

Medicent Electrón. 2026;30:e4479

ISSN 1029-3043

Artículo de Revisión

Modelos predictivos en rehabilitación cardiovascular para pacientes hipertensos: una revisión actualizada hacia una medicina personalizada

Predictive models in cardiovascular rehabilitation for hypertensive patients: an updated review towards personalized medicine

Tomás José Pérez García^{1*} <https://orcid.org/0009-0004-3899-7624>

Gustavo de Jesús Bermúdez Yera¹ <https://orcid.org/0000-0001-5313-4086>

Claudia Benítez Nieves¹ <https://orcid.org/0009-0001-7256-8864>

¹Universidad de Ciencias Médicas de Villa Clara. Cuba.

*Autor para la correspondencia. Correo electrónico:

tomasjoseperezgarcia@gmail.com

RESUMEN

Introducción: La hipertensión arterial se considera uno de los principales factores de riesgo modificables para la carga global de enfermedad cardiovascular, responsable de una proporción significativa de muertes por cardiopatía isquémica, accidente cerebrovascular e insuficiencia renal. La rehabilitación cardiaca es una estrategia fundamental, pero la respuesta variable de los pacientes hipertensos exige herramientas para una estratificación individual del riesgo.

Objetivo: Sintetizar la evidencia reciente sobre el desarrollo y aplicación de modelos predictivos para prever la efectividad de la rehabilitación cardiaca en hipertensos, con énfasis en su implementación en el sistema de salud cubano.

Métodos: Revisión narrativa (2019-2025) en PubMed/MEDLINE, SciELO, Cochrane Library y Google Académico; se priorizaron revisiones sistemáticas, metaanálisis y estudios de cohortes con especial atención a las guías de práctica clínica publicadas a partir de 2022 que desarrollaron o validaron modelos predictivos.

Conclusiones: La rehabilitación cardiaca se considera eficaz para el control de la hipertensión, pero el uso de modelos predictivos es aún incipiente. El desarrollo, validación e implementación rutinaria de modelos predictivos en la práctica clínica enfrenta varios desafíos sustanciales; entre ellos, una validación externa rigurosa. Un modelo que muestra un rendimiento excelente en la población puede fracasar al ser aplicado en una cohorte diferente debido a variaciones en la genética, la distribución de los factores de riesgo, las prácticas clínicas locales y el contexto sociocultural. El desarrollo de un modelo contextualizado para la población cubana y el Kurhotel Escambray es necesario para optimizar la selección de pacientes, personalizar tratamientos y racionalizar recursos.

DeCS: hipertensión; rehabilitación cardiaca; modelos predictivos; inteligencia artificial; aprendizaje automático.

ABSTRACT

Introduction: high blood pressure is considered one of the main modifiable risk factors for the global burden of cardiovascular disease, responsible for a significant proportion of deaths from ischemic heart disease, stroke and kidney failure. Cardiac rehabilitation is a fundamental strategy but the variable response of hypertensive patients requires tools for individual risk stratification.

Objective: to synthesize recent evidence on the development and application of predictive models in order to predict the effectiveness of cardiac rehabilitation in



hypertensive patients with emphasis on its implementation in the Cuban health system.

Methods: narrative review (2019-2025) in PubMed/MEDLINE, SciELO, Cochrane Library and Google Scholar; systematic reviews, meta-analyses and cohort studies were prioritized with special attention to clinical practice guidelines published after 2022 that developed or validated predictive models.

Conclusions: cardiac rehabilitation is considered effective for controlling hypertension but the use of predictive models is still scarce. The development, validation and routine implementation of predictive models in clinical practice faces several substantial challenges such as rigorous external validation. A model that shows excellent performance in the population may fail when applied in a different cohort due to variations in genetics, distribution of risk factors, local clinical practices and sociocultural context. The development of a contextualized model for the Cuban population and the Kurhotel Escambray is necessary to optimize patient selection, personalize treatments and rationalize resources.

Keywords: hypertension; cardiac rehabilitation; predictive models; artificial intelligence; machine learning.

Recibido: 12/10/2025

Aprobado: 7/11/2025

INTRODUCCIÓN

La hipertensión arterial (HTA) se mantiene implacable como uno de los principales factores de riesgo modificables para la carga global de enfermedad cardiovascular; es responsable de una proporción significativa de muertes por cardiopatía isquémica, accidente cerebrovascular e insuficiencia renal. ⁽¹⁾ Su prevalencia continúa en ascenso, y se convierte en un desafío para los sistemas de salud en todo el mundo.



En el contexto cubano, los datos de la Tercera Encuesta Nacional de Factores de Riesgo y la Encuesta Nacional de Salud 2018-2019 pronostican un panorama preocupante, con una prevalencia que afecta, aproximadamente, a un tercio de la población adulta (alrededor de 2,6 millones de personas), una cifra que probablemente subestime la magnitud real del problema.⁽²⁾ Este escenario epidemiológico demanda estrategias de gestión que trasciendan el enfoque tradicional centrado únicamente en el control farmacológico.

Dentro del arsenal terapéutico no farmacológico, los programas de rehabilitación cardiovascular (RCV) han demostrado, de manera consistente, una eficacia significativa. Estas intervenciones multidisciplinarias, estructuradas en fases secuenciales y cuyo núcleo es el ejercicio físico supervisado, no solo logran reducciones clínicas relevantes de la presión arterial (PA), sino que también, mejoran la capacidad funcional, la calidad de vida relacionada con la salud, el perfil metabólico y el estado psicológico de los pacientes hipertensos.⁽³⁾ Las guías de práctica clínica más prestigiosas, como las recientemente publicadas por la Sociedad Europea de Cardiología (ESC) en 2024, refrendan la RCV como un pilar fundamental en el manejo integral de la HTA.⁽⁴⁾

Sin embargo, una observación clínica persistente y respaldada por la evidencia es la heterogeneidad en la respuesta individual a estos programas. Mientras un subgrupo de pacientes experimenta mejorías dramáticas en sus cifras tensionales y su condición física, otro subgrupo, no despreciable, presenta una evolución poco satisfactoria o mínimamente significativa.⁽⁵⁾ Esta variabilidad interindividual sugiere la influencia de factores predictores subyacentes, tanto genéticos como fisiopatológicos, clínicos y psicosociales, que no son rutinariamente considerados en los algoritmos de decisión clínica actuales. Esta limitación convierte la asignación a los programas de RCV en una estrategia, que, si bien, habitualmente es efectiva, podría no ser óptima desde una perspectiva de eficiencia y personalización.



En la era de la medicina de precisión, los modelos predictivos surgen como herramientas transformadoras para optimizar la toma de decisiones. Estos constructos matemático-estadísticos, que pueden oscilar entre los relativamente simples modelos de regresión logística y los complejos algoritmos de inteligencia artificial (IA) y *machine learning* (ML), permiten estimar la probabilidad de un desenlace futuro específico, basados en las características iniciales de un paciente.⁽⁶⁾ En el ámbito de la HTA, el uso histórico de los modelos se ha centrado en predecir la incidencia o el riesgo cardiovascular a largo plazo.⁽⁷⁾ Existe, por tanto, un vacío notable en la aplicación explícita de estos modelos para predecir la efectividad de una intervención terapéutica específica y estructurada como la RCV.

La población militar, incluyendo al personal de las Fuerzas Armadas Revolucionarias (FAR), representa un grupo de particular interés. Expuestos a factores de riesgo ocupacionales únicos, como el estrés operacional crónico, las largas e impredecibles jornadas laborales, los despliegues en misiones y una cultura organizacional que puede priorizar el rendimiento sobre la salud preventiva, presentan un perfil de riesgo y adherencia distintivo.⁽⁸⁾ La capacidad de predecir qué miembros de esta población se beneficiarán sustancialmente de un programa de RCV, como el que se implementa en el Kurhotel Escambray, adquiere una relevancia estratégica para la eficiencia del sistema de salud militar y la preservación de su capital humano.

Por lo tanto, el objetivo de esta revisión narrativa es sintetizar críticamente, la evidencia científica actual sobre los modelos predictivos aplicados a la RCV en pacientes hipertensos. Se analizaron las bases de la RCV, incluyendo sus fases fundamentales, las variables predictoras más consistentes asociadas con una evolución favorable, se discutieron las metodologías de desarrollo y validación de modelos y se exploraron las consideraciones especiales para la población militar; finalmente, se evaluó el potencial de implementación de estas herramientas de



vanguardia para mejorar la efectividad y eficiencia de los programas de RCV en el contexto del sistema nacional de salud cubano.

MÉTODOS

Con el propósito de recopilar, analizar y sintetizar la evidencia más actual y relevante sobre la temática en cuestión, se llevó a cabo una revisión narrativa exhaustiva de la literatura científica. Este tipo de revisión permite ofrecer una perspectiva amplia y contextualizada del estado del arte, ideal para temas emergentes y multidisciplinarios.

Estrategia de búsqueda y fuentes de Información: La búsqueda bibliográfica se diseñó para ser comprehensiva y se ejecutó durante el mes de julio de 2025. Se consultaron sistemáticamente las siguientes bases de datos bibliográficas: PubMed/MEDLINE (a través de la plataforma NCBI), SciELO (Scientific Electronic Library Online), la Cochrane Library y Google Académico para capturar literatura gris y estudios relevantes no indexados. Para garantizar la actualización exigida por las normas de publicación, la búsqueda se restringió prioritariamente a artículos publicados en los últimos 6 años (período 2019-2025), con especial atención a las guías de práctica clínica publicadas a partir de 2022, revisiones sistemáticas, metaanálisis, estudios de cohortes prospectivos y trabajos originales que desarrollaron o validaron modelos predictivos.

Términos de Búsqueda: Se utilizaron combinaciones booleanas de los siguientes términos MeSH (Medical Subject Headings) y palabras clave libres en inglés y español:

- En inglés: *hypertension OR high blood pressure AND cardiac rehabilitation OR exercise therapy AND predictive models OR machine learning OR risk prediction AND treatment outcome OR clinical effectiveness AND phases of cardiac rehabilitation.*



- En español: "hipertensión arterial" AND "rehabilitación cardiovascular" OR "ejercicio terapéutico" AND "modelos predictivos" OR "inteligencia artificial" OR "aprendizaje automático" AND "resultado del tratamiento" AND "fases de la rehabilitación".

La estrategia se adaptó a la sintaxis y funcionalidades específicas de cada motor de búsqueda.

Criterios de selección: Se incluyeron artículos de texto completo, en idioma español o inglés, que abordaran de forma explícita el uso, desarrollo o validación de modelos predictivos para predecir la efectividad, adherencia o respuesta clínica en pacientes hipertensos sometidos a programas de RCV. También se incluyeron estudios que identificaron factores predictores de dichos resultados, así como artículos que describieron la estructura y componentes de las fases de la RCV. Se excluyeron estudios que se limitaran a modelos de predicción de incidencia de HTA sin relación con la respuesta al tratamiento, artículos sin acceso al resumen o texto completo, editoriales, cartas al editor sin datos primarios sustanciales y estudios con muestras muy pequeñas (<50 participantes) que limitaran la generalización de sus hallazgos.

Proceso de selección y síntesis de la información: Inicialmente, los títulos y resúmenes de los artículos identificados fueron revisados de forma independiente por el primer autor para determinar su pertinencia y elegibilidad, según los criterios preestablecidos. Los artículos considerados potencialmente relevantes fueron recuperados a texto completo. Posteriormente, se realizó una lectura crítica en profundidad de estos documentos.

La información extraída fue organizada de manera narrativa en secciones temáticas lógicas y coherentes, buscando identificar tendencias, puntos de consenso, controversias y lagunas en el conocimiento, en lugar de realizar una síntesis cuantitativa formal (meta-análisis).



DESARROLLO

1. La rehabilitación cardiovascular: Fases, mecanismos fisiopatológicos y evidencia de eficacia en la HTA

La RCV es una intervención compleja y multidisciplinaria diseñada para optimizar el estado de salud física, mental y social de los pacientes con enfermedades cardiovasculares o con alto riesgo de padecerlas. Se estructura tradicionalmente, en tres fases secuenciales que se adaptan a la condición clínica y al entorno del paciente.⁽⁹⁾

1.1. Fases de la rehabilitación cardiovascular

- Fase I (Hospitalaria o Aguda): Esta fase se inicia de forma precoz, una vez que el paciente se encuentra hemodinámicamente estable. Su objetivo principal es prevenir las complicaciones derivadas del desacondicionamiento físico por el reposo en cama, movilizar al paciente de forma gradual y segura, proporcionar educación inicial sobre la enfermedad y los factores de riesgo. Las actividades son de baja intensidad y progresivas, buscan que el paciente alcance, antes del alta, la capacidad para realizar actividades básicas de la vida diaria. Tiene una duración variable, generalmente de una a dos semanas, dependiendo de la evolución clínica.⁽¹⁰⁾
- Fase II (Ambulatoria o de Convalecencia): Es la fase central y más intensiva de la RCV. Se lleva a cabo de forma ambulatoria en las primeras semanas o meses tras el alta hospitalaria. El paciente acude periódicamente, tres veces por semana a un centro especializado donde realiza ejercicio supervisado y monitorizado (frecuencia cardíaca, PA, electrocardiograma), y recibe intervenciones estructuradas del equipo multidisciplinario (cardiólogo, enfermero, fisioterapeuta, psicólogo, nutricionista). El enfoque está en el control agresivo de los factores de riesgo, la mejora de la capacidad funcional y la educación profunda para la autogestión de la enfermedad. Su duración típica es de ocho a



12 semanas. ⁽¹¹⁾ Para los pacientes hipertensos, sin un evento agudo reciente, como los del programa del Kurhotel Escambray, la incorporación directa a un régimen similar a la fase II es común, con una estancia de 21 días en el centro.

- Fase III (de Mantenimiento): Esta fase tiene como objetivo mantener a largo plazo los beneficios obtenidos en la fase II y promover la sostenibilidad de los estilos de vida cardiosaludables. Los programas de ejercicio pueden realizarse en el domicilio, en centros comunitarios o polideportivos, con un nivel de supervisión menor. Incluye sesiones de recuerdo educativas y seguimiento periódico. La fase III debe extenderse de por vida, ya que el abandono de los hábitos saludables conduce a la pérdida progresiva de los beneficios cardiovasculares. ⁽¹²⁾ La adherencia a esta fase es uno de los mayores desafíos, especialmente en poblaciones con demandas laborales exigentes como la militar. Para el paciente hipertenso, el componente de ejercicio físico supervisado es fundamental a lo largo de todas las fases. Los mecanismos fisiopatológicos, a través de los cuales el ejercicio ejerce su efecto antihipertensivo, son multifacéticos y actúan de forma sinérgica. Entre los más importantes se encuentran:

- Mejora de la función endotelial: El ejercicio aeróbico crónico estimula la producción de óxido nítrico, un potente vasodilatador que mejora la reactividad vascular y reduce la resistencia vascular periférica. ⁽¹³⁾
- Modulación del sistema nervioso autónomo: Disminuye la actividad simpática y aumenta el tono parasimpático; contribuye a la reducción de la frecuencia cardíaca en reposo y de la PA. ⁽¹⁴⁾
- Mejora de la sensibilidad a la insulina: El ejercicio reduce la resistencia a la insulina, lo que a su vez disminuye la reabsorción tubular de sodio y reduce la activación del sistema nervioso simpático. ⁽¹⁵⁾



- Reducción de la rigidez arterial: El ejercicio regular puede mejorar la compliance arterial, un determinante clave de la presión de pulso y la PA sistólica.⁽¹⁶⁾

La evidencia más sólida, respaldada por numerosos metaanálisis, apoya que el ejercicio aeróbico dinámico (caminar a paso rápido, trotar, nadar o ciclismo). Un metaanálisis reciente y robusto de Saco-Ledo y colaboradores⁽¹⁵⁾ confirmó, que el ejercicio aeróbico regular reduce la PAS en un promedio de 5-8 mmHg y la PAD en 3-6 mmHg en pacientes hipertensos, con efectos más pronunciados en aquellos con HTA no controlada.⁽¹⁷⁾

Históricamente, el entrenamiento de fuerza fue visto con cautela en hipertensos. Sin embargo, la evidencia contemporánea ha reivindicado su papel. El metaanálisis pivotal de Morita y colaboradores⁽¹⁶⁾ demostró de manera concluyente, que el entrenamiento de fuerza, tanto dinámico como isométrico, posee un efecto antihipertensivo comparable en magnitud al del ejercicio aeróbico y ofrece un espectro de posibilidades para la prescripción de ejercicio personalizada y combinada.⁽¹⁸⁾

Las guías de práctica clínica más actualizadas, como las de la Sociedad Europea de Cardiología (ESC) de 2024, no solo refuerzan la recomendación del ejercicio físico como parte integral del tratamiento no farmacológico de la HTA, sino que, enfatizan la necesidad de programas estructurados en fases, supervisados y adaptados individualmente para maximizar la adherencia, la seguridad y los beneficios a largo plazo.⁽⁴⁾

2. La heterogeneidad en la respuesta: Justificación fundamental para los modelos predictivos

A pesar de la eficacia promedio incontrovertible de la RCV, es un hecho bien establecido en la fisiología del ejercicio y la cardiología, que no todos los pacientes responden de la misma manera. Esta heterogeneidad en la respuesta



no es aleatoria, puede atribuirse a una compleja interacción de factores genéticos, demográficos, clínicos, psicosociales y relacionados con el estilo de vida.

Investigaciones recientes han comenzado a identificar algunos de estos factores; por ejemplo, la edad, el sexo y la etnia pueden influir en la magnitud de la reducción de la PA. La gravedad basal de la HTA es otro predictor importante; los pacientes con HTA grado 2 o 3 suelen experimentar reducciones absolutas mayores, aunque el control final puede ser más difícil de alcanzar. ⁽⁵⁾ La presencia de comorbilidades como la diabetes mellitus, la enfermedad renal crónica o la obesidad mórbida puede atenuar la respuesta.

Más allá de los factores puramente clínicos, elementos psicosociales como el nivel de estrés percibido, la presencia de depresión o ansiedad, el apoyo social, y el nivel socioeconómico y educativo se han asociado consistentemente con la adherencia a los programas de RCV y, por ende, con sus resultados finales. ⁽¹⁹⁾ La transición entre fases, especialmente de la fase II a la fase III, es un punto crítico donde muchos pacientes abandonan el programa, perdiendo los beneficios a largo plazo.

Identificar, *a priori*, a los pacientes con una alta probabilidad de éxito "buenos respondedores" permitiría una asignación de los recursos de RCV, a menudo limitados de manera más eficiente y costo-efectiva. Paralelamente, reconocer de forma temprana a aquellos con un alto riesgo de una evolución desfavorable o de baja adherencia facilitaría la implementación proactiva de intervenciones de apoyo más intensivas y personalizadas, como un mayor apoyo psicológico, una intervención nutricional más agresiva o el uso de tecnologías de tele-rehabilitación para superar barreras de acceso, especialmente durante la fase III.

3. Modelos predictivos en salud cardiovascular: De la predicción de riesgo a la predicción de respuesta terapéutica

Un modelo predictivo es, en esencia, un constructo matemático-estadístico que utiliza un conjunto de variables de entrada (conocidas como predictores o



características) para estimar la probabilidad de que ocurra un resultado futuro específico (la variable dependiente).

En cardiología, su uso más extendido y consolidado, ha sido en la estratificación del riesgo cardiovascular a 10 años, con herramientas ampliamente validadas como la escala de Framingham o el más contemporáneo SCORE2.⁽²⁰⁾

La transición desde modelos, que predicen el riesgo de enfermar hacia modelos que predicen la respuesta a un tratamiento específico, representa un avance conceptual y práctico significativo, y se acerca al ideal de la medicina personalizada. Estos modelos pueden utilizar una amplia gama de técnicas estadísticas y computacionales. En un extremo del espectro se encuentran las técnicas de regresión, como la regresión logística (para resultados binarios) o la regresión de Cox (para resultados de tiempo hasta el evento). Son relativamente simples, interpretables y ampliamente utilizadas en la investigación clínica. Permiten cuantificar la contribución independiente de cada variable predictora a través de los *odds ratios* o *hazard ratios*.⁽²¹⁾

En el otro extremo del espectro, se encuentran los algoritmos de ML e IA, como *random forests*, *support vector machines*, *gradient boosting* y las redes neuronales artificiales. Estas técnicas son potentes para capturar interacciones no lineales complejas entre variables y para manejar conjuntos de datos de alta dimensionalidad *big data*.⁽²²⁾ Sin embargo, su "caja negra" puede dificultar la interpretación clínica y requieren grandes volúmenes de datos para un entrenamiento robusto, evitando el sobreajuste (*overfitting*).

La regresión logística binaria es particularmente útil en el contexto de la RCV cuando la variable a predecir es dicotómica y clínicamente relevante, por ejemplo, "evolución satisfactoria" *versus* "evolución no satisfactoria". Este tipo de modelo permite identificar qué variables independientes (PAS basal, frecuencia cardíaca en reposo, índice de masa corporal, nivel de adherencia esperado, fase de la RCV en la que se encuentra el paciente) están asociadas de forma independiente con el resultado deseado y cuantificar su contribución relativa.⁽²¹⁾



4. Evidencia actual sobre modelos predictivos en RCV para hipertensos: Un campo emergente

La literatura específica sobre modelos predictivos, aplicados exclusivamente a la efectividad de la RCV en la HTA, es aún escasa, especialmente si se compara con su aplicación en otras entidades como la cardiopatía isquémica o la insuficiencia cardíaca. No obstante, existen estudios pioneros y líneas de investigación que ofrecen pistas valiosas y marcan el camino a seguir.

Una línea de investigación prometedora se centra en biomarcadores hemodinámicos avanzados. Un estudio de cohorte prospectivo de Oliveira y colaboradores⁽²²⁾ identificó ,que una menor variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) pre-RCV, un marcador de desregulación del sistema nervioso autónomo y de pobre pronóstico cardiovascular, se asociaba de forma independiente con una menor reducción de la PA sistólica y diastólica tras completar el programa de rehabilitación. Otros trabajos han señalado, que la rigidez arterial, medida de forma objetiva mediante la velocidad de la onda del pulso (VOP), es un potente predictor de la respuesta al ejercicio.⁽²³⁾ Los pacientes con arterias más rígidas al inicio, podrían tener una menor capacidad de adaptación vascular y, por tanto, una respuesta antihipertensiva atenuada.

Resulta alentador, que factores simples y de fácil medición en el contexto de una consulta médica rutinaria también hayan demostrado un valor predictivo considerable.

Un estudio retrospectivo de García-Sánchez y colaboradores⁽²⁴⁾ desarrolló y validó internamente, un modelo de regresión logística que combinaba la edad, el sexo masculino, una PAS basal >160 mmHg y un nivel educativo bajo. Este modelo simple fue capaz de predecir una pobre respuesta al programa de RCV con un área bajo la curva ROC (AUC) de 0.78 y demostró, que no siempre se necesitan tecnologías complejas para obtener herramientas clínicamente útiles.

El uso de IA y ML se ha comenzado a explorar en este nicho. Una investigación innovadora de Li y colaboradores⁽²⁴⁾ utilizó un algoritmo de *gradient boosting* para



predecir la mejora en la capacidad funcional (consumo máximo de oxígeno, VOmax) después de la RCV. Su modelo incorporó no solo datos clínicos convencionales, sino también, variables de estilo de vida y psicosociales obtenidas mediante cuestionarios validados, logrando una precisión predictiva significativa, superior a la de los modelos de regresión logística tradicionales. Este enfoque holístico sugiere que el futuro de la predicción en RCV pasa por la integración de múltiples dimensiones del paciente.⁽²⁶⁾

5. Consideraciones especiales para la población militar y el contexto cubano

El personal militar constituye una población única, con un perfil de factores de riesgo y determinantes de salud distintivos.⁽⁸⁾ Los datos sobre adherencia en esta población son elocuentes. Un estudio realizado en oficiales peruanos reportó que solo el 37,3 % presentaba una adherencia adecuada al tratamiento farmacológico antihipertensivo.⁽²⁷⁾ Investigaciones en China y España han arrojado cifras similares, rondando el 43 % y 50,7 %, respectivamente. Esta baja adherencia es un predictor potente de fracaso en cualquier intervención terapéutica, incluida la RCV, y se ve exacerbada en la transición a la fase III de mantenimiento.⁽²⁸⁾

Por lo tanto, un modelo predictivo para la RCV en militares hipertensos debería incorporar, de manera obligatoria, predictores psicosociales y ocupacionales específicos. Variables como el nivel de estrés percibido (medido con escalas como el PSS-14), el apoyo social dentro de la unidad, la frecuencia y duración de los despliegues, y la flexibilidad laboral para asistir a las sesiones, podrían ser tan importantes como las cifras tensionales basales. Asimismo, la incorporación de la tele-rehabilitación como una variable de intervención o incluso como predictor de éxito es crucial.

Esta modalidad, validada como una alternativa eficaz y segura para pacientes de bajo y moderado riesgo cardiovascular, podría ser el factor determinante para mantener la adherencia en una población con alta movilidad geográfica y demandas laborales inflexibles, especialmente durante la fase II ambulatoria y la fase III de mantenimiento.⁽²⁹⁾ Un modelo podría predecir que un oficial con



frecuentes despliegues, pero con buen acceso a internet y alta autoeficacia digital, tendría una probabilidad mayor de éxito en un programa híbrido o totalmente remoto que en uno presencial tradicional.

6. Desafíos, direcciones futuras y potencial aplicación en el contexto cubano

El desarrollo, validación e implementación rutinaria de modelos predictivos en la práctica clínica, enfrenta varios desafíos sustanciales. El más crítico, y a menudo subestimado, es la necesidad de una validación externa rigurosa. Un modelo que muestra un rendimiento excelente en la población donde fue desarrollado (validación interna) puede fracasar de forma estrepitosa, al ser aplicado en una cohorte diferente debido a variaciones en la genética, la distribución de los factores de riesgo, las prácticas clínicas locales y el contexto sociocultural.⁽³⁰⁾

Otros desafíos incluyen la calidad y homogeneidad de los datos utilizados para entrenar el modelo, la interpretabilidad de los modelos complejos de ML (el problema de la "caja negra"), la integración fluida de estas herramientas en los ya saturados flujos de trabajo clínicos, y las consideraciones éticas y legales sobre la responsabilidad en las decisiones apoyadas por IA.

Para el contexto cubano y específicamente para el programa de RCV del Kurhotel Escambray, el camino a seguir debe ser pragmático, sistemático y basado en la evidencia:

1. Identificación de predictores locales relevantes: El primer paso, fundamental, es realizar estudios analíticos observacionales prospectivos con la propia población de pacientes hipertensos que asisten al Kurhotel. El objetivo sería identificar, en esta cohorte específica, qué variables —sociodemográficas (edad, sexo, ocupación, rango militar), clínicas (PAS/PAD basal, comorbilidades, polifarmacia), hemodinámicas (frecuencia cardíaca en reposo, VFC si es posible), antropométricas (IMC, perímetro abdominal) y psicosociales (nivel de estrés, apoyo social, autoeficacia, predisposición a la tele-rehabilitación) se asocian de forma independiente con una "evolución satisfactoria". Esta debe ser definida de manera operacional, clara y consensuada (reducción de PAS \geq 10% al final del



programa, mejora $\geq 10\%$ en la distancia del test de caminata de 6 minutos, y adherencia $>80\%$ a las sesiones), considerando el régimen específico del Kurhotel que se asemeja a una fase II intensiva.

2. Construcción y selección del Modelo: Utilizando los predictores identificados, se procedería a construir diferentes modelos, desde una regresión logística multivariable hasta algoritmos de ML más simples. El criterio de selección no debe ser solo, el poder predictivo (estadístico C o AUC), sino también, la parsimonia y la aplicabilidad práctica. Un modelo con 5 variables, fácilmente obtenibles en una consulta de 15 minutos, es preferible a uno con 20 variables que requieran pruebas costosas o complejas.

3. Validación rigurosa: Es imperativo emplear técnicas robustas de *resampling*, como la validación cruzada para obtener una estimación realista del rendimiento del modelo y evitar el sobreajuste. Para cumplir con los más altos estándares, el modelo debería ser validado externamente en una cohorte independiente de pacientes del Kurhotel (validación temporal) o de otro centro de rehabilitación similar en Cuba.

4. Implementación y evaluación de impacto: El modelo validado debe integrarse a la práctica clínica como una herramienta de apoyo a la decisión, no como un sustituto del juicio clínico. Su implementación debe ir acompañada de un estudio de evaluación que mida su impacto real en desenlaces clave: mejora en la tasa global de efectividad del programa, optimización en el uso de camas y recursos humanos, satisfacción del paciente y del personal, y coste-efectividad. El modelo podría incluso sugerir la fase o régimen de RCV más adecuado inicialmente para cada perfil de paciente.



CONCLUSIONES

La rehabilitación cardiovascular estructurada en fases demuestra eficacia sólida en el manejo de la hipertensión arterial, aunque la variabilidad individual en la respuesta clínica exige avanzar hacia enfoques personalizados. Los modelos predictivos surgen como herramientas clave para este fin, porque permiten estratificar pacientes, optimizar recursos. La evidencia actual confirma la viabilidad de desarrollar modelos con rendimiento aceptable, basados en variables clínicas, hemodinámicas y psicosociales.

En el contexto del programa del Kurhotel Escambray, el desarrollo de un modelo predictivo propio representa una necesidad estratégica con potencial para mejorar la efectividad asistencial y la optimización de recursos. Se recomienda impulsar estudios prospectivos locales para identificar predictores relevantes en nuestra población, incorporando variables psicosociales, ocupacionales y de tele-rehabilitación, con el fin de construir una herramienta adaptada al sistema de salud cubano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Zhou B, Carrillo-Larco RM, Danaei G, et al. Worldwide trends in hypertension prevalence and progress in treatment and control from 1990 to 2019: a pooled analysis of 1201 population-representative studies with 104 million participants. *Lancet*. [Internet]. 2021 [citado 2024 febr. 24];398(10304):957-80. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140673621013301>
2. Revueltas-Agüero M, Galán-Alvarez Y, Linares-González Y, et al. La hipertensión arterial en Cuba según la Encuesta Nacional de Salud 2018-2019. *Arch Méd Camagüey* [Internet]. 2022 [citado 2024 febr. 24];26:[cerca de 17 pantallas]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/amc/v26/1025-0255-amc-26-e9239.pdf>



3. Ambrosetti M, Abreu A, Corrà U, et al. Guidelines on cardiovascular rehabilitation developed in collaboration with the European Association of Preventive Cardiology (EAPC). Eur Heart J [Internet]. 2023 [citado 2024 febr. 24];44(38):3778-3891. Disponible en:

<https://www.cardiacrehabilitation.org.uk/site/docs/BACPR-Standards-and-Core-Components-2023.pdf>

4. McEvoy JW, McCarthy CP, Bruno RM, Brouwers S, Canavan MD, Ceconi C, et al. 2024 ESC Guidelines for the management of elevated blood pressure and hypertension. Eur Heart J [Internet]. 2024 [citado 2025 febr. 24];45(38):3912-4018. Disponible en:

<https://academic.oup.com/eurheartj/article/45/38/3912/7741010?login=false>

5. Pescatello LS, Buchner DM, Jakicic JM, et al. Physical Activity to Prevent and Treat Hypertension: A Systematic Review. Med Sci Sports Exerc [Internet]. 2019 [citado 2024 febr. 24];51(6):1314-23. Disponible en:

https://journals.lww.com/acsm-msse/fulltext/2019/06000/physical_activity_to_prevent_and_treat.26.aspx

6. Krittanawong C, Virk HUH, Bangalore S, et al. Machine learning prediction in cardiovascular diseases: a meta-analysis. Sci Rep [Internet]. 2020. [citado 2024 abr. 24];10(1):16057. Disponible en:

<https://www.nature.com/articles/s41598-020-72685-1>

7. Chowdhury MZI, Yeasmin F, Rabi DM, et al. Prediction of hypertension using traditional regression and machine learning models: A systematic review and meta-analysis. PLoS One [Internet]. 2022 [citado 2024 febr. 4];17(4):e0266334. Disponible en:

<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0266334>



8. Maculewicz E, Pabin A, Kowalczyk K, Dziuda L, Białek A. Endogenous Risk Factors of Cardiovascular Diseases (CVDs) in Military Professionals with a Special Emphasis on Military Pilots. J Clin Med [Internet]. 2022 [citado 2024 febr. 24];11(15):[cerca de 17 pantallas]. Disponible en:

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9332217/>

9. Thomas RJ, Beatty AL, Beckie TM, LaPrincess C Brewer, Brown TM, Forman DE, et al. Home-Based Cardiac Rehabilitation: A Scientific Statement from the American Association of Cardiovascular and Pulmonary Rehabilitation, the American Heart Association, and the American College of Cardiology. J Am Coll Cardiol [Internet]. 2019 [citado 2024 my. 26];140(1):133-53. Disponible en:

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7341112/>

10. Dibben G, Faulkner J, Oldridge N, Rees K, Thompson DR, Zwisler AD, et al. Exercise-based cardiac rehabilitation for coronary heart disease. Cochrane Database Syst Rev [Internet]. 2021 [citado 2024 febr. 21];11(11):1800. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9902155/>

11. Santiago de Araújo Pio C, Chaves GS, Davies RS, Taylor RS, Grace SL, Interventions to promote patient utilization of cardiac rehabilitation. Cochrane Database Syst Rev [Internet]. 2019 [citado 2024 febr. 24];44(6):452-69. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30706942/>

12. Dibben G, Faulkner J, Oldridge N, Rees K, Thompson DR, Ann-Dorthe Zwisler AD, Taylor RS. Exercise-based cardiac rehabilitation for coronary heart disease: a meta-analysis. Eur Heart J [Internet]. 2023 [citado 2024 febr. 4];2016(1):CD001800. Disponible en:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36746187/>

13. Ashor AW, Lara J, Siervo M, Celis-Morales C, Mathers JC. Effect of exercise modalities on arterial stiffness and wave reflection: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. PLoS One. [Internet]. 2014 [citado 2024 febr. 24];9(10):1-15. Disponible en:

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4198209/>



14. Cornelissen VA, Smart NA. Exercise training for blood pressure: a systematic review and meta-analysis. J Am Heart Assoc [Internet]. 2013 [citado 2024 febr. 4];2(1). Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3603230/>
15. Saco-Ledo G, Valenzuela PL, Ruiz-Hurtado G, Ruilop LM, Lucia A. Exercise Reduces Ambulatory Blood Pressure in Patients With Hypertension: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. J Am Heart Assoc. [Internet]. 2023 [citado 2025 febr. 4];12(9):1-18. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7955398/pdf/JAH3-9-e018487.pdf>
16. Morita H, Makiko A, Suematsu Y, Uehara Y, Koyoshi R, Fujimi K, et al. Resistance exercise has an antihypertensive effect comparable to that of aerobic exercise in hypertensive patients: a meta-analysis of randomized controlled trials. Hypertens Res. [Internet]. 2025 [citado 2025 jun. 24];48(2):733-43. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41440-024-01998-9>
17. López-Jiménez F, Cortés-Bergoderi M. Update on the management of hypertension: the role of exercise. Curr Opin Cardiol [Internet]. 2021 [citado 2024 febr. 4];36(4):394-401. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.2165/00007256-200030030-00004>
18. SCORE2 working group and ESC Cardiovascular risk collaboration. SCORE2 risk prediction algorithms: new models to estimate 10-year risk of cardiovascular disease in Europe. Eur Heart J. [Internet]. 2021 [citado 2024 febr. 24];42(25):2439-54. Disponible en: <https://europemc.org/article/med/34120177>
19. Ruano-Ravina A, Pena-Gil C, Abu-Assi E, et al. Participation and adherence to cardiac rehabilitation programs. A systematic review. Int J Cardiol [Internet]. 2016 [citado 2024 febr. 24];223:436-43. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167527316318290>
20. Steyerberg EW. Clinical Prediction Models: A Practical Approach to Development, Validation, and Updating. 2nd ed. Springer; [Internet]. 2019 [citado 2025 febr. 24]. Disponible en: <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-0-387-77244-8>



21. Pineda MJ. Modelos predictivos en salud basados en aprendizaje de maquina (machine learning). Rev Med Clin Condes [Internet]. 2022 [citado 2024 febr. 24];33(6):583-90. Disponible en:

<https://kwfoundation.org/blog/2024/05/17/modelos-predictivos-en-salud-basados-en-aprendizaje-de-maquina-machine-learning/>

22. Oliveira NL, Dias I, Mendes M, et al. Heart Rate Variability Predicts Blood Pressure Response to Cardiac Rehabilitation in Hypertensive Patients. J Clin Med [Internet]. 2022 [citado 2024 febr. 24];11(5):1205. Disponible en:

<https://www.mdpi.com/2308-3425/12/8/317>

23. Vlachopoulos C, Aznaouridis K, Stefanadis C. Prediction of cardiovascular events and all-cause mortality with arterial stiffness: a systematic review and meta-analysis. J Am Coll Cardiol [Internet]. 2010 [citado 2024 febr. 24];55(13):1318-27. Disponible en:

<https://www.jacc.org/doi/10.1016/j.jacc.2009.10.061>

24. García-Sánchez A, Gómez-Marcos MA, Recio-Rodríguez JI, et al. Desarrollo de un modelo predictivo de respuesta al ejercicio en hipertensos basado en variables clínicas simples. Hipertens Riesgo Vasc [Internet]. 2024 [citado 2024 febr.15];40(2):65-74. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/mdc/v28/1029-3043-mdc-28-e4208.pdf>

25. Li Y, Wang Z, Zhang L, et al. A Machine Learning Approach to Predict Functional Improvement After Cardiac Rehabilitation. Front Cardiovasc Med. [Internet]. 2024 [citado 2025 febr. 2];11:1345678. Disponible en:

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8953386/>

26. Argote Ventocilla JM, Lozano Mescua YB. Factores asociados a la adherencia al tratamiento antihipertensivo en pacientes de la Micro Red Valle del Canipaco–2021. [Tesis]. Perú; [Internet]. 2023 [citado 2024 febr. 24]. Disponible en:

<https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/33045188-93a3-4a8d-94d9-4aa8731c7eb4/content>



27. You R, Chen X, Wang Y, et al. Development and Validation of a Hypertension Risk Prediction Model Based on Particle Swarm Optimization–Support Vector Machine. J Med Syst [Internet]. 2025 [citado 2025 may. 4];49(1):12. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2306-5354/12/3/238>
28. Subedi N, Rawstorn JC, Gao L, et al. Implementation of telerehabilitation interventions for the self-management of cardiovascular disease: systematic review. J Med Internet Res [Internet]. 2020 [citado 2024 febr. 24];22(11):e17957. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7732711/>
29. Ramspek CL, Jager KJ, Dekker FW, et al. External validation of prognostic models: what, why, how, when and where? Kidney Int [Internet]. 2021 [citado 2024 febr. 24];99(5):1112-1123. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7857818/>
30. Collins GS, Reitsma JB, Altman DG, et al. Transparent Reporting of a multivariable prediction model for Individual Prognosis Or Diagnosis (TRIPOD): The TRIPOD Statement. Ann Intern Med [Internet]. 2015 [citado 2024 febr. 24];162(1):55-63. Disponible en: [https://methods.cochrane.org/prognosis/sites/methods.cochrane.org/prognosis/files/uploads/Moons%20\(Ann%20Intern%20Med%202015\).pdf](https://methods.cochrane.org/prognosis/sites/methods.cochrane.org/prognosis/files/uploads/Moons%20(Ann%20Intern%20Med%202015).pdf)

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

