

Caracterización de patrones emergentes de emisiones de CO₂ en México

Characterization of emerging patterns of CO₂ emissions in Mexico

Mario Aguilar-Fernández^{1,*}, Oswaldo Morales-Matamoros², Brenda García-Jarquín², Paola Fortanell-Estrada³

¹Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA-SEPI). Instituto Politécnico Nacional. Av. Té 950, Granjas México, Iztacalco, 08400. Ciudad de México, México.

²Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME-SEPI). Instituto Politécnico Nacional. Manuel de Anda y Barredo. Edificio 5, 3er piso. Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco 07738, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México.

³Centro de Estudios Tecnológicos No.1 Walter Cross Buchanan (CET1). Instituto Politécnico Nacional. Av. 661 S/N, F0VISSTE Aragón, San Juan de Aragón V Secc. 07920, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México.

*Autor de correspondencia: maguilarfer@ipn.mx

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 3 mayo 2021 **Aceptado:** 27 mayo 2021 **Publicado:** 7 de junio 2021

Resumen

El impacto de los gases de efecto invernadero en el calentamiento global, ha incitado a las naciones a regular las emisiones, y a la generación de proyectos de captura de CO₂, haciéndose necesario contar con análisis de largo plazo para el establecimiento de políticas y estrategias efectivas. Caracterizando la dinámica de las emisiones de CO₂ y sus patrones emergentes se puede modelar y simular este fenómeno vinculado a la actividad antropogénica. De acuerdo con el análisis fractal realizado, los resultados obtenidos indican la existencia del comportamiento de escalamiento dinámico tipo *ansatz* de *Family-Vicsek*, para la cinética de rugosidad de una interface en movimiento. Es por esto que se espera que la dinámica de las emisiones de CO₂ en México, sea descrita y pronosticada, por la ecuación tipo *Langevin* $ma = m \frac{dv}{dt} = F(x) - \beta v + n(t)$. Lo anterior, puede ser un soporte robusto, para que las autoridades gubernamentales mexicanas, estén en mejores condiciones para analizar el impacto de las políticas ambientales.

Palabras clave: Emisiones CO₂, México, fractales, Langevin

Abstract

The impact of greenhouse gases in global warming has urged nations to regulate the CO₂ emissions and to develop capture strategies; in consequence it is necessary to have long-term analysis for policy setting and effective strategies. The dynamics of CO₂ emissions are characterized to identify emerging patterns in order to model and simulate this phenomenon linked to anthropogenic activity. According to fractal analysis, the results indicate the existence of the behavior of dynamic scaling from the *ansatz* Family-type kinetics *Vicsek* roughness for a moving interface. This is why it is expected that the dynamics of CO₂ emissions in Mexico are described and predicted by the Langevin equation type $ma = m \frac{dv}{dt} = F(x) - \beta v + n(t)$. This can be a strong support for the Mexican government authorities for improved assessments of the impact of environmental policies.

Keywords: CO₂ emissions, México, fractals, Langevin.

1. Introducción

La adaptabilidad y capacidad de aprendizaje del ser humano lo ha llevado al uso de herramientas, de estrategias de comunicación y organización social para satisfacer sus necesidades endosomáticas y exosomáticas, transformando el medio ambiente, de manera acelerada a partir de la revolución industrial, con el uso de combustibles fósiles, impactando drásticamente en la calidad ambiental. Sin duda alguna, el cambio climático está amenazando seriamente la sostenibilidad social, económica, alimentaria, ambiental, sanitaria, el suministro de agua y de la misma raza humana, al menos como se le conoce en la actualidad [1-9].

Entre los diversos gases de efecto invernadero (GEI) antropogénicos asociados con el cambio climático [10,11], el dióxido de carbono (CO₂) es de los más importantes, provocando gran atención académica y científica, durante las últimas décadas [12-13]. Con el desarrollo económico y el crecimiento del consumo de energía fósil, especialmente en países en desarrollo, como México, se requieren esfuerzos para controlar las emisiones de CO₂, tanto para planificar la política energética, como para mantener el acuerdo internacional sobre mitigación del cambio climático, a nivel internacional.

El tema del CO₂ como GEI no es sencillo de abordar, dada la compleja diversidad de relaciones que guarda con las actividades antropogénicas: industrial, tecnológica, de bienestar y calidad de vida de las sociedades. De ahí que cada análisis de emisiones, puede dar un significado o valoración particular a los datos generados, dependiendo la pregunta que se busque responder: valores de predictibilidad, de retroalimentación para los sistemas de seguimiento, del análisis de series de tiempo, o bien de ejercicios de comparabilidad y verificación de la representatividad en las mediciones o los cálculos [14,15]. El incremento en la concentración de CO₂ atmosférico, ha ido desde las 280 ppm que caracterizaba a la atmósfera antes de la revolución industrial, hasta más de 400 ppm, según mediciones realizadas durante los últimos dos años en la estación Mauna Loa en Hawái; concentración que se asocia a un incremento anual de 2°C, en términos de calentamiento global. Lo más preocupante, es que la curva parece no llegar a un punto de estabilidad. Se calculó que sólo en 2011, las actividades humanas fueron responsables de la emisión a la atmósfera de 10,4 miles de millones de toneladas de carbono, de las cuales, únicamente la mitad pudo ser capturada por los sumideros de carbono y el resto permanece en la atmósfera [16].

En el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el análisis de las previsiones medioambientales juega un papel fundamental. Más concretamente, teniendo en cuenta que las emisiones de dióxido de carbono se han incrementado en casi un 50% desde el año 1990, se debe prestar especial atención en la evolución y proyecciones de emisiones para diferentes países [17], generando con estos estudios, una alerta temprana para la implementación de la estrategia ambiental del gobierno mexicano [18]. Por tanto, existe la necesidad de desarrollar herramientas cuantitativas eficientes que permitan caracterizar y pronosticar las emisiones de CO₂ en México [6, 19-21].

La cuantificación y detección de fuentes de emisión de GEI, se ha hecho en México a través de inventarios de CO₂ equivalente y mediciones directas de contaminantes prioritarios, en la red nacional de monitoreo atmosférico, información con la que se han definido las áreas de oportunidad necesarias para asegurar la disminución, o al menos evitar el aumento de emisiones de GEI, y las estrategias de captura de CO₂. El manejo de estas fluctuaciones en series de tiempo, permite no sólo establecer los patrones a largo plazo, sino identificar las áreas de oportunidad para disminuir los impactos al ambiente, establecer políticas más eficaces para el control de las emisiones de GEI y

lograr el cumplimiento de los acuerdos internacionales sobre las emisiones y desarrollo de proyectos de captura de carbono en México.

Si bien la emisión de GEI está estrechamente ligada con las actividades antropogénicas, su comportamiento atmosférico corresponde con los fenómenos naturales, cuya esencia es la de los sistemas dinámicos. Por lo tanto, pueden ser estudiados, caracterizados y modelados dentro del marco de la complejidad, la cual está en armonía con la visión holística de los sistemas suaves relacionados con la naturaleza. Es por ello, que en el presente documento, se caracteriza la dinámica de las emisiones de CO₂, con el fin de hallar patrones emergentes (a diferentes escalas de tiempo-espacio), los cuales permitirán estimar los aspectos relevantes, para la toma de decisiones en materia de política ambiental.

El calentamiento global, no es más que el aumento de las temperaturas terrestres y oceánicas [22]. Estudios revelan el incremento de dichas temperaturas [23-26], y la vinculación directa entre el calentamiento global y los gases de efecto invernadero [27-29] y en el caso particular de México [30,31].

Los gases de efecto invernadero (GEI), que integran la atmósfera, de procedencia natural o antropogénico, absorben una fracción de radiación infrarroja, difundida por la superficie de la tierra, al calentarse por la radiación solar (es lo que se denomina, efecto invernadero), son: el ozono (O₃), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), dióxido de carbono (CO₂) y el vapor de agua (H₂O). Existen otros GEI producidos por el hombre, como los clorofluorocarbonos (CFC) [32], y el hexafluoruro de azufre (SF₆), pero el CO₂ es el gas antropogénico más importante [33]. El CO₂ es un compuesto inorgánico [34]; es un gas incoloro, inodoro y no inflamable, que se encuentra naturalmente en la atmósfera. Es resultado de la quema de combustibles fósiles y las erupciones volcánicas principalmente [35]. De acuerdo con el Departamento de Alimentos de los Estados Unidos, los niveles de CO₂ en la atmósfera, suelen fluctuar entre 300 y 400 ppm (0,03 a 0,04%), pero pueden llegar a 600-900 ppm, en áreas metropolitanas.

Los fractales, novedosas geometrías de la naturaleza, han incrementado sus áreas de estudio (física de materiales, cálculo de precios del petróleo, finanzas, cambio de precios de las mercancías, biología, cambio climático, el nivel de las crecidas de los ríos, circuitos electrónicos, teoría de la información, la lingüística, geología, medicina, etc.). El matemático Benoit Mandelbrot (1924-2010), es considerado como el padre del análisis fractal moderno; acuñó el vocablo *fractal*, del adjetivo latino *fractus* (irregular o interrumpido), y del verbo *frangere* (romper en pedazos) [36,37]. Para Brown y Liebovitch [38], el análisis fractal proporciona un enfoque para estudiar la forma y estructura de fenómenos rugosos e irregulares.

Se realiza una revisión tradicional de literatura, con base en los métodos de [39-42], y las pautas de [43]. La búsqueda de documentos científicos, se realiza en el periodo de 1980 al 2020, en la base de datos *Web of Science*. Se pone particular atención en los artículos publicados con mayor relación en el tema sobre fractalidad, pronósticos y estimaciones de CO₂. La calidad de la información sobre el tema de CO₂, cumple el atributo de vigencia [44,45], lo que quiere decir, que el número de documentos escritos, así como la cantidad de citas, están aumentando. Los documentos consultados se estratifican en 4 apartados: El primero de ellos es series de tiempo [46-48], el segundo, redes neuronales [49-51], métodos de pronósticos [19,52,53] y el apartado de otros [17,54,55].

El objetivo de este trabajo es caracterizar la dinámica fractal de las emisiones de CO₂ en México, dentro del marco de la sistémica, con base en un análisis fractal, con el fin encontrar patrones

emergentes, los cuales permitirán estimar las emisiones de CO₂, empleando redes neuronales. Entre los alcances del estudio se encuentran el desarrollar una herramienta, resultado de la investigación científica, que pueda representar el sistema de fluctuaciones de las emisiones de CO₂ en México, así como brindar estimaciones más precisas y ajustadas a la realidad, en relación con las técnicas de análisis convencionales. Una limitante significativa, es que la efectividad del modelo depende de los datos generados por otras propuestas globales en la literatura científica, además de la calidad y cantidad de datos de los inventarios de emisiones de CO₂ (local y nacional); también los objetos fractales requieren de una gran cantidad de datos para poder realizar las iteraciones correspondientes [56].

2. Metodología

Se desarrolló una investigación cuantitativa, con alcance correlacional [57,58]. La metodología está dividida en tres etapas, las cuales consisten en 1) el ajuste de los datos, 2) la medición de las fluctuaciones, y 3) el análisis fractal de los escalamientos [59,60].

Ajuste de los datos

Los registros históricos de las emisiones de CO₂ en México fueron obtenidos de la base de datos del Banco Mundial en el mes de diciembre del 2020, y se muestran como una serie de datos en la Figura 1. Se ajustaron los datos, para realizar una proyección *a posteriori* con base en las distribuciones más cercanas (Weibull, lognormal, exponencial y logística), como se muestra en la Figura 2.

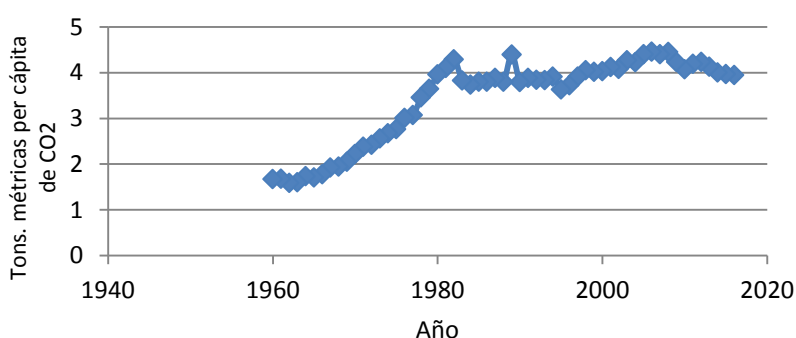


Fig.1 Cantidad de emisiones anuales de CO₂ en México

De acuerdo a la Figura 2, la distribución Weibull fue la que logró un mayor ajuste con un coeficiente de correlación de 0,933 con parámetros de forma de 4,78 y de escala de 3,47. De acuerdo a esto, la función de densidad para procesos estocásticos de la distribución Weibull, se describe de la siguiente forma (Ecuaciones 1 y 2):

$$f(x; \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(x/\lambda)^k} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Donde $k > 0$ es el parámetro de forma y $\lambda > 0$ es el parámetro de escala de la distribución y su función de distribución de probabilidad es:

$$F(x; k, \lambda) = 1 - e^{-(x/\lambda)^k} \quad (2)$$

para $x \geq 0$, siendo nula cuando $x < 0$

Las ecuaciones (1) y (2), fueron aplicadas en el software de simulación de sistemas dinámicos *iThink* 8.0, generando 10,000 datos a posteriori, y series de tiempo de 300 datos cada una, correspondientes a los índices de emisiones de CO₂, como se observa en la Figura 3.

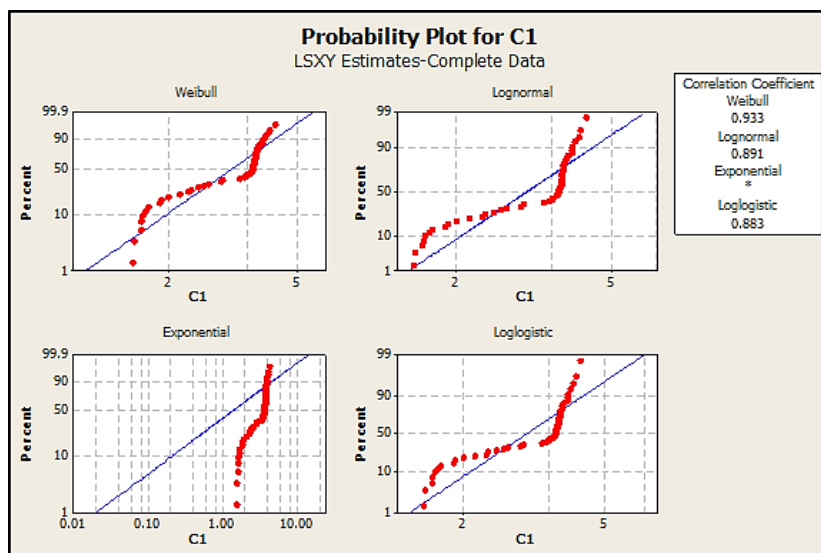


Fig.2 Distribuciones probabilísticas para las emisiones de CO₂ en México

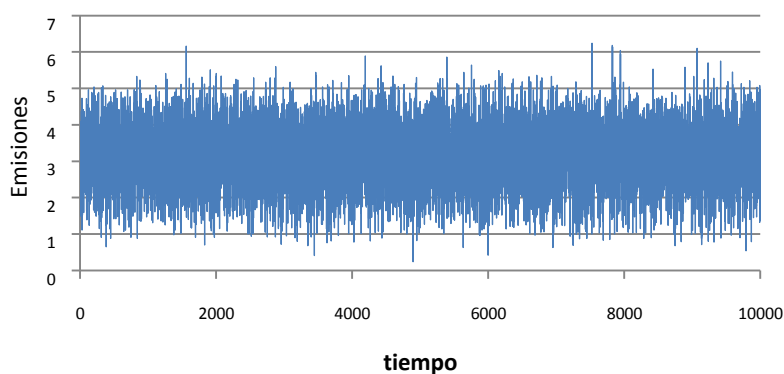


Fig.3 Serie de tiempo para las emisiones anuales de CO₂ en México (en toneladas métricas)

Medición de las fluctuaciones

La dinámica interna de muchos sistemas complejos reales, frecuentemente se estudia a través del análisis de fluctuaciones de los sistemas en series de tiempo de sus fluctuaciones [61,62]. Desde el punto de vista estadístico, estas series de tiempo $z(t)$, se caracterizan, normalmente, por sus retornos logarítmicos $v(t, \tau) = \ln[z(t)/z(t + \tau)]$, para un intervalo de tiempo fijo τ [63-65]. Se han efectuado muchos estudios para analizar las series de tiempo de variables dinámicas a partir de sistemas físicos, biológicos y financieros, debido a que son el producto de la magnitud y signo del retorno logarítmico [61,66]. Investigaciones recientes se han enfocado en el estudio de correlaciones del valor absoluto y en el signo de las series de tiempo [67,68].

De modo que el valor absoluto de los retornos logarítmicos $V(t + \tau) = |V|$, de muchas series de tiempo reales, exhiben correlaciones de leyes de potencia a largo plazo [63, 66-70], indicando que el sistema no responde inmediatamente a una cantidad de información fluyendo hacia él, pero reacciona a dicha información gradualmente en cierto periodo [61,66]; es por esto que la proyección se realiza para 10,000 datos. De acuerdo con esto, el análisis de las propiedades de escalamiento de las fluctuaciones, ha demostrado ofrecer información importante, relacionada con los procesos subyacentes, responsables del comportamiento macroscópico observado en los sistemas del mundo real [61-68,70].

La memoria a largo plazo en las series de tiempo de fluctuaciones, es comúnmente analizada a través de un estudio de su función de estructura, definida como $\sigma(\tau, \delta t) = \langle [V(t + \delta t, \tau) - V(t, \tau)]^2 \rangle^{1/2}$, donde la barra superpuesta, denota el promedio de todas las t en series de tiempo de longitud $t - \tau$ (τ es la longitud de las series de tiempo $z(t)$), y los corchetes cuadrados, denotan el promedio de todas las realizaciones de la ventana de tiempo de tamaño δt [63-65]

De aquí que $\sigma(\tau, \delta t)$, está determinado por el cálculo de las desviaciones estándar estadísticas de los 10,000 datos generados en forma de vectores. Es decir, 300 vectores de 300 datos, de modo que para facilitar esta actividad, se programó en *fortran 90* su solución.

Análisis fractal de los escalamientos

De acuerdo a la función de estructura del valor absoluto de los retornos logarítmicos $V(t + \tau) = |V|$, generalmente, se exhibe el comportamiento de ley de potencia.

$$\sigma \propto (\delta t)^\zeta, \quad (3)$$

El exponente de escalamiento ζ , también conocido como exponente de Hurst, caracteriza la intensidad de las correlaciones a largo plazo en el comportamiento de las fluctuaciones [71], aun cuando la serie de tiempo $z(t)$ parezca errática y sus retornos logarítmicos $v(t, \tau)$ sean aparentemente aleatorios [63-66, 69]. Se ha demostrado, que el conocimiento de ζ , es muy útil, también para propósitos prácticos [63-66, 69]. Sin embargo, el comportamiento de escalamiento (1), caracteriza las correlaciones en una serie de tiempo de retornos logarítmicos tratada de manera análoga a una interface rugosa en dimensiones (1+1) [71-73]. La interface rugosa, en mecánica de suelos, que se refiere a las irregularidades físicas en las superficies, se puede hacer a su vez, análoga a las fluctuaciones que presentan los datos en este caso, de las emisiones de CO₂, para hallar el patrón característico en su comportamiento en series de tiempo a largo plazo. Una mejor comprensión, desde la física estadística de la dinámica de fluctuaciones, requiere una adecuada descripción de las propiedades de correlación de las variables locales en diferentes intervalos de tiempo [66], de modo que para los fines de esta investigación, se aplica un enfoque para entender correctamente la dinámica de las series de tiempo de fluctuaciones, al estudiar el valor absoluto de retornos logarítmicos para diferentes intervalos. Específicamente, se trata las series de tiempo del valor absoluto de retornos logarítmicos como una interface en movimiento $V(t, \tau)$, donde el intervalo de tiempo a considerar τ , juega el papel de la variable de tiempo, mientras que el tiempo físico t , juega el papel de la variable espacial [61]. La Figura 4 muestra una descripción visual de las formas en las que están distribuidos los datos, la cual exhibe un comportamiento auto-similar, conforme los intervalos aumentan en el tiempo, por ejemplo (c-f). Como ya se mencionó, para estudiar la dinámica de fluctuaciones, se analizaron las series de tiempo del valor absoluto de retornos logarítmicos δt , de las series de tiempo originales $z(t)$, de los indicadores de emisiones de CO₂. La longitud de las series

de tiempo originales fue $T = 10,000$, y las muestras del valor absoluto de retornos logarítmicos τ , fueron de 3, 5, 10, 15, 20 y 25.

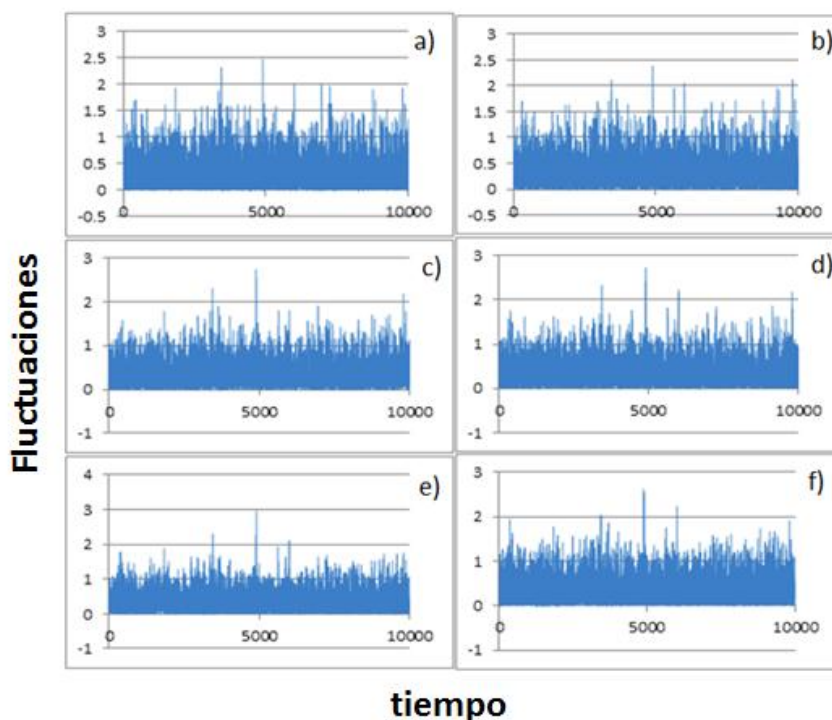


Fig.4 Series de tiempo del valor absoluto de retornos logarítmicos (fluctuaciones) $V(t_v, \tau)$ del índice de emisiones de CO_2 para diferentes intervalos de tiempo: a) $\tau = 3$, b) $\tau = 5$, c) $\tau = 10$, d) $\tau = 15$, e) $\tau = 20$ y f) $\tau = 25$

Se aprecia, principalmente, la similitud visual entre las series de tiempo del valor absoluto de retornos logarítmicos, con muestras a diferentes intervalos (ver Figura 4(a)-4(f)). Desde el punto de vista cuantitativo, la auto-afinidad de las series de tiempo de fluctuaciones, está caracterizada por el comportamiento de escalamiento, como se ilustra en la Figura 5(a)-5(f) [74], para las fluctuaciones de las emisiones de CO_2 . En la Figura 6 se puede constatar que las funciones de estructura, despliegan un comportamiento de ley de potencia (3), con $\zeta(\tau) = 0,451$, dentro de un limitado rango de intervalos de δt , con δt incrementándose con τ , como:

$$\delta t_c \propto \tau^{1/z} \quad (4)$$

donde z es el exponente dinámico

Asimismo, se encontró, que la función de estructura del valor absoluto de retornos logarítmicos, también escala con el intervalo de la muestra τ , como:

$$\sigma \propto \tau^\beta, \quad (5)$$

donde $\beta = 0,0147$ es el exponente de crecimiento de la fluctuación (ver Figura 7). En este sentido, cabe mencionar la importancia de β , dentro del marco análogo a la interpretación de este parámetro, que radica en mostrar de forma más evidente, en qué momento la fluctuación sufre alteraciones drásticas tales que demarquen la tendencia de crecimiento de las variaciones a largo plazo. El valor

tan cercano a 0 indica que las fluctuaciones a largo plazo, no experimentarán incrementos representativos, desde un escenario optimista.

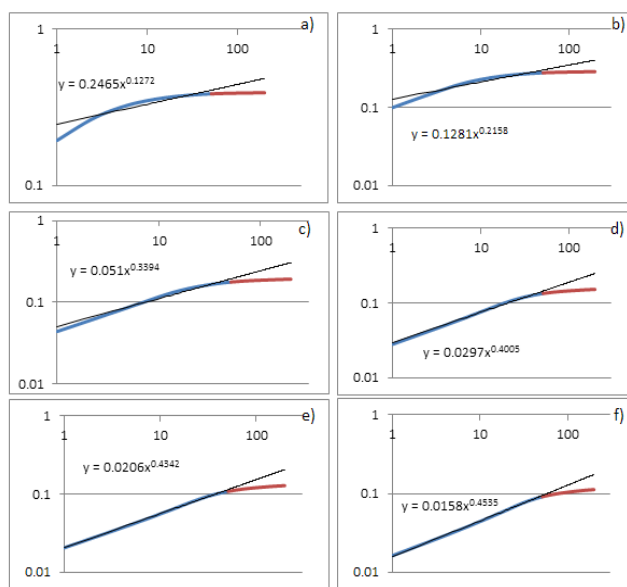


Fig.5 Escalamiento dinámico de fluctuaciones del índice de emisiones de CO₂ $\sigma(\tau, \delta t)$ (en unidades arbitrarias) versus δt ($2 \leq \delta t \leq 101$) para: a) $\tau = 3$, b) $\tau = 5$, c) $\tau = 10$, d) $\tau = 15$, e) $\tau = 20$ y f) $\tau = 25$

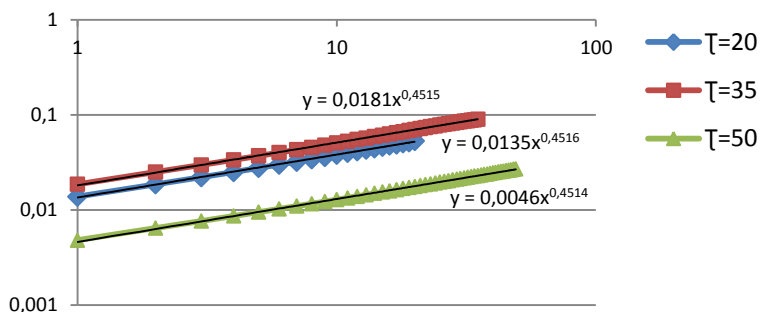


Fig.6 Escalamiento dinámico de fluctuaciones $\sigma(\tau, \delta t)$ (en unidades arbitrarias) del índice de emisiones de CO₂ en México versus δt ($2 \leq \delta t \leq 101$) para: $\tau = 20$, $\tau = 35$ y $\tau = 50$

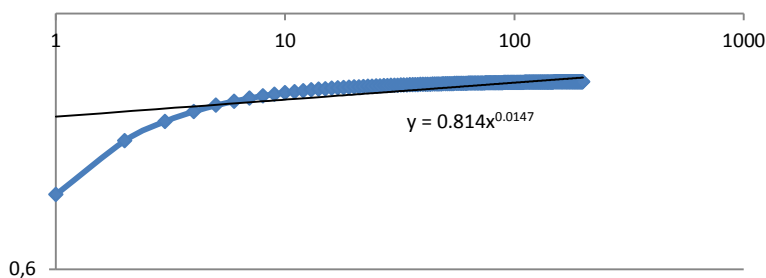


Fig.7 Estructura de función $\sigma(\tau, \delta t)$ para $\beta = 0.0147$

3. Resultados y Discusión

Como se puede apreciar en la Figura 5, donde cada punto representa el promedio de 300 series de tiempo del valor absoluto de retornos logarítmicos, la distribución de emisiones de CO₂ en México, no responde inmediatamente a la cantidad de información que fluye cotidianamente, sino que reacciona gradualmente en cierto periodo, ya que conforme se aumenta el intervalo de tiempo de las fluctuaciones (valor absoluto de los retornos logarítmicos), se tiene un mejor despliegue de las fluctuaciones y de la función de estructura de las mismas a una ley de potencia, incrementándose las correlaciones (o memoria) a largo plazo.

Los resultados obtenidos, indican la existencia del comportamiento de escalamiento dinámico análogo, al escalamiento dinámico *ansatz de Family-Vicsek*, para la cinética de rugosidad de una interface en movimiento [73]. De hecho, las relaciones de escalamiento, implican que la función de estructura de las series de tiempo de fluctuaciones, exhiben el comportamiento de escalamiento dinámico [61]:

$$\sigma(\tau, \delta t) \propto \tau^\beta f_l(\delta t/\tau^{1/z}), \quad (6)$$

La dinámica de escalamiento (4), permite tratar la dinámica de fluctuaciones, como la cinética de crecimiento de una interface en movimiento (Figura 5); por ende, es factible aplicar las poderosas herramientas de la teoría de la cinética de rugosidad -derivadas de la geometría fractal- [71-73, 75], para caracterizar y modelar las series de tiempo de las fluctuaciones de sistemas complejos del mundo real.

Dado lo anterior, se puede intentar establecer la clase de universalidad para la dinámica de fluctuación, asociada con el conjunto de dos exponentes de escalamiento independientes, por ejemplo ζ y z , análoga a la clase de universalidad, para fenómenos que implican la cinética de rugosidad [61, 73, 76, 77].

Las clases de universalidad de la dinámica, son determinadas por la dimensionalidad, las leyes de conservación, la simetría de los parámetros de orden, el rango de las interacciones, y el acoplamiento de los parámetros de orden para las cantidades conservadas [76,77]. Con el conocimiento de la clase de universalidad, es viable comprender los procesos fundamentales que gobiernan la dinámica de las emisiones de CO₂. Por consiguiente, es posible construir la ecuación de la cinética, que gobierna la dinámica de las fluctuaciones del indicador de emisiones de CO₂ en México. Asimismo, la representación de las series de tiempo del valor absoluto de retornos logarítmicos del índice de emisiones, como interfaces en movimiento, permite emplear las ecuaciones de cinética, para la modelación de la dinámica de fluctuaciones, siempre y cuando, pertenezcan a la misma clase de universalidad. Es por esto, que se espera que la dinámica de las series de tiempo de fluctuaciones de los índices de emisiones de CO₂ en México, sea descrita por la ecuación tipo Langevin:

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = \Phi\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right) + \eta(\tau, t) + F, \quad (7)$$

donde F es la fuerza externa, en tanto el término de ruido $\eta(\tau, t)$, y la forma real de la función Φ , están determinados por un modelo particular que obedece a la correspondiente clase de universalidad [61,73,75].

4. Conclusiones

La distribución de emisiones de CO₂ en México no responde inmediatamente a la cantidad de información que fluye cotidianamente, sino que reacciona gradualmente en cierto periodo, ya que, conforme se aumenta el intervalo de tiempo de las fluctuaciones (valor absoluto de los retornos logarítmicos), se tiene un mejor despliegue de las fluctuaciones y de la función de estructura de las mismas a una ley de potencia, incrementándose las correlaciones (o memoria) a largo plazo. Los resultados obtenidos, indican la existencia del comportamiento de escalamiento dinámico análogo al escalamiento dinámico *ansatz* de Family-Vicsek, para la cinética de rugosidad de una interface en movimiento. De hecho, las relaciones de escalamiento, implican que la función de estructura de las series de tiempo de fluctuaciones, exhiben el comportamiento de escalamiento dinámico. Los resultados obtenidos, muestran la posibilidad de emplear una ecuación apropiada tipo Langevin para modelar el comportamiento futuro de los índices de emisiones de CO₂ en México, el cual puede ser un soporte robusto, para que los tomadores de decisiones del gobierno mexicano, estén en mejores condiciones de analizar el impacto que pueden tener las políticas ambientales. A partir de los intervalos de tiempo, y su tendencia a curvas de leyes de potencia, se estableció la necesidad de contar con datos históricos, de al menos 30 años en series de tiempo para realizar análisis robustos aplicados al fenómeno de emisiones de CO₂ o de cualquier otro fenómeno complejo, por la universalidad que ofrecen los exponentes ζ , z y β .

Referencias

1. Li, L., Lei, Y., He, C., Wu, S., Chen, J., *Prediction on the Peak of the CO₂ Emissions in China Using the STIRPAT Model*. Advances in Meteorology, 2016: p. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/5213623>.
2. Xu, C., Kohler, T.A., Lenton, T.M., Svenning, J.C., Scheffer, M., *Future of the human climate niche*, Proc Natl Acad Sci USA, 2020. **117**(21): p. 11350-11355. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1910114117>.
3. Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K.L., Engelbrecht, F., Guiot, J., Hijioka, Y., Mehrotra, S., Payne, A., Seneviratne, S.I., Thomas, A., Warren, R., Zhou, G., *Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* 2018. Geneva: IPCC. ISBN: In Press.
4. Pachauri, R.K., Meyer, L.A., *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2014. Geneva: IPCC. ISBN: 978-92-9169-143-2.
5. Pope, C.A., Dockery, D.W., *Air pollution and life expectancy in China and beyond*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013. **110**(32): p. 12861-12862. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1310925110>.
6. Jacobson, T.A., Kler, J.S., Hernke, M.T., Braun, R.K., Meyer, K.C., Funk, W.E., *Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide*. Nature Sustainability, 2019. **2**: p. 691-701. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0323-1>.
7. Schaefer, K.E., *Effects of increased ambient CO₂ levels on human and animal health*. Experientia, 1982. **38**(10): p. 1163-1168. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf01959726>.
8. Azuma, K., Kagi, N., Yanagi, U., Osawa, H., *Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor*

- performance. *Environment International*, 2018. **121**(1): p. 51-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.059>.
9. Robertson, D.S., *Health effects of increase in concentration of carbon dioxide in the atmosphere*. *Current Science*, 2006. **90**(12): p. 1607-1609.
10. Grimmond, C.S.B., King, T.S., Cropley, F.D., Nowak, D.J., Souch, C., *Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago*. *Environmental Pollution*, 2002. **116**(1): p. S243-S254. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00256-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00256-1).
11. Nakicenovic, N., Alcamo, J., Grubler, A., Riahi, K., Roehrl, R.A., Rogner, H.H., Victor, N., *Special Report on Emissions Scenarios (SRES), A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2000. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0-521-80493-0.
12. Krupa, S.V., Kickert, R.N., *The Greenhouse effect: impacts of ultraviolet-B (UV-B) radiation, carbon dioxide (CO₂), and ozone (O₃) on vegetation*. *Environ Pollut*, 1989. **61**(4): p. 263-393. DOI: [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(89\)90166-8](https://doi.org/10.1016/0269-7491(89)90166-8).
13. Wen, L., Yuan, X., *Forecasting CO₂ emissions in Chinas commercial department, through BP neural network based on random forest and PSO*. *Science of the Total Environment*, 2020. **718**: p. 37194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137194>.
14. Marland, G., Buchholz, T., Kowalczyk, T., *Accounting for Carbon Dioxide Emissions. Journal of Industrial Ecology*, 2013. **17**(3): p. 340-342. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12043>.
15. Irastorza-Trejo, V., Fernández-Martínez, X., *Balance nacional de energía y su relación con el inventario nacional de emisiones*. *Revista internacional de estadística y geografía*, 2010. **1**(1): p. 44-58.
16. Monastersky, R., *Global carbon dioxide levels near worrisome milestone*. *Nature*, 2013. **497**: p. 13-14. DOI: <https://doi.org/10.1038/497013a>.
17. Pérez-Suárez, R., López-Menéndez, A.J., *Growing green? Forecasting CO₂ emissions with Environmental Kuznets Curves and Logistic Growth Models*. *Environmental Science & Policy*, 2015. **54**: p. 428-437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.07.015>.
18. Tong, M., Duan, H., He, L., *A novel Grey Verhulst model and its application in forecasting CO₂ emissions*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021. p. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12137-5>.
19. Pao, H.T., Fu, H.C., Tseng, C.L., *Forecasting of CO₂ emissions, energy consumption and economic growth in China using an improved grey model*. *Energy*, 2012. **40**(1): p. 400-409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.037>.
20. Bierwirth, P., *Carbon dioxide toxicity and climate change: a major unapprehend risk for human health*. Australian National University, 2020. **1**: p. 1-26. DOI: <https://doi.org/10.13140>.
21. Ebi, K.L., Loladze, I., *Elevated atmospheric CO₂ concentrations and climate change will affect our food's quality and quantity*. *The Lancet Planetary Health*, 2019. **3**(7): p. e283-e284. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30108-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30108-1).
22. González-Elizondo, M., Jurado-Ybarra, E., González-Elizondo, S., Aguirre-Calderón, Ó.A., Jiménez-Pérez, J.J., Návar-Cháidez, J., *Cambio climático mundial: origen y consecuencias*. *Ciencia UANL*, 2003. **6**(3): p. 1-10.
23. Mann, M., Bradley, R., Hughes, M., *Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations*. *Geophysical Research Letters*, 1999. **26**(6): p. 759-762. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/1999GL900070>.

24. Mann, M.E., Bradley, R.S., Hughes, M.K., *Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries*. Nature, 1998. **392**: p. 779-787. DOI: <https://doi.org/10.1038/33859>.
25. Jacoby, G.C., D'Arrigo, R.D., *Tree rings, carbon dioxide, and climatic change*. Proc Natl Acad Sci USA, 1997. **94**: p. 8350-8353. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.94.16.8350>.
26. Jones, P.D., Osborn, T.J., Briffa, K.R., *The Evolution of Climate Over the Last Millennium*. Science, 2001. **292**(5517): p. 662-667. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1059126>.
27. Jones, R.G., Murphy, J.M., Noguer, M., *Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1995. **121**: p. 1413-1449. DOI: <https://doi.org/10.1002/QJ.49712152610>.
28. Jones, R.G., Murphy, J.M., Noguer, M., Keen, A.B., *Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. II: Comparison of driving and regional model responses to a doubling of carbon dioxide*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1997. **123**: p. 265-292. DOI: <https://doi.org/10.1002/QJ.49712353802>.
29. Labraga, J.C., *The climate change in South America due to a doubling in the CO₂ concentration: inter comparison of general circulation model equilibrium experiments*. International Journal of Climatology, 1997. **17**: p. 377-398. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19970330\)17:4<3C377::AID-OC129>3E3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19970330)17:4<3C377::AID-OC129>3E3.0.CO;2-P).
30. Villers, L., Trejo, I., *Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico*. Climate Research-CLIMATE RES, 1997. **9**(1): p. 87-93. DOI: <http://dx.doi.org/10.3354/cr009087>.
31. Villers, L., Trejo, I., *Impacto del Cambio Climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México*. Interciencia, 1998. **23**(1): p. 10-19.
32. Molina, M.J., Rowland, F.S., *Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone*. Nature, 1974. **249**: p. 810-812. DOI: <https://doi.org/10.1038/249810a0>.
33. Sánchez, C. A., *Evolución del concepto de cambio climático y su impacto en la salud pública del Perú*. Revista peruana de Medicina Experimental y Salud Publica, 2016. **33**: p. 128-138. DOI: <http://dx.doi.org/10.17843/rpmesp.2016.331.2014>.
34. Chang, R., Goldsby, K.A., *Química 2012*, China: McGraw-Hill. ISBN: 9786071513939.
35. Barnett, T., Hasselmann, K., Chelliah, M., Delworth, T., Hegerl, G., Jones, P., Rasmusson, E., Roeckner, E., Ropelewski, C., Santer, B., Tett S., *Detection and Attribution of Recent Climate Change: A Status Report*. American Meteorological Society, 1999. **80**: p. 2631-2660. DOI: <https://doi.org/10.1175/1520-0477>.
36. Mandelbrot, B., *La geometría fractal de la naturaleza* 2002. Barcelona: Tusquets Editores S.A. ISBN: 978-84-8310-549-8.
37. Mandelbrot, B., *Los Objetos Fractales* 2002. Barcelona: Tusquets Editor. ISBN: 978-84-7223-458-1.
38. Brown, C., Liebovitch, L., *Fractal Analysis* 2010. Thousand Oaks: Sage Publications. ISBN: 9781412971652.
39. Hart, C., *Doing a Literature Review: Releasing the Social Science Research Imagination* 2018. Thousand Oaks: SAGE Publications. ISBN: 978-1526419217.
40. Jesson, J., Matheson, L., Lacey, F.M., *Doing Your Literature Review: Traditional and Systematic Techniques* 2011. Thousand Oaks: SAGE Publications. ISBN: 978-1-84860-153-6.
41. Machi, L. A., McEvoy, B.T., *The Literature Review: Six Steps to Success* 2009. Thousand Oaks: SAGE Publications. ISBN: 978-1-4522-4088-6.

42. Ridley, D., *The Literature Review: A Step-by-Step Guide for Students* 2012. Thousand Oaks: SAGE Publications. ISBN: 978-1-4462-0142-8.
43. Serenko, A., Bontis, N., *Investigating the current state and impact of the intellectual capital academic discipline*. Journal of Intellectual Capital, 2013. **14**(4): p. 476-500. DOI: <https://doi.org/10.1108/JIC-11-2012-0099>.
44. Walker, M., *Cómo escribir trabajos de investigación* 2012. Ciudad de México: Gedisa Mexicana. ISBN: 978-84-7432-724-3.
45. Creme, P., Lea, R., *Escribir en la universidad* 2017. Ciudad de México: Gedisa Mexicana. ISBN: 84-7432-698-2.
46. Lee, K., Oh, W., *Analysis of CO₂ emissions in APEC countries: A time-series and a cross-sectional decomposition using the log mean Divisia method*. Energy Policy, 2006. **34**(17): p. 2779-2787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.04.019>.
47. Magazzino, C., *The relationship between real GDP, CO₂ emissions, and energy use in the GCC countries: A time series approach*. Cogent Economics & Finance, 2016. **4**(1): p. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1080/23322039.2016.1152729>.
48. Hosseini, S.M., Saifoddin, A., Shirmohammadi, R., Aslani, A., *Forecasting of CO₂ emissions in Iran based on time series and regression analysis*. Energy Reports, 2019. **5**: p. 619-631. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.05.004>.
49. Taghavifar, H., Mardani, A., Mohebbi, A., Khalilarya, S., Jafarmadar, S., *Appraisal of artificial neural networks to the emission analysis and prediction of CO₂, soot, and NO_x of n-heptane fueled engine*. Journal of Cleaner Production, 2016. **112**: p. 1729-1739. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.035>.
50. Nishan, A., Ashiq, M., *Role of energy use in the prediction of CO₂ emissions and economic growth in India: evidence from artificial neural networks (ANN)*. Environ Sci Pollut Res Int, 2020. **27**: p. 23631-23642. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08675-7>.
51. Altikat, S., *Prediction of CO₂ emission from greenhouse to atmosphere with artificial neural networks and deep learning neural networks*. International Journal of Environmental Science and Technology, 2021. **21**(10): p. 3079-3083. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-020-03079-z>.
52. Wu, L., Liu, S., Liu, D., Fang, Z., Xu, H., *Modeling and forecasting CO₂ emissions in the BRICS (Brazil, Russia, India, China, and South Africa) countries using a novel multi-variable grey model*. Energy, 2015. **79**(1): p. 489-495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.052>.
53. Lin, C.S., Liou, F.M., Huang, C.P., *Grey forecasting model for CO₂ emissions: A Taiwan study*. Applied Energy, 2011. **88**(11): p. 3816-3820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.013>.
54. Dutta, S., *A Multifractal Analysis of Time Series of Atmospheric CO₂ Concentration*. International Journal of Global Warming, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJGW.2018.10006662>.
55. Özceylan, E., *Forecasting CO₂ emission of Turkey: Swarm intelligence approaches*. International Journal of Global Warming, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJGW.2016.075450>.
56. Family, F., Vicsek, T., *Dynamics of Fractal Surfaces* 1991. Singapore: World Scientific. ISBN: 978-9810207205.
57. Creswell, J. W., *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, 2014. Thousand Oaks: SAGE Publications. ISBN: 978-1-4522-2609-5.
58. Hernández-Sampieri, R., Mendoza, C., *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* 2018. Ciudad de México: Mc Graw Hill Education.

59. Matamoros, O., Balankin, A., Hernández, L., *Metodología de predicción de precios del petróleo basada en dinámica fractal*. Científica, 2005. **9**(1): p. 3-11.
60. Lina-Reyes, X., Morales-Matamoros, O., Moreno-Escobar, J.J., Contreras-Troya, T.I., *Dinámica fractal de niños con trastornos en el aprendizaje en México*. Científica, 2019. **23**(1): p. 31-41.
61. Balankin, A., *Statistical, nonlinear and soft matter physics*, 2007. **76**(5): p. 1-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.76.056120>.
62. Kantz, H., Schreiber, T., *Nonlinear Time Series Analysis* 2003. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN: 9780511755798.
63. Plerou, V., Gopikrishnan, P., Rosenow, B., Amaral, L., Stanley, H., *Universal and Nonuniversal Properties of Cross Correlations in Financial Time Series*. Physical Review Letters, 1999. **83**(7): p. 1471-1474. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.1471>.
64. Krawiecki, A., Hołyst, J. A., Helbing, D., *Volatility clustering and scaling for financial time series due to attractor bubbling*. Phys Rev Lett, 2002. **89**(15): p. 158701-158704. DOI: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.89.158701>.
65. Constantin, M., Sarma, S.D., *Volatility, persistence, and survival in financial markets*. Phys Rev, 2005. **72**(5): p.1-12. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.72.051106>.
66. Balankin, A., Matamoros, O., *Devil's-staircase-like behavior of the range of random time series with record-breaking fluctuations*. Physical review E. Statistical, nonlinear and soft matter physics, 2005. **71**(6): p. 651061-651064. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.71.065106>.
67. Balankin, A., Paredes, R., Susarrey, O., Morales, D., Vacio, F., *Kinetic Roughening and Pinning of Two Coupled Interfaces in Disordered Media*. Physical review letters, 2006. **96**(5): p. 56101-56104. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.056101>.
68. Podobnik, B., Ivanov, P., Biljakovic, K., Horvatic, D., Stanley, H., Grosse, I., *Fractionally integrated process with power-law correlations in variables and magnitudes*. Physical review E. Statistical, nonlinear, and soft matter physics, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.72.026121-7>.
69. Oleschko, K., Korvin, G., Balankin, A.S., Khachaturov, R.V., Flores, L., Figueroa, B., Urrutia, J., Brambila, F., *Fractal scattering of microwaves from soils*. Phys Rev Lett, 2002. **89**(18): p. 188501-188504. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.188501>.
70. Ashkenazy, Y., Ivanov, P., Havlin, S., Peng, C.K., Goldberger, A., Stanley, H., *Magnitude and Sign Correlations in Heartbeat Fluctuations*. Physical review letters, 2001. **86**(9): p. 1900-1903. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.1900>.
71. Ramasco, J.J., López, J.M., Rodríguez, M.A., *Generic Dynamic Scaling in Kinetic Roughening*. Physical Review Letters, 2000. **84**(10), p. 2199-2202. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.2199>.
72. Antal, M., Droz, T., Györgyi, G., Racz, Z., *1/f Noise and Extreme Value Statistics*. Physical review letters, 2002. **87**(24): p. 1-4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.240601>.
73. Barabási, A.L., Stanley, H.E., *Fractal Concepts in Surface Growth* 1995. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN: 9780511599798.
74. Patiño, V.F., Nuchera, A.H., *La cooperación en los procesos de transferencia de conocimiento científico-tecnológico en México. Una evidencia empírica*. Revista Innovar, 2012. **22**(43): p. 145-163.
75. Meakin, P., Chirikov, B., Cvitanovic, P., Moss, F., Swinney, H., *Fractals, Scaling and Growth Far from Equilibrium* 1998. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN: 9780521452533.
76. Ódor, G., *Universality classes in nonequilibrium lattice systems* 2008. Toh Tuck Link: World Scientific Publishing Company. ISBN: 978-981-281-227-8.

77. Balankin, A.S., *Physics of fracture and mechanics of self-affine cracks*. Engineering Fracture Mechanics, 1997. 57(2-3): p. 135-203. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(97\)00007-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(97)00007-6).

Agradecimientos

Los autores agradecen las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo al Instituto Politécnico Nacional, a la Secretaría de Investigación y Posgrado con el proyecto SIP 20210297, a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA), a la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, al CET 1 Walter Cross Buchanan, al CONACyT, y al Programa de Estímulo al Desempeño Docente (PEDD del IPN).

Conflicto de Intereses

No hay conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Mario Aguilar Fernández. ORCID: 0000-0003-2621-8692
Desarrolla la investigación y redacta el manuscrito.

Oswaldo Morales Matamoros. ORCID: 0000-0002-3184-4869.
Desarrolla la investigación y redacta el manuscrito.

Brenda García Jarquín. ORCID: 0000-0001-7192-2342
Administración y supervisión del proyecto de investigación.

Paola Fortanell Estrada ORCID: 0000-0003-1898-7475.
Administración, supervisión, validación. Redacción y edición del manuscrito.