

DIMENSIÓN FRACTAL CRITERIO DE IDENTIFICACIÓN DE ECOS ULTRASÓNICOS EN LA ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA DE MANERA NO INVASIVA

Mónica Vázquez-Hernández^a, Pedro Acevedo-Contla^b

Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas
Ciudad de México, México

^amonica.vazquez@iimas.unam.mx, ^bpedro.acevedo@iimas.unam.mx

RESUMEN

En este trabajo se estima la dimensión fractal (FD) utilizando los algoritmos de Katz y de Higuchi directamente en el dominio del tiempo, con el objetivo de establecer un criterio que permita identificar el número de copias escaladas (ecos) contenidas dentro de un tren de pulsos ultrasónicos, diferenciando las oscilaciones asociadas a ruido eléctrico de los ecos. Así como encontrar dos o más trenes de ecos ultrasónicos idénticos o similares donde la única diferencia entre ellos sea que uno está desplazado en el tiempo respecto a otro (referencia) debido a un incremento en la temperatura en el medio de propagación.

Analizando las señales ultrasónicas simuladas numéricamente (backscattering), encontramos que existe un factor lineal entre la relación señal-ruido y la dimensión fractal. Es decir, entre mayor sea la amplitud del ruido contenido en la señal mayor será la dimensión fractal.

Palabras clave: Backscattering, temperatura, dimensión fractal

SUMMARY

In this work the fractal dimension (FD) is estimated using the Katz and Higuchi algorithms directly in the time domain, to establish a criterion that allows identifying the number of scaled copies (echoes) contained within a train of ultrasonic pulses, differentiating the oscillations associated with electrical noise from the echoes. As well as finding two or more trains of identical or similar ultrasonic echoes where the only difference between them is that one is displaced in time with respect to another (reference) due to an increase in the temperature in the propagation medium.

Analyzing the numerically simulated ultrasonic signals (backscattering), we find that there is a linear factor between the signal-to-noise ratio and the fractal dimension. That is, the greater the amplitude of the noise contained in the signal, the greater the fractal dimension will be.

Key words: Backscattering, temperature, fractal dimension

1. INTRODUCCIÓN

En trabajos anteriores [1] hemos empleado la transformada wavelet como herramienta para estimar las variaciones de temperatura entre dos o más trenes de ecos. Gracias a esta experiencia previa identificamos que es necesario un primer procesamiento para determinar de manera automática o semiautomática las fluctuaciones que corresponden a un eco y cuáles eran sólo ruido eléctrico producido por el pulso de excitación del transductor ultrasónico, para elegir la escala wavelet adecuada.

Malderlbrot y Van Ness extendieron el concepto de análisis fractal a las series de tiempo. Desde entonces el análisis fractal se ha convertido en una herramienta invaluable en el estudio del comportamiento de series de tiempo. La dimensión fractal (FD) ha sido frecuentemente usada en el análisis de señales biomédicas que exhiben comportamiento no estacionario y características transitorias. La FD es una dimensión no entera que describe el grado de irregularidad de una señal en el tiempo. Existe una relación entre la señal de referencia y la escala a la cual se observa una forma auto-similar. A nosotros nos interesa saber el número de copias escaladas (ecos) contenidas dentro de un tren de pulsos ultrasónicos, en el caso de las señales simuladas cada tren contiene 3 ecos contaminados con ruido. También es de nuestro interés encontrar dos o más secuencia de ecos ultrasónicos idénticos o similares donde la única diferencia sea que una está desplazada en el tiempo respecto a otra debido a un incremento en la temperatura [2-4].

Para evaluar el proceso de escalamiento dos índices son comúnmente empleados. 1) La dimensión fractal y 2) El exponente de Hurst. Los cuales son llamados parámetros fractales y miden qué tanto se desvía una curva fractal de la función que se usa para aproximarse a ella.

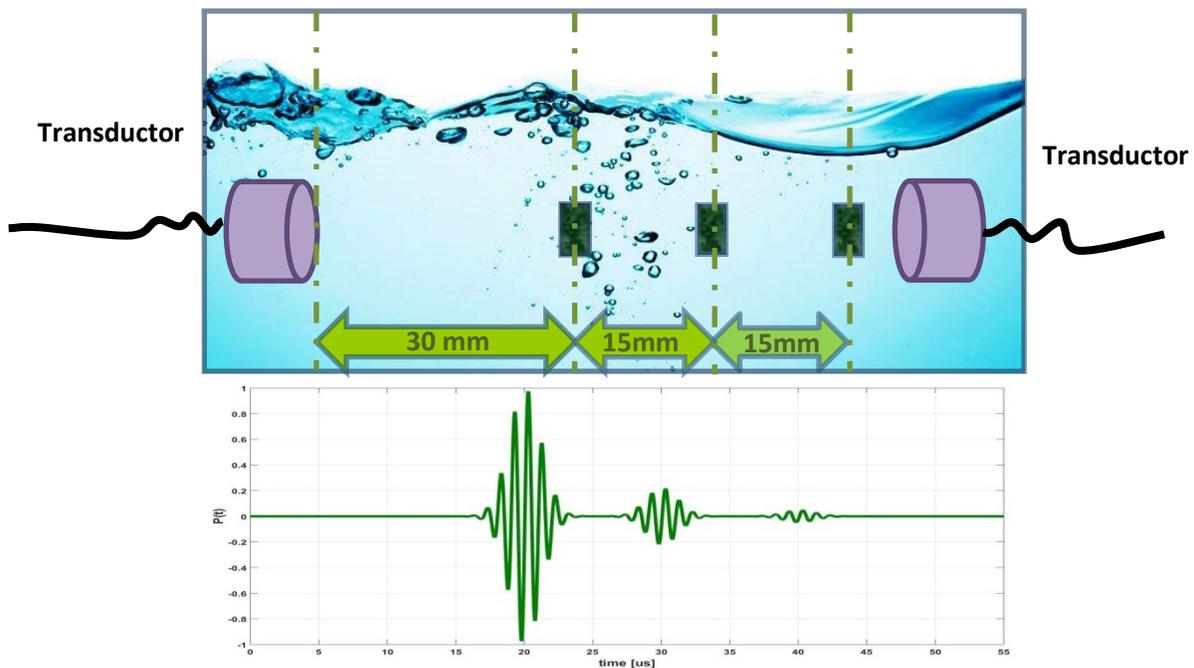


Figura 1. Diagrama esquemático de la configuración experimental

Hay principalmente dos formas aproximadas para generar una estructura fractal. Una es hacerla crecer a partir de un objeto y la otra es construir las divisiones subsecuentes de una estructura original.

En la figura 1 podemos observar una señal ultrasónica que se propaga en agua y que se encuentra tres obstáculos en su camino. La señal se atenúa en amplitud conforme se aleja del transductor emisor. La distancia a la que se encuentran los obstáculos también es constante por lo que las variaciones en la velocidad de propagación son debidas a cambios en la temperatura del medio.

2. METODOLOGÍA

Las señales ultrasónicas utilizadas en este trabajo son señales backscattering simuladas numéricamente aplicando las ecuaciones 1 y 2, que corresponden a señales emitidas por un transductor que oscila a una frecuencia de resonancia (f_0) de 1MHz y ancho de banda (B) de 300 kHz, que viajan en agua y encuentran tres obstáculos en su trayectoria.

$$P(t) = -te^{-4B^2t^2} \sin(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

La señal ultrasónica de backscattering recibida $r(t)$, se define como [5]

$$r(t) = \sum_{k=1}^N P(t - (2x_k)/c) \quad (2)$$

Donde x_k es la ubicación del cambio de medio (centro dispersor) k , c es la velocidad del ultrasonido en el medio. [1] En el caso de nuestra señal, el primer obstáculo se fijó en 15 mm de la cara del transductor emisor, el segundo a 30 mm y el tercero a 45 mm.

Por otro lado, la velocidad de propagación del ultrasonido en agua se simuló a diferentes temperaturas utilizando para ello la ecuación 3 llamada ecuación de Bilianuk yWong [6-7]

$$c = 1.40238742 \times 10^3 + 5.03821344 T - 5.80539349 \times 10^{-2} T^2 + 3.32000870 \times 10^{-4} T^3 - 1.44537900 \times 10^{-6} T^4 + 2.99402365 \times 10^{-9} T^5 \quad (3)$$

Analizar los trenes de ecos ultrasónicos con fractales, supone emplear métodos matemáticos que revelan la autosimilitud de las señales. Estimar la FD directamente en el dominio del tiempo, es considerar la señal original una figura geométrica. El cálculo de la FD de formas de onda es útil para la detección de transitorios, con la adicional ventaja de ser un cálculo rápido.

Los métodos más importantes para el cálculo de la FD de una forma de onda son 1) el algoritmo de Higuchi, 2) el algoritmo de Katz y 3) el algoritmo de Petrosian.

En el Algoritmo de Katz, se compara el número actual de unidades que componen una curva con el mínimo número de unidades requerido para reproducir un patrón de la misma extensión espacial.

El cálculo de la FD propuesto por Katz [4] se deriva directamente de la forma de onda. Se describe como la porción de la longitud de la curva, calculado como la suma de distancias Euclidianas entre dos puntos sucesivos, dividida por la distancia máxima de cualquier punto en la trama en cuestión desde el primer punto. Podemos interpretarlo como la relación de la longitud total de la curva en comparación con la línea recta correspondiente a la distancia Euclideana máxima desde el primer punto. La FD compara el número actual de unidades que componen una curva con el mínimo número de unidades requerido para reproducir un patrón de la misma extensión espacial.

Por otra parte, el algoritmo de Higuchi, se basa en la secuencia de tiempo original $x(1), x(2), \dots, x(n)$. Constituye la señal a ser analizada y a partir de esta secuencia original se construyen k nuevas series de tiempo x_m^k , donde m indica el valor inicial, k indica el intervalo de tiempo discreto entre puntos. Para cada una de las curvas o serie de tiempo x_m^k construida. Se calcula una longitud promedio para todas las series de tiempo teniendo el mismo intervalo de tiempo (o escala) k , como la media de las k longitudes $L_m(k)$ para $M=1, \dots, k$.

Este procedimiento se repite para cada k que van desde 1 a k_{max} , produciendo una sumatoria de longitudes $L(k)$. La longitud promedio total para la escala k , $L(k)$, es proporcional a k^D , donde D es la dimensión fractal por el método de Higuchi. En la curva de $\ln(L(k))$ vs. $\ln(1/k)$, la pendiente del mejor ajuste por mínimos cuadrados es el estimado de la dimensión fractal.

En la práctica, las series de tiempo siempre contienen algo de ruido, por lo que hicimos una primera evaluación por ventana y calculamos la FD para ecos simulados contaminados con cierto nivel de ruido y encontramos los valores que se muestran en la Tabla 1.

3. RESULTADOS

De los resultados mostrados en la tabla 1 se puede deducir que existe un factor lineal entre la relación señal a ruido y la dimensión fractal. Es decir, entre mayor sea la amplitud del ruido contenido en la señal mayor la dimensión fractal. La FD de una señal con baja complejidad esa igual a 1 y entre más compleja es la señal la FD se acerca a 2.

Tabla 1. Dimensión fractal del primer eco de la secuencia de ecos simulada con distintos niveles de ruido

Amplitud máxima del Ruido [V]	Amplitud máxima del Eco	Dimensión Fractal Katz	Dimensión Fractal Higuchi
0	1	1.5672	1.5295
0.01	1	1.6064	1.5387
0.02	1	1.6589	1.5501
0.03	1	1.7136	1.5648
0.04	1	1.7763	1.5759
0.05	1	1.8169	1.5869
0.06	1	1.8694	1.5973
0.07	1	1.95	1.6075
0.08	1	1.97	1.6190

En el caso de las señales presentadas en este trabajo una vez que se define el patrón (primer eco), el cual se establece como señal de referencia y se calcula su dimensión fractal, se pueden encontrar los siguientes ecos analizando la señal completa. El algoritmo Higuchi fue usado para identificar los ecos en un tren de pulsos ultrasónicos de 3 ecos. Esto se realizó calculando la FD por ventanas hasta encontrar un FD igual o parecida a la establecida como referencia. En la figura 2, vemos que somos capaces de identificar el eco en una señal simulada y en la figura 3 observamos cómo se identificó el eco en una señal real. Después comparar estas señales eco, se comparan con una señal de referencia y determinar los retardos de tiempo usando wavelets.

También es posible determinar dos señales iguales o similares (trenes de ecos), estableciendo una secuencia de ecos como referencia, de esta forma todos los trenes similares se analizan y se determina el retardo de tiempo entre ellos, lo cual nos resulta muy útil en la estimación de temperatura.

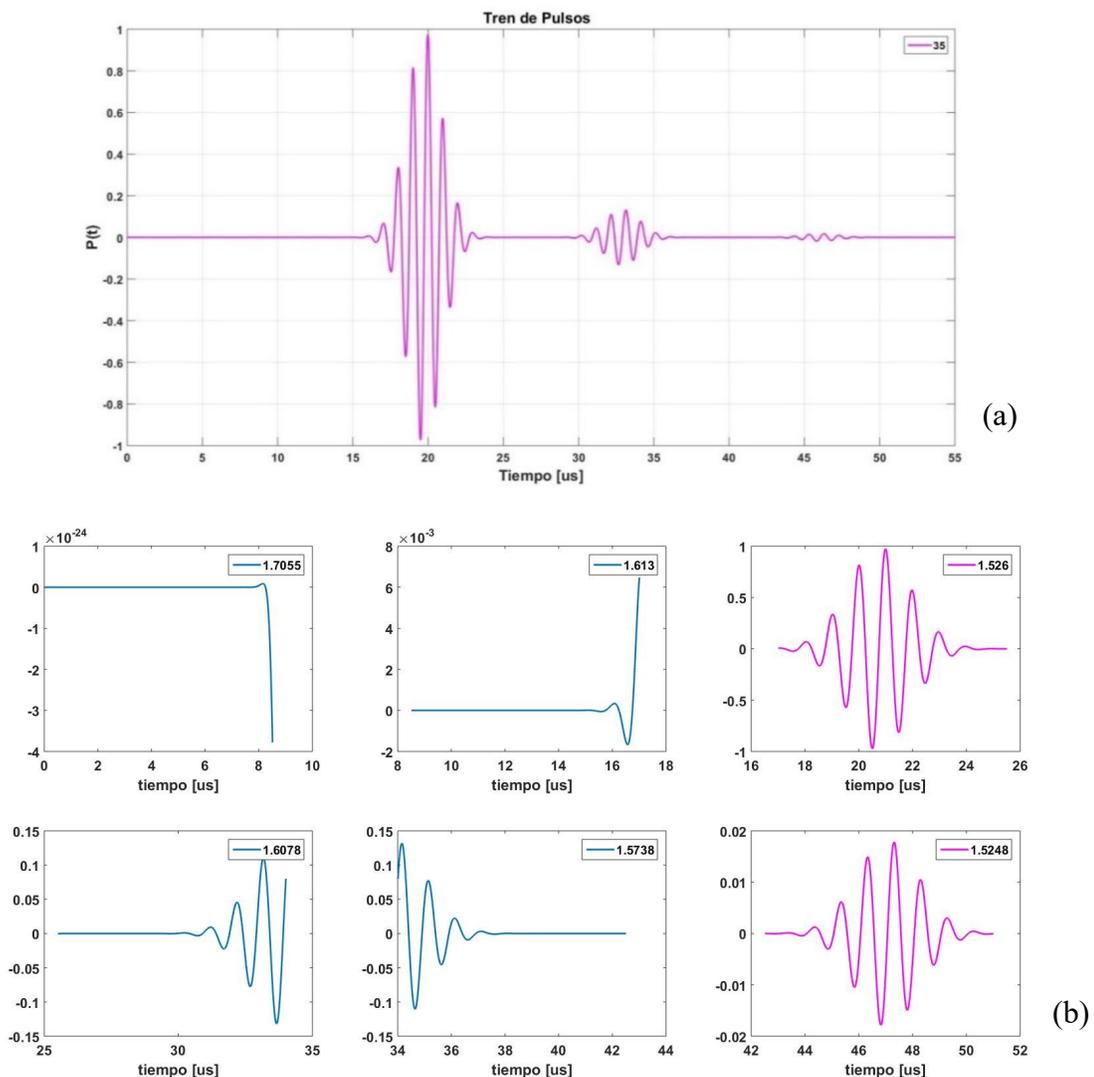


Figura 2. Señal simulada (a) Tren de pulsos simulado (b) FD por ventanas

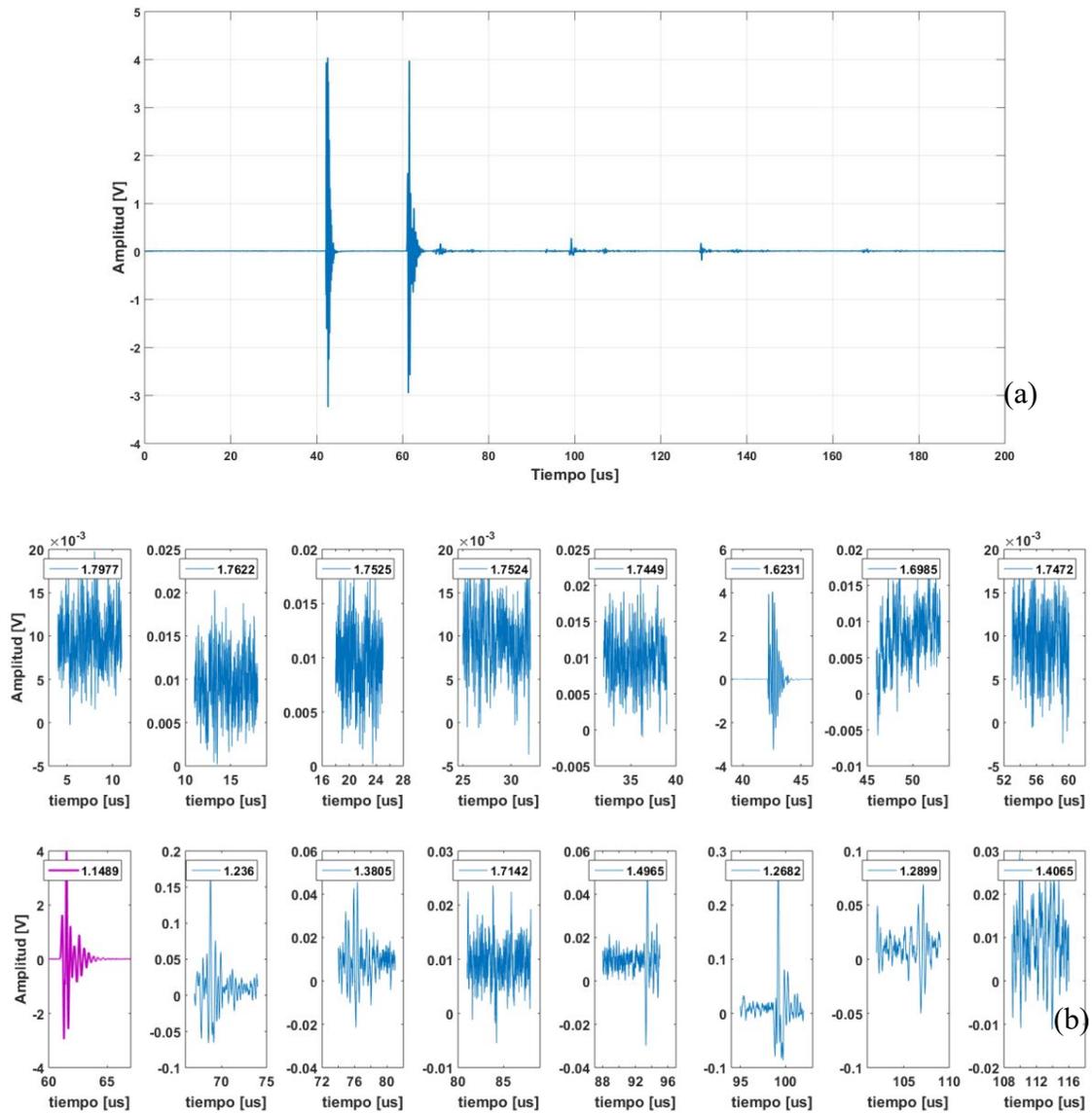
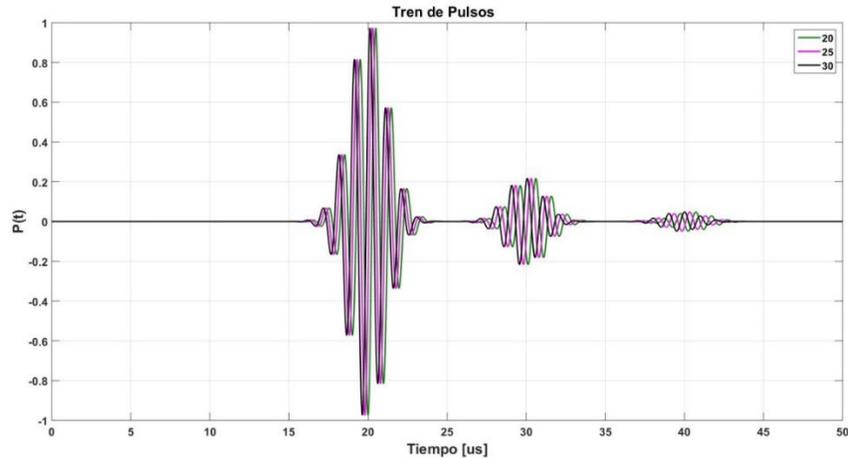
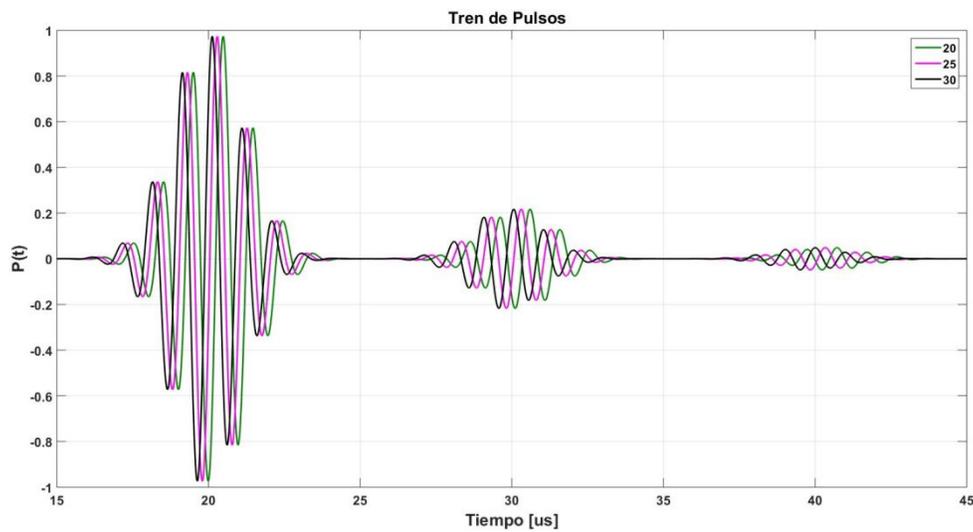


Figura 3. Señal ultrasónica real que se propaga en agua (a) Tren de pulsos simulado (b) FD por ventanas



(a)



(b)

Figura 4. (a)Trenes de ecos simulados a diferentes temperaturas (b) acercamiento a los ecos

4. CONCLUSIONES

La dimensión topológica de una serie de tiempo tiene que ser un valor entre 1 y 2, dado que es una señal unidimensional. La FD parece un buen criterio para hacer una preselección de las zonas de interés de la señal (ecos.)

La estimación de temperatura en tejido suave de manera no invasiva es una de las potenciales aplicaciones del análisis de señales ultrasónicas que como las utilizadas en este trabajo se propagan en un medio conocido en distancias fijas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la DGAPA proyecto PAPIIT IN-106016.

5. REFERENCIAS

- [1] Pedro Acevedo Contla and Mónica Vázquez Hernández. Detection of delay times in the estimation of temperature changes in water using the Wavelet transform. 14th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), Mexico, City. Mexico. October 25-27, 2017. ISBN: 978-1-5386-3405-9
- [2] Jesús Rubén Azor Montoya. 25 de mayo 2018. “Competencias emprendedoras en las Ingenierías”. Trabajando con Fractales. Universidad de Mendoza. Facultad de Ingeniería. Recuperado de:
<http://www.um.edu.ar/catedras/ANASEN/document/fractal/>.
- [3] Olivia Delgadillo Ruiz, Juan Antonio Leos-Rodríguez, Pedro Pablo Ramírez Moreno, Ricardo David Valdez Cepeda. Análisis fractal de series de tiempo de anomalías de variables de frijol en México. CIENCIA ergo-sum, ISSN 1405-0269, Vol. 22-3, noviembre 2015-febrero 2016. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México. Pp. 233-241
- [4] Fernandez Fraga Santiago y Rangel Mondragon Jaime. Comparativo de los Algoritmos de Dimensión Fractal Higuchi, Katz y multiresolución de conteo de cajas en señales EEG basadas en potenciales relacionados por eventos. Revista EIA, ISSN 1794-1237, Año XIV, volumen 14, edición 27, enero-junio 2017. Pp. 73-83. Envigado Colombia.
- [5] P Mohana Shankar. A model for ultrasonic scattering from tissues based on the K distribution. Phys. Med. Bid. 40 (1995) 1633-1649.
- [6] N. Bilianuk and Wong. Speed of sound in pure water as a function of temperature, J. Acoust. Soc. Am. 93(3) pp 1609-1612,
- [7] N. Bilaniuk and G. S. K. Wong (1996), Erratum: Speed of sound in pure water as a function of temperature, J. Acoust. Soc. Am. 99(5), p 3257.