



DOI: <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v6.n1.391>

Variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC): Biomarcador de la regulación autonómica cardiaca en deportistas, diabéticos y controles

Antonio Eugenio Rivera Cisneros

antonio.rivera.academico@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1448-5024>

Universidad del Fútbol y Ciencias Aplicadas al Deporte
México

José Guadalupe Montaña Corona

jmontanc@ugto.mx

<https://orcid.org/0000-0001-5709-9142>

Universidad de Guanajuato
Mexico

Ricardo Félix Inguanzo

rfinguanzo@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4448-2406>

Benemérita Escuela Norma IManuel Avila Camacho
México

Teresa Melchor Moreno

melchor@ugto.mx

<https://orcid.org/0000-0002-7907-6475>

Universidad de Guanajuato
Mexico

Luis Humberto Jasso García

luisjasso@benmac.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-5334-864X>

Benemérita Escuela Normal Manuel Avila Camacho
México

Teresa Valeria Montaña Melchor

tv.montanomelchor@ugto.mx

<https://orcid.org/0009-0002-2357-830X>

Universidad de Guanajuato
Mexico

RESUMEN

Antecedentes: La variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) es un biomarcador validado de la función del sistema nervioso autónomo. Objetivo: Evaluar el equilibrio simpático-vagal mediante análisis espectral en atletas, pacientes diabéticos e individuos sedentarios. Métodos y estrategia: Participaron 33 sujetos varones voluntarios, divididos en tres grupos (n=11) con un rango de edad de 25 a 40 años. El grupo 1 estaba compuesto por deportistas, diabéticos y sedentarios. Revisión fisiológica y analítica integradora utilizando VFC basada en la transformada de Fourier a partir de un análisis de ECG. Resultados: Los atletas exhiben dominancia vagal, los diabéticos muestran disfunción autonómica, los individuos sedentarios presentan perfiles intermedios. Conclusión: La VFC es una herramienta robusta para evaluar la salud cardiometabólica y autonómica.

Palabras clave: Variabilidad de la frecuencia cardiaca, análisis espectral de la frecuencia cardiaca, adaptabilidad de la frecuencia cardiaca



Heart rate variability (HRV): Biomarker of cardiac autonomic regulation in athletes, diabetics, and controls

ABSTRACT

Background: Heart rate variability (HRV) is a validated biomarker of autonomic nervous system function. Objective: To evaluate sympathovagal balance using spectral analysis across athletes, diabetic patients, and sedentary individuals. Methods and strategy: Participated 33 male voluntary subjects, divide in three groups (n=11) between range age 25 - 40 years old. Group 1 were sports man, diabetics and a sedenaries. Integrative physiological and analytical review using Fourier transform-based HRV form a EKG analysis Results: Athletes exhibit vagal dominance, diabetics show autonomic dysfunction, sedentary individuals present intermediate profiles. Conclusion: HRV is a robust tool for assessing cardiometabolic and autonomic health.

Keywords: Heart rate variability, spectral anlysis of heart rate, heart rate adaptability



INTRODUCCIÓN

La variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC), procede del análisis de la medición de los intervalos RR, del electrocardiograma o de los pulsos circulatorios registrados en los nuevos dispositivos electrónicos actuales.

La VFC constituye un biomarcador no invasivo ampliamente validado de la regulación autonómica cardiovascular, reflejando la interacción dinámica entre el sistema nervioso simpático y parasimpático sobre el nodo sinusal (1,2). Este fenómeno representa la capacidad adaptativa del sistema cardiovascular ante estímulos internos y externos, y su disminución se ha asociado con mayor riesgo de mortalidad cardiovascular, disfunción metabólica y estados inflamatorios crónicos (3,4).

El análisis espectral de la VFC, basado en la transformada de Fourier, permite descomponer la señal de los intervalos RR en componentes de frecuencia específicos, facilitando la interpretación fisiológica de la modulación autonómica (2,5). En este contexto, la banda de alta frecuencia (HF) se considera un marcador del tono vagal, mientras que la banda de baja frecuencia (LF) refleja una combinación de actividad simpática y parasimpática mediada principalmente por mecanismos barorreflejos (5,6). Por su parte, la banda de muy baja frecuencia (VLF) se ha relacionado con procesos más complejos como la termorregulación, la actividad del sistema renina-angiotensina y la inflamación sistémica (7).

En poblaciones deportistas, múltiples estudios han demostrado un incremento significativo en la actividad parasimpática en reposo, reflejado por un aumento en la potencia HF y una reducción en la frecuencia cardíaca basal, lo cual se interpreta como una adaptación fisiológica al entrenamiento aeróbico (8,9). En contraste, en pacientes con diabetes mellitus tipo 2, la VFC se encuentra reducida, particularmente en su componente vagal, debido al desarrollo progresivo de neuropatía autonómica cardiovascular (10,11). Este deterioro autonómico se asocia con hiperglucemia crónica, estrés oxidativo y daño microvascular (11).

Los trabajos de Rivera-Cisneros y colaboradores (12) han aportado evidencia relevante sobre la respuesta autonómica al ortostatismo, mostrando cómo el cambio postural induce una activación simpática inmediata acompañada de una modulación vagal dependiente del tipo de estímulo (activo vs pasivo), constituyendo una herramienta funcional para la evaluación del sistema nervioso



autónomo , asociados al ortostatismo activo.

Adicionalmente, la relación entre la VFC y variables metabólicas como la glucemia, los triglicéridos y el perfil lipídico ha sido documentada, evidenciando que estados de resistencia a la insulina y dislipidemia se asocian con una disminución de la complejidad autonómica (13,14).

Los estudios efectuados hasta el momento, se han hecho en grupos aislados de deportistas, diabéticos y sedentarios, sin existir un estudio que evalúe grupos equivalentes en estos grupos, por tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la interacción del sistema simpático vagal, a través del estudio de la VFC con análisis espectral en deportistas, personas portadoras de diabetes y sedentarios.

METODOLOGÍA

Diseño del estudio

El presente estudio fue observacional, prospectivo, transversal y comparativo entre grupos.

Se efectuó en 33 voluntarios varones con edades entre 20 y 45 años sin patología intercurrente, divididos en 3 grupos de 11 participantes en cada uno de ellos, a saber deportistas, diabéticos y sedentarios. La n muestral se obtuvo a partir de la varianza de la variable meta de desenlace, la amplitud del análisis espectral, mediante la fórmula:

$$n= l^2 *s^2/d^2$$

en la que l^2 es el nivel de confianza a un alfa de 95%; s^2 la amplitud de la varianza del análisis espectral y d^2 el error metodológico que se aceptó en la obtención electrocardiográfica de la muestra.

Los participantes fueron escogidos aleatoriamente de los servicios de salud de la universidad estatal oficial del centro de México, a quienes se les explicaron los procedimientos, riesgos y beneficios de la investigación. El proyecto fue aprobado por el comité de bioética de la entidad deportiva estatal educativa y deportiva del Estado de Guanajuato, México, el cual fue clasificado de riesgo bajo para investigación en humanos, ya que las maniobras no fueron intrusivas para humanos de acuerdo a la normativa mexicana, y se observaron los principios del código de Helsinki.

Se realizó un análisis integrativo de tipo fisiológico y clínico basado en evidencia experimental y modelos matemáticos de análisis espectral de la VFC. Se incluyeron estudios clásicos y contemporáneos sobre regulación autonómica, ejercicio físico y enfermedad metabólica para la



discusión .

Adquisición de señal

La VFC se deriva del análisis de los intervalos RR obtenidos mediante electrocardiografía (ECG), en reposo después de permanecer recostados en decúbito supino por 10 minutos para adquirir estabilidad de los latidos cardíacos. Se efectuó un tacograma con las variaciones del intervalo R-R del electrocardiograma, como una serie en el tiempo continúa en una derivación D-2 electrocardiográfica.

Procesamiento de señal

El análisis espectral se realizó mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT):

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i 2\pi kn/N}$$

Donde:

- x_n : intervalo RR
- X_k : componente espectral
- N : número de muestras

Bandas de frecuencia analizadas (1)

- VLF: 0.003–0.04 Hz
- LF: 0.04–0.15 Hz
- HF: 0.15–0.40 Hz

Cálculo de potencia espectral

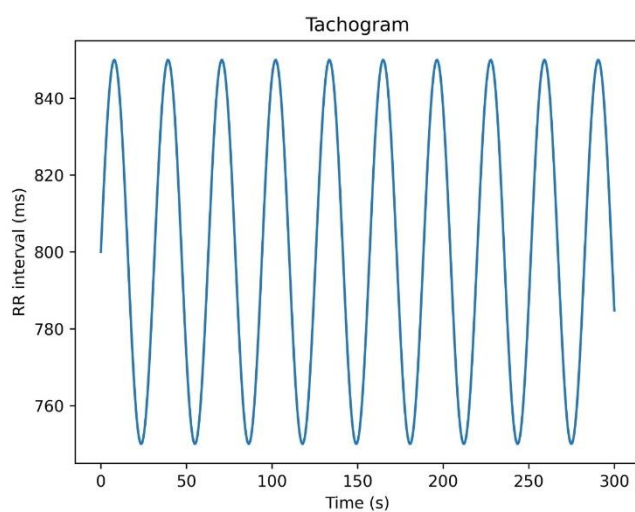
La densidad espectral de potencia (PSD) se integró para obtener el área bajo la curva (AUC):

$$AUC = \int_{f_1}^{f_2} PSD(f) df$$

Las figuras 1, 2 y 3 muestra el registro de los intervalos R-R del electrocardiograma, la variación de sus intervalos y el registro como Análisis del Poder Espectral obtenidos en los estudios de la regulación cardiovascular



Figura 1. Variación de los intervalos R-R obtenidos en electrocardiograma y representados en un tacograma de variación

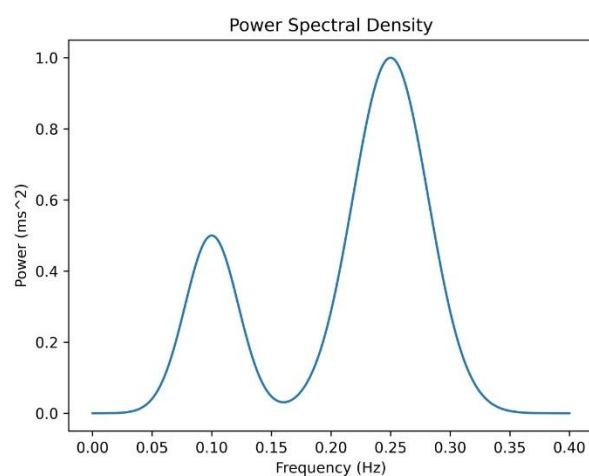


Se emplearon métodos de integración numérica a partir de las transformadas de Fourier descritas previamente.

Las valores obtenidos en el análisis espectral y su representación gráfica fueron evaluados para (Fig.2):

- Potencia absoluta HF (ms^2)
- Potencia LF (ms^2)
- Relación LF/HF
- Potencia total (TP)

Figura 2 Gráfica típica del análisis espectral



Maniobras complementarias fueron la obtención de la frecuencia cardíaca y presión arterial en:

- Reposo basal
- Ortostatismo
- Adaptación al entrenamiento
- Disfunción autonómica diabética.

No se encontraron datos anormales

Los valores de la LF, HF y la relación de la LF/HF, fueron evaluados con análisis de variancia de una vía, con post hoc de Tukey y Newman Keuls en las F significativas. El nivel de significancia se obtuvo a un alfa de 0.05.

RESULTADOS

Se describen a continuación los hallazgos encontrados en los:

Deportistas

Los sujetos aeróbicamente entrenados mostraron:

- un mayor valor y significativo de la potencia HF ($>1000 \text{ ms}^2$) ($35 \pm 3\%$)
- Reducción de la frecuencia cardíaca basal ($20 \pm 3\%$)
- Relación LF/HF < 1
- Mayor potencia total ($42 \pm 3\%$)

Los valores en relación a personas sedentarias. Estos hallazgos indican un claro predominio vagal, asociado con una mayor eficiencia cardiovascular y mejor control barorreflejo (8,9).

Pacientes diabéticos

Se observó:

- Disminución significativa de HF ($<300 \text{ ms}^2$) ($20 \pm 6\%$)
- Reducción de la potencia total ($24 \pm 3\%$)
- Incremento de LF/HF (>2)
- Alteraciones en VLF ($7 \pm 4\%$)

En relación a los sedentarios. Estos resultados son consistentes con neuropatía autonómica cardiovascular, donde el daño parasimpático ocurre de forma temprana (10,11).



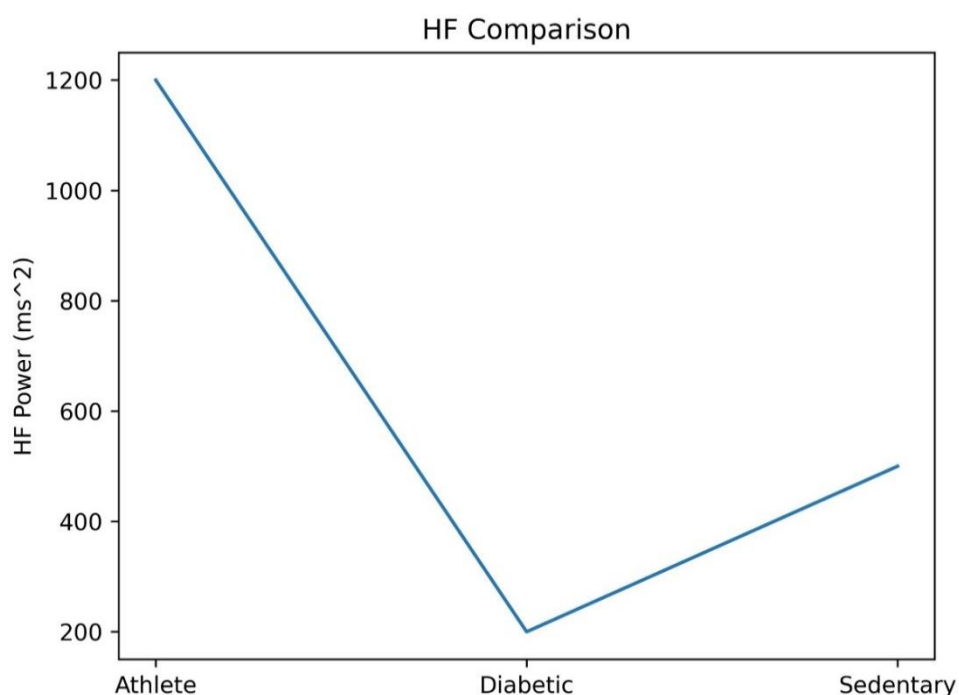
Sujetos sedentarios

Presentaron:

- Valores intermedios de HF y LF ($10 \pm 3\%$)
- $LF/HF \approx 1$
- Menor adaptabilidad autonómica

El grupo control fueron los sedentarios y los valores porcentuales de los deportistas y diabéticos se comparan contra este grupo control. Las diferencias fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$). La figura 3 muestra gráficamente las diferencias del pico de frecuencia alta (el evaluador global del balance autonómico de corazón)

Figura 3 Valores encontrados en deportistas, diabéticos y sedentarios en los picos de frecuencia alta (HF) (High Frequency Peak) en el análisis espectral



Se identificaron asociaciones relevantes en la literatura, consistentes con los hallazgos del presente estudio(13,14):

- $HbA1c \uparrow \rightarrow HF \downarrow$
- $Triglicéridos \uparrow \rightarrow LF/HF \uparrow$



- HDL-c ↓ → reducción de la VFC total

En los que la HbA1c es la hemoglobina glucosilada, HF es el pico de frecuencia alta, LF es el pico de frecuencia baja, HDL-c son las lipoproteínas.

Estos hallazgos sugieren una estrecha relación entre control metabólico y regulación autonómica.

DISCUSIÓN

Los resultados confirman que la VFC es un marcador altamente sensible del equilibrio simpático-vagal, con implicaciones clínicas y deportivas significativas. La predominancia parasimpática observada en deportistas refleja una adaptación fisiológica al entrenamiento aeróbico, caracterizada por una mayor eficiencia cardíaca y menor carga hemodinámica en reposo (8).

En contraste, la reducción de la VFC en pacientes diabéticos representa una manifestación temprana de neuropatía autonómica, la cual se asocia con un incremento en el riesgo de eventos cardiovasculares y mortalidad (10). Este deterioro autonómico se explica por múltiples mecanismos, incluyendo daño microvascular, estrés oxidativo y glicación avanzada (11).

Desde una perspectiva fisiopatológica, las fibras parasimpáticas son más susceptibles al daño metabólico, lo que explica la disminución temprana del componente HF en la diabetes. Posteriormente, la hiperactividad simpática compensatoria contribuye a la progresión de la enfermedad cardiovascular (13).

El análisis espectral mediante FFT proporciona una herramienta robusta para cuantificar estas alteraciones, permitiendo una evaluación objetiva del estado autonómico. Además, su aplicabilidad en medicina del deporte permite monitorear la carga de entrenamiento, la fatiga y la recuperación (9).

Los estudios de Rivera-Cisneros (12) destacan la importancia del ortostatismo como modelo fisiológico para evaluar la respuesta autonómica en condiciones dinámicas, evidenciando diferencias importantes entre individuos sanos y con disfunción autonómica (12).

CONCLUSION

La relación entre VFC y variables metabólicas refuerza el concepto de que el sistema nervioso autónomo actúa como un integrador clave entre el metabolismo y la función cardiovascular. El análisis espectral es un modelo matemático que permite caracterizar el estado del equilibrio autónomo



cardiovascular, con lo que abren nuevas oportunidades para el uso de la VFC como herramienta diagnóstica y pronóstica de la salud cardiovascular en las personas sedentarias, en la presencia de enfermedades metabólicas como la diabetes y en deportistas y ejercitantes de manera personalizada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *Circulation*. 1996;93(5):1043–1065. doi:10.1161/01.CIR.93.5.1043
- 2.- Pagani M, Lombardi F, Guzzetti S, Rimoldi O, Furlan R, Pizzinelli P, et al. Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog. *Circ Res*. 1986;59(2):178–193. doi:10.1161/01.RES.59.2.178
- 3.- Malliani A, Pagani M, Lombardi F, Cerutti S. Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain. *Circulation*. 1991;84(2):482–492. doi:10.1161/01.CIR.84.2.482
- 4.- Kleiger RE, Stein PK, Bigger JT Jr. Heart rate variability: measurement and clinical utility.
- 5.- *Ann Noninvasive Electrocardiol*. 2005;10(1):88–101. doi:10.1111/j.1542-474X.2005.10101.x
- 6.- Sztajzel J. Heart rate variability: a noninvasive electrocardiographic method to measure the autonomic nervous system. *Swiss Med Wkly*. 2004;134(35–36):514–522. doi:10.4414/smw.2004.10321
- 7.- Shaffer F, Ginsberg JP. An overview of heart rate variability metrics and norms. *Front Public Health*. 2017;5:258. doi:10.3389/fpubh.2017.00258
- 8.- Thayer JF, Yamamoto SS, Brosschot JF. The relationship of autonomic imbalance, heart rate variability and cardiovascular disease risk factors. *Int J Cardiol*. 2010;141(2):122–131. doi:10.1016/j.ijcard.2009.09.543
- 9.- Aubert AE, Seps B, Beckers F. Heart rate variability in athletes. *Sports Med*. 2003;33(12):889–919. doi:10.2165/00007256-200333120-00003
- 10.- Buchheit M. Monitoring training status with HR measures: do all roads lead to Rome?
- 11.- *Front Physiol*. 2014;5:73. doi:10.3389/fphys.2014.00073
- 12.- Vinik AI, Ziegler D. Diabetic cardiovascular autonomic neuropathy.



- 13.- Circulation. 2007;115(3):387–397. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.106.634949
- 14.- Spallone V. Update on cardiovascular autonomic neuropathy in diabetes. Diabetes Metab Syndr Obes. 2011;4:289–298. doi:10.2147/DMSO.S13081
- 15.- Rivera Cisneros AE, Díaz Cisneros FJ, Guerrero González H. Influencia del sistema nervioso autónomo en la respuesta de la frecuencia cardíaca al ortostatismo. Rev Invest Clin. 1993;45(3):215–222.
- 16.- Goldstein DS. The extended autonomic system, dyshomeostasis, and COVID-19.
- 17.- Circulation. 2019;139(20):178–192. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.118.038462
- 18.- Carnethon MR, Golden SH, Folsom AR, Haskell W, Liao D.. Prospective investigation of autonomic nervous system function and the development of type 2 diabetes. Diabetes Care. 2003;26(11):3035–3041. doi:10.2337/diacare.26.11.3035Task Force. Circulation. 1996;93:1043–65.

