



REVISTA MÉDICA CLÍNICA LAS CONDES

<https://www.journals.elsevier.com/revista-medica-clinica-las-condes>

ARTÍCULO ESPECIAL

Inteligencia artificial al servicio de la salud del futuro

Artificial intelligence at the service of the health of the future

Rocío B. Ruiz^a, Juan D. Velásquez^{a✉}.

^a Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI), Universidad de Chile. Santiago, Chile.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del Artículo:

Recibido: 10 08 2022
Aceptado: 20 12 2022

Key words:

Artificial Intelligence;
Machine Learning;
Healthcare; P4 Medicine.

Palabras clave:

Inteligencia Artificial;
Cuidado de la salud;
Medicina 4P.

RESUMEN

Desde sus orígenes, la medicina ha estado más ligada a la cura de enfermedades que a su prevención. Con los últimos avances en ciencia, tecnología y procesamiento masivo de datos, este paradigma está cambiando, focalizándose en mantener la salud de los individuos, evitando que padezcan alguna enfermedad. Este nuevo enfoque es llamado "Medicina 4P", el cual propone que la medicina debe ser Preventiva, Participativa, Predictiva y Personalizada. En este artículo analizaremos cómo la Inteligencia Artificial (IA), a través del procesamiento de datos como el DNA, las fichas médicas electrónicas y las variables medioambientales a las que han estado expuestas las personas, puede contribuir de forma decisiva al desarrollo de una nueva propuesta en el cuidado de la salud.

En los últimos años, la cantidad de datos relacionados con la salud de las personas ha crecido exponencialmente, y los esfuerzos que se han llevado a cabo por mejorar su calidad, ya están dando frutos. Sin embargo, cada día es más difícil que el personal de salud pueda extraer información de relevancia usando métodos tradicionales de procesamiento de estos datos. En este sentido, la IA junto con los recursos computacionales para procesar datos masivos, serán una pieza clave para mejorar la salud de la población.

ABSTRACT

Since its origins, medicine has been linked more to the cure of diseases than to its prevention. With the latest advances in science, technology and massive data processing, this paradigm is changing, focusing on maintaining the health of individuals, preventing them from suffering from any disease. This new approach is called "4P Medicine", which proposes that medicine must be Preventive, Participative, Predictive and Personalized. In this article we will analyze how Artificial Intelligence (AI), through the processing of data such as DNA, electronic medical records and the environmental variables to which people have been exposed, can contribute decisively to the development of a new proposal in health care.

In recent years, the amount of data related to people's health has grown exponentially, and the efforts that have been made to improve its quality are already bearing fruit. However, every day it is more difficult for health personnel to extract relevant information, using traditional methods of data processing. In this sense, AI together with the computational resources to process massive data will be a key element in improving the health of the population.

✉ Autor para correspondencia
Correo electrónico: jvelasqu@dii.uchile.cl

<https://doi.org/10.1016/j.rmcl.2022.12.001>
e-ISSN: 2531-0186/ ISSN: 0716-8640/© 2023 Revista Médica Clínica Las Condes.
Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



INTRODUCCIÓN

La Inteligencia Artificial (IA) es quizás la mayor revolución tecnológica del siglo XXI. Sus inicios se pueden situar a finales de los años 50, cuando el célebre matemático inglés Alan Turing empezó a preguntarse sobre qué condiciones se necesitaban para considerar inteligente a una máquina. Sus ideas quedaron reflejadas en el artículo *"Computing Machinery and Intelligence"*¹. Sin embargo, el concepto principal fue acuñado en 1956 por John McCarthy en el *Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence*², definiendo la IA como "la ciencia y la ingeniería para fabricar máquinas inteligentes, especialmente programas informáticos inteligentes". En la actualidad, prácticamente ningún desarrollo tecnológico escapa al uso o influencia de la IA. La podemos encontrar en situaciones cotidianas como la cafetera que nos prepara un capuchino o algunas más sofisticadas, como un robot que realiza una cirugía compleja a un paciente que posee una condición cardíaca crítica.

Pero, ¿qué es la inteligencia? No hay un acuerdo general sobre su definición, pero durante el siglo pasado se presentaron algunos enfoques como "la capacidad de dar buenas respuestas desde el punto de vista de los hechos"³, "la capacidad de llevar a cabo un pensamiento abstracto"⁴, "la combinación de habilidades necesarias para sobrevivir en una determinada cultura"⁵ o "la capacidad de resolver problemas, creando productos valorados en base a determinados requerimientos"⁶.

Todo apunta a que la capacidad de aprendizaje es un insumo importante cuando se trata de explicar qué es la inteligencia. Entonces, ¿puede una máquina llegar a ser inteligente como un ser humano?

Por ahora la respuesta es no. Dado lo anterior, se considera que una buena aproximación a la definición de Inteligencia Artificial está relacionada al "conjunto de técnicas informáticas que permiten a una máquina (por ejemplo, un ordenador, un teléfono) realizar tareas que, por lo común, requieren inteligencia tales como el razonamiento o el aprendizaje"⁷.

No hay duda de que las aplicaciones desarrolladas y por desarrollar basadas en IA están más allá de cualquier predicción que se pueda hacer en este momento. Sin embargo, el mundo que conocemos está experimentando cambios vertiginosos donde la IA, en muchos casos, ha tomado un papel protagónico. Es por ello que, en la medicina y el cuidado de la salud, el siguiente paso en su evolución no puede darse sin el apoyo de esta disciplina.

Desde tiempos inmemoriales, la medicina se ha centrado en la cura de enfermedades y dolencias de todo tipo en los pacientes⁸. Primero se manifiestan los síntomas antes de poder tomar decisiones sobre la salud de una persona, pese a que en muchos casos estos pueden llegar tarde. No obstante, este enfoque está cambiando, pues mantenerse y envejecer con buena salud comienza a ser rele-

vante. De hecho, la medicina está pasando de una disciplina reactiva a una predictiva, participativa, personalizada y preventiva ("Medicina 4P")⁹. Lo anterior, será posible en la medida en que podamos obtener información y conocimiento de los datos relacionados con la salud de los pacientes, en particular, sobre su DNA, historia clínica y el entorno en el que han vivido, entre otros. Claramente estamos ante un gran desafío, el cual comienza con la mantención y la consolidación de datos que garanticen un acceso seguro para fines de estudio, y por supuesto, para ayudar a los pacientes con sus dolencias. Le sigue la capacidad de procesamiento de estos, para la extracción de patrones que ayuden a todo el personal sanitario en tareas como el diagnóstico, tratamiento, medicación, etc. Lo anterior con el fin de brindar una ayuda adecuada tanto al paciente como al personal de salud, siguiendo con el objetivo primordial: conservar a la población sana¹⁰.

El presente artículo muestra un marco genérico respecto del aprendizaje automático, posibles aplicaciones de la IA en la medicina y se comentan trabajos relacionados a la medicina 4P. Finalmente, se plantean algunas reflexiones sobre el potencial actual y futuro de la aplicación de la IA en salud.

MACHINE LEARNING

¿Cómo aprendemos los seres humanos? Aprendemos a través de ejemplos que producen cambios en nuestra red neuronal, los cuales nos permiten analizar sonidos, imágenes, movimientos, gustos, etc. En este sentido, el aprendizaje automático de una máquina es muy similar, es decir, se necesitan muchos ejemplos para que esta pueda extraer patrones desde los datos, que luego le permitan extrapolar una decisión futura. Cuando se reciben como entrada datos que no pertenecen al conjunto de entrenamiento, y para los que no se conoce la respuesta, la máquina dará la mejor predicción basada en lo que conoce¹¹. De acuerdo a un algoritmo será capaz de aprender cuando se le asigna una tarea, entrenamiento y una medida de desempeño, de tal forma que su rendimiento mejora con la experiencia¹². En base a esto, los algoritmos pueden tomar decisiones, hacer predicciones, clasificar objetos, predecir una enfermedad, dar instrucciones a robots y un enorme conjunto de posibles usos y aplicaciones. En este contexto, los datos juegan un papel central para lograr un entrenamiento correcto, pues si no están limpios y consolidados, el algoritmo se verá afectado y se reducirá su capacidad de aprendizaje. En consecuencia, perjudicará todos los usos descritos anteriormente, imposibilitando la creación de crear herramientas útiles. *Machine Learning* o Aprendizaje Automático, es el concepto que agrupa al conjunto de algoritmos que son capaces de aprender a partir de los datos. Fue definido por Arthur L. Samuel como un "campo de estudio que le da a los computadores la capacidad de aprender sin ser programados explícitamente"¹³. Según el tipo de dato y el algoritmo a utilizar, el proceso de aprendizaje se puede clasificar en supervisado, no supervisado, por refuerzo¹⁴, y en *Deep Learning* o Aprendizaje Profundo¹⁵.

En el aprendizaje supervisado, se crea un conjunto de datos de entrenamiento donde se conoce la entrada y salida. Luego, el algoritmo aprende las asociaciones entre estas para crear un modelo matemático que se valida y prueba con datos reales antes de que pueda utilizarse. Una situación diferente ocurre en el aprendizaje no supervisado donde el algoritmo aprende las asociaciones en los datos de entrenamiento, pero desconoce el resultado; identificando patrones no descubiertos. En el aprendizaje por refuerzo, el algoritmo aprende un comportamiento a través de prueba y error para maximizar una recompensa definida, y por último, en el aprendizaje profundo se crean modelos computacionales compuestos por varias capas de procesamiento, siendo las de entrada las que preparan los datos para transformarlos en vectores los cuales luego son procesados por una red neuronal artificial de varios niveles, permitiendo procesar grandes cantidades de datos para extraer patrones que detecten o clasifiquen objetos

Proceso de aprendizaje automático

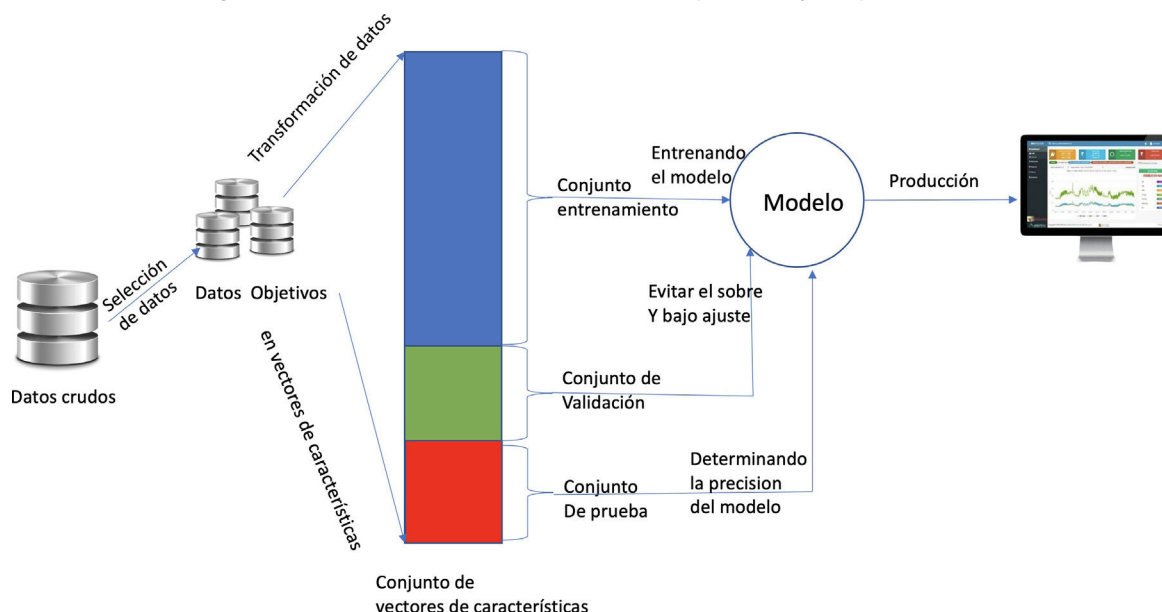
Dado una colección de datos, se intenta extraer patrones y reglas sobre cómo usarlos. El supuesto básico es que los datos no son aleatorios y que existen relaciones intrínsecas entre ellos, en decir, “regularidades” que luego pueden detectarse y representarse como patrones que permiten entrenar un algoritmo. Por lo tanto, si los datos están sucios, su dispersión es alta o no existen relaciones posibles entre ellos, no habrá ningún algoritmo capaz de ejecutar una tarea con el fenómeno en estudio. Es por ello, que se utilizan técnicas estadísticas para analizar la calidad de los datos y prospectar sus posibles usos en un proceso de entrenamiento¹⁶.

La figura 1 muestra el proceso de aprendizaje general para algoritmos de Machine Learning enfocados en el aprendizaje supervisado. A partir de un conjunto de datos, se seleccionan los datos objetivo, es decir, aquello que se considerarán para analizar el fenómeno en estudio. A continuación, se desarrolla un proceso de transformación a vectores de características, los cuales se dividen en tres grupos: entrenamiento, validación y prueba. Los primeros se utilizan para entrenar el modelo aplicando el algoritmo de aprendizaje automático seleccionado. Luego este es validado para comprobar si hay problemas de sobre/bajo ajuste. Después, se aplican pruebas para obtener alguna medida de efectividad, como la precisión. Al término de este proceso, el modelo se pone a disposición del usuario, proporcionando información útil para la toma de decisiones.

Algunas de las técnicas más utilizadas en Machine Learning son¹⁷:

- 1. Agrupamiento (*clustering*).** Dada una medida de similitud/disimilitud, los vectores de características son agrupados de tal forma que exista una cercanía entre los que componen un *cluster*/grupo, y que, a la vez, estos últimos sean muy diferentes entre ellos.
- 2. Clasificación.** Asigna una clase predefinida y etiquetada a los nuevos vectores de características que se desean clasificar.
- 3. Regresión.** El modelo utiliza las relaciones entre las variables para estimar un valor a predecir para un nuevo vector de entrada, donde existe una variable dependiente y una serie de variables que se utilizan para realizar una buena predicción o pronóstico.
- 4. Árboles de decisión.** Se trata de una estructura similar a un diagrama de flujo que utiliza un método de bifurcación para mostrar cada resultado posible en una decisión. Los nodos del árbol

Figura 1. Proceso de entrenamiento del aprendizaje supervisado



representan una pregunta a una variable específica y las ramas son las posibles respuestas.

5. Redes Neuronales Artificiales. Se inspiran en el funcionamiento de las redes neuronales en los sistemas biológicos, presentando una serie de unidades de procesamiento ordenadas en capas e interconectadas. Cada unidad procesa datos recibiendo como entrada los vectores de características o el resultado del procesamiento de la capa anterior. El resultado lo entregan las neuronas de la capa final.

Aprendizaje automático en medicina

Teniendo en cuenta la cantidad de datos relacionados con la salud de las personas, y que su crecimiento futuro será exponencial, ya no es posible utilizar métodos tradicionales de extracción de información, fundamentalmente manuales, para obtener algún beneficio¹⁸. De esta forma, los algoritmos de *Machine Learning* se han convertido en la nueva forma de procesar grandes volúmenes de datos, los cuales en muchos casos son complejos y multivariantes¹⁹. Los algoritmos de aprendizaje automático y un subconjunto de ellos, como *Deep Learning*, permiten crear modelos computacionales en salud para obtener patrones novedosos. Por ejemplo, utilizando imágenes digitalizadas del tórax de varios sujetos, obtenidas a través de rayos X, se puede detectar si un paciente tiene neumonía o COVID-19²⁰. El modelo de aprendizaje se entrena mediante el uso de un conjunto de técnicas, la cual en este caso se basa en la detección de objetos, para predecir si una nueva imagen de tórax se clasifica como normal, con neumonía o COVID-19.

Los datos médicos están disponibles en una enorme variedad de tipos y fuentes, que incluyen enfermedades, salud pública, pronósticos, diagnósticos, imágenes, series temporales, etc.; y todo indica que aumentarán a medida que haya más y mejores sensores²¹. Estos son complejos de analizar, aun cuando existan muy pocos registros, pues su alta dimensionalidad los convierte en un desafío para el aprendizaje automático. Además, en muchos casos no está del todo claro qué métodos se utilizaron para asegurar su calidad, lo que influye directamente en la capacidad predictiva del modelo a entrenar²². No hay duda de que las aplicaciones de *Machine Learning* en medicina, más precisamente del aprendizaje profundo, son enormes y seguirán expandiéndose en los próximos años. En el artículo de Garg A y Mago V se presenta un estudio sobre su uso en la investigación médica de los últimos años. De ahí se identifican los algoritmos más utilizados: *Random Forest*, *Decision Tree*, *Support Vector Machine*, *Naïve Bayes*, *Artificial Neural Networks* y técnicas de *clustering*.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN MEDICINA

Durante la última década, la investigación de IA aplicada en medicina ha crecido a pasos agigantados. De hecho, solo en 2016 hubo mucha más inversión en iniciativas de IA en medicina que en otras áreas de la economía mundial^{23,24}. ¿Qué factores explican este mayor interés? Una de las posibles razones es la gran capacidad de la

IA para mejorar la eficiencia y eficacia de la prestación de servicios de salud.

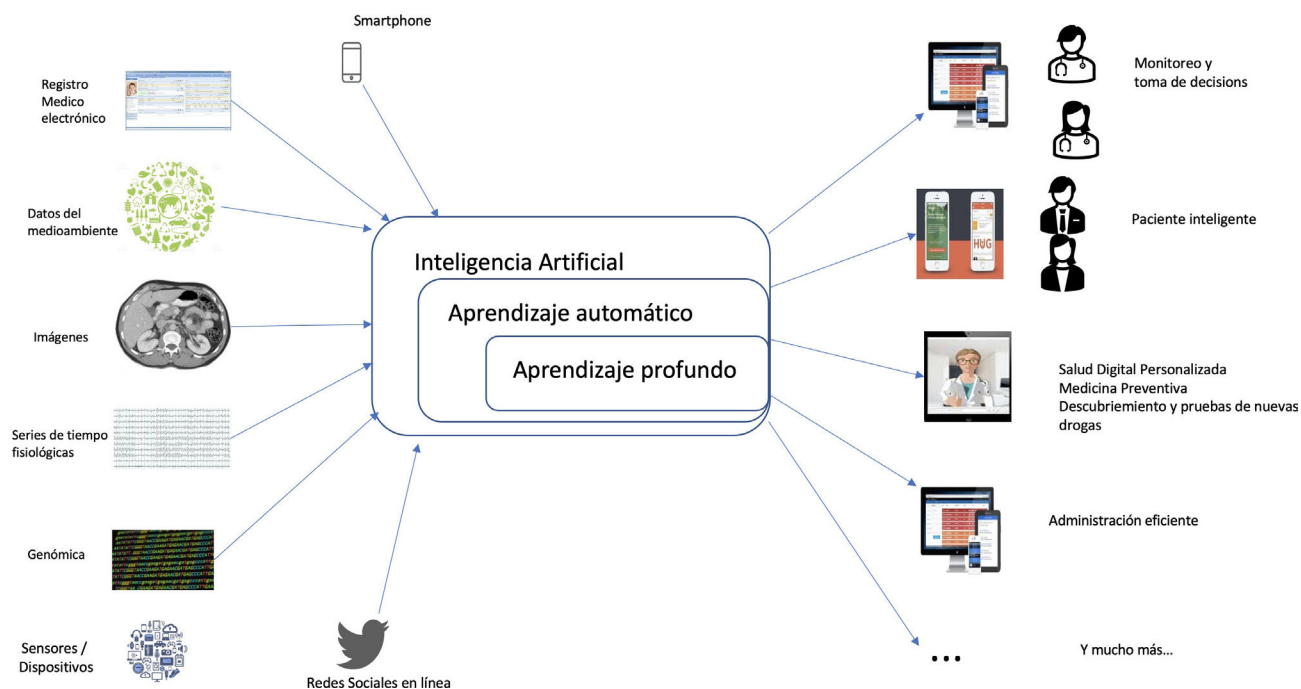
Entonces, ¿qué pueden hacer los algoritmos de IA por el futuro de la medicina? Es un hecho ineludible que, en el mundo desarrollado, la cantidad de datos relacionados a la salud de cada persona aumenta constantemente, y que la calidad y consolidación de estos en muchos países aún es dudosa. Sin embargo, se está avanzando en la dirección correcta para mejorarlos, principalmente a través de la digitalización de los sistemas informáticos relacionados con los registros médicos electrónicos, la interoperabilidad y protocolos de comunicación seguros que garantizan que el acceso, tratamiento y uso de los datos se lleven a cabo en conformidad con la ley²⁵. En este sentido, solo cabe una pregunta: ¿qué hacemos con los datos médicos? Aquí es donde la IA juega un papel central. Con la cantidad de exámenes que se hacen los pacientes, una decodificación del DNA menos costosa y los datos que proporcionan los mismos sujetos a través de aplicaciones para *Smartphones* u otros dispositivos, se requieren mecanismos avanzados en el procesamiento de estos y el reconocimiento de patrones para la toma de decisiones clínicas relevantes.

La figura 2 muestra la integración de varias fuentes de datos relacionadas con los pacientes y el procesamiento respectivo, mediante técnicas de inteligencia artificial. Entre todos los datos también encontramos aquellos provenientes de las redes sociales²⁶ y los proporcionados por las personas a través de aplicaciones de teléfonos inteligentes relacionados con la atención médica²⁷. El resultado final apunta a que múltiples usuarios, empezando por el paciente, puedan hacer un uso correcto de este nuevo conocimiento, el cual es clave en la asistencia sanitaria.

No cabe duda de que la IA está provocando una gran revolución positiva en cuanto a la salud de las personas. Sin embargo, no todo es color de rosas. Al tratarse de datos personales sensibles, su tratamiento debe realizarse bajo estrictas medidas de seguridad y consideraciones éticas²⁸. Efectivamente, ¿qué pasaría si analizando los datos del DNA de un individuo, se detecta que tiene una alta probabilidad de desarrollar diabetes en el futuro? ¿Cubrirá el seguro de salud esta enfermedad? ¿Sufrirá algún tipo de discriminación? No debemos olvidar que el foco de la IA en salud es ayudar a las personas de forma ética y responsable²⁹, cuidando que sus datos personales no se utilicen para fines distintos a los de potenciar su bienestar o curar enfermedades que les puedan afectar. De ninguna manera pueden ser utilizados para otros fines que violen los derechos humanos fundamentales³⁰.

APLICACIONES DE LA IA EN LA MEDICINA 4P

Los resultados de la aplicación de la IA en exámenes médicos revelan una gran heterogeneidad en los factores y procesos fisiopatológicos que contribuyen a una enfermedad, sugiriendo que existe la necesi-

Figura 2. La inteligencia artificial como factor habilitante para la medicina del futuro

dad de adaptar o “personalizar” los medicamentos a las características matizadas, y muchas veces únicas de los pacientes³¹. La medicina 4P representa los cimientos de un modelo de medicina clínica que ofrece la oportunidad de modificar el paradigma asistencial, donde la participación del individuo es fundamental para poner en práctica los otros tres aspectos de la medicina 4P con cada paciente³². El futuro de los servicios de salud se centra en brindar a las personas una imagen completa de los muchos factores que afectan su salud. La medicina personalizada propone la integración de numerosos puntos de datos biológicos, incluidas mediciones moleculares, celulares y fenotípicas, así como secuencias genómicas individuales; para definir mejor la salud o el bienestar de cada persona, predecir transiciones a enfermedades y guiar intervenciones médicas³³⁻³⁵. La implementación de las 4P desde el punto de vista clínico creará modelos predictivos y personalizados lo que permitirá, por ejemplo, diseñar nuevos *tests* farmacológicos que tengan en cuenta la heterogeneidad de las respuestas a las terapias, y la estratificación de enfermedades³⁶.

Medicina predictiva

Es una rama de la medicina que tiene como objetivo identificar a los pacientes con riesgo de desarrollar una enfermedad, permitiendo levantar una alerta temprana para prevenir o definir un tratamiento de la afección. En ese contexto, se busca caracterizar a los pacientes de forma individual, para luego establecer un predictor que indique el riesgo de manifestar una determinada enfermedad, permitiendo establecer qué tratamiento será más efectivo; para posteriormente realizar esta intervención antes de que se produzca el problema³⁷. Por ejemplo, se han realiza-

do estudios focalizados en la medicina preventiva para evaluar la readmisión de pacientes a hospitales³⁸, al detectar sujetos que sufrirán efectos adversos al tomar ciertos medicamentos³⁹, en enfermedades crónicas como la diabetes⁴⁰ e hipertensión⁴¹, solo por nombrar algunos.

Medicina participativa

Este tipo de medicina se centra en el paciente, con el fin de capacitarlos para que tomen decisiones más informadas relacionadas con su salud, donde el individuo está en el centro de cualquier iniciativa de atención médica⁴². En los últimos años, el papel de los pacientes en el manejo de su propia salud ha ido cambiando⁴³. Las personas han pasado de ser meros observadores a actores más activos, comprometidos y empoderados en el proceso de toma de decisiones compartidas con el equipo de salud⁴⁴⁻⁴⁶. Por ejemplo, la vacunación es estrictamente participativa ya que el individuo es responsable de administrarla (incluyendo a los niños). Este tema se ha vuelto muy relevante debido a la pandemia y las múltiples vacunas COVID-19 desarrolladas recientemente, dadas sus diferencias en composición, momento de administración, efectividad y posibles secuelas⁴⁷.

La IA aplicada a la salud participativa involucra a las personas y sus representantes, quienes serían los principales beneficiarios de esta tecnología^{48,49}. Las personas pueden recopilar, registrar y rastrear indicadores para cuantificar su salud, proporcionando una fuente rica de información⁵⁰; otorgando así a la IA la oportunidad de comprender mejor su salud.

Medicina personalizada

Es la adaptación de terapias a subconjuntos definidos de pacientes según su probabilidad de respuesta o su riesgo de eventos adversos⁵¹. Su propósito es identificar qué enfoques serán efectivos para qué pacientes en función de sus factores genéticos, ambientales y de estilo de vida. Lo anterior busca guiar las decisiones relacionadas a la prevención, el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades⁵². Si se recopilan datos de diferentes fuentes para un mismo individuo, se puede establecer un perfil específico de él. Con ello, es posible ejecutar una evaluación de riesgos que puede beneficiarse de la medicina de precisión al generar estimaciones que conducen a recomendaciones basadas en evidencia para diferentes resultados⁵³, incluidos datos históricos⁵⁴.

Medicina preventiva

En la actualidad, la prevención temprana de enfermedades nunca ha sido más importante. Dado lo anterior, se fortalece el concepto de medicina preventiva, la cual se basa en prácticas médicas que están diseñadas para prevenir y evitar afecciones⁵⁵.

La Salud Digital asegura que, gracias al avance tecnológico plasmado en aplicaciones, tecnología vestible, monitoreo remoto, telemedicina y herramientas de comunicación, entre otros; se optimizará la calidad de la atención al paciente, así como una respuesta más oportuna ante cualquier situación. Esto ocurre porque estas herramientas ponen a disposición datos, los cuales son utilizados para la detección, predicción y apoyo al diagnóstico/toma de decisiones de anomalías⁵⁶.

Las intervenciones de salud impulsadas por IA se dividen en cuatro categorías relevantes para los investigadores de salud global: (1) diagnóstico, (2) evaluación del riesgo de morbilidad o mortalidad del paciente, (3) predicción y vigilancia de brotes de enfermedades, y (4) política y planificación de salud⁵⁷. Mediante el uso de IA, se pueden interpretar grandes cantidades de datos derivados de diferentes fuentes para facilitar el diagnóstico y aumentar la capacidad de ejecutar iniciativas tempranas y así, prevenir enfermedades para reducir la carga tanto para el paciente como para los cuidadores. Por lo tanto, ejecutar intervenciones exitosas depende del conocimiento de las causas de la enfermedad, la dinámica de transmisión, la identificación de factores y grupos de riesgo, los métodos de detección temprana y tratamiento, la implementación de estos y la evaluación y desarrollo continuo de procedimientos de prevención y tratamiento⁵⁶.

CONCLUSIONES

Las intervenciones desarrolladas para velar por la salud de la población están cambiando, pasando de ser tareas con foco en lo paliativo, a orientarse a preservar el bienestar de las personas a través de diversos métodos que se anticipan a posibles dolencias/patologías. Esta nueva perspectiva considera que, los individuos son el centro de cualquier iniciativa. Por lo tanto, la recolección adecuada de datos de calidad relacionados con la vida y la salud de estos es muy importante. Desde hace varios años se han realizado diferentes esfuerzos para mejorar los procesos de captura y almacenamiento de datos relacionados a esta materia, para su posterior mantenimiento, transmisión y explotación. Sin embargo, a pesar de todos estos esfuerzos, en muchos lugares aún no existe una historia clínica electrónica unificada, lo cual es fundamental para aplicar los conceptos detrás de la medicina 4P. Pese a lo anterior, se visualiza que es cuestión de tiempo que la situación mejore. Por ahora, los esfuerzos se han centrado en optimizar la utilización de los datos relacionados con la salud de los pacientes. Lo anterior, con el fin de crear diversas aplicaciones y sistemas que tienen como objetivo mantener sana a la población. Teniendo en cuenta este escenario y el hecho ineludible de que los datos relacionados con la salud solo crecen en complejidad y tamaño, es fundamental contar con herramientas automatizadas para extraer información y conocimiento, con el propósito de apoyar la toma de decisiones en el campo de la medicina. Es aquí donde la IA juega un papel fundamental, posibilitando el procesamiento masivo de datos, la automatización de procesos, la entrega oportuna de información y conocimiento y, por supuesto, el apoyo a la prevención de enfermedades. Estamos a las puertas de una nueva medicina, mucho más participativa, predictiva, preventiva y personalizada, donde el trabajo conjunto entre el personal sanitario y la IA está dando frutos cada vez más significativos; lo que también conlleva una gran responsabilidad, pues este tremendo poder tecnológico tiene que ser usado correctamente. El tratamiento de datos relacionados con la salud de las personas debe realizarse de forma segura, responsable y, especialmente, éticamente, velando por la salvaguarda de los derechos humanos de las personas por encima de todo. Solo así se podrá acceder realmente a los beneficios de la IA en el ámbito sanitario.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de ANID PIA/PUENTE AFB220003 y Doctorado Nacional #2116137

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflictos de intereses

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Turing AM. Computing machinery and intelligence. *Mind*. 1950; LIX (236): 433–460. doi: 10.1093/mind/LIX.236.433
2. McCarthy J, Minsky ML, Rochester N, Shannon CE. A proposal for the dartmouth summer research project on artificial intelligence, August 31, 1955. *AI magazine*. 2006;27(4):12–12.
3. Thorndike EL. Intelligence and its measurement: A symposium-I. *J Educ Psychol*. 1921;12(3):124–127.
4. Terman LM. Intelligence and its measurement: A symposium-II. *J Educ Psychol*. 1921;12(3):127–133.
5. Anastasi A. What counselors should know about the use and interpretation of psychological tests. *J Couns Dev*. 1992;70(5): 610–615. doi: 10.1002/j.1556-6676.1992.tb01670.x
6. Garain A, Basu A, Giampaolo F, Velasquez JD, Sarkar R. Detection of COVID-19 from CT scan images: A spiking neural network-based approach. *Neural Comput Appl*. 2021;33(19):12591–12604. doi: 10.1007/s00521-021-05910-1
7. Dihlaci M, Mai V, Mörch C, Noiseau P, Voarino N. Pensar la inteligencia artificial responsable: una guía de deliberación. Disponible en: https://opendialogueonai.com/wp-content/uploads/2020/07/ES_Delib.pdf
8. Subbarayappa BV. The roots of ancient medicine: an historical outline. *J Biosci*. 2001;26(2):135–143. doi: 10.1007/BF02703637
9. Hood L, Friend SH. Predictive, personalized, preventive, participatory (P4) cancer medicine. *Nat Rev Clin Oncol*. 2011;8(3):184–187. doi: 10.1038/nrclinonc.2010.227
10. Koteluk O, Wartecki A, Mazurek S, Kołodziejczak I, Mackiewicz A. How Do Machines Learn? Artificial Intelligence as a New Era in Medicine. *J Pers Med*. 2021;11(1):32. doi: 10.3390/jpm11010032
11. Thrun S, Pratt L. *Learning to learn*. Springer Science & Business Media, 2012.
12. Mitchell T. *Learning to learn*. McGraw Hill, 1997.
13. Samuel AL. Machine learning. *Technol Rev*. 1959;62(1): 42–45.
14. Ray S. A quick review of machine learning algorithms. In: 2019 International conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon), IEEE, 2019, pp. 35–39.
15. Janiesch C, Zschech P, Heinrich K. Machine learning and deep learning. *Electronic Markets, Springer; IIM University of St. Gallen*. 2021;31(3):685–695
16. Gudivada V, Apon A, Ding J. Data quality considerations for big data and machine learning: Going beyond data cleaning and transformations. *Int J Adv Softw*. 2017;10(1):1–20.
17. Velásquez JD, Palade V. Adaptive web sites: A knowledge extraction from web data approach, Vol. 170. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications* IOS Press, 2008.
18. Awayseh A, Wilcke J, Elvinger F, Rees L, Fan W, Zimmerman KL. Review of Medical Decision Support and Machine-Learning Methods. *Vet Pathol*. 2019 Jul;56(4):512–525. doi: 10.1177/0300985819829524.
19. Garg A, Mago V. Role of machine learning in medical research: A survey. *Comput Sci Rev*. 2021;40(C):100370. doi: 10.1016/j.cosrev.2021.100370
20. [20] Das S, Roy SD, Malakar S, Velásquez JD, Sarkar R. Bi-Level Prediction Model for Screening COVID-19 Patients Using Chest X-Ray Images. *Big Data Research*. 2021;25:100233. doi: 10.1016/j.bdr.2021.100233.
21. Tao X, Velásquez JD. Multi-source information fusion for smart health with artificial intelligence. *Inf Fusion*. 2022;83–84:93–95. doi: 10.1016/j.inffus.2022.03.010
22. Lee CH, Yoon HJ. Medical big data: promise and challenges. *Kidney Res Clin Pract*. 2017;36(1):3–11. doi: 10.23876/j.krmp.2017.36.1.3
23. Buch VH, Ahmed I, Maruthappu M. Artificial intelligence in medicine: current trends and future possibilities. *Br J Gen Pract*. 2018;68(668):143–144. doi: 10.3399/bjgp18X695213
24. CB Insights Research Healthcare remains the hottest AI category for deals. 2017. Disponible en: <https://www.cbinsights.com/research/artificial-intelligence-healthcare-startups-investors/>
25. Chan KS, Fowles JB, Weiner JP. Review: electronic health records and the reliability and validity of quality measures: a review of the literature. *Med Care Res Rev*. 2010;67(5):503–527. doi: 10.1177/1077558709359007
26. Guinazú M, Cortes VH, Ibañez CF, Velasquez J. Employing online social networks in precision-medicine approach using information fusion predictive model to improve substance use surveillance: A lesson from twitter and marijuana consumption. *Inform Fusion*. 2020;55: 150–163.
27. González F, Vera, F, González F, Velásquez JD. Kefuri: A novel technological tool for increasing organ donation in Chile, in: 2020 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT), IEEE, 2020, pp. 470–475.
28. Knoppers BM, Thorogood AM. Ethics and big data in health. *Curr Opin Syst Biol*. 2017;4:53–57. doi: 10.1016/j.coisb.2017.07.001
29. Morley J, Machado CCV, Burr C, Cows J, Joshi I, Taddeo M, et al. The ethics of AI in health care: A mapping review. *Soc Sci Med*. 2020;260:113172. doi: 10.1016/j.socscimed.2020.113172
30. Mann JM, Gostin L, Gruskin S, Brennan T, Lazzarini Z, Fineberg HV. Health and human rights. *Health Hum Rights*. 1994;1(1):6–23.
31. Douali N, Jaulent MC. Genomic and personalized medicine decision support system. *IEEE 2012 International Conference on Complex Systems (ICCS)*; 2012. Nov 5–6; Agadir, Morocco. IEEE; 2012. pp. 1–4.
32. Hood L, Flores M. A personal view on systems medicine and the emergence of proactive P4 medicine: predictive, preventive, personalized and participatory. *N Biotechnol*. 2012;29(6):613–624. doi: 10.1016/j.nbt.2012.03.004
33. Gifari MW, Samodro P, Kurniawan DW. Artificial intelligence toward personalized medicine. *Pharm Sci Res*. 2021;8(2):65–72.
34. Lin B, Wu S. Digital Transformation in Personalized Medicine with Artificial Intelligence and the Internet of Medical Things. *OMICS*. 2022 Feb;26(2):77–81. doi: 10.1089/omi.2021.0037
35. Zellweger MJ, Tsirkin A, Vasilchenko V, Failer M, Dressler A, Kleber ME, et al. A new non-invasive diagnostic tool in coronary artery disease: artificial intelligence as an essential element of predictive, preventive, and personalized medicine. *EPMA J*. 2018;9(3):235–247. doi: 10.1007/s13167-018-0142-x
36. Flores M, Glusman G, Brogaard K, Price ND, Hood L. P4 medicine: how systems medicine will transform the healthcare sector and society. *Per Med*. 2013;10(6):565–576. doi: 10.2217/pme.13.57
37. Taylor CA, Draney MT, Ku JP, Parker D, Steele BN, Wang K, Zarins CK. Predictive medicine: computational techniques in therapeutic decision-making. *Comput Aided Surg*. 1999;4(5):231–47. doi: 10.1002/(SICI)1097-0150(1999)4:5<231::AID-IGS1.3.O.CO;2-Z
38. Xue Y, Klabjan D, Luo Y. Predicting ICU readmission using grouped physiological and medication trends. *Artif Intell Med*. 2019;95:27–37. doi: 10.1016/j.artmed.2018.08.004
39. Yang H, Yang CC. Using Health-Consumer-Contributed Data to Detect Adverse Drug Reactions by Association Mining with Temporal Analysis. *ACM Trans Intell Syst Technol*. 2015; 6(4):1–27. doi: 10.1145/2700482
40. Krieg SJ, Robertson DH, Pradhan MP, Chawla NV. Higher-order Networks of Diabetes Comorbidities: Disease Trajectories that Matter. 2020 IEEE International Conference on Healthcare Informatics (ICHI) 2020. doi: 10.1109/ichi48887.2020.9374390
41. Martínez-Ríos E, Montesinos L, Alfaro-Ponce M, Pecchia L. A review of machine learning in hypertension detection and blood pressure estimation based on clinical and physiological data. *Biomed Signal Process Control*. 2021;68:102813.
42. Swan M. Health 2050: The Realization of Personalized Medicine through Crowdsourcing, the Quantified Self, and the Participatory Biocitizen. *J Pers Med*. 2012;2(3):93–118. doi: 10.3390/jpm2030093
43. [43] deBronkart D. From patient centred to people powered: autonomy

- on the rise. *BMJ*. 2015;350:h148. doi: 10.1136/bmj.h148
44. Millenson ML. When "patient centred" is no longer enough: the challenge of collaborative health: an essay by Michael L. Millenson. *BMJ*. 2017;358:j3048. doi: 10.1136/bmj.j3048
 45. Martínez-Pernía D, Núñez-Huasaf J, Del Blanco Á, Ruiz-Tagle A, Velásquez J, Gomez M, et al. Using game authoring platforms to develop screen-based simulated functional assessments in persons with executive dysfunction following traumatic brain injury. *J Biomed Inform*. 2017;74:71-84. doi: 10.1016/j.jbi.2017.08.012
 46. Coughlin S, Roberts D, O'Neill K, Brooks P. Looking to tomorrow's healthcare today: a participatory health perspective. *Intern Med J*. 2018;48(1):92-96. doi: 10.1111/imj.1366
 47. Gonzalez-Hernandez G, Sarker A, O'Connor K, Savova G. Capturing the Patient's Perspective: a Review of Advances in Natural Language Processing of Health-Related Text. *Yearb Med Inform*. 2017;26(1):214-227. doi: 10.15265/IY-2017-029
 48. Wright MT, Springett J, Kongats K. What is participatory health research?. In: *Participatory health research*. Springer, 2018, pp. 3-15.
 49. Denecke K, Gabarron E, Grainger R, Konstantinidis ST, Lau A, Rivera-Romero O, et al. Artificial Intelligence for Participatory Health: Applications, Impact, and Future Implications. *Yearb Med Inform*. 2019;28(1):165-173. doi: 10.1055/s-0039-1677902
 50. Almalki M, Gray K, Sanchez FM. The use of self-quantification systems for personal health information: big data management activities and prospects. *Health Inf Sci Syst*. 2015;3(Suppl 1 HISA Big Data in Biomedicine and Healthcare 2013 Con):S1. doi: 10.1186/2047-2501-3-S1-S1
 51. Bates S. Progress towards personalized medicine. *Drug Discov Today*. 2010;15(3-4):115-120. doi: 10.1016/j.drudis.2009.11.001
 52. Schork NJ. Personalized medicine: Time for one-person trials. *Nature*. 2015;520(7549):609-611. doi: 10.1038/520609a
 53. Bollati V, Ferrari L, Leso V, Iavicoli I. Personalised Medicine: implication and perspectives in the field of occupational health. *Med Lav*. 2020;111(6):425-444. doi: 10.23749/mdl.v111i6.10947.
 54. Orlando LA, Wu RR, Myers RA, Neuner J, McCarty C, Haller IV, et al. At the intersection of precision medicine and population health: an implementation-effectiveness study of family health history based systematic risk assessment in primary care. *BMC Health Serv Res*. 2020;20(1):1015. doi: 10.1186/s12913-020-05868-1.
 55. Clarke EA. What is Preventive Medicine? *Can Fam Physician*. 1974;20(11):65-68.
 56. Chang A. The role of artificial intelligence in digital health. In: *Digital health entrepreneurship*. Springer, 2020, pp. 71-81.
 57. Schwalbe N, Wahl B. Artificial intelligence and the future of global health. *Lancet*. 2020;395(10236):1579-1586. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30226-9.