



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS

XXVII Verano de investigación en ciencias y humanidades

Análisis estadístico de Electrocardiogramas (ECG)

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Resumen

El envejecimiento fisiológico se asocia con modificaciones profundas en los mecanismos que regulan el sistema cardiovascular. Estudios previos han demostrado que la dinámica del ritmo cardíaco pierde complejidad con la edad, fenómeno que ha sido cuantificado mediante herramientas de la dinámica no lineal y la teoría del caos, como la entropía aproximada, la dimensión fractal y el espectro de potencia. La mayoría de estos estudios se han realizado sobre series de intervalos RR.

En este trabajo analizamos la influencia del envejecimiento en la dinámica no lineal del ritmo cardíaco en hombres y mujeres sanos, y buscamos signos de determinismo. Se aplicaron medidas estadísticas clásicas, como media aritmética, la desviación estándar y la raíz media cuadrática de las diferencias sucesivas, así como métodos más avanzados, entre ellos la entropía de Shannon y el índice J.

La principal contribución de este trabajo consiste en la implementación y adaptación de una herramienta estadística novedosa que puede aplicarse directamente sobre los registros completos de ECG, los cuales contienen mayor riqueza de información que las series derivadas exclusivamente de los intervalos RR. Nuestros resultados muestran un aumento de regularidad en la dinámica del ritmo cardíaco asociado con el envejecimiento. Además, se encontraron signos de determinismo en la dinámica cardíaca.

Palabras clave: Electrocardiograma, Envejecimiento, determinismo, Índice J.

1. Introducción

El sistema cardiovascular humano está regulado por una compleja red de mecanismos homeostáticos que actúan en múltiples escalas temporales [1]. Estos mecanismos (incluyendo la actividad del sistema nervioso autónomo, la

modulación hormonal, la función barorreceptora y la mecánica respiratoria) interactúan de forma no lineal para generar un patrón dinámico de variabilidad en el ritmo cardíaco (HRV, por sus siglas en inglés). A diferencia de los modelos tradicionales que asumían una respuesta fisiológica lineal y predecible, la evidencia empírica ha demostrado que las señales cardíacas, incluso en condiciones de reposo, presentan una variabilidad altamente irregular y estructurada que no es aleatoria. Este comportamiento es una expresión de la adaptabilidad del sistema cardiovascular frente a perturbaciones internas o externas [1,2,6]. Este tipo de comportamiento es compatible con el de los sistemas caóticos o fractales [1-5]. En este contexto, se han desarrollado técnicas de análisis basadas en la teoría del caos y la dinámica no lineal (como la entropía aproximada, la dimensión correlacional y el DFA) para cuantificar la "complejidad" de estas señales fisiológicas [2,4,6].

Numerosos estudios han documentado una pérdida progresiva de complejidad en la dinámica del ritmo cardíaco con el envejecimiento [1,6]. Esta disminución se ha interpretado como una reducción de la capacidad adaptativa del sistema cardiovascular, lo que podría aumentar la vulnerabilidad a eventos adversos, como síncope, arritmias o falla hemodinámica. Se ha propuesto que la complejidad de la señal cardíaca podría actuar como un biomarcador funcional del estado fisiológico general del individuo, con aplicaciones diagnósticas, pronósticas y terapéuticas.

En este trabajo, retomamos esta línea de investigación y presentamos resultados preliminares obtenidos mediante una nueva herramienta de análisis no lineal aplicada a datos completos de electrocardiograma (ECG) [1]. A diferencia de los enfoques que se limitan al análisis de intervalos RR (El intervalo RR es el intervalo de tiempo entre dos latidos cardíacos sucesivos, medido desde el pico de una onda R a la siguiente onda R), el uso de

señales completas del ECG permite conservar más información sobre la dinámica eléctrica del corazón. Además, la metodología propuesta ha demostrado tener robustez frente al ruido y a las variaciones no estacionarias, lo que la convierte en una alternativa prometedora para la evaluación clínica y la investigación en fisiología del envejecimiento.

2. Objetivo general

Analizar la influencia del envejecimiento fisiológico en la dinámica no lineal del ritmo cardíaco en hombres y mujeres sanos, mediante el uso de herramientas estadísticas clásicas y métodos avanzados de análisis no lineal, con especial énfasis en la detección de signos de determinismo en los registros completos de electrocardiograma (ECG).

3. Objetivos específicos

- Aplicar medidas estadísticas clásicas y avanzadas sobre registros completos de ECG.

- Evaluar los efectos del envejecimiento en la regularidad del ritmo cardíaco.
- Detectar posibles signos de determinismo en la dinámica del ritmo cardíaco.
- Validar la utilidad del índice J como herramienta para el análisis directo de señales ECG.

4. Descripción general de un ECG

El electrocardiograma (ECG) es una herramienta que permite registrar de forma no invasiva la actividad eléctrica del corazón a lo largo del tiempo. Esta señal eléctrica es generada por la despolarización y repolarización de las células miocárdicas durante el ciclo cardíaco, y puede ser captada mediante electrodos colocados sobre la superficie corporal del paciente.

Un ECG típico consta de una secuencia de ondas con morfología característica (Figura 1), entre las cuales destacan:

- Onda P: Representa la despolarización auricular;

- Complejo QRS: Refleja la despolarización de los ventrículos;
- Onda T: Corresponde a la repolarización ventricular.

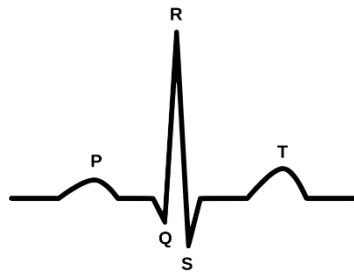


Figura 1. Esquema representativo de un ciclo de electrocardiograma (ECG).

El análisis del ECG permite evaluar el ritmo cardíaco, la frecuencia, la conducción eléctrica, y detectar posibles anomalías como arritmias, bloqueos, isquemias o hipertrofias.

5. Descripción de los datos

Se utilizaron registros de la base de datos *Fantasia*, disponible públicamente en el repositorio PhysioNet [6]. Esta base de datos fue diseñada específicamente para el análisis de la variabilidad del ritmo cardíaco en relación con el envejecimiento fisiológico.

La base contiene registros de 20 voluntarios sanos, divididos en dos grupos etarios: 10 adultos jóvenes (edades entre 21 y 34 años), 10 adultos mayores (edades entre 68 y 85 años), con representación equitativa entre hombres y mujeres. Los datos consisten en registros de electrocardiograma (ECG) de dos horas de duración, adquiridos con una frecuencia de muestreo de 250 Hz y obtenidos bajo condiciones de reposo, mientras los sujetos observaban una película con el fin de minimizar artefactos por movimiento. Cada archivo incluye la señal cruda de ECG.

Para el análisis presentado en este trabajo se seleccionaron los primeros 30 minutos de señal de un subconjunto compuesto por 6 adultos jóvenes y 6 adultos mayores, con igual número de hombres y mujeres en cada grupo. Esta selección permitió realizar comparaciones entre grupos etarios manteniendo el equilibrio por sexo y reduciendo la variabilidad asociada a diferencias individuales extremas. En la Figura 2 se muestra un fragmento de un registro de ECG utilizado en el estudio.

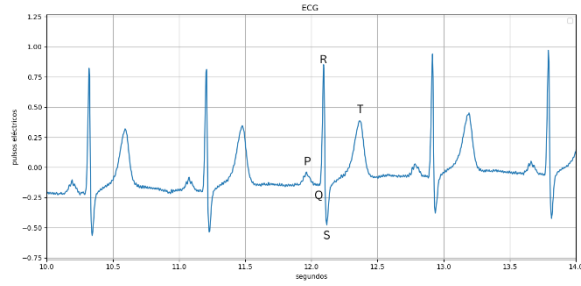


Figura 2. Fragmento representativo de un registro de ECG utilizado en este trabajo. La señal permite observar la morfología característica de las ondas P, QRS y T.

6. Descripción de los métodos

Por cuestiones de espacio, damos una breve descripción de los métodos utilizados, para más detalles revisar las referencias.

Media: Medida de tendencia central que representa el valor promedio de una señal a lo largo del tiempo [7]. En el contexto del ECG, la media permite establecer un valor basal en torno al cual fluctúan las variaciones de la señal.

Desviación estándar: Mide la dispersión de los valores de la señal respecto a su media[7]. Una mayor desviación indica mayor variabilidad en el ritmo cardíaco.

RMSSD: Parámetro específico de la variabilidad de la frecuencia cardíaca que cuantifica los cambios instantáneos entre latidos consecutivos [7]. Es especialmente

sensible a la actividad del sistema nervioso parasimpático.

Entropía de Shannon: Medida de la incertidumbre de una señal. Una mayor entropía indica mayor complejidad dinámica y menor regularidad [7].

Índice J: Detecta signos de determinismo en series de tiempo y cuantifica el grado de irregularidad de la dinámica. Además, no requiere el ajuste de parámetros, no exige la reconstrucción del espacio fase ni la generación de datos sustitutos para establecer niveles de significancia y presenta robustez frente a niveles significativos de ruido. Se define como:

$$J = 1 - \left| \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^{N-1} e^{i\alpha(f_l)} \right|,$$

donde N es el número de datos de la serie de tiempo, f_l indica el número de frecuencias en el espacio de Fourier hasta la frecuencia de Nyquist, $\alpha \in [0, 2\pi]$ representa el ángulo de desviación entre dos vectores consecutivos de trayectoria construidos sobre la superficie de un toro tridimensional. Para más detalles sobre el método consultar [8,9].

7. Metodología

- 1) Preprocesamiento de los datos: Se verificó que los registros seleccionados de la base de datos no presentaran interrupciones ni huecos en la señal. Posteriormente se realizó una limpieza de valores atípicos. Finalmente, todos los datos fueron centrados en cero para garantizar la homogeneidad en el análisis estadístico posterior.
- 2) Cálculo de medidas estadísticas y no lineales: Sobre cada registro de 30 minutos se calcularon los métodos descritos en la sección 6. Posteriormente, cada registro completo fue dividido en seis ventanas consecutivas de 5 minutos. En cada una de estas ventanas se volvieron a aplicar las cinco medidas antes mencionadas.

8. Resultados

En la Figura 3 se presentan los valores promedio de las medidas estadísticas y no lineales aplicadas a los registros de ECG

segmentados en ventanas de 5 minutos. Cada registro fue dividido en seis segmentos consecutivos, y en cada uno de ellos se calcularon las métricas correspondientes. Posteriormente, los seis valores obtenidos para cada métrica fueron promediados para obtener un único valor representativo del sujeto.

Como se muestra en la Figura ##, tanto en los hombres como mujeres se observa una tendencia decreciente con la edad en todas las métricas calculadas. Esto indica una reducción de la variabilidad del ritmo cardíaco asociada al envejecimiento, resultado que coincide con la literatura.

	Desviación estándar	RMSSD	Entropía de Shannon	Índice J
Hombres Jóvenes	0.2919	0.0944	0.8010	0.9750
Hombres Mayores	0.2200	0.0717	0.7775	0.9740
Mujeres Jóvenes	0.1958	0.0604	0.8106	0.9727
Mujeres Mayores	0.1869	0.0584	0.7831	0.9700

Figura 3. Resumen de los valores promedio de métricas aplicadas a registros de ECG segmentados en ventanas de 5 minutos y promediadas por sujeto. Los resultados se presentan para cuatro grupos: hombres jóvenes, hombres mayores, mujeres jóvenes y mujeres mayores.

El índice J también muestra un decremento asociado con la edad, del orden de 10^{-3} , lo que sugiere que la dinámica no lineal del ritmo cardíaco se vuelve más estable en adultos mayores. Además, todos los valores del índice J se encuentran por debajo del umbral de significancia establecido para la detección de signos de determinismo, umbral que fue determinado a partir de la curva universal publicada en [8]. Este resultado indica que, a pesar del envejecimiento, la dinámica cardíaca en todos los grupos analizados conserva características compatibles con una dinámica determinista.

En la Figura 4 se presentan los resultados del índice J aplicado a un solo registro de ECG, segmentado en ventanas de 5 minutos. Se observa que, a lo largo de todo el registro, los valores del índice J se mantienen por debajo del valor umbral de significancia (línea roja).

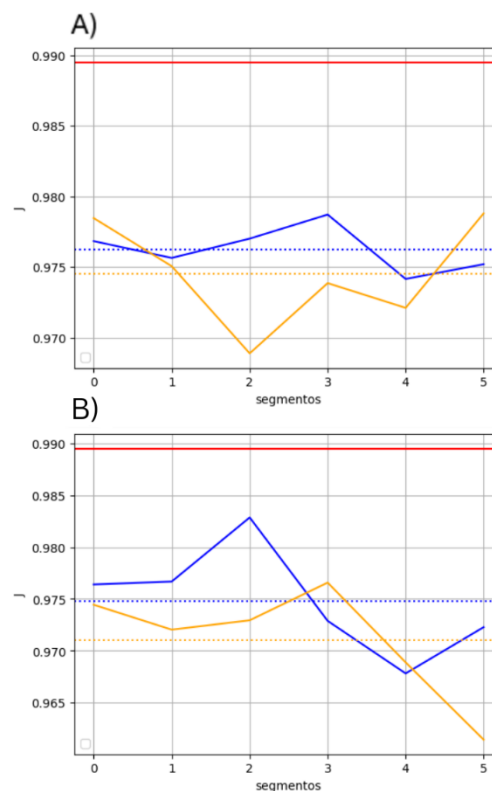


Figura 4. Resultados del índice J aplicado a los registros de ECG segmentados en ventanas de 5 minutos. La gráfica A) corresponde a al grupo de hombres y la gráfica B) al grupo de mujeres. En color azul se muestran los resultados de la población de adultos mayores y en naranja los de adultos jóvenes. Las líneas punteadas indican el valor promedio del índice J para cada grupo. La línea roja representa el umbral de significancia utilizado para detectar signos de determinismo.

9. Conclusiones

Analizamos la influencia del envejecimiento fisiológico sobre la dinámica no lineal del ritmo cardíaco, utilizando registros completos de ECG de sujetos sanos provenientes de la base de datos Fantasia. A diferencia de estudios

previos centrados exclusivamente en las series de intervalos RR, aquí se aplicaron tanto medidas estadísticas clásicas como herramientas de análisis no lineal directamente sobre las señales completas, preservando así su riqueza informativa.

Nuestros resultados muestran que el envejecimiento está asociado con una disminución en la variabilidad del ritmo cardíaco, evidenciada por valores menores en la desviación estándar, el RMSSD y la entropía de Shannon en adultos mayores.

El índice J también mostró un descenso sutil con la edad, lo que indica un aumento en la regularidad de la dinámica cardíaca. Todos los valores observados del índice J se mantuvieron por debajo del umbral de significancia derivado de la curva universal publicada en [REF J], lo cual sugiere la presencia de signos consistentes de determinismo en todos los grupos etarios. Actualmente, estos análisis se están replicando sobre una base de datos más amplia, y los resultados preliminares indican que la disminución del índice J con la edad se vuelve

más evidente, lo que refuerza la hipótesis de una transición hacia una dinámica cardíaca más regular y menos compleja con el envejecimiento.

La aplicación directa del índice J sobre registros completos de ECG se presenta como una herramienta robusta para detectar cambios sutiles en la dinámica cardíaca, con potencial aplicación clínica en el monitoreo del envejecimiento y la salud cardiovascular.

Como trabajo futuro, se planea establecer colaboraciones con especialistas en cardiología para profundizar en la interpretación clínica de los resultados. Además, resulta de interés investigar si los cambios en la dinámica del ritmo cardíaco inducidos por el envejecimiento presentan diferencias significativas entre hombres y mujeres, lo cual podría aportar nuevas perspectivas sobre las bases fisiológicas del envejecimiento cardíaco con enfoque de género.

Referencias

- [1] Ernst, G. (2017). Heart-rate variability—more than heart beats?. *Frontiers in public health*, 5, 240.
- [2] Lipsitz, L. A. (1995). Age-related changes in the “complexity” of cardiovascular dynamics: A potential marker of vulnerability to disease. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 5(1), 102-109.
- [3] Kaplan, D. T., Furman, M. I., Pincus, S. M., Ryan, S. M., Lipsitz, L. A., & Goldberger, A. L. (1991). Aging and the complexity of cardiovascular dynamics. *Biophysical journal*, 59(4), 945-949.
- [4] Lipsitz, L. A., & Goldberger, A. L. (1992). Loss of complexity and aging: potential applications of fractals and chaos theory to senescence. *Jama*, 267(13), 1806-1809.
- [5] Craft, N. O. A. H., & Schwartz, J. B. (1995). Effects of age on intrinsic heart rate, heart rate variability, and AV conduction in healthy humans. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 268(4), H1441-H1452.
- [6] Iyengar N, Peng CK, Morin R, Goldberger AL, Lipsitz LA. Age-related alterations in the fractal scaling of cardiac interbeat interval dynamics. *Am J Physiol*. 1996 Oct;271(4 Pt 2):R1078-84. doi: 10.1152/ajpregu.1996.271.4.R1078. PMID: 8898003.
- [7] Dekking, F. M. (2005). *A Modern Introduction to Probability and Statistics: Understanding why and how*. Springer Science & Business Media.
- [8] Aguilar-Hernández, A. I., Serrano-Solis, D. M., Ríos-Herrera, W. A., Zapata-Berruecos, J. F., Vilaclara, G., Martínez-Mekler, G., & Müller, M. F. (2024). Fourier phase index for extracting signatures of determinism and nonlinear features in time series. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 34(1).
- [9] Aguilar-Hernández, A. I., Marin-Mendoza,

C. A., Valdez, R., & Müller, M. F. (2025).
Uniform approach to reproduce the Mandelbrot
set, some of its inner structure as well as its
complement with high sensitivity using Fourier
phases. *Chaos, Solitons & Fractals*, 198,
116575.