



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA

CARRERA EN GEOCIENCIAS

**ANÁLISIS MEDIANTE ESTADÍSTICA NO EXTENSIVA DEL
TERREMOTO DE PEDERNALES, ECUADOR 2016**

Proyecto de investigación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN GEOCIENCIAS

AUTOR

Daniel Andrés Barahona Cárdenas

Napo – Ecuador

2023



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA

INGENIERÍA EN GEOCIENCIAS

ANÁLISIS MEDIANTE ESTADÍSTICA NO EXTENSIVA DEL

TERREMOTO DE PEDERNALES, ECUADOR 2016

Proyecto de investigación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN GEOCIENCIAS

AUTOR: Daniel Andrés Barahona Cárdenas

TUTOR: PhD. José Sebastián Araujo Soria

Napo – Ecuador

2023

**DECLARACION DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y
RESPONSABILIDAD**

Tena, 12 de Mayo de 2023

Yo, Daniel Andrés Barahona Cárdenas con documento de identidad N°1725803389, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Ingeniero en Geociencias son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad. Por la favorable atención a la presente, suscribo de usted, Atentamente,

A handwritten signature in blue ink that reads "Daniel Barahona". The signature is stylized with a large initial 'D' and a long horizontal stroke at the end.

Daniel Andrés Barahona Cárdenas
C.I:1725803389

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Daniel Andrés Barahona Cárdenas, con documento de identidad N°1725803389, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: Análisis mediante estadística no extensiva del terremoto de Pedernales, Ecuador de conformidad con el Art.114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación superior.

Tena, 12 de Mayo de 2023

A handwritten signature in blue ink that reads "Daniel Barahona". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

Daniel Andrés Barahona Cárdenas

C.I: 1725803389

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Certifico que el trabajo de integración curricular titulado: "Análisis mediante estadística no extensiva del terremoto de Pedemales, Ecuador 2016", en la modalidad de: artículo original, fue realizado por: Daniel Andrés Barahona Cárdenas, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 12 de Mayo de 2023



José Sebastián Araujo Soria

C.I: 1802672871

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia y a mis mejores amigos por ayudarme a superar cada obstáculo que se me ha presentado.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento en primer lugar a Dios por darme la vida, A mi madre Jenny Cárdenas y a mi padre Carlos Barahona por su esfuerzo y sacrificio, A mis hermanos Paulina, Carlos, Josué y Jessica por apoyarme en todo momento.

A mis mejores amigos, Horus Román, Juan Diego Pulla, Henry Narvaez, Bryan Jumbo, Luis Puma, Ángel Muentes, Pablo Corella, Liz Ortiz, Victoria Cárdenas, Michelle Guachamin, Estela Dalgo, María Fernanda Minango y Michelle Villacís por ser parte importantísima de mi vida.

A mis maestros Sebastián Araujo, Amanda Cevallos, Juan Francisco Tlapanco y Caroline Bacquet por sus enseñanzas que me servirán para toda la vida.

Y por último, a ejemplos de talla mundial cuyo esfuerzo, dedicación y constancia y arte me han inspirado en determinados momentos de mi carrera para no rendirme, como Lionel Messi, Cristiano Ronaldo, Eicchiro Oda, y Akira Toriyama, a ellos también, Gracias

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD	¡Error! Marcador no definido.
AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	¡Error! Marcador no definido.
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	
viii	
INTRODUCCIÓN.....	2
DATOS Y CÁLCULO DEL CONJUNTO DE PARÁMETROS	5
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	7
CONCLUSIONES.....	10
REFERENCIAS	12
ANEXOS: Algoritmo de programación para hallar q	13

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No.1 Eventos sísmicos medidos para la zona alrededor de Manabí influyente al terremoto de Pedernales.	6
Figura No.2 Ajuste modificado GR e histograma frecuencias-magnitud catálogo sísmico IG Manabí.....	8
Figura No.3 Evolución temporal de q desde 01-Enero-1995 hasta 01-Enero-2018 y los importantes cambios de pendiente	8
Figura No.4 Relación q vs tiempo alrededor del 16 de abril de 2016, fecha del terremoto de 7.8.....	10
Figura No.5 Ajuste GR e histograma frecuencia-magnitud réplicas terremoto de Pedernales 16-abr-2016.....	11
Figura No.6 Ajuste GR e histograma frecuencia-magnitud precursores terremoto Pedernales 16-abr-2016	11

Resumen

Este artículo presenta un estudio sobre la sismicidad de la zona de Manabí-Esmeraldas en Ecuador, utilizando el concepto de entropía propuesto por Tsallis y la mecánica estadística no extensiva. La zona de Manabí-Esmeraldas es conocida por ser una zona de alto acoplamiento sísmico, lo que implica un alto riesgo de terremotos de gran

magnitud. Debido a esto, se han llevado a cabo varios estudios previos con el objetivo de entender mejor los patrones de actividad sísmica de la zona.

En este estudio, se analizó el catálogo de sismos asociados con la zona de Manabí-Esmeraldas utilizando el cálculo del coeficiente de complejidad para la magnitud de los sismos. En particular, se encontró que el terremoto de magnitud 7.8 que tuvo lugar el 16 de abril de 2016 en la provincia de Manabí fue precedido por un incremento en el valor de q , lo cual es consistente con otros estudios previos.

Estos resultados sugieren que el concepto de entropía de Tsallis y la mecánica estadística no extensiva pueden ser útiles para entender mejor la sismicidad de la zona de Manabí-Esmeraldas y predecir futuros eventos sísmicos en la región.

Palabras clave: terremoto, Manabí, complejidad, no extensividad, entropía.

Abstract

This article presents a study on the seismicity of the Manabí-Esmeraldas zone in Ecuador, using the concept of entropy proposed by Tsallis and non-extensive statistical mechanics. The Manabí-Esmeraldas zone is known to be an area of high seismic coupling, which implies a high risk of earthquakes of large magnitudes. Due to this, several previous studies have been conducted with the aim of better understanding the seismic activity patterns of the zone.

In this study, the earthquake catalog associated with the Manabí-Esmeraldas zone was analyzed using the calculation of the complexity coefficient for the magnitude of the earthquakes. In particular, it was found that the magnitude 7.8 earthquake that occurred on April 16, 2016, in the province of Manabí, was preceded by an increase in the value of q , which is consistent with other previous studies.

These results suggest that the concept of Tsallis entropy and non-extensive statistical mechanics can be useful for better understanding the seismicity of the Manabí-Esmeraldas zone and predicting future seismic events in the region.

Keywords: earthquake, Manabí, complexity, non-extensivity, entropy.

**Análisis mediante estadística no extensiva del terremoto de Pedernales, Ecuador
2016**

Daniel Barahona¹, Sebastián Araujo¹.

Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua, Universidad Regional Amazónica Ikiam, Tena, Ecuador.

INTRODUCCIÓN

El 16 de abril del año 2016 a las 18:58 hora local se produjo un terremoto en la provincia de Manabí, Ecuador. El epicentro del sismo tuvo lugar alrededor de 27 km de las ciudades de Pedernales y Muisne y presentó una magnitud de $M_w = 7,8$. Posterior al terremoto se calcularon 661 personas fallecidas, 6274 heridos y 28.678 desplazados sin contar con el aumento de estas cifras debido a las réplicas. (Goretti et al., 2017).

El terremoto de Manabí forma parte del catálogo de sismos homogenizados el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG). Los 14474 datos del catálogo tomados desde julio de 1901 hasta noviembre de 2021 muestran la función de potencia entre la frecuencia y la magnitud según la ley Gutenberg-Richter (GR). Esta ley, que se muestra a continuación, permite calcular la probabilidad de amenaza sísmica y la relación frecuencia magnitud de acuerdo con (Stein & Wysession, 2009).

$$\log N(> m) = a - bm \quad (1)$$

En esta relación N significa el número de sismos con magnitud mayor que m , y a y b son constantes empíricas positivas específicas, que varían dependiendo de cada región (da Silva, 2021).

Sin embargo, esta ley únicamente toma en cuenta la frecuencia de los sismos y la magnitud de momento sísmico obtenida de los equipos de medición, más no el mecanismo físico que genera los terremotos. El modelo de interacción fragmento aspereza planteado por (Sotolongo-Costa & Posadas, 2004) modifica esta ley al

considerar el movimiento de los bloques que conforman la falla y las asperezas presentes entre los bloques como un sistema complejo (Araujo, 2017). Este tipo de sistemas se caracterizan por presentar correlaciones de largo rango tanto en el espacio como en el tiempo, procesos no Markovianos, es decir que tienen memoria a largo plazo, ruidos aditivos y multiplicativos en sus ecuaciones mesoscópicas tipo Langevin, caos débil con exponentes de Lyapunov que tienden a cero, geometría multifractal, largo rango de interacción en sistemas de muchos cuerpos, ecuaciones mesoscópicas de Fokker-Planck no lineales y/o no homogéneas. (Araujo, 2018, 2019). Debido a esto la introducción de la mecánica estadística no extensiva se muestra como una solución ad hoc para brindar un sustento teórico a la ley GR.

De acuerdo con el formalismo no extensivo, se sustituye la entropía de Boltzmann por la entropía no aditiva S_q propuesta por Tsallis en (Tsallis, 2009) dada por

$$S_q = k \sum_{i=1}^W p_i \ln_q \frac{1}{p_i} \quad (2)$$

Donde W es el número total de configuraciones, p en este caso es la probabilidad de encontrar un fragmento de superficie relativa σ , y k es la constante de Boltzmann. La función \ln_q denominada logaritmo q , introducida en la entropía no aditiva, es una modificación de la función logaritmo de base 10 en la que el valor de q modifica la curva de la función logaritmo, y determina la forma de la distribución de probabilidad subyacente. La entropía de Tsallis ha sido utilizada en diversos campos para describir sistemas complejos y ha mostrado ser una herramienta útil en el análisis de datos de sismicidad y predicción de terremotos (Tsallis, 2009). A continuación se presenta la función $\ln_q(x)$

$$\ln_q x = \frac{x^{1-q} - 1}{1 - q} \quad (3)$$

La entropía de Tsallis es una generalización de la entropía de Boltzmann “ S ” (Vallianatos et al., 2016) para casos en los que $q=1$

$$S = -k \sum_{i=1}^W p_i \ln p_i \quad (4)$$

A partir de la entropía de Tsallis en su forma continua representada por

$$S_q = k \frac{1 - \int p^q(\sigma) d\sigma}{q - 1} \quad (5)$$

Se obtiene la función de distribución de probabilidad utilizando el principio de máxima entropía sujeta a 2 restricciones (Stolongo-Costa & Posadas, 2004). La primera restricción corresponde a la normalización de la función de probabilidad expresada mediante:

$$\int_0^{\infty} p(\sigma) d\sigma = 1 \quad (6)$$

En la que $P(\sigma)$ representa la función de probabilidad y la suma continua de las probabilidades de todos los micro estados es igual a 1. La segunda restricción se relaciona con el valor medio- q de la función de probabilidad, representado de forma continua mediante

$$\int_0^{\infty} \sigma p^q(\sigma) d\sigma = \langle\langle \sigma \rangle\rangle_q \quad (7)$$

En este caso se observa una modificación al valor medio para casos en los que q es diferente de 1. Tomando en cuenta la proporcionalidad entre la energía sísmica liberada y la magnitud del momento sísmico se obtiene una versión modificada para la ley GR en la que también se presenta el parámetro q

$$\log (N(> m)) = \log N + \left(\frac{2-q}{1-q} \right) \log \left[1 + a(q-1) (2-q)^{\frac{1-q}{q-2}} 10^{2m} \right] \quad (8)$$

El mecanismo físico de la generación de terremotos aún no ha sido desarrollado por completo por lo que aún no es posible hacer predicciones certeras (Vllianatos et al., 2016). El parámetro de complejidad q obtenido a partir del modelo fragmento aspereza aplicado al estudio de terremotos representa una medida de complejidad y estabilidad sísmica (Posadas & Sotolongo-Costa, 2023), y ha sido calculado para algunas regiones sísmicas. El catálogo de Ecuador presenta un valor de $q=1.74$ para sismos de profundidad intermedia, $q=1.72$ para los sismos superficiales y $q=1.71$ para la totalidad del catálogo de sismos del Ecuador (Araujo, 2017), para el catálogo de sismos de Panamá $q=1.69$ (Samudio et al., 2015). Para el catálogo sísmico de Japón se realizó una evaluación de la evolución temporal de este parámetro en fechas cercanas al terremoto de Kobe de 1995 y se interpretó el valor de q como un indicador de estabilidad de esta zona (Papadakis et al., 2015).

El modelo fragmento aspereza se aplica con éxito al catálogo sísmico del Ecuador debido a la deformación crustal por la subducción oblicua de la placa de Nazca debajo de la placa continental Sudamericana, con una velocidad aproximada de 58 mm/yr. La dinámica entre las 2 placas produce sismos de subducción y terremotos crustales de gran magnitud, mayores a 5 (Gailler et al., 2007).

En este estudio se examina el posible cambio del parámetro q en relación al tiempo para los precursores y réplicas del terremoto de Pedernales, y si existen cambios abruptos al presentarse sismos de gran magnitud $m \sim 7$. El análisis se lleva a cabo para los períodos anterior y posterior al terremoto del 16 de abril de 2016, sin embargo, para el cálculo se utiliza el catálogo sísmico total del Ecuador 1901-2021 delimitado para la zona de influencia cercana a la provincia de Manabí.

DATOS Y CÁLCULO DEL CONJUNTO DE PARÁMETROS

Los datos empleados para este estudio corresponden al subconjunto del catálogo de sismos correspondiente a la zona de mayor influencia para el terremoto de Manabí. El análisis se realiza para 3609 sismos crustales superficiales de profundidad máxima de 75 km. La ubicación de este enjambre de sismos se encuentra entre latitud máxima de 1.25, latitud mínima -1.5, longitud máxima -79.25 y longitud mínima de -82.0, de acuerdo a la ruptura de un segmento de 100 km y deslizamiento sísmico expuesto en (Nocquet et al., 2017)

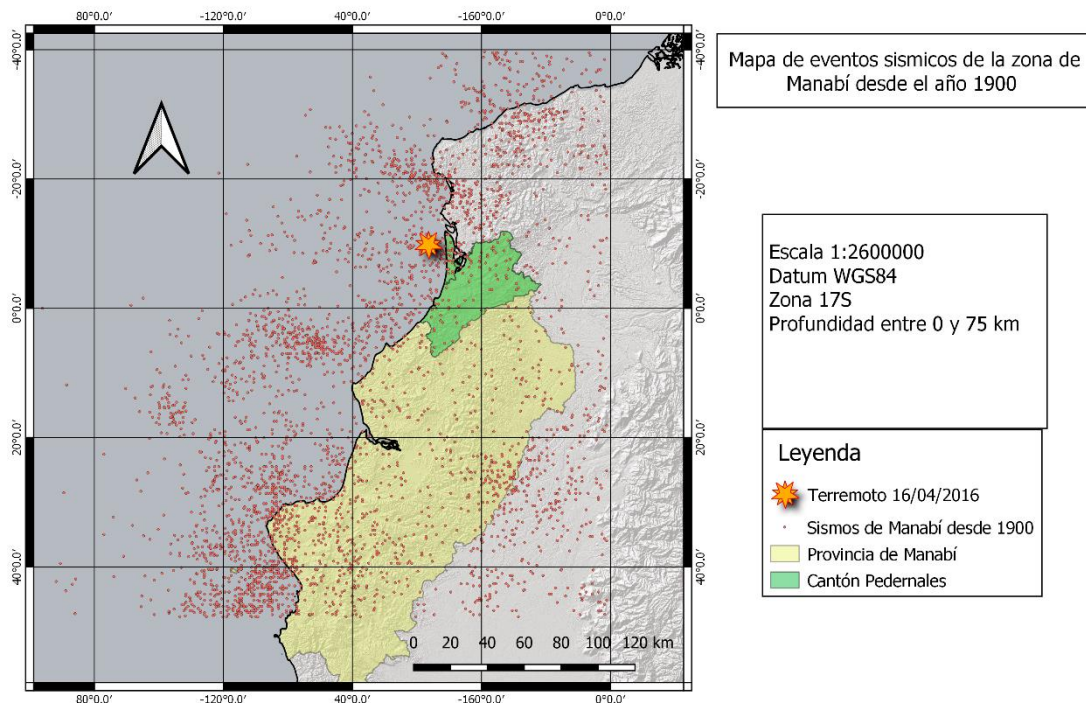


Figura No.1: Eventos sísmicos medidos para la zona alrededor de Manabí influyente al terremoto de Pedernales.

Elaborado por: Daniel Barahona

El parámetro q se obtiene a partir de la ecuación (8) mediante la resolución del problema inverso por mínimos cuadrados no lineales desde una perspectiva Bayesiana, esto es para casos en los que se obtiene información sobre los valores de algunas cantidades medidas, y se busca emplear una relación teórica para obtener información sobre los valores del conjunto de parámetros (Tarantola & Valette, 1982).

El problema inverso $d = g(p)$, donde d son los datos medidos y p es un vector que contiene los parámetros se resuelve a través de la convergencia del siguiente algoritmo

$$\hat{p}_{k+1} = p_0 + C_{p_0 p_0} G_k^T (C_{d_0 d_0} + G_k C_{p_0 p_0} G_k^T)^{-1} [d_0 - g(\hat{p}_k) + G_k (\hat{p}_k - p_0)] \quad (9)$$

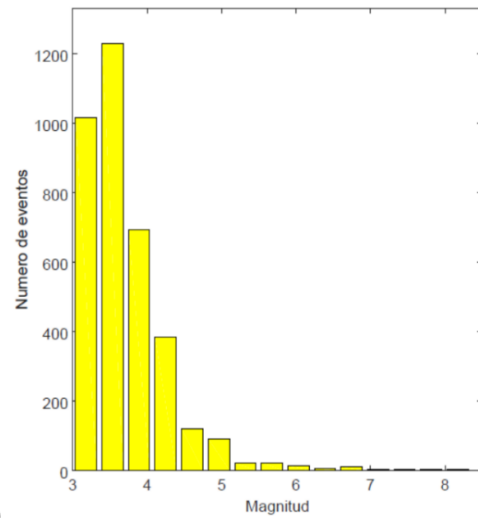
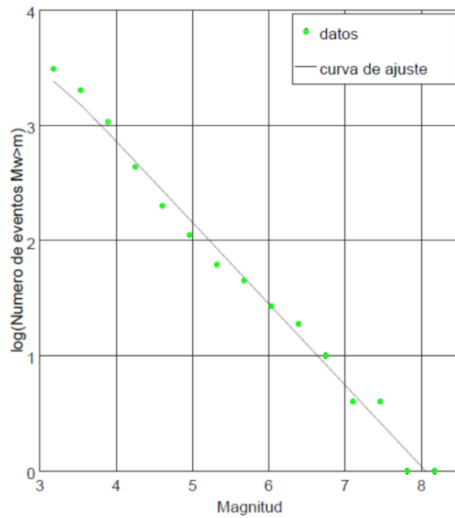
En donde $C_{p_0p_0}$ y $C_{d_0d_0}$ son matrices de covarianza, G es la matriz de derivadas parciales y G^T es su matriz transpuesta.

$$G^{i\alpha} = \frac{\partial g^i}{\partial p^\alpha} \quad (10)$$

La depuración del catálogo sísmico se realizó mediante un programa elaborado en lenguaje Fortran y la resolución del problema inverso se modeló a través de Matlab. Para obtener la evolución temporal del parámetro se calculó q para cada mes tomando todas las magnitudes previas y se sigue la secuencia hasta culminar el catálogo. Por último, también se obtuvo el ajuste con la relación Gutenberg Richter modificada y el histograma de frecuencia-magnitud para el conjunto de datos correspondientes a la zona delimitada de Manabí.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvo el ajuste de la magnitud vs el logaritmo del número de eventos y el histograma de frecuencia magnitud utilizando la ecuación (8) para todo el catálogo de la provincia de Manabí desde el año 1900. Analizando el catálogo total se observa un rango amplio de los eventos sísmicos, con una mayor presencia de los sismos de menor magnitud $M < 4$.



a)

b)

Figura No.2a Ajuste modificado GR catálogo sísmico IG Manabí.

Figura No.2b Histograma frecuencias-magnitud modificado catálogo sísmico IG Manabí.

El valor de q obtenido para la sección del catálogo total correspondiente a Manabí es $q=1.71$. El valor de q calculado sobre los precursores, 2674 datos de magnitud de momento sísmico, es decir, desde el primer dato tomado el 31 de enero de 1906 hasta el terremoto de Manabí es $q=1.7584$. Por otro lado, para las réplicas, 935 datos posteriores al terremoto del 16 de abril, se tiene un valor de $q=1.687$. También se obtuvo el ajuste GR modificado para los precursores y las réplicas y las gráficas frecuencia vs magnitud.

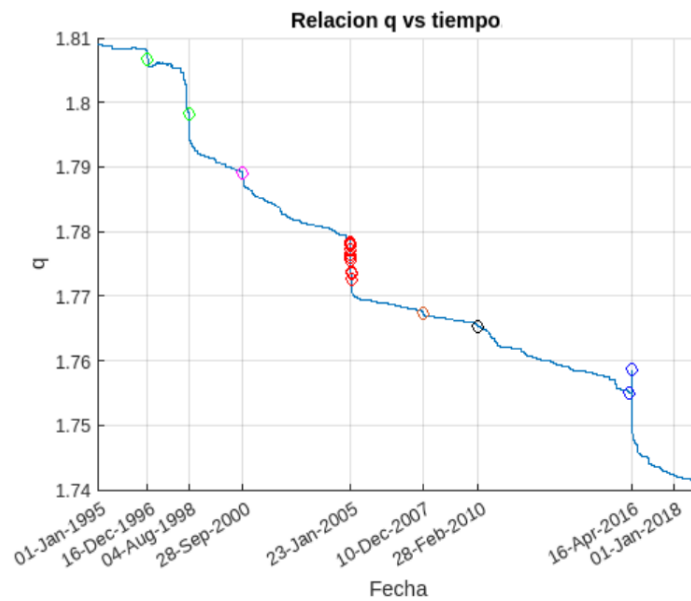


Figura No.3 Evolución temporal de q desde 01-Enero-1995 hasta 01-Enero-2018 y los importantes cambios de pendiente.

Tomando un intervalo de día a día de forma acumulativa para el cálculo de cada valor de q Figura (3) Se observan 3 cambios de pendiente importantes, uno en el 2016 correspondiente a la fecha del terremoto, otro cambio menor cercano al año 2010, y otro en el año 2005. Los cambios de pendiente se toman desde el año 1995 debido a insuficiencia de datos previos a esta fecha no permite la realización del estudio estadístico. Los datos digitales de la red nacional de sismos del instituto geofísico (RENSIG) comienzan en el año 1988, pero la cantidad de datos comienza a ser significativa desde el año 1995. Aun así, para el cálculo del parámetro q se toma todos los datos previos desde el año 1900.

En la Figura (3) se observa un cambio de pendiente el 16 de diciembre de 1996 asociado a un sismo de magnitud 5.5 mar adentro, cerca de la orilla entre los cantones Jama y Sucre, provincia de Manabí longitud: -80.80, latitud: -0.12, otro cambio se produce el 4 de agosto de 1998 debido a un sismo de magnitud de 7.1 en las coordenadas longitud: -80.66, latitud: -0.49, se muestra también un cambio de pendiente el 28 de septiembre del 2000 por un sismo de 6.4. En enero del 2005 se presenta un cambio de pendiente aún más pronunciado que coincide con un enjambre de sismos de magnitudes entre 5 y 6 cerca de las costas de los cantones Montecristi, Manta, Jipijapa y Puerto López en la provincia de Manabí. El 10 de diciembre del 2007 hay un cambio de pendiente correspondiente a un sismo de magnitud de 5.1, y el 28 de febrero de 2010 se muestra un ligero cambio de pendiente en relación a un sismo de magnitud de 5.2. El momento más significativo corresponde al terremoto del 16 de abril de 2016 que muestra un incremento del valor de q asociado al mismo terremoto Figura (4) Este incremento representa una recarga del sistema y un aumento instantáneo de complejidad, sin embargo, luego de este sismo el valor de q continúa descendiendo.

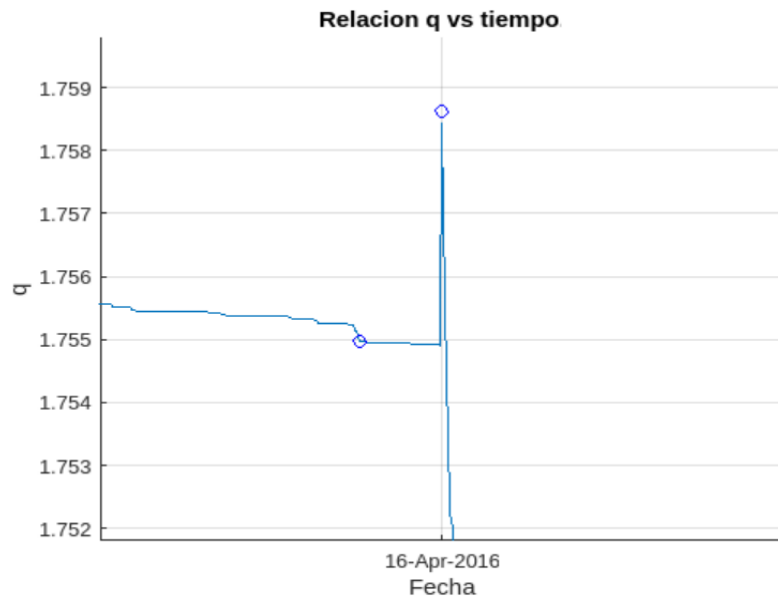
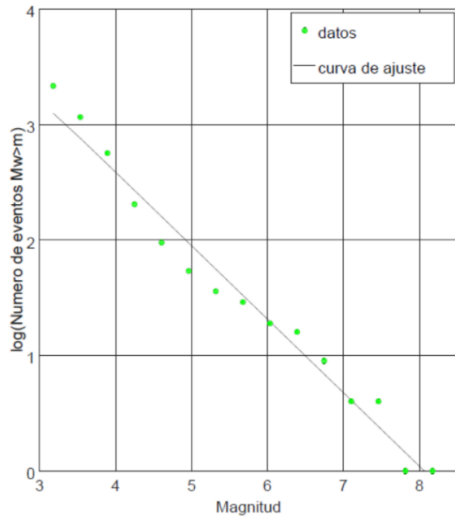
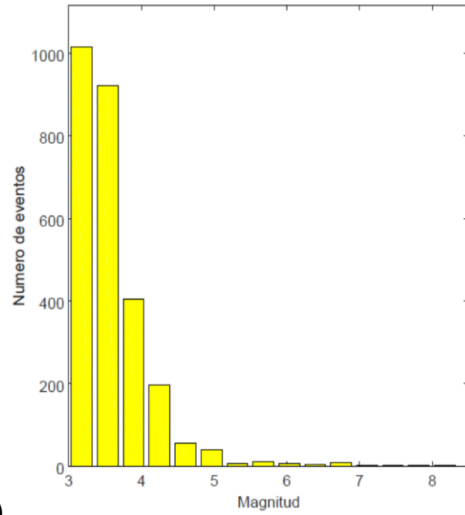


Figura No.4 Relación q vs tiempo alrededor del 16 de abril de 2016, fecha del terremoto de 7.8

Esto coincide con los datos del terremoto de Kobe de 1995 analizados en (Papadakis et al., 2015) y los datos sísmicos del terremoto de L'Aquila estudiados en (Telesca, 2010).



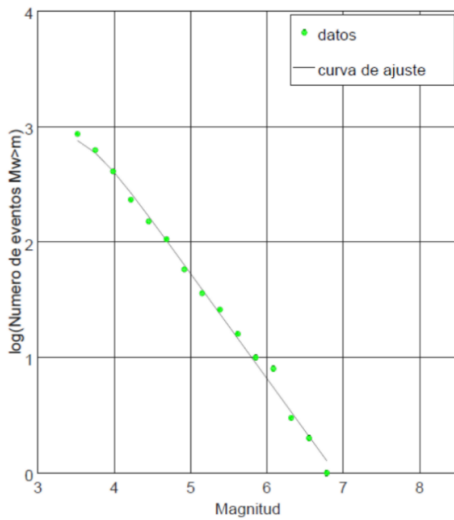
a)



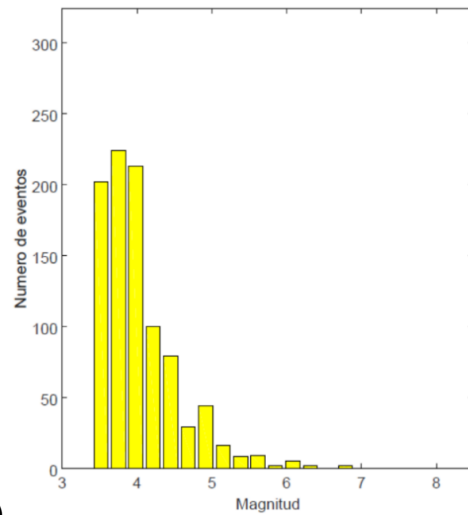
b)

Figura No.5a Ajuste GR réplicas terremoto de Pedernales 16-abr-2016.

Figura No.5b Histograma frecuencia-magnitud réplicas Pedernales 16-abr-2016.



a)



b)

Figura No.6a: Ajuste GR precursores terremoto Pedernales 16-abr-2016.

Figura No.6b Histograma frecuencia-magnitud precursores Pedernales 16-abr-2016

Las figuras 5a, 5b, 6a y 6b muestran la relación frecuencia magnitud y el ajuste utilizando la ecuación (8) para los sismos previos y posteriores al terremoto de Pedernales. Se observa una disminución del rango de eventos de antes a después del terremoto del 16 de abril, esto coincide con la disminución de q que representaría una descomplejización del sistema. El valor de q en la Figura (3) decrece debido al aumento de estabilidad sísmica que gana el sistema, sin embargo el valor de q aún sigue siendo relativamente elevado en comparación con los estudios de *Papadakis et al. (2015)* donde q inicia con un valor de 1.46 aproximadamente previo y posterior al terremoto y 1.55 durante el evento sísmico, y (*Telesca, 2010*) el cual es 1.48 previo al terremoto de L'Aquila, alcanza un pico de 1.74 durante el sismo y luego desciende al valor de 1.69.

CONCLUSIONES

El valor de q para el catálogo total de Manabí fue de $q=1.71$, mientras que para los precursores y réplicas fue de $q=1.75$ y $q=1.68$, respectivamente. Además, se encontró que los cambios en el valor de q a lo largo de los años presentan una relación con los eventos sísmicos y las magnitudes.

Es importante destacar que un cambio importante de pendiente se presenta asociado a la ocurrencia de un sismo de gran magnitud $M>5$, en el caso de Manabí este cambio ocurrió durante el terremoto de Pedernales del 16 de abril de 2016. Asimismo, se observó que la evolución temporal de q presenta una similitud con la evolución estudiada para otros catálogos sísmicos. Por otro lado, la disminución del valor de q a lo largo del tiempo implica una reducción en la complejidad del sistema.

Este estudio proporciona una nueva perspectiva para analizar la sismicidad de la zona de Manabí-Esmeraldas y su relación con el valor de q . Los hallazgos sugieren que los cambios en el valor de q pueden ser útiles a fin de pronosticar futuros eventos sísmicos en la región. Se recomienda recolectar una mayor cantidad de datos con el fin de obtener un monitoreo más preciso del cambio de q en escala de horas.

REFERENCIAS

- Araujo, S. (2019). Teoría básica y aplicaciones de las propiedades emergentes de la sociedad como un sistema complejo. *Momento*, (59), 11-20. <https://doi.org/10.15446/mo.n59.73556>
- Araujo, S. (2018). Las propiedades emergentes de la sociedad como un sistema complejo. *RECIAMUC*, 2(2), Art. 2. <https://doi.org/10.26820/reciamuc/2.2.2018.391-401>

- Araujo, S. (2017). Cálculo del parámetro de no extensividad en el modelo de interacción fragmento-aspereza para los sismos del Ecuador mediante un método Bayesiano. *Revista Cubana De Física*, 34(2), 112-115.
- da Silva, S. L. E. F. (2021). κ -generalised Gutenberg–Richter law and the self-similarity of earthquakes. *Chaos, Solitons & Fractals*, 143, 110622. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110622>
- Gailler, A., Charvis, P., & Flueh, E. R. (2007). Segmentation of the Nazca and South American plates along the Ecuador subduction zone from wide angle seismic profiles. *Earth and Planetary Science Letters*, 260(3-4), 444-464. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.045>
- Goretti, A., Molina Hutt, C., & Hedelund, L. (2017). Post-earthquake safety evaluation of buildings in Portoviejo, Manabí province, following the Mw7.8 Ecuador earthquake of April 16, 2016. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24, 271-283. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.06.011>
- Nocquet, J.-M., Jarrin, P., Vallée, M., Mothes, P. A., Grandin, R., Rolandone, F., Delouis, B., Yepes, H., Font, Y., Fuentes, D., Régnier, M., Laurendeau, A., Cisneros, D., Hernandez, S., Sladen, A., Singaicho, J.-C., Mora, H., Gomez, J., Montes, L., & Charvis, P. (2017). Supercycle at the Ecuadorian subduction zone revealed after the 2016 Pedernales earthquake. *Nature Geoscience*, 10(2), 145-149. <https://doi.org/10.1038/ngeo2864>
- Papadakis, G., Vallianatos, F., & Sammonds, P. (2015). A Nonextensive Statistical Physics Analysis of the 1995 Kobe, Japan Earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 172(7), 1923-1931. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0876-x>
- Posadas, A., & Sotolongo-Costa, O. (2023). Non-extensive entropy and fragment–asperity interaction model for earthquakes. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 117, 106906. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2022.106906>
- Samudio, D., Weigandt, P., Toral B, J., & Sotolongo-Costa, O. (2015). No extensividad en catálogos sísmicos de Panamá. *Nova scientia*, 7(13), 149-169.
- Sotolongo-Costa, O., & Posadas, A. (2004). Fragment-asperity interaction model for earthquakes. *Physical Review Letters*, 92(4), 048501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.048501>
- Stein, S., & Wysession, M. (2009). *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. John Wiley & Sons.
- Tarantola, A., & Valette, B. (1982). Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion. *Reviews of Geophysics*, 20(2), 219. <https://doi.org/10.1029/RG020i002p00219>
- Telesca, L. (2010). A non-extensive approach in investigating the seismicity of L'Aquila area (central Italy), struck by the 6 April 2009 earthquake (ML = 5.8). *Terra Nova*, 22(2), 87-93. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00920.x>
- Tsallis, C. (2009, marzo 11). *Introduction to Nonextensive Statistical Mechanics: Approaching a Complex World*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Introduction-to-Nonextensive-Statistical-Mechanics%3A-Tsallis/d68ff1226018b9ca1c1a0d16672fe951dede95d9>
- Vallianatos, F., Papadakis, G., & Michas, G. (2016). Generalized statistical mechanics approaches to earthquakes and tectonics. *Proceedings. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 472(2196), 20160497. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0497>

Anexo

A continuación, se presenta el código utilizado para calcular el valor de q utilizando el concepto de entropía de Tsallis y la mecánica estadística no extensiva para analizar la sismicidad de la zona de Manabí-Esmeraldas en este estudio. Este código fue utilizado para procesar los datos de magnitud sísmica y calcular los valores de q utilizados en el análisis estadístico:

```
% Esta es una función llamada "qcomp" para calcular la entropía de Tsallis, La función toma un vector de magnitudes como entrada
```

```
function q=qcomp(mag)
```

```
% Se define el número de eventos en el catálogo sísmico
```

```
N=length(mag);
```

```
% Se define el vector de marcas de clase m
```

```
R=max(mag)-min(mag);
```

```
k=15;
```

```
l=R/k;
```

```
m=zeros(k,1);
```

```
% Se establecen las marcas de clase de manera equidistante
```

```
for i=1:k
```

```
    m(i)=min(mag)+i*l-l/2;
```

```
end
```

```
% Cálculo del número de eventos para cada marca de clase
```

```
gr=zeros(length(m),1);
```

```
for i=1:length(m)
```

```
    n=find(mag>=m(i));
```

```
    gr(i)=length(n);
```

```
end
```

```
% Transformación logarítmica y normalización de los datos
```

```
grn=log10(gr);
```

```

% Cálculo de la entropía de Tsallis

loge=log10(exp(1));

qo=1.6;

ao=3e-6;

d=grn;

le=length(d);

Cv=[100 0;0 100];

Cd=0.01*eye(le,le);

vo=[qo ao]';

v=vo;

for k=1:10

q=v(1);

a=v(2);

qdos=(2-q)^((1-q)/(q-2));

paren=(1+a*(q-1)*qdos*10.^(2*m));

gvk=log10(N)+((2-q)/(1-q))*log10(paren);

qcinc=(2-q)^((5-3*q)/(q-2));

G1=(1-q)^(-2)*log10(paren)+...

((2-q)/(1-q))*(loge*a*10.^(2*m))*(qdos+(q-1)*(1-q+log(2-q)))*qcinc)./paren;

G2=(-loge*10.^(2*m)*(2-q)^(1/(2-q)))./paren;

G=[G1 G2];

% Iteración para encontrar el mínimo de la función objetivo

v=v+(G'*Cd^-1*G+Cv^-1)^-1*(G'*Cd^-1*(d-gvk)-Cv^-1*(v-vo));

end

% Cálculo de la covarianza a posteriori y de la desviación estándar

Cv=(G'*Cd^-1*G+Cv^-1)^-1;

```

```
sig_q=(Cv(1))^0.5;
```

```
sig_a=(Cv(4))^0.5;
```

```
% Cálculo del valor final de la entropía de Tsallis
```

```
q=v(1);
```

```
a=v(2);
```

```
end
```