



Análisis entrópico y fractal de la distribución espacial de la sismicidad en un sector de Cuba occidental y su relación con el régimen tectónico de la Falla Pinar

Marcos Enrique Pazo-Arango ^{a b}

^a Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Pinar Río, Pinar del Río, Cuba.

^b Dpto. de Geoprocесamiento y Tectónica, Instituto de Geología y Paleontología, La Habana, Cuba. arango@igp.minem.cu, marcospazo7731@gmail.com

Recibido: 9 de febrero 2024. Recibido en formato revisado: 16 de mayo 2024. Aceptado: 16 de mayo 2024.

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es la caracterización de la actividad sísmica vinculada a la Falla Pinar en la región de Cuba Occidental, mediante el empleo de métodos matemáticos que permitan caracterizar y/o cuantificar la relación espacio–tiempo en dicha serie sísmica. A la par de este análisis se realiza una interpretación y correlación de los resultados obtenidos con los derivados de investigaciones anteriores. Para dar solución al problema de este trabajo se determinan cuatro parámetros fundamentales mediante la aplicación de métodos matemático–estadísticos: la entropía de Poisson, la estimación de las dimensiones generalizadas D_q , el valor b_m de la relación Gutenberg–Richter y el exponente de Hurst. La integración de los criterios que ofrecen estos parámetros contribuye a la interpretación de la neotectónica de la región desde el punto de vista sísmico y permite a su vez la creación de registros sísmicos más completos que los actuales. Entre los principales resultados obtenidos está la demostración de que la serie sísmica de la región cumple con la hipótesis de Hurst, donde la mayoría de los fenómenos naturales se comportan como tendencias estadísticas con ruido estocástico y no como caminatas aleatorias. Esto facilita la relación entre los resultados de la investigación y los fenómenos recientes que rigen la neotectónica en el área.

Palabras claves: fractal; dimensión fractal; dimensión de capacidad; dimensión de información; dimensión de correlación; exponente de Hurst; relación Gutenberg – Richter.

Entropic and fractal analysis of the spatial distribution of seismicity in a sector of western Cuba and its relationship with the tectonic regime of the Pinar Fault

Abstract

The main objective of this work is the characterization of the seismic activity linked to the Pinar Fault in the region of Western Cuba, through the use of mathematical methods that allow characterizing and/or quantifying the space-time relationship in said seismic series. Along with this analysis, an interpretation and correlation of the results obtained with those derived from previous research is carried out. To solve the problem of this work, four fundamental parameters are determined through the application of mathematical-statistical methods: the Poisson entropy, the estimation of the generalized dimensions D_q , the b value of the Gutenberg–Richter relationship and the Hurst exponent. The integration of the criteria offered by these parameters contributes to the interpretation of the neotectonics of the region from a seismic point of view and in turn allows the creation of more complete seismic records than the current ones. Among the main results obtained is the demonstration that the seismic series of the region complies with Hurst's hypothesis, where most natural phenomena behave as statistical trends with stochastic noise and not as random walks. This facilitates the relationship between the research results and the recent phenomena that govern neotectonics in the area.

Keywords: fractal; fractal dimension; capacity dimension; information dimension; correlation dimension; Hurst exponent; Gutenberg – Richter relationship.

1 Introducción

En la región de Cuba Occidental se encuentra la dislocación tectónica activa: “Falla Pinar”. Esta divide a la región en dos partes distinguidas por una marcada diferencia entre sus relieves. La estructura no posee un comportamiento lineal y homogéneo, por el contrario; muestra variaciones en cuanto a su rumbo, que han llevado a varios investigadores a

subdividirla en tramos para estudios más detallados. La zona de la Falla Pinar posee una clara expresión topográfica producto del ascenso de las secuencias al norte de la falla con respecto a las del sur, y esto a su vez, es la expresión de una componente normal extensiva en sus movimientos [9].

Un marcado cambio en rumbo de la estructura en las inmediaciones de la localidad de San Cristóbal / Artemisa, hace que en dicha área exista una mayor concentración de

How to cite: Pazo-Arango, M.E., (2024). Análisis entrópico y fractal de la distribución espacial de la sismicidad en un sector de Cuba occidental y su relación con el régimen tectónico de la Falla Pinar. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 55, pp. 74 - 84. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n55.112800>

esfuerzos que se refleja como actividad sísmica; principalmente sobre los sedimentos y secuencias del cuaternario ubicadas en la cuenca Los Palacios, hacia el sur de la Falla Pinar. Esta actividad constituye un reflejo de la cinemática de la estructura mediante un complejo sistemas de dislocaciones, grietas y vetillas interconectadas [4] sobre las que descansan las secuencias pertenecientes a la cuenca Los Palacios. En el año 1880, producto de la creciente acumulación de esfuerzos, se registró el sismo de mayor magnitud ocurrido hasta la fecha en Cuba Occidental, con un valor de 6.1 grados en la escala de Richter [7]. Sin embargo, el comportamiento de la sismicidad posterior al evento de 1880 no ha sido estudiado mediante métodos que relacionen evolución espacial, densidad de ocurrencia y tiempo. Dicha actividad sísmica muestra correspondencia con la traza del Sistema Falla Pinar y no se le han dedicado trabajos en aras de interpretar y descifrar su naturaleza. La sismicidad se comporta con valores promedios entre los 1.5 grados y 2 grados de magnitud según la escala de Richter, constituyendo una actividad tectónica de fondo y de baja energía característica de los sistemas de intraplacas [9,17].

Los escasos pronósticos sísmicos del área [10] están basados en la utilización de histogramas de períodos de retorno estadístico y conforme el tiempo; el grado de incertidumbre en los mismos se ha incrementado producto a la limitante de no incluir entre sus variables la evolución de la relación espacio–tiempo. Esta limitante trae como consecuencia que los trabajos existentes [10] no puedan seguir el paso del complejo y creciente historial cinemático que continúa experimentando la Falla Pinar.

Con el fin de tener datos que permitan la toma de decisiones anticipadas antes de la ocurrencia de eventos poco predecibles (sismos de elevada magnitud) y de relacionar el comportamiento sísmico de la Falla Pinar con los procesos neotectónicos de la región, se decide: caracterizar la actividad sísmica mediante el empleo de métodos que integren las variables: evolución espacial, densidad de ocurrencia en el espacio, variación de la densidad de ocurrencia en el tiempo y la persistencia en el tiempo de las anteriores variables.

La primera medida utilizada para caracterizar el nivel de agrupamiento en secuencias sísmicas es la entropía de Shannon [18,19], y la aplicación de su variante: Entropía de Poisson [8]. Este método permite estudiar las propiedades estadísticas de los sismos como la no uniformidad, y como el nivel de agrupación está estrechamente relacionado con la acumulación de esfuerzos en la corteza terrestre, se pueden obtener datos que caractericen y contribuyan a la interpretación de la expresión sísmica de la Falla Pinar y permitan la creación de pronósticos sísmicos complejos con menor grado de incertidumbre que los actuales.

La segunda medida utilizada para evaluar la relación espacio–tiempo de la serie sísmica está basada en los conceptos de la fractalidad, especialmente en la estimación del espectro de dimensiones generalizadas D_q . Este método permite cuantificar el nivel de regularidad dentro del “comportamiento caótico” de los fractales naturales, y los resultados obtenidos han mostrado ser capaces de caracterizar variables difíciles para la matemática euclíadiana. Para dar mayor peso a estos resultados, se estima la variación del valor b de la relación Gutenberg–Richter, variable aceptada internacionalmente como un precursor sísmico.

En la mayoría de los trabajos dedicados a los pronósticos sísmicos [2,3,13,14,16,20] y/o interpretación de series sísmicas, se suele hacer uso de estos precursores sísmicos de manera independiente, obteniéndose en la mayoría de los

casos resultados pocos satisfactorios y con elevados grados de incertidumbre. Es por esta razón que en este trabajo se analiza la actividad sísmica relacionada con la Falla Pinar mediante la interpretación de tres variables. Estos resultados se comparan con investigaciones existentes y se demuestra su persistencia en el tiempo, así como su influencia en los eventos futuros mediante la aplicación del análisis basado en el exponente de Hurst.

2 Marco Geológico

2.1 Geología regional y del área de estudio

En el plano estructural actual de la Isla y en las regiones colindantes se determinan claramente grandes estructuras anticlinales y sinclinales complejas y también grandes dislocaciones disyuntivas. El contorno actual de la Isla está más o menos condicionado al rumbo general de las estructuras que, en plano, forman un arco relativamente suave, convexo hacia el Norte. Quedan comprendidas dentro del polígono de estudio las estructuras siguientes: Anticlinorio Pinar de Río, Sinclinorio San Diego de los Baños, Sinclinorio Bahía Honda y las anticlinorias: Anticlinorio Habana–Matanzas y Anticlinorio Madruga separadas por el Sinclinorio Almendares–San Juan [11].

El área de estudio ocupa gran parte de la Región Occidental de Cuba. Esta área cubre un segmento del orógeno cubano formado por la colisión entre el Arco Volcánico formado durante el Cretácico (AVK), perteneciente a la placa Caribe y el Paleomargen continental de América del Norte (PMAN), que ocurrió entre el Eoceno temprano y el Eoceno medio [9]. El área incluye al frente montañoso de la Falla Pinar; separando esta última al área en dos grandes estructuras geomorfológicas: Los terrenos de la Cordillera de Guaniguanico al norte y los terrenos de la cuenca Los Palacios al sur, y otras subcuenca de ríos cortadas por la Falla Pinar. Estos terrenos se encuentran dentro de la mega estructura Anticlinorio Pinar de Río.

En las montañas de la cordillera de Guaniguanico afloran las secuencias mesozoicas del margen continental y en ellas se distinguen las unidades: Alturas de Pizarras del Sur, Sierra de los órganos, Sierra de Rosario–Alturas de Pizarras del Norte–Esperanza y el Cinturón Cangre [6]. Estas unidades se caracterizan por diferente estratigrafía y tectónica, y se encuentran separadas por grandes fallas regionales [9]. Las secuencias del margen continental yacen por debajo del cabalgamiento formado por rocas de AVK y del Cinturón Ofiolítico Septentrional (Secuencias de la Unidad Bahía Honda). La parte norte del área se caracteriza por una compleja evolución tectónica, cuyo rasgo más notable es la presencia de nappes o cabalgamientos [12].

En el margen meridional de la cordillera y en contacto con la Falla Pinar; se encuentra la Faja Cangre, que constituye una zona de metamorfismo de altas presiones y puede ser considerada la equivalencia metamórfica del paleomargen [9]. Ya en el sur, las rocas del paleomargen entran en contacto con las rocas de la cuenca Los Palacios mediante la Falla Pinar. La cuenca está activa desde comienzos del Eoceno [12] y en ella afloran sedimentos sinorogénicos y postorogénicos. Estos últimos se individualizan en 3 tres secuencias de diferente edad, contraste y composición litológica. De modo general, esta parte del área se caracteriza por una tectónica de menor complejidad con un predominio de estructuras disyuntivas subverticales que inciden sobre los movimientos neotectónicos diferenciados.

Hacia el noreste de área afloran las rocas del Cinturón Ofiolítico Septentrional, ellas tienen distintas maneras de presentarse en superficie: como fajas estrechas muy deformadas asociadas a zonas de fallas, o bien como mantos tectónicos de diversa potencia. Las fajas estrechas se conocen bien a lo largo de la Falla Pinar. Para el caso de los matos tectónicos, en el área; estos se caracterizan por presentar un intenso grado de desmembramiento y mezcla con otras unidades geológicas (como en Bahía Honda y La Habana) [1,9].

Las rocas del alóctono Bahía Honda se componen de una sección potente de basaltos con hialoclastitas del Albiano-Cenomaniano (muy semejantes a las que afloran en la faja Felicidades) cubiertas concordantemente por tuítas, tobas litoclásticas y basaltos del Turoniano al Campaniano, cuyo origen en condiciones de retroarco se ha fundamentado convincentemente mediante geoquímica, mineralogía, estratigrafía y geología regional [15]. Este tipo de secuencias tectono-estratigráficas se extienden también hacia La Habana y es característico de estas la imbricación de vulcanitas de arco y ofiolitas en los cortes, la ausencia de plutones de arco entre sus límites, el carácter fuertemente sedimentario (tobas marinas, tuítas, silicitas, areniscas tobáceas, clastitas y carbonatos) de las secuencias de arco, la composición química y mineralógica típicas de retroarco de estas rocas, y la presencia de sills de basaltos oceánicos [1].

2.2 Estratigrafía

Actualmente la isla de Cuba se encuentra dispuesta en varias fajas que forman parte de un cinturón mayor, el “Cinturón Plegado y Sobre corrido Cubano”. Esta disposición no es solo el resultado de una tectónica compresiva que condicionó la yuxtaposición y sobre corridos de varios conjuntos patogénicos formados en diferentes dominios paleogeográficos. Esta disposición actual de la isla solo representa una etapa reciente de una evolución geológica más compleja del entorno Caribe-Norteamericano. Se reconocen varias unidades tectono estratigráficas, constituidas por conjuntos de rocas con estratigrafía distintiva y separadas por un sistema de fallas de carácter local y regional [1].

2.2.1 Provincias Pinar del Río y Artemisa

Estas provincias poseen una geología compleja que aumenta su grado a medida que caminamos hacia la parte norte del área de estudio. Al norte se disponen secuencias características de un margen continental, en tanto que al sur de estos se sitúan diferentes terrenos tectonoestratigráficos. Los mayores afloramientos de los cortes de margen continental se localizan en la Cordillera de Guaniguanico, en Cuba occidental, ocupando la mayor parte del área de estudio donde cuatro tipos diferentes de columnas están presentes: Sierra del Rosario-Esperanza-Alturas de Pizarras, Sierra de los Órganos, Pan de Guajaibón y Cinturón Cangre [6]. Las secuencias más jóvenes en Guaniguanico, comenzando por el Oxfordiano, son cortes mayormente carbonatados, en tanto que los sedimentos jurásicos más antiguos son deltaicos o continentales [6]. Los cortes comienzan con una secuencia terrígena del Jurásico, pre Oxfordiano Superior (formaciones San Cayetano y Arroyo Cangre), de depósitos deltaicos y continentales cerca de cuyo techo pueden presentarse intercalaciones de mafitas, a veces con espesores significativos [6]. En el Oxfordiano Superior ocurre una transición carbonatado-terrígena hacia la sedimentación

mayormente carbonatada que se inicia posiblemente en el Kimmeridgiano. La sedimentación carbonatada con abundante materia orgánica, comprende los sedimentos hasta el Cenomaniano. En contadas localidades de Sierra del Rosario hay capas turonianas. En esta última región se presentan intercalaciones terrígenas en todo el corte entre el Oxfordiano Superior y el Cenomaniano (formaciones Artemisa, Polier, Santa Teresa y Carmita). Las capas de la Cordillera de Guaniguanico están cabalgadas desde el sur por ofiolitas y rocas de arcos volcánicos cretácicos, que afloran en el NE de Pinar del Río y NW de La Habana [1,7,6].

A continuación, se describen las principales características estratigráficas de las UTEs que se encuentran dentro del área de estudio.

a. Zonas de Los Órganos y Cangre

Ocupan la mayor parte del terreno Guaniguanico, justo al norte de la falla Pinar. La sección más antigua que se conoce son estratos del Jurásico Inferior-medio al Oxfordiano inferior, con espesor estimado entre 3000 y 5000 metros, representados por areniscas, lutitas, pizarras y escasos conglomerados, con raros cuerpos concordantes de diabasas y diques de gabrodes y diabasas, con un metamorfismo moderado. Estas capas se depositaron en depresiones intracontinentales con ambientes deltaicos, lagunares y muy localmente de mar somero [15]. Las capas descritas se cubren por areniscas, lutitas y calizas de aguas marinas someras, del Oxfordiano medio al superior, que representan la primera transgresión marina importante que completa la extensión del Tethys hasta el Caribe y el Golfo de México [15]. Más arriba los cortes contienen calizas bien estratificadas que pasan a masivas del Oxfordiano superior al Tithoniano inferior, depositadas en condiciones de plataforma carbonatada (Plataforma San Vicente). Durante el Tithoniano la plataforma se hunde y sobre ella se depositan en concordancia calizas con silicitas intercaladas, bien estratificadas, de aguas más profundas, que se extienden hasta el Cenomaniano [1,15].

b. Zonas Rosario Sur y Norte

Estas zonas están ubicadas como se muestra, en posición tectónica sobre Los Órganos. En la zona de Rosario Sur las rocas del Jurásico Inferior(?) al Oxfordiano son semejantes a las descritas anteriormente en Los Órganos, pero ellas faltan por completo en la zona Rosario Norte. También propio de la zona Rosario Sur es un potente cuerpo de basaltos con almohadillas intercalados con calizas y lutitas, de casi 400 metros. Las secciones suprayacentes de edad Kimmeridiano-Tithoniano, en ambas zonas de Rosario, se distinguen de aquéllas de Los Órganos por la ausencia de las calizas de plataforma (Miembro San Vicente), que están sustituidas por calizas y pizarras calcáreas bien estratificadas, de facies de cuenca marina, que contienen capas intercaladas de detritos (calcareitas) derivados de la plataforma. El tithoniano tardío está representado por calizas bien estratificadas con intercalaciones de silicitas, indicando una profundización del fondo de la cuenca; evento que se refleja también en las secciones de Los Órganos. Estas secciones están coronadas por un potente depósito de calciturbiditas (Formación Cacarajicara), que sobreyace rocas desde el Tithoniano hasta el Campaniano, y cuya edad se ha definido clásicamente como Maastrichtiano [1,6].

c. Zona de Quiñones/Guajaibón

Las rocas de esta zona yacen en posición tectónica sobre las de Rosario Norte. La secuencia estratigráfica de

Quiñones/Guajaibón se distingue porque los depósitos del Jurásico Superior y más jóvenes contienen un volumen reducido del componente clástico en comparación con los cortes de Rosario. Del Jurásico Superior al Aptiano se encuentran calizas pelágicas, propias de una cuenca marina profunda. Estas rocas están plegadas y en contacto tectónico con calizas propias de un banco carbonatado del Albiano-Cenomaniano (Plataforma Guajaibón). Aquí hay un hiatus del Turoniano al Santoniano, y las capas del Campaniano y Maastrichtiano no se distinguen de las que aparecen en la sección norte de Rosario.

2.3 Sismicidad

La Falla Pinar constituye la estructura de mayor extensión mapeada en superficie, la cual se extiende por más de 170 km, al sur de la Cordillera de Guaniguanico, con una profundidad máxima de 25 km aproximadamente [7] (Fig.1). A esta zona de falla se asocia el terremoto de $M=6.1$ grados de magnitud Richter, que produjo sacudidas de VIII grados de intensidad MSK en localidades de San Cristóbal y Candelaria, el 22 de enero de 1880. Se puede establecer su funcionamiento en el tiempo como una falla siniestral (al inicio de su desarrollo) y como una falla normal en su etapa final [12]. Se confirma su origen como una fractura de Riedel principal, provocada por la desviación al noreste del máximo esfuerzo compresivo σ_1 [12]. Sin embargo, en sus inmediaciones han ocurrido 6 terremotos significativos (1880, 1914, 1939, 1974, 1982 y 1995) que se asocian, con gran certidumbre, a distintas fallas (Cubitas, Guane, Habana-Cienfuegos y Pinar) o nudos de fallas Torriente-Jagüey Grande: San José de las Lajas) [5].

Cotilla (1993) [7] sostuvo que estos sectores de actividad diferencial son de utilidad en la evaluación del peligro sísmico. Además, señala que algunas de las fallas tienen un comportamiento neotectónico particular, como por ejemplo algunas referentes al sistema Falla Pinar, que desde el año 1880 no reporta actividad sísmica alguna. Estas fallas, supone el autor, que se vincula en escalón con una falla cubierta más al sur denominada Guane, que posee algunos eventos perceptibles a lo largo de su traza y que en su prolongación al este intercepta a la ya mencionada falla Habana-Cienfuegos para conformar un nudo sísmico activo en las inmediaciones del poblado de San José de Las Lajas [5].

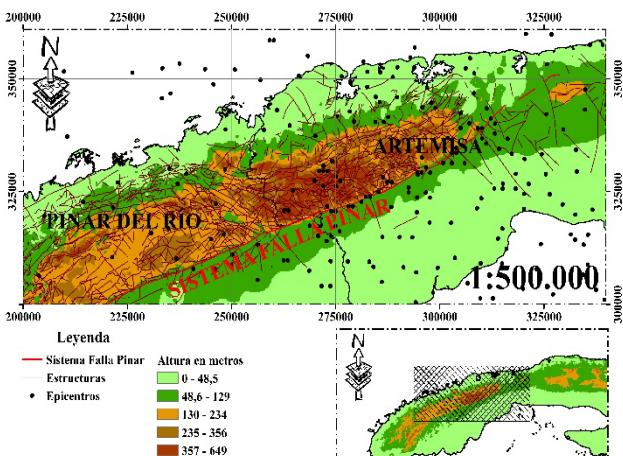


Figura 1. Relación de la distribución de la sismicidad con el Sistema Falla Pinar. Escala 1: 500 000. La sismicidad muestra una tendencia al agrupamiento cerca de la localidad de San Cristóbal, actual provincia Artemisa. Fuente: elaborada por el autor

Tabla 1.

Materiales utilizados en la realización de este trabajo.

Materiales utilizados	Autor	Formato
Mapa Geológico de Cuba	IGP	.shp
Sismicidad (1700 – 2021)	CENAIS	.pdf
Registro Sísmico Total	El autor	.xlsx

Fuente: elaborada por el autor.



Figura 2. Diagrama de flujo de la investigación. En negrita se muestran las 4 etapas fundamentales por la que transcurrió la investigación.

Fuente: elaborada por el autor

3 Materiales y métodos

La información empleada en este trabajo proviene de una base de datos sísmicos creada a partir de los catálogos publicados por el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIS) comprendiendo los años 1762 – 2021. La base cartográfica proviene del Instituto de Geología y Paleontología y actualmente se encuentra en proceso de actualización [1] (Tabla 1).

La investigación comienza con una etapa de revisión bibliográfica con el fin de conocer la limitación de las técnicas analíticas propuestas y detectar la presencia de antecedentes relacionados con la temática en el área de estudio. Se compila la información geólogo-geofísica y se clasifica y normaliza de acuerdo a los criterios de calidad del dato planteados por varios autores [3,5,8,16], dando como resultado la confección de la región sísmica (área de estudio con datos sísmicos, estructurales, geológicos y geodinámicos que permiten la caracterización sismo-geológica de la misma).

Una vez establecida la región sísmica se procede a dividir la serie de observaciones en diferentes ventanas temporales y con la finalidad de minimizar la influencia de la cantidad de sismos por ventana temporal, se procuró que todas las ventanas tuviesen el mismo número de eventos. A cada una de estas ventanas temporales “V” se le aplican las técnicas analíticas planteadas con el apoyo de los Softwares Hurst y Fractalyse, obteniéndose los resultados a discutir y analizar en la etapa 3 de la investigación (Fig. 2)

Para el análisis de la densidad de ocurrencia de la distribución espacial de la sismicidad de la región se preparó un catálogo sísmico que contiene 1218 sismos de magnitudes ≥ 0.5 ocurridos en Cuba occidental entre los años 1700 – 2021, a partir de los datos publicados por el CENAIS. Estos datos fueron revisados minuciosamente para eliminar sismos repetidos e incluir sismos omitidos. El catálogo preliminar cuenta con la fecha (año de ocurrencia), coordenadas de los epicentros y magnitud media. Otros datos no se pudieron

emplear por su carencia y ausencia en otros registros sísmicos. Dentro de estos datos se encuentra: ubicación, fecha exacta e intensidad. Los datos espaciales fueron homogenizados transformando las coordenadas al sistema Lambert. El resultado final de este procesamiento fue una base de datos de 315 eventos registrados dentro de las coordenadas del polígono de estudio.

Para el análisis de la distribución espacial de la sismicidad es necesario contar con un registro significativo que posea una determinada cantidad de eventos. Estos eventos deben ser seleccionados de tal forma que se tengan valores observables de la variación de su distribución espacial en el tiempo. Por estas razones se debe seleccionar un área, cuyo tamaño comprenda una cantidad de eventos representativos en la región sísmica analizada.

El tamaño de esta área va a estar determinada por la actividad sísmica de la región. Cuba occidental presenta una actividad sísmica relativamente baja asociada a una dislocación tectónica activa en un ambiente de intraplaca. Esto condiciona que para el análisis de la distribución espacial de la sismicidad se deban trazar áreas relativamente grandes. Si se imagina la región sísmica como un sistema con un determinado número de eventos, y para su análisis es necesario la división del sistema en estados discretos mediante el empleo de un mallado, aparece la limitante de que el mallado debe estar determinado por particiones “ k ” que sean un número entero y no un número racional. Es decir: $Z = k \neq Q$, por esta relación la delimitación del área a usar como sistema debe tener un contorno rectangular que pueda ser dividido en M estados discretos que puedan tomar valores igual al número de eventos registrados en cada estado atendiendo a un mismo régimen tectónico. En este trabajo el área se determina mediante un rectángulo de propiedades 2D, producto de la carencia de datos de profundidad en los catálogos sísmicos publicados por el CENAIS.

El análisis de entropía es una herramienta estadística que se usa para caracterizar el nivel de desorden de un sistema dado, donde éste está constituido por un número finito de estados, siendo éstos los distintos valores que pueden tomar dichos estados. La entropía de información caracteriza la distribución de probabilidades en un sistema con un número finito de estados y corresponde al valor esperado de información en el sistema. Toma valor cero si corresponde a un sistema donde cada estado tiene probabilidad no nula y toma su valor máximo; que depende del número de estados, para una distribución equiprobable.

Si se idealiza una región sísmica y consideramos como estados a las M celdas 2D o 3D, delimitadas por la construcción de una rejilla que abarque el área seleccionada, entonces cada evento (sismo) en la región tomará el valor del estado correspondiente a la celda que registra su ocurrencia. De este modo la probabilidad de cada estado va a estar relacionada con el número de eventos localizados dentro de la celda correspondiente.

Para cada ventana temporal los eventos representan un proceso puntual en el espacio; a partir de la probabilidad de cada estado la entropía del sistema para dicha ventana puede ser evaluada. De este modo la entropía va a depender del número de celdas en las que se divida el área registrada. Pero, como para una distribución espacial dada, los valores de probabilidad y la entropía depende del número de celdas, surge la incertidumbre de qué valor o valores de entropía serán utilizados para caracterizar el sistema. Para este trabajo se seleccionaron la entropía uniforme y de Poisson.

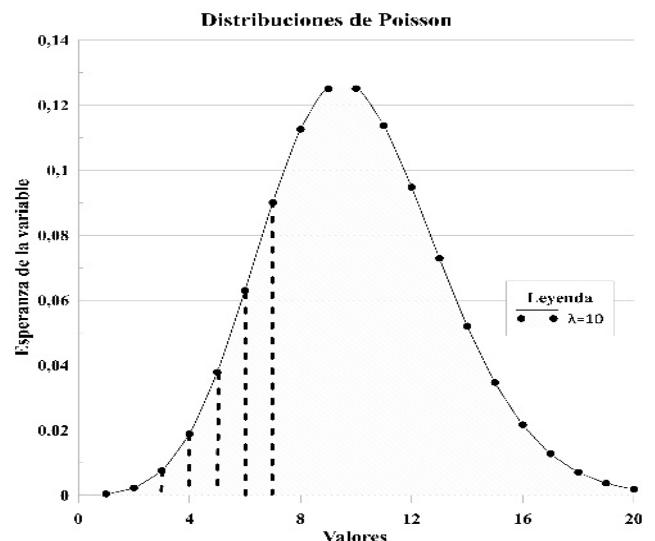


Figura 3. Ejemplo del cálculo del área bajo la curva mediante su división trapezoides. El procesamiento mostrado se realiza sobre una curva empírica trazada en Excel donde el valor de cada eje solo representa unidades numéricas y λ representa la esperanza de la variable.

Fuente: Elaborada por el autor.

3.1 Cuantificación de la medida de entropía

Para cuantificar la diferencia entre entropía de Poisson (S^P) y entropía uniforme (S^U) se considera el área entre los límites $M_1 = 2^2$ y $M_2 = \text{redondear}[(3N)_2]$, donde “redondear” es una función de Excel. Lo que sería igual a la subdivisión de las áreas en múltiples polígonos y de este modo el área graficada sería:

$$A_{up} = \int S^U - \int S^P \quad (1)$$

Donde A_{up} es el área entre las curvas de entropía.

Una integral no es más que el valor del área sombreada bajo la curva. Las integrales dividen estas áreas en múltiples polígonos que son limitados por el eje de las “x” y la superficie de la curva representada (Fig. 3)

Existen varios métodos matemáticos para la estimación del área entre dos curvas, sin embargo, con la intención de abreviar solo se hará alusión al método semiautomatizado empleado en este trabajo.

El área de cada trapezoide (Fig. 3) se puede calcular mediante la programación de la fórmula en “Excel”:

$$\frac{(Y_n + Y_{n+1})}{2(X_{n+1} - X_n)} \quad (2)$$

Teniendo estimada el área de cada trapezoide, basta con sumar todas las áreas. De este modo se cumple que:

$$\int S^n = \sum_n^{n+1} \frac{(Y_n + Y_{n+1})}{2(X_{n+1} - X_n)} \quad (3)$$

Este procedimiento se aplica para cada curva de entropía, S^U y S^P . El área total se divide entre el rango de M ; para minimizar el efecto de la dependencia al número de eventos

Obteniéndose como resultado el área entre las curvas de entropía (A_{up}) que es la medida de cuantificación de la entropía para cada ventana temporal de la región sísmica seleccionada.

3.2 Espectro de dimensiones generalizadas D_q

Hentschel & Procaccia (1983) [14]; Grassberger (1983) [13] proponen un número infinito de dimensiones fractales generalizadas D_q , donde q es un número entero que determina el énfasis dado a los agrupamientos. Para este trabajo solo se estimarán las dimensiones D_0 , D_1 y D_2 , porque han demostrado ser suficientes para el estudio del comportamiento fractal de la sismicidad y su variación en el tiempo [8]. No son pocos los trabajos que han mostrado variaciones de la fractalidad antes de la ocurrencia de grandes sismos. [3,5,8, 13,14,16]

a. Dimensión de capacidad

El comportamiento de la dimensión de capacidad está regido por la relación:

$$M(r) = ar^{-D} \quad (4)$$

Donde $M(r)$ es el número de cajas de tamaño “r” necesarias para cubrir (2D) o contener (3D) al objeto de estudio. El exponente es la conocida dimensión de Hausdorff [15], que se determina mediante el análisis en regresión de la representación de la relación:

$$D_0 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log M(r)}{\log \frac{1}{r}} \quad (5)$$

b. Dimensión de información

Se define como:

$$D_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^M p_i \log_{10} p_i}{\log_{10} r} \quad (6)$$

Donde “r” es el tamaño de la caja, M es la cantidad de cajas ocupadas y $p_i = p_i(r) = \frac{n_i}{N}$ es la probabilidad de ocupación de la caja i. n_i es el término que define el número de eventos en la caja y N el número total de eventos. Si se analiza el numerador de la ecuación anterior, nos damos cuenta que D_1 comparte relación con la entropía de información del sistema excepto por el log en base 10.

c. Dimensión de correlación

La dimensión de correlación, se basa en la dimensión de información y toma en cuenta en cuadrado de la probabilidad de incidencia en cada caja:

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^M p_i^2 \log_{10} p_i^2}{\log_{10} r} \quad (7)$$

3.3 Valor b de la relación Gutenberg – Richter

Gutenberg y Richter (1944) encontraron que la distribución cumulativa de las magnitudes se distribuye cumpliendo con la ecuación de la recta:

$$y = mx \pm n \quad (8)$$

$$\log_{10} N(M) = a_1 - b(M - M_1) \quad (9)$$

Donde $N(M)$ es el número de sismos de magnitud $\geq M$, que ocurren en un intervalo espacio-temporal determinado, a_1 es la cantidad de sismos y b es la pendiente que cuantifica el número relativo de sismos grandes y pequeños. Varios

trabajos han demostrado la disminución de la pendiente antes de la ocurrencia de grandes sismos.

El valor observado b se estima mediante el método de máxima verosimilitud de Aki–Utsu (1965).

$$b = \frac{\log_{10} e}{M_m - M_1^U} \quad (10)$$

3.4 Exponente de Hurst

El exponente de Hurst es un método que se utiliza para evaluar el comportamiento de los sistemas a lo largo del tiempo. Fue desarrollada por el hidrólogo británico Harold Edwin Hurst, quien durante años estudió fluctuaciones en el nivel de las aguas de Rio Nilo en busca de series fractales. La importancia de esta herramienta reside en la distinción y clasificación de series de tiempo en aleatorias o no, siendo su principal ventaja su aplicación a series de tiempo que no cumplen con una distribución Gaussiana. H (Exponente de Hurst) es un cociente sin dimensiones creado a partir de la división del rango por la desviación estándar de las observaciones, lo que se conoce como “análisis de rango escalado” [2]. Esto arrojó que la mayoría de las series de tiempos que se relacionan con fenómenos naturales cumplen con una secuencia aleatoria sesgada, conocida también como: caminata con ruido estadístico. Es posible medir la fuerza en la tendencia y la cantidad de ruido mediante el análisis de R/S [13]. Imaginemos una ventana temporal con tiempo “t”, con una cantidad de observaciones “u”, entonces:

$$X_{t,N}(r) = \sum_{u=1}^u (e_u - M_N) \quad (11)$$

En donde: $X_{t,N}$ es la desviación calculada para N períodos, e_u es el valor de entrada u , M_N es el promedio e_u sobre N períodos; siendo el rango R :

$$R = \max(X_{t,N}) - \min(X_{t,N}) \quad (12)$$

Hurst divide el rango por la desviación estándar de las observaciones originales y formula la siguiente relación:

$$\frac{R}{S} = (aN)^H \quad (13)$$

4 Resultados

4.1 Área analizada

Fue seleccionada el área de tal manera que tuviera relación con el evento sísmico más importante en la región de Cuba occidental, para evaluar el comportamiento de la sismicidad posterior a su ocurrencia en el año 1880. La sismicidad se delimitó con la construcción de un polígono con un registro de ocurrencia de 315 eventos. Aunque para los análisis matemático-estadísticos de la sismicidad suelen usarse registros de más de 10 000 sismos para la lograr la representatividad, el área de estudio se encuentra en un ambiente de intraplaca relativamente tranquilo; donde la cantidad de eventos registrados en el área de estudio conforman aproximadamente el 72.5% del total de eventos datados en la región occidental de Cuba. La sismicidad del área muestra una clara evolución de su distribución espacial en el tiempo, presentando un incremento en su grado de agrupamiento hacia el año 2021 (Fig. 4).

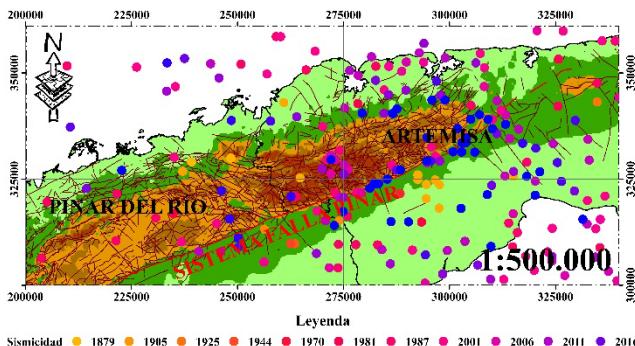


Figura 4. Evolución temporal de la sismicidad en el tiempo Escala 1: 5 000 000. La figura muestra la tendencia al agrupamiento de los epicentros. Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 2.

Ventanas de tiempo posterior a la ocurrencia del sismo de magnitud 6.1 en el año 1880.

Ventanas Temporales.	Años comprendidos.
Ventana 1	29/6/1849 – 24/6/1981
Ventana 2	24/9/1981 – 3/28/2009
Ventana 3	21/1/2009 – 13/11/2021

Fuente: elaborada por el autor

4.2 Sismicidad posterior al sismo de magnitud 6.1 en 1880

El resultado de este procesamiento fue la subdivisión de la sismicidad en 3 ventanas temporales. Como la dependencia de las medidas a determinar varían con el número de eventos, se procuró minimizar esta dependencia haciendo que las ventanas temporales tuvieran la misma cantidad de sismos. Las ventanas fueron seleccionadas de manera tal que guardaran relación con la evolución de la sismicidad en el tiempo, facilitando la caracterización de la misma de la región posterior a la ocurrencia del sismo de 6.1 grados (Tabla 2).

El aumento de la sismicidad hacia el año 1998 está relacionada con incremento de la acumulación de esfuerzos y la concentración de epicentros en las inmediaciones de la traza sísmica Falla Pinar esencialmente en el sector cerca de las inmediaciones del poblado de San Cristóbal actual provincia de Artemisa se debe a un cambio en el rumbo de la dislocación, esto genera una zona de acumulación de energía que manifiestan su actividad principal en los sedimentos y formaciones de la cuenca Los Palacios; producto de la presencia de un complejo sistema de estructuras profundas que se encuentra situado hacia la parte sur-sureste de la Falla Pinar [4]. Estos últimos no responden a la traza sísmica de la Falla Pinar y parecen estar asociados a fracturas de Riedel de segundo orden (sintéticas y antitéticas) y otras estructuras locales pertenecientes al Sistema Falla Pinar.

4.3 Medidas A_{up} de la distribución espacial de la sismicidad posterior a la ocurrencia del sismo de magnitud 6.1 en la región de Cuba occidental

A continuación, se muestran los resultados del análisis de entropía de la distribución espacial de la sismicidad posterior al sismo de 6.1 grados en la escala de Richter para cada una de las ventanas temporales. La Ventana 1 no aporta información de confianza por poseer eventos anteriores al

Tabla 3.

Resumen de los resultados de los análisis de no uniformidad para la sismicidad vinculada a la Falla Pinar.

Resumen de resultados sobre el análisis de no uniformidad			
Ventana 1	S_p 1,26	S_u 1,80	A_{up} 0,50
Ventana 2	S_p 1,24	S_u 1,80	A_{up} 0,55
Ventana 3	S_p 1,19	S_u 1,80	A_{up} 0,61

Fuente: elaborado por el autor.

sismo de mayor envergadura en la región de estudio. Nótese que, a pesar de que las distribuciones de los sismos muestran valores similares para las ventanas 1-3 el área A_{up} muestra tendencia al crecimiento en correspondencia al avance en el análisis temporal respecto al año 1880. Todas las áreas calculadas y representadas gráficamente están normalizadas bajo la eq. (15).

La diferencia entre la S_u y la S_p es la evidencia de que la distribución espacial de la sismicidad se aleja de ser una distribución uniforme y los agrupamientos que presenta no son un resultado del azar (Tabla 3).

El resultado esperado sería una tendencia en la disminución del A_{up} a medida que se aleje del periodo de ocurrencia del sismo de magnitud 6.1 ocurrido en el año 1880. Sin embargo, el A_{up} muestra una tendencia al crecimiento para las ventanas 1-3. Esto está estrechamente relacionado con un aumento en la densidad de ocurrencia por unidad de área y migración de los epicentros conforme pasa el tiempo. Si estos datos se contrastan con trabajos enfocados en el análisis de la distribución espacial [6], se pudo corroborar que: el aumento en el grado de agrupamiento de la distribución espacial de la sismicidad, ocasiona una disminución de la entropía del sistema y esto a su vez un aumento en el valor de no uniformidad y estas variaciones pueden estar relacionadas con la posible ocurrencia de un sismo magnitudes por encima de la media en el área de estudio. Para comprender este hecho es importante entender que los sismos son evidencia directa de la acumulación y relajación de esfuerzos durante el momento de ruptura. Varios trabajos han descrito la migración y concentración de epicentros antes de la ocurrencia de un sismo de magnitudes por encima a la media histórica de una región determinada [2,8], de este modo se puede decir que: una tendencia a la disminución del valor del valor de A_{up} puede estar relacionada con la ocurrencia de un sismo de gran envergadura [8]. A la par se propone el empleo de la entropía de Poisson como una variable precursora para la sismicidad

Desde el punto de vista estructural este aumento en las concentraciones de esfuerzos muestra correspondencia con el ascenso diferencial de los bloques de la falla en las zonas descritas por varios autores [7,9]. Sin embargo, en la Fig. 4 se observan epicentros recientes que no se encuentran ubicados sobre trazas pertenecientes al sistema Falla Pinar. Esto puede sugerir que el régimen presente en el área de estudio no esté completamente dominado por la actividad de la Falla Pinar y la presencia de estructuras activas disyuntivas a la misma. Este resultado apoya la presencia de nodos activos y potencialmente activos conformados por fracturas de Riedel de segundo orden pertenecientes a varios períodos deformacionales [17].

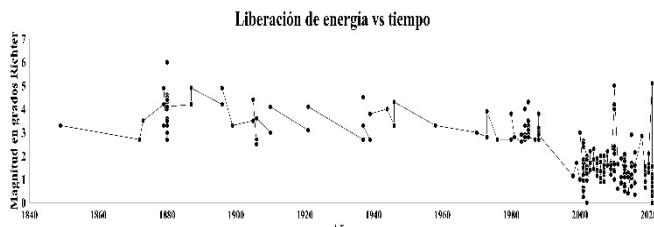


Figura 5. Evolución temporal de la sismicidad en el tiempo Escala 1: 5 000 000.
Fuente: Elaborado por el autor.

Hacia la ventana 3 ocurre un notable incremento en el valor de no uniformidad para el sistema (Tabla 3), este valor va a la par del incremento en la frecuencia de ocurrencia sísmica y de la disminución de la liberación de energía (Fig. 5). Estos resultados son coherentes con otros trabajos en la temática realizados en diversas regiones sísmicas del mundo [8], apoyando la posible ocurrencia de un sismo de elevadas magnitudes.

En cuanto al pronóstico de la sismicidad futura, tal como su nombre lo indica no puede aportar datos con 100% de certidumbre, de este modo la interpretación brindada por el análisis de no uniformidad debe ser complementada con datos que impliquen trabajos de campo y los resultados obtenidos sean comparados con resultados preexistentes. Además de continuar con análisis sistemáticos regulares.

4.4 Espectro de dimensiones generalizadas D_q (D_0, D_1, D_2 para la sismicidad de la región de Cuba occidental)

Se muestran los resultados de la estimación de espectro de dimensiones D_q para la actividad sísmica correspondiente a cada ventana a partir del sismo de magnitud 6.1 registrado en el año 1880. La información aportada por la Ventana 1 se tomará como la menos confiable por poseer eventos anteriores a la ocurrencia del sismo tomado como límite para el análisis. La dimensión menos confiable es D_0 por no ser capaz de detectar pequeños cambios en cortas escalas de tiempo, por estas razones, los resultados son interpretados a partir de los valores de D_1 y D_2 . El nivel de incertidumbre para la ventana 1 es producto de la selección de eventos (sismos) para ese intervalo de tiempo. Aun así, la semejanza entre las dimensiones D_q muestra que antes de la ocurrencia del sismo de magnitud 6.1 la sismicidad de la región comenzaba a alejarse de una distribución uniforme, alejándose de los términos de la fractalidad. La ventana temporal 2 comprende en su totalidad eventos registrados en tiempos posteriores a la ocurrencia del sismo en 1880. Para este intervalo, es evidente la relación entre las dimensiones generalizadas mostrando el carácter fractal y no uniforme que comienza a presentar la distribución espacial de la sismicidad de la región de Cuba occidental. Esta ventana registra además el mayor incremento en la frecuencia de ocurrencia sísmica.

Los resultados obtenidos de la determinación de los parámetros fractales para cada ventana temporal se muestran en la tabla 4. Nótese que: los valores que se muestran son aproximaciones no asintóticas. Esta incapacidad de exactitud se debe al hecho de que la determinación de las dimensiones generalizadas para objetos fractales puede presentar pequeñas variaciones en dependencia de las técnicas de medición empleadas. Aun así, los análisis espaciales y temporales basados en los conceptos de la fractalidad, son de gran utilidad y los datos aportados por los mismos sirven para caracterizar e interpretar variables que no pueden ser estudiadas bajos los conceptos de la matemática euclíadiana.

Tabla 4.

Resumen de los parámetros fractales de la sismicidad asociada a la Falla Pinar, Cuba Occidental.

Resumen de los parámetros fractales de la sismicidad asociada a la Falla Pinar, Cuba Occidental.			
Ventanas	D_0	D_1	D_2
V1	0,051	0,065	0,53
V2	0,090	0,105	0,098
V3	0,125	0,146	0,161

Fuente: elaborada por el autor.

La dimensión de información D_1 , es la cuantificadora del nivel de información que aporta la serie sísmica para un determinado intervalo de tiempo analizado y guarda estrecha relación con el nivel de desorden del sistema. A medida que aumentan los valores de D_1 el sistema se aleja del desorden natural (caos, aleatoriedad). Las ventanas temporales 1–3 muestran valores bien diferenciados, siendo las ventanas temporales $V3 > V2 > V1$. La marcada diferencia es el resultado de la ocurrencia de algunos epicentros con menos tendencia al agrupamiento y estos a su vez son el producto de la posible activación de antiguos sistemas de dislocaciones y/o fallamientos de paquetes de rocas en las profundidades de la corteza. V1 presenta el menor valor de información esto se debe a que en el comienzo de la serie de tiempo la sismicidad se comportaba con una tendencia más uniforme, es decir más aleatoriedad. Esta interpretación se fundamenta con el hecho de que varias trazas sísmicas comenzaron a cesar su actividad después de la ocurrencia del evento de 1880.

Las ventanas 2 y 3 poseen los mayores valores de información y están conformadas principalmente para eventos relacionados con fracturas de Riedel de segundo orden relacionadas con el sistema Falla Pinar, lo que demuestra que durante esos períodos de tiempo la región se encontraba bajo un régimen tectónico dominante. En cada una de estas ventanas se registra un sismo de magnitudes mayores a los 5 grados según la escala de Richter registrados en las inmediaciones del poblado de San Cristóbal, en el sector donde numerosos estudios geofísicos confirman la verticalización de la componente normal de la dislocación Falla Pinar. Por estas razones se atribuye la creciente acumulación de esfuerzos en el sector a esta componente normal.

Cada ventana temporal cuenta con un evento de magnitudes por encima de la media para la región y posterior a la ocurrencia de los mismos se tienen registros que describen la disminución de la liberación de energía y la tendencia al incremento en la frecuencia de ocurrencia sísmica, lo que permite interpretar el comportamiento sísmico de la región como un estado de cadenas recurrentes. Resta determinar el número de cadenas sísmicas presentes en el sector de estudio mediante estudios estadísticos complejos (Cadenas de Márkov)

La dimensión de correlación D_2 es la que aporta mayor información en términos de espacio–densidad de ocurrencia y tiempo, pues es más sensible a pequeños cambios en las propiedades de los cúmulos o agrupamientos (densidad de eventos por unidad de área) y velocidad en la ocurrencia de los agrupamientos. Una interpretación referente a los períodos en los cuales se observa una disminución del valor D_2 puede asociarse a la ocurrencia de sismos donde se presenta dicha variación, ya que esta se muestra de manera más aleatoria con el paso del tiempo, es decir presenta un menor grado de agrupamiento. Por tanto, la dimensión de correlación es la expresión de la velocidad de migración de

los focos sísmicos en el tiempo. Los posibles mecanismos de este descenso en la velocidad de agrupamiento pueden estar dado por variaciones en las propiedades mecánicas de las rocas que muestran comportamientos diferenciado ante la acumulación de concentraciones en la corteza terrestre y/o la activación de sistemas de dislocaciones presentes en las inmediaciones a la Falla Pinar [3]. Así como el proceso de reacomodo de las estructuras después de la relajación de los esfuerzos pasado el punto de ruptura. Al comparar los resultados obtenidos en esta investigación con estudios realizados sobre el tema (ejemplo: Cruso, 1998) se puede observar que las dimensiones generalizadas presentan cambios en dependencia del periodo en que se realice la estimación, y dicha variabilidad va a estar asociada en su mayor parte a la respuesta frágil del medio ante los cambios en las concentraciones de esfuerzos.

La ventana 1 posee el menor valor de D_2 , es decir; presenta el menor nivel de relación entre el espacio – la densidad de ocurrencia – tiempo de formación de los agrupamientos. El pequeño valor de la relación anterior es coherente con la interpretación realizada a partir de las variaciones del valor de D_1 . Las dimensiones de información y de correlación muestran una tendencia al crecimiento a medida que nos alejamos del evento de 1880, estos resultados son coherentes con los obtenidos mediante la aplicación de la entropía de Poisson, además, varios autores han demostrado variaciones en el comportamiento fractal de la sismicidad antes de la ocurrencia de un sismo de magnitudes relevantes [3,5,8,16].

Obsérvese además que las dimensiones de información y de correlación son mayores en la ventana 1 que en la ventana 2 (Tablas 4 y 6), es decir; la sismicidad ha ganado en aleatoriedad hacia la actualidad. Esta diferencia concuerda con la dualidad de criterios que existe sobre la sismicidad asociada a la Falla Pinar, donde hay autores que la caracterizan como la principal estructura sismo generadora [4,5,7,9,17] y otro grupo de autores que asocian la actividad del sistema Falla Pinar a un grupo de estructuras regionales profundas determinadas mediante campañas de sondeos geofísicos.

4.5 *Valor b de la relación Gutenberg – Richter para la distribución espacial de la sismicidad de la región de Cuba Occidental*

La variable b de la relación Gutenberg–Richter es un valor que se estima mediante la ecuación 16. Estos valores fueron recogidos y representados en la Tabla 5.

El valor b de la relación GR es susceptible ante sismos que se encuentren por encima de la media para cada intervalo de tiempo analizado [2,3]. Esto explica su decrecimiento antes de la ocurrencia de estos eventos alejados de la media de dicho intervalo. Para la ventana 1 la media de los sismos es de 3.01 grados (actividad sísmica de fondo) en la escala de Richter, sin embargo, se registra un valor máximo de 6.1 grados de magnitud. Este sismo por encima del valor medio ocasiona un descenso del valor b , lamentablemente la región occidental de Cuba no cuenta con catálogos sísmicos concretos que permitan la creación de una ventana de tiempo

Tabla 5.

Valor b de la relación GR para cada ventana temporal.

Ventanas	Valor b
1	-1,493534
2	0,361107
3	0,125214

Fuente: elaborada por el autor.

anterior a la ventana 1 para comparar la variación del valor b de esta última. El resultado del valor b para la ventana 1 es coherente con la disminución del espectro de dimensiones generalizadas y el valor de no uniformidad para dicha ventana. Por lo que el sismo de magnitud 6.1 se puede considerar como el cierre de una de las cadenas sísmicas presentes en el sector, dando paso a un nuevo periodo de concentración de esfuerzos caracterizado en un principio por una distribución uniforme en la concentración de los mismos y una menor tendencia al agrupamiento con la presencia de epicentros producto a liberaciones de energía por procesos de reacomodo. Esta interpretación se apoya en el hecho de que varios trabajos dedicados a la identificación de variables precursoras sísmicas, expone que cambios significativos en el valor b después de la ocurrencia de un sismo de magnitudes elevadas [2,3]. La ventana 3 muestra un valor menor que el estimado para la ventana 2 (Tabla 6), esto se debe a que en V3 se cuenta con una magnitud media de 2.3 grados según la escala de Richter y se registra un evento de magnitud 5.1 grados. Esta información aportada por el valor b de la distribución espacial de la sismicidad en conjunto con la aplicación de técnicas estadísticas complejas como las cadenas de Markov, pueden usarse para la construcción de registros sísmicos complejos.

La Tabla 6 constituye un resumen de cada una de las variables analizadas para la caracterización e interpretación de la sismicidad vinculada a la Falla Pinar. Es importante tener en cuenta que los resultados mostrados no constituyen valores exactos, sino aproximaciones a los valores reales. Las medidas utilizadas para la caracterización de la sismicidad muestran ser útiles para el análisis de distribuciones epicentrales o hipocentrales en torno a propiedades 2D (área) y 3D (volumen). Es necesario determinar en qué casos se puede trabajar con propiedades 3D, ya que pocos catálogos sísmicos muestran datos de confianza sobre la ubicación de los epicentros. La principal limitante de este tipo de análisis está comprendida por la homogeneidad de los catálogos sísmicos, ya que estos afectan a las medidas utilizadas mediante la introducción de ruidos y sesgos en la determinación de los parámetros de cada sismo en el momento de su ocurrencia. Otra de las limitantes es que la cantidad de datos y la calidad de los mismos se ven afectadas por la disponibilidad y las condiciones instrumentales

4.6 *Caracterización de la sismicidad vinculada a la Falla Pinar / Cuba occidental mediante el empleo del exponente de Hurst*

No cabe duda de que la distribución espacial de la sismicidad en la región de Cuba Occidental se aleja de ser una distribución uniforme, y los datos aportados por las medidas utilizadas para el análisis de la no uniformidad sirven para la interpretación de la sismicidad de la región y su relación con

Tabla 6.

Resumen de resultados obtenidos mediante la aplicación de las técnicas analíticas.

Resumen de resultados del análisis de no uniformidad e irregularidad de la actividad sísmica de la región occidental vinculada a la Falla Pinar							
V	S_p	S_u	A_{up}	D_0	D_1	D_2	b
1	1,26	1,80	0,50	0,065	0,53	0,051	-1,5
2	1,24	1,80	0,55	0,105	0,098	0,090	0,36
3	1,19	1,80	0,61	0,146	0,161	0,125	0,12

Fuente: elaborada por el autor

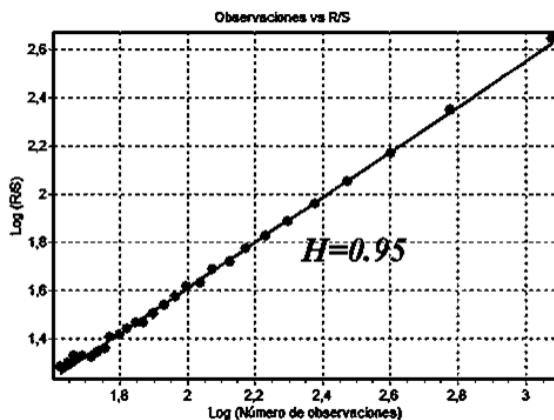


Figura 6. Exponente de Hurst para la totalidad de la serie sísmica. Análisis realizado con 25 observaciones. El valor de H se estima mediante el método de regresión lineal.

Fuente: elaborada por el autor.

la neotectónica de dicha región. A priori estas medidas, no pueden ser interpretadas siempre y cuando no se demuestre que la serie analizada se comporta como una caminata con ruido estadístico y no como una sucesión aleatoria de eventos en el tiempo. De este modo se introduce la necesidad de analizar y caracterizar la serie en base al exponente de Hurst para demostrar la influencia de los eventos analizados en los eventos futuros (Fig. 6).

El exponente de Hurst demuestra que las fuerzas que actúan hoy y regulan el comportamiento sísmico de la región, son las mismas que han actuado en el pasado y seguirán actuando en el futuro. Esto no aparta el hecho de que presenten variaciones que sean imposibles o muy difíciles de cuantificar, pues cada fractal natural posee una variación entorno a un componente; a esto se le llama auto afinidad y hasta el momento no hay manera tan sencilla de conocer cuál puede ser o será la variable que actúe como componente auto afín.

5 Conclusiones

Con la discusión de los resultados anteriores se puede concluir que:

- La confección de un registro sísmico total mostró la baja sismicidad relativa del área de estudio, correspondiendo con los parámetros esperados para un ambiente de intraplaca. Sin embargo, existe un apantallamiento en los datos en cuanto a sus coordenadas espaciales esto llevó de un total de 1218 sismos usar 315 para el análisis espacio temporal de la sismicidad
- El análisis basado en la entropía del sistema muestra ser susceptible a los cambios que experimentan las acumulaciones de esfuerzos en la corteza terrestre antes de la ocurrencia de grandes sismos; de ahí que, la entropía puede ser utilizada para caracterizar el grado de estabilidad de una región, además de la intensidad y velocidad de los procesos neotectónicos por la que transcurre y muestra que la distribución espacial de la sismicidad en la región occidental no cumple con las características de una distribución estadísticamente uniforme.
- La dimensión de capacidad (D_0) no es muy eficaz a la hora de realizar análisis en cortos intervalos de tiempos, mientras que las dimensiones generalizadas D_1 y D_2 demostraron ser capaces de captar variaciones en el nivel

y la velocidad de agrupamiento de los epicentros registrados. Para el caso de las ventanas 2 y 3, con la estimación de estas dimensiones se pudo apreciar que la sismicidad del área de estudio no corresponde en su totalidad al régimen tectónico de la Falla Pinar. De este modo demuestran su utilidad en los análisis dedicados a la interpretación sísmica de la neotectónica del área.

- El valor b de la relación Gutenberg–Richter es altamente susceptible a la ocurrencia de sismos por encima de la media, esto demuestra su utilidad como un fiable precursor sísmico a la hora de interpretar la sísmica de una región determinada. Además de usarse como delimitador para las cadenas símicas presentes en una determinada región
- Los análisis entrópicos y fractales demostraron ser coherentes coincidiendo en el reconocimiento de los períodos donde la sismicidad se comportaba de una manera más uniforme y ambos arrojaron argumentos que afirman la posible ocurrencia de un sismo de magnitudes por encima a los de la media además de arrojar datos que sirven para cubrir las debilidades resultantes de la aplicación de cada método de manera independiente.
- La determinación de la exponente de Hurst demostró que la distribución sísmica en el área se comporta como una caminata con ruido estadístico con una marcada tendencia a que los eventos del hoy influyan por siempre en los eventos futuros.
- Los análisis de irregularidad y no uniformidad mostraron que la sismicidad en el sector analizado corresponde a un único régimen tectónico de carácter regional, asociado generalmente a la Falla Pinar.

6 Recomendaciones

- Realizar estudios geodinámicos en las zonas donde la sismicidad tiende al agrupamiento y no responde a la traza de la Falla Pinar en superficie.
- Normalizar las magnitudes registradas por los diferentes catálogos a la hora de realizar análisis enfocados a los índices de liberaciones de energías.
- Realizar trabajos que relacionen los parámetros fractales de la sismicidad con la distribución espacial y parámetros fractales de las estructuras presentes en el área.
- Realizar estudios detallados sobre las estructuras sismo generadoras Falla Cubitas, Falla Guane, Falla Habana-Cienfuegos y Falla Pinar.

Referencias

- [1] Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Geología y Paleontología. Mapa geológico digital de la república de Cuba, escala 1:100 000. Centro Nacional de Información Geológica, Habana, Cuba, 2007.
- [2] Aki, K., Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log(N) = a - bM$ and its confidence limits. Tokio University, Tokio, Japan, 1965.
- [3] Mandelbrot, B.B., Fractals aspects of the iteration of $z \rightarrow \lambda z(1-z)$ for complex and z . In: Nonlinear dynamics. Annals New York Acad. Sciences 357(1), pp. 249–259, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1980.tb29690.x>
- [4] Cáceres-Govea, D., and Cruz-Gámez, E.M., Metamorphic-tectonic implications under a compression dynamic in Cangre Belt, western of Cuba. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 39(1), pp. 1-15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2022.1.1632>
- [5] Chuy, T.J., Precisión por zonas de la peligrosidad sísmica de Cuba con fines de su desarrollo económico sostenible. Memorias del II Congreso Cubano de Geofísica, Nuevas Investigaciones Sismológicas en Cuba, Ed. Academia, La Habana, Cuba, 2002, pp. 27-36.
- [6] Cobella-Reguera, J.L., Estratigrafía y eventos jurásicos en la cordillera de Guaniguanico, Cuba occidental. Minería y Geología, 13, 5-15, 1996.

[7] Cotilla, M.O., Álvarez, L., González, D., Pacheco, M., y Arteaga, E., Elementos del esquema neotectónico de Cuba. Informe Científico Técnico del departamento de Geofísica del Interior, 100. Instituto de Geofísica y Astronomía, Habana, Cuba, 1993.

[8] Despaigne-Longchamp, G., La entropía Poissoniana de la distribución espacial de la sismicidad y su variación temporal como premonitor a la ocurrencia de grandes sismos. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, Mexico, 2017, 48 P.

[9] Estévez-Cruz, E., Cueto-Gil, C.J., Díaz-Guanche, C., Ramírez-Hernández, R., y Ordaz-Hernández, A., Estudio del Frente montañoso de la zona de Falla Pinar, Cuba occidental, y su relación con la tectónica reciente. Cuaternario y Geomorfología, 35(3-4), pp. 29-53, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17735/cyg.v35i3-4.84170>

[10] Martínez-Silva, R., El Pronóstico en el peligro, la vulnerabilidad y el riesgo. En: La Geomecánica en las Construcciones, nueva región ingeniero geológica “PINAR SUR”. Dpto. de Geología, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, Cuba, (s.f.), 160 P.

[11] Furrazola et al., Geología de Cuba, Tectónica. Editora del Consejo Nacional de Universidades, La Habana, Cuba, 1964.

[12] Gordon, M.B., Mann, P., Caceres, D., and Flores, R., Cenozoic tectonic history of the North America - Caribbean plate boundary zone in Western Cuba. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B5), pp. 10055-10082, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1029/96JB03177>

[13] Grassberger, P., Generalized dimensions of strange attractors. Phys. Rev. Lett, 97A, pp. 227-230, 1983. DOI: [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(83\)90753-3](https://doi.org/10.1016/0375-9601(83)90753-3)

[14] Hentschel, H.G.E., and Procaccia, I., The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors. Physica D: Nonlinear Phenomena, 8(3), pp. 435-444, 1983. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(83\)90235-X](https://doi.org/10.1016/0167-2789(83)90235-X)

[15] Iturralte-Vinet, M.A., Sinopsis de la constitución geológica de Cuba. Acta Geológica Hispana, 33(1-4), pp. 9-56, 1998.

[16] Kaplan, I., Estimating the Hurst exponent. Inédito. 2003.

[17] Ramírez-Herández, R., Análisis morfotectónico del sector sur de la cordillera de Guaniguanico, entre las cuencas de los ríos el Cangre y San Cristóbal, Pinar del Río-Artemisa. Tesis Doctor en Ciencias Geológicas, Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca, Pinar del Río, Cuba, 2018, 189 P.

[18] Shannon, C., A mathematical theory of communication. Bell Syst. Tech. Journ. XXVII(3), pp. 379-423, 1948a. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>

[19] Shannon, C., A mathematical theory of communication. Bell Syst. Tech. Journ. XXVII(3), pp. 623-656, 1948b. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x>

[20] Turcotte, D.L., Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge University Press. Cambridge; U.K., 1992.

M.E. Pazo-Arango, recibió el título de Ingeniero Geólogo en 2023 en la Universidad de Pinar del Río Hnos. Saíz Montes de Oca, Cuba. En 2024 comenzó a trabajar en el Instituto de Geología y Paleontología donde desempeña el rol de especialista en tectónica. Sus intereses de investigación incluyen: geodinámica, geología estructural, tectónica, neo tectónica, geoestadística, estadística compleja, matemática fractal, sísmica, programación y pronóstico de series temporales no lineales utilizando técnicas de inteligencia estadística y computacional.

ORCID: 009-0009-5628-1060