



Medicent Electrón. 2025;29:e4521

ISSN 1029-3043

Comunicación

La fotopletismografía en estadios previos a la hipertensión arterial: ¿Útil en la hiperreactividad cardiovascular?

Photoplethysmography in stages prior to arterial hypertension: Is it useful in the assessment of cardiovascular hyperreactivity?

Marianela Ballesteros Hernández^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-2687-6302>

Leonardo Agustín Hernández Pérez² <https://orcid.org/0000-0002-5526-3364>

Alexis Rodríguez Pena¹ <https://orcid.org/0000-0002-7671-5884>

Roberto Luis Ballesteros Horta² <https://orcid.org/0000-0002-4941-754X>

¹Universidad de Ciencias Médicas de Villa Clara. Cuba.

²Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba.

*Autor para la correspondencia: Correo electrónico: marianelabh@infomed.sld.cu

RESUMEN

El análisis de la onda de pulso, obtenida por fotopletismografía, es uno de los métodos empleados para medir rigidez arterial y proporciona información relevante sobre la salud cardiovascular. En la hiperreactividad cardiovascular pueden estar presentes modificaciones iniciales en los mecanismos de regulación de la presión arterial. Se realizó el análisis de la onda de pulso en 130 jóvenes de 18 a 21 años; de ellos, 65 normorreactivos y 65 hiperreactivos cardiovasculares.



Para determinar las variables de mejor desempeño, se aplicó un conjunto de métodos de reconocimiento de patrones con enfoque supervisado y se implementó, un procedimiento que utiliza evaluadores de rasgos de bajo costo computacional. La identificación de variables con capacidad discriminativa demuestra, que la fotoplethysmografía puede ser útil en la evaluación de la hiperreactividad cardiovascular. Las variables identificadas pueden constituir focos de atención para su análisis en la búsqueda de modificaciones iniciales en estadios previos a la hipertensión arterial.

DeCS: fotoplethysmografía; rigidez vascular; presión arterial; prueba de esfuerzo; adulto joven.

ABSTRACT

Photoplethysmography-based pulse wave analysis is one of the methods used to measure arterial stiffness and provides relevant information on cardiovascular health. Initial modifications in the mechanisms of blood pressure regulation may be present in cardiovascular hyperreactivity. Pulse wave analysis was performed on 130 young people aged 18 to 21 years: 65 normoreactive and 65 cardiovascular hyperreactive. A set of pattern recognition methods with a supervised approach was applied to determine the best performing variables as well as a procedure that uses low- cost computationally trait evaluators was implemented. The identification of variables with discriminative capacity demonstrates that photoplethysmography can be useful in the assessment of cardiovascular hyperreactivity. The identified variables may constitute focuses of attention for analysis in the search for initial modifications in stages prior to arterial hypertension.

MeSH: photoplethysmography; vascular stiffness; arterial pressure; stress test; young adult.

Recibido: 13/12/2025

Aprobado: 16/12/2025



El incremento de la rigidez arterial es un marcador, no invasivo, de la lesión vascular que permite su detección en la fase preclínica, cuando comienza la disfunción endotelial o durante los primeros cambios histológicos. Este es un buen factor pronóstico de enfermedad cardiovascular, independiente de los factores clásicos. Diversos métodos permiten determinar el grado de daño vascular como la pletismografía, los biomarcadores de actividad endotelial, el índice de presiones tobillo-brazo y el grosor íntima-media carotídeo.⁽¹⁾

La onda de pulso, obtenida por la fotopleetismografía, es una representación visual de los cambios en el volumen sanguíneo dentro del lecho tisular microvascular y proporciona información de relevancia sobre la salud cardiovascular. La fotopleetismografía no es el método de referencia para la monitorización de la presión arterial, pero ofrece soluciones innovadoras a algunas de las limitaciones de los métodos tradicionales. Uno de los aspectos más prometedores es su potencial para permitir la monitorización de la presión arterial latido a latido; esta posibilidad lo convierte en una alternativa atractiva para un control más detallado y eficaz de la hipertensión arterial (HTA).⁽²⁾

Aunque la búsqueda para extraer la predicción de la presión arterial a partir del análisis de la onda de pulso se aborda desde múltiples perspectivas, los estudios existentes no consideran un modelo sólido que vincule la naturaleza mecánica de la presión arterial con la naturaleza óptica de la fotopleetismografía. Si bien, estos mecanismos aún son objeto de debate, no constituyen un obstáculo para evaluar la caracterización cardiovascular con cierto nivel de confianza.⁽³⁾

Evdochim y colaboradores⁽³⁾ definen el nivel deseado de información cardiovascular que se puede extraer de la señal óptica en tres niveles de predicción: Nivel 1: Si el individuo está hipotenso, normotenso o hipertenso. Nivel 2: La tendencia ascendente o descendente de la presión arterial, de forma cualitativa, durante un período de observación determinado en un caso de monitorización individual. Nivel 3: El valor de la presión arterial. Este último es el más difícil de lograr, pues puede requerir técnicas alternativas como el tiempo de



tránsito de pulso, que involucra un segundo sensor como el electrocardiograma y requiere de calibración.

La rigidez arterial aumenta con la edad a lo largo de la vida, y su origen en las primeras etapas de la vida es aún un tema de debate. La rigidez arterial disminuye la impedancia entre las arterias elásticas con gradiente normal y las arterias musculares rígidas. Esto resulta en un aumento de la potencia pulsátil transmitida y la carga en los vasos conductores, las arterias pequeñas y la microcirculación, lo que provoca daño orgánico y remodelación.⁽⁴⁾

La rigidez arterial se consideró como un marcador intermedio de eventos cardiovasculares ateroscleróticos, en estudios con adolescentes y adultos jóvenes. La escasez de datos longitudinales normativos y la repetición de evaluaciones de referencia generaron una gran brecha de conocimiento sobre su utilidad clínica. Sin embargo, los hallazgos longitudinales del Estudio Longitudinal de Padres e Hijos de Avon (ALSPAC) sugieren la presencia de un predictor independiente de varios factores de riesgo, para enfermedades cardiometabólicas. La mayor rigidez arterial en la adolescencia podría ser un nuevo factor de riesgo para la HTA y la enfermedad metabólica en la adultez temprana.⁽⁴⁾

Estudios en adolescentes y adultos jóvenes sugieren, que la velocidad de la onda de pulso puede ser un indicador temprano de trastornos cardiometabólicos, lo cual favorece a los profesionales de la salud, para exhortar a los jóvenes a adoptar modificaciones tempranas en sus estilos de vida. Abgabe⁽⁴⁾ plantea, que una mayor rigidez arterial en la adolescencia puede ser un nuevo factor de riesgo para la HTA y la enfermedad metabólica en la adultez temprana.

La observación, de que la rigidez arterial precede a alteraciones biológicas, puede indicar que la rigidez arterial es un marcador temprano de una serie de modificaciones en el organismo; su estudio, desde estadios previos a la HTA, puede ser útil para la evaluación del sistema cardiovascular. Sánchez Hechavarría y colaboradores,⁽⁵⁾ en un estudio en individuos prehipertensos, a



quienes se les determinó la rigidez arterial por fotoplethysmografía, encontraron alteraciones de la rigidez arterial, dado por el predominio de los índices de rigidez arterial moderado y grave. Esto evidencia, que la rigidez arterial puede aparecer desde los estadios iniciales del incremento de la presión arterial y un aspecto a tener en cuenta en los jóvenes hiperreactivos.

El desarrollo de la HTA puede estar precedido por un estado prehipertensivo que se manifiesta por una reactividad cardiovascular anormal, en individuos aparentemente sanos. La hiperreactividad cardiovascular (HRCV) está entre los factores de riesgo que incrementan la probabilidad de desarrollar HTA y se asocia significativamente, con otros factores de riesgo de enfermedades no transmisibles.⁽⁶⁾ Durante ese estado de HRCV, los individuos pueden presentar modificaciones iniciales en los mecanismos de regulación de la presión arterial: uno de sus determinantes es la resistencia periférica total, en el cual desempeña un papel fundamental el grado de rigidez arterial.

Existen marcadores reconocidos internacionalmente para medir la rigidez arterial mediante el análisis del registro de la onda de pulso, como el índice de reflexión, el índice de aumentación y el índice de rigidez arterial. Sin embargo, en el registro de la onda de pulso se obtienen múltiples variables que pueden resultar útiles para la evaluación de la rigidez arterial en estadios previos a la HTA.

El análisis de la onda de pulso obtenida por fotoplethysmografía, denominada fotoplethysmograma, ofrece múltiples variables:⁽⁷⁾

1. Características básicas: Se obtienen directamente de la forma de onda, usadas con frecuencia en la clínica como la amplitud del pulso sistólico, amplitud del pulso y el intervalo entre dos pulsos consecutivos.
2. Características combinadas: Combinan varios puntos del fotoplethysmograma e incluyen índice de perfusión, de rigidez arterial, de aumentación y el tiempo de tránsito del pulso.
3. Características obtenidas al determinar la primera y segunda derivada de la onda: Su importancia fisiológica se describió desde la década de 1970 , pero es a



partir de los años noventa que comenzó a recibir una atención especial. Tanto el análisis de la primera derivada, como de la segunda derivada de la onda de pulso, son ventajosos para representar las variaciones espaciotemporales del fotopletismograma con respecto a la posición del pico, el punto de inflexión, el número de picos y las pendientes, ascendente y descendente. Pueden utilizarse como métodos alternativos para detectar picos dicróticos y diastólicos difíciles de detectar en las formas de onda originales.

En la onda obtenida de la primera derivada, denominada pletismograma de velocidad, se puede determinar el tiempo de cresta y el intervalo de tiempo desde el pico sistólico hasta el pico diastólico (ΔT). En la segunda derivada, denominada pletismograma de aceleración, se definen picos y valles conocidos como *a*, *b*, *c*, *d* y *e*; algunos de sus índices muestran correlación significativa con el envejecimiento, la rigidez arterial y al riesgo cardiovascular de Framingham.⁽⁷⁾

En un estudio realizado en el Laboratorio de Fisiología Cardiovascular de la Unidad de Investigaciones Biomédicas (UNIB) de la Universidad de Ciencias Médicas de Villa Clara (UCMVC) se analizó la onda de pulso en 130 jóvenes de 18 a 21 años, aparentemente sanos. La muestra se dividió en 65 normorreactivos y 65 hiperreactivos cardiovasculares, según la respuesta a la prueba isométrica del peso sostenido (PPS).

La onda de pulso se obtuvo con un polígrafo marca *ADInstrument* de procedencia australiana acoplado a una computadora con microprocesador *Intel Dual Core*, a través de la colocación de un transductor fotopletismográfico sobre la falange distal del dedo del medio del miembro superior derecho. Se realizó el análisis de los registros obtenidos mediante la herramienta *PulseAnalyse*⁽⁸⁾ y se obtuvieron 48 variables de la onda del pulso de cada individuo.

A estas variables se les aplicó un conjunto de métodos de reconocimiento de patrones con enfoque supervisado, para determinar las variables de mejor desempeño en la discriminación de la hiperreactividad cardiovascular en estos



jóvenes. Se implementó un procedimiento que utiliza evaluadores de rasgos de bajo costo computacional, que emplean algoritmos de búsqueda de tipo *ranker* de acuerdo con la terminología de *Weka*⁽⁹⁾ (*Waikato Environment for Knowledge Analysis*).

La plataforma utilizada se basa en un *software* de *machine learning* y minería de datos que contiene una colección de herramientas de visualización y algoritmos para análisis de datos y modelado predictivo. De manera simultánea a la selección de las variables de mayor importancia, se implementó el proceso de clasificación para evaluar el conjunto de mejor desempeño; para ello se utilizó la validación cruzada estratificada de 10 iteraciones (*10-fold crossvalidation*). Se tomaron como resultados válidos de la clasificación, aquellos que contenían cuatro o menos variables; es decir, 10 % o menos de la cantidad total de variables analizadas, para garantizar que no se sobreajustara el clasificador.⁽¹⁰⁾

La aplicación del procesamiento de las variables permitió obtener un número de clasificaciones con su conjunto de variables. Se seleccionaron los clasificadores con índice de clasificados correctamente por encima de 65 %, se identificaron las variables que presentaron una mayor repetición en las clasificaciones seleccionadas y se ordenaron las variables según su relevancia, teniendo en cuenta tanto el orden de cada clasificador como el de identificación de cada uno. Los clasificadores mostraron un porcentaje correcto de clasificados, entre el 65 y 67 %. Los valores obtenidos no se consideran altos, pero resultaron significativos para discriminarlos entre ambos grupos; estos se corresponden con estudios discriminantes realizados en este grupo poblacional (jóvenes aparentemente sanos); en ellos se buscaban modificaciones iniciales y no se observaron grandes diferencias entre ambos grupos.

El mayor número de variables, que mostraron mejor desempeño en la discriminación de la HRCV en estos jóvenes, están relacionadas con el intervalo entre diferentes puntos fiduciales de los picos sistólicos y diastólicos, y solo una se relacionó con la amplitud de los picos. Las variables identificadas, según orden



de relevancia fueron: 1. Tiempo entre el pico sistólico y el diastólico (ΔT); 2. Tiempo entre el segundo punto de inflexión de la onda incidente (P2) y el pico diastólico; 3. Tiempo entre *b* y *c*; 4. Proporción de la duración de la onda del pulso que se consume en la pendiente ascendente sistólica. 5. Amplitud de *d* relativa a. 6. Tiempo de cresta.

El ΔT es la diferencia de tiempo entre el primer y el segundo punto de cruce por cero, según el valor positivo a negativo de la primera derivada del fotopletoislograma y representa el tiempo que tarda la sangre expulsada del corazón en llegar al vaso sanguíneo periférico. La amplitud de *d* relativa a es la relación entre la amplitud del pico tardío re-decreciente sistólico y la amplitud del pico temprano positivo sistólico de la segunda derivada del fotopletoislograma; este es inversamente proporcional a la rigidez vascular, disminuye con la edad y se utiliza para la evaluación de agentes vasoactivos. El tiempo de cresta es el intervalo temporal entre el inicio del pulso y el primer cruce por cero de la primera derivada; su uso clínico, se basa en que su valor es mayor en pacientes con enfermedad vascular e hipertensos.⁽⁷⁾

La identificación de variables con capacidad discriminativa entre jóvenes normorreactivos e hiperreactivos cardiovasculares demuestra que la fotopletoislografía puede ser útil en la evaluación de la HRCV. Las variables identificadas pueden constituir focos de atención para su análisis en la búsqueda de modificaciones iniciales a nivel de la vasculatura en estadios previos a la HTA, y punto de partida para la realización de estudios futuros en jóvenes con diferentes grados de reactividad cardiovascular.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Tsaia JP, Hsu BG. Arterial stiffness: A brief review. Tzu Chi Med J [Internet]. 2021 [citado 21 mar. 2024]; 33(2):115-21. Disponible en: https://journals.lww.com/TCMJ/fulltext/2021/33020/Arterial_stiffness_A_brief_review.3.aspx
2. Elgendi M, Haugg F, Ribon Fletcher R, Allen J, Shin H, Alian A, et al. Recommendations for evaluating photoplethysmography-based algorithms for blood pressure assessment. Communications Medicine [Internet]. 2024 [citado 14 oct 2025];4(140). Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s43856-024-00555-2>
3. Evdochim LD, Halichidis S, Dobrescu L, Stanciu, S. Hypertension detection based on photoplethysmography signal morphology and machine learning techniques. Appl Sci [Internet]. 2022 [citado 14 oct. 2025];12(8380). Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/16/8380>
4. Agbaje AO. Arterial stiffness precedes hypertension and metabolic risks in youth: a review. J Hypertens [Internet]. 2022 [citado 26 mar. 2024];40:1887-96. Disponible en: https://journals.lww.com/jhypertension/fulltext/2022/10000/arterial_stiffness_precedes_hypertension_and.4.aspx
5. Sánchez-Mengana A, Pascau-Simón A, García-Céspedes M, Vitón-Castillo A, Abad-Araujo J, Sánchez-Hechavarría M. Rigidez vascular obtenida mediante fotoplethysmografía y riesgo cardiovascular en pacientes prehipertensos. CorSalud [Internet]. 2022 [citado 21 mar. 2024];14(1). Disponible en: <https://revcorsalud.sld.cu/index.php/cors/article/view/710/1469>



6. Ballesteros Hernández M, Moya Bernal SM, Rodríguez Pena A, Hernández Ramírez A, Botello Ramírez EA. Relación de medidas antropométricas con las presiones arteriales en jóvenes normorreactivos e hiperreactivos cardiovasculares. Rev Cubana Salud Pública [Internet]. 2024 [citado 15 febr. 2025]; 50. Disponible en: <https://revsaludpublica.sld.cu/index.php/spu/article/view/17181/1972>
7. Park J, Seok HS, Kim SS, Shin H. Photoplethysmogram analysis and applications: an integrative review. Front Physiol [Internet]. 2022 [citado 14 oct. 2025];12. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/physiology/articles/10.3389/fphys.2021.808451/full>
8. Charlton PH, Mariscal Harana J, Vennin S, Li Y, Chowienczyk P, Alastruey J. Modeling arterial pulse waves in healthy aging: a database for in silico evaluation of hemodynamics and pulse wave indexes. Am J Physiol Heart Circ Physiol [Internet]. 2019 [citado 14 oct. 2025];317(5). Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6879924>
9. Frank E, Hall MA, Witten IH. The WEKA Workbench. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. Massachusetts: Morgan Kaufmann Publishers; 2016 [cited 2 nov. 2025]. Disponible en: https://ml.cms.waikato.ac.nz/weka/Witten_et_al_2016_appendix.pdf
10. Aliferis C, Simon G. Overfitting, Underfitting and General Model Overconfidence and Under-Performance Pitfalls and Best Practices in Machine Learning and AI. 2024. In: Artificial Intelligence and Machine Learning in Health Care and Medical Sciences: Best Practices and Pitfalls [Internet]. Cham (CH): Springer. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK610560/>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

