

HYBRID SEISMIC SOURCE MODEL FOR THE SEISMOGENIC ZONE OF PUNÁ: INTEGRATING ACTIVE FAULTS AND REGIONAL SEISMICITY

Alicia Rivas Medina⁽¹⁾, Brian Cagua Gómez⁽²⁾, Roberto Aguiar Falconí⁽³⁾ y Julia Pilatasig Caizaguano⁽²⁾

⁽¹⁾ Escuela Técnica Superior en Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid, España, aliciarivasmedina1981@gmail.com

⁽²⁾ Doctorando en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de los Andes, Santiago, Chile, bjcagua@miuandes.cl, jepilatasig@miuandes.cl

⁽³⁾ Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Av. Gral. Rumiñahui, Valle de los Chillos, Ecuador roberto.aguiar.falconi@gmail.com

Received: January 2023. Accepted: October 2024. Published: December 2024

ABSTRACT

In this study, seismic hazard was assessed in the Gulf of Guayaquil region using a hybrid approach that combines seismogenic sources and individually modeled active faults. The Quinto Puente project, which involves the construction of infrastructure over the Guayas River, revealed the presence of four nearby geological faults, cataloged by Chunga et al. (2019), highlighting the need to adjust traditional seismic hazard assessment methodologies.

The seismogenic zones used are based on the proposals of Beauval et al. (2018), and the development of the seismic catalog used in this study, including the merging of data from ISC-GEM and USGS, was published by Cagua et al. (2023). Based on this new catalog, new Gutenberg-Richter relationships were obtained for all the zones. Additionally, the geometries of the BGN and Puná zones were adjusted, creating the BGN Mod and Puná Mod versions, to ensure that the selected faults were entirely contained within a single seismogenic zone.

The HybridModel, following the methodology of Rivas-Medina et al. (2018), was applied to integrate both the general seismicity of the area and the seismic potential of the active faults. This approach provided a more specific evaluation of the seismic potential of fault-type and zone-type sources compared to traditional approaches that assume uniform seismicity across the entire zone. These results are particularly relevant for infrastructure projects like the Quinto Puente, where seismic hazard must account for both background seismicity and the activity of faults present in the region.

Keywords: HybridModel; Seismic Hazard; Fault-Source; Gutenberg-Richter Recurrence Relationships.

MODELO HÍBRIDO DE FUENTE SÍSMICA PARA LA ZONA SISMOGENÉTICA DE PUNÁ: INTEGRACIÓN DE FALLAS ACTIVAS Y SISMICIDAD REGIONAL

RESUMEN

En este estudio se evaluó la peligrosidad sísmica en la región del Golfo de Guayaquil mediante un enfoque híbrido que combina fuentes sismogénicas y fallas activas modeladas individualmente. El proyecto del Quinto Puente, que implica la construcción de infraestructuras sobre el río Guayas, reveló la presencia de cuatro fallas geológicas cercanas, catalogadas por Chunga et al. (2019), lo que subrayó la necesidad de ajustar las metodologías tradicionales de evaluación sísmica.

Las zonas sismogénicas utilizadas se basan en las propuestas de Beauval et al. (2018), y el desarrollo del catálogo sísmico utilizado en este estudio, incluyendo la fusión de los datos del ISC-GEM y el USGS, fue publicado por Cagua et al. (2023). Con base en este nuevo catálogo, se obtuvieron nuevas rectas de Gutenberg-Richter para todas las zonas. Además, se ajustaron las geometrías de las zonas BGN y Puná, creando las versiones BGN Mod y Puná Mod, para asegurar que las fallas seleccionadas estuvieran completamente contenidas dentro de una sola zona sismogénica.

El HybridModel, siguiendo la metodología de Rivas-Medina et al. (2018), se aplicó para integrar tanto la sismicidad general de la zona como el potencial sísmico de las fallas activas cercanas. Esto proporcionó una evaluación más específica del potencial sísmico de las fuentes tipo falla y zona en comparación con los enfoques tradicionales que asumen una sismicidad uniforme en toda la zona. Estos resultados son especialmente relevantes para proyectos de infraestructura como el Quinto Puente, donde la peligrosidad sísmica debe considerar tanto la sismicidad de fondo como la actividad de las fallas presentes en la región.

Palabras clave: Modelo Híbrido; Peligrosidad Sísmica; Fuente-fallas; Relaciones de recurrencia de Gutenberg y Richter.

1 INTRODUCCIÓN

La inclusión de fuentes tipo falla en los cálculos de peligrosidad sísmica ha sido ampliamente utilizada en diversas metodologías, pero con el tiempo han surgido limitaciones cuando se aplica en áreas donde la sismicidad no se asocia fácilmente a una única fuente o donde no se cuenta con suficiente información geológica. En este contexto, los métodos híbridos han ganado relevancia, ya que combinan fuentes tipo falla con fuentes tipo zona (o *background*) para ofrecer una evaluación más completa y realista de la peligrosidad sísmica.

Los métodos híbridos permiten integrar la información derivada tanto de fallas activas conocidas como de la sismicidad difusa, la cual no se puede asignar directamente a una falla específica. Esta combinación es particularmente útil en regiones donde, si bien existen fallas identificadas, su historial sísmico no está

completamente documentado o las fallas son lentas y generan eventos sísmicos con grandes períodos de recurrencia. Al incorporar también la sismicidad catalogada en zonas sin fallas evidentes, se logra una mejor representación del riesgo sísmico en el área de estudio.

Tradicionalmente, la tasa de deslizamiento de una falla se estima a partir de datos geológicos y geodésicos, y se utiliza para calcular la tasa de momento sísmico de la falla, siguiendo la formulación propuesta por Brune (1968). A partir de esa tasa, se puede obtener un modelo de recurrencia de sismos para la falla utilizando distribuciones de magnitud-frecuencia (MFD), como el modelo Gutenberg-Richter o el de Terremoto Característico, según el enfoque de Anderson (1979).

Una de las principales fortalezas de los métodos híbridos es que no dependen exclusivamente de la información geológica y geodésica de las fallas para definir las tasas de ocurrencia de sismos, sino que también integran los registros sísmicos históricos y la sismicidad de fondo. Esto permite una mayor robustez en la caracterización de la peligrosidad sísmica, especialmente en áreas donde la información sobre fallas activas es incompleta o donde la sismicidad histórica ha sido significativa pero no fácilmente atribuible a fallas conocidas.

Sin embargo, como en los métodos que consideran solo fallas, los métodos híbridos también requieren la definición previa de ciertos parámetros, como el valor b de la distribución magnitud-frecuencia (MFD) y el porcentaje de sismicidad asignado a fallas y zonas. Esta dependencia de parámetros predeterminados introduce cierto grado de incertidumbre, ya que estos valores son usualmente estimados con base en juicio experto o inferencias a partir de información limitada. Además, la definición del porcentaje de sismicidad asignado a cada fuente puede afectar considerablemente los resultados de la evaluación de la peligrosidad.

Un ejemplo clásico de los métodos híbridos es el modelo "moment_rate" propuesto por Bungum (2007), el cual asigna un porcentaje del momento sísmico total de la región tanto a las fallas activas como a la sismicidad de fondo. De manera similar, el programa SHERIFS, desarrollado por Chartier et al. (2019), distribuye el potencial sísmico entre fallas y fondo sísmico (*background*) en función de la magnitud, ajustando el potencial de las fallas conocidas en proporción a la sismicidad registrada en el catálogo de la región. Ambos enfoques ofrecen una solución más flexible que los modelos tradicionales centrados exclusivamente en fallas, ya que permiten integrar la sismicidad difusa. Sin embargo, ambos modelos dependen en gran medida del juicio de expertos para determinar cómo repartir el potencial sísmico entre las fallas y las zonas de fondo. Este proceso es crucial pero también introduce incertidumbre, ya que el reparto adecuado del potencial sísmico no siempre es fácil de predecir, especialmente en regiones con datos incompletos o escasa actividad documentada.

En este contexto, el HybridModel, propuesto por Rivas-Medina et al. (2018), presenta una alternativa innovadora al no requerir la definición previa del reparto del potencial sísmico entre fallas y zonas ni la necesidad de fijar parámetros como el valor b de la distribución magnitud-frecuencia (MFD). Este modelo estima dicho reparto de manera dinámica, utilizando la sismicidad registrada (en períodos de registro completos) junto con la geometría y la tasa de deslizamiento de las fallas. Esto permite que el HybridModel se ajuste mejor a las condiciones sísmicas locales, reduciendo la dependencia del juicio experto y proporcionando una representación

más precisa de la peligrosidad sísmica en regiones con información incompleta o fallas lentas.

Los métodos híbridos representan un avance significativo en la evaluación de la peligrosidad sísmica. Al combinar de manera eficiente la información disponible sobre fallas y sismicidad difusa, ofrecen una visión más equilibrada y realista de la peligrosidad sísmica, ya que pueden incorporar el efecto de proximidad a la fuente, particularmente en áreas complejas como las que rodean a la ciudad de Guayaquil.

2 HYBRIDMODEL

El HybridModel, propuesto por Rivas-Medina et al. (2018), combina fuentes tipo zona y fallas, distribuyendo la tasa de momento sísmico y la tasa de sismicidad entre ambas. Este proceso se basa en la información registrada en un período completo del catálogo sísmico, asumiendo que dicho registro es completo. Para ello, se establecen intervalos de completitud definidos para rangos de magnitudes, desde una magnitud mínima (M_{min}) hasta una magnitud máxima de completitud (MMC).

El HybridModel evalúa de manera independiente el potencial sísmico de las fallas y de la zona, cuya suma define el potencial sísmico total de la región (Figura 1). Es importante destacar que la región y la zona poseen la misma geometría (volumen de litosfera), pero exhiben diferentes potenciales sísmicos, distinguiéndose entre el potencial contenido en las fallas y en la zona.

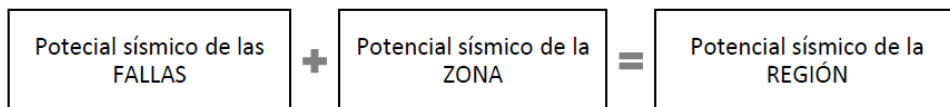


Figura 1 Esquema propuesto por el modelo.

Aunque el HybridModel permite implementar fallas y zonas con menos parámetros predefinidos que otros métodos, sigue siendo crucial definir ciertos parámetros, como la Magnitud Máxima de Completitud (MMC), la magnitud máxima para la zona ($M_{maxzone}$) y el valor b de la zona (b_z), ya que estos influyen significativamente en la distribución de la tasa de momento sísmico. Por tanto, es necesario realizar un estudio exhaustivo y justificar los valores de estos parámetros. Si este análisis no se realiza adecuadamente, el sistema no logra encontrar un equilibrio entre la energía acumulada en las fallas y la liberada, y registrada en el catálogo, lo que impide una aplicación efectiva del HybridModel.

Un ejemplo de este desequilibrio se presenta cuando una zona contiene fallas con altas tasas de deslizamiento, pero el catálogo sísmico no refleja esta alta actividad. Si no se analizan correctamente los intervalos de completitud del catálogo (años de completitud y MMC), pueden generarse discrepancias entre la tasa de

momento sísmico acumulada por las fallas y la registrada en el catálogo, lo que impide la convergencia del HybridModel y, por tanto, la obtención de una solución válida.

Para abordar esta problemática y facilitar la aplicación del HybridModel, se ha implementado una variante en su metodología original. En lugar de fijar de antemano los valores de la MMC, Mmaxzone y bz, se define un rango amplio y probable para estos parámetros. Así, se permite que estas variables se determinen de manera libre, y el modelo busca todas las combinaciones posibles de MMC, Mmaxzone, valor b de las fallas (bf) y valor b de la zona (bz) que generen un equilibrio entre el potencial sísmico registrado en períodos completos y el potencial sísmico acumulado en las fallas.

El resultado de esta búsqueda es una combinación de posibles soluciones para la distribución de la energía sísmica, que mantenga el equilibrio en el sistema (fallas + zona) y logre la convergencia. En este punto, el juicio experto sigue siendo necesario para analizar las soluciones propuestas y seleccionar una o varias que se puedan implementar en un árbol lógico. Aunque el juicio experto sigue siendo relevante, las decisiones se toman ahora entre varias opciones que garantizan un modelo sísmico final equilibrado. De esta forma, el experto debe identificar las soluciones más cercanas a las características sismotectónicas particulares de la región de estudio.

El primer paso consiste en implementar el HybridModel con las modificaciones descritas. Para lograrlo, es esencial distribuir el potencial sísmico entre las fallas y la zona, identificando las soluciones que permitan la convergencia en el modelo de fuentes híbridas. En segundo lugar, se deben generar los modelos de recurrencia sísmica asociados con las fuentes sismogénicas, ya sean fallas o zonas, utilizando las soluciones seleccionadas por el experto. Para este proceso, se ha desarrollado un código en R.

En la primera fase, utilizando los datos de las fallas, se calculará el momento sísmico (M_0) y la tasa de momento sísmico (\dot{M}_0) de las fallas en el rango de magnitud $M_{min} - M_{max}$. Este cálculo se realizará utilizando las ecuaciones Ec 1 y Ec 2 propuestas por Hanks y Kanamori (1979) y Brune (1968) respectivamente, aplicadas a cada falla.

$$\log(M_0) = 16.1 + 1.5 \cdot M_{max} \quad Ec \ 1$$

$$\dot{M}_0 = \dot{u} \cdot A \cdot \mu \quad Ec \ 2$$

Donde M_0 : Momento sísmico [dina x cm], M_{max} : la magnitud máxima esperada en cada falla, \dot{M}_0 tasa de momento sísmico en [$N \times m/año$], \dot{u} la tasa de deslizamiento en [$mm/año$], A : Área del plano de falla en [km] y μ el módulo de rigidez de la corteza en [$N \times m^2$].

Simultáneamente, utilizando los datos del catálogo sísmico, se estimará la tasa de momento sísmico asociada a cada intervalo de magnitud registrado en el catálogo. Este proceso incluye estimar el momento sísmico para cada bin de magnitud (Ec. 3), determinar la tasa de sismos para cada intervalo de magnitud durante el período completo de observación (Ec. 4) y calcular la tasa de momento sísmico asociada a cada intervalo de magnitud (Ec. 5). En este punto, se introducen

las variables de MMC, que no se define inicialmente, sino que se explora dentro de un rango amplio de valores.

$$\log(Mo(mi)) = 16.1 + 1.5 \cdot mi \quad Ec 3$$

$$\dot{n}(mi) = \frac{n(mi)}{PC(mi)} \quad Ec 4$$

$$\dot{M}o(mi) = \dot{n}(mi) \cdot Mo(mi) \quad Ec 5$$

Donde, por cada bin de magnitud (mi), se tiene $Mo(mi)$: Momento sísmico en [dina x cm], $\dot{n}(mi)$ tasa de sismos en [número/año], $n(mi)$ número de sismos registrados en un periodo de tiempo completo, $PC(mi)$ número de años de un periodo completo en [año] y $\dot{M}o(mi)$ tasa de momento sísmico en [$N \times m/año$].

Una vez establecidos los rangos para la MMC y el valor b de las fallas, se puede proceder a estimar la tasa de sismos $\dot{N}min$ (Ec. 6) y la tasa de momento sísmico $\dot{M}o$ (Ec. 7) registradas en el catálogo, dentro del intervalo de magnitudes definido.

$$\dot{N}min(region) = \sum_{mi=Mmin}^{MMC} \dot{n}(mi) \quad Ec 6$$

$$\dot{M}o(region) = \sum_{mi=Mmin}^{MMC} \dot{M}o(mi) \quad Ec 7$$

Simultáneamente, se puede definir la tasa de sismos $\dot{N}min$ para las fallas y la tasa de momento sísmico $\dot{M}o$ (Ec. 8) de cada falla, utilizando la expresión de Anderson (1979) para un modelo de distribución de magnitudes tipo Gutenberg-Richter modificado (Cosentino et al., 1977):

$$\dot{M}o = \dot{N}min \frac{\beta(e^{-\beta mi} Mo(mi) - e^{-\beta Mmin} Mo(Mmin))}{(d - \beta) \cdot (e^{-\beta Mmin} - e^{-\beta mi})} \quad Ec 8$$

Donde $\dot{N}min$ tasa acumulada de sismos de magnitud mayor o igual a $Mmin$, $Mo(Mmin)$ momento sísmico liberado en un sismo de magnitud $Mmin$, $Mo(mi)$ momento sísmico liberado en un terremoto de magnitud mi , β pendiente del modelo de recurrencia. $\beta = b \cdot \ln(10)$ y $d = 1.5 \cdot \ln(10)$.

Después de calcular $\dot{N}min$ y $\dot{M}o$ tanto para la región (observada en el catálogo) como para las fallas, se calcula $\dot{N}min(zona)$ (Ec. 9) y $\dot{M}o(zona)$ (Ec. 10) para la zona, mediante una resta entre ambos conjuntos de datos:

$$\dot{N}min(zona) = \dot{N}min(region) - \sum_{i=1}^n \dot{N}min(falla_i) \quad Ec 9$$

$$\dot{M}o(zona) = \dot{M}o(region) - \sum_{i=1}^n \dot{M}o(falla_i) \quad Ec 10$$

El valor de \dot{N}_{min} y \dot{M}_o para la zona se almacena para su posterior comparación con la tasa acumulada de sismos mayores o iguales a la magnitud mínima teórica (\dot{N}_{min} teórica). Esta \dot{N}_{min} teórica se calcula a partir de los valores de MMC, del valor b para la zona (b_z), y de la magnitud máxima de la zona (M_{max}), definida previamente dentro de un intervalo de valores, utilizando nuevamente la ecuación de Anderson (1979) (Ec. 8), pero aplicada a los datos de la zona.

Las soluciones del HybridModel serán aquellas combinaciones de MMC, valor b para las fallas (b_f), valor b para la zona (b_z) y $M_{maxZona}$ que igualen \dot{N}_{min} y \dot{N}_{min} teórica para la zona, descartando aquellas combinaciones que generen tasas de sismos y tasas de momento sísmico negativas, ya que carecen de sentido físico.

Una vez identificadas estas combinaciones, se extrapolan para generar los modelos finales de recurrencia sísmica para cada fuente, abarcando desde la magnitud M_{min} hasta la magnitud máxima esperada en cada caso

3 FALLAS DEL GOLFO DE GUAYAQUIL

Las fallas en el Golfo de Guayaquil han sido estudiadas mediante el análisis de datos sísmicos históricos e instrumentales de la región costera de Ecuador, entre otros recursos disponibles. Chunga et al. (2019) identificaron un total de 40 fallas geológicas, un número significativo obtenido a partir del análisis de catálogos sísmicos proporcionados por el Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS), el National Earthquake Information Center (NEIC) y el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN).

La Figura 2 muestra la sismicidad registrada y la ubicación de las fallas en el Golfo de Guayaquil, lo que pone de manifiesto la actividad de estas fallas. En este estudio, se han seleccionado las fallas más cercanas a los emplazamientos de interés, ya que serán modeladas de manera independiente en la evaluación de la amenaza sísmica. Se trata de cuatro fallas activas: F08, que cruza el puente sobre el río Guayas, y las fallas cercanas F05, F09 y F17 (destacadas en rojo en la Figura 3). Los detalles específicos de estas fallas se proporcionan en la Tabla 1.

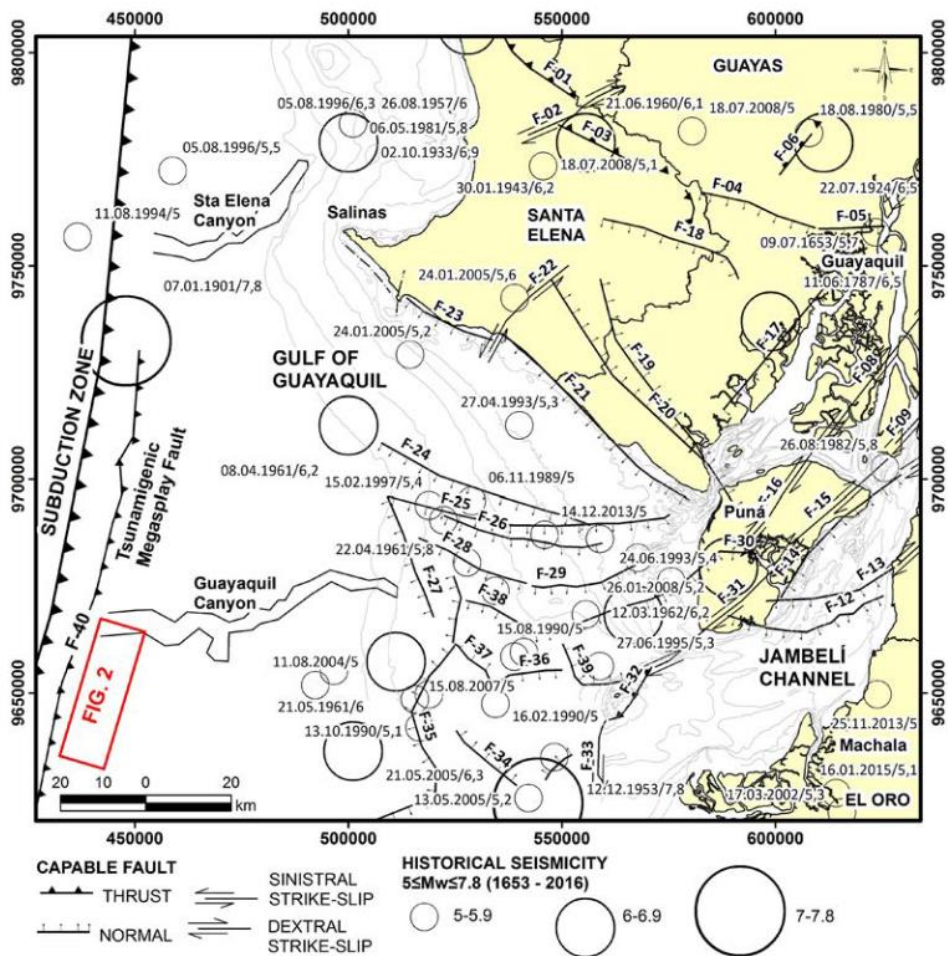


Figura 2 Mapa sismo tectónico del Golfo de Guayaquil. Fuente Chunga *et al.* (2019)

Es importante señalar que el trabajo de Chunga *et al.* (2019) contiene datos adicionales que profundizan en la configuración geométrica de estas fallas. Sin embargo, para este estudio, nos centramos en la estimación de la longitud (L) y el ancho (w) de las fallas con el fin de calcular el área del plano de falla, un parámetro clave para la determinación del momento sísmico (M_0), que se calcula aplicando la ecuación de Brune (1968).

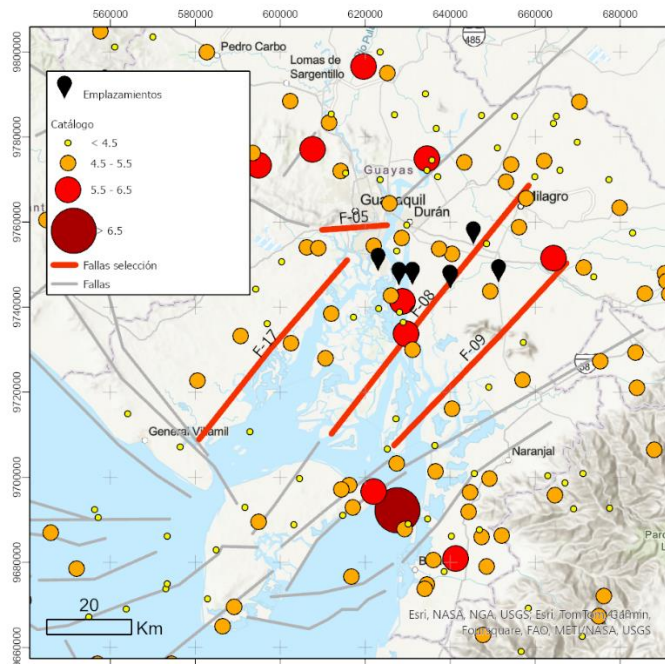


Figura 3 Sismicidad registrada y fallas del Golfo de Guayaquil. En naranja la sismicidad registrada a una profundidad igual e inferior a 35 km (vinculada a fallas de cortical), en gris la sismicidad profunda vinculada a la zona de subducción. Las fallas en rojo son las 4 fallas modeladas como fuentes sísmicas independientes.

Las cuatro fallas seleccionadas han sido destacadas por su proximidad a los emplazamientos de interés y por su actividad geológica relevante. A continuación, se describen sus principales características en la **Tabla 1**.

Tabla 1 Longitudes de las fallas y magnitudes máximas esperadas.

Falla	Tipo	L_f (km)	H (km)	w (km)	M_w	\dot{u} (mm/año)
F05	Normal	15.56	10	8	6.7	0.4
F08	Transcurrente	75.37	12	12	7.2	0.4
F09	Transcurrente	57.88	12	11	7.1	0.4
F17	Normal	40.16	10	10	6.9	0.4

Se enfatiza que la estimación de la magnitud se ha realizado mediante dos conjuntos de ecuaciones. La primera de ellas, propuesta por Wells y Coppersmith (1994), es la siguiente:

$$M_w = 5.08 + 1.16 \log L_f$$

Las ecuaciones adicionales empleadas corresponden a las propuestas por Wesnousky (2008), las cuales están condicionadas por el tipo específico de falla. Estas ecuaciones se encuentran detalladas en la Tabla 2 para su referencia.

Tabla 2 Relaciones propuestas por Wesnousky (2008) para encontrar la magnitud máxima en función del tipo de falla.

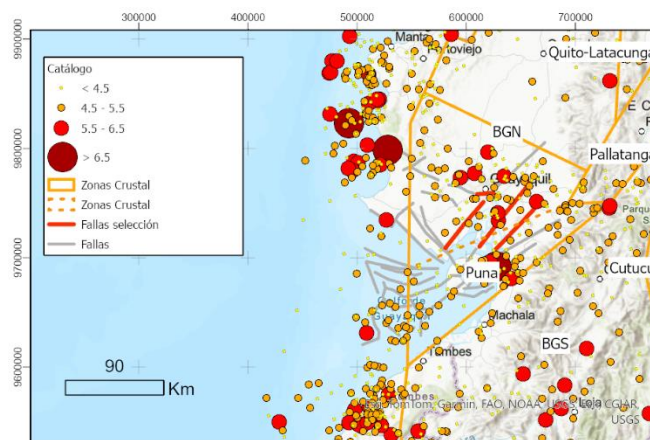
Tipo de Falla	M_w
Transcurrente	$M_w = 5.56 + 0.87 \log L_f$
Normal	$M_w = 6.12 + 0.47 \log L_f$
Inversa	$M_w = 4.11 + 1.88 \log L_f$

4 ZONAS FUENTE, PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE ZONAS Y FALLAS SÍSMICAS.

Las zonas sismogénicas seleccionadas para el cálculo de la peligrosidad se basan en las propuestas de Beauval et al. (2018). Estas zonas modelan fuentes sísmicas en diferentes contextos tectónicos: la corteza continental, la interfaz de subducción y la intraplaca. En particular, las zonas corticales que abarcan los emplazamientos de interés y las fallas que se modelarán de manera independiente son la zona BGN y la zona de Puná.

Para la correcta implementación del HybridModel, es esencial que todas las fallas seleccionadas estén completamente contenidas dentro de una sola zona sismogénica. No tendría sentido asignar una falla a más de una zona, ya que esto afectaría la coherencia del modelo y la distribución de la peligrosidad sísmica. Debido a esta consideración, se realizó un ajuste en el límite norte de la zona de Puná, de modo que incluyera en su totalidad a las fallas activas de interés en este estudio.

La redefinición de esta frontera se llevó a cabo teniendo en cuenta la distribución espacial de los terremotos registrados en la región. Para ello, se analizó la densidad espacial de los eventos sísmicos y se identificó un cambio significativo en esta densidad, lo que justificó el nuevo límite. Este ajuste permitió que la geometría de la zona sismogénica fuera coherente con la distribución observada de la sismicidad. Los nuevos límites establecidos se muestran en la Figura 4, en la que se destaca la nueva frontera de la zona de Puná.

**Figura 4** Mapa con la modificación del límite norte de la zona de Puná. La sismicidad y las fallas sísmicas. En línea discontinua, el límite anterior.

Los vértices actualizados de las zonas fuente BGN y Puná se presentan en la Tabla 3. A la izquierda, se listan los nuevos vértices de la zona fuente BGN, mientras que a la derecha se encuentran los vértices que ahora pertenecen a la zona de Puná. Los nuevos vértices de ambas zonas están resaltados en amarillo para facilitar su identificación.

Tabla 3 Modificación de vértices en fallas BGN y Puná.

Nuevos Vértices de BGN			Vértices que pasan a Puná		
Longitud (°)	Latitud(°)	Profundidad (km)	Longitud (°)	Latitud(°)	Profundidad (km)
-80.234	-0.872	0 - 35	-80.447	-1.346	0 - 35
-80.073	-0.931	0 - 35	-79.106	-1.994	0 - 35
-78.557	1.977	0 - 35	-79.266	-2.266	0 - 35
-77.459	1.292	0 - 35	-78.909	-2.251	0 - 35
-78.810	0.199	0 - 35	-80.584	-3.608	0 - 35
-78.806	-0.400	0 - 35	-80.575	-2.803	0 - 35
-78.872	-1.599	0 - 35	-80.560	-1.598	0 - 35
-79.106	-1.994	0 - 35			
-80.447	-1.346	0 - 35			

Estas modificaciones aseguran que las fallas seleccionadas se encuentren completamente dentro de una sola zona sismogénica, lo cual es crucial para la correcta implementación del HybridModel. Las zonas sismogénicas ajustadas se muestran en la Figura 5, donde la zona BGN se presenta en la parte superior y la zona Puná en la inferior.

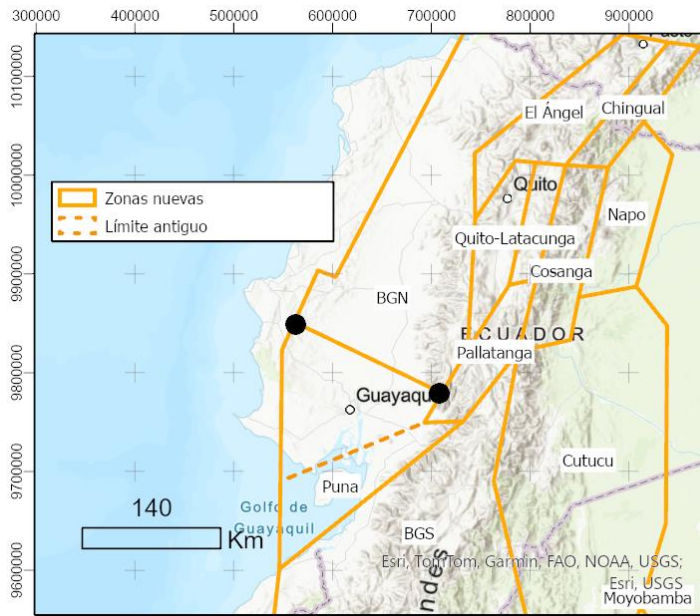


Figura 5 Nuevos vértices de las zonas fuentes BGN y Puná.

En cuanto a la geometría de las fallas activas modeladas como fuentes sísmicas independientes, estas han sido representadas mediante planos de falla definidos por cuatro vértices. Las coordenadas geográficas de dichos vértices se presentan en la Tabla 4, junto con la profundidad focal correspondiente.

Tabla 4 Coordenadas geográficas de los vértices que definen los planos de falla de las fallas F-05; F-08; F-09; F-17.

Identificación	Longitud (°)	Latitud(°)	Profundidad (km)
F-05	-80.013	-2.188	1
F-05	-79.874	-2.178	1
F-05	-79.907	-2.234	3
F-05	-80.045	-2.245	3
F-08	-79.992	-2.621	1
F-08	-79.575	-2.093	1
F-08	-79.581	-2.086	12
F-08	-79.998	-2.614	12
F-09	-79.860	-2.646	1
F-09	-79.495	-2.258	1
F-09	-79.500	-2.251	11
F-09	-79.865	-2.639	11
F-17	-80.273	-2.634	1
F-17	-79.959	-2.252	1
F-17	-79.927	-2.307	7
F-17	-80.241	-2.689	7

5 PÁRAMETROS DE GR DE LAS FUENTES SÍSMICAS

Es importante destacar que, para definir el modelo de recurrencia de las fuentes sísmicas, se realizó una actualización de los parámetros de sismicidad propuestos por Beauval et al. (2018). Este proceso incluyó la fusión de dos catálogos sísmicos, el ISC GEM y el USGS, hasta el año 2023, como se describe en el trabajo de Cagua et al. (2023). Esta fusión resultó en un total de 2933 eventos sísmicos. Tras uniformizar la escala de magnitud a M_w , se aplicó el método de depuración GK74 de Gardner & Knopoff (1974), lo que redujo el número a 2214 sismos principales, diferenciando así los eventos premonitorios y las réplicas. A continuación, se estimaron los años de completitud del catálogo para cada rango de magnitud. Todo el desarrollo del catálogo está publicado en Cagua et al. (2023).

Siguiendo el método zonificado clásico, se determinaron los parámetros de sismicidad a y b del modelo de Gutenberg y Richter para cada zona, utilizando el método de Máxima Verosimilitud para todas las zonas fuente. Este proceso fue implementado a través del software OpenQuake (Pagani et al., 2014). Téngase en cuenta que esta es una zona de cortical, representan la sismicidad registrada asociada a las fallas de cortical y, por lo tanto, solo tiene en cuenta los terremotos de magnitud igual o inferior a 35 km.

Para la nueva zona de Puná, no se siguió el procedimiento zonificado clásico, ya que esta zona contiene cuatro fallas que serán modeladas de forma independiente. Por lo tanto, se aplicó el HybridModel, descrito en el Apartado 2.

El HybridModel requiere dos insumos principales: el catálogo sísmico registrado en Puná y el catálogo de fallas. El catálogo sísmico se muestra en la Tabla 5, donde se detalla, por cada bin de magnitud, los años de completitud asociados a dichos bins y el número de sismos registrados en la zona de Puná durante el período de observación completo con una profundidad menor a 35km. Por ejemplo, para sismos de magnitud 4.5, la completitud de la información sísmica se observa desde 1992 (según la metodología de Stepp (1972)), y en la tercera columna se observa que $n=4$ representa el número de sismos de magnitud 4.5 registrados entre 1992 y 2023.

Tabla 5 Magnitud de los sismos registrados en la zona fuente de Puná; completitud para la magnitud y número de sismos desde el año de completitud hasta 2023.

m	com_m	n
4.0	1992	1
4.1	1992	3
4.2	1992	5
4.3	1992	5
4.4	1992	3
4.5	1992	4
4.6	1976	5
4.7	1976	7
4.8	1976	3
4.9	1967	4

m	com_m	n
5.0	1967	0
5.1	1967	1
5.2	1961	0
5.3	1961	1
5.4	1961	1
5.5	1957	0
5.6	1957	0
5.7	1957	1
5.8	1957	0
5.9	1957	1

El input del catálogo de fallas se presenta en la Tabla 6, donde se incluye un identificador de cada falla (Nombre de la falla), la tasa de deslizamiento (en mm/año), el área del plano de falla (en km^2) y la magnitud máxima esperada en la falla, calculada según el tamaño del plano de falla. Es importante destacar que, en todas las fallas, la magnitud máxima esperada supera la magnitud máxima registrada por sismos superficiales, de tan solo 5.9, lo que evidencia la poca actividad sísmica registrada en la zona, probablemente vinculado a la poca velocidad de estas fallas.

Tabla 6 Magnitud máxima, tasa de deslizamiento y área de las fallas consideradas.

Nombre falla	$slip_rate$ (mm/año)	Area (km^2)	M_{max}
Fault 05	0.4	124.48	6.7
Fault 08	0.4	904.44	7.2
Fault 09	0.4	636.68	7.1
Fault 17	0.4	401.60	6.9

Además, se debe definir la magnitud mínima considerada ($M_{min} = 4.0$), un rango de magnitudes máximas asociadas a la zona ($M_{maxZ} = 6.0 - 6.5$), la rigidez de la corteza ($\mu = 3 \times 10^{10}$ Pa) y la tolerancia decimal (0.1). Este último valor es

adecuado para evitar demoras significativas en los cálculos, manteniendo la precisión requerida. Reducirlo podría ralentizar el proceso sin aportar mejoras significativas en los resultados.

Tal como se describió en el Apartado 2, el método ofrece combinaciones de parámetros que permiten la convergencia entre la energía liberada en el catálogo (durante un rango de observación completa) y la energía acumulada en las fallas (en ese mismo rango).

Teniendo en cuenta que la zona de Puná incluye un número significativo de fallas con dimensiones similares a las modeladas de manera independiente (Figura 2), es razonable suponer que la magnitud máxima esperada en la zona podría alcanzar valores altos. Esto se debe a que dicha magnitud representaría el potencial sísmico de aquellas fallas que no están siendo modeladas de manera individual. Por este motivo, de entre las combinaciones potenciales que genera el HybridModel, se seleccionan aquellas que permiten asociar a la zona una magnitud máxima elevada (6.5Mw).

Al mismo tiempo, al analizar la Tabla 5, se observa que el registro de terremotos con magnitudes superiores a 5.0 no es constante, lo que pone de manifiesto una posible falta de completitud en el catálogo sísmico de esta zona. Esta observación sugiere que la magnitud máxima de completitud (MMC) del catálogo estaría limitada a magnitudes cercanas a 5.0Mw. Esta limitación influye en la selección de los parámetros del modelo, ya que la MMC del catálogo debe considerarse con cuidado al estimar el potencial sísmico máximo de la zona.

Cabe destacar que esta zona no cuenta con un registro sísmico significativo de terremotos superficiales, lo que contrasta con el gran número de fallas catalogadas por Chunga et al. (2019) en la misma región. Esta discrepancia podría explicarse por la baja tasa de deslizamiento de las fallas catalogadas, lo que resultaría en un escaso registro de terremotos vinculados a ellas. Este escenario representa un caso extremo dentro de los modelos híbridos, ya que el catálogo sísmico presenta una limitada profundidad temporal para eventos de magnitudes moderadas y altas. Esta falta de datos temporales dificulta una representación completa del comportamiento sísmico en la zona.

Las combinaciones que generan convergencia y que coinciden con el razonamiento anterior, es decir, aquellas que permiten asociar una magnitud máxima elevada a la zona y tener en cuenta la limitación en la completitud del catálogo, se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7 Valores de la Magnitud máxima de completitud, β de la falla y de la zona y Magnitud máxima de la zona.

	MMC	β_{fault}	β_{zone}	$M_{maxZona}$
1	5.0	1.8	1.7	6.5
2	5.0	2.7	1.0	6.5

De las dos combinaciones mostradas en la Tabla 7, una combinación se descarta, ya que el valor de β para la zona es igual al valor mínimo considerado en el modelo, lo que sugiere que se trata de una solución extrema y, por lo tanto, no adecuada. En consecuencia, se selecciona la otra combinación para generar los modelos de recurrencia sísmica tanto de las fallas individuales como de la zona.

A partir de este valor de β y las magnitudes máximas esperadas en cada fuente, se estiman los valores correspondientes de a y b para la relación $\log N = a - bM$. Estos resultados se presentan en detalle en la Tabla 8.

Tabla 8 Valores de a, b , de la relación de recurrencia de GR, $\log N = a - bM$

Nombre	M_{max}	$N_{min-M_{min}-M_{max}C}$	β	b	a
Fault 05	6.7	0.046	2.7	1.2	3.350
Fault 08	7.2	0.218	2.7	1.2	4.029
Fault 09	7.1	0.167	2.7	1.2	3.912
Fault 17	6.9	0.124	2.7	1.2	3.785
Zone Puná	6.5	0.805	1.0	0.4	1.643

En la Figura 6, la línea roja continua representa la relación de recurrencia de la zona (incluyendo sismos no asociados a las fallas y la sismicidad de fondo). Además, se muestran con líneas discontinuas las relaciones de recurrencia de las cuatro fallas identificadas, utilizando los valores a y b de la Tabla 8. Se observa que estas relaciones pueden alcanzar magnitudes mayores en comparación con la zona.

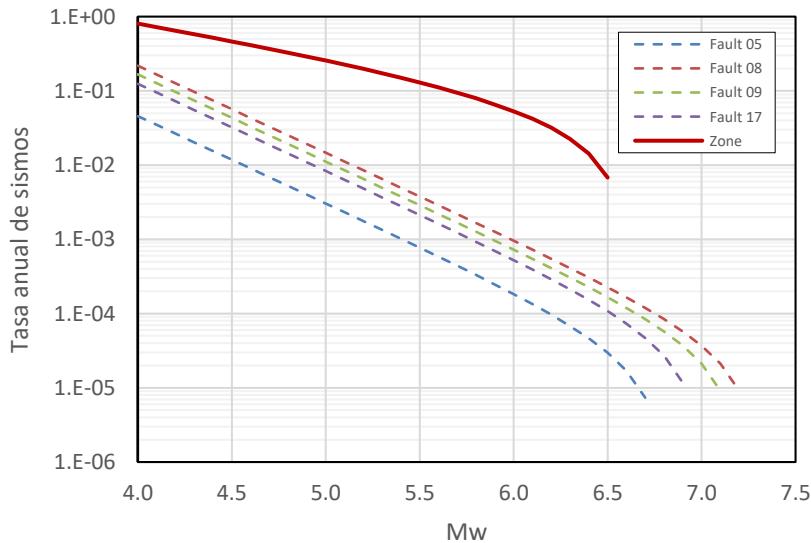


Figura 6 Relaciones de recurrencia en Puná Modificado para la zona y las fallas.

6 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En la metodología tradicional para la estimación de la peligrosidad sísmica, se asume que la sismicidad está distribuida uniformemente dentro de una zona fuente, lo cual es adecuado en ausencia de conocimiento suficiente sobre los parámetros que definen las fallas geológicas activas contenidas en la zona. Sin embargo, cuando existen fallas activas conocidas suficientemente, esta aproximación puede subestimar la peligrosidad en áreas cercanas a dichas fallas, haciendo necesario el uso de un enfoque híbrido que considere tanto las zonas sísmicas generales como las fallas específicas.

En el caso del proyecto del Quinto Puente, que incluye la construcción de puentes e intercambiadores de tráfico sobre el río Guayas, los estudios geológicos previos, como Chunga et al. (2019), identificaron cuatro fallas geológicas cercanas al área del proyecto, una de las cuales atraviesa cerca del puente sobre el río Cobina. Esto subraya la importancia de integrar estas fallas en la evaluación de la peligrosidad mediante un modelo híbrido.

Para implementar el HybridModel, fue necesario ajustar las geometrías de las zonas sismotectónicas BGN y Puná, propuestas por Beauval et al. (2018), a fin de que todas las fallas seleccionadas quedaran dentro de una misma zona. Los nuevos límites geométricos resultantes, denominados BGN Mod y Puná Mod, permiten una evaluación más coherente de la peligrosidad sísmica en la región. Además, los valores de recurrencia sísmica actualizados para estas zonas se obtuvieron mediante un nuevo catálogo sísmico, resultado de la fusión de los datos del ISC-GEM y USGS, como se detalla en el trabajo de Cagua et al. (2023).

El análisis realizado demuestra que, si se adopta un enfoque tradicional de sismicidad uniforme, es crucial utilizar los parámetros de recurrencia detallados para las zonas BGN Mod y Puná Mod. Sin embargo, si se opta por un enfoque híbrido, como el desarrollado en este estudio para la zona Puná Mod, se debe integrar tanto la sismicidad general de la zona como la de las cuatro fallas modeladas individualmente. Los resultados obtenidos mediante el HybridModel, siguiendo la metodología de Rivas-Medina et al. (2018), proporcionan una solución equilibrada entre la sismicidad observada y el potencial sísmico acumulado en las fallas.

7 AGRADECIMIENTOS

Brian Cagua y Julia Pilatasig agradecen el apoyo de ANID-Subdirección de Capital Humano/Doctorado/2022-folio 21220089 y Humano/Doctorado/2024-folio 21240148, por la beca para realizar sus estudios de postgrado en Chile.

8 REFERENCIAS

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>

Beauval, C., Marinière, J., Yepes, H., Audin, L., Nocquet, J. -M., Alvarado, A., Baize, S., Aguilar, J., Singaicho, J. -C., & Jomard, H. (2018). A New Seismic Hazard Model

for Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(3A), 1443-1464. <https://doi.org/10.1785/0120170259>

Brune, J. N. (1968). Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 73(2), 777-784. <https://doi.org/10.1029/JB073i002p00777>

Bungum, H. (2007). Numerical modelling of fault activities. *Computers & Geosciences*, 33(6), 808-820. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.10.011>

Cagua, B., Rivas, A., Aguiar, R., & Pilatasig, J. (2023). Nuevas relaciones de recurrencia para estudios de peligrosidad sísmica en Ecuador. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 28(4), 140-160.

Centro Regional de Sismología para América del Sur—CERESIS. (s. f.). Recuperado 24 de noviembre de 2023, de <https://www.ceresis.org/>

Chunga, K., Ochoa-Cornejo, F., Mulas, M., Toulkeridis, T., & Menéndez, E. (2019). Characterization of seismogenic crustal faults in the Gulf of Guayaquil, Ecuador. *Andean Geology*, 46, 66-81.

Frankel, A. D., Mueller, C. S., Barnhard, T. P., Perkins, D. M., Leyendecker, E. V., Dickman, N., Hanson, S. L., & Hopper, M. G. (1996). *National Seismic-Hazard Maps: Documentation June 1996* (Report 96-532; Open-File Report). USGS Publications Warehouse. <https://doi.org/10.3133/ofr96532>

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>

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>

Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348-2350. <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>

Instituto Geofísico—(IG-EPN). (s. f.). Recuperado 24 de noviembre de 2023, de <http://www.igepn.edu.ec/>

International Seismological Centre. (s. f.). *ISC-GEM Catalogue*. ISC-GEM Earthquake Catalogue. Recuperado 14 de octubre de 2023, de <https://doi.org/10.31905/d808b825>

Leonard, M. (2010). Earthquake Fault Scaling: Self-Consistent Relating of Rupture Length, Width, Average Displacement, and Moment Release. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5A), 1971-1988. <https://doi.org/10.1785/0120090189>

Mueller, C. S. (2018). Earthquake Catalogs for the USGS National Seismic Hazard Maps. *Seismological Research Letters*, 90(1), 251-261. <https://doi.org/10.1785/0220170108>

Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, M., & Vigano, 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>

Rivas-Medina, A., Benito, B., & Gaspar, J. (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>

Stepp, J. 1972. (1972). *Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard*. 2, 897-910.

Stirling, M., Goded, T., Berryman, K., & Litchfield, N. (2013). Selection of Earthquake Scaling Relationships for Seismic-Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(6), 2993-3011. <https://doi.org/10.1785/0120130052>

Stirling, M., Rhoades, D., & Berryman, K. (2002). Comparison of Earthquake Scaling Relations Derived from Data of the Instrumental and Preinstrumental Era. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(2), 812-830. <https://doi.org/10.1785/0120000221>

Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin - Seismological Society of America*, 84(4), 974-1002. Scopus.

Wesnousky, S. G. (1986). Earthquakes, quaternary faults, and seismic hazard in California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B12), 12587-12631. <https://doi.org/10.1029/JB091iB12p12587>

Wesnousky, S. G. (2008). Displacement and Geometrical Characteristics of Earthquake Surface Ruptures: Issues and Implications for Seismic-Hazard Analysis and the Process of Earthquake Rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(4), 1609-1632. <https://doi.org/10.1785/0120070111>