

NEW RECURRENCE RELATIONSHIPS FOR SEISMIC HAZARD STUDIES IN ECUADOR

**Brian Cagua Gómez⁽¹⁾, Alicia Rivas Medina⁽²⁾, Roberto Aguiar Falconí⁽³⁾,
Julia Pilatasig⁽⁴⁾**

⁽¹⁾ Doctorando en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de los Andes, Santiago, Chile,
bjcagua@miuandes.cl

⁽²⁾ Escuela Técnica Superior en Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid,
España, aliciarivasmedina1981@gmail.com

⁽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

⁽⁴⁾ Investigadora CEINCI LAB, Ecuador, julia.pilatasig@gmail.com

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

ABSTRACT

The work by Beauval et al. (2018) represents the state of the art in defining seismic source zones in Ecuador as of 2023. However, it is necessary to update the coefficients that define the recurrence relationships for each source zone because the seismic database they used only goes up to 2013.

To achieve this objective, this article presents how a new catalog was obtained by merging the catalogs from ISC-GEM with the USGS catalog, and subsequently, new recurrence relationships for Ecuador are presented for the source zones defined by Beauval et al. (2018).

The study demonstrates that, for some seismic sources, the annual earthquake rate in Beauval et al.'s work (2018) reports lower values for high-magnitude earthquakes compared to what is obtained by merging the two catalogs, and this undoubtedly affects the determination of design spectra.

To obtain the new seismic catalog for 2023, several steps were taken. First, magnitudes were homogenized, considering only moment magnitude. Then, data cleaning was performed by removing foreshocks and aftershocks to work only with the main events. Time windows were then selected where the data was considered stable for different magnitudes, and earthquakes were classified into the source zones defined by Beauval et al. (2018).

To determine the recurrence parameters, programs were developed in Matlab, where the least squares method was employed, and in OpenQuake using the maximum likelihood method. Gutenberg-Richter recurrence relationships were found for both truncated and modified models.

Keywords: Truncated and Modified Recurrence Relationships, Least Squares, Maximum Likelihood, New Seismic Catalog.

NUEVAS RELACIONES DE RECURRENCIA PARA ESTUDIOS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN ECUADOR

RESUMEN

El trabajo de Beauval et al. (2018) constituye el estado del arte para definir las zonas fuentes del Ecuador al 2023. Sin embargo, es necesario actualizar los coeficientes que definen las relaciones de recurrencia de cada zona fuente, debido a que la base de datos sísmicos con la que trabajaron es hasta el 2013.

Para lograr este objetivo, en este artículo se presenta como se obtuvo un nuevo catálogo fusionando los catálogos del ISC-GEM (International Seismological Centre, s. f.) con el catálogo del USGS (United States Geological Survey, s. f.) y posteriormente se presentan las nuevas relaciones de recurrencia para el Ecuador, en las zonas fuentes de Beauval et al. (2018).

Del estudio realizado se demuestra que, para algunas fuentes sísmicas, la tasa anual de sismos del trabajo de Beauval et al. (2018) reporta valores bajos para sismos de magnitudes altas con relación a los que se obtienen con la fusión de los dos catálogos y esto indudablemente que repercute en la determinación de los espectros de diseño.

Para la obtención del nuevo catálogo sísmico al 2023, se realizó en primer lugar la homogenización de las magnitudes, para tener solo en magnitud de momento; luego se realizó la depuración, eliminando los premonitores y réplicas para trabajar solo con el evento principal; después se obtuvieron ventanas de tiempo donde se considera que la muestra es estable para diferentes magnitudes; se clasificaron los sismos en las zonas fuentes de Beauval et al. (2018).

Para la determinación de los parámetros de recurrencia se realizaron programas en Matlab, donde se empleó el método de mínimos cuadrados y en OpenQuake trabajando con el método de máxima verosimilitud. Se encontraron relaciones de recurrencia de Gutenberg y Richter para los modelos truncado y modificado.

Palabras clave: Relaciones de Recurrencia truncado y modificado. Mínimos Cuadrados; Máxima Verosimilitud. Nuevo catálogo sísmico.

1. Introducción

Los autores de este artículo, realizaron el estudio de peligrosidad sísmica para el proyecto denominado "Quinto Puente", que se construirá en la zona suroeste del país, específicamente en la provincia de Guayas. Esta área geográfica está delimitada por dos sectores clave. El primero abarca la carretera E-25, en el tramo que va desde Virgen de Fátima hasta Naranjal, y se extiende hacia la zona sur de Guayaquil, cerca del Puerto Marítimo, en la intersección de las calles Cacique Tomalá y 15 de septiembre. El segundo sector abarca desde el poblado de Taura hasta la carretera E-40, que corresponde al tramo Durán-Boliche. El proyecto contempla la construcción de 4 puentes principales, la mayor parte de ellos con

aisladores sísmicos, de tal manera que se trata de un proyecto muy importante para el desarrollo del Ecuador.

Se decidió trabajar con las zonas fuentes propuestas por Beauval et al. (2018), las mismas que se indican en la Figura 1. Estas zonas fuentes corresponden al estado de conocimiento que se tiene al 2023, para el Ecuador. En la referencia indicada se tienen los parámetros que definen los volúmenes de litosfera de cada una de las zonas fuentes como sus valores de sismicidad; estamos de acuerdo en la geometría de las zonas, pero se plantea actualizar los valores de sismicidad.

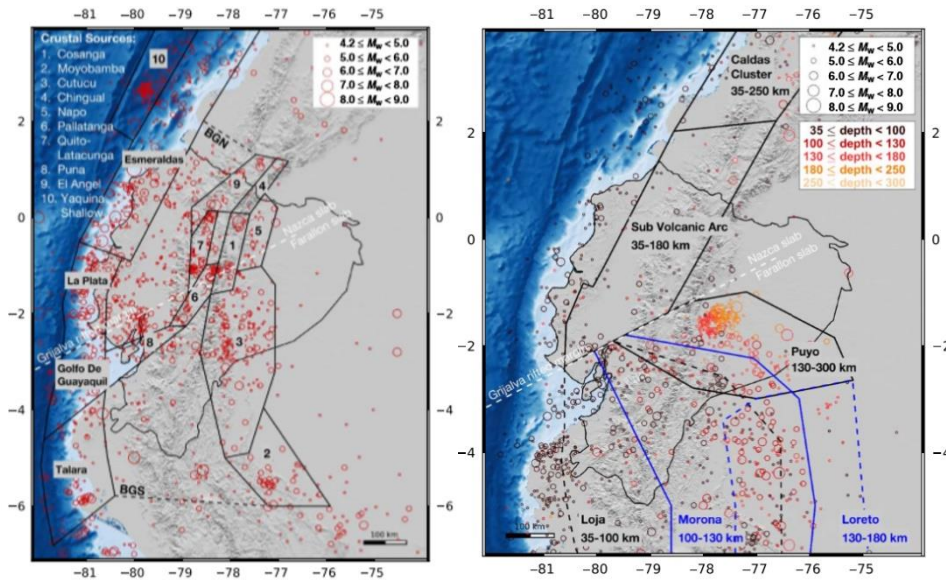


Figura 1 Zonas fuentes propuestas por Beauval et al. (2018) a la izquierda se encuentran las fuentes: interplaca y corticales; a la derecha las intra placa.

Beauval et al. (2018) trabajaron con tres catálogos sísmicos que son: ISC (International Seismological Center); NEIC (National Earthquake Information Center) y BSSA (Bulletin of the Seismological Society of America) pero con datos hasta el 2013, (Beauval et al., 2013). Trabajar con tres catálogos es una manera de reducir la incertidumbre en la elaboración de modelos de recurrencia; aunque para el 2023, en que estábamos realizando el estudio de peligrosidad sísmica para el proyecto denominado “Quinto Puente” se tenía que actualizar el catálogo sísmico a utilizar, no solo porque han pasado 10 años, tiempo en el cual se dio el terremoto del 16 de abril de 2016 (M=7.8), sino por lo que implica esta ventana temporal, 10 años es bastante considerando que los sismos de magnitudes bajas se tiene gran información a partir de 1980 y hay que tomar en cuenta que existen catálogos que han incorporado sismos de magnitud mayor que 5 en diferentes regiones del mundo y en tiempos pasados, como es el caso del catálogo del ISC GEM (International Seismological Center).

Para ver la bondad de las relaciones de recurrencia publicadas por Beauval et al. (2018) se decidió determinar el período de recurrencia en la zona fuente de Esmeraldas para sismos de magnitud superiores a 7.8, se escogió esta magnitud

porque es la que corresponde a la del terremoto del 16 de abril de 2016, que dejó grandes pérdidas económicas y humanas en el Ecuador.

En la Figura 2, se aprecia que desde 1900, se han registrado 4 terremotos de magnitud igual o mayor a 7.8 y son los registrados en 1906, de magnitud 8.8; el de 1942 de magnitud 7.8; el de 1979 de magnitud $M_s = 7.7$, con lo que se infiere que la magnitud M_w es superior a 7.8 y el terremoto de 2016 de magnitud 7.8. Con estos datos la tasa anual de sismos de magnitud mayor o igual a 7.8 es $4/123$ que da $\dot{N}(M \geq 7.8) = 0.033$ sismos/año; al sacar la inversa se encuentra que en la zona fuente Esmeraldas un sismo de magnitud mayor o igual a 7.8 se registra cada 30.75 años.

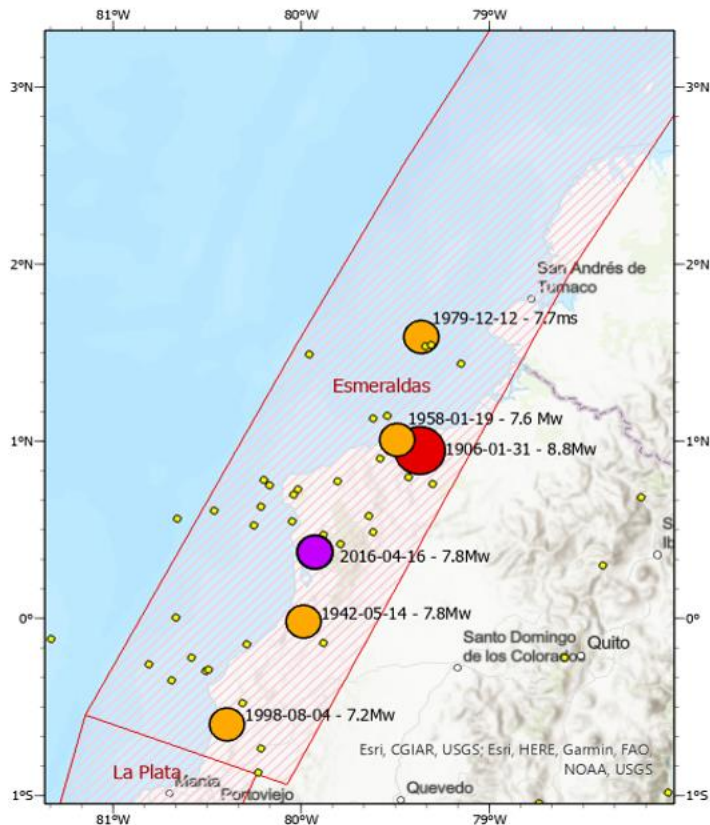


Figura 2 Sismos de gran magnitud registrados en la zona fuente de Esmeraldas, del modelo de Beauval et al. (2018).

Ahora bien, con los valores de recurrencia presentados por Beauval et al. (2018) se tiene que en la zona fuente Esmeraldas, el número de sismos con magnitud mayor o igual a 4.5 (magnitud mínima) es $\dot{N}_{M_{min}} = 2.3412$; los parámetros de la relación de Gutenberg y Richter: $\alpha = 2.341$; $\beta = 1.865$ con lo que la tasa anual de sismos de magnitud mayor o igual a 7.8 es:

$$\dot{N}(M \geq 7.8) = \dot{N}_{M_{min}} e^{-\beta(M - M_{min})} = 2.341 e^{1.865(7.8-4.5)} = 0.005 \text{ sismos/año}$$

El inverso de esta cantidad da 200 años, que significa que cada 200 años se registra un sismo de magnitud mayor a 7.8, en la zona fuente de Esmeraldas. Por lo tanto, con los datos de sismicidad de Beauval et al. (2018) se está subestimando el número de sismos de magnitudes altas, al menos en la zona fuente de Esmeraldas.

En base a esta experiencia se decidió elaborar un nuevo catálogo sísmico fusionando los catálogos del ISC-GEM y el del USGS hasta agosto de 2023; similar al trabajo de Poulos et al. (2018) con los sismos registrados en Chile.

2. HOMOGENIZACIÓN DE LAS MAGNITUDES

Existen varias escalas de magnitud, entre ellas: M_d ; M_L ; M_b ; M_s ; M_w . La primera de ellas es la magnitud que se encuentra en base a la duración del sismo, en realidad en el catálogo del USGS hay pocos sismos con esta magnitud; la magnitud M_L , fue propuesta por Richter en 1935; con el pasar del tiempo se pasó a la magnitud en base a la amplitud de las ondas de cuerpo que se denomina M_b ; luego se trabajó con la amplitud de las ondas superficiales Rayleigh dando origen a la magnitud M_s . El problema de estas magnitudes es que se saturan, es decir tienen un tope máximo la magnitud, lo que no sucede con la magnitud de momento M_w que es la que se utiliza actualmente.

Se había indicado que Poulos et al. (2018) fusionaron los catálogos del ISC GEM y el del USGS; para los sismos de Chile; como estamos trabajando con los mismos catálogos con sismos de Ecuador se decidió utilizar las mismas ecuaciones que emplearon para tener los sismos en magnitud M_w . Es así como para los sismos de duración se tienen dos casos:

- i) Si $M_d < 5 \rightarrow M_w = M_d$
- ii) Si $M_d > 5 \rightarrow M_b = M_d$

Para pasar las magnitudes de las escalas M_s, m_b, M_L a la magnitud de momento M_w , se utilizaron los coeficientes que se tienen en la tabla 1; que en general tienen la siguiente forma: $M_w = c + d M$. Entonces c, d , son los coeficientes de las ecuaciones lineales de conversión; S_c, S_d , son las desviaciones estándar de las variables c, d ; finalmente n es el número de datos en que se tienen las magnitudes en dos escalas.

Tabla 1 Relaciones de tipo lineal utilizadas para obtener la magnitud en escala M_w
Fuente: Poulos et al. (2018).

Escala de Magnitud	c	d	S_c	S_d	n
Magnitud M_s	0.585	0.935	0.073	0.013	1115
Magnitud M_L	0.676	0.899	0.200	0.037	891
Magnitud m_b	-1.005	1.227	0.092	0.017	1716

Con el objeto de clarificar uno de los problemas encontrados en la homogenización de la magnitud; en la Figura 3, a la izquierda, se presentan los sismos del catálogo del USGS en color naranja y los sismos del ISC-GEM en color azul; se aprecia que para sismos de magnitud menor a 5 el catálogo del ISC-GEM no reporta sismos y esto es importante tener en cuenta. Por otra parte, se ve que

para el 2023 no se tienen registrados sismos por el ISC-GEM, pero eso se debe a la fecha máxima de datos del catálogo con que se trabajó.

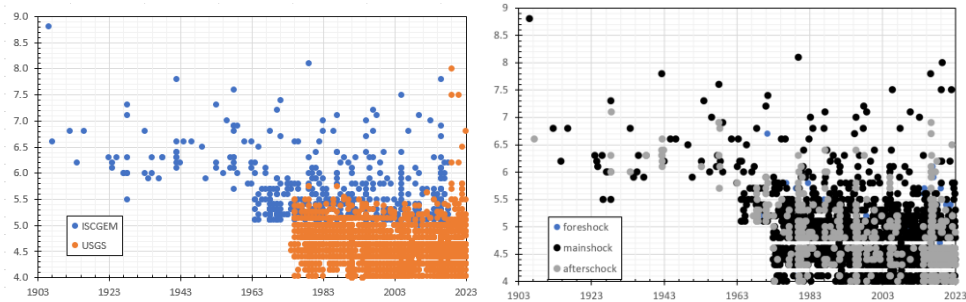


Figura 3 Base de datos del catálogo del USGS y del ISC-GEM, a la izquierda y a la derecha en la fusión de los dos catálogos se presentan los sismos principales y las réplicas. Fuente: Este estudio.

En la gráfica de la parte derecha de la Figura 3, se presentan los eventos principales hallados con los dos catálogos y las réplicas; en esta gráfica se observa por ejemplo que para sismos de magnitud 4.7 o magnitud 4.2, se ve prácticamente dos líneas en blanco y esto en parte se debe a las ecuaciones que utilizaron para homogeneizar la magnitud. En efecto hay sismos de magnitud 4.1 que al homogeneizar pasan a ser sismos de magnitud 4.0, hay otros sismos de magnitud 4.2, que pasan a ser de magnitud 4.3, etc.

Entonces, una de las causas de que no se tenga más información en sismos de las magnitudes indicadas (4.2 y 4.7) se debe a las ecuaciones que se utilizó para la homogeneización de la magnitud sísmica.

3. DECLUSTERIZACIÓN DE LOS SISMOS

Un aspecto crucial es desagrupar los sismos premonitores y réplicas de un sismo principal, porque los catálogos sísmicos deben contener solo sismos principales. Para ilustrar la importancia de este tema se presentan los resultados encontrados en una región de la India por Borah & Kumar (2021) quienes aplicaron tres métodos de declusterización a una misma base de datos y encontraron en primer lugar ventanas de tiempo diferentes y consecuencia de ello, valores de recurrencia diferentes.

Tabla 2 Tiempos de Completitud y valores de recurrencia a, b ; encontrados con tres métodos diferentes para separar el evento principal de las réplicas y premonitores. Borah & Kumar (2021).

Rango de Magnitud	(Gardner & Knopoff, 1974)	(Uhrhammer, 1986)	(Reasenberg, 1985)
$4 \leq M_w \leq 5$	40	40	30
$5.1 \leq M_w \leq 6$	60	60	60
$6.1 \leq M_w \leq 7$	100	110	110
$7.1 \leq M_w$	160	160	160
a	5.2607	5.6418	5.824
b	0.9099	0.9339	0.9592

Los métodos que utilizaron son el de Gardner & Knopoff (1974); Uhrhammer (1986) y Reasenberg (1985); los resultados de completitud se indican en la tabla 2. Nótese que se tienen diferentes períodos de las ventanas de tiempo y esto se debe a la forma como se separaron las réplicas y premonitores del evento principal. En las dos últimas filas se presenta los valores de recurrencia a, b ; para la relación $\log N = a - b M$; los valores son parecidos, aunque no iguales.

En este trabajo se trabaja con la propuesta de Gardner & Knopoff (1974) que se va a abreviar GK74 y utiliza una versión generalizada de ventanas espacio-temporales desarrollada por Knopoff et al. (1982). También se trabaja con la metodología de Uhrhammer (1986) que se abreviará UH86. Estas metodologías brindan la capacidad de adaptar de manera independiente las ventanas espacial y temporal; lo que proporciona una mayor flexibilidad en el análisis.

- **Metodología GK74**

Se consideran dos eventos i y j con magnitudes m_i y m_j , respectivamente, donde $m_i > m_j$, que ocurrieron en ubicaciones x_i y x_j en fechas t_i y t_j , respectivamente. Si la distancia geodésica entre las ubicaciones x_i y x_j , denotada como $d(x_i, x_j)$, satisface la siguiente condición:

$$d(x_i, x_j) \leq C_{dis} \cdot 3^{m_i-7}$$

Y la diferencia de tiempo entre t_i y t_j , denotada como $(t_i - t_j)$, satisface la siguiente condición:

$$|t_i - t_j| \leq C_{ti} \cdot 3^{m_i-7}$$

Entonces, el evento j se elimina del catálogo. Los parámetros de declusterización C_{dis} y C_{ti} se seleccionaron de manera que los intervalos de tiempo entre terremotos en el catálogo declusterizado sigan una distribución exponencial, y el número de terremotos en una ventana de tiempo siga una distribución de Poisson (Poulos et al., 2018).

- **Metodología UH86**

Lo que cambia en la metodología UH86, son las ecuaciones de cálculo que ahora son las siguientes:

$$d(x_i, x_j) \leq e^{(-1.024+0.804 m_i)}$$

$$|t_i - t_j| \leq \frac{e^{(-2.87+1.235 m_i)}}{364.75} * 12$$

Tanto en la metodología GK74 como en la UH86 la ventana espacial se obtiene en km y la ventana temporal en meses.

En la Figura 4 se presentan la relación espacial y temporal al emplear el modelo de Gardner & Knopoff (1974) para tres escenarios en que se supone que para un sismo de magnitud 7, los siguientes valores: C_{dis} =50 km; 100 km; 200 km; C_{ti} =65 días; 130 días; 260 días. Lo que significa; por ejemplo, al tomar los valores intermedios, de los indicados, que un sismo de magnitud 7 puede tener eventos réplicas hasta una distancia de 100 km, y que el tiempo de las réplicas puede ser de 130 días (4.3 meses). Pasados esa distancia o ventana de tiempo ya no se espera réplicas del sismo. Además, en la Figura 4 se ha presentado los resultados con el modelo de Uhrhammer (1986).

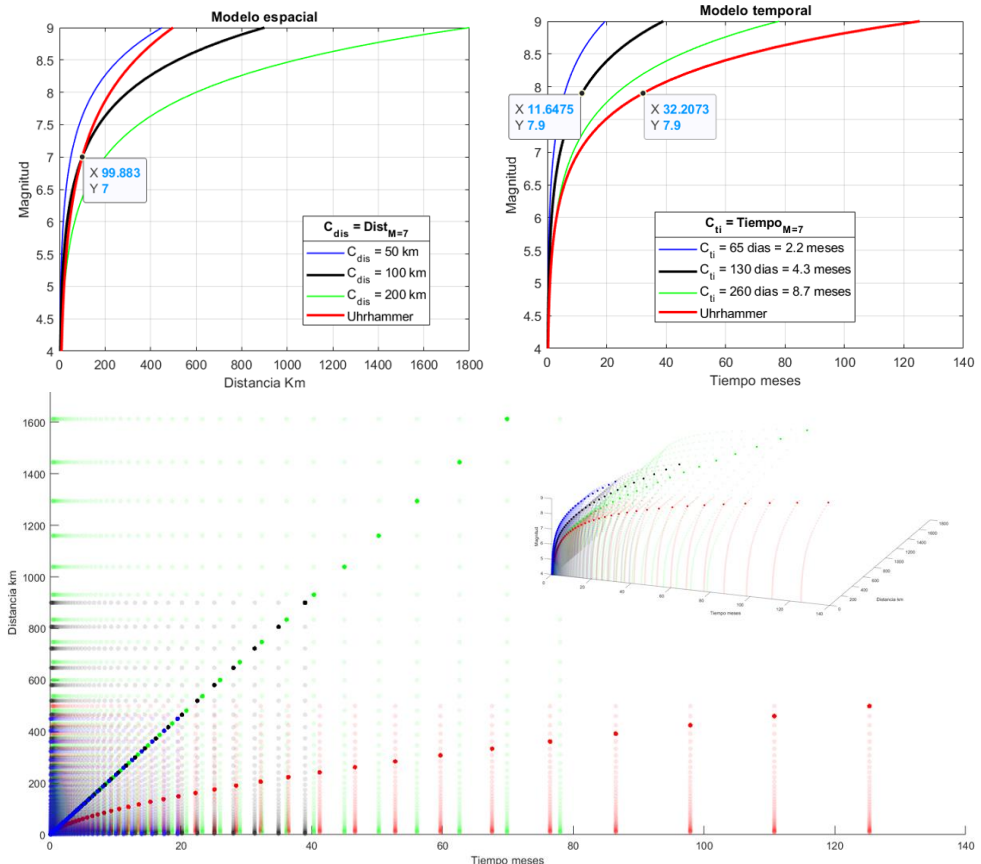


Figura 4 Relación espacio temporal encontrada con los modelos de Gardner & Knopoff (1974) y Uhrhammer (1986). Fuente: Este estudio.

En la parte superior de la Figura 4, se presenta la relación espacial (Distancia Magnitud) y temporal (Tiempo Magnitud) y en la parte inferior la relación de las tres variables indicadas (3 dimensiones).

Para la separación de los premonitores y réplicas de un terremoto cuando se utiliza el modelo de Gardner & Knopoff (1974) se trabajó con los valores que utilizaron Polos *et al.* (2019) y son: C_{dis} =100 km; y, C_{ti} =130 días. El procedimiento de cálculo para encontrar los sismos principales, empleando los modelos GK74 y UH86, es el siguiente:

1. Se seleccionan los eventos desde la magnitud de corte hacia arriba, puede ser 3.9 o la que el usuario considere.
2. Se verifica desde la magnitud mayor a la menor, sí puede agrupar a otros eventos de menor magnitud como sus posibles réplicas.
3. Si se tiene eventos en varios grupos, entonces se asigna una probabilidad de pertenecer a uno u otro en función de las ventanas de tiempo y distancia.
4. Se definen los grupos asociados a la mayor probabilidad de ser réplica del evento principal seleccionado.
5. De los eventos no clasificados se define nuevamente el procedimiento anterior, hasta converger a que todos los eventos sean categorizados en grupos, algunos eventos podrían no tener réplicas asociadas (debido a que se tiene pocos registros en algunas ventanas de tiempo).

4. COMPLETITUD DEL CATÁLOGO SÍSMICO

En la Figura 3, se observa que antes de 1970 no se tiene información sobre sismos registrados de magnitudes bajas y para magnitudes mayores se tiene poca información, esto es debido a que no se disponía de redes sísmicas como se tiene actualmente.

Cuando se calcula la tasa anual de sismos, en las relaciones de recurrencia se lo hace por año, así se dice se esperan 0.033 sismos/año de magnitud mayor a 7.8 en la zona fuente Esmeraldas. Entonces se debe encontrar ventanas de tiempo en los cuales se considera que la muestra de datos es estable, para el efecto existen varios métodos, dos de los clásicos son el método gráfico y el de Stepp (1972). El programa OpenQuake (Pagani et al., 2014) tiene una función para hallar las ventanas de tiempo utilizando el método de Stepp (1972) por esto se decidió utilizar las ventanas de tiempo que reporta OpenQuake con la base de datos del catálogo sísmico solo con sismos principales.

Tabla 3 Períodos de completitud por intervalos de magnitud, con diferentes bases de datos, para el Ecuador. Fuente: Este estudio.

Magnitud	ISC	NEIC	BSSA	OQ UH86	Gráfico	OQGK74
4.2	1969	1973	1995	1990	1990	1992
4.5	1964	1973	1963	1990	1971	1992
4.8	1964	1973	1963	1978	1971	1976
5.1	1964	1973	1963	1967	1964	1967
5.4	1964	1971	1963	1957	1964	1961
5.7	1957	1965	1963	1950	1964	1957
6.0	1925	1930	1900	1950	1920	1957
6.3	1925	1920	1900	1913	1920	1908
6.6	1925	1920	1900	1910	1920	1908
6.9	1900	1900	1900	1910	1920	1908
7.2	1900	1900	1800	1905	1906	1905
> 7.5	1900	1900	1750	1905	1906	1905

En la primera columna de la tabla 3 se presenta la magnitud; las tres siguientes columnas corresponden a los valores de completitud obtenidos por

Beauval et al., (2013); la quinta columna identificada por OQUH86 es los resultados hallados con el programa OpenQuake utilizando el modelo UH86 en la descluterización; la sexta lo que reporta el método gráfico y la última columna llamada OQGK74, reporta OpenQuake empleando el método GK74 en la descluterización. El lector puede apreciar que existen algunos pasos necesarios para determinar las ventanas de tiempo con las cuales se va a trabajar.

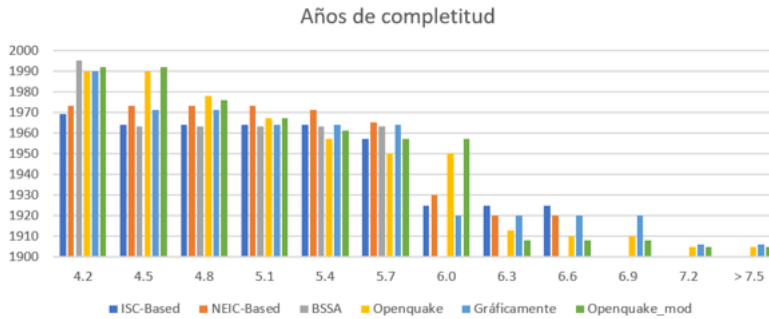


Figura 5 Representación gráfica del estudio de completitud. Fuente: Este estudio.

Luego de los estudios realizados se decidió trabajar con la última columna de la tabla 3, para proseguir con el trabajo de las relaciones de recurrencia.

5. RELACIONES DE RECURRENCIA

Las relaciones de recurrencia propuestas inicialmente por Gutenberg & Richter (1944) tienen la siguiente forma:

$$\log N(m) = a - b m$$

Donde $N(m)$ es el número de sismos de magnitud mayor o igual a m . Los parámetros de sismicidad a, b , se han obtenido en este estudio de dos formas, la primera por el método de los mínimos cuadrados, empleando una función de Matlab (The MathWorks Inc., 2023) y la segunda por método de máxima verosimilitud empleando una función de OpenQuake que trabaja con el método de Weichert (1980), que se encuentra descrito en Pinilla (2019).

Al escribir la ecuación de Gutenberg y Richter en logaritmos naturales se tiene:

$$\ln N(m) = \alpha - \beta m$$

$$\alpha = a \ln 10$$

$$\beta = b \ln 10$$

En Rivas (2014) se presenta la deducción de las ecuaciones de Gutenberg y Richter para los modelos truncado y modificado, cuyas ecuaciones se indican a continuación, para los dos casos se necesita encontrar la tasa anual de sismos mayores a la magnitud mínima $\dot{N}_{M_{min}}$

$$\dot{N}_{M_{min}} = e^{\alpha - \beta M_{min}}$$

- **Modelo de GR Truncado**

$$\dot{N}(m) = \dot{N}_{M_{min}} e^{-\beta(m-M_{min})}$$

$$f(m) = \beta e^{-\beta(m-M_{min})} + e^{-\beta(M_{max}-M_{min})} \cdot (m - M_{max}) \quad \text{si } m = M_{max}$$

$$f(m) = \beta e^{-\beta(m-M_{min})} + e^{-\beta(M_{max}-M_{min})} \quad \text{si } m \leq M_{max}$$

$$F(m) = \begin{cases} 1 - e^{-\beta(m-M_{min})} & \text{si } m < M_{max} \\ (1 - e^{-\beta(M_{max}-M_{min})}) + e^{-\beta(m-M_{min})} = 1 & \text{si } m = M_{max} \end{cases}$$

Donde $\dot{N}(m)$ es la tasa anual de sismos de magnitud mayor o igual a m ; $f(m)$ es la función de densidad y $F(m)$ es la función de probabilidad. Se recuerda que M_{min}, M_{max} , son las magnitudes mínimas y máximas consideradas en la zona fuente.

- **Modelo de GR Modificado**

$$\dot{N}(m) = \dot{N}_{M_{min}} * \left[1 - \frac{(1 - e^{-\beta(m-M_{min})})}{(1 - e^{-\beta(M_{max}-M_{min})})} \right]$$

$$f(m) = \frac{\beta}{(1 - e^{-\beta(M_{max}-M_{min})})} \cdot e^{-\beta(m-M_{min})}$$

$$F(m) = \frac{(1 - e^{-\beta(m-M_{min})})}{(1 - e^{-\beta(M_{max}-M_{min})})}$$

El significado de las variables ha sido ya indicado.

6. NUEVAS FUNCIONES DE CEINCI-LAB

Las nuevas funciones que se han generado en esta investigación y que se han incorporado al sistema de computación **CEINCI-LAB** se hallan en la carpeta denominada **Catálogo y relaciones de recurrencia** y básicamente se resumen en los tres programas siguientes:

- Ecuador_Graficas_Puente_Gye_Mainshock_Depurado_BCG
- Ecuador_Graficas_Puente_Gye_Mainshock_Depurado_OpenQuake_vs2
- Ecuador_Graficas_Puente_Gye_Mainshock_Depurado_OpenQuake4_vs2

El primer programa está en Matlab y el depurado del catálogo unificado se lo hace con el método GK74. El segundo programa está en OpenQuake y el depurado se lo realiza con UH86. Finalmente, el tercer programa está en OpenQuake y el depurado se lo hace con GK74

El catálogo unificado con depuración GK74 y trabajando en Matlab tiene 2217 sismos principales, mientras que al hacer el depurado en OpenQuake y con GK74 se tiene 2214 sismos principales. Antes de indicar los resultados que reporta cualquiera de los programas, se debe indicar que el nombre que el usuario debe dar para encontrar las relaciones de recurrencia en una determinada zona fuente se encuentra a continuación.

```
Zone = {'Cosanga'; 'Moyobamba'; 'Cutucu'; 'Chingal'; 'Napo'; 'Pallatanga'; ...
'Quito_Latacunga'; 'Puna'; 'El Angel'; 'BGN'; 'BGS'; ...
'Yaquina_Shallow'; 'Esmeraldas'; 'La_Plata'; 'Golfo_de_Guayaquil'; ...
'Talara'; 'Loja'; 'Morona'; 'Puyo'; 'Subvolcanic_Arc'; 'Caldas_Cluster';
' Loreto');
```

El nombre se lo da, en las líneas 443 y 625; dos veces, el número de las líneas de los programas es referencial ya que pueden cambiar fácilmente con la incorporación de comentarios o alguna modificación que se hagan a los programas. Los programas presentan la misma cantidad de figuras y variables, en formato es igual, sin embargo, el contenido es diferente, por esta razón al indicar los reportes que se encuentran al usar el primero de los programas ya se puede inferir que presentan los otros. Para el ejemplo se ha seleccionado a la zona fuente 'Esmeraldas'.

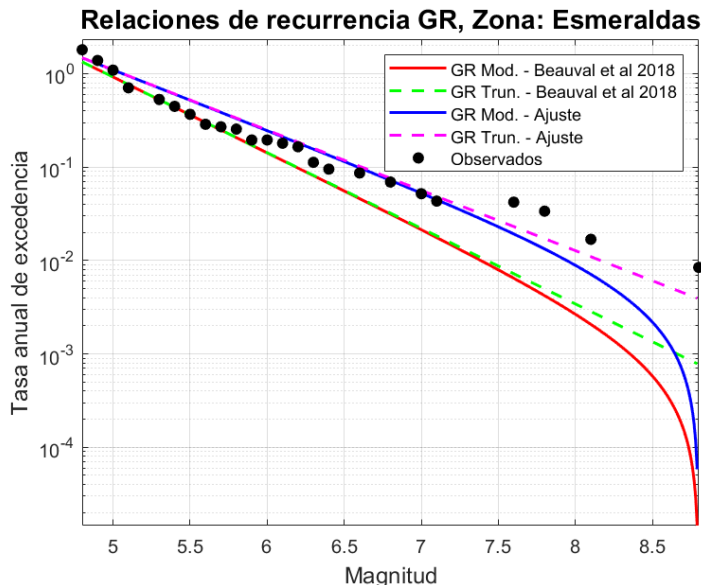


Figura 6 Relaciones de recurrencia GR truncado y modificado para la zona fuente Esmeraldas, utilizando valores de Beauval et al. (2018) y el catálogo unificado con depuración GK74, con mínimos cuadrados.

En la Figura 6 se presentan con color rojo y verde las relaciones de recurrencia de GR modifica y truncada; y con colores azul y lila, las mismas relaciones, pero obtenidas a partir de la base del nuevo catálogo sísmico unificado con la depuración GK74; se indica además los sismos observados con puntos negros. Como era de esperarse los puntos observados se aproximan más a las obtenidas con el nuevo catálogo especialmente para sismos de gran magnitud.

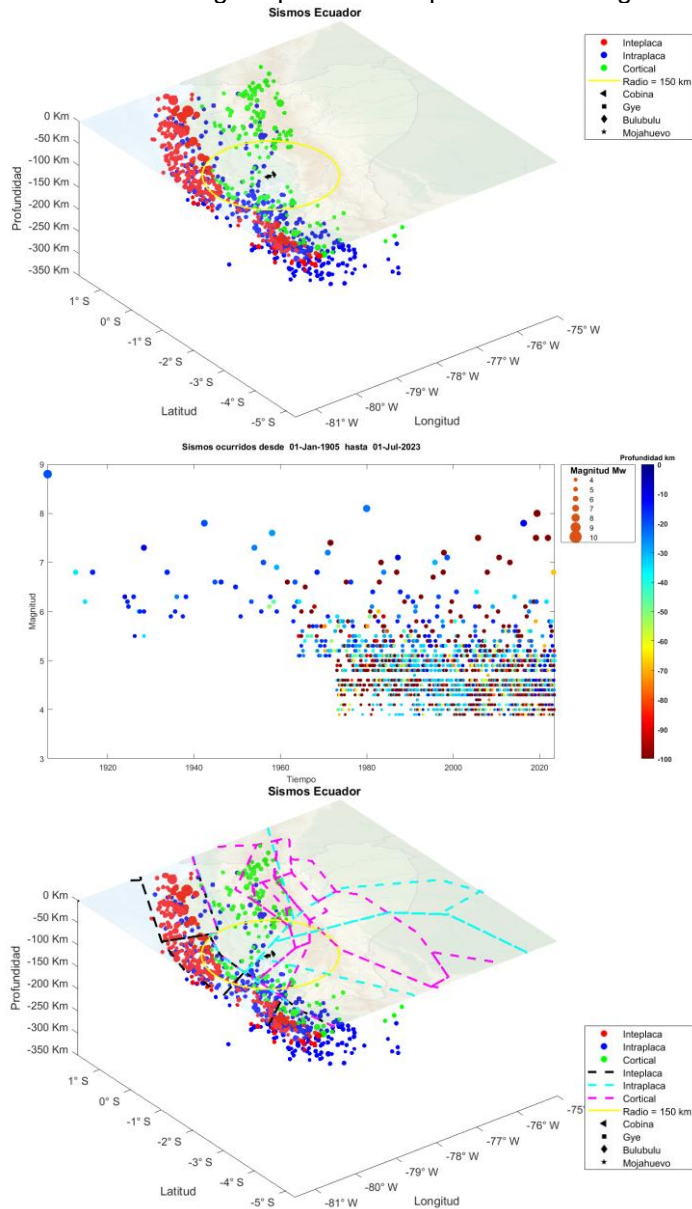


Figura 7 En la gráfica superior se presentan la ubicación de los sismos en tres dimensiones y las fuentes tectónicas; en la parte central el catálogo unificado en el tiempo; en la gráfica inferior los sismos asociados a las zonas fuentes de Beauval et al. (2018).

En la Figura 7 se presentan algunas de las gráficas que reporta el programa: **Ecuador_Graficas_Puente_Gye_Mainshock_Depurado_BCG**, en la parte superior se tiene la ubicación de los sismos en tres dimensiones y con colores se los clasifica de acuerdo a la tectónica en: interplaca, cortical e intra placa; en la parte central se muestra la magnitud de los sismos del catálogo unificado en función de año de registro y en la parte inferior se tiene planteado los hipocentros en cada una de las zonas fuentes del modelo de Beauval et al. (2018).

El tercero de los autores de este artículo dictó una conferencia sobre “Nuevas funciones de **CEINCI-LAB**” donde en su primera parte se habla con cierto detalle las nuevas funciones que se han presentado en este y el siguiente apartado para explicar el trabajo desarrollado, materia del presente artículo. Esta conferencia se encuentra en los siguientes links:

<https://vimeo.com/872767575/eb1f42b06b?share=copy>

https://ceincilab.wordpress.com/conferencias_raf/

7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON BEAUVAL

Inicialmente en el estudio se trabajó con los dos catálogos por separado; el uno del USGS y los resultados que se obtenían se denominaron Ajuste 1; por otro lado, se trabajó solo con el catálogo del ISC GEM, los resultados se denominaron Ajuste 2. A continuación se presenta lo que se obtuvo al dividir el valor de β , encontrado por Beauval et al. (2018) con los valores de β , encontrados con Ajuste 1 y 2; los resultados se presentan en la Figura 8.

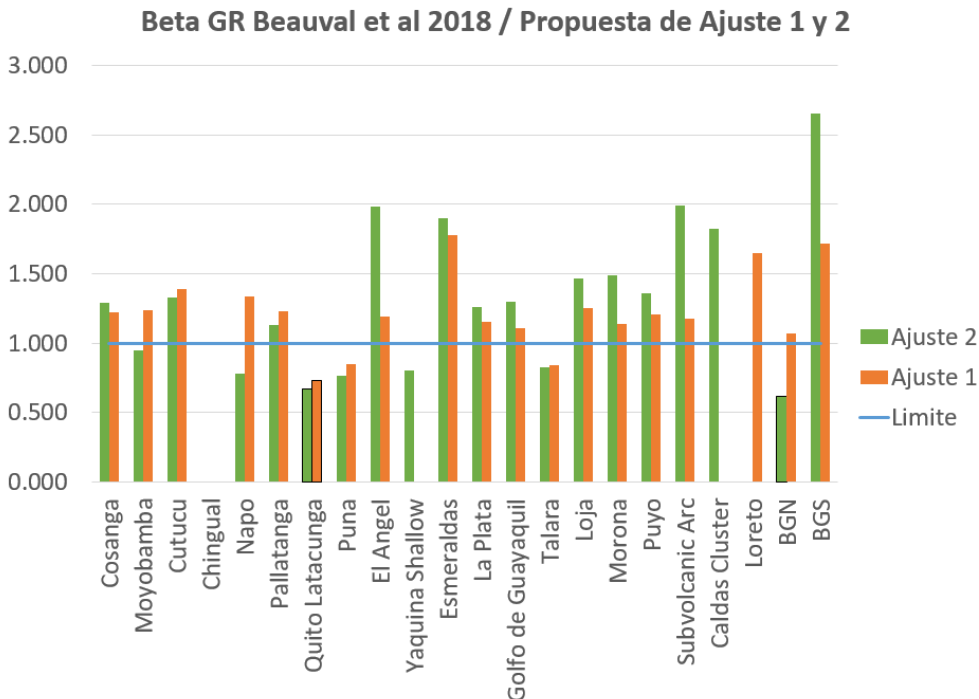


Figura 8 Relación del factor de sismicidad β encontrado con Beauval et al. (2018) para los valores β hallados con solo catálogo de USGS y solo con ISC GEM.

Si la relación indicada es mayor a la unidad significa que las relaciones de recurrencia del modelo de Beauval et al. (2018) están sub estimando la peligrosidad sísmica en esa fuente para sismos de magnitud alta. Si bien es cierto la Figura 8 es al trabajar por separado la información sísmica de los catálogos del USGS y del ISC GEM, no es menos cierto que esta tendencia se mantiene al fusionar los dos catálogos y esto se lo vio en la Figura 6, con la información sísmica de la fuente de Esmeraldas. Se destaca que en el catálogo unificado los valores a, b , se obtuvieron con mínimos cuadrados. De esta misma forma se obtuvieron las relaciones de recurrencia que se indican en la Figura 9, para las zonas fuentes de La Plata y Golfo de Guayaquil.

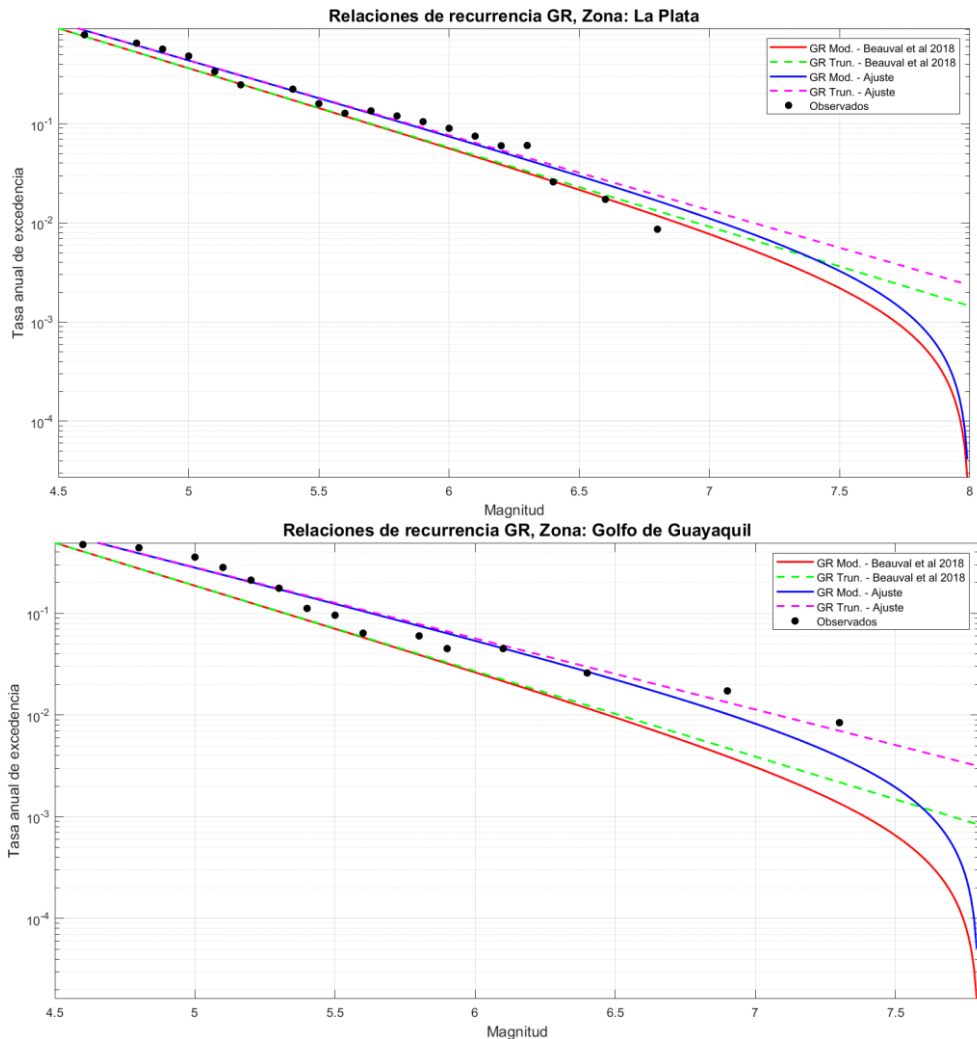


Figura 9 Relaciones de recurrencia GR modificado y truncado hallado con valores de Beauval et al. (2018) y con código unificado, empleando GK74 y hallando los valores de sismicidad a, b , con mínimos cuadrados en las zonas fuentes: La Plata y Golfo de Guayaquil. Fuente: Este estudio.

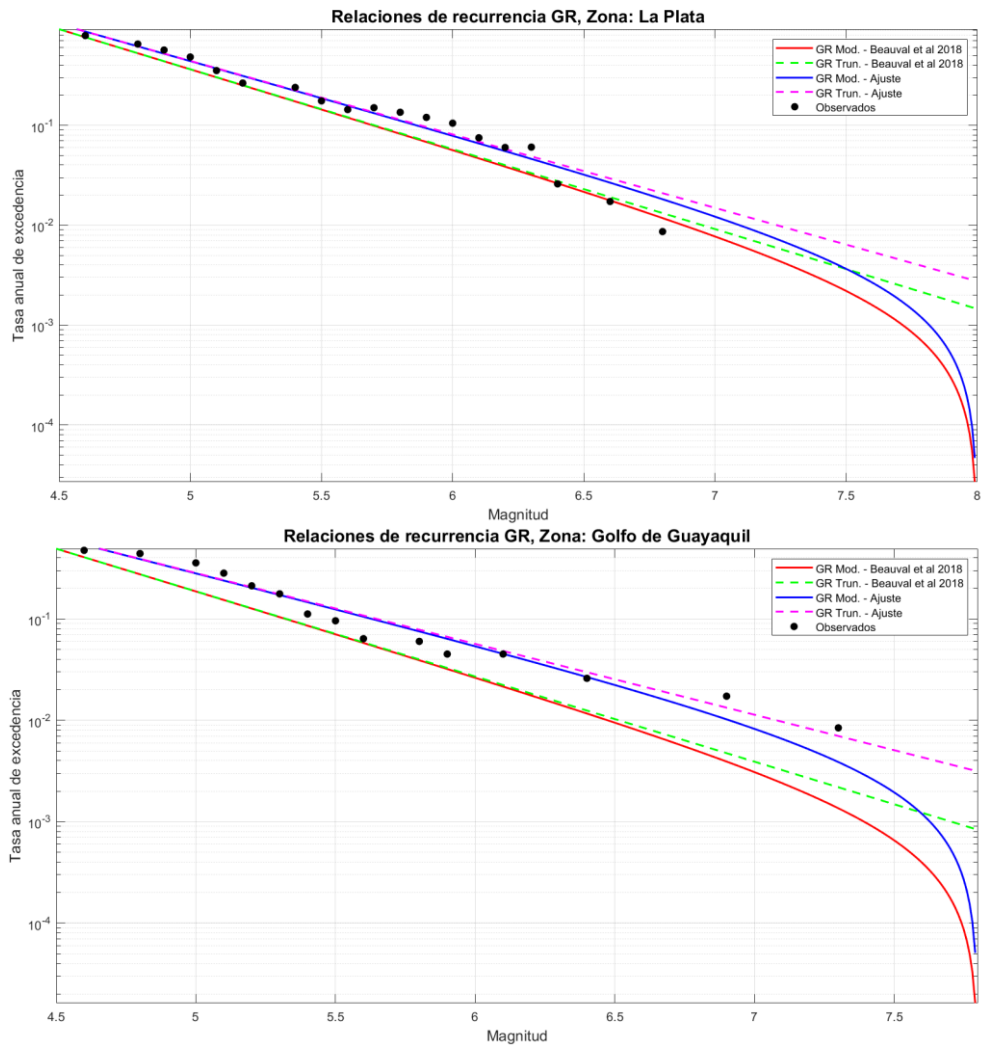


Figura 10 Relaciones de recurrencia GR modificado y truncado hallado con valores de Beauval et al. (2018) y con código unificado, empleando GK74 y hallando los valores de sismicidad a , b , con máxima verosimilitud en las zonas fuentes: La Plata y Golfo de Guayaquil. Fuente: Este estudio.

En base a los resultados presentados en la Figura 9 y Figura 10 en que se han comparado las relaciones GR modificado y truncado, encontradas en este estudio con dos catálogos sísmicos con las obtenidas por Beauval et al. (2018) se debe indicar lo siguiente:

A simple vista los resultados hallados en este estudio de los parámetros a , b , con dos métodos: mínimos cuadrados (Figura 9) y máxima verosimilitud (Figura 10) son prácticamente los mismos; para ver alguna diferencia en el siguiente apartado se presentan en un solo gráfico los resultados con estos dos métodos.

Para sismos de magnitudes cercanas o mayores a 7, las relaciones de recurrencia halladas en este estudio se aproximan mejor a los datos observados con relación a los de Beauval et al. (2018).

8. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LAS TRES BASES DE DATOS DE ESTE ESTUDIO

En este estudio se fusionaron los catálogos del ISC GEM con el del USGS para el Ecuador; pero la depuración para hallar los sismos principales se hizo con Matlab y con OpenQuake, por separado, empleando los métodos GK74 y UH86 con lo que se obtuvo tres bases de datos, la primera que contiene 2217 sismos principales, está se halló con Matlab y GK74; la segunda que contiene 1963 sismos principales hallada con OpenQuake y UH86 y la tercera, con 2214 sismos principales trabajando con OpenQuake y GK74.

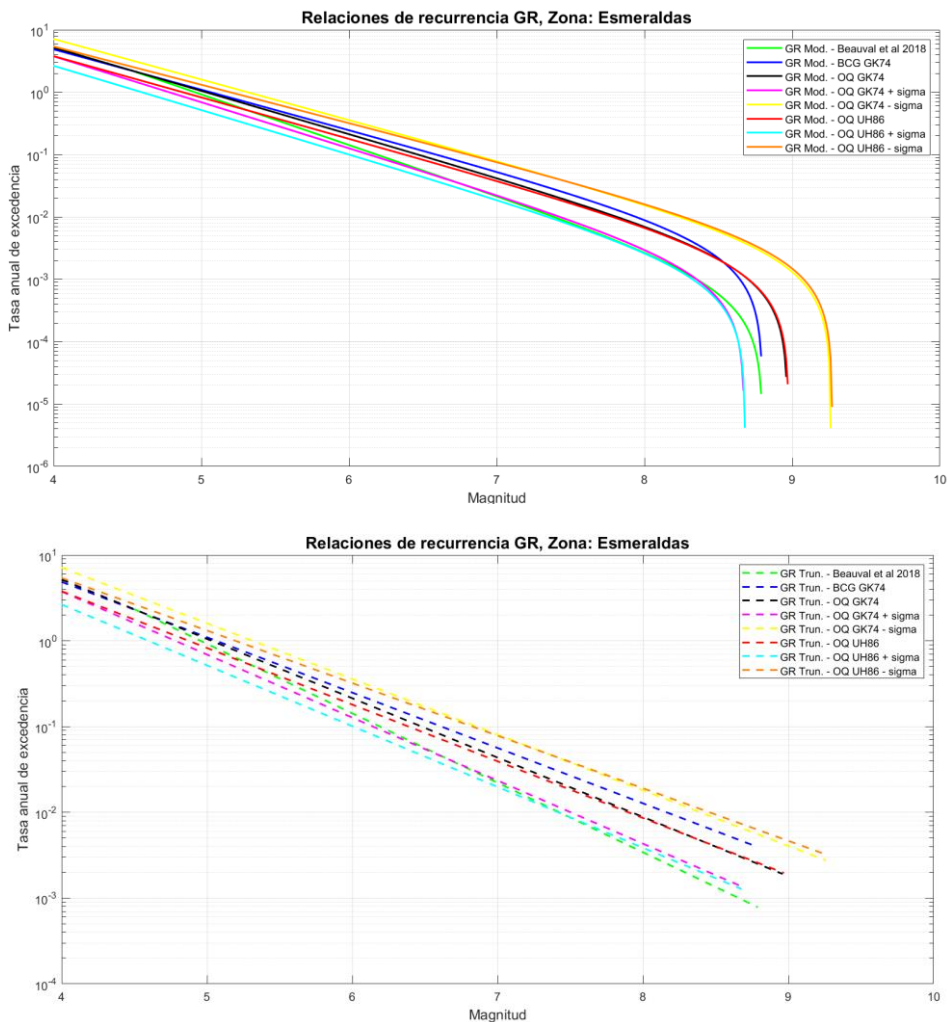


Figura 11 Relaciones GR modificado y truncado para zona fuente Esmeraldas con las tres bases de datos de este estudio y Beauval et al. (2018).

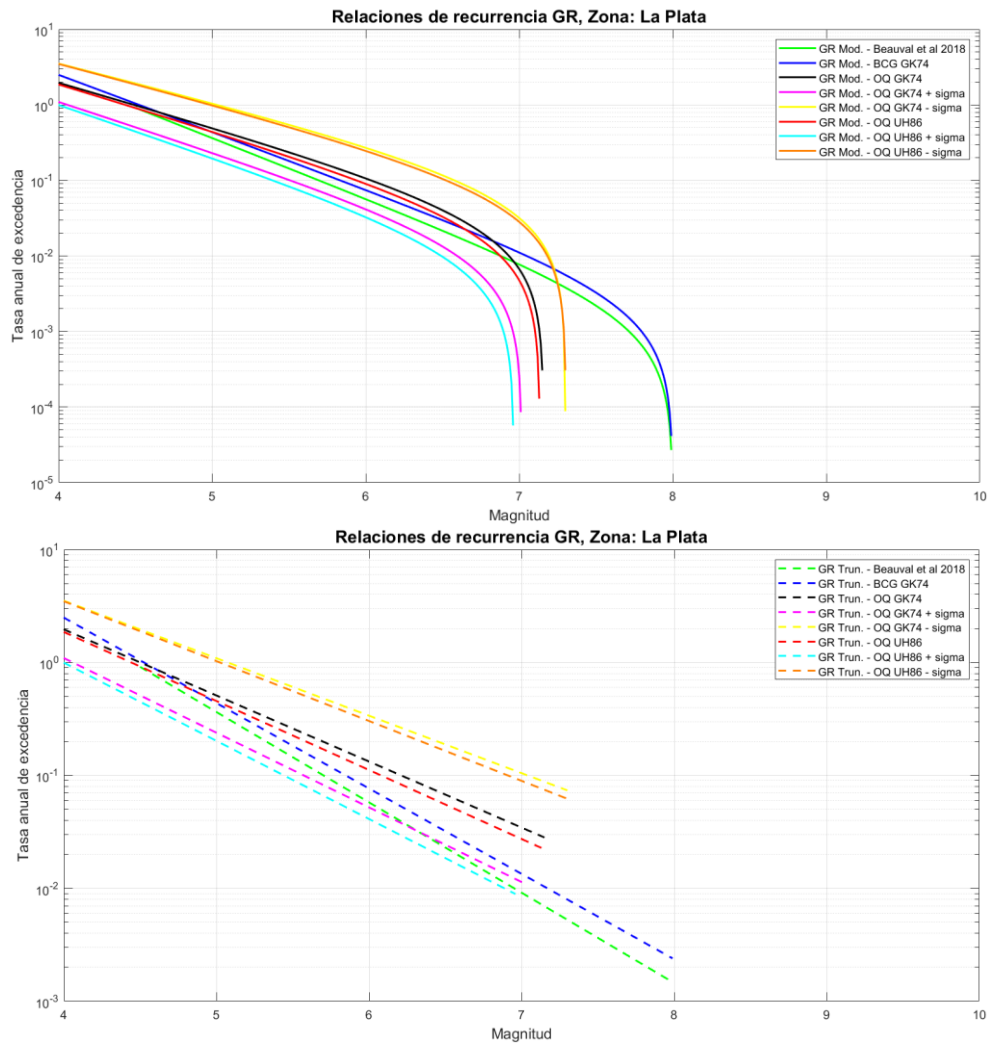


Figura 12 Relaciones GR modificado y truncado para zona fuente La Plata con las tres bases de datos de este estudio y Beauval et al. (2018).

Para decidir con cuál de las tres bases de datos resultantes de la unificación de los dos catálogos sísmicos ISC GEM y USGS, se deben mirar las relaciones de recurrencia en las zonas fuentes de Beauval et al. (2018), pero a más de mirar la magnitud máxima a la que se llega se debe ver los datos de los sismos registrados.

En este artículo se presentan los resultados en tres zonas fuentes interplaca, que son: Esmeraldas (Figura 11); La Plata (Figura 12) y Golfo de Guayaquil (Figura 13), sin embargo, estas tendencias de los modelos con los datos observados se mantienen.

En la Figura 11, Figura 12 y Figura 13, se presenta en la parte superior las relaciones GR modificada y en la parte inferior las relaciones GR truncada. Halladas con las cuatro bases de datos que son: Beauval et al. (2018) y las tres de este estudio.

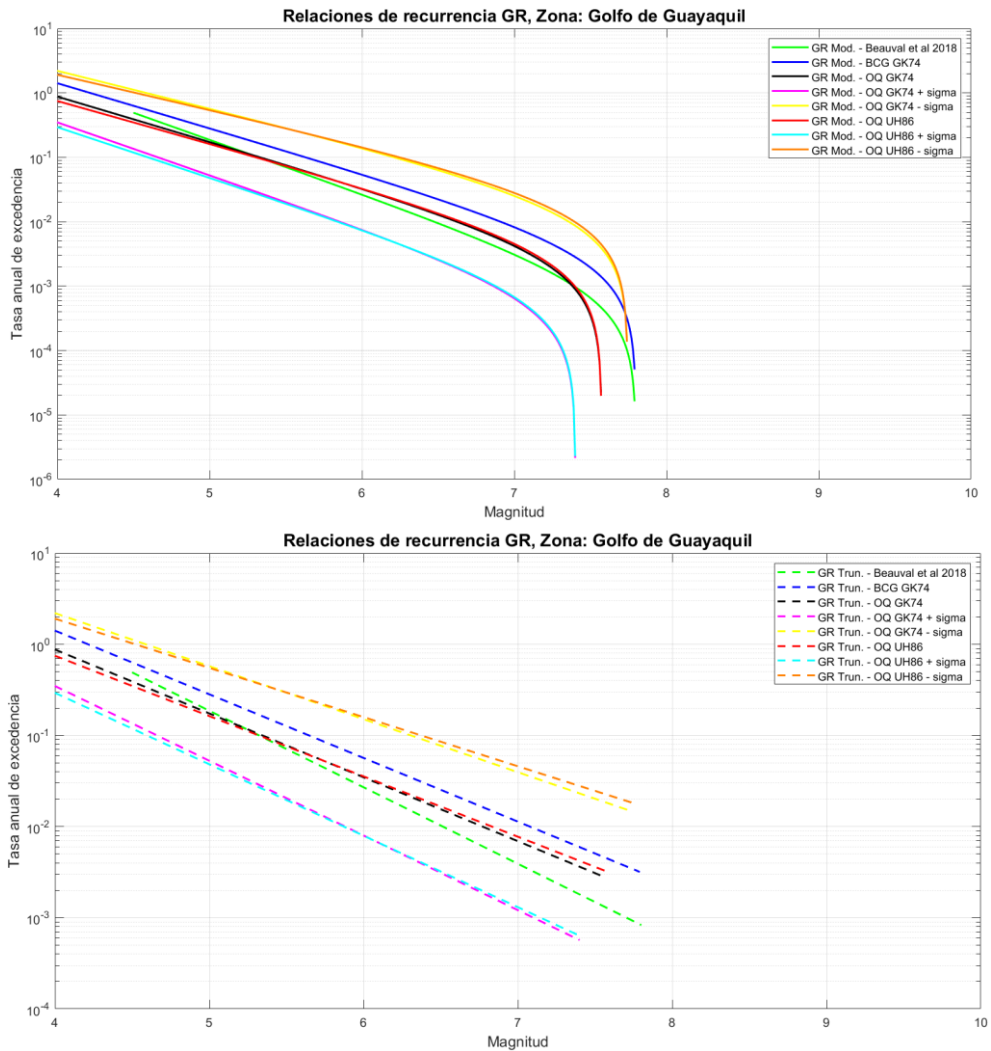


Figura 13 Relaciones GR modificado y truncado para zona fuente Golfo de Guayaquil con las tres bases de datos de este estudio y Beauval et al. (2018).

En la Figura 11, Figura 12 y Figura 13 se presentan además las relaciones GR modificada y truncada halladas con más o menos la desviación estándar encontradas con los bases de datos de los modelos GK74 y UH86 hallados con OpenQuake y se ve que estas curvas realmente definen los valores extremos, es decir que las curvas halladas con valores medios se encuentran entre estos límites.

Del estudio realizado se desprende que la relaciones GR truncada y modificada hallada con OpenQuake, con la declusterización de GK74 y UH86, son muy parecidas, pero las curvas halladas con GK74 tienen valores ligeramente mayores que UH86 y se aproximan mejor a los sismos registrados, por esto se decidió trabajar con los 2214 sismos principales que tiene el catálogo hallado en OpenQuake y GK74.

9. RESULTADO FINAL DEL ESTUDIO

En la Figura 14 se presenta el resultado de la separación de los sismos principales, de los premonitores y de las réplicas por rangos de magnitud, encontrados con el programa OpenQuake y con el modelo GK74, que contiene en total 2214 sismos principales. De paso se nota que la mayor cantidad de sismos se tienen para magnitudes menores a 6.

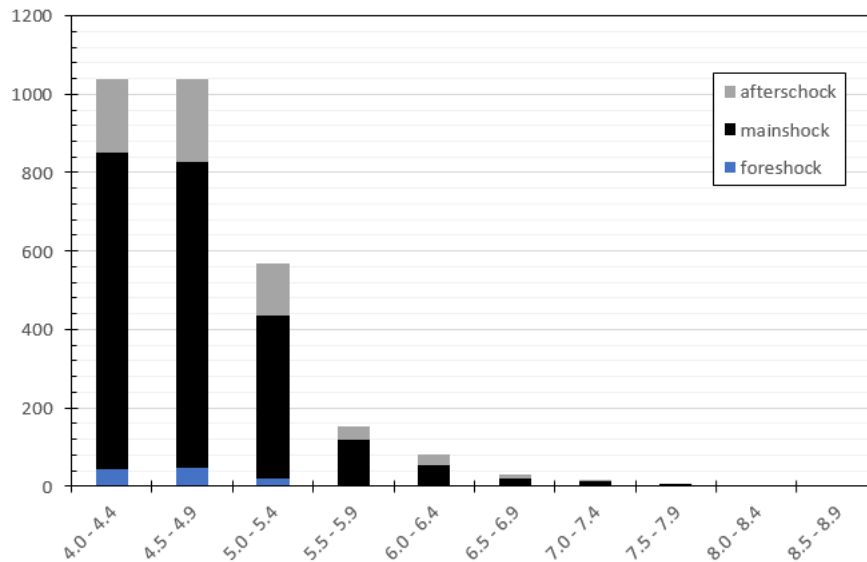


Figura 14 Resultados de la separación de los sismos principales de los premonitores y réplicas halladas con OpenQuake y GK74. Fuente: Este estudio.

Los valores que definen la sismicidad en cada una de las zonas fuentes del modelo de Beauval et al. (2018) encontradas con la base de datos de 2214 sismos se indican en la tabla 4 (Ver Anexo 1), esta tabla es el resultado final del estudio y entre otras cosas sirven para determinar las relaciones de recurrencia.

10. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Al realizar la unificación del catálogo sísmico del ISC GEM con el del USGS hasta julio de 2023, se tuvieron 2933 sismos, con diferentes magnitudes por lo que se procedió a homogeneizar a la magnitud de momento; posteriormente se separó los sismos principales de los premonitores y réplicas, empleando los métodos GK74 y UH86; esto se lo realizó en Matlab y en OpenQuake.

Como resultado se obtuvieron tres catálogos solo con sismos principales, el primero de ellos fue realizado el Matlab y con GK74; este catálogo tiene 2217 sismos; el segundo fue desarrollado en OpenQuake y UH86 con lo que se obtuvo 1963 sismos y el tercero en OpenQuake con GK74 que arrojó 2214 sismos principales.

Posteriormente para los tres catálogos se obtuvieron ventanas de tiempo donde se considera que la muestra es estable, en OpenQuake. Luego se clasificaron los sismos en cada uno de las zonas fuentes del modelo de Beauval et al. (2018) y se obtuvieron las relaciones de recurrencia de Gutenberg y Richter modificado y truncado, las mismas que fueron comparadas en primer lugar con las encontradas por Beauval et al. (2018) y se observó que los sismos registrados se aproximan mejor a los obtenidos en este estudio, especialmente para eventos de magnitudes altas.

Finalmente se analizó las relaciones de recurrencia con los tres catálogos que dicho sea de paso presentan relaciones de recurrencia bastante parecidas, sin embargo, para trabajos futuros de peligrosidad sísmica en el Ecuador se recomienda emplear el catálogo que tiene 2214 sismos principales en el cual la depuración de los premonitores y réplicas se realizó en OpenQuake y con GK74.

11. AGRADECIMIENTOS

Brian Cagua agradece el apoyo de ANID-Subdirección de Capital Humano/Doctorado/2022-folio 21220089, por la beca para realizar sus estudios de postgrado en Chile.

11. REFERENCIAS

- 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>
- Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., Aguilar, J., Troncoso, L., & Vaca, S. (2013). An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A), 773-786. <https://doi.org/10.1785/0120120270>
- Borah, N., & Kumar, A. (2021). Studying and Comparing the Declustered EQ Catalogue Obtained from Different Methods for Guwahati Region NE India. En M. Latha Gali & P. Raghuvveer Rao (Eds.), *Geohazards* (pp. 577-590). Springer Singapore.
- 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>
- 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>
- Knopoff, L., Kagan, Y. Y., & Knopoff, R. (1982). B Values for foreshocks and aftershocks in real and simulated earthquake sequences. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(5), 1663-1676. <https://doi.org/10.1785/BSSA0720051663>

- 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>
- Pinilla, D. (2019). *Análisis de la influencia del catálogo sísmico en la estimación de la recurrencia de terremotos* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María UTFSM]. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/46899?show=full>
- Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N., & de la Llera, J. C. (2018). An Updated Recurrence Model for Chilean Subduction Seismicity and Statistical Validation of Its Poisson Nature. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(1), 66-74. <https://doi.org/10.1785/0120170160>
- Reasenber, P. (1985). Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B7), 5479-5495. <https://doi.org/10.1029/JB090iB07p05479>
- Rivas, A. (2014). *Contribución metodológica para incorporar fallas activas en la modelización de la fuente dirigida a estimaciones de peligrosidad sísmica. Aplicación al sur de España* [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/23328/>
- 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.
- The MathWorks Inc. (2023). *MATLAB* (9.10.0 (R2021a)) [Software]. The MathWorks Inc. <https://la.mathworks.com/>
- Uhrhammer, R. (1986). Characteristics of northern and central California seismicity. *Earthquake Notes*, 57(1), 21.
- United States Geological Survey. (s. f.). *Earthquake Catalog*. Earthquake Hazards Program. Recuperado 6 de octubre de 2023, de <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- 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>

12. ANEXOS
Anexo 1

Tabla 4 Valores de sismicidad en nuevo catálogo sísmico. Fuente: Este estudio.

Type	N.	Zone	a	b	$\lambda Mw \geq M_{min}$	M_{min} for GR	Number of Events $\geq M_o$	M_{max} Obs	M_{max}	Depth Range		α	β	σ_α	σ_β	
Crustal Sources	1	Cosanga	1.885	0.55	0.57	3.90	26	7.10	7.32	0	35	4.34	1.26	0.092	0.134	
	2	Moyobamba	2.703	0.60	1.97	4	76	6.80	7	0	35	6.22	1.39	0.050	0.078	
	3	Cutucu	3.331	0.75	2.48	3.90	77	7	7.23	0	35	7.67	1.73	0.052	0.086	
	4	Chingual														
	5	Napo	1.141	0.40	0.31	4.10	15	5.80	6.11	0	35	2.63	0.93	0.110	0.260	
	6	Pallatanga														
	7	Quito Latacunga	1.36	0.43	0.47	3.90	23	5.90	6.20	0	35	3.13	1	0.100	0.222	
	8	Puna	1.389	0.43	0.47	4	18	5.60	6.02	0	35	3.20	0.99	0.097	0.253	
	9	El Angel	2.892	0.77	0.77	3.90	24	6.30	6.77	0	35	6.66	1.78	0.092	0.192	
	10	Yaquina Shallow	3.34	0.72	3.40	3.90	116	6.10	6.60	0	35	7.69	1.66	0.045	0.094	
Interplaca Sources	11	Esmeraldas	3.482	0.69	6.07	3.90	225	8.80	8.97	0	50	8.02	1.59	0.033	0.043	
	12	La Plata	2.633	0.59	2.25	3.90	82	6.80	7.16	0	35	6.06	1.35	0.050	0.076	
	13	Golfo de Guayaquil	2.747	0.70	1.03	3.90	32	7.30	7.58	0	35	6.33	1.61	0.076	0.119	
	14	Talara	2.202	0.43	3.44	3.90	139	6.30	6.92	0	40	5.07	0.98	0.039	0.066	
Intraslab Sources	15	Loja	4.145	0.80	10.59	3.90	314	6.80	7.27	35	100	9.54	1.84	0.027	0.046	
	16	Morona	3.409	0.69	5.04	3.90	169	7.50	7.81	100	130	7.85	1.60	0.036	0.052	
	17	Puyo	4.245	0.86	8.06	3.90	308	7.50	7.74	130	300	9.77	1.97	0.031	0.052	
	18	Subvolcanic Arc	3.684	0.83	2.70	3.90	83	7	7.22	35	180	8.48	1.92	0.052	0.092	
	19	Caldas Cluster	3.627	0.85	2.09	3.90	69	6.80	6.99	35	250	8.35	1.95	0.060	0.111	
	20	Loreto	2.976	0.81	0.33	4.30	26	7.50	7.69	130	180	6.85	1.85	0.097	0.167	
Crustal Sources	21	BGN	2.612	0.64	1.35	3.90	51	6.20	6.42	0	35	6.01	1.46	0.069	0.189	
	22	BGS	3.213	0.78	1.43	3.90	54	7.30	7.64	0	35	7.40	1.81	0.069	0.114	