown, generating a regional map based on the results from these local studies reveals a discontinuity in acceleration values along the borders between countries.

To evaluate the impact of national scale seismic hazard maps compared with the KUKAHPÁN-25 map, a ratio map of PGA values for a return period of 475 years was created (Fig. 8). As shown on the map, most areas exhibit an increase of 10 %–50 % in acceleration values in the regional study compared to the national studies. Additionally, there are very localized zones where these accelerations exceed 50 %, reaching up

to double the values. Examples of this include the northern transversal strip of Guatemala, northern coast of Honduras and the southern coast of Nicaragua (Fig. 8).

A more thorough analysis of each country revealed that in the case of Guatemala, there were no discrepancies between the PGA values of the KUKAHPÁN-25 map and those derived from the local study in the southern coastal area and the northern region of the country. However, as regards the central region and the northern transversal strip, an increase in the PGA was observed, ranging from 20 % to 80 % on the KUKAHPÁN-25 map (Fig. 8).

In the case of El Salvador, accelerations remain consistent between the latest regional seismic hazard study and the local study. Across most of the territory, the accelerations are similar, except for specific areas where the local map shows accelerations that are 20 % higher than those in the regional map (Fig. 8). However, in the localized areas where accelerations differ by 20 % these differences are attributable to the integration of faults in the seismic hazard calculations in the local study. Specifically, it was the inclusion of the El Salvador Fault Zone (ESFZ) (Mixco Durán, 2020) which resulted in a significant increase in accelerations within the zones of influence where fault ruptures could occur.

As regards Honduras, accelerations in the southwestern part of the country are similar when comparing the regional map to the local study map. This area corresponds to the Chortis Block, identified by the seismic zone G5-S5-H1 (Alvarado et al., 2017; Benito et al., 2012), indicating stability in the accelerations obtained in the local and regional models (Fig. 8). In contrast, the northern part of the country shows an increase in accelerations ranging from 20 % to nearly 100 % on the regional map.

In Nicaragua, accelerations in the central-southern region remain consistent between the latest regional map and the latest local study, except for the southwestern and northeastern coasts, where the KUKAHPÁN-25 map shows acceleration increases ranging from 20 % to 80 %. Meanwhile, in the southern region (bordering Costa Rica), there is a slight decrease of the PGA on the KUKAHPÁN-25 map of up to 10 % (Fig. 8).

In Costa Rica, the northern region (bordering Nicaragua) shows consistent accelerations between the latest regional map and the most recent local study. However, in the central region, there is an increase of

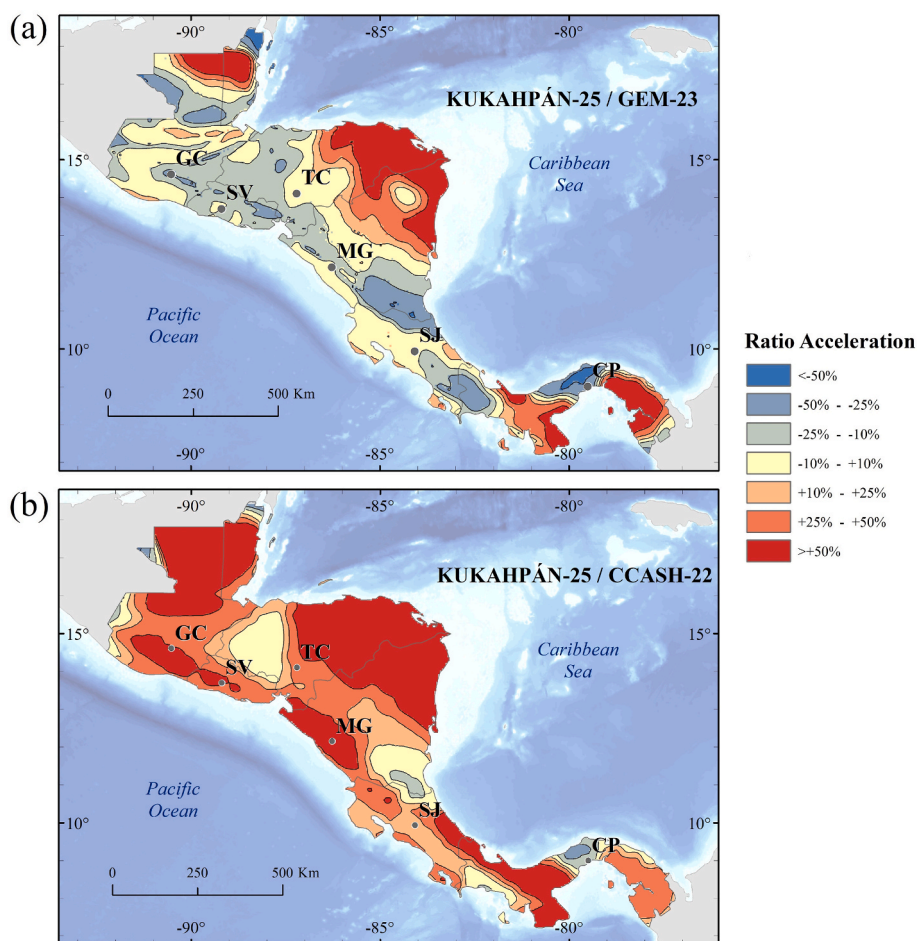


Fig. 6. Ratio acceleration maps for PGA and 475 return period in KUKAHPÁN-25 map compared to (a) GEM-23 map and (b) CCASH-22 map. The red and orange areas indicate a significant increase in accelerations under the latest updated regional model compared to previous regional models, the yellow color indicates that accelerations are stable between the regional models compared, and the blue color indicates that previous regional models show higher accelerations compared to the latest updated regional model. Capital cities of the countries are shown: GC – Guatemala City, SV – San Salvador, TC – Tegucigalpa, MG – Managua, SJ – San José, CP – Panama City.

nearly 40 % on the regional map compared to the local study, and a decrease of up to 20 % in the Nicoya Peninsula (Fig. 8). Although both studies used the same source model and mostly the same GMMs, the primary reason for this variability lies in the updated recurrence parameters in the source characterization.

Finally, as regards Panama, a general consistency is observed across most of the territory between the PGA from the latest regional study (Gamboa-Canté et al., 2025) and those from the RESIS II map (Benito et al., 2012). However, there is a considerable increase of more than 50 % in ground acceleration in the northern region of Panama, mainly due to changes in the seismic zoning in the Northern Panama Deformed Belt (P10-C8), which also implies a change in the recurrence model for that area (Alvarado et al., 2017). A similar situation occurs in the central region of Panama, where a reduction in ground accelerations of approximately 25 %–50 % is observed.

4.3. Comparison with local seismic codes

Most seismic codes include a seismic zoning map that shows the PGA values for return period of 475 years on different types of soils. In this context, we conducted a comparison of the accelerations from the latest regional seismic hazard map for Central America (Gamboa-Canté et al., 2025) against the accelerations established in the last seismic code for each country involved (Acuña et al., 2011; Castillo et al., 2008; Delgado Carranza et al., 2021; Kiamco et al., 2022; López et al., 2021; Paiz

Aragón et al., 2024)

For this purpose, a correlation graph was generated to compare the accelerations from the KUKAHPÁN-25 map with those calculated for several cities in each country according to the local seismic code (Fig. 9). In general, there are similar PGA values for cities in El Salvador, Honduras and Panama, while for cities in Nicaragua, Costa Rica and Guatemala, the codes give values which are considerably lower than those given on the KUKAHPÁN-25 map (Gamboa-Canté et al., 2025), especially in the cases of Costa Rica and Guatemala. The differences tend to be greater for cities with greater hazard (i.e., higher expected accelerations in the seismic hazard calculation) (Fig. 9).

This finding can largely be attributed to the models or methods used in developing seismic codes. For example, a deterministic approach is used in the development of the seismic code for Guatemala to account for the effect of proximity of seismic sources that interact with the site, the resulting values from this deterministic study being reduced to approximate those expected for a return period of 475 years (Rodas et al., 2021). However, since these are not values obtained from a probabilistic calculation, the approximation may yield results that differ from the expected accelerations for that return period.

In the case of Costa Rica, the seismic code has not been updated since 2010, which implies that the latest knowledge on seismic sources and models has not been taken into account to provide a more robust and realistic framework of seismic hazard for the country. However, the latest local study carried out by Hidalgo-Leiva et al. (2023) presents

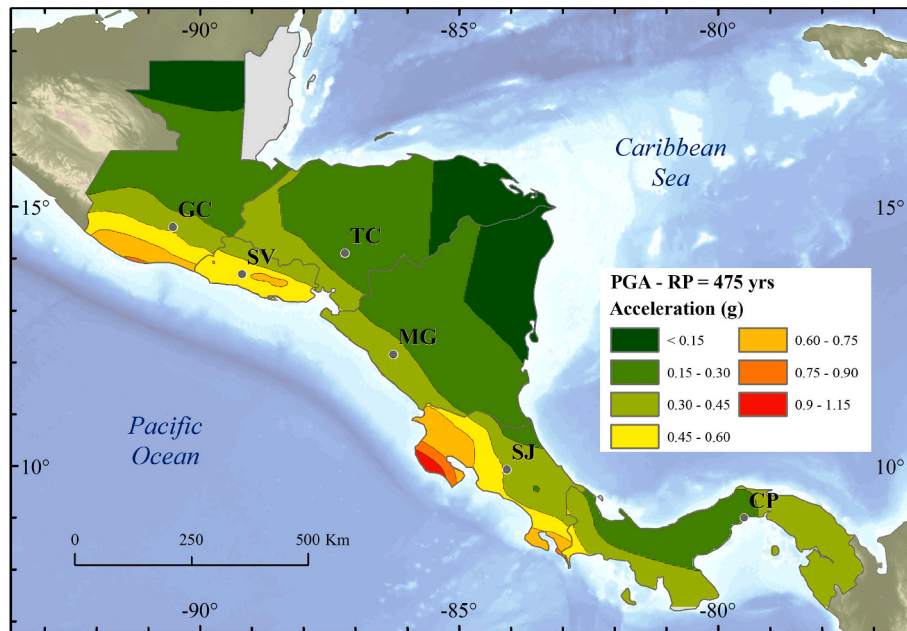


Fig. 7. Seismic hazard map for Central America in term of PGA and return periods of 475 years using the recent local seismic hazard studies: Kalakonas et al. (2020) – Guatemala, Mixco Durán (2020) – El Salvador, Castillo et al. (2008) – Honduras, Álvarez (2022) – Nicaragua, Hidalgo-Leiva et al. (2023) – Costa Rica, Benito et al. (2012) – Panama. The discontinuity of accelerations at the borders of countries can be observed when trying to unify local models. Capital cities of the countries are shown: GC – Guatemala City, SV – San Salvador, TC – Tegucigalpa, MG – Managua, SJ – San José, CP – Panama City.

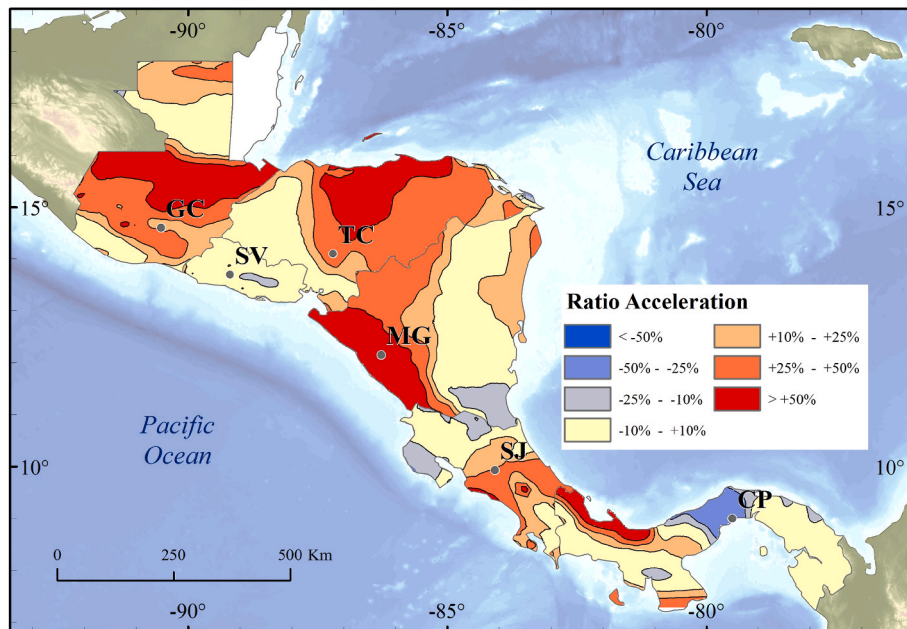


Fig. 8. Ratio acceleration map for PGA and 475 return period under KUKAHPÁN-25 map in comparison to all the recent local seismic hazard studies: Kalakonas et al. (2020) – Guatemala, Mixco Durán (2020) – El Salvador, Castillo et al. (2008) – Honduras, Álvarez (2022) – Nicaragua, Hidalgo-Leiva et al. (2023) – Costa Rica, Benito et al. (2012) – Panama. The red and orange areas indicate a significant increase in accelerations under the latest updated regional model compared to previous local models, the yellow color indicates that accelerations are stable between the regional and local models compared, and the blue color indicates that local models show higher accelerations compared to the latest updated regional model. Capital cities of the countries are shown GC – Guatemala City, SV – San Salvador, TC – Tegucigalpa, MG – Managua, SJ – San José, CP – Panama City.

values which are much higher than those in the code, with variations of up to 60 %, these being more consistent with those obtained in the KUKAHPÁN-25 map.

As for Nicaragua, the seismic hazard model in the seismic code is that developed by Álvarez (2022). Hence, the factors of discrepancy with the KUKAHPÁN-25 map are the same as those addressed in the comparison

with local seismic hazard studies (Álvarez, 2022), developed in the following discussion section.

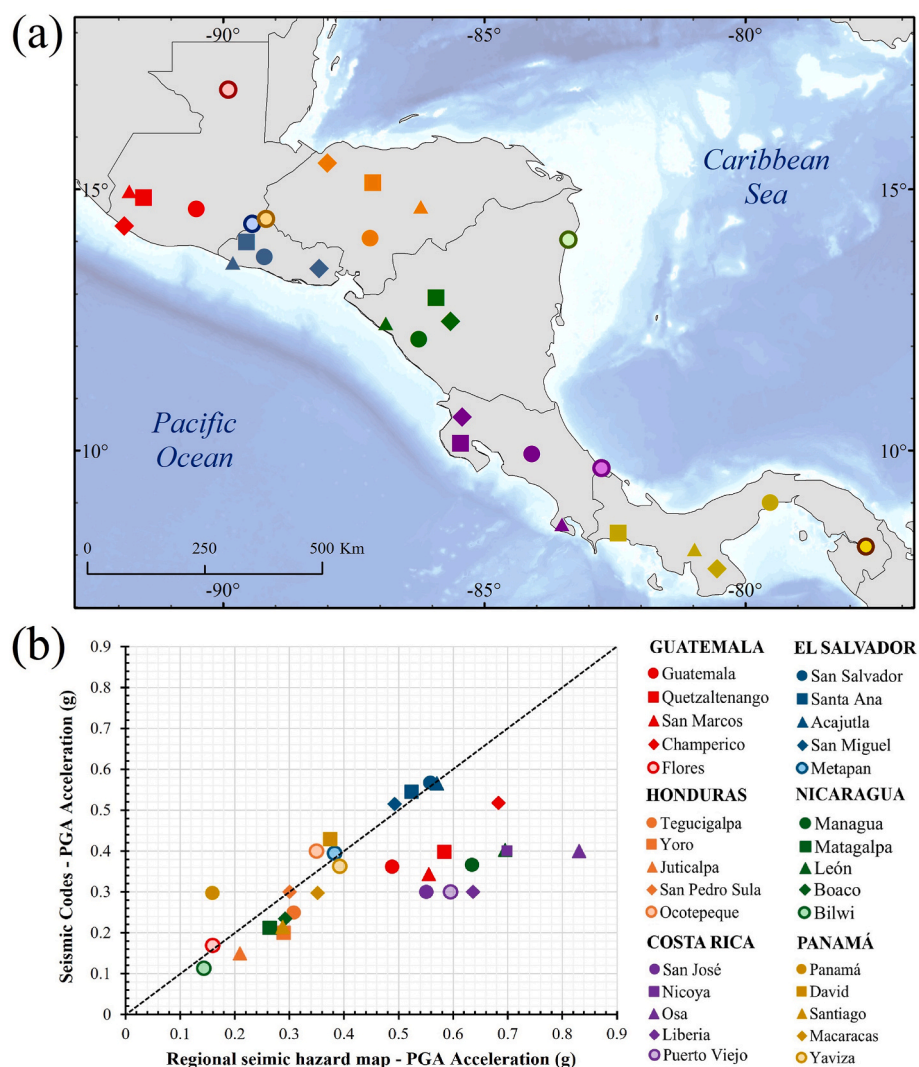


Fig. 9. (a) Location of some towns in each Central American country and (b) correlation of latest regional seismic hazard map accelerations (Gamboa-Canté et al., 2025) with local seismic code accelerations. PGA – 475 years return period.

5. Discussion

5.1. Highlighting regional trends and variability in Central American seismic hazard

The KUKAHPÁN-25 map exhibits increased PGA values relative to older models such as RESIS II, in line with the general upward trend observed in national hazard studies over the past decade. Maximum PGA values reach up to 0.8g, 1.0g, and 1.2g for return periods of 475, 975, and 2475 years, respectively, particularly in Costa Rica's peninsulas and southern Guatemala (Fig. 2). In the capitals, the highest UHS are estimated in San Salvador, Managua and San Jose, Costa Rica, followed by Guatemala City, Tegucigalpa and Panama (Fig. 3). The identification of control earthquakes through disaggregation shows that both subduction and upper-plate faulting sources contribute to hazard levels in these capitals with the exception of Tegucigalpa where subduction is not dominant. The identified local faulting scenarios that dominate the hazard are: Motagua-Polochic Chixoy and Jalpatagua fault in Guatemala; Guayume and San Vicente in El Salvador; Guayape and Honduras depression fault system in Honduras; faults in the Nicaraguan tectonic depression; the Central deformed belt system in Costa Rica and Gatun, Azota, Limon, Pedro Miguel and Miraflores faults in Panama (Fig. 4). The magnitude M_w and distances R_{rup} of the control

earthquakes for short and long period ground motion are included in Table 1.

Other two regional maps have been published for the entire Central American region in the last five years: GEM-23 map (Johnson et al., 2023) and CCASH-22 map (Salgado-Gálvez et al., 2022). A joint analysis of these maps together with the KUKAHPÁN-25 map has allowed us to determine the areas where there is greater consistency of results and to identify those areas that present greater variability. For this analysis, a coefficient variation (CV) map has been created, which shows the dispersion of the results of the three studies with respect to the average values throughout the territory. In general, in most of the territory the CV values do not exceed 20% (Fig. 5), which means that the results are quite robust. But there same sectors in northern of Guatemala, northern border between Honduras and Nicaragua, and central zone of Panama are where the variation exceeds 30%. Then the results in these areas are less robust than in the rest of the territory.

When the KUKAHPÁN-25 map is compared specifically with the GEM-23 map (Fig. 6a), the former yields similar or slightly lower PGA values across large portions of the territory, particularly within the central corridor of Guatemala, Honduras, Nicaragua, and Costa Rica. The observed differences arise primarily from the distinct methodological approaches. The GEM-23 model includes active fault sources explicitly in the hazard calculations, which leads to elevated PGA values

in the immediate vicinity of these faults, contrasting with the zoned seismic source methodology applied in the updated regional study. However, KUKAHPÁN-25 model reports significantly higher PGA values in particular areas, notably the northern region of Guatemala, the Honduras–Nicaragua border zone, and the eastern region of Panama (Fig. 6a). These deviations are attributed to the regional earthquake catalog used in the study (Gamboa-Canté et al., 2024), which benefits from greater completeness in these regions due to the incorporation of data from local seismic networks. In contrast, the earthquake catalog employed in the GEM-23 study, compiled by Di Giacomo et al. (2018), lacks comprehensive coverage in these sectors, potentially compromising the accuracy of the recurrence models generated for those seismic zones. The greater hazard values in eastern Panama according to KUKAHPÁN-25 model are further explained by differences in seismic zonation. While GEM-23 model adopted a zonation scheme proposed by Garcia-Pelaez et al. (2019), which defines relatively broad source zones, the KUKAHPÁN-25 study utilizes a more detailed seismic zonation that aligns more closely with observed seismicity patterns, as described by Alvarado et al. (2017). Notably, the greatest level of agreement between the two models occurs in regions with historically high seismic activity, such as the coastal zones of Guatemala, Nicaragua, and Costa Rica. In these areas, PGA discrepancies remain within a narrow range (−10 % to +10 %), probably due to the availability of complete and stable seismic records that lead to consistent recurrence parameter estimates (Fig. 6a).

On the other hand, the CCASH-22 map reports lower acceleration values across nearly the entire Central American region compared to those presented in the KUKAHPÁN-25 map (Fig. 6b). This discrepancy is once again attributable to differences in the regional earthquake catalogs employed. Specifically, the higher acceleration values identified in the northern and southern transverse belts of Guatemala and El Salvador, the Nicaraguan Depression zone, and the northern segment of the Honduras–Nicaragua border are clearly associated with the enhanced representation of local seismicity in the catalog compiled by Gamboa-Canté et al. (2024). This catalog offers improved completeness in both the volcanic arc and forearc regions, surpassing the coverage provided in the catalog used by Salgado-Gálvez et al. (2022) to obtain the CCASH-22 map. Moreover, the KUKAHPÁN-25 map yields substantially higher acceleration values in Costa Rica, aligning more closely with findings from the local study by Hidalgo-Leiva et al. (2023). Like the study by Gamboa-Canté et al. (2025), the Hidalgo-Leiva et al. (2023) analysis utilizes ground motion models (GMMs) calibrated with local data, resulting in systematically higher PGA estimates than those derived using the GMMs applied in Salgado-Gálvez et al. (2022). Finally, the higher acceleration values observed in the Azuero Peninsula in Panama are primarily the result of improvements in the completeness of the seismic catalog and the refinement of recurrence parameter calculations in the updated regional KUKAHPÁN-25 model.

The KUKAHPÁN-25 map was also compared with the previous maps generated for each country on a national scale. For much of the territory the PGA values of the regional map and those derived from local studies coincide, specifically in the south and northeast of Guatemala, El Salvador, southern Honduras, eastern Nicaragua, southeastern and southwestern Costa Rica, western and eastern of Panama (Fig. 8). In other areas, the accelerations on the regional map are from 10 % to 50 % higher than those from the local studies, specifically in the northern transversal strip of Guatemala, northern coast of Honduras, the southern coast of Nicaragua and northwestern Panama.

A critical aspect is the contextualization of why the regional model differs from local models in certain areas. In Guatemala, the regional model incorporates the segmentation of the Polochic-Motagua fault system (zones G6 and G9 according with Alvarado et al., 2017), which is not fully reflected in local studies, leading to higher PGA values, especially in the northern region. In El Salvador, the regional and local models show strong agreement due to shared input data and zonation (Alvarado et al., 2017; Gamboa-Canté et al., 2024; Mixco Durán, 2020), although the inclusion of the ESFZ in the local model results in localized

differences. In Honduras, differences arise in the northern zone due to the inclusion of the back-arc zones (H4) of Alvarado et al. (2017) and a more complete seismic catalog in the regional study elaborated by Gamboa-Canté et al. (2024), including a higher density of seismic events in northern Honduras, leading to improved completeness of seismicity rates.

In the case of Nicaragua, discrepancies on the coasts are explained by the use of different zonation models and GMM; the regional model (Alvarado et al., 2017) covers broader zones, while the local model (Álvarez, 2022) uses finer segmentation. In Costa Rica, divergence in central regions is linked to different *b-value* fitting methods and catalog completeness (Arroyo-Solórzano and Linkimer, 2021), with regional adjustments capturing more events in KUKAHPÁN-25 model (Gamboa-Canté et al., 2025). In Panama, significant increases in northern areas correspond to a refined representation of the Northern Panama Deformed Belt (P10-C8), as proposed by Alvarado et al. (2017).

5.2. Towards regional implementation and seismic code integration

When compared with national seismic codes, the PGA values of KUKAHPÁN-25 map align with code-based estimates in El Salvador, Honduras, and Panama. In contrast, substantial differences exist in Guatemala, Costa Rica, and Nicaragua whose codes provide significantly lower accelerations. These discrepancies are due to outdated codes, deterministic modeling approaches, or simplified source characterizations. For example, Guatemala's seismic code is based on deterministic calculations and scaled approximations for PGA values (Rodas et al., 2021), while Costa Rica's code has not been updated since 2010 (Acuña et al., 2011), despite newer local models (Hidalgo-Leiva et al., 2023) showing much higher hazard. Furthermore, a recent simulation of potentially critical deterministic scenarios for San José (Benito et al., 2025), concludes that the code's design accelerations are low with the exception of those proposed by the code for the softest soils classified as S4. Nicaragua's national model (Álvarez, 2022) uses different zonation and ground motion models, which also contributes to discrepancies.

We recommend the KUKAHPÁN-25 map (Gamboa-Canté et al., 2025) as a reference for updating national seismic hazard models and building codes across Central America. To facilitate its practical implementation, we encourage national and local governments to establish technical working groups to assess the implications of the updated hazard levels and support the development of local-scale studies, especially in border areas. In these areas, the different assumptions derived from the hazard computations in neighboring countries mean that there are discrepancies and a lack of continuity in the hazard levels; hence, a harmonized assessment is highly recommended. In addition, we recommend that the design response spectrum and load requirements be revised based on the accelerations provided by the regional hazard map.

We also encourage an open-access, detailed explanation of the methodological processes followed to obtain the accelerations assigned in the seismic codes. In some cases, the codes date back many years, and the methodological approaches or assumptions applied are not described in sufficient detail, which makes it more difficult to explain the contrast. We suggest that the methods applied in regional studies should be taken into consideration along with round tables allowing methodological discussions among international experts on the final hazard results in order to define the hazard considered in the seismic codes.

Finally, academic and research institutions can contribute by incorporating new methodologies into their hazard computations. This could be developed by groups of multidisciplinary experts of the different countries. Several research efforts in this regard have been developed (e.g., Hidalgo-Leiva et al., 2023), although the findings have not yet been implemented in the seismic codes. Such initiatives will help ensure that the expected ground motions are more realistically represented in structural design.

5.3. Future research lines

The research work undertaken to improve the seismic hazard model for Central America, as reflected in the KUKAHPÁN-25 map, serves as a starting point for integrating new methodologies with different approaches that can help us better understand the region's tectonic behavior. An example of this is the European Seismic Hazard Model (ESHM20), which, in addition to using the zoned PSHA method, integrates hybrid seismic source models by incorporating fault-type sources and time-dependent activity rate models (non-stationary recurrence models) in some regions (Danciu et al., 2024). Similarly, the Aotearoa New Zealand National Seismic Hazard Model (NZ NSHM, 2022) applies a rigorous analysis of epistemic uncertainties, as in the KUK-AHPÁN project. However, it also incorporates new approaches, such as time dependence, complex rupture modeling, and the inclusion of non-Poissonian occurrence models, among others (Gerstenberger et al., 2024). Finally, the USA National Seismic Hazard Model (NSHM23) introduces innovative approaches such as fault system inversion to implement variable segmentation models that control the likelihood of multi-fault ruptures. This includes explicit segmentation constraints based on distance and geological connectivity (Milner and Field, 2024).

We suggest that the updated regional seismic hazard map for Central America (Gamboa-Canté et al., 2025) be used as a reference map to incorporate recent methodologies in seismic hazard assessments. This will provide a better understanding of expected ground motion accelerations and make them more realistic for seismic risk mitigation strategies.

6. Conclusions

This paper presents an overview of seismic hazard studies developed for Central America at both regional and local scales using the Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) approach including the KUKAHPÁN-25 updated map, a recent regional hazard map developed by Gamboa-Canté et al. (2025). This new model integrates updated seismic and tectonic information and incorporates several methodological advances that significantly improve upon previous regional assessments, such as the RESIS II project (Benito et al., 2012). These methodological updates include:

- 1) Enhanced Seismic Zonation: The updated model uses the regional seismic zonation developed by Alvarado et al. (2017), which improves the representation of fault geometry and subduction angles across the region, contributing to better source characterization.
- 2) Comprehensive Regional Earthquake Catalog: The earthquake catalog (1520–2020) compiled by Gamboa-Canté et al. (2024) includes high-resolution seismic data from national agencies, improving completeness, temporal coverage, and the reliability of recurrence models.
- 3) Region-Specific Scaling Relationships: Incorporating empirical scaling relationships derived from 64 Central American earthquakes (Arroyo-Solórzano et al., 2024), allowing for better estimates of rupture parameters and maximum magnitudes.
- 4) Locally Calibrated Ground Motion Models (GMMs): The use of GMMs calibrated with local strong-motion records from El Salvador (Mixco Durán, 2020) and Costa Rica (Hidalgo-Leiva et al., 2023) provides more accurate site-specific estimates of ground motion.
- 5) Improved Handling of Epistemic Uncertainty: The model applies rigorous statistical methods to assign weights in the logic tree, enhancing transparency and robustness in hazard quantification (Gurjar and Basu, 2022).

These methodological refinements result in a seismic hazard model that better reflects the region's geodynamic complexity and supports more accurate and regionally harmonized seismic design applications.

Overall, the updated regional KUKAHPÁN-25 model, presented here is consistent with recent national studies, demonstrates improved resolution, and exhibits PGA variations under 20 % in most of the region, excluding specific localized areas. Most importantly, it eliminates cross-border discontinuities which are common when aggregating national maps (Fig. 7).

We recommend the adoption of this regional hazard map to update national seismic codes and guide future engineering design. Specific and practical recommendations for stakeholders include:

- 1) For governments and public institutions: Create inter-institutional technical panels to oversee the harmonization of seismic hazard models across borders and ensure policy alignment in hazard assessment methodologies.
- 2) For developers of seismic codes: Incorporate UHS and control earthquake scenarios provided in this study, revise load requirements based on updated PGA values.
- 3) For local planning authorities: Use regional hazard outputs for defining land-use zoning, risk mitigation planning, and infrastructure resilience assessments, especially in border areas.
- 4) For research institutions and academia: Promote collaborative projects focused on improving seismic source models, integrating geological fault data, and expanding regional monitoring networks.

Through these actions, national institutions can ensure that structural design is based on the latest and most reliable hazard data, thus improving resilience and reducing seismic risk across the region.

CRedit authorship contribution statement

Gamboa-Canté Carlos: Writing – original draft, Software, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Arroyo-Solórzano Mario:** Writing – review & editing, Validation, Supervision, Methodology, Funding acquisition, Conceptualization. **Rivas-Medina Alicia:** Writing – review & editing, Validation, Supervision, Methodology, Investigation, Conceptualization. **Benito María Belén:** Writing – review & editing, Validation, Supervision, Project administration, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Conceptualization.

Funding sources

This work was supported by the KUK-APHÁN Project (RTI2018-094827-B-C21/C22) funded by *Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno de España* and MCIN/AEI/10.1303 9/501100011033 and, if applicable, by “FEDER A way to do Europe”. M. Arroyo-Solórzano also acknowledged the funding program number 57645448 from the *Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD)*.

Declaration of competing interest

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests: María Belén Benito reports financial support was provided by Spain Ministry of Science and Innovation. Mario Arroyo-Solorzano reports financial support was provided by German Academic Exchange Service. If there are other authors, they declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge all their colleagues involved in the KUK-AHPÁN Project from Central America. Also, special thanks to Mario A. Salgado-Gálvez and Mario Ordaz for providing the digital model of the Caribbean and Central America Seismic Hazard Model for

Sovereign Parametric Insurance Coverage, which was used to conduct the respective analysis in this article. C. Gamboa-Canté acknowledged to Dra. Alice Burgos of *Dirección General de Investigación (DIGI)* of Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) for supporting research mobility to carry out this work as part of the Erasmus+ KA171 Programme.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105630>.

Data availability

The KUKAHPÁN-25 model used in this study are available at <https://doi.org/10.5281/zenodo.15673184>.

References

- Acuña, R., Bermúdez, J., Cartín, J., Cruz, M., Fernández, C., Granados, J., Guevara, E., Gutiérrez, J., Laporte, M., Mora, R., Poveda, A., Santana, G., Ronald Steinworth, S., 2011. Código Sísmico de Costa Rica 2010, fourth ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Agate, M., Caldarelli, F., Castillo, L., García, A., Giunta, G., Mixco, L., Requena, J., Rubi Tellez, C., Ruiz, M., Sulli, A., Argueta-Platero, A.A., Calderon, H., Luna, J., Torres Bernhard, L.E., 2024. The pattern of brittle deformation in Central America for an assessment of the seismo-tectonic framework. *J. Maps* 20, 1–15. <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2285479>.
- Alfaro, C.S., Kiremidjian, A.S., White, R.A., 1990. *Seismic Zoning and Ground Motion Parameters for El Salvador*. Stanford, California.
- Algermissen, S.T., Dewey, J.W., Langer, C.J., Dillinger, W.H., 1974. The Managua, Nicaragua, earthquake of December 23, 1972: Location, focal mechanism, and intensity distribution. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 64, 993–1004. <https://doi.org/10.1785/BSSA0640040993>.
- Alvarado, G.E., Benito, B., Staller, A., Climent, Á., Camacho, E., Rojas, W., Marroquín, G., Molina, E., Talavera, J.E., Martínez-Cuevas, S., Lindholm, C., 2017. The new Central American seismic hazard zonation: mutual consensus based on up to day seismotectonic framework. *Tectonophysics* 721, 462–476. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.013>.
- Álvarez, L., 2022. Nueva Estimación de la Amenaza Sísmica para Nicaragua. *Revista Tierra* 2, 1–18.
- Ambraseys, N.N., Adams, R.D., 2001. *The Seismicity of Central America: A Descriptive Catalogue 1898-1995*. IMPERIAL COLLEGE PRESS, London, England. <https://doi.org/10.1142/p209>.
- Arroyo-Solórzano, M., Belén Benito, M., Alvarado, G.E., Climent, A., 2024. Empirical earthquake source scaling relations for maximum magnitudes estimations in Central America. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 114, 1539–1567. <https://doi.org/10.1785/0120230100>.
- Arroyo-Solórzano, M., Linkimer, L., 2021. Spatial variability of the b-value and seismic potential in Costa Rica. *Tectonophysics* 814, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228951>.
- Benito, B., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, A., Marroquín, G., Molina, E., Rojas, W., Talavera, E., Escobar, J.J., Alvarado, G., Torres, Y., Pérez-Escalante, M., 2010. *Amenaza sísmica en América Central*. Entimema, Madrid, España.
- Benito, M.B., Arroyo-Solórzano, M., Climent, A., Montero, W., Alvarado, G.E., López, A., García-Lanchares, C., Marchamalo, M., Ornelas, A., Hernández-Rubio, O., Quirós, L., 2025. Seismic hazard scenarios for the city of San José, Costa Rica: evaluation of critical ruptures on nearby faults. *Earthq. Spectra* 1–36. <https://doi.org/10.1177/87552930251319736>.
- Benito, M.B., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, A., Marroquín, G., Molina, E., Rojas, W., Escobar, J.J., Talavera, E., Alvarado, G.E., Torres, Y., 2012. A new evaluation of seismic hazard for the Central America Region. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 102, 504–523. <https://doi.org/10.1785/0120110015>.
- Bommer, J., McQueen, C., Salazar, W., Scott, S., Woo, G., 1998. A case study of the spatial distribution of seismic hazard (El Salvador). *Nat. Hazards* 18, 145–166. <https://doi.org/10.1023/A:1008066017353>.
- Bommer, J.J., Hernandez, D.A., Navarrete, J.A., Salazar, W.M., 1996. Seismic hazard assessments for El Salvador. *Geofis. Int.* 35, 227–244. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1996.35.3.459>.
- Bungum, H., 2007. Numerical modelling of fault activities. *Comput. Geosci.* 33, 808–820. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.10.011>.
- Cáceres, D., Kulhánek, O., 2000. Seismic hazard of Honduras. *Nat. Hazards* 22, 49–69. <https://doi.org/10.1023/A:1008134030510>.
- Camacho, E., Lindholm, C., Dahle, A., Bungum, H., 1997. Seismic hazard assessment in Panama. *Eng. Geol.* 48, 1–6. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(97\)81910-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)81910-2).
- Castillo, L., Ferrera Boza, R., Orlando Chávez, J., Renán Rivera, J., Torre, J., Moncada, J. L., Alvarado, M., Barahona, O., Soto, A., Andino, J.C., 2008. Código Hondureño de Construcción: Normas Técnicas CHOC-08. Colegio de Ingenieros Civiles de Honduras. Tegucigalpa, Honduras.
- Chartier, T., Scotti, O., Lyon-Caen, H., 2019. SHERIFS: open-source code for computing earthquake rates in fault systems and constructing hazard models. *Seismol. Res. Lett.* 90, 1678–1688. <https://doi.org/10.1785/0220180332>.
- Cornell, A., 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 58, 1583–1606. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583>.
- Cruz Calderón, G., Escobar, J.J., Tenorio, C., Lindholm, C., 2001. Evaluación de la amenaza sísmica en Honduras. *Ciencia Tecnol.* 8, 1–16.
- Danciu, L., Giardini, D., Weatherill, G., Basili, R., Nandan, S., Rovida, A., Beauval, C., Bard, P.-Y., Pagani, M., Reyes, C.G., Sesetyan, K., Vilanova, S., Cotton, F., Wiemer, S., 2024. The 2020 European seismic hazard model: overview and results. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 24, 3049–3073. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-3049-2024>.
- Delgado Carranza, S., Montoya Coronado, L., Rugama Idiáquez, M., Fariñas Pérez, M., Chávez Toruño, G., Toruño Méndez, M., Mendoza Mercado, A., Reyes López, S., Lorio Laguna, D., 2021. Norma Sismorresistente Para La Ciudad De Managua (ED-MTI 140622), first ed. Ministerio de Transporte e Infraestructura, Managua, Nicaragua.
- Denyer, P., Montero, W., Alvarado, G., 2003. Atlas tectónico de Costa Rica, first ed. Editorial de la Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Di Giacomo, D., Engdahl, E.R., Storchak, D.A., 2018. The ISC-GEM earthquake catalogue (1904-2014): status after the extension project. *Earth Syst. Sci. Data* 10, 1877–1899. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1877-2018>.
- Espinosa, S., 1996. Probabilistic macroseismic hazard assessment for Nicaragua (preliminary results). *Nat. Hazards* 13, 179–202. <https://doi.org/10.1007/BF00138482>.
- Frankel, A., 1995. Mapping seismic hazard in the central and eastern United States. *Seismol. Res. Lett.* 66, 8–21. <https://doi.org/10.1785/gssrl.66.4.8>.
- Gamboa-Canté, C., Arroyo-Solórzano, M., Benito, B., Aguilar, J., Arroyo, I.G., Camacho-Astigarrabía, E., Castro, D., Flores, O., Linkimer, L., Marroquín, M.G., Mixco-Durán, L., Strauch, W., Talavera, E., Valle, G., Yani-Quiyuch, R., 2024. Seismicity in Central America (1520–2020) and Earthquake catalog compilation for seismic hazard assessments. *Bull. Earthq. Eng.* 22, 7201–7234. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-02059-9>.
- Gamboa-Canté, C., Arroyo-Solórzano, M., Rivas-Medina, A., Benito, B., 2025. Sensitivity analysis on the impact of input parameters on seismic hazard results: a case study of Central America. *Geosciences* 15, 4. <https://doi.org/10.3390/geosciences15010004>.
- García-Pelaez, J., Gee, R., Styron, R., Poggi, V., 2019. PSHA Input Model Documentation for Caribbean and Central America (CCA). Pavia, Italy.
- Gerstenberger, M.C., Bora, S., Bradley, B.A., Dicaprio, C., Kaiser, A., Manea, E.F., Nicol, A., Rollins, C., Stirling, M.W., Thingbaijam, K.K.S., Van Dissen, R.J., Abbott, E. R., Atkinson, G.M., Chamberlain, C., Christophersen, A., Clark, K., Coffey, G.L., de la Torre, C.A., Ellis, S.M., Fraser, J., Graham, K., Griffin, J., Hamling, I.J., Hill, M.P., Howell, A., Hulsev, A., Hutchinson, J., Iturrieta, P., Johnson, K.M., Jurgens, V.O., Kirkman, R., Langridge, R.M., Lee, R.L., Litchfield, N.J., Maurer, J., Milner, K.R., Rastin, S., Rattenbury, M.S., Rhoades, D.A., Ristau, J., Schorlemmer, D., Seebeck, H., Shaw, B.E., Stafford, P.J., Stolte, A.C., Townsend, J., Villamor, P., Wallace, L.M., Weatherill, G., Williams, C.A., Wotherspoon, L.M., 2024. The 2022 Aotearoa New Zealand national seismic hazard model: process, overview, and results. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 114, 7–36. <https://doi.org/10.1785/0120230182>.
- Güendel, F., Bungum, H., 1995. Earthquakes and seismic hazards in Central America. *Seismol. Res. Lett.* 66, 19–25. <https://doi.org/10.1785/gssrl.66.5.19>.
- Gurjar, N., Basu, D., 2022. Epistemic uncertainty in PSHA and seismic hazard characterization using the logic tree approach: Part I, developing the framework. *Pure Appl. Geophys.* 179, 3647–3676. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03143-4>.
- Hidalgo-Leiva, D.A., Linkimer, L., Arroyo, I.G., Arroyo-Solórzano, M., Piedra, R., Climent, A., Díaz, V.S., Esquivel, L.C., Alvarado, G.E., Castillo, R., Carranza-Morales, M.E., Cerdas-Guntanis, L., Escalante-Meza, J., Lobo, S., Rodríguez, M.J., Rojas, W., 2023. The 2022 seismic hazard model for Costa Rica. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 113, 23–40. <https://doi.org/10.1785/0120220119>.
- Johnson, K., Villani, M., Bayliss, K., Brooks, C., Chandrasekhar, S., Chartier, T., Chen, Y.-S., García-Pelaez, J., Gee, R., Styron, R., Rood, A., Simonato, M., Pagani, M., 2023. Global Earthquake Model (GEM) Seismic Hazard Map (version 2023.1 - June 2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8409646>.
- Kalakonas, P., Silva, V., Mouyiannou, A., Rao, A., 2020. Exploring the impact of epistemic uncertainty on a regional probabilistic seismic risk assessment model. *Nat. Hazards* 104, 997–1020. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04201-7>.
- Kiamco, L., Alfaro, B., Avendaño, A., Berman, G., Camacho, E., De Puy, M., Echeverría, H., Dumanoir, R., García, L., Grajales, F., Guerra, F., Hassell, A., Lewis, E., Ng, E., Parada, R., Pinzón, A., Quirós, J.L., Sáez, D., Ulloa, D., Vargas, R., Villareal, R., Yin, J., 2022. Reglamento de Diseño Estructural para la República de Panamá (REP-2021). GACETA OFICIAL, Panama City, Panama.
- Kiremidjian, A.S., Shah, H.C., Lubetin, L., 1977. *Seismic Hazard Mapping for Guatemala*. Stanford, California.
- Kiremidjian, A.S., Shah, H.C., Sutch, P.L., 1982. Seismic hazard and uncertainty analysis of Honduras. *Soil Dynam. Earthq. Eng.* 1, 83–94. [https://doi.org/10.1016/0261-7277\(82\)90017-1](https://doi.org/10.1016/0261-7277(82)90017-1).
- Laporte, M., Lindholm, C., Bungum, H., Dahle, A., 1994. *Seismic Hazard for Costa Rica*. Oslo, Norway.
- Larsson, T., Mattson, C., 1987. Seismic hazard analysis in Nicaragua - a summary. *Dev. Geotech. Eng.* 45, 439–453. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-98955-0.50037-9>.
- Llenos, A.L., Michael, A.J., Shumway, A.M., Rubinstein, J.L., Haynie, K.L., Moschetti, M. P., Altekruze, J.M., Milner, K.R., 2024. Forecasting the long-term spatial distribution of earthquakes for the 2023 U.S. National seismic hazard model using gridded seismicity. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 114, 2028–2053. <https://doi.org/10.1785/0120230220>.

- López, M.A., Hernández de Paz, J., Hasbun, J.C., 2021. MODERNIZACIÓN DE LAS PROVISIONES QUE RIGEN EL DISEÑO SÍSMICO. San Salvador, El Salvador.
- Mancini, S., Marzocchi, W., 2024. SimpleTAS: a benchmark earthquake forecasting model suitable for operational purposes and seismic hazard analysis. *Seismol. Res. Lett.* 95, 38–49. <https://doi.org/10.1785/0220230199>.
- Milner, K.R., Field, E.H., 2024. A comprehensive fault-system inversion approach: methods and application to NSHM23. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 114, 486–522. <https://doi.org/10.1785/0120230122>.
- Mixco Durán, L.E., 2020. Evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador. El Salvador. San Salvador.
- Mizrahi, L., Nandan, S., Mena Cabrera, B., Wiemer, S., 2024. suiETAS: developing and testing ETAS-based earthquake forecasting models for Switzerland. *Bull. Seismol. Soc. Am.* <https://doi.org/10.1785/0120240007>.
- Montero, W., Peraldo, G., Rojas, W., 1997. Proyecto de AMENAZA sísmica de America central. San José, Costa Rica.
- Mortgat, C.P., Zsutty, T.C., Shah, H.C., Lubetkin, L., 1977. A Study of Seismic Risk for Costa Rica. Stanford, California.
- Pagani, M., García-Pelaez, J., Gee, R., Johnson, K., Poggi, V., Silva, V., Simionato, M., Styron, R., Viganò, D., Danciu, L., Monelli, D., Weatherill, G., 2020. The 2018 version of the global earthquake model: hazard component. *Earthq. Spectra* 36, 226–251. <https://doi.org/10.1177/8755293020931866>.
- Paiz Aragón, B., Cruz, D., Monzón Despang, H., Rodas, J.A., Chang Campang, R., Flores, O., González, W., Ligorria, J.P., 2024. NSE 2 - DEMANDAS ESTRUCTURALES Y CONDICIONES DE SITIO. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES, Guatemala City, Guatemala.
- Plafker, G., 1976. Tectonic aspects of the Guatemala earthquake of 4 February 1976. *Science*, New Series 193, 1201–1208. <https://doi.org/10.1126/science.193.4259.1201>.
- Rivas-Medina, A., Benito, B., Miguel Gaspar-Escribano, J., 2018. Approach for combining fault and area sources in seismic hazard assessment: application in south-eastern Spain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18, 2809–2823. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2809-2018>.
- Rodas, J., Monzón, H., Callejas, F., 2021. ANÁLISIS DE RIESGO SÍSMICO PARA LA REPÚBLICA DE GUATEMALA. Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- Rojas, W., Bungum, H., Lindholm, C., 1993a. Historical and recent earthquakes in Central America. *Rev. Geol. Am. Cent.* 16, 5–22. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i16.13242>.
- Rojas, W., Cowan, A., Lindholm, C., Dahle, C., Bungum, H., 1993b. Regional Seismic Zonation for Central America: A Preliminary Model, Program of Reduction of Natural Disasters in Central America. Report of the Research Council of Norway (NORSAR), Oslo, Norway.
- Salazar, W., 2018. Principles of probabilistic seismic hazard assessment (PSHA) and site effect evaluation and its application for the volcanic environment in El Salvador. In: Svalova, V. (Ed.), *Earthquakes - Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction*. InTechOpen, pp. 119–146. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75845>.
- Salazar, W., Brown, L., Hernández, W., Guerra, J., 2013. An earthquake catalogue for El Salvador and neighboring central American countries (1528-2009) and its implication in the seismic hazard assessment. *Journal of Civil Engineering and Architecture* 7, 1018–1045. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2013.08.011>.
- Salgado-Gálvez, M.A., Ordaz, M., Singh, S.K., Pérez-Campos, X., Huerta, B., Bazzurro, P., Fagà, E., 2022. A Caribbean and Central America seismic hazard model for Sovereign parametric insurance coverage. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 113, 1–22. <https://doi.org/10.1785/0120220117>.
- Shah, H.C., Mortgat, C.P., Kiremidjian, A., Zsutty, T.C., 1975. A Study of Seismic Risk for Nicaragua, Part I. Stanford, California.
- Shedlock, K.M., 1999. Seismic hazard map of North and Central America and the Caribbean. *Ann. Geofisc.* 42, 977–997. <https://doi.org/10.4401/ag-3786>.
- Singh, S.K., Gutiérrez, C., Arboleda, J., 1993. PELIGRO SÍSMICO EN EL SALVADOR. México.
- Styron, R., Pagani, M., 2020. The GEM global active faults database. *Earthq. Spectra* 36, 160–180. <https://doi.org/10.1177/8755293020944182>.
- Suárez, G., Pardo, M., Domínguez, J., Ponce, L., Montero, W., Boschini, I., Rojas, W., 1995. The Limón, Costa Rica earthquake of April 22, 1991: back arc thrusting and collisional tectonics in a subduction environment. *Tectonics* (Wash., D. C.) 14, 518–530. <https://doi.org/10.1029/94TC02546>.
- Tanner, J.G., Shedlock, K.M., 2004. Seismic hazard maps of Mexico, the Caribbean, and central and South America. *Tectonophysics* 390, 159–175. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.03.033>.
- Taylor, W., Santos, P., Dahle, A., Bungum, H., 1992. Digitization of Strong Motion Data and Estimation of PGA Attenuation.
- Vergara Muñoz, A., 1991. Probabilistic seismic hazard maps for Panama. *Nat. Hazards* 4, 1–6. <https://doi.org/10.1007/BF00126555>.
- Vergara Muñoz, A., 1989. Assessment of earthquake hazard in Panama based on seismotectonic regionalization. *Nat. Hazards* 2, 115–131. <https://doi.org/10.1007/BF00141386>.
- Villagran, M., Lindholm, C., Dahle, A., Cowan, H., Bungum, H., 1997. Seismic hazard assessment for Guatemala city. *Nat. Hazards* 14, 189–205. <https://doi.org/10.1007/BF00128266>.
- White, R.A., Harlow, D.H., Alvarez, S., 1987. The san Salvador earthquake of October 10, 1986—Seismological aspects and other recent local seismicity. *Earthq. Spectra* 3, 419–434. <https://doi.org/10.1193/1.1585439>.
- White, R.A., Ligorria, J.P., Cifuentes, I.L., 2004. Seismic History of the Middle America Subduction Zone along El Salvador, Guatemala, and Chiapas, Mexico: 1526-2000. *Geological Society of America*, pp. 379–396. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2375-2.379>.
- Yong, C., Ling, C., Güendel, F., Kulhánek, O., Juan, L., 2002. Seismic hazard and loss estimation for Central America. *Nat. Hazards* 25, 161–175. <https://doi.org/10.1023/A:1013722926563>.

5. Discusión

5.1. Discusión de los resultados del catálogo sísmico regional

El catálogo regional de terremotos resultante comprende 260,548 terremotos ocurridos entre 1520 y 2020, con magnitudes que varían desde M_w 1.0 hasta M_w 7.9, y profundidades de hasta 300 km (Alvarado et al., 2017; Barrera-Lopez et al., 2022; Hayes et al., 2018). La Figura 11 presenta el nuevo catálogo sísmico regional desarrollado en este estudio, incluyendo los sismos de $M_w \geq 3.0$. La distribución porcentual según el régimen tectónico y la ubicación geográfica se presenta en la Tabla 6.

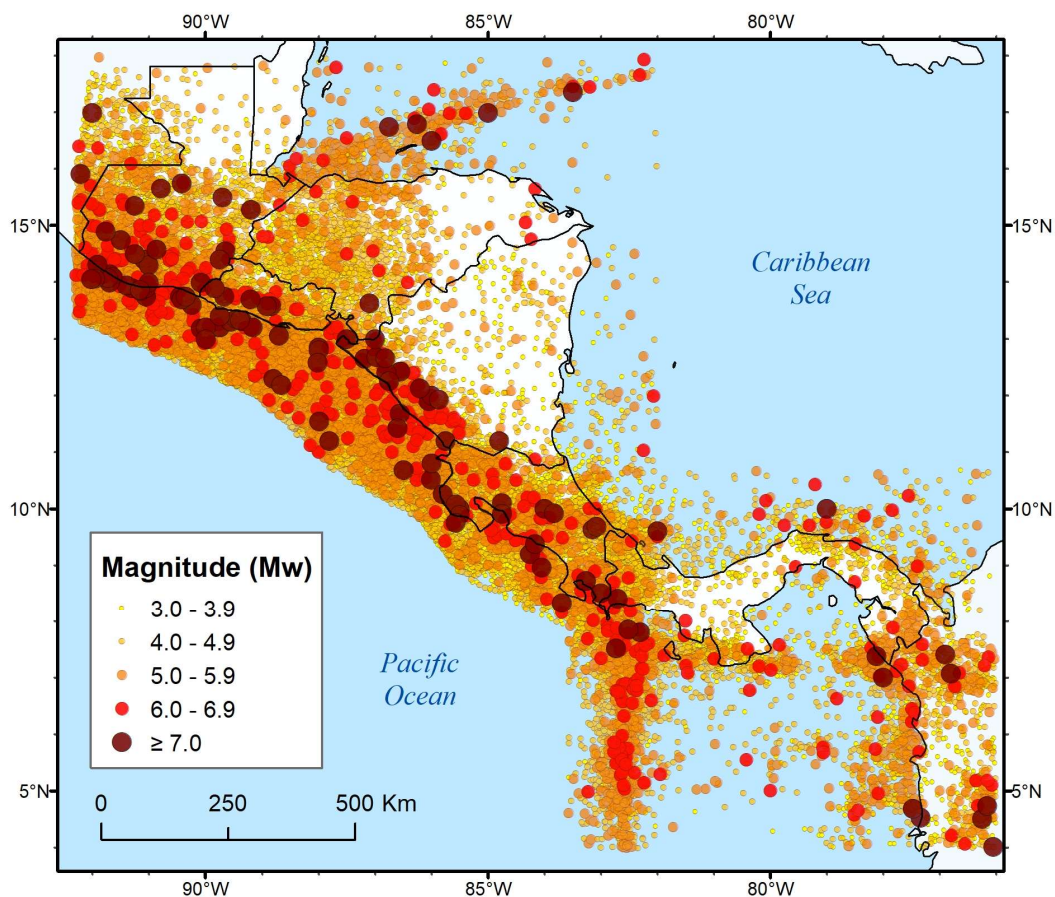


Figura 11: Catálogo sísmico regional para Centroamérica (1520 – 2020).

Tabla 6: Número de terremotos y porcentaje respecto a todo el catálogo sísmico según ubicación geográfica y régimen tectónico.

Country	Number of events	Percentage	Tectonic regime	Number of events	Percentage
Guatemala	27 909	10.71%	Shallow Crustal	110 262	42.32%
Honduras	4117	1.58%	Volcanic Arc	55 692	21.37%
El Salvador	74 715	28.68%	Transform boundaries	6162	2.37%
Nicaragua	47 322	18.16%	Others	48 408	18.58%
Costa Rica	76 030	29.18%	Interplate	91 786	35.23%
Panamá	30 455	11.69%	Intraplaca	58 500	22.45%

En general, se observa que los países de El Salvador y Costa Rica poseen la mayor cantidad de sismos en todo el catálogo sísmico, representando aproximadamente el 58% (Tabla 6). Luego sigue Nicaragua con alrededor del 18%, seguido de Panamá y Guatemala con un 12% y 11%, respectivamente. Por último, Honduras destaca por tener la menor cantidad de sismos en su territorio (menos del 2%), debido a parte de su menor sismicidad, a que no cuenta con las mejores condiciones de instrumentación sísmica ni con grupos expertos en redes sísmicas, en comparación con otros países centroamericanos. La red disponible actualmente es muy escasa, lo que implica que se detectan menos eventos (Figura 3). Además, el país es menos sísmico que el resto de la región, al no estar directamente influenciado por la zona de subducción. Su sismicidad está mayormente asociada al límite entre las placas Caribe y Norteamericana, donde se ubica la Falla Swan, generadora de los sismos más importantes del país, aunque la mayoría ocurren en zona marina (Figura 1). Sin embargo, el catálogo en esta región ha sido complementado con datos provistos por las redes sísmicas de Guatemala, El Salvador y Nicaragua.

La Figura 12 resume la distribución espacial resultante de la M_c (magnitud de completitud) en Centroamérica. La variación espacial de la M_c muestra que las zonas sísmicas correspondientes al arco volcánico centroamericano presentan la mejor completitud, con $M_c = M_w \leq 3.0$. Además, se observa que las zonas con mejor registro son aquellas con $M_c = M_w 2.5$, las cuales corresponden a sectores con mejor cobertura de estaciones sísmicas locales. Esto es evidente en las zonas del arco volcánico de Nicaragua y Costa Rica, así como en las áreas limítrofes con territorio colombiano al este de Panamá (Figura 12a). En contraste, las zonas sísmicas en Honduras presentan el valor de M_c más alto ($M_w \geq 4.0$), debido a la ausencia de

una red sísmica local y la limitada recopilación de eventos sísmicos en ese sector, en comparación con el resto de la región (Figura 12a). Una situación similar ocurre en las regiones del norte de Guatemala y Nicaragua, con baja completitud y valores altos de M_c (Figura 12).

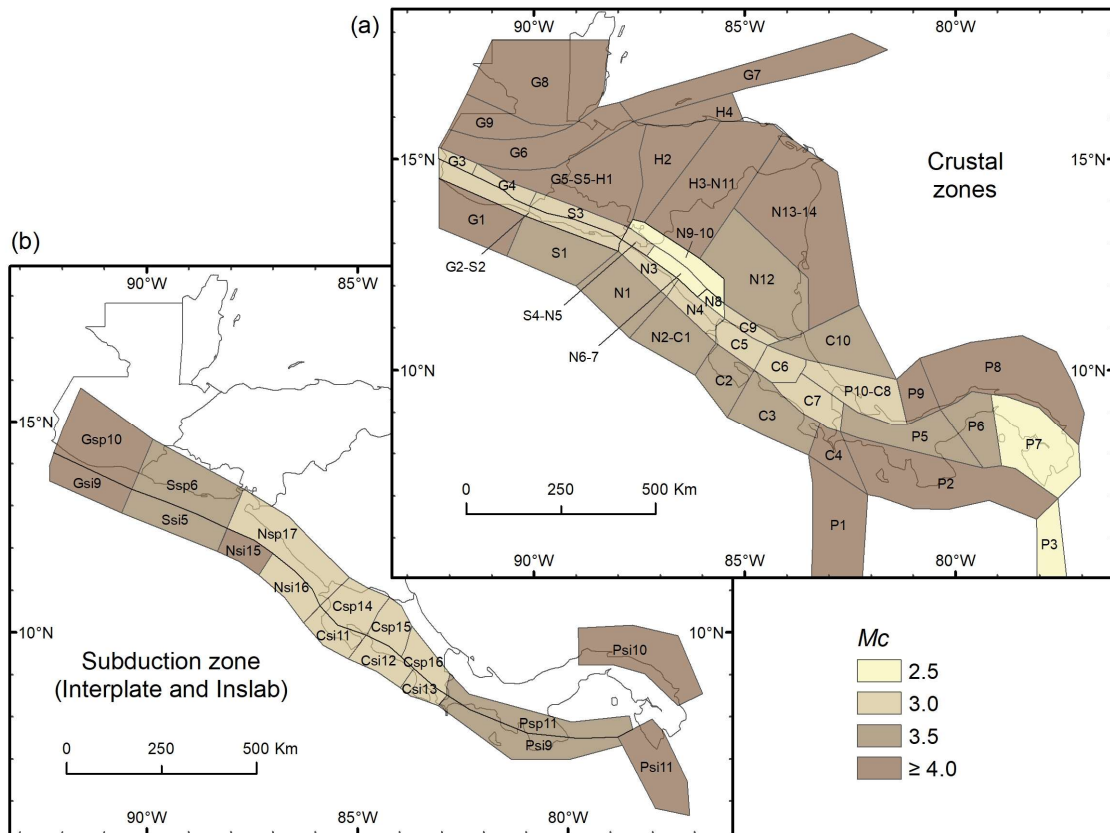


Figura 12: Distribución de la magnitud de completitud (M_c) en las zonas sísmicas propuestas por Alvarado et al. (2017).

En general, las zonas pertenecientes al borde superior de la losa en subducción en Centroamérica exhiben una completitud homogénea con $M_c = M_w 3.5$. Sin embargo, algunas áreas en Guatemala presentan valores más altos de M_c ($M_w \geq 4.0$) y, por tanto, una completitud deficiente comparada con el resto de los países de la región (Figura 12a). Panamá también muestra completitud deficiente en las regiones del sur del país (C4, P1, P2), lo cual se atribuye a la baja completitud de estas zonas sísmicas debido a lagunas de cobertura, ya que están ubicadas principalmente en zona marina, lo que dificulta el registro de sismos de pequeña magnitud (Figura 12a).

Por último, las zonas interplaca e intraplaca presentan valores de M_c con una tendencia geográficamente discontinua, aunque el valor es el mismo para cada país

(Figura 12b). Guatemala y Panamá presentan la completitud más deficiente, por las mismas razones explicadas previamente para la sismicidad cortical. El Salvador muestra una completitud homogénea ($M_c = M_w 3.5$) en la zona de subducción (Ssi5, Ssp6) (Figura 12b), mientras que Nicaragua y Costa Rica presentan la mejor completitud en la zona de subducción, con un M_c de $M_w 3.0$, lo que evidencia que la proximidad de la fosa a las penínsulas, así como los procesos de mejora y densificación de las redes sísmicas locales, contribuyen a mejorar la completitud espacial en estos sectores (Figura 12b).

Tabla 7: Análisis de completitud en el tiempo del catálogo sísmico de Centroamérica

Mw range	Time of completeness	
	Statistical analysis of the standard deviation (σ)	Percentage of cumulative seismic events [%N(m)]
Mw < 2.0	¿2001 – 2005?	¿2005?
2.0 – 2.4	¿1996 – 2000?	¿2000?
2.5 – 2.9	¿1996 – 2000?	¿1995?
3.0 – 3.4	1991 – 1995	1992
3.5 – 3.9	1991 – 1995	1992
4.0 – 4.4	1986 – 1990	1985
4.5 – 4.9	1971 – 1975	1975
5.0 – 5.4	1966 – 1970	1963
5.5 – 5.9	1956 – 1960	1950
6.0 – 6.4	1911 – 1915	1915
6.5 – 6.9	1896 – 1900	1900
7.0 – 7.4	1801 – 1805	1830
7.5 – 7.9	¿1726 – 1730?	¿1765?

Los resultados sobre la evolución temporal de la completitud muestran que, para los rangos inferiores de M_w , no es posible asegurar con suficiente certeza el intervalo temporal ni el año en que se logra la completitud (Tabla 7). Esto se debe a que la detección de eventos sísmicos de $M_w < 3.0$ comenzó principalmente a finales del siglo XX, y hasta la fecha, algunos países aún carecen de cobertura suficientemente densa de estaciones sísmicas para capturar estos eventos. Como se muestra en la Figura 13, el espectrograma de magnitudes para el periodo instrumental no indica claramente una concentración de eventos para $M_w < 3.0$. Por tanto, se infiere que los años de completitud para estas magnitudes se extienden hasta inicios del siglo XXI, cuando comenzó la actualización de las redes sísmicas locales con equipos digitales. En contraste, los sismos de $M_w \geq 7.5$ fueron

registrados mayormente en el periodo histórico previo a la era instrumental, dificultando determinar con certeza cuándo comenzó el registro completo de estos eventos.

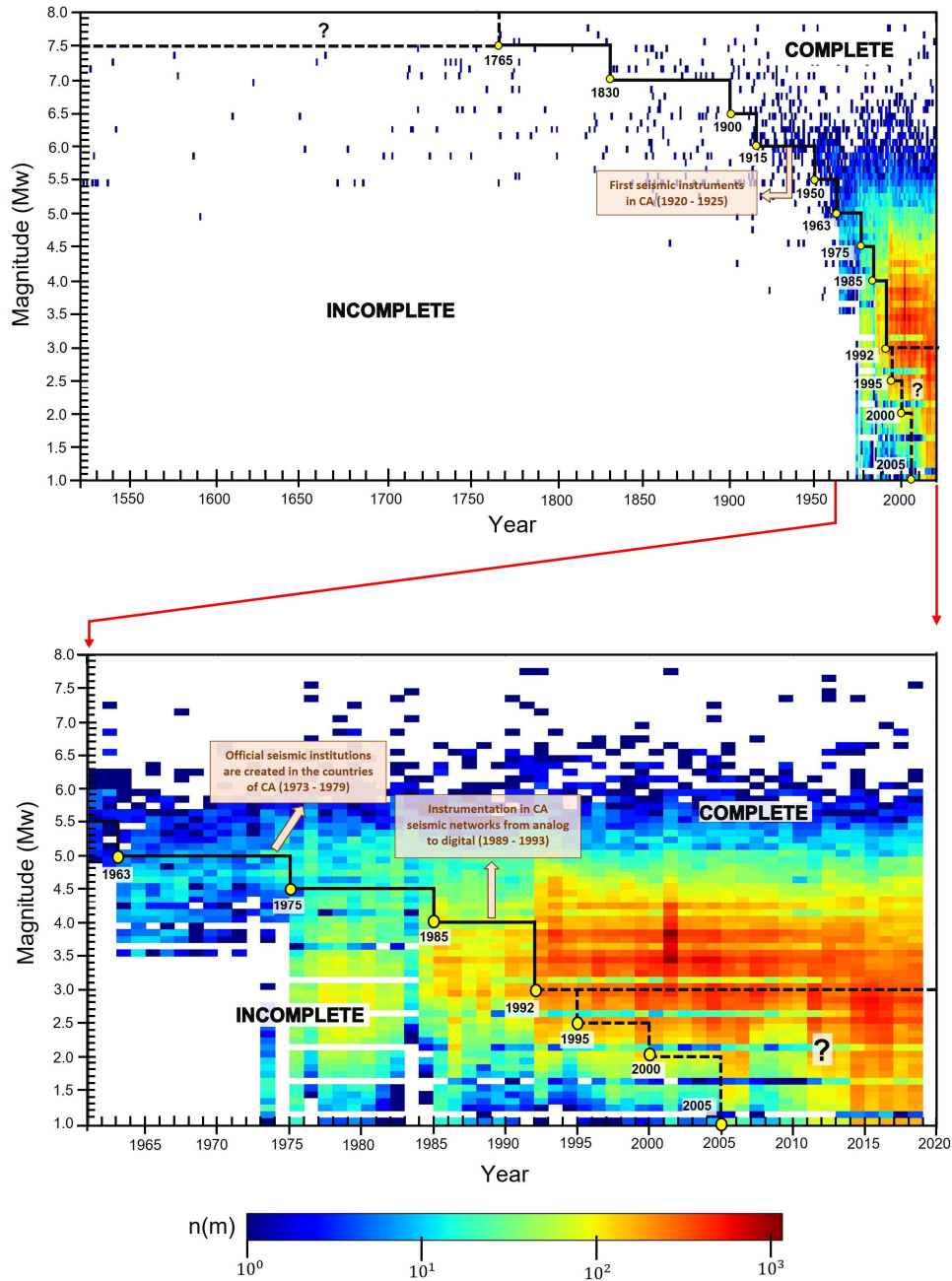


Figura 13: Completitud en el tiempo para Centroamérica calculada con el método de Stepp (1972) para el catálogo sísmico regional.

Al comparar nuestros resultados con los de estudios previos realizados en la región (Alvarado et al., 2017; Arroyo-Solórzano & Linkimer, 2021; Benito et al., 2012), se observa que la mayoría de los intervalos de magnitud alcanzan la completitud

durante el periodo instrumental a partir de $M_w < 5.0$, tal como fue reportado en el último estudio regional para Centroamérica (Benito et al., 2012). Sin embargo, los años en que se alcanza la completitud para cada intervalo de magnitud en nuestro estudio son más recientes. Esto se debe a que los registros más completos para estas magnitudes se concentran predominantemente a partir de mediados del siglo XX (Figura 13), lo cual podría afectar la estimación de tasas de recurrencia sísmica $[\dot{n}(m)]$ en la región. Este hecho debe ser considerado para futuras evaluaciones de peligrosidad sísmica en Centroamérica. Además, nuestros resultados coinciden estrechamente con los estimados por Arroyo-Solórzano & Linkimer (2021) en un estudio realizado para Costa Rica, indicando que los datos del nuevo catálogo sísmico regional respecto a los años en que se alcanza la completitud son consistentes y confiables para su uso en estudios de peligrosidad sísmica en los países de Centroamérica.

5.2. Discusión de los resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros inputs en los resultados finales de peligrosidad sísmica

Se realizó un análisis de sensibilidad para las cuatro combinaciones de métodos de depuración y ajuste del *b-valor*: (1) RSB-bLS, (2) RSB-bML, (3) UHR-bLS y (4) UHR-bML. Según los resultados obtenidos, el bajo valor de CV ($CV < 0.10$) en la mayoría de las zonas de Centroamérica indica un bajo impacto de estos métodos en los resultados de peligrosidad sísmica (Figura 14). Por el contrario, se encontró una alta consistencia en las aceleraciones calculadas bajo las diferentes combinaciones de métodos de depuración y ajuste del modelo de recurrencia. Esto indica la estabilidad de las aceleraciones pronosticadas por las distintas combinaciones, independientemente del método utilizado en esta fase de cálculo.

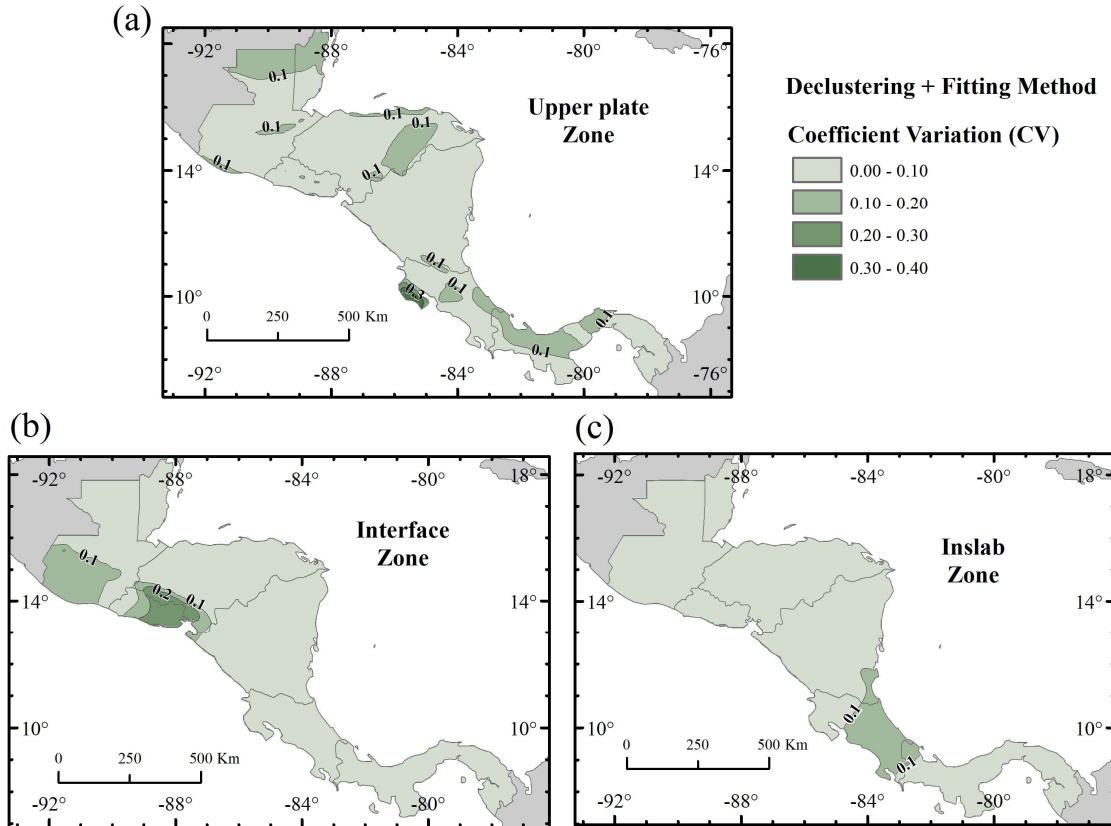


Figura 14: Variabilidad relacionada con los métodos de ajuste del *b*-valor y el método de depuración para la (a) zona cortical, (b) zona de interplaca y (c) zona intraplaca.

El otro aspecto analizado es el impacto de las relaciones de escalamiento para obtener la M_{max} de las zonas en los resultados finales de peligrosidad (Figura 15). En este caso, los valores de CV no superan el 5% en el régimen de placa superior, lo que muestra que no existe una variabilidad significativa en los resultados de peligrosidad según la relación de escalamiento utilizada o, en última instancia, el M_{max} correspondiente a cada zona. El régimen de interfaz exhibe la mayor variabilidad de datos, notablemente en el occidente de Guatemala y la región sur de Panamá (Península de Azuero), con un valor de CV de hasta 10%. Finalmente, en el régimen intraplaca no hay una variabilidad aparente según la distribución espacial del CV, ya que no supera el 1%. Esto puede deberse a que las relaciones disponibles incluidas en el análisis son más adecuadas para contextos de placa superior e intraplaca que para regímenes de interfaz. En cualquier caso, se puede concluir del análisis que estas relaciones de escalamiento tienen un bajo impacto en los resultados de peligrosidad.

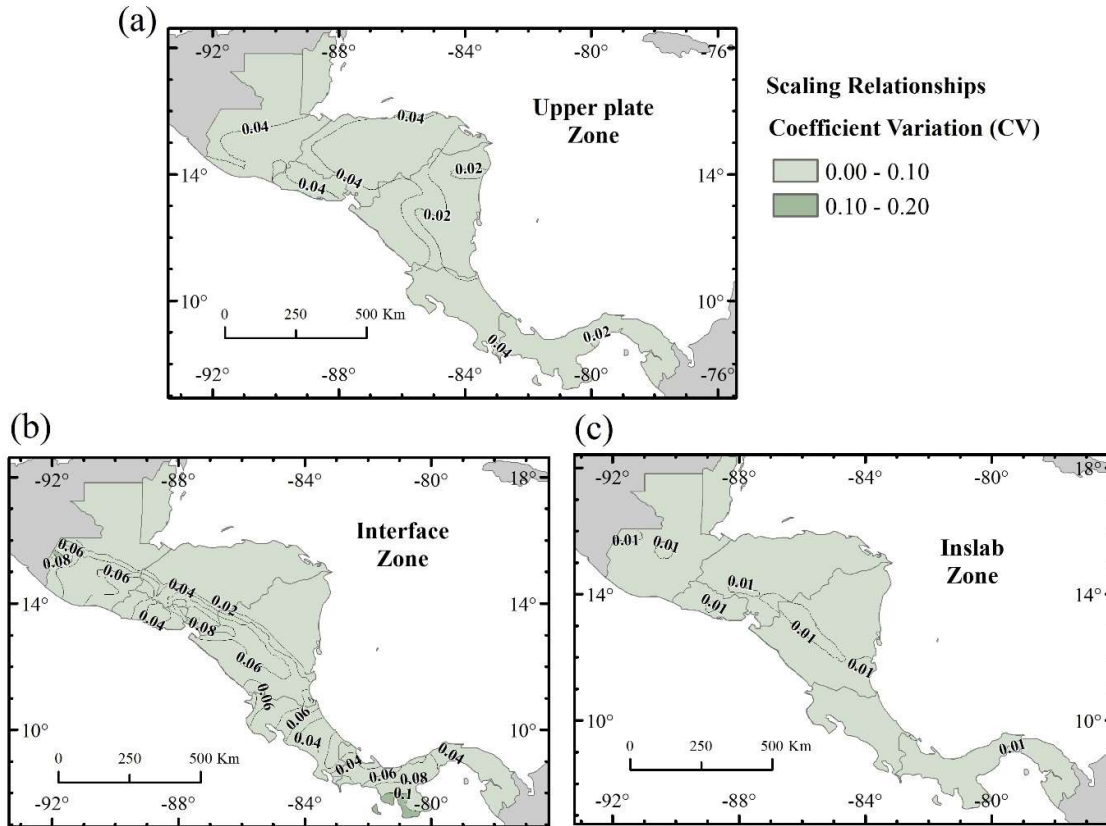


Figura 15: Variabilidad relacionada con las leyes de escalamiento para la (a) zona cortical, (b) zona de interplaca y (c) zona intraplaca.

El último aspecto abordado en el análisis de sensibilidad es el impacto de los modelos GMM (Ground Motion Models) (Figura 16). Estos modelos son los que tienen mayor impacto en los resultados de peligrosidad entre todas las variables analizadas. En el régimen cortical, se observan valores altos de CV ($CV > 0.30$) en ciertas zonas del arco posterior (*Backarc*) de Guatemala y Honduras, el arco volcánico (*Volcanic arc*) de Costa Rica y el antearco (*Forearc*) de Panamá. Esta dispersión también es evidente en algunas zonas del *Backarc*, mientras que en otras la variabilidad se reduce, con menor dispersión entre los resultados dados por los distintos modelos, con valores de CV en el rango de 0.10 – 0.20.

Para las zonas de *Forearc*, particularmente las cercanas a la costa del Pacífico, todos los modelos GMM muestran una dispersión evidente (Figura 16a). Esta variabilidad se refleja en el mapa, con valores de CV alrededor de 0.2 – 0.3 a lo largo de las costas de Guatemala, El Salvador y Nicaragua. Sin embargo, en las zonas de antearco asociadas con la Fosa Mesoamericana (MAT), los modelos de Cauzzi et al. (2015) y Akkar et al. (2014) tienden a alinearse más con la media, lo

que hace que estos modelos sean más adecuados para dichas zonas. En contraste, los modelos de Boore et al. (2014) y Atkinson & Boore (2011) tienden a sobreestimar ligeramente. Esto también se puede evidenciar en los perfiles de aceleración para el régimen cortical (Figura 17).

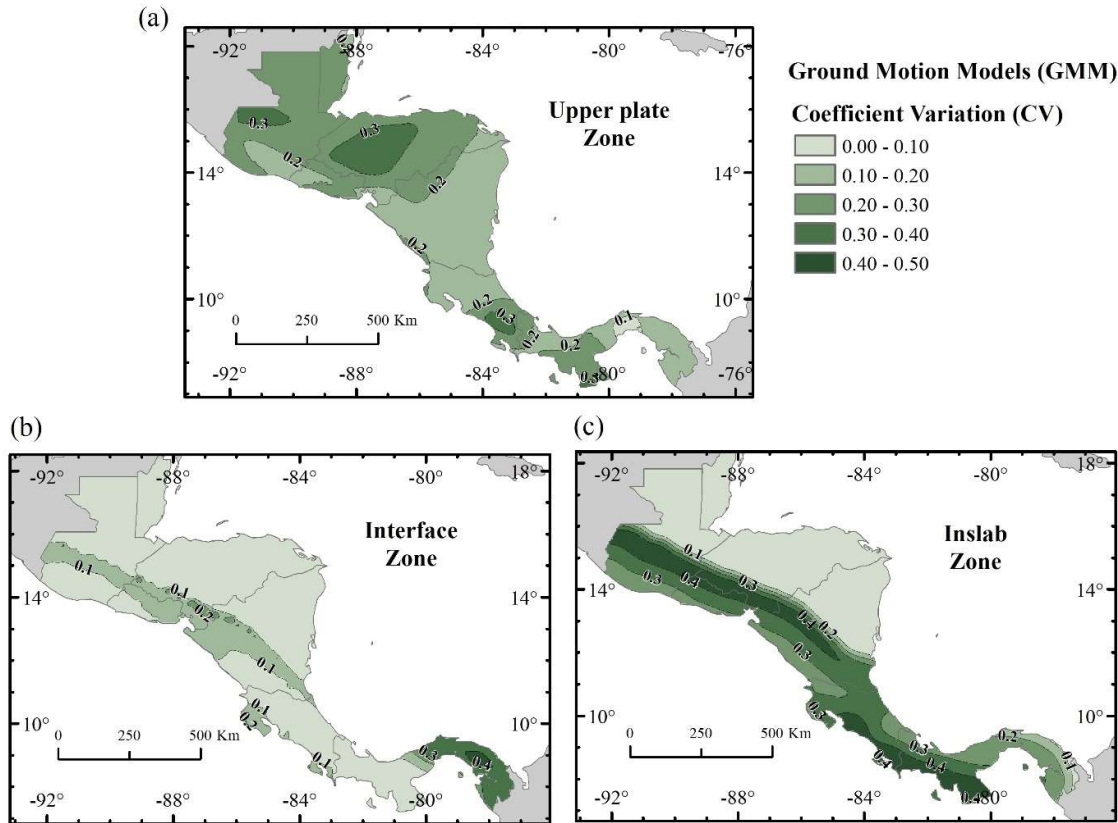


Figura 16: Variabilidad relacionada con los modelos de movimiento fuerte (GMM) para la (a) zona cortical, (b) zona de interplaca y (c) zona intrapalca.

En el régimen de interplaca, la mayor parte de la región presenta variaciones relativamente bajas ($CV < 0.20$) (Figura 16b). La mayoría de los modelos GMM se ajustan bien con la media de los datos, tal como se muestra en el perfil de aceleraciones (Figura 18a). Sin embargo, algunas zonas de Costa Rica presentan alta dispersión, posiblemente debido a la complejidad en la geometría de la subducción en estas áreas, donde la placa subducida es plana y de menor profundidad (Figura 18a).

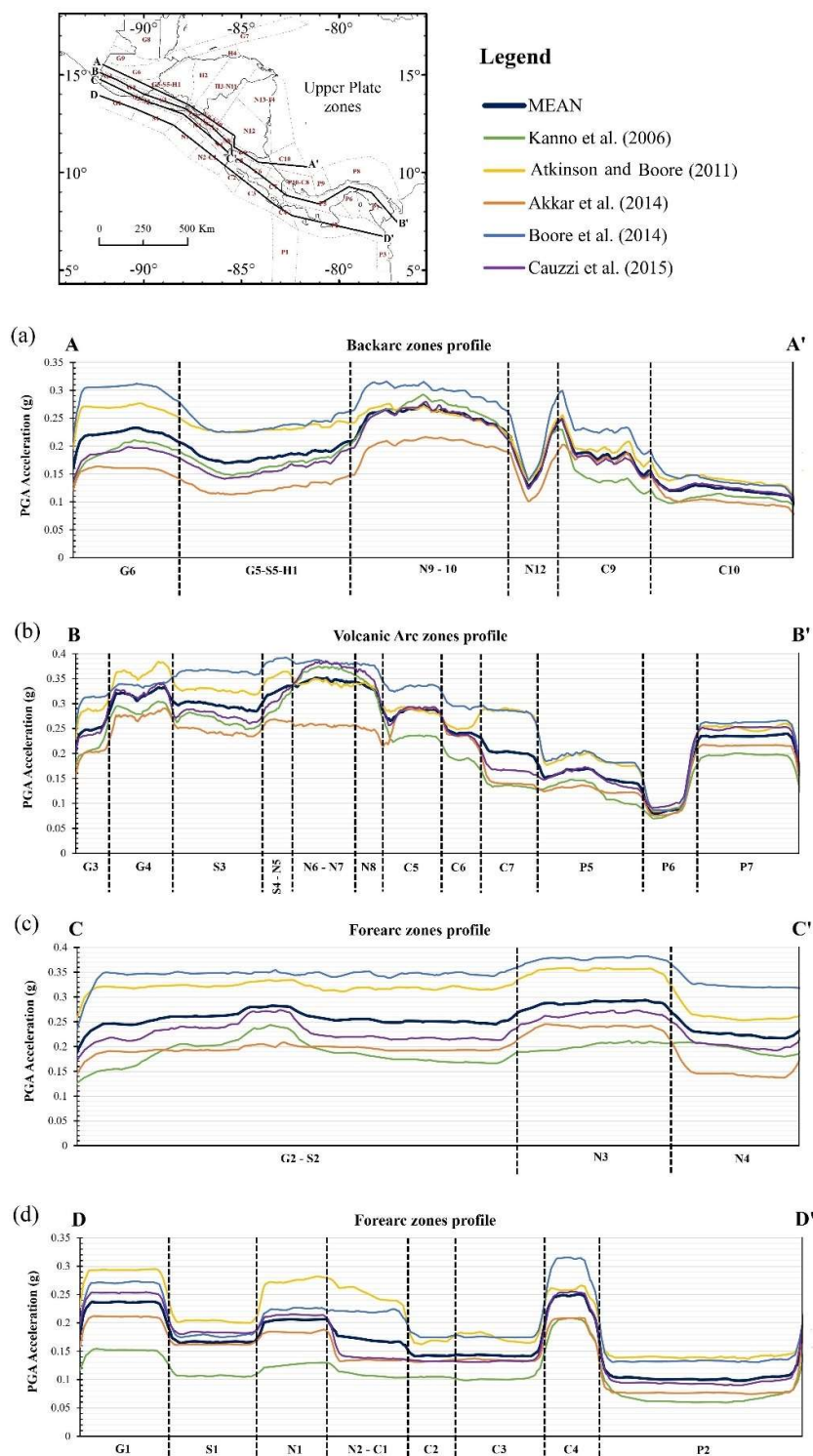


Figura 17: Valores de PGA proporcionados por diferentes GMM a lo largo de los perfiles dibujados para las zonas corticales en (a) *Backarc*, (b) *Volcanic arc*, (c) *Middle Forearc* y (d) *Ocean Forearc* propuestas por Alvarado et al. (2017). La nomenclatura corresponde a las zonas representadas en la Figura 12.

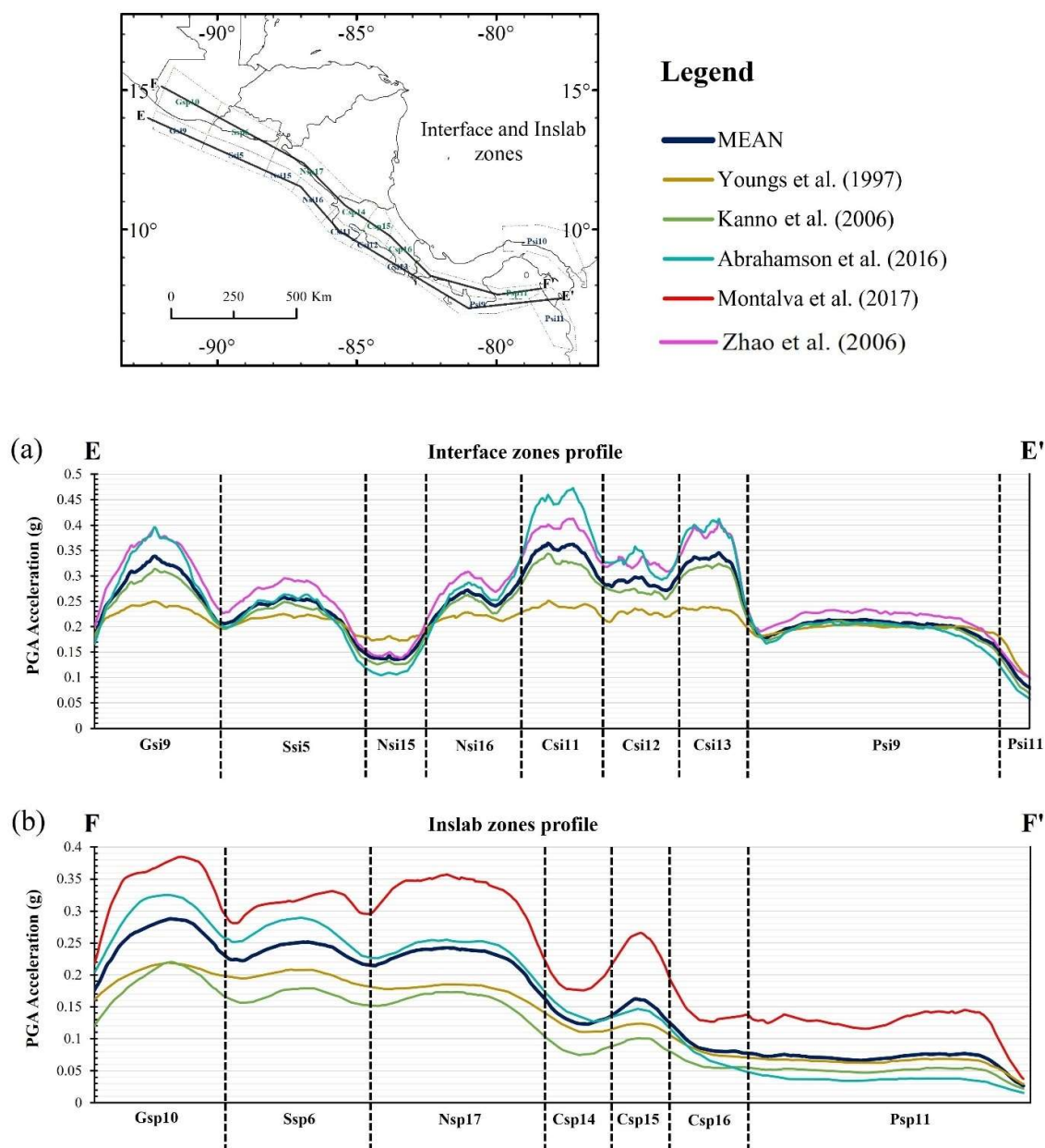


Figura 18: Valores de PGA proporcionados por diferentes GMM a lo largo de los perfiles dibujados para las zonas de subducción en (a) las zonas interplaca y (b) las zonas de intraplaca propuestas por Alvarado et al. (2017). La nomenclatura corresponde a las zonas representadas en la Figura 12.

Finalmente, el régimen intraplaca presenta las mayores variaciones en la mayoría de la región debido a la geometría profunda de la subducción (Figura 16). Por un lado, el modelo de Montalva et al. (2017) muestra una sobreestimación significativa en todas las zonas sísmicas, lo cual puede atribuirse a su calibración para la subducción profunda en Chile (Figura 18b). Por otro lado, el modelo de

Abrahamson et al. (2016) ofrece un ajuste más equilibrado, alineándose mejor con la media en varias zonas intraplaca.

El análisis de sensibilidad concluyó con la propuesta de un árbol lógico compuesto por 4 nodos relacionados con los métodos para definir los parámetros de entrada: métodos de depuración, métodos de ajuste del modelo de Gutenberg-Richter, relaciones de escalamiento y modelos GMM (Figura 19). En cada nodo se consideran diferentes ramas y el peso de cada una se deriva del análisis de sensibilidad realizado, teniendo en cuenta particularmente los valores de CV, el error cuadrático medio (MSE) y el error cuadrático medio raíz (RMSE) entre los datos observados y predichos.

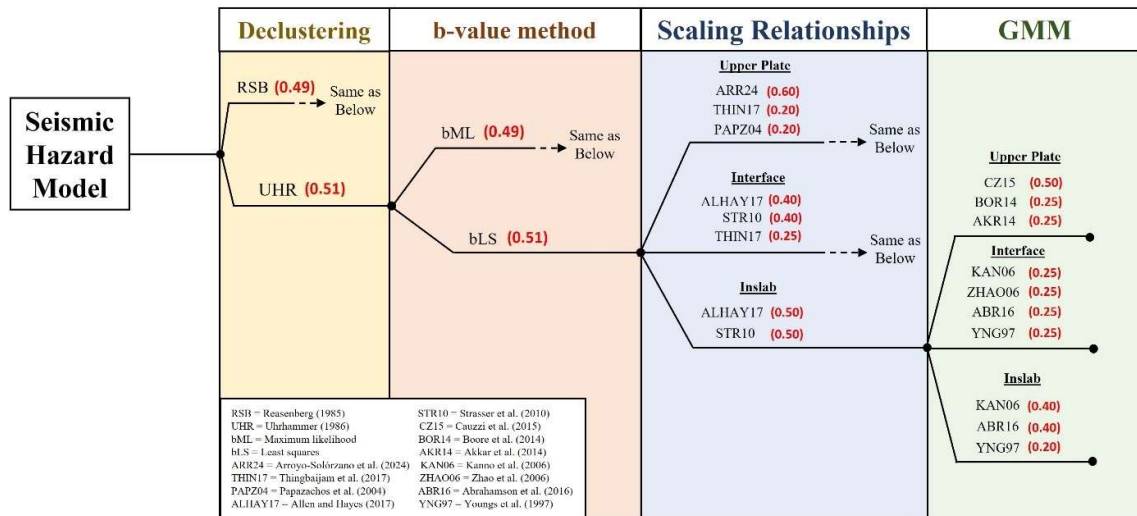


Figura 19: Propuesta de árbol lógico para la evaluación de la peligrosidad sísmica en Centroamérica.

Utilizando este árbol lógico, se realizó un nuevo cálculo regional de peligrosidad sísmica para Centroamérica y se generaron mapas actualizados de la región desde su último estudio realizado en 2012 bajo el marco del proyecto RESIS II (Benito et al., 2012) (Figura 20). Las principales novedades incluidas en estos nuevos mapas son: la implementación de la zonificación sísmica propuesta por Alvarado et al. (2017), la actualización del catálogo regional de terremotos con datos de agencias locales hasta 2020 (Gamboa-Canté et al. 2024), la implementación de relaciones de escalamiento específicas para Centroamérica (Arroyo-Solórzano et al., 2024), y el control de las incertidumbres epistémicas a través de una propuesta de árbol lógico derivada del análisis de sensibilidad de los parámetros de los modelos en los resultados de peligrosidad. A esta nueva generación de mapas de peligrosidad sísmica se les denominó modelo *KUKAHPÁN-25*.

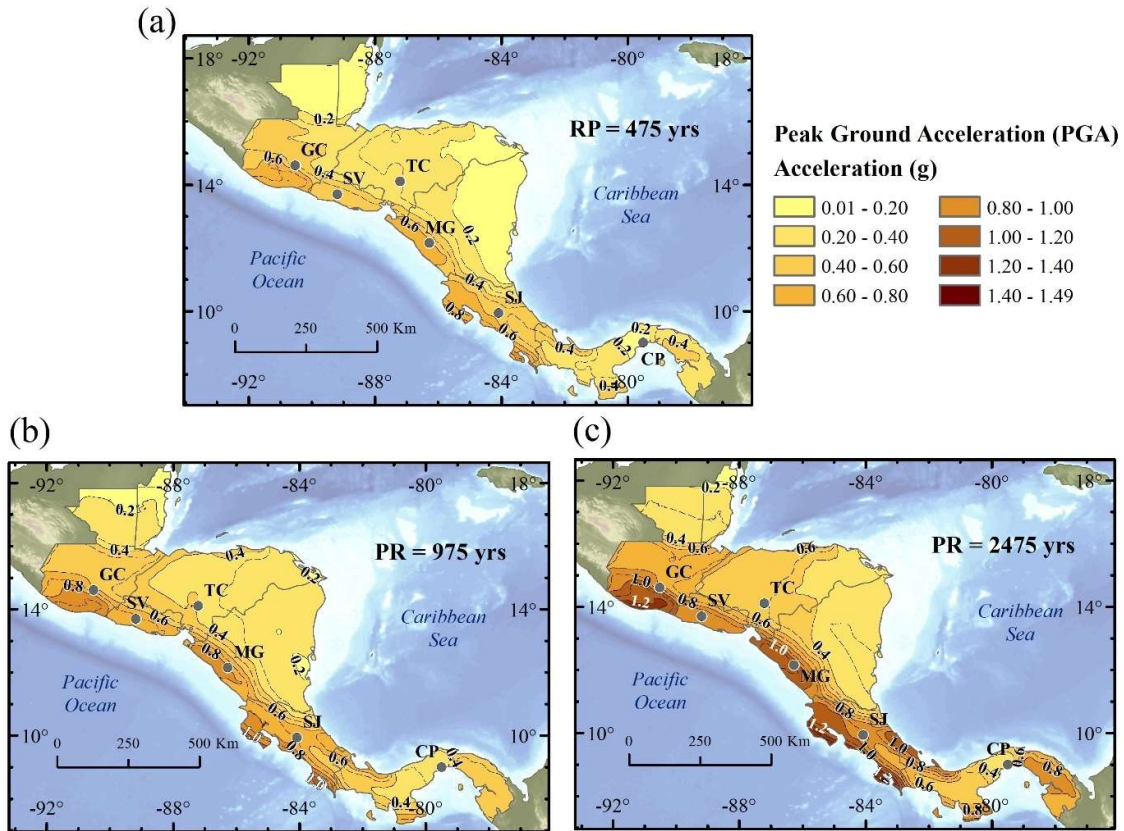


Figura 20: Mapas de peligrosidad sísmica para Centroamérica, para PGA y períodos de retorno de (a) 475 años, (b) 975 años y (c) 2475 años en condiciones de roca ($V_{s3} = 760$ m/s), según el modelo *KUKAHPÁN-25*. Se muestran las capitales de los países: GC – Ciudad de Guatemala, SV – San Salvador, TC – Tegucigalpa, MG – Managua, SJ – San José, CP – Ciudad de Panamá.

Se identificaron las posibles fuentes compatibles con los pares (M_w – R_{rup}) resultantes de la desagregación de peligrosidad para cada ciudad capital, que resultaron ser esencialmente fallas capaces de generar dichas magnitudes y que se encuentran dentro de un determinado radio de acción respecto a cada capital, según lo indicado por R_{rup} . La Tabla 8 resume los sismos de control en cada capital de Centroamérica para periodos cortos (PGA) y para periodos largos [$SA(1.0s)$], mostrando la posible asociación del sismo de control con la fuente sísmica capaz de generarlo con mayor probabilidad. La Figura 21 también muestra los sismos de control asociados con las posibles fuentes generadoras de dichos sismos en la región.

Tabla 8: Sismos de control para las seis ciudades capitales de Centroamérica, obtenidos para los movimientos objeto identificados con las ordenadas espectrales PGA y SA (1.0s) para periodo de retorno de 475 años. Se indica la fuente sísmica asociada

Capital city	Code	Magnitude (Mw)	Rrup (Km)	Seismic source associated
<u>Guatemala City</u>	G1 – PGA	6.5 – 7.0	20 – 30	Motagua fault system; Jalpatagua fault
	G2 – Sa(1.0s)	7.5 – 8.0	40 – 50	Motagua fault system; Polochic-Chixoy fault system; Subduction
<u>San Salvador</u>	S1 – PGA	5.5 – 6.0	0 – 10	Guaycume fault; San Vicente fault
	S2 – Sa(1.0s)	7.5 – 8.0	40 – 50	Subduction
<u>Tegucigalpa</u>	H1 – PGA	5.0 – 5.5	10 – 20	Guayape fault; Honduras depression fault system
	H2 – Sa(1.0s)	6.0 – 6.5	10 – 20	Guayape fault; Honduras depression fault system
<u>Managua</u>	N1 – PGA	7.0 – 7.5	0 – 10	Subduction zone
	N2 – Sa(1.0s)	7.0 – 7.5	0 – 10	Nicaragua depression fault system
<u>San Jose</u>	CR1 – PGA	6.0 – 6.5	0 – 10	Central Costa Rica deformed belt system
	CR2 – Sa(1.0s)	7.0 – 7.5	30 – 40	Subduction
<u>Panama City</u>	P1 – PGA	5.0 – 5.5	10 – 20	Gatun fault; Azota fault; Limon fault; Pedro Migue fault; Miraflores fault
	P2 – Sa(1.0s)	6.0 – 6.5	40 – 50	Gatun fault; Pedro Migue fault
	P3 – Sa(1.0s)	6.5 – 7.0	40 – 50	Subduction

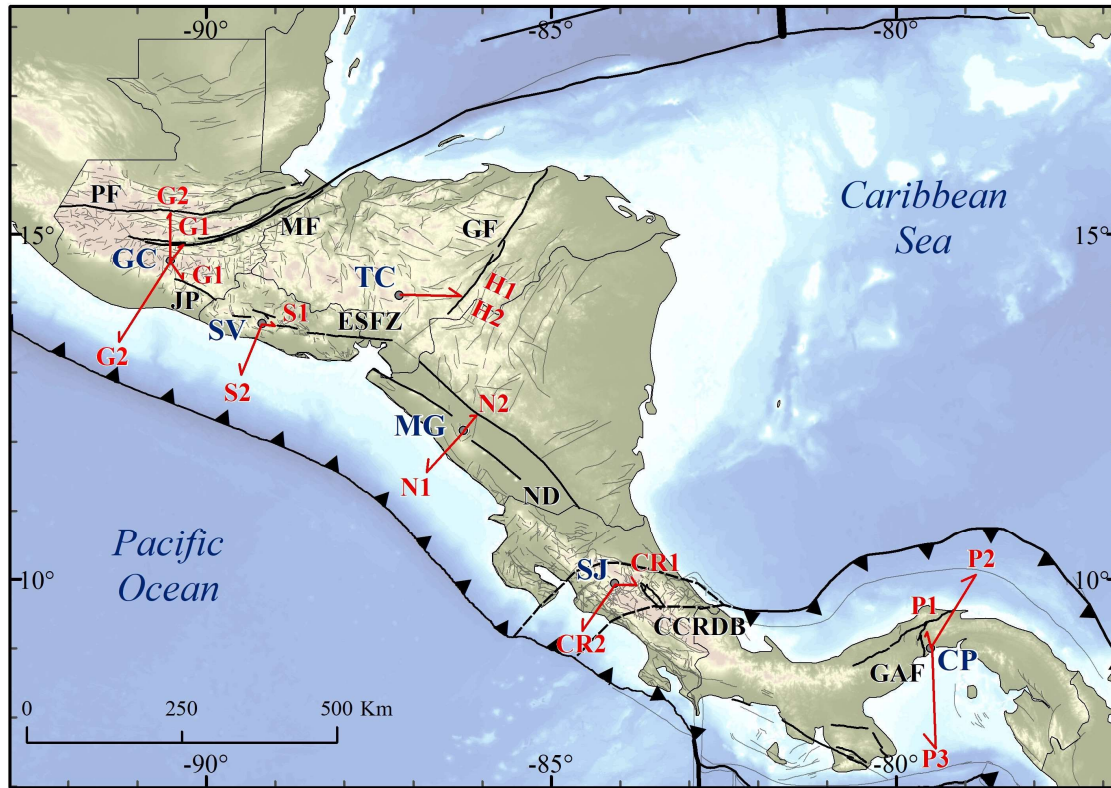


Figura 21: Terremotos de control asociados con posibles fuentes sísmicas en Centroamérica. Las líneas grises muestran la base de datos de fallas de Agate et al. (2024) y Denyer et al. (2003), y las líneas negras, la base de datos de fallas de Styron y Pagani (2020). Las siglas en rojo corresponden a los sismos de control indicados en la Tabla 8. CCRDB – Cinturón deformado de Costa Rica Central, ESFZ – Zona de falla de El Salvador, GC – Ciudad de Guatemala, GAF – Falla de Gatún, GF – Falla de Guayape, CP – Ciudad de Panamá, JP – Falla de Jalpatagua, MF – Sistema de fallas de Motagua, MG – Managua, ND – Depresión de Nicaragua, PF – Sistema de fallas Polochic-Chixoy, SJ – San José, SV – San Salvador, TC – Tegucigalpa.

La identificación de los sismos de control muestra que tanto las fuentes de subducción como las fallas corticales contribuyen a los niveles de peligrosidad en estas capitales, con la excepción de Tegucigalpa, donde la subducción no es dominante. Los escenarios de fallamiento local que dominan la amenaza sísmica identificados son: las fallas Motagua-Polochic-Chixoy y Jalpatagua en Guatemala; Guayume y San Vicente en El Salvador; el sistema de fallas de Guayape y la Depresión Hondureña en Honduras; fallas en la depresión tectónica de Nicaragua; el cinturón deformado central en Costa Rica; y las fallas de Gatún, Azota, Limón, Pedro Miguel y Miraflores en Panamá (Figura 21).

Se generaron curvas de peligrosidad sísmica para las seis capitales con el fin de ilustrar las probabilidades o periodos de retorno para distintos niveles de aceleración SA (T). A partir de estas curvas de peligrosidad, se establecieron los espectros de amenaza uniforme (UHS) para periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años, los cuales pueden compararse con los espectros de diseño de los códigos sísmicos locales de cada país y utilizarse en futuras actualizaciones (Figura 22).

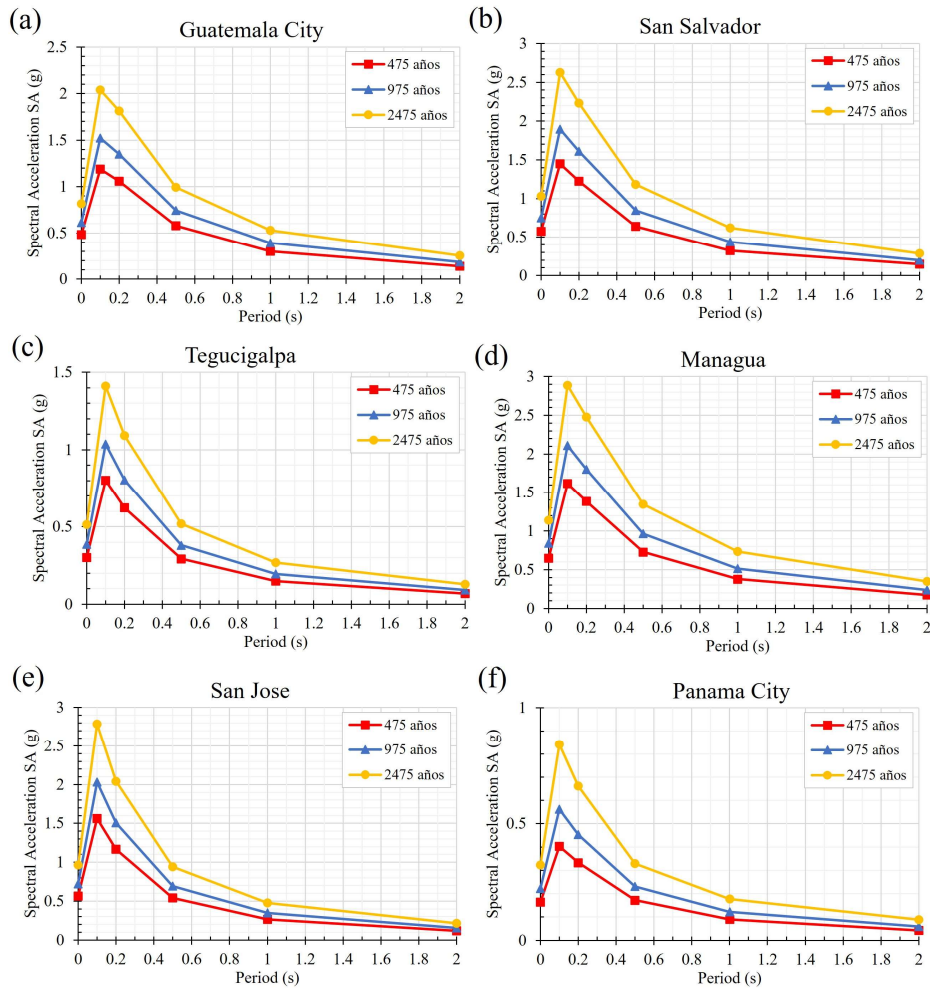


Figura 22: Espectros de peligrosidad uniforme (UHS) para períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años, según el modelo *KUKAHPÁN-25*. Los UHS se generaron para las seis capitales de Centroamérica: (a) Ciudad de Guatemala, (b) San Salvador, (c) Tegucigalpa, (d) Managua, (e) San José y (f) Ciudad de Panamá.

5.3. Discusión de los resultados de la comparativa con otros modelos regionales, locales y códigos sísmicos

Al comparar el mapa de peligrosidad sísmica del proyecto RESIS II (Benito et al., 2012) con el generado en este trabajo, a través de un mapa que representa el cociente entre las aceleraciones del modelo *KUKAHPAN-25* y las de RESIS II, se pueden identificar áreas específicas donde las aceleraciones han aumentado o disminuido (Figura 23). En general, se observa un incremento del 10% al 50% en las aceleraciones con respecto al mapa RESIS II. Este aumento se atribuye en gran medida a la ampliación del catálogo regional de sismos (Gamboa-Canté et al., 2024), a las mejoras en los modelos de recurrencia y al uso de la zonificación sísmica propuesta por Alvarado et al. (2017). Por otro lado, algunas áreas permanecen estables en ambos mapas de peligrosidad sísmica, lo que indica que los resultados son robustos en dichas zonas y apenas se ven afectados por las variaciones introducidas en este nuevo estudio (Figura 23).

Adicionalmente, se observan áreas de interés donde el incremento en las aceleraciones supera el 50% en comparación con las reflejadas en el mapa RESIS II, particularmente en el norte de Honduras y en el Cinturón Deformado del Norte de Costa Rica (CCRDB) (Figura 23). Este aumento se atribuye a una mejor representación de los eventos sísmicos en estas zonas, los cuales han sido incorporados al catálogo regional actualizado, mejorando significativamente los parámetros de la fuente sísmica (Gamboa-Canté et al., 2024). Asimismo, se pueden apreciar pequeñas áreas con una reducción en las aceleraciones de hasta casi un 30%, especialmente en el norte de Guatemala y en el centro de Panamá. Esta reducción se debe principalmente a la zonificación sísmica de Alvarado et al. (2017), cuyas modificaciones y mejoras en la definición de zonas sísmicas se ajustan mejor al comportamiento tectónico observado en estas regiones (Figura 23).

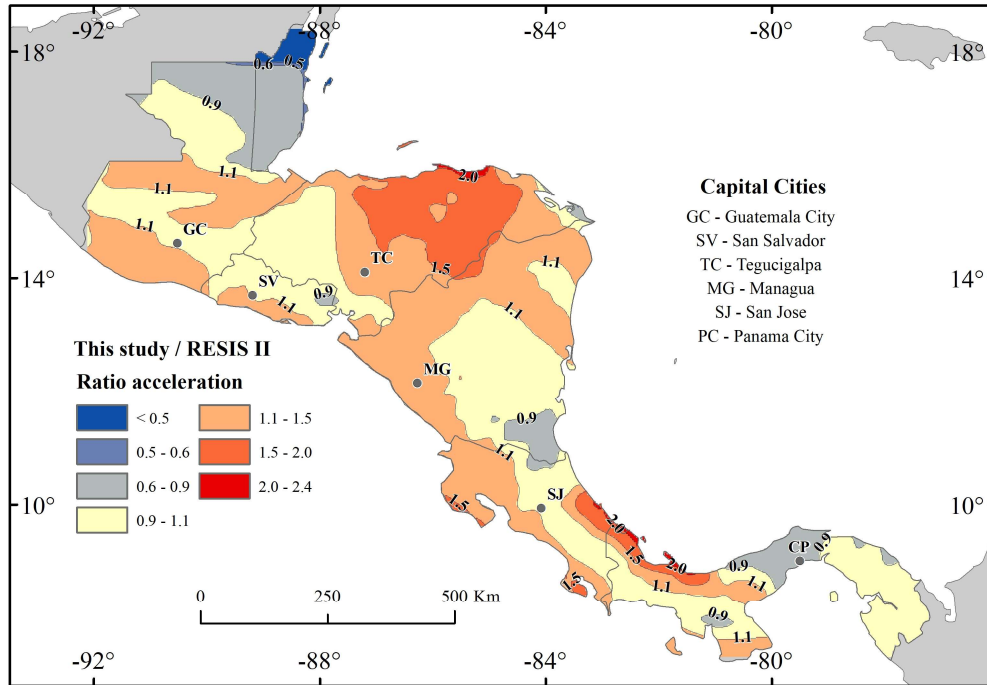


Figura 23: Mapa que muestra el cociente de aceleraciones PGA y PR=475 yrs del modelo *KUKAHPÁN-25* y el modelo de RESIS II (Benito et al., 2012). Las áreas rojas y naranjas indican un aumento significativo en las aceleraciones con el último modelo regional actualizado en comparación con los modelos regionales anteriores; el color amarillo indica que las aceleraciones se mantienen estables entre los modelos regionales comparados; y el color azul indica que los modelos regionales anteriores muestran aceleraciones mayores en comparación con el último modelo regional actualizado.

Por otro lado, en los últimos cinco años se han publicado otros dos mapas regionales para toda Centroamérica: el mapa GEM-23 (Johnson et al., 2023) y el mapa CCASH-22 (Salgado-Gálvez et al., 2022). Un análisis de estos mapas junto con el mapa *KUKAHPÁN-25* ha permitido determinar las áreas con mayor consistencia en los resultados, así como aquellas que presentan mayor variabilidad. Para este análisis, se elaboró un mapa del coeficiente de variación (CV) que muestra la dispersión de los resultados de los tres estudios respecto a los valores promedio en todo el territorio. En general, en la mayor parte del territorio, los valores de CV no superan el 20% (Figura 24), lo cual indica que los resultados son bastante robustos. Sin embargo, existen sectores en el norte de Guatemala, en la frontera norte entre Honduras y Nicaragua, y en la zona central de Panamá donde la variación supera el 30%, por lo que los resultados en estas áreas son menos robustos que en el resto del territorio.

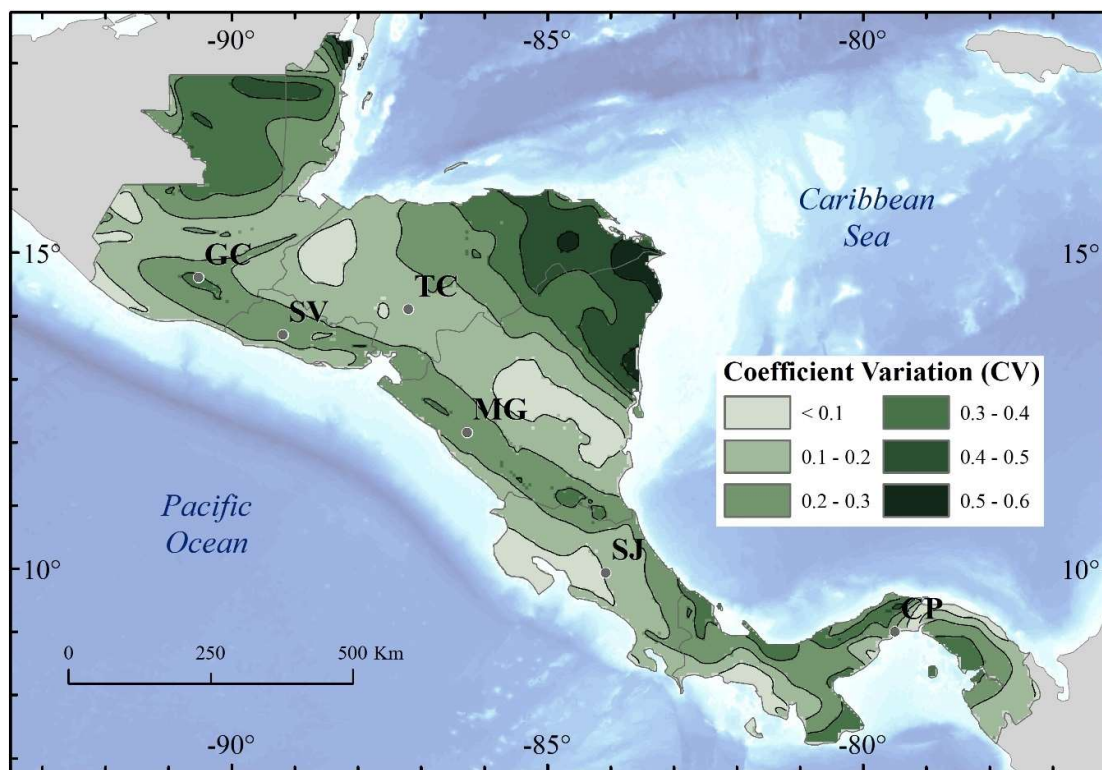


Figura 24: Mapa de CV para PGA y periodo de retorno de 475 de los modelos KUKAHPÁN-25, GEM-23 y CCASH-22. Se observan variaciones significativas en zonas con baja peligrosidad sísmica y alrededor del arco volcánico centroamericano. Se muestran las capitales de los países: GC – Ciudad de Guatemala, SV – San Salvador, TC – Tegucigalpa, MG – Managua, SJ – San José, CP – Ciudad de Panamá.

Cuando el mapa *KUKAHPÁN-25* se compara específicamente con el mapa GEM-23 (Figura 25a), se observan valores de PGA similares o ligeramente menores en amplias zonas del territorio, particularmente en el corredor central de Guatemala, Honduras, Nicaragua y Costa Rica. Las diferencias observadas se deben principalmente a los enfoques metodológicos distintos. El modelo GEM-23 incluye explícitamente fuentes sísmicas tipo falla en los cálculos de amenaza, lo que conduce a valores de PGA más elevados en las inmediaciones de estas fallas, en contraste con la metodología de fuentes sísmicas zonificadas aplicada en el estudio regional actualizado (García-Pelaez et al., 2019).

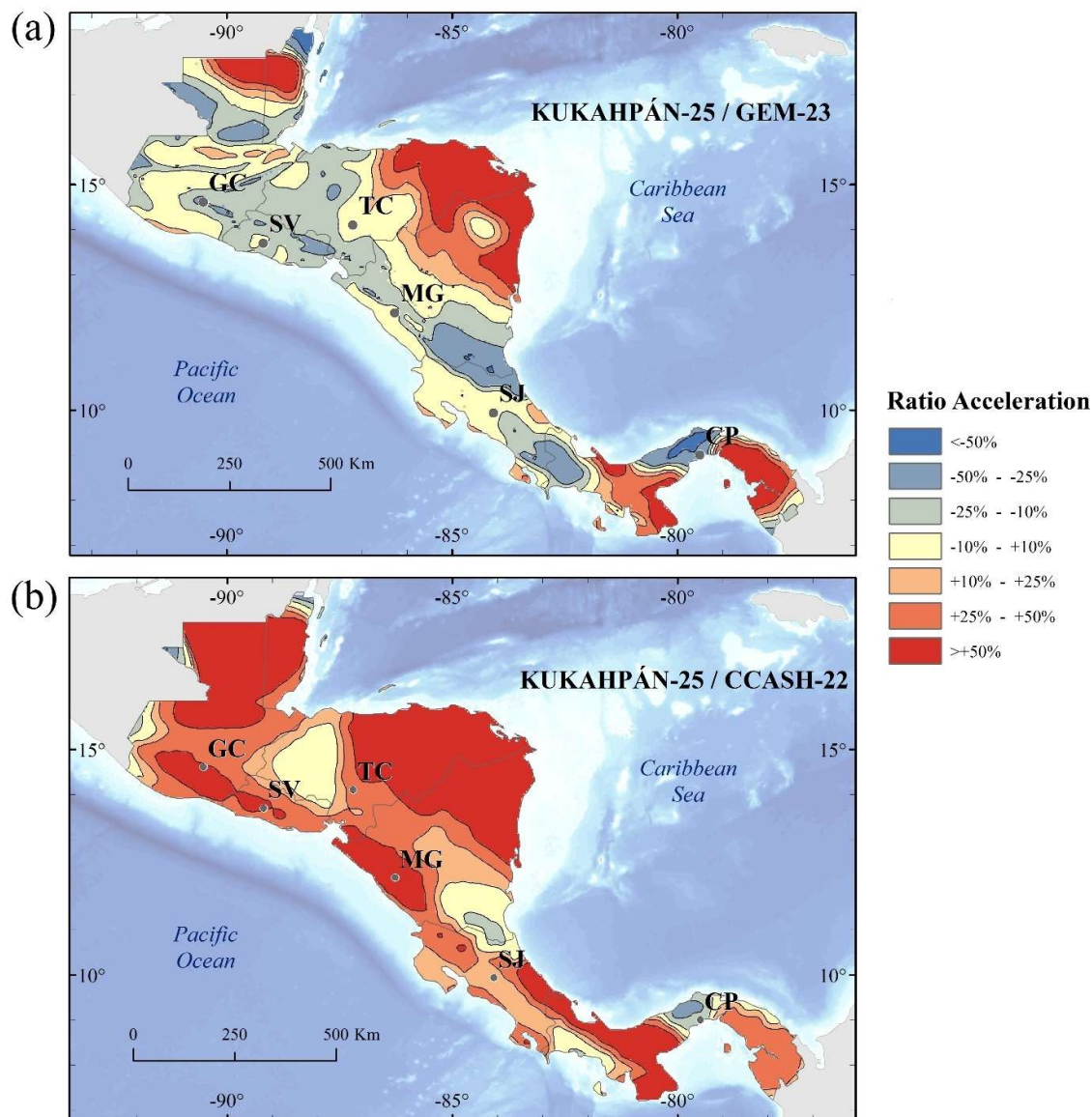


Figura 25: Mapas de aceleración de razón para PGA y período de retorno de 475 en el mapa KUKAHPÁN-25 comparado con (a) el mapa GEM-23 y (b) el mapa CCASH-22. Las áreas rojas y naranjas indican un aumento significativo en las aceleraciones con el último modelo regional actualizado en comparación con los modelos regionales anteriores; el color amarillo indica que las aceleraciones se mantienen estables entre los modelos regionales comparados; y el color azul indica que los modelos regionales anteriores muestran aceleraciones mayores en comparación con el último modelo regional actualizado. Se muestran las capitales de los países: GC – Ciudad de Guatemala, SV – San Salvador, TC – Tegucigalpa, MG – Managua, SJ – San José, CP – Ciudad de Panamá.

Sin embargo, el modelo *KUKAHPÁN-25* reporta valores significativamente más altos de PGA en áreas específicas, especialmente en la región norte de Guatemala, en la frontera entre Honduras y Nicaragua, y en la región oriental de Panamá

(Figura 25a). Estas desviaciones se atribuyen al catálogo regional de sismos utilizado en el estudio (Gamboa-Canté et al., 2024), el cual presenta una mayor completitud en estas regiones gracias a la incorporación de datos de redes sísmicas locales. En contraste, el catálogo sísmico empleado en el estudio GEM-23, compilado por Di Giacomo et al. (2018), no cubre de forma exhaustiva estos sectores, lo que compromete la precisión de los modelos de recurrencia generados para dichas zonas sísmicas. Los mayores valores de peligrosidad en el este de Panamá, según el modelo *KUKAHPÁN-25*, también se explican por las diferencias en la zonificación sísmica empleada. Mientras que GEM-23 adopta un esquema de zonificación propuesto por García-Peláez et al. (2019), que define zonas fuente relativamente amplias, el estudio *KUKAHPÁN-25* utiliza una zonificación sísmica más detallada, alineada con los patrones de sismicidad observados, como lo describe Alvarado et al. (2017). Notablemente, el mayor nivel de concordancia entre ambos modelos ocurre en regiones con alta actividad sísmica histórica, como las zonas costeras de Guatemala, Nicaragua y Costa Rica. En estas áreas, las discrepancias en la PGA se mantienen en un rango estrecho (−10% a +10%), probablemente debido a la disponibilidad de registros sísmicos completos y estables que permiten estimaciones consistentes de los parámetros de recurrencia (Figura 25a).

Por otro lado, el mapa CCASH-22 reporta valores de aceleración más bajos en casi toda la región centroamericana en comparación con los presentados en el mapa *KUKAHPÁN-25* (Figura 25b). Esta discrepancia se atribuye nuevamente a las diferencias en los catálogos regionales utilizados. Específicamente, los valores más altos de aceleración identificados en las bandas transversales norte y sur de Guatemala y El Salvador, en la zona de la depresión nicaragüense, y en el segmento norte de la frontera Honduras–Nicaragua, se asocian claramente a una mejor representación de la sismicidad local en el catálogo compilado por Gamboa-Canté et al. (2024). Este catálogo ofrece una mayor completitud tanto en la zona del arco volcánico como en la zona *Forearc*, superando la cobertura del catálogo usado por Salgado-Gálvez et al. (2022) para elaborar el mapa CCASH-22. Además, el mapa *KUKAHPÁN-25* arroja valores de aceleración sustancialmente mayores en Costa Rica, alineándose más estrechamente con los hallazgos del estudio local de Hidalgo-Leiva et al. (2023). Al igual que el estudio de Gamboa-Canté et al. (2025), el análisis de Hidalgo-Leiva et al. (2023) emplea modelos de movimiento fuerte (GMMs) calibrados con datos locales, lo que resulta en estimaciones sistemáticamente mayores de PGA en comparación con las derivadas del uso de los

GMMs aplicados por Salgado-Gálvez et al. (2022). Finalmente, los mayores valores de aceleración observados en la Península de Azuero, en Panamá, se deben principalmente a mejoras en la completitud del catálogo sísmico y a un refinamiento en el cálculo de los parámetros de recurrencia en el modelo regional actualizado *KUKAHPÁN-25* (Figura 25b).

El mapa *KUKAHPÁN-25* también fue comparado con los mapas previos generados para cada país a escala nacional. En buena parte del territorio, los valores de PGA del mapa regional y los de los estudios locales coinciden, específicamente en el sur y noreste de Guatemala, El Salvador, sur de Honduras, este de Nicaragua, sureste y suroeste de Costa Rica, y en el oeste y este de Panamá (Figura 26). En otras áreas, las aceleraciones del mapa regional son entre un 10% y un 50% mayores que las de los estudios locales, especialmente en la franja transversal norte de Guatemala, la costa norte de Honduras, la costa sur de Nicaragua y el noroeste de Panamá.

Un aspecto crítico es contextualizar por qué el modelo regional difiere de los modelos locales en ciertas áreas. En Guatemala, el modelo regional incorpora la segmentación del sistema de fallas Polochic-Motagua (zonas G6 y G9 según Alvarado et al., 2017), lo cual no se refleja completamente en los estudios locales, generando valores de PGA más altos, especialmente en el norte del país (Figura 26). En El Salvador, los modelos regional y local muestran una fuerte coincidencia debido al uso compartido de datos de entrada y zonificación (Alvarado et al., 2017; Gamboa-Canté et al., 2024; Mixco Durán, 2020), aunque la inclusión de la ESFZ en el modelo local produce diferencias localizadas. En Honduras, las diferencias se deben a la inclusión de las zonas de *backarc* (H4) según Alvarado et al. (2017) y a un catálogo sísmico más completo en el estudio regional elaborado por Gamboa-Canté et al. (2024), que incluye una mayor densidad de eventos sísmicos en el norte del país, mejorando la completitud de las tasas de sismicidad (Figura 26).

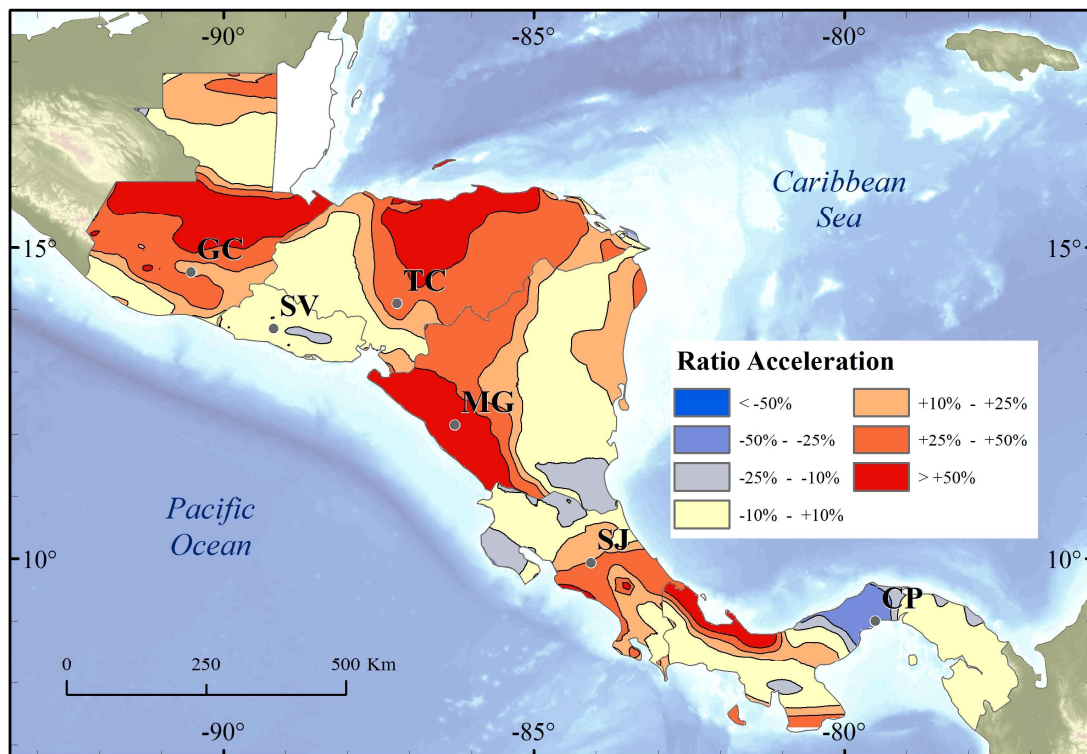


Figura 26: Mapa de aceleración de razón para PGA y período de retorno de 475 bajo el mapa KUKAHPÁN-25 en comparación con todos los estudios recientes de peligro sísmico local: Kalakonas et al. (2020) – Guatemala, Mixco Durán (2020) – El Salvador, Castillo et al. (2008) – Honduras, Álvarez (2022) – Nicaragua, Hidalgo-Leiva et al. (2023) – Costa Rica, Benito et al. (2012) – Panamá. Las áreas rojas y naranjas indican un aumento significativo en las aceleraciones bajo el último modelo regional actualizado en comparación con los modelos locales anteriores, el color amarillo indica que las aceleraciones son estables entre los modelos regionales y locales comparados, y el color azul indica que los modelos locales muestran aceleraciones más altas en comparación con el último modelo regional actualizado. Las ciudades capitales de los países se muestran GC – Ciudad de Guatemala, SV – San Salvador, TC – Tegucigalpa, MG – Managua, SJ – San José, CP – Ciudad de Panamá.

En el caso de Nicaragua, las discrepancias en las costas se explican por el uso de modelos de zonificación y GMM distintos; el modelo regional (Alvarado et al., 2017) abarca zonas más amplias, mientras que el modelo local (Álvarez, 2022) utiliza una segmentación más fina (Figura 26). En Costa Rica, las diferencias en las regiones centrales se relacionan con distintos métodos de ajuste del *b*-valor y con la completitud del catálogo (Arroyo-Solórzano y Linkimer, 2021), siendo que el modelo regional KUKAHPÁN-25 (Gamboa-Canté et al., 2025) captura más eventos. En Panamá, los incrementos significativos en las zonas del norte corresponden a una representación refinada del Cinturón Deformado del Norte de Panamá (P10-C8), como fue propuesto por Alvarado et al. (2017) (Figura 26).

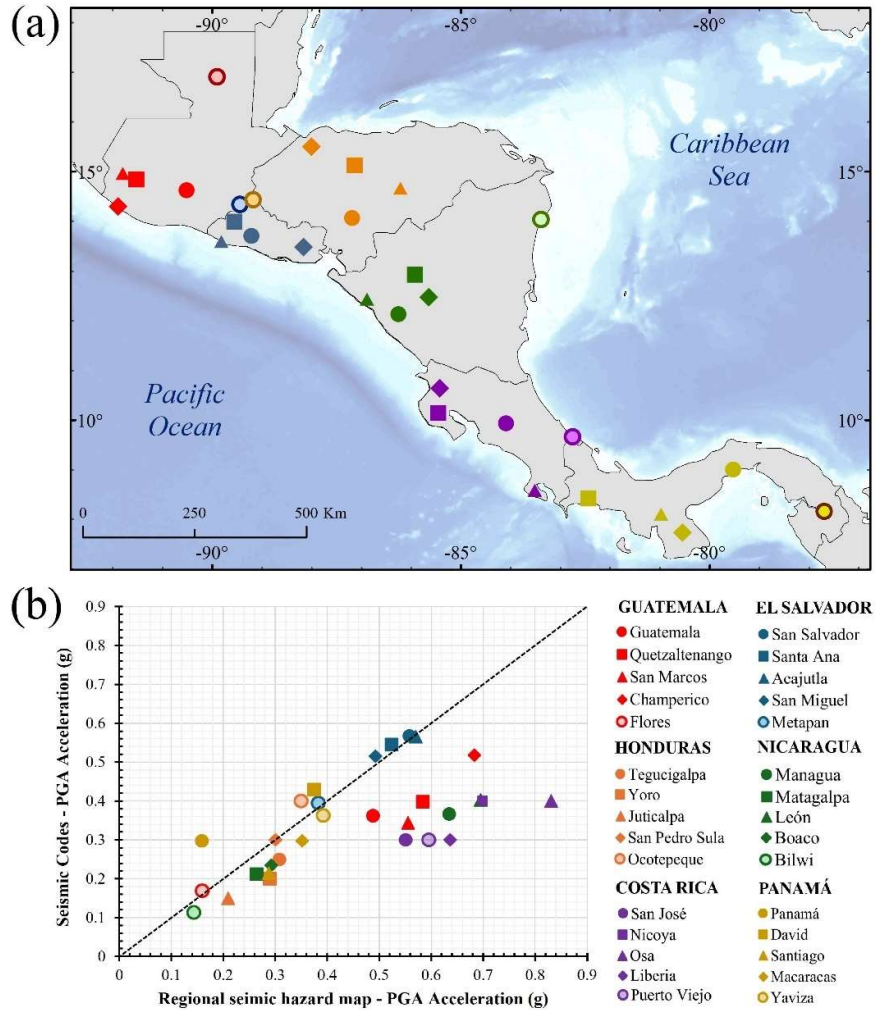


Figura 27: (a) Ubicación de algunas localidades en cada país centroamericano y (b) correlación de las aceleraciones del mapa de riesgo sísmico regional más reciente (Gamboa-Canté et al., 2025) con las aceleraciones del código sísmico local. PGA y PR = 475 yrs.

Al comparar con los códigos sísmicos nacionales, los valores de PGA del mapa *KUKAHPÁN-25* coinciden con las estimaciones basadas en código en El Salvador, Honduras y Panamá (Figura 27). En contraste, existen diferencias sustanciales en Guatemala, Costa Rica y Nicaragua, cuyos códigos proporcionan aceleraciones significativamente menores. Estas discrepancias se deben a códigos desactualizados, enfoques deterministas o caracterizaciones simplificadas de las fuentes. Por ejemplo, el código sísmico de Guatemala se basa en cálculos deterministas y aproximaciones escaladas para valores de PGA (Rodas et al., 2021), mientras que el código de Costa Rica no se ha actualizado desde 2010 (Acuña et al., 2011), a pesar de que modelos locales más recientes (Hidalgo-Leiva et al.,

2023) muestran una amenaza mucho mayor. Además, una simulación reciente de escenarios deterministas potencialmente críticos para San José (Benito et al., 2025) concluye que las aceleraciones de diseño del código son bajas, salvo para los suelos más blandos clasificados como S4. El modelo nacional de Nicaragua (Álvarez, 2022) usa una zonificación y modelos de movimiento fuerte distintos, lo que también contribuye a las discrepancias (Figura 27).

En conjunto, el modelo regional actualizado *KUKAHPÁN-25*, presentado aquí, es consistente con estudios nacionales recientes, demuestra una mejor resolución y presenta variaciones de PGA inferiores al 20% en la mayor parte de la región, excluyendo áreas localizadas específicas. Lo más importante es que elimina discontinuidades transfronterizas comunes al agregar mapas nacionales (Figura 28), ofreciendo una referencia armonizada para la representación regional de peligrosidad sísmica.

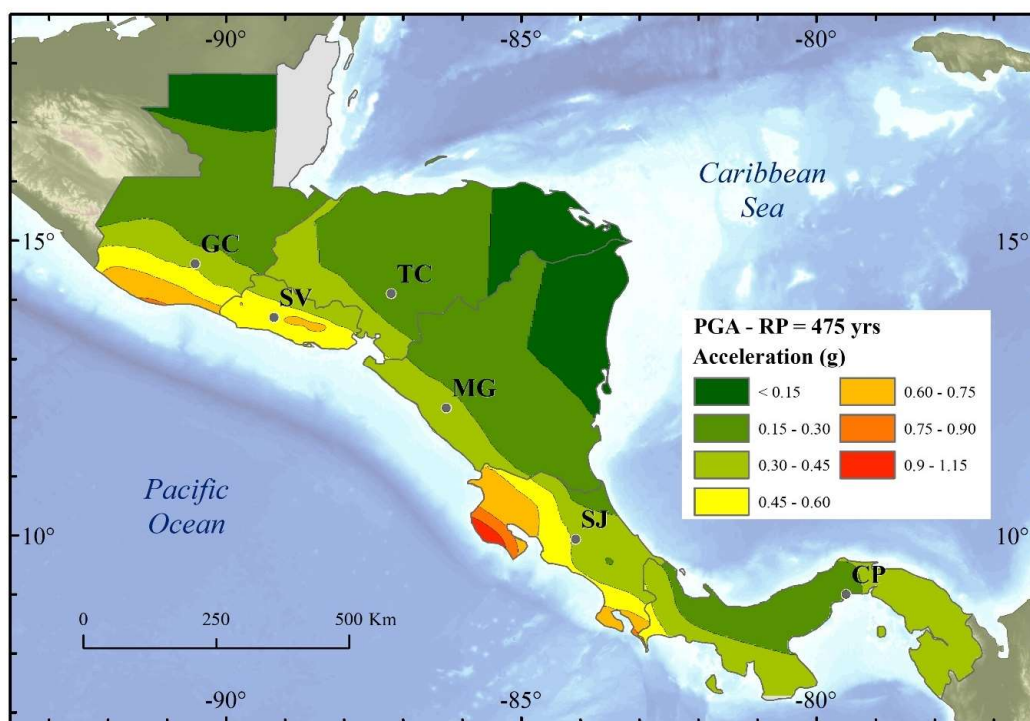


Figura 28: Mapa de peligro sísmico para Centroamérica en términos de PGA y períodos de retorno de 475 años utilizando los estudios locales recientes de peligro sísmico: Kalakonas et al. (2020) – Guatemala, Mixco Durán (2020) – El Salvador, Castillo et al. (2008) – Honduras, Álvarez (2022) – Nicaragua, Hidalgo-Leiva et al. (2023) – Costa Rica, Benito et al. (2012) – Panamá. La discontinuidad de las aceleraciones en las fronteras de los países se puede observar al intentar unificar modelos locales. Se muestran las ciudades capitales de los países: GC – Ciudad de Guatemala, SV – San Salvador, TC – Tegucigalpa, MG – Managua, SJ – San José, CP – Ciudad de Panamá.

5.4. Discusión de los resultados de la actualización del método propuesto por Rivas-Medina et al. (2018)

Para el caso de estudio en la zona G6 de Guatemala que contiene el sistema de fallas de Polochic-Chixoy y el sistema de fallas de Motagua, la aplicación de la herramienta *HybridModel* (H_M) da como resultado hasta 19 soluciones posibles (Figura 29).

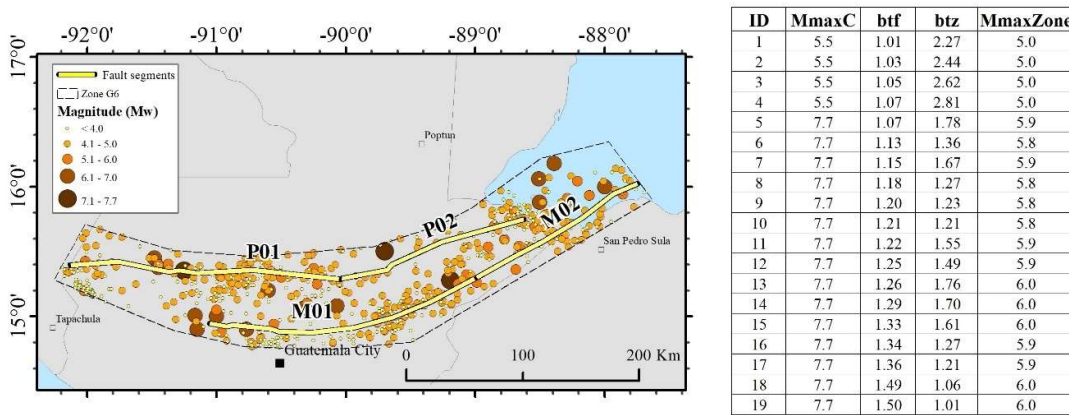


Figura 29: *Izquierda:* Mapa de la sismicidad y los segmentos de falla en la franja transversal central de Guatemala. El mapa muestra la ubicación de los segmentos de falla P01, P02, M01 y M02 dentro de la Zona G6. El tamaño y el color de los círculos representan las magnitudes sísmicas, con una escala que indica magnitudes desde menos de Mw 4.0 hasta Mw 7.7. La línea negra gruesa delimita la zona sísmica G6, y las líneas amarillas continuas representan los segmentos de falla identificados. *Derecha:* La tabla muestra M_{maxC} , b_{tf} , b_{tz} y $M_{maxZone}$ para diferentes combinaciones de modelos.

Se examinan los modelos de Gutenberg-Richter y los mapas de PGA para las dos combinaciones más divergentes, ID01 y ID19, que presentan diferencias significativas en los valores de M_{maxC} , b_{tf} , b_{tz} y $M_{maxZona}$. En la Figura 30, se observa que los modelos de Gutenberg-Richter para las fallas son similares en ambas combinaciones. Sin embargo, el modelo de Gutenberg-Richter para la zona muestra una diferencia clara, con una magnitud máxima más alta en el modelo ID19. Estos resultados también se reflejan en los mapas de peligrosidad sísmica, donde, aunque las aceleraciones máximas estimadas son similares en ambas combinaciones, la distribución dentro de la zona cambia, observándose una mayor aceleración en zonas alejadas de las fallas en la combinación ID01.

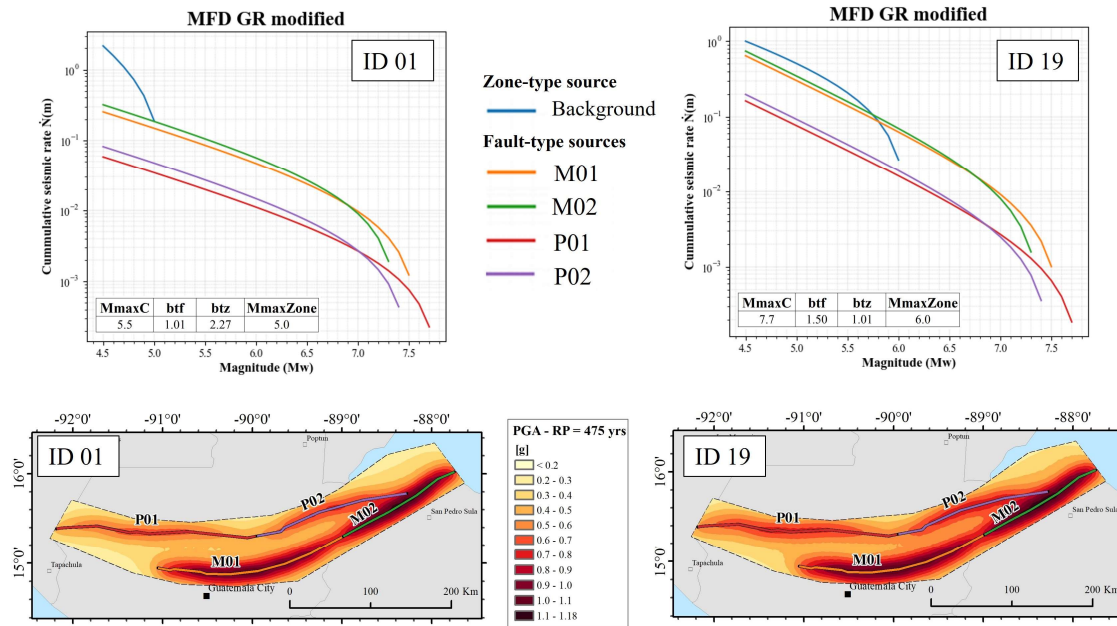


Figura 30: *Arriba*: Modelos de recurrencia sísmica de Gutenberg-Richter para dos opciones de cálculo, ID01 e ID19. El eje X muestra la magnitud (Mw) y el eje Y la tasa acumulada de terremotos $[\dot{N}(m)]$ de magnitud mayor o igual a un valor dado. Las curvas de color representan diferentes segmentos de falla (M01, M02, P01 y P02) y la zona completa. *Abajo*: Mapas de la aceleración máxima esperada del suelo (media PGA) para un período de retorno de 475 años según las dos opciones de cálculo. Los colores indican diferentes áreas con diferentes niveles de aceleración esperada, destacando las áreas cercanas a las trazas de falla.

Al analizar el promedio de las aceleraciones obtenido con todas las combinaciones del *HybridModel* (H_M) (Figura 31), se observa nuevamente que el área de mayor peligrosidad sísmica se encuentra cerca del sistema de fallas de Motagua. Esto coincide con la ubicación de la falla con la mayor tasa de deslizamiento (Garnier et al., 2022). Los resultados muestran valores de PGA de hasta 1.16 g, lo que indica aceleraciones muy altas asociadas con un sistema de fallas de gran magnitud y tasas de deslizamiento de hasta 18 mm/año. Además, destaca el bajo coeficiente de variación (COV) en esta zona de alta amenaza, mostrando consistencia entre todas las combinaciones obtenidas, con valores de COV inferiores al 5% en zonas cercanas a las fallas (Figura 31). Esto indica una alta convergencia en las combinaciones ofrecidas por el *HybridModel* (H_M).

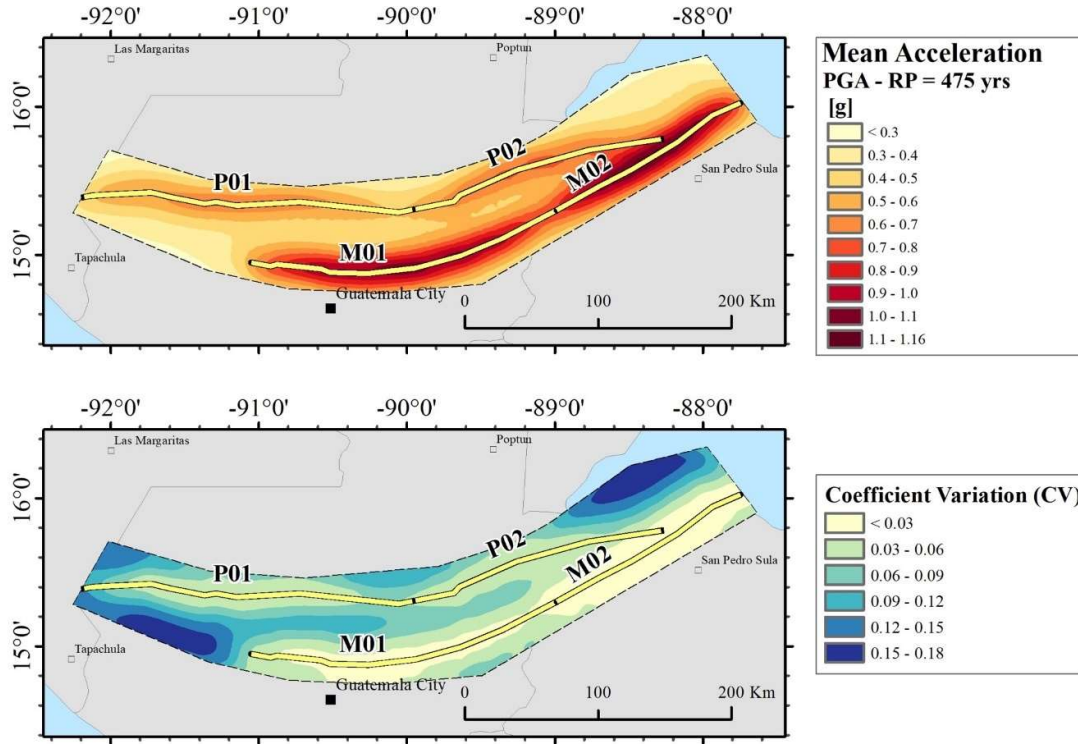


Figura 31: Mapa de la aceleración máxima promedio del suelo (PGA) y el coeficiente de variación (CV). Los colores del mapa PGA indican la intensidad de la aceleración del suelo, con los valores más altos cerca de la Falla de Motagua. El mapa de CV muestra la variabilidad de los datos PGA al analizar todas las combinaciones resueltas por el *HybridModel* (H_M), mostrando una menor variabilidad cerca de la Falla de Motagua y una mayor variabilidad en zonas alejadas de las fallas.

Dado que el *HybridModel* (H_M) no incorpora rupturas múltiples, en regiones con sistemas de fallas grandes, como es el caso de este estudio para Guatemala, es necesario realizar una segmentación previa de las fallas para considerar magnitudes máximas realistas coherentes con los registros históricos. Esta segmentación define los segmentos máximos de ruptura, permitiendo que los segmentos menores se fracturen con terremotos dentro del rango de M_{min} a $M_{maxFault}$. Sin embargo, esta segmentación previa condiciona el modelo de ruptura del sistema de fallas, lo cual se refleja claramente en los resultados de aceleración sísmica (Figura 30). En dichos resultados, la distribución de las aceleraciones sísmicas máximas esperadas a lo largo de las trazas de las fallas sigue el patrón de segmentación inicial, como se observa notablemente en el sistema de fallas Polochic-Chixoy. Una posible solución para abordar esta particularidad es considerar diferentes escenarios de segmentación e incorporarlos

en un árbol lógico, como se hace en los modelos SHERIFS y SUNFiSH (Chartier et al., 2019; Visini et al., 2020).

5.5. Discusión de la comparación de resultados entre diferentes métodos que integran las fuentes tipo falla y tipo zona

Al aplicar los métodos que integran las fuentes tipo falla a los cálculos de la peligrosidad sísmica, se obtuvieron las tasas acumuladas de actividad sísmica $[\dot{N}(m)]$ para cada uno de los segmentos de falla, y en el caso de aplicar un método híbrido, también para la sismicidad residual (*background*). Al graficar los MFD de cada uno de los métodos para compararlos (Figura 32), se puede observar que existe una variabilidad en cuanto al cálculo de la magnitud máxima para cada segmento de falla ($M_{maxFault}$) que utiliza cada método, esto a pesar de haber aplicado la misma relación de escalamiento (Wells and Coppersmith, 1994) (Tabla 9). Por otro lado, se destaca que el método *HybridModel* (H_M) es el único método que posee una MFD distinta a las demás en cuanto al *b-valor*, ya que este parámetro es calculado por el propio método y no asignado por juicio de experto como en otros métodos (*moment-slip*, SHERIFS, FiSH).

Tabla 9: Valor $M_{maxFault}$ (Mw) de los métodos aplicados para fuentes tipo falla incorporadas en los cálculos de la peligrosidad sísmica

Code	Segment	AL2 ¹	AL3 ²	YC ³	FiSH	SHERIFS	Hybrid
		Mom-slip	Mom-slip	Mom-slip			Model
IXC	Ixcán Fault	7.5	7.5	7.5	7.3	7.6	7.4
P01	E – W segment Polochic-Chixoy	7.5	7.5	7.5	7.6	8.0	7.8
P02	NE – SW segment Polochic-Chixoy	7.3	7.3	7.3	7.5	7.9	7.6
M01	E – W segment Motagua	7.4	7.4	7.4	7.6	8.0	7.7
M02	NE – SW segment Motagua	7.2	7.2	7.2	7.3	7.7	7.5
JLP	Jalpatagua Fault	7.1	7.1	7.1	7.0	7.4	7.1

¹ AL2 = Anderson and Luco (1983) equation no. 2

² AL3 = Anderson and Luco (1983) equation no. 3

³ YC = Youngs and Coppersmith (1985) equation

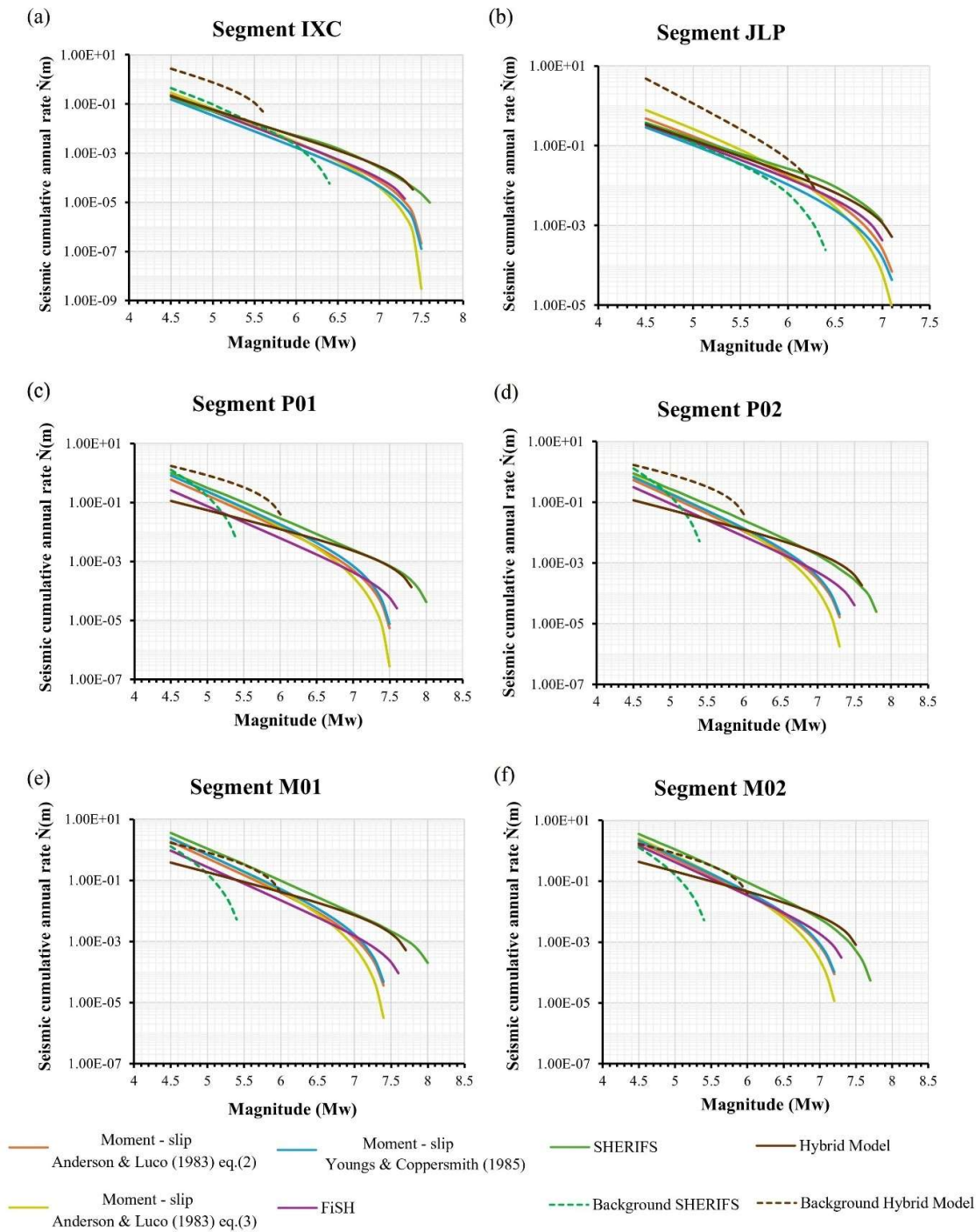


Figura 32: MFD calculado para el método moment-slip, FiSH, SHERIFS y HybridModel en el (a) segmento IXC, (b) segmento JLP, (c) segmento P01, (d) segmento (P02), (e) segmento M01 y (f) segmento M02.

Esta variabilidad en el cálculo de la magnitud máxima ($M_{maxFault}$) en los segmentos de falla, se debe a la forma en que los métodos utilizan las relaciones de escalamiento para encontrar dicha magnitud. En primer lugar, en *moment-slip* se

deben ingresar los coeficientes de la relación $\text{Log}(A)$ lo que implica que se utilizando indirectamente la relación de escalamiento para despejar y encontrar el valor de la magnitud M_w (Bungum, 2007).

Por otro lado, FiSH realiza un análisis estadístico para encontrar la M_{maxFault} , donde primero calcula la magnitud utilizando diferentes relaciones de escalamiento que dependen de la longitud de la falla (L) y el área de ruptura (A), así mismo considera la magnitud máxima observada ($M_{\text{max obs}}$) obtenida del catálogo sísmico (Pace et al., 2016). Debido a que las relaciones de escalamiento y la magnitud observada están sujetas a incertidumbres, FiSH incorpora estas incertidumbres generando una distribución de probabilidad para cada estimación de magnitud hecha. Luego suma estas curvas de densidad de probabilidad para obtener una distribución normal que representa la estimación final de la M_{maxFault} con su respectiva desviación estándar (Pace et al., 2016).

Ahora bien, SHERIFS sigue el mismo principio que FiSH para calcular la M_{maxFault} pero lo realiza de manera más rigurosa. Dependiendo de la relación de escalamiento que se utilice, se calcula la M_{maxFault} basado en la longitud (L) o el área de ruptura (A) de la falla. Luego, para incorporar la incertidumbre en la predicción de la M_{maxFault} , SHERIFS realiza un muestreo aleatorio basado en distribuciones normales o normales truncadas, donde se ajustan los coeficientes mediante un valor de ϵ que sigue una distribución aleatoria. Se realiza este proceso según el número de muestras impuesto en el cálculo para luego promediar el resultado y así obtener un mejor control de las incertidumbres asociadas en el cálculo de la M_{maxFault} (Chartier et al., 2019).

Por último, en el *HybridModel* (H_M) se debe ingresar directamente la M_{maxFault} como un parámetro de entrada, por lo que queda a criterio del experto cómo calcular dicho valor. En tal sentido, se puede aplicar directamente la relación de escalamiento para calcular la M_{maxFault} , o bien, calcularla utilizando métodos estadísticos para el control de las incertidumbres aleatorias.

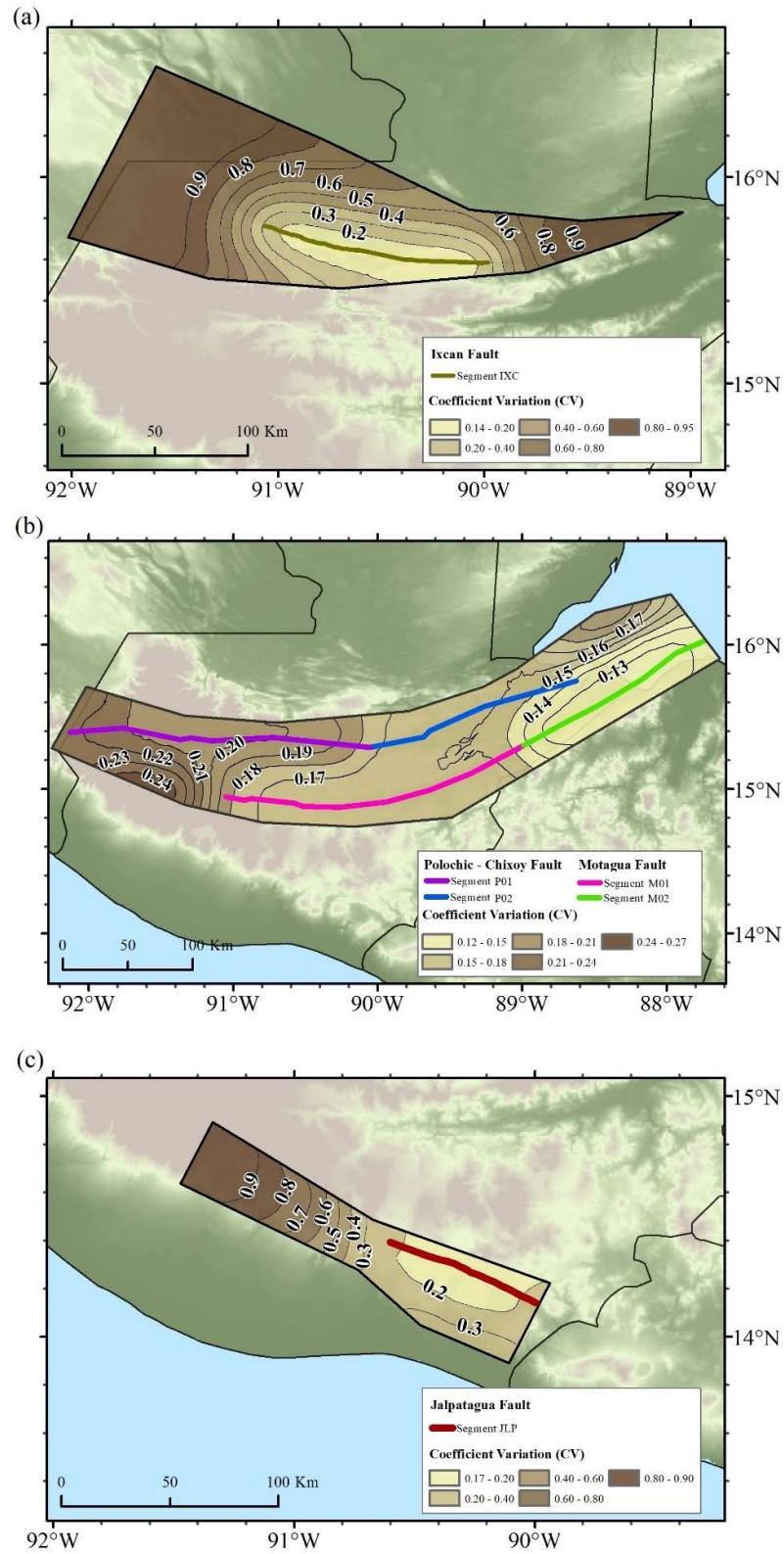


Figura 33: Mapas de coeficiente de variación (CV) para la (a) zona G9, (b) zona G6 y (c) zona G4.

Por otro lado, los mapas de coeficientes de variación (CV) demuestran que la mayor variabilidad existe en las zonas alejadas a los segmentos de falla, es decir, donde predomina la sismicidad de fondo (*background*). Esto se observa con más detalle en el segmento IXC (Figura 33a) y en el segmento JLP (Figura 33c). Esta variabilidad se debe a la manera en que se calcula el potencial sísmico de la región ($\dot{M}_{o_{region}}$). Dado que ahora estamos considerando los segmentos de falla como fuentes sísmicas, el potencial sísmico de región ($\dot{M}_{o_{region}}$) es repartido entre el fondo ($\dot{M}_{o_{zone}}$) y las fallas analizadas ($\dot{M}_{o_{faults}}$). Sin embargo, existen casos particulares como el sistema de fallas de Motagua y Polochic-Chixoy que cubren casi por completo el potencial sísmico de la región, haciendo que, al momento de aplicar los métodos, la variación en las aceleraciones sea muy baja, debido a que los segmentos de fallas están cubriendo casi por completo todo el reparto de la energía sísmica de la región (Figura 33b). Por eso, solo persisten las mayores variaciones en los sectores donde no se encuentran los segmentos de falla, es decir donde solamente existe la sismicidad de fondo (*background*) (Figura 33b).

Se han generado perfiles de aceleración PGA aplicando los diferentes métodos, donde se puede evidenciar que las aceleraciones máximas sobre los segmentos de falla son muy diferentes entre unos métodos y otros. Esto se puede deber principalmente a la magnitud máxima calculada ($M_{maxFault}$) para cada segmento de falla en el modelo MFD, así como también, el *b-valor* impuesto para cada segmento de falla (Figura 34).

En el caso de la falla de Ixcán (IXC) se observa que la aceleración que genera la mayoría de los métodos es igual o menor que la aceleración que genera el método zonificado PSHA, a excepción del *HybridModel* (H_M) que da la mayor aceleración (Figura 34a). Esto se puede deber principalmente a que el *HybridModel* (H_M) calcula un *b-valor* para la falla, a diferencia de los otros métodos que utilizan el *b-valor* calculado para la zona G9 (Tabla 5); por lo tanto, la tendencia del *b-valor* para magnitudes altas (Figura 32a) hace que las aceleraciones producidas en torno a la falla tengan este comportamiento (Figura 34a). Otra explicación se puede deber a que el porcentaje que representa el potencial sísmico de la falla IXC respecto a toda la zona G9 es moderadamente alto, algo que se puede visualizar con mayor claridad en la sismicidad de la zona G9 (Figura 10a). En esta región se han generado terremotos $M_w \geq 5.0$ en torno a la falla, sin embargo, otros cuantos quedan aún repartidos en el *background* lo que implica que aún hay fallas que pueden poseer un potencial sísmico mayor respecto al que se puede producir en la falla de Ixcán (Figura 34a).

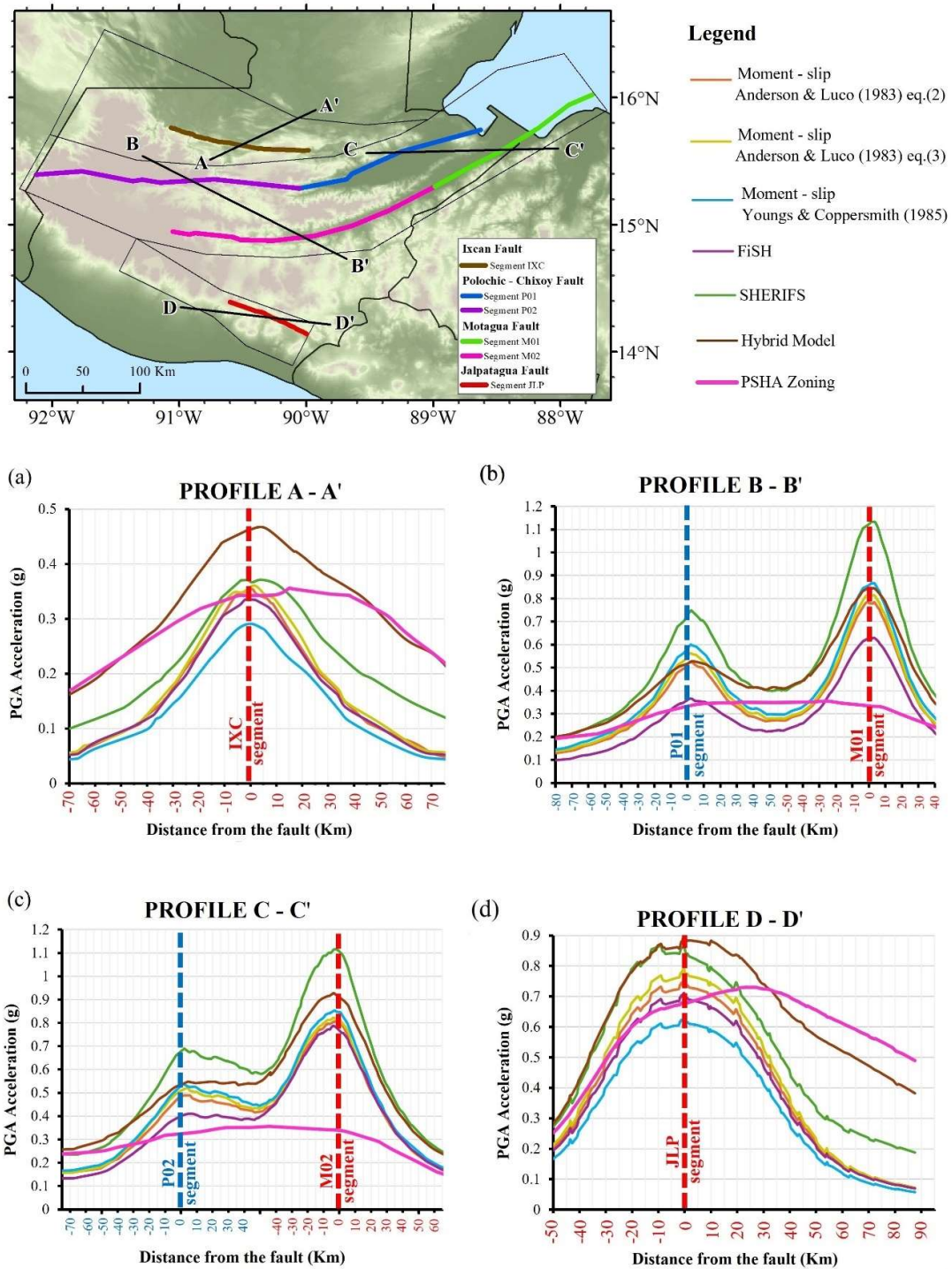


Figura 34: Perfiles de aceleración PGA en los segmentos de falla analizados para (a) falla Ixcan (perfil A-A'), (b) segmento E-O Polochic-Chixoy y Motagua (perfil B-B'), (c) segmento NS-O-E Polochic-Chixoy y Motagua (perfil C-C'), y (d) falla Jalpatagua (perfil D-D').

Para el caso de los sistemas de fallas de Polochic-Chixoy y Motagua, la aceleración que produce cada uno de los métodos aplicados es mucho mayor a la aceleración del método zonificado PSHA (Figura 34b; Figura 34c). En este caso, los segmentos de falla tienen las tasas de deslizamiento más altas, lo que implica un potencial sísmico muy alto que se puede liberar durante la ruptura (Garnier et al., 2022). Además, tal como se observa en la sismicidad registrada en el catálogo sísmico, todos los terremotos con $M_w \geq 6.0$ se han producido en torno a los segmentos de falla, lo que implica que estos segmentos cubren casi en su totalidad el potencial sísmico de toda la zona G6 (Figura 10b). Así mismo, el perfil de aceleraciones de estos sistemas de falla demuestra que la aceleración puede llegar a duplicarse (segmento P01 y M01) o ser hasta casi triple respecto a la aceleración estimada con el método zonificado PSHA para los segmentos con tasas de deslizamiento más altas (segmento P02 y M02).

Respecto a la influencia de la modelización de fuentes tipo falla en las aceleraciones, destaca que para los segmentos del lado oeste (P01 y M01), el aumento en las aceleraciones se percibe para distancias inferiores a ~ 30 km (Figura 34b). Para los segmentos con las tasas de deslizamiento más altas (P02 y M02) esta distancia es mayor y puede llegar a ser de hasta ~ 50 km (Figura 34c).

Por último, para la falla de Jalpatagua (JLP) ocurre algo similar que en el caso de la falla de Ixcán (IXC). Esto se debe a que la región ha registrado demasiados terremotos de magnitud $M_w \geq 6.0$ que no están asociados al segmento JLP, lo que implica que el potencial sísmico de la falla que estamos analizado representa solamente una parte de toda la energía que se libera en la zona G4 (Figura 10c). Esto hace que las aceleraciones con los métodos que integran las fallas queden por debajo de la aceleración que se estima con el método zonificado PSHA a partir de los ~ 30 km (Figura 34d). Cabe destacar, que el *HybridModel* (H_M) intenta equilibrar este potencial sísmico de la región dando más tasa de sismicidad a la fuente tipo zona respecto a la fuente tipo falla (Figura 32b). Por ello se visualiza que, en el perfil del *HybridModel* (H_M), no ocurre un decaimiento súbito de la aceleración en el *background*, como sucede en la mayoría de los métodos aplicados (Figura 34d).

Independientemente del método que se utilice, al incorporar las fuentes tipo falla en los cálculos de peligrosidad sísmica, estamos representando de una manera aproximada las aceleraciones que se pueden presentar con un enfoque probabilista, asumiendo un planteamiento más realista sobre la fuente sísmica que el que supone considerar zonas sismogénicas de sismicidad uniformemente distribuida.

Este planteamiento contempla, además, el efecto de *proximidad de la falla*, ya que permite determinar cuánto se amplifica el movimiento en torno a la falla, así como el rango de distancias a la que esa amplificación resulta significativa. Tal como se evidencia en este caso de estudio para Guatemala, las aceleraciones en el entorno de la falla resultan superiores que las obtenidas con modelos únicamente de zonas sismogénicas en un rango de distancias que oscila entre 30 y 50 km, dependiendo de la casuística (Figura 34).

Dicho lo anterior, es posible realizar un mapa de peligrosidad sísmica integrando las fuente tipo falla en los cálculos de peligrosidad para Guatemala (Figura 35). No obstante, conviene hacer algunas consideraciones:

En primer lugar, es importante tener en cuenta que aquellos métodos que solamente integran fuentes tipo falla (*moment-slip*, *FiSH*), sin combinarlas con zonas, pueden caer en el error de subestimar la aceleración, se puede cometer errores en subestimar la aceleración esperada en la región, ya que solo consideran las fallas cuya geometría y cinemática son conocidas. Y pueden existir otras fuentes potencialmente peligrosas que, por desconocimiento de sus parámetros no quedan incluidas en el cálculo, ni si quiera como zonas con sismicidad residual (*background*).

En segundo lugar, parece razonable considerar que los *métodos híbridos* (SHERIFS, *HybridModel*) resultan más idóneos para el cálculo de la peligrosidad sísmica, ya que en parte solventan el problema anterior, considerando además de las fallas conocidas otras zonas que albergan la sismicidad remanente (*background*) o que incluyen fallas desconocidas o fallas en las que aún no se tiene información suficiente para ser consideradas en el cálculo de la peligrosidad sísmica (Agate et al., 2024) (Figura 9).

Para entender de mejor manera el impacto de las aceleraciones estimadas a partir de las fuentes tipo falla, se ha generado un mapa que representa el cociente entre valores de PGA para periodo de retorno de 475 años, estimados con modelos de fuente tipo fallas y con el modelo clásico zonificado para Guatemala (Figura 36).

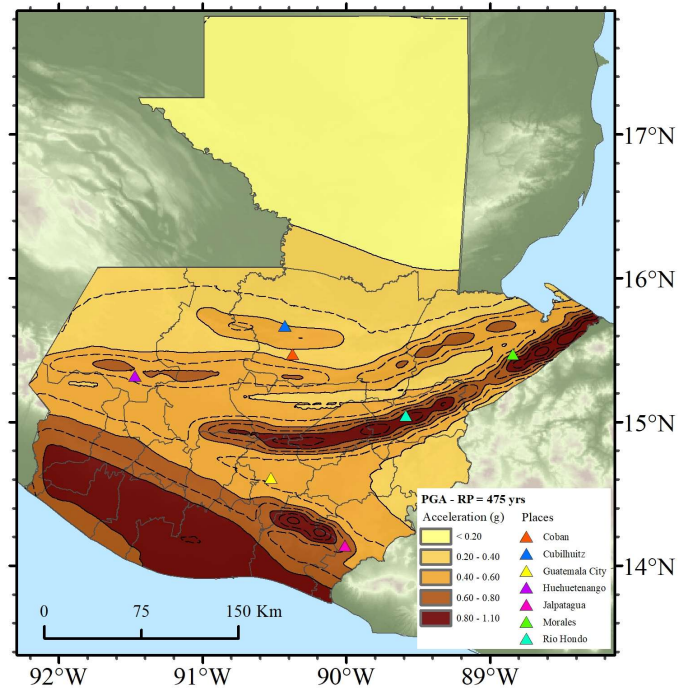


Figura 35: Mapa de peligrosidad sísmica para Guatemala para la ordenada PGA y PR = 475 yrs, incluyendo las fuentes tipo falla como unidades independientes.

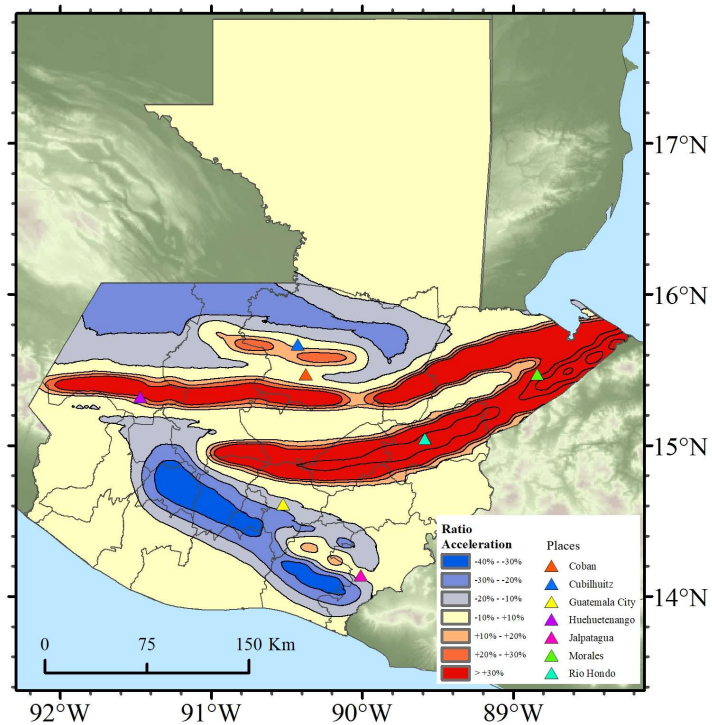


Figura 36: Mapa que representa el cociente entre valores de PGA para periodo de retorno de 475 años, estimados con modelos de fuente tipo fallas y con el modelo clásico zonificado para Guatemala.

Como se puede observar, en la franja transversal norte del país llegan a duplicarse las aceleraciones (áreas de color rojo) obtenidas con el *método híbrido* respecto a las estimadas con el método clásico zonificado (Figura 36). Así mismo, se destaca la reducción de aceleraciones obtenidas con modelos de fallas en zonas alejadas de las mismas, lo que implica que los métodos zonificados proporcionan valores superiores en estas zonas. Este resultado es lógico ya que, al incluir modelos de fallas, estas “absorben” casi todo el potencial sísmico de la zona, algo que no ocurre cuando se consideran solo modelos de zonas en las que el potencial sísmico se reparte de forma uniforme. Con estas evidencias, se puede tener una idea clara sobre cómo afecta la incorporación de las fuentes tipo falla y sus implicaciones en los cálculos de la peligrosidad sísmica.

Por otro lado, la incorporación de fuentes tipo falla en los cálculos de la peligrosidad sísmica puede contribuir notablemente hacia la mejora de los códigos sísmicos de construcción. En ellos, los espectros de peligrosidad uniforme (UHS) adoptan un papel importante, al identificar las aceleraciones esperadas con un mismo nivel de probabilidad para diferentes periodos de vibración (ordenadas espectrales). Para contribuir también en este aspecto, se han generado los UHS en diferentes ciudades del territorio de Guatemala, y se han comparado con el espectro de diseño del código sísmico local (AGIES NSE 2 – 2024). Los resultados pueden verse en la Figura 37.

Tal como se puede observar, el espectro de diseño del código local es excedido por los UHS obtenidos en este estudio modelizando las fallas como fuentes sísmicas, especialmente en los cortos periodos estructurales, en la mayor parte de las ciudades analizadas (Figura 37). Así mismo, en las ciudades de Huehuetenango, Rio Hondo y Morales (Figura 37c; Figura 37d; Figura 37e), el UHS obtenido con el modelo híbrido es muy superior al estimado con el método clásico zonificado.

Se destaca un cambio importante en los espectros UHS cuando se trabaja con un modelo zonificado PSHA y un modelo híbrido que integra las fuentes tipo falla. Donde el solamente considerar un modelo zonificado PSHA para generar los espectros UHS puede incurrir a subestimar las aceleraciones en un área determinada, tal es que caso que se presenta en Huehuetenango, Rio Hondo y Morales (Figura 37c; Figura 37d; Figura 37e). Esta ciudades están justamente localizadas muy próximas a los sistemas de fallas Polochic-Chixoy y Motagua (Figura 35), y se evidencia que en ellas los modelos zonificados no capturan el efecto de proximidad que si es reflejado en el modelo híbrido.

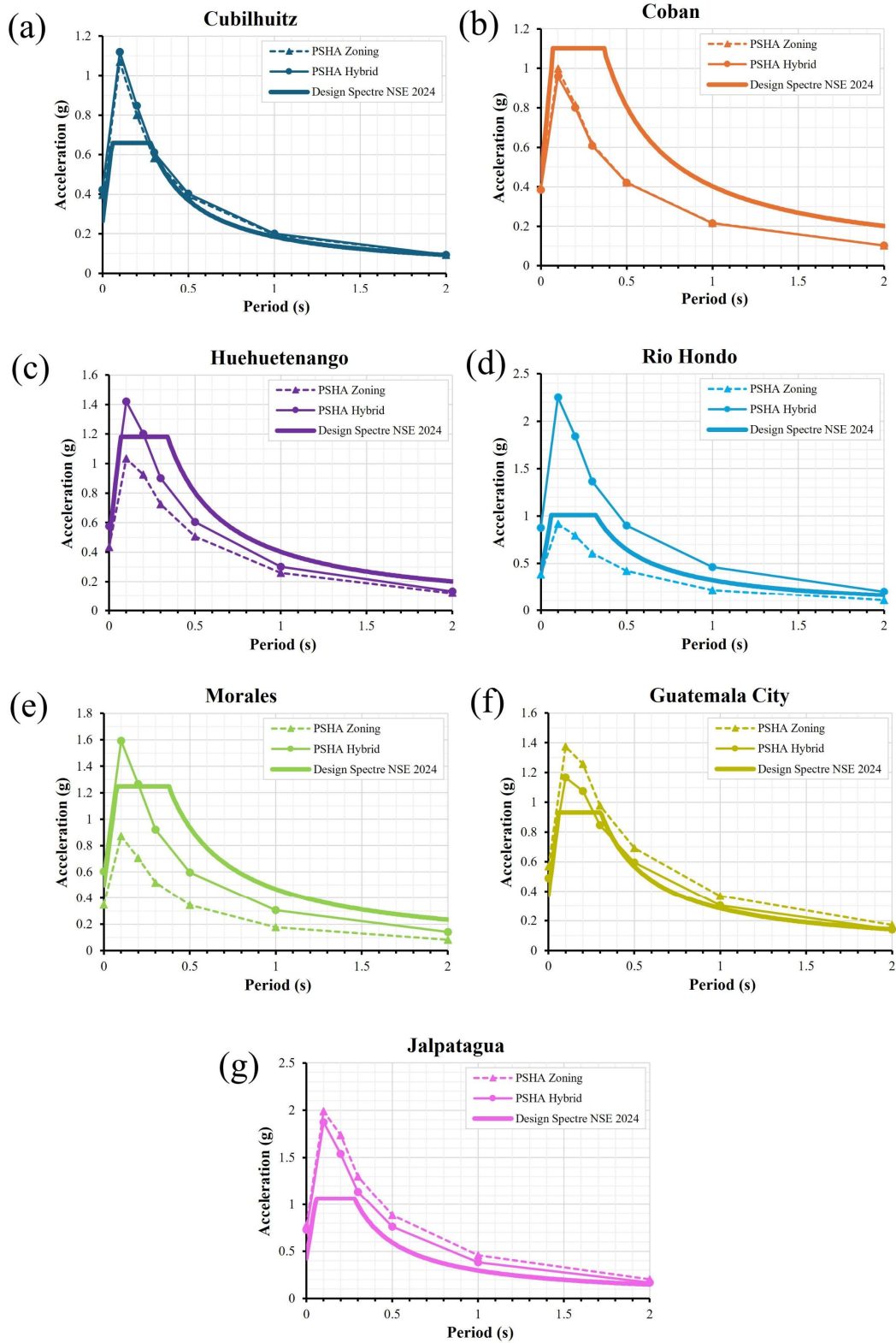


Figura 37: Comparación entre los espectros UHS y de diseño para las localidades de (a) Cubilhuitz, (b) Cobán, (c) Huehuetenango, (d) Rio Hondo, (e) Morales, (f) Ciudad de Guatemala y (g) Jalpatagua.

Como se puede observar, este tipo de análisis ayuda a mejorar la interpretación del contexto sismotectónico de una región y demuestra que el hecho de considerar las fuentes sísmicas tipo falla en los cálculos de la peligrosidad sísmica, es de utilidad para mejorar los códigos de construcción en búsqueda de una solución para construir ciudades más resilientes y sostenibles, así como también, mejorar los planes de mitigación y actuación ante desastres naturales de origen sísmico. Por último, el avance de las tecnologías geoespaciales permite seguir recopilando información importante para el estudio de fallas activas potencialmente peligrosas que deben ser consideradas para seguir mejorando y densificando los estudios de peligrosidad sísmica en una región.

6. Conclusiones

A lo largo de esta tesis doctoral se ha desarrollado un enfoque metodológico integral para mejorar la estimación de la peligrosidad sísmica en Centroamérica, incorporando datos geológicos, geofísicos y sismológicos bajo una lógica regional y transfronteriza. Esta propuesta se ha concretado mediante tres artículos científicos y una aplicación metodológica detallada (sección 3.4), que en conjunto aportan nuevas herramientas (*HybridModel*) y evidencias técnicas para la mejora de los modelos probabilistas de amenaza sísmica (PSHA) en contextos tectónicamente complejos, como es el caso de Centroamérica.

Se abordó la recopilación, depuración y homogenización de un catálogo sísmico regional completo y actualizado para Centroamérica, abarcando el periodo 1520–2020, con datos regionales y locales. La confección de este catálogo permitió establecer las bases para una caracterización más precisa de la actividad sísmica regional, mediante el análisis de completitud, el uso de métodos de depuración, como Reasenberg y Uhrhammer, y la priorización de soluciones hipocentrales en función de criterios establecidos atendiendo al error de localización, RMS, profundidad, ubicación y tipo de magnitud. El catálogo resultante comprende 260,548 terremotos ocurridos entre 1520 y 2020, con magnitudes que varían desde Mw 1.0 hasta Mw 7.9, y profundidades de hasta 300 km. Analizando la distribución de sismos por países, se concluye que El Salvador y Costa Rica poseen la mayor cantidad de sismos en todo el catálogo sísmico, representando aproximadamente el 58%. Luego siguen Nicaragua con alrededor del 18%, Panamá y Guatemala con un 12% y 11%, respectivamente. Por último, Honduras presenta la menor cantidad de sismos en su territorio (menos del 2%), debido, a parte de su menor sismicidad, a que no cuenta con las mejores condiciones de instrumentación sísmica ni con grupos expertos en redes sísmicas, en comparación con otros países centroamericanos. Este catálogo constituye una herramienta fundamental para futuros estudios de peligrosidad sísmica en la región y representa un avance clave en el conocimiento del marco sismotectónico centroamericano.

Por otro lado, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de diversos métodos, modelos y parámetros de entrada en los resultados de peligrosidad sísmica, como son los métodos de depuración, el ajuste de modelos de recurrencia, las relaciones de escalamiento y los modelos de movimiento fuerte

(GMM). Este estudio permitió identificar que los GMM son los modelos que introducen mayor variabilidad en los resultados, y por tanto representan mayor incertidumbre epistemológica, mientras que el método de ajuste al modelo de recurrencia y el método de *declustering* presentan menor variabilidad en los resultados, por lo que tienen menor impacto y llevan asociada una menor incertidumbre epistemológica.

Los resultados del análisis de sensibilidad permitieron construir un árbol lógico con asignación de pesos justificados para las diferentes ramas u opciones de cálculo, utilizando métodos estadísticos del coeficiente de variación (CV), MSE y RMSE, mejorando la trazabilidad de las decisiones metodológicas en los modelos probabilistas.

Gracias a este análisis de sensibilidad se pudieron generar mapas de peligrosidad sísmica para la región, que representan el modelo denominado *KUKAHPÁN-25* que supone un actualización regional de la peligrosidad sísmica en Centroamérica, integrando: 1) el catálogo sísmico mejorado (Gamboa-Canté et al., 2024), 2) la zonificación tectónica publicada (Alvarado et al., 2017), 3) GMM calibrados con datos locales (Mixco Durán, 2020; Hidalgo-Leiva et al., 2023) y 4) relaciones de escalamiento específicas para fallas corticales en la región (Arroyo-Solórzano et al., 2024).

Este modelo se representa por medio de mapas regionales de PGA y SA(1.0s) para periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años, así como espectros de amenaza uniforme (UHS) y sismos de control derivados por desagregación de la peligrosidad para las principales capitales de la región. Los resultados fueron comparados con modelos regionales (RESIS II, GEM, CCASH), modelos locales recientes y con los valores establecidos por los códigos sísmicos vigentes, mostrando diferencias significativas en algunas zonas, lo que confirma la necesidad de revisar los modelos nacionales con base en enfoques regionales más consistentes. En conjunto, el modelo regional actualizado *KUKAHPÁN-25*, supone un aumento de la amenaza respecto a estudios regionales previos, pero es consistente con estudios nacionales recientes. Lo más importante es que elimina discontinuidades transfronterizas comunes al agregar mapas nacionales, ofreciendo una referencia armonizada para la representación regional de peligrosidad sísmica.

Se identificaron los sismos de control que más contribuyen a la peligrosidad en las capitales de los seis países de Centroamérica, concluyendo que tanto las fuentes de subducción como las fallas corticales contribuyen a los niveles de peligrosidad en

estas capitales, con la excepción de Tegucigalpa, donde la subducción no es dominante. Los escenarios de fallamiento local que dominan la amenaza sísmica identificados son: fallas Motagua-Polochic-Chixoy y Jalpatagua en Guatemala; Guayume y San Vicente en El Salvador; el sistema de fallas de Guayape y la Depresión Hondureña en Honduras; fallas en la depresión tectónica de Nicaragua; el cinturón deformado central en Costa Rica; y las fallas de Gatún, Azota, Limón, Pedro Miguel y Miraflores en Panamá.

A nivel metodológico, una de las principales contribuciones de esta tesis fue la actualización del método propuesto por Rivas-Medina et al. (2018) a través de la herramienta *HybriModel* (H_M), que distribuye el potencial sísmico de la región entre fuentes tipo zona y tipo falla mediante un proceso iterativo que ayuda a facilitar la toma de decisiones al usuario sobre los parámetros de recurrencia de las fuentes sísmicas. Esta actualización metodológica permite la representación más realista del potencial sismogénico de una región, especialmente en áreas donde las fallas activas han sido suficientemente caracterizadas y pueden ser consideradas como fuentes independientes dentro de los cálculos de peligrosidad sísmica probabilistas.

Finalmente, se consolidó la propuesta metodológica mediante su aplicación específica a Guatemala, como caso de estudio. Se llevó a cabo una comparación sistemática entre el modelo clásico zonificado PSHA y diferentes modelos con integración de fallas activas (*moment-slip*, FiSH, SHERIFS, *HybridModel*). La comparación incluyó perfiles de aceleración, mapas CV reflejando la variabilidad de resultados por diferentes métodos y un mapa de cociente de aceleraciones.

Independientemente del método utilizado, al incorporar las fuentes tipo falla en los cálculos de peligrosidad sísmica, se obtienen aceleraciones que doblan, en promedio, las deducidas por métodos zonificados en la proximidad de las fallas. Este planteamiento permite calibrar los factores de amplificación por *proximidad de la falla*, que empiezan a contemplarse en los códigos sísmicos, así como el rango de distancias a las que esa amplificación resulta significativa. Tal como se evidencia en el caso de estudio desarrollado para Guatemala, las aceleraciones en el entorno de la falla resultan superiores que las obtenidas con modelos únicamente de zonas sismogénicas en un rango de distancias que oscila entre 30 y 50 km.

Los resultados revelaron que el uso de modelos híbridos mejora la representación de la peligrosidad, al permitir una asignación más coherente del potencial sísmico

y considerar el *efecto de proximidad de la fuente*. Este efecto se manifiesta particularmente en los espectros de respuesta en ciudades próximas a fallas.

En la aplicación desarrollada en algunas ciudades de Guatemala se destaca un cambio importante en los espectros UHS deducidos por un modelo zonificado PSHA y los obtenidos por un modelo híbrido que integra las fuentes tipo falla. En las ciudades de Huehuetenango, Rio Hondo y Morales , el UHS obtenido con el modelo híbrido es muy superior al estimado con el método clásico zonificado. Estas ciudades están justamente localizadas muy próximas a los sistemas de fallas Polochic-Chixoy y Motagua, y se evidencia que en ellas los modelos zonificados no capturan el efecto de proximidad de fuente. El espectro del código sísmico de Guatemala también es excedido en estas ciudades.

En conjunto, los resultados de esta tesis doctoral evidencian que el uso de información geológica y geofísica local de alta calidad, junto con una evaluación crítica de las incertidumbres metodológicas, permite mejorar sustancialmente la estimación de la amenaza sísmica en Centroamérica. Se propone que el modelo *KUKAHPÁN-25*, la actualización del modelo propuesto por Rivas-Medina et al. (2018) denominado *HybriModel* (H_M), y la metodología aplicada en Guatemala sirvan como base para futuros estudios de peligrosidad sísmica en Centroamérica y la actualización de los códigos sísmicos de los países de la región, así como para la elaboración de escenarios sísmicos más realistas en zonas urbanas altamente expuestas para la planificación y mitigación del riesgo a corto plazo.

7. Líneas futuras de investigación

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se identifican diversas líneas futuras que pueden ampliar y consolidar el enfoque metodológico propuesto. Una primera línea consiste en extender el análisis comparativo realizado en Guatemala al resto de países de Centroamérica, lo que permitiría evaluar la variabilidad espacial de la peligrosidad sísmica y generar un modelo regional armonizado que integre de forma explícita las fuentes tipo falla junto con las fuentes tipo zona. En paralelo, se propone desarrollar una base de datos geológica regional de fallas activas, con criterios estandarizados para su caracterización cinemática y geométrica, que pueda ser empleada en modelos híbridos más detallados. Asimismo, resulta pertinente explorar la incorporación de modelos temporales de recurrencia sísmica, superando el enfoque poissoniano clásico, lo cual permitiría integrar la historia de ruptura de fallas individuales y las tasas de carga acumuladas observadas mediante geodesia y técnicas InSAR. Otra línea de interés se centra en la evaluación de Modelos de Movimiento Fuerte (GMM) específicos para la región de Centroamérica, desarrollando GMM calibrados con datos locales para reducir la incertidumbre inherente a los modelos de atenuación.

Referencias

- Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016). BC Hydro Ground Motion Prediction Equations For Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra*, *32*(1), 23–44. <https://doi.org/10.1193/051712EQS188MR>
- Acuña, R., Bermúdez, J., Cartín, J., Cruz, M., Fernández, C., Granados, J., Guevara, E., Gutiérrez, J., Laporte, M., Mora, R., Poveda, Á., Santana, G., & Ronald Steinvoth S. (2011). *Código Sísmico de Costa Rica 2010* (4th ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Agate, M., Caldarelli, F., Castillo, L., Garcia, A., Giunta, G., Mixco, L., Requena, J., Rubi Tellez, C., Ruiz, M., Sulli, A., Argueta-Platero, A. A., Calderon, H., Luna, J., & Torres Bernhard, L. E. (2024). The pattern of brittle deformation in Central America for an assessment of the seismo-tectonic framework. *Journal of Maps*, *20*(1), 1–15. <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2285479>
- Aki, K. (1965). Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\log N = a - bM$ and its Confidence Limits. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, *43*(2), 237–239.
- Akkar, S., Sandikkaya, M. A., & Bommer, J. J. (2014). Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *12*(1), 359–387. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9461-4>
- Alfaro, C. S., Kiremidjian, A. S., & White, R. A. (1990). *Seismic Zoning and Ground Motion Parameters for El Salvador*. <https://purl.stanford.edu/yq951mj8521>
- Algermissen, S. T., Dewey, J. W., Langer, C. J., & Dillinger, W. H. (1974). The Managua, Nicaragua, earthquake of December 23, 1972: Location, focal mechanism, and intensity distribution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *64*(4), 993–1004. <https://doi.org/10.1785/BSSA0640040993>
- Allen, T. I., & Hayes, G. P. (2017). Alternative rupture-scaling relationships for subduction interface and other offshore environments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *107*(3), 1240–1253. <https://doi.org/10.1785/0120160255>
- Alvarado, G. E., Benito, B., Staller, A., Climent, Á., Camacho, E., Rojas, W., Marroquín, G., Molina, E., Talavera, J. E., Martínez-Cuevas, S., & Lindholm,

- C. (2017). The new Central American seismic hazard zonation: Mutual consensus based on up to day seismotectonic framework. *Tectonophysics*, 721(28), 462–476. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.013>
- Álvarez, L. (2021). A new earthquake catalog for Nicaragua Republic. *Investigaciones Geográficas*, 62, 43–68. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2021.64948>
- Álvarez, L. (2022). Nueva Estimación de la Amenaza Sísmica para Nicaragua. *Revista Tierra*, 2(1), 1–18. <https://revistatierra.unan.edu.ni>
- Ammon, C. J., Velasco, A. A., Lay, T., & Wallace, T. C. (2021). Earthquake size & descriptive earthquake statistics. In *Foundations of Modern Global Seismology* (pp. 197–222). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815679-7.00014-8>
- Anderson, J. G. (1979). ESTIMATING THE SEISMICITY FROM GEOLOGICAL STRUCTURE FOR SEISMIC-RISK STUDIES. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69(1), 135–158. <https://doi.org/10.1785/BSSA0690010135>
- Anderson, J. G., & Luco, J. E. (1983). CONSEQUENCES OF SLIP RATE CONSTRAINTS ON EARTHQUAKE OCCURRENCE RELATIONS. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(2), 471–496. <https://doi.org/10.1785/BSSA0730020471>
- Arroyo, I. G., & Linkimer, L. (2021). Geometría de la zona sismogénica interplacas en el Sureste de Costa Rica a la luz de la secuencia sísmica de Golfito del 2018. *Geofísica Internacional*, 60(1), 51–75. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2021.60.1.2026>
- Arroyo, M., Godínez, K., & Linkimer, L. (2017). Completitud del catálogo de la red sismológica nacional de Costa Rica durante 1975-2014. *Boletín de Geología*, 39(3), 87–98. <https://doi.org/10.18273/revbol.v39n3-2017006>
- Arroyo-Solórzano, M., Belén Benito, M., Alvarado, G. E., & Climent, A. (2024). Empirical Earthquake Source Scaling Relations for Maximum Magnitudes Estimations in Central America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 114(3), 1539–1567. <https://doi.org/10.1785/0120230100>
- Arroyo-Solórzano, M., & Linkimer, L. (2021). Spatial variability of the b-value and seismic potential in Costa Rica. *Tectonophysics*, 814, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228951>

- Atkinson, G. M., & Boore, D. M. (2011). Modifications to existing ground-motion prediction equations in light of new data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *101*(3), 1121–1135. <https://doi.org/10.1785/0120100270>
- Authemayou, C., Brocard, G., Teyssier, C., Suski, B., Cosenza, B., Morán-Ical, S., González-Véliz, C. W., Aguilar-Hengstenberg, M. A., & Holliger, K. (2012). Quaternary seismo-tectonic activity of the Polochic Fault, Guatemala. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *117*(7). <https://doi.org/10.1029/2012JB009444>
- Barrera-Lopez, C. V., Mooney, W. D., & Kaban, M. K. (2022). Regional Geophysics of the Caribbean and Northern South America: Implications for Tectonics. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *23*(5). <https://doi.org/10.1029/2021GC010112>
- Benito, B., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, A., Marroquín, G., Molina, E., Rojas, W., Talavera, E., Escobar, J. J., Alvarado, G., Torres, Y., & Pérez-Escalante, M. (2010). *Amenaza sísmica en América Central* (M. B. Benito Oterino & Y. Torres Fernández, Eds.; Entimema, Vol. 1).
- Benito, M. B., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, A., Marroquín, G., Molina, E., Rojas, W., Escobar, J. J., Talavera, E., Alvarado, G. E., & Torres, Y. (2012). A new evaluation of seismic hazard for the Central America Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *102*(2), 504–523. <https://doi.org/10.1785/0120110015>
- Bommer, J. J., Hernandez, D. A., Navarrete, J. A., & Salazar, W. M. (1996). Seismic hazard assessments for El Salvador. *Geofísica Internacional*, *35*(3), 227–244. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1996.35.3.459>
- Bommer, J., McQueen, C., Salazar, W., Scott, S., & Woo, G. (1998). A Case Study of the Spatial Distribution of Seismic Hazard (El Salvador). *Natural Hazards*, *18*(2), 145–166. <https://doi.org/10.1023/A:1008066017353>
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, *30*(3), 1057–1085. <https://doi.org/10.1193/070113EQS184M>
- Bourke, J. R., Levin, V., Arroyo, I. G., & Linkimer, L. (2023). Evidence for Caribbean plate subduction in southern Costa Rica. *Geology*, *51*(4), 408–412. <https://doi.org/10.1130/G50796.1>

- Brune, J. N. (1968). Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. *Journal of Geophysical Research*, *73*(2), 777–784. <https://doi.org/10.1029/JB073i002p00777>
- Bungum, H. (2007). Numerical modelling of fault activities. *Computers and Geosciences*, *33*(6), 808–820. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.10.011>
- Cáceres, D., & Kulháněk, O. (2000). Seismic Hazard of Honduras. *Natural Hazards*, *22*, 49–69. <https://doi.org/10.1023/A:1008134030510>
- Camacho, E., Lindholm, C., Dahle, A., & Bungum, H. (1997). Seismic hazard assessment in Panama. *Engineering Geology*, *48*, 1–6. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(97\)81910-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)81910-2)
- Carvajal-Arenas, L. C., & Mann, P. (2018). Western Caribbean intraplate deformation: Defining a continuous and active microplate boundary along the San Andres rift and Hess Escarpment fault zone, Colombian Caribbean Sea. *AAPG Bulletin*, *102*(8), 1523–1563. <https://doi.org/10.1306/12081717221>
- Castillo, L., Ferrera Boza, R., Orlando Chávez, J., Renán Rivera, J., Torre, J., Moncada, J. L., Alvarado, M., Barahona, O., Soto, A., & Andino, J. C. (2008). *Código Hondureño de Construcción: Normas Técnicas CHOC-08*. Colegio de Ingenieros Civiles de Honduras.
- Cauzzi, C., Faccioli, E., Vanini, M., & Bianchini, A. (2015). Updated predictive equations for broadband (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *13*(6), 1587–1612. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9685-y>
- Chartier, T., Scotti, O., & Lyon-Caen, H. (2019). SHERIFS: Open-source code for computing earthquake rates in fault systems and constructing hazard models. *Seismological Research Letters*, *90*(4), 1678–1688. <https://doi.org/10.1785/0220180332>
- Cornell, A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *58*(5), 1583–1606. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583>
- Cosentino, P., Ficarra, V., & Luzio, D. (1977). Truncated exponential frequency-magnitude relationship in earthquake statistics. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *67*(6), 1615–1623. <https://doi.org/10.1785/bssa0670061615>

- Cruz Calderón, G., Escobar, J. J., Tenorio, C., & Lindholm, C. (2001). Evaluación de la amenaza sísmica en Honduras. *Ciencia y Tecnología*, 8(8), 1–16.
- Delgado Carranza, S., Montoya Coronado, L., Rugama Idiáquez, M., Fariñas Pérez, M., Chávez Toruño, G., Toruño Méndez, M., Mendoza Mercado, A., Reyes López, S., & Lorio Laguna, D. (2021). *NORMA SISMORRESISTENTE PARA LA CIUDAD DE MANAGUA (ED-MTI 140622)* (1st ed.). Ministerio de Transporte e Infraestructura.
- Di Giacomo, D., Engdahl, E. R., & Storchak, D. A. (2018). The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904-2014): status after the Extension Project. *Earth System Science Data*, 10(4), 1877–1899. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1877-2018>
- Dziewonski, A. M., Chou, T. A., & Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 86(B4), 2825–2852. <https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825>
- Ekström, G., Nettles, M., & Dziewoński, A. M. (2012). The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200–201, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
- Ellis, A., DeMets, C., Briole, P., Cosenza, B., Flores, O., Graham, S. E., Guzmán-Speziale, M., Hernández, D., Kostoglodov, V., LaFemina, P., Lord, N., Lasserre, C., Lyon-Caen, H., Maradiaga, M. R., McCaffrey, R., Molina, E., Rivera, J., Rogers, R., & Staller, A. (2018). GPS constraints on deformation in northern Central America from 1999 to 2017, Part 1 - Time-dependent modelling of large regional earthquakes and their post-seismic effects. *Geophysical Journal International*, 214(3), 2177–2194. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy249>
- Ellis, A., DeMets, C., McCaffrey, R., Briole, P., Cosenza Muralles, B., Flores, O., Guzmán-Speziale, M., Hernández, D., Kostoglodov, V., LaFemina, P., Lord, N., Lasserre, C., Lyon-Caen, H., Rodriguez Maradiaga, M., Molina, E., Rivera, J., Rogers, R., Staller, A., & Tikoff, B. (2019). GPS constraints on deformation in northern Central America from 1999 to 2017, Part 2: Block rotations and fault slip rates, fault locking and distributed deformation. *Geophysical Journal International*, 218(2), 729–754. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz173>

- Ellis, A. P., Demets, C., Briole, P., Molina, E., Flores, O., Rivera, J., Lasserre, C., Lyon-Caen, H., & Lord, N. (2015). Geodetic slip solutions for the Mw= 7.4 Champerico (Guatemala) earthquake of 2012 November 7 and its postseismic deformation. *Geophysical Journal International*, *201*(2), 856–868. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu484>
- Espinosa, S. (1996). Probabilistic Macroseismic Hazard Assessment for Nicaragua (Preliminary Results). *Natural Hazards*, *13*, 179–202. <https://doi.org/10.1007/BF00138482>
- Finch, R. C., & Ritchie, A. W. (1991). The Guayape fault system, Honduras, Central America. *Journal of South American Earth Sciences*, *4*(1–2), 43–60. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(91\)90017-F](https://doi.org/10.1016/0895-9811(91)90017-F)
- Frankel, A. (1995). Mapping Seismic Hazard in the Central and Eastern United States. *Seismological Research Letters*, *66*(4), 8–21. <https://doi.org/10.1785/gssrl.66.4.8>
- Funk, J., Mann, P., McIntosh, K., & Stephens, J. (2009). Cenozoic tectonics of the Nicaraguan depression, Nicaragua, and Median trough, El Salvador, based on seismic-reflection profiling and remote-sensing data. *Bulletin of the Geological Society of America*, *121*(11–12), 1491–1521. <https://doi.org/10.1130/B26428.1>
- Gamboa-Canté, C., Arroyo-Solórzano, M., Benito, B., Aguilar, J., Arroyo, I. G., Camacho-Astigarrabia, E., Castro, D., Flores, O., Linkimer, L., Marroquin, M. G., Mixco-Durán, L., Strauch, W., Talavera, E., Valle, G., & Yani-Quiyuch, R. (2024). Seismicity in Central America (1520–2020) and Earthquake catalog compilation for seismic hazard assessments. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *22*, 7201–7234. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-02059-9>
- Gamboa-Canté, C., Arroyo-Solórzano, M., Rivas-Medina, A., & Benito, B. (2025a). Sensitivity Analysis on the Impact of Input Parameters on Seismic Hazard Results: A Case Study of Central America. *Geosciences*, *15*(1), 4. <https://doi.org/10.3390/geosciences15010004>
- Gamboa-Canté, C., Arroyo-Solórzano, M., Rivas-Medina, A., & Benito, M. B. (2025b). Overview of seismic hazard studies in Central America: A comparative analysis of results. *Journal of South American Earth Sciences*, *164*, 105630. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105630>
- García-Lanchares, C., Fernández-Landa, A., Armayor, J. L., Hernández-Rubio, O., & Marchamalo-Sacristán, M. (2025). The Influence of Groundwater

- Management on Land Subsidence Patterns in the Metropolitan Region of Guatemala City: A Multi-Temporal InSAR Analysis. *Remote Sensing*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/rs17091496>
- García-Lanchares, C., Marchamalo-Sacristán, M., Fernández-Landa, A., Sancho, C., Krishnakumar, V., & Benito, B. (2023). Analysis of Deformation Dynamics in Guatemala City Metropolitan Area Using Persistent Scatterer Interferometry. *Remote Sensing*, 15(17), 4207. <https://doi.org/10.3390/rs15174207>
- García-Pelaez, J., Gee, R., Styron, R., & Poggi, V. (2019). *PSHA input model documentation for Caribbean and Central America (CCA)*.
- Gardner, J. K., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363–1367. <https://doi.org/10.1785/BSSA0640051363>
- Garnier, B., Tikoff, B., Flores, O., Jicha, B., DeMets, C., Cosenza-Murales, B., Hernandez, D., Marroquin, G., Mixco, L., & Hernandez, W. (2021). An integrated structural and GPS study of the Jalpatagua fault, southeastern Guatemala. *Geosphere*, 17(1), 201–225. <https://doi.org/10.1130/GES02243.1>
- Garnier, B., Tikoff, B., Flores, O., Jicha, B., DeMets, C., Cosenza-Murales, B., Hernandez, W., & Greene, D. (2022). Deformation in Western Guatemala Associated With the NAFCA (North America-Central American Forearc-Caribbean) Triple Junction: Neotectonic Strain Localization Into the Guatemala City Graben. *Tectonics*, 41(2). <https://doi.org/10.1029/2021TC006739>
- Gaspar-Escribano, J. M., Rivas-Medina, A., Parra, H., Cabañas, L., Benito, B., Ruiz Barajas, S., & Martínez Solares, J. M. (2015). Uncertainty assessment for the seismic hazard map of Spain. *Engineering Geology*, 199, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.10.001>
- Ghods, B., & Rofooei, F. R. (2022). Addressing the epistemic uncertainty in seismic hazard analysis as a basis for seismic design by emphasizing the knowledge aspects and utilizing imprecise probabilities. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(2), 741–764. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01252-4>
- Graham, S. E., Demets, C., Deshon, H. R., Rogers, R., Maradiaga, M. R., Strauch, W., Wiese, K., & Hernandez, D. (2012). GPS and seismic constraints on the M

- = 7.3 2009 Swan Islands earthquake: Implications for stress changes along the Motagua fault and other nearby faults. *Geophysical Journal International*, *190*(3), 1625–1639. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05560.x>
- Guéndel, F., & Bungum, H. (1995). Earthquakes and Seismic Hazards in Central America. *Seismological Research Letters*, *66*(5), 19–25. <https://doi.org/10.1785/gssrl.66.5.19>
- Gurjar, N., & Basu, D. (2022). Epistemic Uncertainty in PSHA and Seismic Hazard Characterization Using the Logic Tree Approach: Part I, Developing the Framework. *Pure and Applied Geophysics*, *179*, 3647–3676. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03143-4>
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *34*(4), 185–188. <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>
- Guzmán-Speziale, M., & Molina, E. (2022). Seismicity and seismically active faulting of Guatemala: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, *115*. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103740>
- Hamdache, M., Pelaéz, J. A. P., Henares, J., & Sawires, R. (2022). Seismic Hazard Assessment and Its Uncertainty for the Central Part of Northern Algeria. *Pure and Applied Geophysics*, *179*, 2083–2118. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03066-0>
- Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, *84*(B5), 2348–2350. <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>
- Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., & Smoczyk, G. M. (2018). Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*, *362*(6410), 58–61. <https://doi.org/10.1126/science.aat4723>
- Hidalgo-Leiva, D. A., Linkimer, L., Arroyo, I. G., Arroyo-Solórzano, M., Piedra, R., Climent, A., Díaz, V. S., Esquivel, L. C., Alvarado, G. E., Castillo, R., Carranza-Morales, M. E., Cerdas-Guntanis, L., Escalante-Meza, J., Lobo, S., Rodríguez, M. J., & Rojas, W. (2023). The 2022 Seismic Hazard Model for Costa Rica. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *113*(1), 23–40. <https://doi.org/10.1785/0120220119>
- Johnson, K., Villani, M., Bayliss, K., Brooks, C., Chandrasekhar, S., Chartier, T., Chen, Y.-S., Garcia-Pelaez, J., Gee, R., Styron, R., Rood, A., Simionato, M., &

- Pagani, M. (2023). *Global Earthquake Model (GEM) Seismic Hazard Map (version 2023.1 - June 2023)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8409646>
- Kagan, Y. Y. (2002a). Seismic moment distribution revisited: I. Statistical results. *Geophysical Journal International*, *148*(3), 520–541. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01594.x>
- Kagan, Y. Y. (2002b). Seismic moment distribution revisited: II. Moment conservation principle. *Geophysical Journal International*, *149*(3), 731–754. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01671.x>
- Kalakonas, P., Silva, V., Mouyiannou, A., & Rao, A. (2020). Exploring the impact of epistemic uncertainty on a regional probabilistic seismic risk assessment model. *Natural Hazards*, *104*(1), 997–1020. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04201-7>
- Kale, O., & Akkar, S. (2013). A New Procedure for Selecting and Ranking Ground-Motion Prediction Equations (GMPEs): The Euclidean Distance-Based Ranking (EDR) Method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *103*(2A), 1069–1084. <https://doi.org/10.1785/0120120134>
- Kanamori, H. (1971). Seismological evidence for a lithospheric normal faulting — the Sanriku earthquake of 1933. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *4*(4), 289–300. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(71\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0031-9201(71)90013-6)
- Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., & Fukushima, Y. (2006). A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *96*(3), 879–897. <https://doi.org/10.1785/0120050138>
- Kiamco, L., Alfaro, L., Avendaño, A., Berman, G., Camacho, E., De Puy, M., Echeverría, H., Dumanoir, R., García, L., Grajales, F., Guerra, F., Hassell, A., Lewis, E., Ng, E., Parada, R., Pinzón, A., Quirós, J. L., Sáez, D., Ulloa, D., ... Vinh, J. (2022). *Reglamento de Diseño Estructural para la República de Panamá (REP-2021)*. GACETA OFICIAL.
- Kiremidjian, A. S., Shah, H. C., & Sutch, P. L. (1982). Seismic hazard and uncertainty analysis of Honduras. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *1*(2), 83–94. [https://doi.org/10.1016/0261-7277\(82\)90017-1](https://doi.org/10.1016/0261-7277(82)90017-1)
- LaFemina, P., Dixon, T. H., Govers, R., Norabuena, E., Turner, H., Saballos, A., Mattioli, G., Protti, M., & Strauch, W. (2009). Fore-arc motion and Cocos Ridge

- collision in Central America. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(5), 1–21. <https://doi.org/10.1029/2008GC002181>
- Laporte, M., Lindholm, C., Bungum, H., & Dahle, A. (1994). *Seismic Hazard for Costa Rica*.
- Larsson, T., & Mattson, C. (1987). Seismic Hazard Analysis in Nicaragua - A Summary. *Developments in Geotechnical Engineering*, 45, 439–453. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-98955-0.50037-9>
- Linkimer, L., Arroyo, I. G., Alvarado, G. E., Arroyo, M., & Bakkar, H. (2018). The national seismological network of Costa Rica (RSN): An overview and recent developments. In *Seismological Research Letters* (Vol. 89, Issue 2A, pp. 392–398). Seismological Society of America. <https://doi.org/10.1785/0220170166>
- Lombardi, A. M., Akinci, A., Malagnini, L., & Mueller, C. S. (2005). Uncertainty analysis for seismic hazard in Northern and Central Italy. *Annals of Geophysics*, 48(6), 853–865. <https://doi.org/10.4401/ag-3239>
- López, M. A., Hernández de Paz, J., & Hasbun, J. C. (2021). *MODERNIZACIÓN DE LAS PROVISIONES QUE RIGEN EL DISEÑO SÍSMICO*.
- Lubbers, N., Bolton, D. C., Mohd-Yusof, J., Marone, C., Barros, K., & Johnson, P. A. (2018). Earthquake Catalog-Based Machine Learning Identification of Laboratory Fault States and the Effects of Magnitude of Completeness. *Geophysical Research Letters*, 45(24), 13,269–13,276. <https://doi.org/10.1029/2018GL079712>
- Lücke, O. H. (2014). Moho structure of Central America based on three-dimensional lithospheric density modelling of satellite-derived gravity data. *International Journal of Earth Sciences*, 103(7), 1733–1745. <https://doi.org/10.1007/s00531-012-0787-y>
- Lücke, O. H., & Arroyo, I. G. (2015). Density structure and geometry of the Costa Rican subduction zone from 3-D gravity modeling and local earthquake data. *Solid Earth*, 6(4), 1169–1183. <https://doi.org/10.5194/se-6-1169-2015>
- Lyon-Caen, H., Barrier, E., Lasserre, C., Franco, A., Arzu, I., Chiquin, L., Chiquin, M., Duquesnoy, T., Flores, O., Galicia, O., Luna, J., Molina, E., Porrás, O., Requena, J., Robles, V., Romero, J., & Wolf, R. (2006). Kinematics of the North American-Caribbean-Cocos plates in Central America from new GPS measurements across the Polochic-Motagua fault system. *Geophysical Research Letters*, 33(19). <https://doi.org/10.1029/2006GL027694>

- MacKenzie, L., Abers, G. A., Fischer, K. M., Syracuse, E. M., Protti, J. M., Gonzalez, V., & Strauch, W. (2008). Crustal structure along the southern Central American volcanic front. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *9*(8). <https://doi.org/10.1029/2008GC001991>
- Martínez-Díaz, J. J., Álvarez-Gómez, J. A., Staller, A., Alonso-Henar, J., Canora, C., Insúa-Arévalo, J. M., Tsige, M., Villamor, P., Herrero-Barbero, P., Hernández-Moreno, C., Hernández, W., Hernández, D., Marroquín, G., & Mixco, L. (2021). Active faults of El Salvador. *Journal of South American Earth Sciences*, *105*. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103038>
- Mixco Durán, L. E. (2020). *Evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador*. <https://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/riesgo+sismico/amenaza/antecedentes/>
- Mizrahi, L., Nandan, S., & Wiemer, S. (2021). The Effect of Declustering on the Size Distribution of Mainshocks. *Seismological Research Letters*, *92*(4), 2333–2342. <https://doi.org/10.1785/0220200231>
- Montalva, G. A., Bastías, N., & Rodriguez-Marek, A. (2017). Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *107*(2), 901–911. <https://doi.org/10.1785/0120160221>
- Montero, W., Peraldo, G., & Rojas, W. (1997). *PROYECTO DE AMENAZA SÍSMICA DE AMERICA CENTRAL*.
- Mortgat, C. P., Zsutty, T. C., Shah, H. C., & Lubetkin, L. (1977). *A study of Seismic Risk for Costa Rica*. <http://purl.stanford.edu/cb820ng4035>
- Pace, B., Visini, F., & Peruzza, L. (2016). FiSH: MATLAB Tools to Turn Fault Data into Seismic-Hazard Models. *Seismological Research Letters*, *87*(2A), 374–386. <https://doi.org/10.1785/0220150189>
- Pagani, M., Garcia-Pelaez, J., Gee, R., Johnson, K., Poggi, V., Silva, V., Simionato, M., Styron, R., Viganò, D., Danciu, L., Monelli, D., & Weatherill, G. (2020). The 2018 version of the Global Earthquake Model: Hazard component. *Earthquake Spectra*, *36*(1_suppl), 226–251. <https://doi.org/10.1177/8755293020931866>
- Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, M., & Viganò, D.

- (2014). Openquake engine: An open hazard (and risk) software for the global earthquake model. *Seismological Research Letters*, *85*(3), 692–702. <https://doi.org/10.1785/0220130087>
- Paiz Aragón, B., Cruz, D., Monzón Despang, H., Rodas, J. A., Chang Campang, R., Flores, O., Gonzáles, W., & Ligorria, J. P. (2024). *NSE 2 - DEMANDAS ESTRUCTURALES Y CONDICIONES DE SITIO*. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES. www.agies.org
- Papazachos, B. C., Scordilis, E. M., Panagiotopoulos, D. G., Papazachos, C. B., & Karakaisis, G. F. (2004). GLOBAL RELATIONS BETWEEN SEISMIC FAULT PARAMETERS AND MOMENT MAGNITUDE OF EARTHQUAKES. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, *36*(3), 1482–1489. <https://doi.org/10.12681/bgsg.16538>
- Perry, M., & Bendick, R. (2024). A comparative analysis of five commonly implemented declustering algorithms. *Journal of Seismology*, *28*(3), 829–842. <https://doi.org/10.1007/s10950-024-10221-8>
- Peruzza, L., Esposito, E., Rodríguez García, F. E., García Castro, R. A., Santos, P., Marroquín, G., Mixco, L., Torres Bernhard, L., Torres, R., Hernandez, D. A., Rubi Tellez, C., Guevara, S., Castrillo-Osorio, N., Monterroso, D., Ordóñez Martínez, T., Ruiz, M., Tenorio, C., Flores, O., Luna, J., ... Giunta, G. (2021). MARCA-GEHN, a prototype macroseismic archive of four Central America countries. *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, *62*(2), s1–s198. <https://doi.org/10.4430/bgta0355>
- Plafker, G. (1976). Tectonic Aspects of the Guatemala Earthquake of 4 February 1976. *Science, New Series*, *193*(4259), 1201–1208. <https://doi.org/10.1126/science.193.4259.1201>
- Portela, J., Staller, A., Béjar-Pizarro, M., Hamling, I. J., & Hernández, D. (2024). Tectonic deformation in El Salvador from combined InSAR and GNSS data. *Tectonophysics*, *882*. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230364>
- Reasenber, P. (1985). Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982. *Journal of Geophysical Research*, *90*(B7), 5479–5495. <https://doi.org/10.1029/JB090iB07p05479>
- Rivas-Medina, A., Benito, B., & Gaspar-Escribano, J. M. (2018). Approach for combining fault and area sources in seismic hazard assessment: Application

- in south-eastern Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(11), 2809–2823. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2809-2018>
- Rodas, J., Monzon, H., & Callejas, F. (2021). *ANÁLISIS DE RIESGO SÍSMICO PARA LA REPÚBLICA DE GUATEMALA*. <https://www.agies.org/bibliotecas/>
- Rojas, W., Bungum, H., & Lindholm, C. (1993). Historical and recent earthquakes in Central America. *Revista Geológica de América Central*, 16, 5–22. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i16.13242>
- Rojas, W., Cowan, A., Lindholm, C., Dahle, C., & Bungum, H. (1993). Regional seismic zonation for Central America: A preliminary model, Program of Reduction of Natural Disasters in Central America. In *Report of the Research Council of Norway (NORSAR)*.
- Rydelek, P. A., & Sacks, I. S. (1989). Testing the completeness of earthquake catalogues and the hypothesis of self-similarity. *Nature*, 337, 251–253. <https://doi.org/10.1038/337251a0>
- Sáenz Bravo, R. (2013). Cuando la ciudad tiene imagen: cronología del traslado de la ciudad de Guatemala, 1773-1776. *V Seminario Internacional de Investigación En Urbanismo, Barcelona-Buenos Aires, Junio 2013*, 232–239. <https://doi.org/10.5821/siiu.5967>
- Salazar, W. (2018). Principles of Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA) and Site Effect Evaluation and Its Application for the Volcanic Environment in El Salvador. In V. Svalova (Ed.), *Earthquakes - Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction* (pp. 119–146). InTechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75845>
- Salazar, W., Brown, L., Hernández, W., & Guerra, J. (2013). An Earthquake Catalogue for El Salvador and Neighboring Central American Countries (1528-2009) and Its Implication in the Seismic Hazard Assessment. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 7(8), 1018–1045. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2013.08.011>
- Salgado-Gálvez, M. A., Ordaz, M., Singh, S. K., Pérez-Campos, X., Huerta, B., Bazzurro, P., & Fagà, E. (2022). A Caribbean and Central America Seismic Hazard Model for Sovereign Parametric Insurance Coverage. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(1), 1–22. <https://doi.org/10.1785/0120220117>

- Scheingraber, C., & Käser, M. (2020). Spatial seismic hazard variation and adaptive sampling of portfolio location uncertainty in probabilistic seismic risk analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(7), 1903–1918. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1903-2020>
- Scherbaum, F., Delavaud, E., & Riggelsen, C. (2009). Model Selection in Seismic Hazard Analysis: An Information-Theoretic Perspective. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(6), 3234–3247. <https://doi.org/10.1785/0120080347>
- Shah, H. C., Mortgat, C. P., Kiremidjian, A., & Zsutty, T. C. (1975). *A Study of Seismic Risk for Nicaragua, Part I*. <http://purl.stanford.edu/vn596mw3936>
- Shaw, B. E. (2023). Magnitude and Slip Scaling Relations for Fault-Based Seismic Hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(3), 924–947. <https://doi.org/10.1785/0120220144>
- Shedlock, K. M. (1999). Seismic hazard map of North and Central America and the Caribbean. *ANNALI DI GEOFISICA*, 42(6), 977–997. <https://doi.org/10.4401/ag-3786>
- Silva, V., Crowley, H., Pagani, M., Monelli, D., & Pinho, R. (2014). Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Natural Hazards*, 72(3), 1409–1427. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0618-x>
- Singh, S. K., Gutiérrez, C., & Arboleda, J. (1993). *PELIGRO SÍSMICO EN EL SALVADOR*. <https://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00016/doc00016.htm>
- Stepp, J. C. (1972). Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and Its Effect on Statistical Estimates of Earthquake Hazard. *Proceedings of the International Conference on Microzonation*, 897–910.
- Strasser, F. O., Arango, M. C., & Bommer, J. J. (2010). Scaling of the source dimensions of interface and intraplate subduction-zone earthquakes with moment magnitude. *Seismological Research Letters*, 81(6), 941–950. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.6.941>
- Tanner, J. G., & Shedlock, K. M. (2004). Seismic hazard maps of Mexico, the Caribbean, and Central and South America. *Tectonophysics*, 390(1–4), 159–175. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.03.033>

- Taroni, M., & Akinici, A. (2021). Good practices in PSHA: Declustering, b-value estimation, foreshocks and aftershocks inclusion; A case study in Italy. *Geophysical Journal International*, *224*(2), 1174–1187. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa462>
- Tavakolizadeh, N., Mohammadigheymasi, H., Visini, F., & Pombo, N. (2024). FaultQuake: An open-source Python tool for estimating Seismic Activity Rates in faults. *Computers & Geosciences*, *191*, 105659. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105659>
- Taylor, W., Santos, P., Dahle, A., & Bungum, H. (1992). *Digitization of strong motion data and estimation of PGA attenuation*.
- Thingbaijam, K. K. S., Mai, P. M., & Goda, K. (2017). New empirical earthquake source-scaling laws. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *107*(5), 2225–2246. <https://doi.org/10.1785/0120170017>
- Uhrhammer, R. A. (1986). Characteristics of Northern and Central California Seismicity. *Earthquakes Notes*, *57*(1), 21–37. <https://doi.org/10.1785/gssrl.57.1.5>
- Vergara Muñoz, A. (1989). Assessment of Earthquake Hazard in Panama Based on Seismotectonic Regionalization. *Natural Hazards*, *2*, 115–131. <https://doi.org/10.1007/BF00141386>
- Vergara Muñoz, A. (1991). Probabilistic seismic hazard maps for Panama. *Natural Hazards*, *4*, 1–6. <https://doi.org/10.1007/BF00126555>
- Villagran, M., Lindholm, C., Dahle, A., Cowan, H., & Bungum, H. (1997). Seismic Hazard Assessment for Guatemala City. *Natural Hazards*, *14*, 189–205. <https://doi.org/10.1007/BF00128266>
- Visini, F., Valentini, A., Chartier, T., Scotti, O., & Pace, B. (2020). Computational Tools for Relaxing the Fault Segmentation in Probabilistic Seismic Hazard Modelling in Complex Fault Systems. *Pure and Applied Geophysics*, *177*(5), 1855–1877. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02114-6>
- Weatherill, G., Rodríguez, L., & Pagani, M. (2014). THE SEISMIC HAZARD MODELLER'S TOOLKIT: AN OPEN-SOURCE LIBRARY FOR THE CONSTRUCTION OF PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD MODELS. *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 1–12. <https://github.com/GEMScienceTools/hmtk>

- Weichert, D. H. (1980). Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(4), 1337–1346. <https://doi.org/10.1785/BSSA0700041337>
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>
- White, R. A. (1984). *Catalog of historic seismicity in the vicinity of the Chixoy-Polochic and Motagua faults, Guatemala*. <https://doi.org/10.3133/ofr8488>
- White, R. A. (1985). THE GUATEMALA EARTHQUAKE OF 1816 ON THE CHIXOY-POLOCHIC FAULT. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(2), 455–473. <https://doi.org/10.1785/BSSA0750020455>
- White, R. A., Harlow, D. H., & Alvarez, S. (1987). The San Salvador Earthquake of October 10, 1986—Seismological Aspects and Other Recent Local Seismicity. *Earthquake Spectra*, 3(3), 419–434. <https://doi.org/10.1193/1.1585439>
- Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373–382. <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>
- Woessner, J., & Wiemer, S. (2005). Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2), 684–698. <https://doi.org/10.1785/0120040007>
- Yong, C., Ling, C., Güendel, F., Kulháněk, O., & Juan, L. (2002). Seismic Hazard and Loss Estimation for Central America. *Natural Hazards*, 25(2), 161–175. <https://doi.org/10.1023/A:1013722926563>
- Youngs, R. R., Chiou, S.-J., Silva, W. J., & Humphrey, J. R. (1997). Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 58–73.
- Youngs, R. R., & Coppersmith, K. J. (1985). IMPLICATIONS OF FAULT SLIP RATES AND EARTHQUAKE RECURRENCE MODELS TO PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ESTIMATES. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 939–964. <https://doi.org/10.1785/BSSA0750040939>

Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., Fukushima, Y., & Fukushima, Y. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *96*(3), 898–913. <https://doi.org/10.1785/0120050122>

Anexos

A.1. Formulación y detalle de la herramienta *HybridModel* (H_M)

Este contenido complementario contiene información adicional que describe el proceso iterativo del código aplicado en *HybridModel* (H_M). La manera en que trabaja el código es de la siguiente manera:

PASO 0: Vectores de cálculo

Se crean los vectores de cálculo para los parámetros $MmaxC$, $MmaxZone$, btf y btz . El incremento de dichos vectores dependerá de la precisión asignada en el parámetro dec . Para el caso del vector $MmaxC$, los límites del vector serán desde $Mmin+1.0 - Mmax\ obs$. Por otro lado, en el caso del vector $MmaxZone$, los límites del vector serán los valores asignados por el usuario desde $MmaxZone1 - MmaxZone2$. Por último, para los vectores btf y btz , los límites estarán condiciones en $\beta - values$ entre 1.0 – 3.0 (esto puede ser modificado por el usuario si se conoce el contexto sismotectónico de la región).

$$(1) MmaxC = [M_{min} + 1.0, \dots, M_{max\ obs}]$$

$$(2) MmaxZone = [MmaxZone1, \dots, MmaxZone2]$$

$$(3) btf, btz = [1.0, \dots, 3.0]$$

PASO 1: Seismic moment (M_o) and moment rate (\dot{M}_o) in the seismic catalog in the range $Mmin$ a $Mmaxobs$

Se procede a calcular el momento sísmico (M_o) y la tasa de momento sísmico (\dot{M}_o) para cada bin de magnitud (m) desde $Mmin$ hasta $Mmax\ obs$. Esto se hace para los periodos de completitud [$CY(m)$].

$$(1) M_o(m) = 10^{(16.1+1.5 \cdot m)} \rightarrow \text{Hanks and Kanamori (1979)}$$

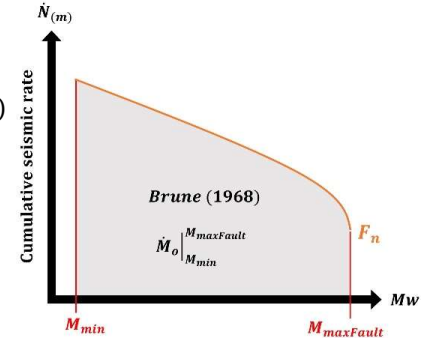
$$(2) \dot{n}(m) = \frac{n(m)}{LY_{obs} - CY_n}$$

$$(3) \dot{M}_o = \dot{n}(m) \cdot M_o(m)$$

PASO 2: Seismic moment ($M_o M_{maxFault}$) and moment rate ($\dot{M}_o fault$) for faults in the range $Mmin$ a $MmaxFault$

Se procede a calcular el momento sísmico ($M_o fault$) y la tasa de momento sísmico ($\dot{M}_o fault$) para cada falla desde $Mmin$ hasta $MmaxFault$.

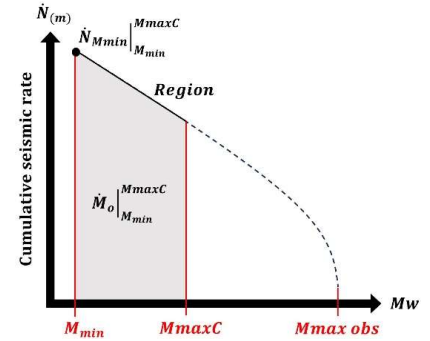
- (1) $M_o M_{maxFault} = 10^{(16.1+1.5 \cdot M_{maxFault})} \rightarrow$ Hanks and Kanamori (1979)
- (2) $\dot{M}_o fault = \dot{u} \cdot A \cdot \mu \rightarrow$ Brune (1968)



STEP 3: Cumulative seismic rate $Mmin$ ($\dot{N}_{Mminregion}$) and moment rate ($\dot{M}_o region$) for the region in the range $Mmin$ to $MmaxC$

Se procede a calcular la tasa acumuladas de sismos de $Mmin$ ($\dot{N}_{Mminregion}$) y la tasa de momento sísmico ($\dot{M}_o region$) para la región desde $Mmin$ hasta $MmaxC$.

- (1) $\dot{N}_{Mminregion} \Big|_{Mmin}^{MmaxC} = \sum_{Mmin}^{MmaxC} \dot{n}(m)$
- (2) $\dot{M}_o region \Big|_{Mmin}^{MmaxC} = \sum_{Mmin}^{MmaxC} \dot{n}(m) \cdot M_o(m)$

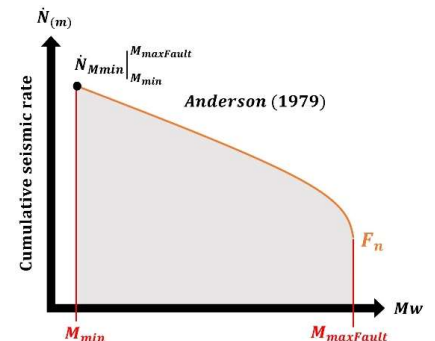


STEP 4: Cumulative seismic rate ($\dot{N}_{Mminfault}$) and moment rate ($\dot{M}_o fault$) for each fault in the range $Mmin$ to $MmaxC$

Se procede a calcular la tasa acumuladas de sismos de $Mmin$ ($\dot{N}_{Mmin fault}$) y la tasa de momento sísmico ($\dot{M}_o fault$) para las fallas desde $Mmin$ hasta $MmaxC$.

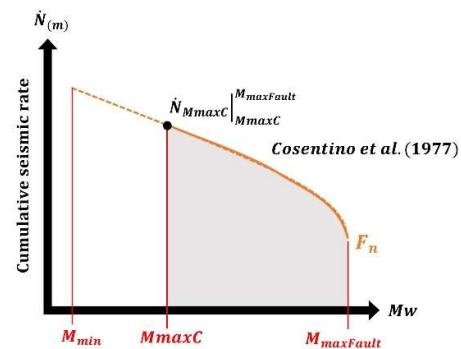
$$(1) \dot{N}_{Mmin} \Big|_{Mmin}^{MmaxFault} = \frac{\dot{M}_o fault \cdot (\bar{d} - btf) \cdot [e^{-btf(Mmin)} - e^{-btf(MmaxFault)}]}{btf \cdot [e^{-btf(MmaxFault)} \cdot M_o M_{maxFault} - e^{-btf(Mmin)} \cdot M_o M_{min}]}$$

↳ Anderson (1979)



$$(2) \dot{N}_{M_{max}C} \Big|_{M_{max}C}^{M_{max}Fault} = \dot{N}_{M_{min}} \Big|_{M_{min}}^{M_{max}Fault} \cdot \left[\frac{e^{-bt f(M_{max}C)} - e^{-bt(M_{max}Fault)}}{e^{-bt f(M_{min})} - e^{-bt f(M_{max}Fault)}} \right]$$

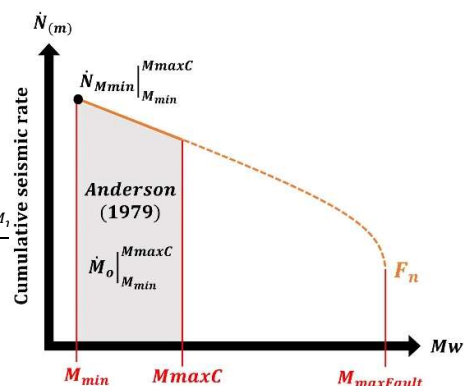
↳ Cosentino et al. (1977)



$$(3) \dot{N}_{M_{min} fault} \Big|_{M_{min}}^{M_{max}C} = \dot{N}_{M_{min}} \Big|_{M_{min}}^{M_{max}Fault} - \dot{N}_{M_{max}C} \Big|_{M_{max}C}^{M_{max}Fault}$$

$$\dot{M}_o fault \Big|_{M_{min}}^{M_{max}C} = \frac{\dot{N}_{M_{min}} \Big|_{M_{min}}^{M_{max}C} \cdot b t f \cdot [e^{-bt f(M_{max}C)} \cdot M_o M_{max}C - e^{-bt f(M_{min})} \cdot M_o M_{min}]}{(d - b t f) \cdot [e^{-bt f(M_{min})} - e^{-bt f(M_{max}C)}]}$$

↳ Anderson (1979)



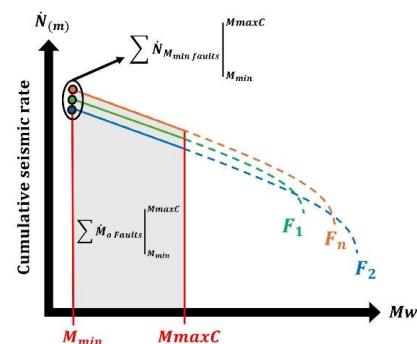
STEP 5: Total cumulative seismic rate ($\Sigma \dot{N}_{M_{min} fault}$) and moment rate ($\Sigma \dot{M}_o fault$) for all faults in the range M_{min} to $M_{max}C$

Se procede a calcular la tasa acumuladas de sismos de M_{min} total ($\Sigma \dot{N}_{M_{min} fault}$) y la tasa de momento sísmico total ($\Sigma \dot{M}_o fault$) para las fallas desde M_{min} hasta $M_{max}C$.

(1)

$$\sum \dot{N}_{M_{min} Faults} \Big|_{M_{min}}^{M_{max}C} = \dot{N}_{M_{min} f_1} \Big|_{M_{min}}^{M_{max}C} + \dot{N}_{M_{min} f_2} \Big|_{M_{min}}^{M_{max}C} + \dots + \dot{N}_{M_{min} f_n} \Big|_{M_{min}}^{M_{max}C}$$

$$\sum \dot{M}_o Faults \Big|_{M_{min}}^{M_{max}C} = \dot{M}_o f_1 \Big|_{M_{min}}^{M_{max}C} + \dot{M}_o f_2 \Big|_{M_{min}}^{M_{max}C} + \dots + \dot{M}_o f_n \Big|_{M_{min}}^{M_{max}C}$$



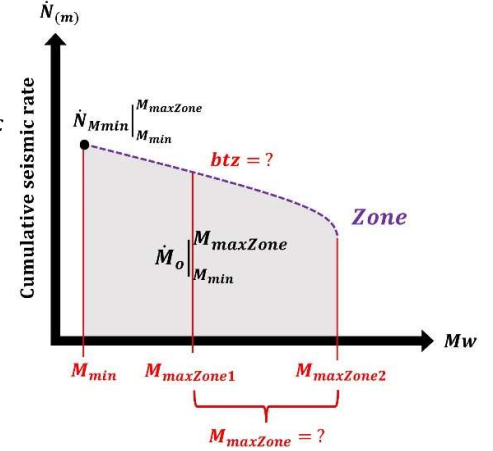
STEP 5: Cumulative seismic rate ($\dot{N}_{M_{min}zone}$) and moment rate (\dot{M}_{ozone}) for the zone in the range M_{min} to $M_{maxZone}$

Se procede a calcular la tasa acumuladas de sismos de M_{min} ($\dot{N}_{M_{min}zone}$) y la tasa de momento sísmico (\dot{M}_{ozone}) para la zona desde M_{min} hasta $M_{maxZone}$.

(1)

$$\dot{N}_{M_{min}zone} \Big|_{M_{min}}^{M_{maxZone}} = \dot{N}_{M_{min}region} \Big|_{M_{min}}^{M_{maxC}} - \sum \dot{N}_{M_{min}Faults} \Big|_{M_{min}}^{M_{maxC}}$$

$$\dot{M}_{ozone} \Big|_{M_{min}}^{M_{maxZone}} = \dot{M}_{oregion} \Big|_{M_{min}}^{M_{maxC}} - \sum \dot{M}_{oFaults} \Big|_{M_{min}}^{M_{maxC}}$$



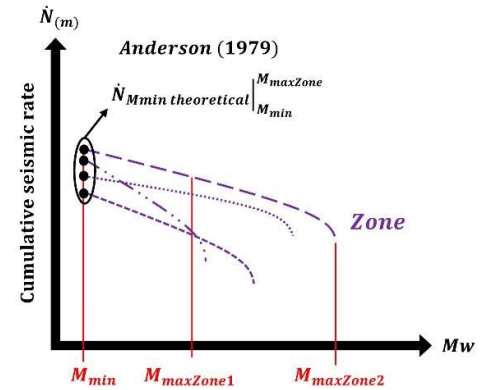
STEP 7: The theoretical cumulative seismic rate ($\dot{N}_{M_{min}theoretical}$) for the zone in the range M_{min} to $M_{maxZone}$

Se procede a calcular la tasa acumuladas de sismos de M_{min} teórica ($\dot{N}_{M_{min}theoretical}$) para la zona desde M_{min} hasta $M_{maxZone}$.

(1)

$$\dot{N}_{M_{min}theoretical} = \frac{\dot{M}_{ozone} \Big|_{M_{min}}^{M_{maxZone}} \cdot (\bar{d} - btz) \cdot [e^{-btz(M_{min})} - e^{-btz(M_{maxZone})}]}{btz \cdot [e^{-btz(M_{maxZone})} \cdot M_{o_{maxZone}} - e^{-btz(M_{min})} \cdot M_{o_{M_{min}}}]}$$

↳ Anderson (1979)



STEP 8: Acceptance tolerance and required conditions for obtaining a coherent result

Se procede a verificar la tolerancia del valor teórico y el valor observado y las condiciones impuestas para que se cumpla el equilibrio del sistema (zona+fallas). Si se cumplen las condiciones establecidas el código almacenará la combinación $MmaxC$, btf , btz y $MmaxZone$ que hacen que el sistema se mantenga en equilibrio, de lo contrario, se reinicia el nuevamente el proceso iterativo tomando otros valores de los vectores $MmaxC$, btf , btz y $MmaxZone$.

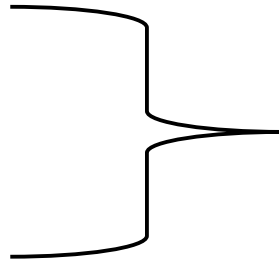
$$(1) Dif_{\dot{N}_{Mmin}} = \dot{N}_{Mmin\ zone} \Big|_{Mmin}^{MmaxZone} - \dot{N}_{Mmin\ theoretical}$$

Genera todas las soluciones:

$$(2) Dif_{\dot{N}_{Mmin}} < 0.001$$

$$\dot{N}_{Mmin\ zone} \Big|_{Mmin}^{MmaxZone} > 0$$

$$\dot{M}_{o\ zone} \Big|_{Mmin}^{MmaxZone} > 0$$



ID	MmaxC	btf	btz	Mmax zone
1	$MmaxC_1$	btf_1	btz_1	$Mmax_1$
2	$MmaxC_2$	btf_2	btz_2	$Mmax_2$
3	$MmaxC_3$	btf_3	btz_3	$Mmax_3$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	$MmaxC_n$	btf_n	btz_n	$Mmax_n$

A.2. Publicaciones

Otros publicaciones que se realizaron durante los estudios de doctorado fueron las siguientes:

- Navas-Sánchez, L., Ferretti, F., Savoia, M., **Gamboa-Canté, C.**, & Bravo, J. C. (2023). NSE seismic demand characterization: the case of a Spanish RC residential building. *Procedia Structural Integrity*, 44, 418–425. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.055>
- **Gamboa-Canté, C.**, Benito, B., Rivas-Medina, A., Quiros, L., Arroyo-Solórzano, M., & Lindholm, C. (2023). Review of hybrid methods for the characterization of seismic hazard in central America. *CIGEO* 2023, 7. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2023028007>
- Obrist-Farner, J., Pérez, C., Maurer, J., Yani, R., **Gamboa-Canté, C.**, Flores, O., Kutterolf, S., Gordillo, C., Konecky, B., Gibson, D., Gómez, V., Roque, F., Lachniet, M., Brenner, M., Anaité López, S., Pérez, L., Echeverría-Galindo, P., Correa-Metrio, A., Oliva, B., Aguilar, A., Reyes, F., Spanbauer, T. (2025). MADRE TIERRA. Editorial Puntoaparte S.A.S. ISBN: 978-99939-2-236-0 https://guateologyrocks.com/sdc_download/2033/?key=wcve7myjqfarz6csmo010ss6xjhd26
- **Gamboa-Canté, C.**, Rivas-Medina, A. & Benito, M.B. *HybridModel (H_M)*: An Improved Tool for Distributing Fault-type and Zone-type Sources Contributions in Seismic Hazard Assessment. *In press*

A.3. Contribuciones en congresos nacionales e internacionales

Durante los estudios de doctorado se presentaron resultados de las diferentes fases de la tesis en congresos nacionales e internacionales, de los cuales destacan los siguientes:

- **Gamboa-Canté, C.**, Rivas-Medina, A., Arroyo-Solórzano, M., Benito, B. PSHA APPLIED IN CENTRAL AMERICA USING SOURCE HYBRID MODELS. SENSITIVITY ANALYSIS OF RESULTS. 18th World Conference on Earthquake Engineering.
- **Gamboa-Canté, C.**, Rivas-Medina, A., Benito, B. A new seismic hazard map for Central America integrating faults into the seismic hazard calculation. V Assembly of the Latin American and Caribbean Seismological Commission.
- Dávila-Migoya, L.D.; **Gamboa-Canté, C.**; Benito, B.; Cabrero, J.M. (2023). New approach to seismic risk for Guatemala City: update exposure model and vulnerability model. 13th International Workshop on Seismic Microzoning and Risk Reduction. Universidad de Alicante, España.
- **Gamboa-Canté, C.**; Benito-Oterino, B.; Arroyo-Solórzano, M. (2023). Review of Hybrid Methods for the Characterization of Seismic Hazard in Central America. SSA Annual Meeting 2023: Seismological Society of America. Puerto Rico, USA.
- **Gamboa-Canté, C.**; Benito-Oterino, B.; Arroyo-Solórzano, M. (2022). Updating of the Seismic Hazard Map for Central America within the Framework of the KUK-AHPÁN Project. AGU Fall Meeting 2022: The American Geophysical Union. Chicago, Illinois, USA.
- **Gamboa-Canté, C.**; Benito-Oterino, B.; Arroyo-Solórzano, M. (2022). Actualización del catálogo sísmico regional de Centroamérica. XIV Congreso geológico de América Central y VII Congreso geológico nacional. San José, Costa Rica.