



## Artículo original

# Aplicación de la ley de Zipf-Mandelbrot al diagnóstico de la dinámica cardíaca normal y aguda

## *Application of the law of Zipf-Mandelbrot to the diagnosis of normal and acute cardiac dynamics*

**Javier Rodríguez**

Médico, Director, Grupo Insight, Centro de Investigación, Clínica del Country, Bogotá, Colombia

**Signed Prieto**, Investigadora, Centro de Investigación, Clínica del Country, Bogotá, Colombia

**Catalina Correa**, Psicóloga, Centro de Investigación, Clínica del Country, Bogotá, Colombia

**Frank Pernet**, Médico, Centro de Investigación, Clínica del Country, Bogotá, Colombia

**Dharma Rodríguez**, Médica, Centro de Investigación, Clínica del Country, Bogotá, Colombia

**Sefirot Rodríguez**, Investigadora, Centro de Investigación, Clínica del Country, Bogotá, Colombia

**Katherine Páez**, Estudiante de Medicina, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia

**Jairo Jattin**, Médico, Centro de Investigación, Clínica del Country, Bogotá, Colombia

**Andrés Ibarra**, Estudiante de Medicina, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia

**Eduardo Méndez**, Estudiante de Medicina, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia

### Acceda a este artículo en siicsalud

[www.siicsalud.com/dato/experto.php/159579](http://www.siicsalud.com/dato/experto.php/159579)

Recepción: 06/02/2019 - Aprobación: 14/02/2020  
 Primera edición: 27/02/2020

Enviar correspondencia a: Javier Rodríguez,  
 Centro de Investigación, Clínica del Country,  
 Bogotá, Colombia  
[grupoinight2025@gmail.com](mailto:grupoinight2025@gmail.com)



+ Especialidades médicas relacionadas,  
 producción bibliográfica y referencias  
 profesionales de los autores.



[www.dx.doi.org/10.21840/siic/159579](http://www.dx.doi.org/10.21840/siic/159579)

### Abstract

**Background:** The capacity of statistical fractals in the evaluation of the complexity of different systems whose dynamics can be evaluated from the frequencies of a variable is known. This is why the measure of the statistical fractal dimension is used, which can be calculated with the Zipf-Mandelbrot law, this mathematical law has been applied in cardiology evaluating the degree of complexity of cardiac dynamics. In the present work, the Zipf-Mandelbrot law was applied together with the diagnostic methodology previously developed to evaluate normal cardiac dynamics and acute disease. **Material and methods:** 15 Holter records were taken; 10 with normal diagnosis and 5 with acute pathologies of patients of the Intensive Care Unit. The frequencies of occurrence of the heart frequencies of each dynamics were organized hierarchically in ranges of 15 lat/min, in search of the hyperbolic behavior required for the application of the law of Zipf-Mandelbrot. Subsequently, a linearization was performed and the statistical fractal dimension was obtained for each dynamics. **Results:** The values of the statistical fractal dimension for acute cardiac dynamics varied between 0.4925 and 0.6061, whereas for normal dynamics they varied between 0.7134 and 0.9749, evidencing the differentiation between both groups. **Conclusions:** The statistical fractal behavior of the cardiac dynamics was corroborated, as well as the loss of complexity for the acute dynamics with respect to the normal dynamics.

**Keywords:** acute heart disease, heart rate, fractals, electrocardiography ambulatory, intensive care units

### Resumen

**Introducción:** Es conocida la capacidad de los fractales estadísticos en la evaluación de la complejidad de diferentes sistemas cuya dinámica pueda ser evaluada a partir de las frecuencias de una variable; para esto, se utiliza la medida de la dimensión fractal estadística, la cual puede ser calculada con la ley de Zipf-Mandelbrot. Esta ley matemática ha sido aplicada en cardiología para evaluar el grado de complejidad de la dinámica cardíaca. En el presente trabajo se aplicó la ley de Zipf-Mandelbrot, junto con la metodología diagnóstica desarrollada previamente, para evaluar dinámicas cardíacas normales y con enfermedad aguda. **Materiales y métodos:** Se tomaron 15 registros Holter; 10 con diagnóstico normal y 5 con afecciones agudas de pacientes de la Unidad de Cuidados Intensivos. Se organizaron jerárquicamente las frecuencias de aparición de las frecuencias cardíacas de cada dinámica en rangos de a 15 lat/min, en busca del comportamiento hiperbólico necesario para la aplicación de la ley de Zipf-Mandelbrot. Posteriormente se realizó una linealización y se obtuvo la dimensión fractal estadística para cada dinámica. **Resultados:** Los valores de la dimensión fractal estadística para una dinámica cardíaca aguda variaron entre 0.4925 y 0.6061, mientras que para una dinámica normal variaron entre 0.7134 y 0.9749, lo que pone de manifiesto la diferenciación entre ambos grupos. **Conclusiones:** Se corroboró el comportamiento fractal estadístico de la dinámica cardíaca, al igual que la pérdida de complejidad para las dinámicas agudas con respecto a las dinámicas normales.

**Palabras clave:** enfermedad aguda cardíaca, frecuencia cardíaca, fractales, electrocardiografía ambulatoria, unidades de cuidados intensivos

### Introducción

La caracterización de los objetos regulares fue cuestionada a partir de los resultados de los estudios de sir Fray

Richardson, polémica que planteó Benoit Mandelbrot,<sup>1</sup> quien desarrolló la geometría fractal, mediante la cual se pueden caracterizar objetos irregulares –denominados

fractales— por medio de la dimensión fractal. Existen diferentes tipos de fractales, uno de estos son los fractales estadísticos que corresponden a sistemas que pueden ser caracterizados a partir de la distribución de las frecuencias de aparición de determinadas variables que se presentan de manera jerárquica. La ley de Zipf-Mandelbrot<sup>2-5</sup> se utiliza para el cálculo de la dimensión de los fractales estadísticos, la cual caracteriza el grado de complejidad de dichos fractales. Esta medida ha permitido medir la pérdida de la complejidad de textos escritos por pacientes con enfermedad de Alzheimer.<sup>6</sup>

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), las enfermedades cardiovasculares (ECV) siguen siendo la principal causa de mortalidad a nivel mundial,<sup>7</sup> y se han llegado a comunicar cuatro millones de muertes al año<sup>8</sup> por esta causa en Europa; en algunos países de ese continente la cifra llega a ser, incluso, más de dos veces la obtenida por todos los tipos de cáncer. La tasa de mortalidad atribuida a las ECV en los Estados Unidos durante 2011 fue de 229.6 por 100 000 personas;<sup>9</sup> es decir, cada 40 segundos fallece un estadounidense a causa de una ECV; también se ha informado que las tasas de mortalidad por enfermedad coronaria han aumentado en los EE.UU. y en muchos países europeos.<sup>10</sup>

En la literatura médica cardiológica, la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) es considerada un buen indicador pronóstico de pacientes con dinámicas cardíacas agudas;<sup>11</sup> sin embargo, sus variaciones también se encuentran asociadas con un número considerable de ECV.<sup>12,13</sup> Otras investigaciones han mostrado que el sistema cardiovascular presenta un comportamiento no lineal, observando, en muchos casos, conductas caóticas,<sup>14</sup> que pueden ser caracterizadas a partir de la geometría fractal, mediante la cual también se pueden evaluar diferentes estructuras del cuerpo humano.<sup>15,16</sup>

A partir de los trabajos de Goldberger y colaboradores sobre los cambios espectrales abruptos y las oscilaciones de baja frecuencia sostenidas en pacientes con alto riesgo de muerte súbita cardíaca, se encontró que se puede asociar la pérdida de la complejidad y la reducción de la dinámica de la respuesta cardíaca antes de la muerte súbita y el envejecimiento.<sup>17,18</sup> Para evaluar la complejidad de la dinámica cardiovascular se utilizó la entropía aproximada,<sup>19</sup> análisis multifractales para analizar la complejidad y el comportamiento de la VFC en diferentes situaciones, como por ejemplo la evaluación de la dinámica cardíaca de pacientes antes de ser sometidos a una revascularización miocárdica y después de dicha intervención.<sup>20</sup> En esta investigación se encontró que este tipo de análisis permite evaluar la recuperación del paciente durante las primeras semanas después de la cirugía.<sup>21</sup> En cambio, estudios recientes han encontrado el surgimiento de la complejidad relacionada con la VFC a partir del análisis de la entropía multiescala.<sup>22</sup> Sin embargo, algunas investigaciones subrayan la necesidad de hacer más específicos los análisis efectuados con base en la no linealidad de las dinámicas temporales.<sup>23</sup>

Desde la aplicación de la física y la matemática se han llevado adelante nuevos estudios que simplifican en una sola metodología el análisis de la dinámica cardíaca fetal,<sup>24,25</sup> del adulto<sup>26,27</sup> y neonatal.<sup>28</sup> La confirmación clínica de estas metodologías ha sido mostrada a partir de su análisis en arritmias cardíacas,<sup>29,30</sup> así como en un número mayor de casos,<sup>31,32</sup> permitiendo también evaluar de manera efectiva dinámicas cardíacas de pacientes que se encuentran en la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI).<sup>33</sup>

Su aplicación clínica se debe a que mediante cada una de ellas se puede diferenciar la dinámica cardíaca normal del enfermo, así como su evolución a estados de agudización, dejando de lado análisis rigurosos que requieran la aplicación de otros métodos para comprender los resultados hallados mediante estas metodologías.

Recientemente, se realizó un estudio en el cual se aplicó la ley de Zipf-Mandelbrot para desarrollar una metodología de ayuda diagnóstica, que permitió evaluar el grado de complejidad de la dinámica cardíaca normal y aguda. El estudio reveló, a partir de las dimensiones fractales estadísticas, que la dinámica cardíaca normal se caracteriza por presentar mayor complejidad respecto de la dinámica cardíaca aguda, diferenciando de manera cuantitativa el grado de agudización de la dinámica cardíaca.<sup>34</sup> El propósito de esta investigación es aplicar la metodología fundamentada en la ley de Zipf-Mandelbrot a 15 registros de la dinámica cardíaca, cinco de ellos de pacientes de la UCI.

## Metodología

### *Dimensión fractal estadística*

Se halló calculando el inverso multiplicativo negativo de la pendiente de la linealización logarítmica del comportamiento hiperbólico de las frecuencias de aparición de los rangos de frecuencias cardíacas respecto de los rangos definidos por la ley de Zipf-Mandelbrot. Se expresa mediante la ecuación:

$$D = \frac{\log(\sigma + V)}{\log\left(\frac{F}{P}\right)}$$

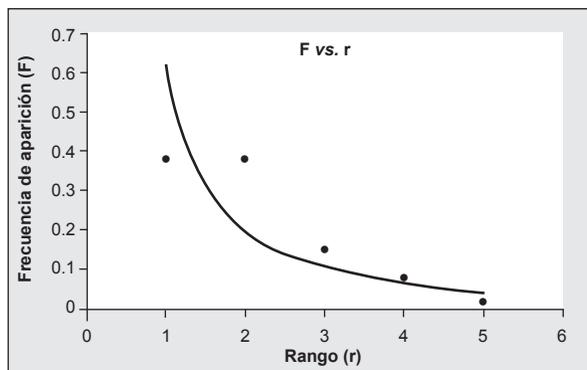
En la cual, D representa la dimensión fractal;  $\sigma$  corresponde al rango asumido para cada frecuencia, P es la frecuencia de aparición de la frecuencia cardíaca, V está definida por  $V = 1/N - 1$ , donde N es el número de frecuencias medidas; por último, F corresponde a un cofactor secundario en el proceso de linealización, el cual fue realizado aplicando el método de cuadrados mínimos.

### *Procedimiento*

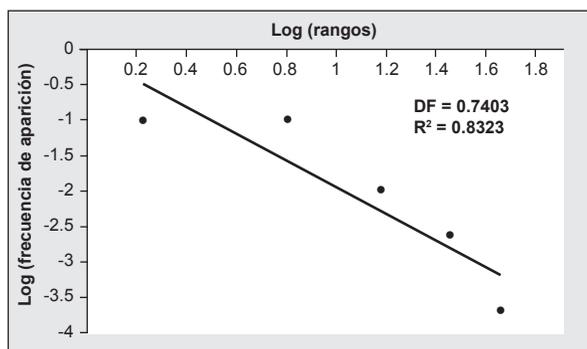
Para la realización de este estudio se tomaron 15 registros Holter de pacientes mayores de 21 años, provenientes de las bases de datos del grupo Insight, los cuales contaban con un tiempo mínimo de 21 horas de registro. Se incluyeron dos grupos; el primero, de diez registros, con diagnóstico clínico entre los límites de normalidad, y el segundo, de cinco registros, con pacientes con diagnóstico de enfermedad aguda de la UCI de la Clínica del Country. Estos registros fueron evaluados y diagnosticados por un electrofisiólogo experto, de acuerdo con los parámetros convencionales.

De cada Holter se tomó el valor de la frecuencia cardíaca máxima y mínima durante cada hora. Seguidamente, se realizó un conteo del número de frecuencias cardíacas que se encuentran en cada rango de 15 lat/min, se calculó la frecuencia de aparición de los rangos de 15 lat/min y se aplicó la ley de Zipf-Mandelbrot a estos valores. Por ello, las frecuencias de aparición de los rangos fueron ordenadas de mayor a menor, asignando a cada una un número entero, empezando por 1 y aumentando en una unidad para las siguientes frecuencias de aparición ordenadas de manera jerárquica. Estos datos fueron graficados para confirmar el comportamiento hiperbólico necesario para la aplicación de la ley (Figuras 1 y 3). A esta gráfica se le aplicó una linealización logarítmica

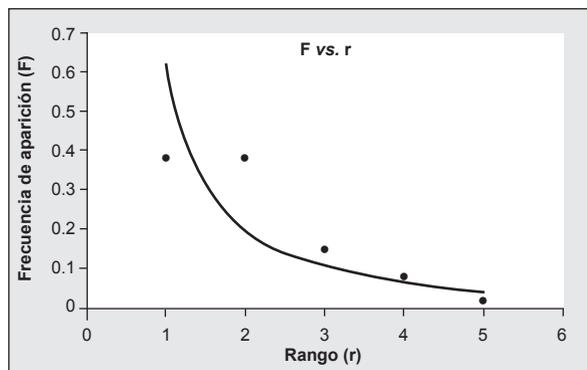
(Figuras 2 y 4), con lo que se halló la dimensión fractal estadística para cada dinámica.



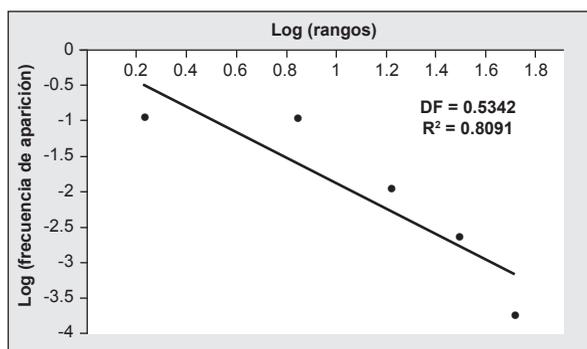
**Figura 1.** Comportamiento hiperbólico de una dinámica normal, correspondiente al Holter N° 1. F, frecuencia de aparición; r, rango asignado por la ley de Zipf-Mandelbrot.



**Figura 2.** Linealización del comportamiento hiperbólico de la dinámica de la Figura 1, correspondiente al Holter N° 1. r, rango asignado por la ley de Zipf-Mandelbrot.



**Figura 3.** Comportamiento hiperbólico del Holter N° 3, el cual presenta una dinámica aguda. F, frecuencia de aparición; r, rango asignado por la ley de Zipf-Mandelbrot.



**Figura 4.** Linealización del comportamiento hiperbólico de la dinámica aguda de la Figura 3.

Posteriormente se analizaron estos valores para ver si se encontraban en el rango consistente de la ley, el cual puede presentar cualquier valor real entre 0 y 1. Finalmente, se aplicaron los parámetros diferenciadores entre normalidad y enfermedad aguda hallados previamente.<sup>34</sup>

**Aspectos éticos**

El presente estudio cumple con los principios éticos de la Declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial y, de acuerdo con la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud colombiano, esta investigación es declarada como de riesgo mínimo dado que se realizan cálculos físicos y matemáticos sobre informes de exámenes y paraclínicos no invasivos, que han sido prescritos previamente según protocolos establecidos de manera convencional, protegiendo también el anonimato e integridad de los participantes.

**Resultados**

La dimensión fractal estadística para los registros Holter normales varió entre 0.7134 y 0.9749, y para los registros con enfermedad aguda, entre 0.4925 y 0.6061 (Tabla 1), lo que muestra que las distribuciones de rangos de frecuencias cardíacas de las dinámicas patológicas son menos complejas que las dinámicas normales (Figuras 1 y 3). Las linealizaciones obtenidas para hallar las dimensiones fractales tuvieron valores del factor de correlación, R<sup>2</sup>, entre 0.7560 y 0.9876 para normalidad, y entre 0.8091 y 0.9938 para enfermedad aguda, lo que pone de manifiesto el comportamiento a escala de la dinámica cardíaca (Figuras 2 y 4). Todas las dimensiones fractales estuvieron en los rangos establecidos,<sup>34</sup> a excepción de una que corresponde a una dinámica normal, que presentó un valor mayor que el límite superior del rango establecido para las dinámicas cardíacas normales.

**Discusión**

Este es el primer trabajo en el cual se muestra la aplicabilidad de la metodología de ayuda diagnóstica fundamentada en la ley de Zipf-Mandelbrot, con la evaluación de 15 dinámicas cardíacas, las cuales incluyen dinámicas cardíacas normales y con enfermedad aguda de pacientes de la UCI. El análisis del ordenamiento jerárquico de las frecuencias cardíacas máximas y mínimas cada hora para

**Tabla 1.** Dimensión fractal estadística de los registros estudiados.

Nº	Indicaciones	DF	r <sup>2</sup>
1	Normal	0.7403	0.8323
2	Normal	0.9749	0.8476
3	Síndrome coronario agudo. Angina inestable	0.5342	0.8091
4	Deficiencia respiratoria aguda. Insuficiencia cardíaca	0.5912	0.8527
5	Normal	0.8349	0.9285
6	Normal	0.7266	0.9565
7	Normal	0.7134	0.8074
8	Lesión vascular. Edema cerebeloso	0.6061	0.9938
9	Normal	0.9432	0.7942
10	Normal	0.7729	0.7777
11	Normal	0.7856	0.756
12	Normal	0.8272	0.8221
13	Normal	0.7308	0.9876
14	Bloqueo auriculoventricular	0.4925	0.9204
15	Angina hipertensiva. Hipertensión arterial vs. hipertensión asociada con embarazo	0.4973	0.9057

F, dimensión fractal; r<sup>2</sup>, factor de correlación.

rangos de 15 lat/min, permitió hallar un comportamiento hiperbólico para las frecuencias cardíacas, lo que revela una autoorganización fractal de la dinámica cardíaca de pacientes con afecciones agudas y para casos dentro de límites normales, según el diagnóstico clínico convencional, lo que indica que, a medida que los grados de complejidad descienden, aumenta el grado de agudización de los pacientes.

Previamente se estableció que los mayores grados de complejidad de la dinámica cardíaca son característicos de las dinámicas cardíacas normales, mientras que las dinámicas cardíacas con enfermedad aguda presentan complejidades de menor valor, lo que muestra, de manera más sencilla, los valores matemáticos que caracterizan el grado de complejidad de la dinámica cardíaca a medida que esta se agudiza,<sup>34</sup> hecho que fue confirmado en el presente estudio. De acuerdo con los resultados, la evolución entre normalidad y enfermedad aguda quedaría matemáticamente acotada al presentar valores de dimensión fractal estadística entre el límite superior de enfermedad aguda y el límite inferior de normalidad. Desde esta perspectiva físico-matemática se han llevado a cabo otros trabajos, en los que se lograron diagnósticos de aplicabilidad clínica al diferenciar normalidad, enfermedad crónica y enfermedad aguda, así como la evolución entre estos estados, a partir de las proporciones de la entropía.<sup>32</sup> Del mismo modo, se elaboró una ley exponencial que permite calcular la totalidad de las dinámicas cardíacas posibles, diferenciando cuantitativamente normalidad, enfermedad aguda y evolución entre ellas,<sup>29,31</sup> lo cual simplifica otros métodos de evaluación creados con este mismo fin.<sup>21-23</sup> Siguiendo esta perspectiva, esta metodología novedosa constituye una nueva forma cuantitativa, objetiva y reproducible de evaluar el grado de complejidad de la dinámica cardíaca, aplicable tanto a pacientes ambulatorios como a pacientes de la UCI con diagnóstico de infarto agudo de miocardio (IAM) o con agudización de la dinámica cardíaca.

Previamente, Rodríguez y colaboradores<sup>35,36</sup> evaluaron la dinámica cardíaca a partir de las leyes de la probabilidad, y encontraron un diagnóstico matemático que requería analizar 26 rangos de frecuencias cardíacas, e incluía la evaluación de tres parámetros y otros subparámetros para establecer el estado de normalidad, enfermedad o evolución. Un estudio de la capacidad diagnóstica de esta metodología halló valores de sensibilidad del 100% y de especificidad del 73.3%.<sup>35</sup> El presente método tiene mayor simplicidad, pues se necesita solo un valor numérico –el grado de complejidad de la dinámica cardíaca– para establecer el estado de normalidad/enfermedad, evitando de esta manera el análisis de la dinámica cardíaca mediante más parámetros.

Desde la teoría de los sistemas dinámicos, Goldberger y colaboradores<sup>15</sup> elaboraron una nueva concepción normalidad/enfermedad, en la que encontraron que la enfermedad se caracteriza por presentar estados altamente

regulares o irregulares, mientras que la normalidad se ubica en medio de estos dos extremos, contradiciendo la noción de homeostasis; sin embargo, esta concepción no cuenta con valores característicos de normalidad y enfermedad de aplicabilidad diagnóstica. En contraposición, la presente metodología logra cuantificar, a partir de la dimensión fractal estadística, las diferencias entre dinámicas normales y agudas, lo que proporciona una cuantificación objetiva y reproducible de aplicabilidad diagnóstica, en la que la disminución de los valores de dimensión fractal se asocia con enfermedad aguda.

En el contexto de los sistemas dinámicos, Huikuri y colegas<sup>37</sup> caracterizaron la dinámica cardíaca de pacientes posinfartados y con fracción de eyección menor del 35%, y encontraron índices predictores de mortalidad que superan los convencionales. Sin embargo, las implicaciones que tiene la aplicación de este y otros trabajos desarrollados desde esta línea aún se encuentran en discusión.<sup>38</sup> En cambio, en el presente estudio se estableció un orden matemático que permite la evaluación de dinámicas cardíacas con IAM de manera independiente, sin que la metodología se vea afectada por factores causales, poblaciones y por enfoques terapéuticos.

El desarrollo de metodologías fundamentadas en la ley de Zipf-Mandelbrot ha permitido la caracterización objetiva de diferentes fenómenos en medicina. Entre ellas, se encuentra la diferenciación en los grados de complejidad del repertorio T específico contra el alérgeno Poa P9 en un paciente alérgico, en presencia y en ausencia de interferón alfa, y en los clones de células T colaboradoras.<sup>39</sup> En el área de la ginecología, se elaboró una nueva metodología diagnóstica de la monitorización fetal con base en el análisis de la aparición de los componentes dinámicos del sistema (CDS) mediante la ley de Zipf-Mandelbrot,<sup>25,40</sup> estableciendo diferencias cuantitativas del comportamiento normal y anormal de una dinámica cardíaca fetal, con lo que se evitan los problemas de reproducibilidad interobservador e intraobservador del método convencional.<sup>41</sup>

Continuando con esta nueva perspectiva de investigación, la aplicación de otras teorías físicas y matemáticas a diferentes sistemas ha contribuido al desarrollo de nuevas metodologías predictivas en otras áreas, como la predicción de alteraciones cardíacas asociadas con sepsis neonatal,<sup>28</sup> o la creación de un método que permite predecir el recuento de linfocitos T CD4 de pacientes con infección por el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH).<sup>37</sup> Del mismo modo, se han obtenido predicciones en inmunología,<sup>42</sup> en biología molecular<sup>43</sup> y en la dinámica de epidemias tales como la de malaria en Colombia.<sup>44</sup> También se logró la generalización de la totalidad de las arterias coronarias normales y reestenósadas, de utilidad para modelos experimentales,<sup>45</sup> y un diagnóstico de células preneoplásicas y neoplásicas de cuello,<sup>46</sup> trabajos de utilidad tanto a nivel clínico como experimental y en el campo de la salud pública.

## Bibliografía

1. Mandelbrot B. Scaling and power laws without geometry. In: *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: Freeman Ed.; 1972. Pp. 344-348.
2. Zipf GK. *The human behavior and the principle of least effort*. Cambridge, MA: Addison-Wesley Press; 1949.
3. Mandelbrot B. Information theory and psycholinguistics: a theory of words frequencies. En: Lazafeld P, Henry N. (Eds.) *Readings in mathematical social science*. Cambridge, MA: MIT Press; 1966.
4. Mandelbrot B. Structure formelle des textes et communication. *World* 10:1-27, 1954.
5. Corral Á, Boleda G, Ferrer-i-Cancho R. Zipf's law for word frequencies: Word forms versus lemmas in long texts. *PLoS one* 10(7):e0129031, 2015.
6. Hernández A, Diéguez F. La ley de Zipf y la detección de la evolución verbal en la enfermedad de Alzheimer. *Anuario de Psicología* 43(1):67-82, 2013.
7. WHO. The atlas of heart disease and stroke. Deaths from coronary heart disease. Disponible en: [http://www.who.int/cardiovascular\\_diseases/en/cvd\\_atlas\\_14\\_deathHD.pdf?ua=1](http://www.who.int/cardiovascular_diseases/en/cvd_atlas_14_deathHD.pdf?ua=1).
8. Nichols M, Townsend N, Scarborough P, Rayner M. Cardiovascular disease in Europe 2014: epidemiological update. *Eur Heart J* 35(42):2950-2959, 2014.
9. Mozaffarian D, Benjamin E, Go AS, Arnett DK, Blaha MJ, Cushman M, et al. Heart disease and stroke statistics. Update. A report from the American Heart Association. *Circulation* 131:e29-e322, 2015.
10. OMS. Centro de prensa. Enfermedades cardiovasculares. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/es/>.
11. Harris P, Stein PK, Fung GL, Drew BJ. Heart rate variability measured early in patients with evolving acute coronary syndrome and 1-year outcomes of rehospitalization and mortality. *Vasc Health Risk Manag* 10:451-464, 2014.
12. Shahbazi F, Asl BM. Generalized discriminant analysis for congestive heart failure risk assessment based on long-term heart rate variability. *Comput Methods Programs Biomed* 122(2):191-198, 2015.
13. Lakusic N, Mahovic D, Kruzliak P, Cerkez Habek J, Novak M, Cerovec D. Changes in heart rate variability after coronary artery bypass grafting and clinical importance of these findings. *Biomed Res Int* 680515, 2015.
14. Gallo J, Farbiarz J, Alvarez D. Análisis espectral de la variabilidad de la frecuencia cardíaca. *Iatreia* 12(2):61-71, 1999.
15. Goldberger A, Amaral L, Hausdorff JM, Ivanov P, Peng Ch, Stanley HE. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *PNAS* 99:2466-2472, 2002.
16. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Bernal P, Puerta G, Vitery S, et al. Theoretical generalization of normal and sick coronary arteries with fractal dimensions and the arterial intrinsic mathematical harmony. *BMC Medical Physics* 10:1-6, 2010.
17. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Bernal P, Álvarez L, Forero G, et al. Diagnóstico fractal del ventriculograma cardíaco izquierdo. Geometría fractal del ventriculograma durante la dinámica cardíaca. *Rev Colomb Cardiol* 19(1):18-24, 2012.
18. Goldberger AL, West BJ. Applications of nonlinear dynamics to clinical cardiology. *Ann N Y Acad Sci* 504:195-213, 1987.
19. Goldberger AL, Rigney DR, Mietus J, Antman EM, Greenwald S. Nonlinear dynamics in sudden cardiac death syndrome: heart rate oscillations and bifurcations. *Experientia* 44:983-987, 1988.
20. Pincus SM. Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proc Natl Acad Sci USA* 88(6):2297-2301, 1991.
21. Ksela J, Avbelj V, Kalisnik JM. Multifractality in heartbeat dynamics in patients undergoing beating-heart myocardial revascularization. *Comput Biol Med* 60:66-73, 2015.
22. Chang MC, Peng CK, Stanley HE. Emergence of dynamical complexity related to human heart rate variability. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys* 90(6):062806, 2014.
23. Porta A, Bari V, Marchi A, De Maria B, Cysarz D, Van Leeuwen P, et al. Complexity analyses show two distinct types of nonlinear dynamics in short heart period variability recordings. *Front Physiol* 6:71, 2015.
24. Rodríguez J. Nuevo diagnóstico físico y matemático de la monitoría fetal: predicción de aplicación clínica. *Momento Revista de Física* 44:49-65, 2012.
25. Rodríguez J, Prieto S, Ortiz L, Bautista A, Bernal P, Avilán N. Diagnóstico matemático de la monitoría fetal aplicando la ley de Zipf Mandelbrot. *Rev Fac Med Univ Nac Colomb* 54(2):96-107, 2006.
26. Rodríguez J. Entropía proporcional de los sistemas dinámicos cardíacos: Predicciones físicas y matemáticas de la dinámica cardíaca de aplicación clínica. *Rev Colomb Cardiol* 17:115-129, 2010.
27. Rodríguez J. Mathematical law of chaotic cardiac dynamic: Predictions of clinic application. *J Med Med Sci* 2(8):1050-1059, 2011.
28. Rodríguez J, Prieto S, Flórez M, Alarcón C, López R, Aguirre G, et al. Physical-mathematical diagnosis of cardiac dynamic on neonatal sepsis: predictions of clinical application. *J Med Med Sci* 5(5):102-108, 2014.
29. Rodríguez J, Narváez R, Prieto S, Correa C, Bernal P, Aguirre G, et al. The mathematical law of chaotic dynamics applied to cardiac arrhythmias. *J Med Med Sci* 4(7):291-300, 2013.
30. Rodríguez J, Álvarez L, Tapia D, López F, Cardona M, Mora J, et al. Evaluación de la dinámica cardíaca de pacientes con arritmia con base en la teoría de la probabilidad. *Medicina (Bogotá)* 34(1):7-16, 2012.
31. Rodríguez J, Correa C, Melo M, Domínguez, D, Prieto S, Cardona DM, et al. Chaotic cardiac law: Developing predictions of clinical application. *J Med Med Sci* 4(2):79-84, 2013.
32. Rodríguez J, Prieto S, Domínguez D, Melo M, Mendoza F, Correa C, et al. Mathematical-physical prediction of cardiac dynamics using the proportional entropy of dynamic systems. *J Med Med Sci* 4(8):370-381, 2013.
33. Rodríguez J, Prieto S, Bernal P, Izasa D, Salazar G, Correa C, Soracipa Y. Entropía proporcional aplicada a la evolución de la dinámica cardíaca. Predicciones de aplicación clínica. En: Rodríguez LG, coordinador. *La emergencia de los enfoques de la complejidad en América Latina: implicancias políticas, epistemológicas y metodológicas para las ciencias del siglo XXI*. Tomo 1, 1ª. Buenos Aires: Comunidad Editora Latinoamericana; 2015. Pp. 315-334.
34. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Mendoza F, Weisz G, Soracipa Y, et al. Physical mathematical evaluation of the cardiac dynamic applying the Zipf ? Mandelbrot law. *J Mod Phys* 6:1881-1888, 2015.
35. Rodríguez J, Correa C, Ortiz L, Prieto S, Bernal P, Ayala J. Evaluación matemática de la dinámica cardíaca con la teoría de la probabilidad. *Rev Mex Cardiol* 20(4):183-189, 2009.
36. Rodríguez J, Correa C, Prieto S, Bernal P, Forero G, Salazar G, et al. Confirmación del método de ayuda diagnóstica de la dinámica cardíaca de aplicación clínica desarrollado con base en la teoría de la probabilidad. *Rev Fac Med* 19(2):167-177, 2011.
37. Huikuri HV, Mäkikallio T, Peng CK, Peng CK, Goldberger AL, Hintze U, Møller M. Fractal correlation properties of R ? R interval dynamics and mortality in patients with depressed left ventricular function after and acute myocardial infarction. *Circulation* 101:47-53, 2000.

38. Voss A, Schulz S, Schroeder R, Baumert M, Caminal P. Methods derived from nonlinear dynamics for analysing heart rate variability. *Phil Trans R Soc A* 367(1887):277-296, 2009.
39. Rodríguez J. Comportamiento fractal del repertorio T específico contra el alérgeno Poa P9. *Rev Fac Med Univ Nac Colomb* 53:72-78, 2005.
40. Rodríguez J. Dynamical systems theory and Zipf-Mandelbrot Law applied to the development of a fetal monitoring diagnostic methodology. XVIII FIGO World Congress of Gynecology and Obstetrics. Kuala Lumpur, Malasia. Noviembre 2006.
41. Borgatta L, ShROUT PE, Divon MY. Reliability and reproducibility of nonstress test readings. *Am J Obstet Gynecol* 159(3):554-558, 1988.
42. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Pérez C, Mora J, Bravo J, et al. Predictions of CD4 lymphocytes count in HIV patients from complete blood count. *BMC Medical Physics* 13(1):3, 2013.
43. Rodríguez J, Bernal P, Prieto S, Correa C. Teoría de péptidos de alta unión de malaria al glóbulo rojo. Predicciones teóricas de nuevos péptidos de unión y mutaciones teóricas predictivas de aminoácidos críticos. *Inmunología* 29(1):7-19, 2010.
44. Rodríguez J. Método para la predicción de la dinámica temporal de la malaria en los municipios de Colombia. *Rev Panam Salud Pública* 27(3):211-218, 2010.
45. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Bernal PA, Puerta GE, Vitery S, et al. Theoretical generalization of normal and sick coronary arteries with fractal dimensions and the arterial intrinsic mathematical harmony. *BMC Medical Physics* 10:1-6, 2010.
46. Prieto S, Rodríguez J, Correa C, Soracipa Y. Diagnosis of cervical cells based on fractal and Euclidian geometrical measurements: intrinsic geometric cellular organization. *BMC Medical Physics* 14(2):1-9, 2014.

**Información relevante**

## Aplicación de la ley de Zipf-Mandelbrot al diagnóstico de la dinámica cardíaca normal y aguda

### Respecto al autor

**Javier Rodríguez.** Médico, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Posee una sólida formación en física teórica, además de un profundo conocimiento académico en todo lo relacionado con las ciencias médicas, dirigidos a la investigación en medicina a partir de teorías físicas y matemáticas. Director del Grupo de Investigación Insight (2001-), creado con la misión de elaborar predicciones físicas y matemáticas en medicina para servir a la humanidad. Ha sido galardonado con el reconocimiento Man of the Year 2011, Centro Biográfico Internacional de Cambridge, entre otros. Actualmente cuenta con más de 140 publicaciones científicas.

### Respecto al artículo

La metodología de ayuda diagnóstica basada en la organización por rangos de la frecuencia cardíaca y la ley matemática de Zipf-Mandelbrot, aplicada a registros cardíacos de pacientes de la Unidad de Cuidados Intensivos, permitió establecer que dichas dinámicas presentan una autoorganización, que puede ser caracterizada a partir de la dimensión fractal estadística. Se mostró que el rango de esta medida para normalidad podría ser más amplio, para lo que se necesitan más estudios.

### El autor pregunta

A partir del análisis de la dimensión fractal estadística mediante la ley de Zipf-Mandelbrot se ha podido elaborar una metodología que permite diagnosticar la dinámica cardíaca, un fenómeno aparentemente caótico e irregular, discriminando las dinámicas cardíacas normales de aquellas con enfermedad aguda en distintas poblaciones (como la que se encuentra en la Unidad de Cuidados Intensivos), a partir de la cuantificación de las frecuencias de aparición de las frecuencias cardíacas.

¿Qué beneficios permitió esta metodología, al ser aplicada a pacientes con afecciones cardíacas internados en la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI)?

- A) Diferenciar normalidad de enfermedad crónica cardíaca.
- B) Diferenciar normalidad de enfermedad cardíaca aguda.
- C) Diagnosticar la dinámica cardíaca mediante la variabilidad de la frecuencia cardíaca.
- D) Predecir mortalidad por causas cardíacas.
- E) Diagnosticar arritmias potencialmente mortales.

**Corrobore su respuesta:** [www.siicsalud.com/dato/evaluaciones.php/159579](http://www.siicsalud.com/dato/evaluaciones.php/159579)

### Palabras clave

enfermedad aguda cardíaca, frecuencia cardíaca, fractales, electrocardiografía ambulatoria, unidades de cuidados intensivos

### Keywords

acute heart disease, heart rate, fractals, electrocardiography ambulatory, intensive care unit

### Lista de abreviaturas y siglas

OMS, Organización Mundial de la Salud; ECV, enfermedades cardiovasculares; VFC, variabilidad de la frecuencia cardíaca; UCI, Unidad de Cuidados Intensivos; IAM, infarto agudo de miocardio; CDS, componentes dinámicos del sistema; VIH, virus de la inmunodeficiencia humana.

### Cómo citar

Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Pernet F, Rodríguez D, Rodríguez S, Páez K, Jattin J, Ibarra A, Méndez E. Aplicación de la ley de Zipf-Mandelbrot al diagnóstico de la dinámica cardíaca normal y aguda. *Salud i Ciencia* 23(8):612-8, Mar-Abr 2020.

### How to cite

Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Pernet F, Rodríguez D, Rodríguez S, Páez K, Jattin J, Ibarra A, Méndez E. Application of the law of Zipf-Mandelbrot to the diagnosis of normal and acute cardiac dynamics. *Salud i Ciencia* 23(8):612-8, Mar-Abr 2020.

### Orientación

Diagnóstico

### Conexiones temáticas

