

Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en el campo de la Inmunología

Application of Artificial intelligence on the field of immunology

Adrián Alejandro Vitón-Castillo^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-7811-2470>

Carlos Alfredo Miló-Valdés¹ <https://orcid.org/0000-0003-1527-4541>

Emanuel Maldonado² <https://orcid.org/0009-0004-3595-4979>

Lidia Cecilia Pérez Acevedo³ <https://orcid.org/0000-0002-9477-399X>

¹Universidad de Ciencias Médicas de Pinar del Río, Hospital Pediátrico Provincial Docente “Pepe Portilla”. Departamento de Inmunología. Pinar del Río, Cuba.

²Universidad Abierta Interamericana. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

³Universidad de Ciencias Médicas de La Habana, Centro de Inmunología Molecular. La Habana, Cuba.

*Autor para la correspondencia: adrianviton964@gmail.com

RESUMEN

La inmunología ha evolucionado a lo largo de los años, con un rápido crecimiento mediante el uso de las tecnologías emergentes para su desarrollo. La inteligencia artificial representa una herramienta de utilidad para el desarrollo de las especialidades médicas, entre ellas, la inmunología. Se desarrolló una búsqueda de información en las bases de datos Scopus, PubMed/MedLine y SciELO sobre las aplicaciones de la inteligencia artificial en el campo de la inmunología. Para recuperar la información se empleó una estrategia de búsqueda mediante la combinación de términos con operadores booleanos. Se encontró que la Inteligencia Artificial posee múltiples aplicaciones en el campo de la inmunología, siendo útil para el análisis de datos genómicos e inmunogenómicos, la predicción de respuestas inmunitarias en diferentes situaciones como la alergia y los trasplantes de órganos, el desarrollo de vacunas, la detección temprana, estratificación y predicción de enfermedades, la inmunoterapia en el tratamiento del cáncer y la respuesta a pandemias, entre otras. Sin embargo, no está exento de retos, como lo es la legibilidad de los datos y las inadecuadas infraestructuras. De igual forma, existen riesgos, como es el caso de las interpretaciones inadecuadas de los análisis y las implicaciones éticas.

Palabras clave: alergia e inmunología; análisis de datos; inteligencia artificial; aprendizaje profundo; aprendizaje automático.

ABSTRACT

Immunology has evolved over the years, achieving rapid growth through the use of emerging technologies for its development. Artificial intelligence represents a useful tool for the development of medical specialties, including immunology. A search for information in the Scopus, PubMed/MedLine and SciELO databases on the applications of artificial intelligence in the field of immunology

was carried out. To retrieve the information, a search strategy was employed by combining terms with Boolean operators. It was found that Artificial Intelligence has multiple applications in the field of immunology, being useful for the analysis of genomic and immunogenomic data, prediction of immune responses in different situations such as allergy and organ transplants, vaccine development, early detection, stratification and prediction of diseases, immunotherapy in cancer treatment and response to pandemics, among others. However, it is not without its challenges, such as data readability and inadequate infrastructures. Similarly, there are risks, such as inadequate interpretations of the analyses and ethical implications.

Keywords: Allergy and Immunology; Data Analysis; Artificial Intelligence; Deep Learning; Machine Learning.

Recibido: 20/11/2024

Aceptado: 10/01/2025

Introducción

El sistema inmunitario, defensa del cuerpo contra patógenos y células anormales; consiste en una red elaborada de células, moléculas y órganos que trabajan al unísono para proteger al hospedero.⁽¹⁾ La inmunología, como especialidad médica, es la encargada del estudio del sistema inmunitario, así como las enfermedades asociadas al mismo.

La inteligencia artificial (IA) ha surgido como una tecnología transformadora, que exhibe un gran potencial para revolucionar el panorama de la atención

médica al aumentar la precisión del diagnóstico, permitir la medicina personalizada, optimizar los planes de tratamiento y avanzar en la investigación médica. La IA abarca una amplia gama de técnicas y algoritmos que permiten a los sistemas informáticos emular la inteligencia humana, incluidas las capacidades de percepción, razonamiento, aprendizaje y toma de decisiones. Al aprovechar la IA, la atención médica se beneficiará de avances y oportunidades sin precedentes. ^(2,3)

La inteligencia artificial no es un fenómeno nuevo, sino que se ha desarrollado a través de los años; se ha aplicado en diferentes áreas, como la agricultura,⁽⁴⁾ la educación,^(5,6) la industria,^(7,8) la economía^(9,10,11), la administración^(12,13) y las Ciencias de la Salud.

En el área de la salud se han demostrado sus usos en diferentes especialidades, como la enfermería,^(9,14) cardiología,⁽¹⁵⁾ endocrinología,⁽¹⁶⁾ dermatología,⁽¹⁷⁾ imagenología,⁽¹⁸⁾ neurociencias^(19,20), oncología,⁽²¹⁾ etc.

Al igual que el resto de las especialidades médicas, la inmunología se encuentra en constante cambio, aumentando su cuerpo de conocimientos mediante los avances resultantes de la investigación biomédica y no médica. Tal es el caso de la aplicación de la inteligencia artificial en la inmunología.

La integración de la IA en la atención sanitaria tiene un enorme potencial para transformar el campo de la Inmunología al mejorar la precisión diagnóstica, permitir la medicina personalizada, optimizar las estrategias de tratamiento e impulsar avances en la investigación médica. Mediante la aplicación de sofisticados algoritmos y metodologías de IA, los proveedores de atención sanitaria y los investigadores obtienen acceso a información sin precedentes a partir de grandes conjuntos de datos, lo que permite tomar decisiones informadas y mejorar la atención a los pacientes.^(1,3,22)

Basado en lo antes expuesto, la presente investigación se realizó con el objetivo de describir las aplicaciones de la inteligencia artificial en el campo de la inmunología.

Métodos

Se realizó una búsqueda de información en las bases de datos Scopus, PubMed/MedLine y SciELO sobre las aplicaciones de la inteligencia artificial en el campo de la inmunología. Para recuperar la información se empleó una estrategia de búsqueda mediante la combinación de términos con operadores booleanos. Se emplearon los términos “Artificial Intelligence”, “Machine Learning”, “Deep Learning” e “Immunology”. Se seleccionaron artículos en español e inglés, sin importar su tipología (artículo original, de revisión, revisiones sistemáticas, comunicaciones breves y cartas al editor).

Una vez obtenidos los artículos se procedió a la lectura de sus resúmenes, para eliminar aquellos que no fueran de la temática de interés. Posteriormente, se realizó la lectura de los textos completos, entre los cuales se seleccionaron 47 fuentes para el desarrollo de la presente revisión.

Desarrollo

Existen numerosas aplicaciones clínicas potenciales de la IA en inmunología que van desde el diagnóstico de enfermedades hasta la reducción de datos multidimensionales en historias clínicas electrónicas o conjuntos de datos inmunológicos. Para una aplicación e interpretación de la IA, los especialistas

deben participar en el diseño, validación, regulación y aplicación de la IA en inmunología.⁽²³⁾

Análisis de datos genómicos e inmunogenómicos

Los algoritmos de aprendizaje automático han revolucionado la inmunología pues permite el análisis de datos inmunológicos complejos aplicados en varias áreas de investigación, incluido el análisis de datos inmunológicos de alta dimensión, la predicción de respuestas inmunes, el descubrimiento de biomarcadores y el análisis de conjuntos de datos inmunológicos a gran escala.^(1,22)

En la actualidad, existe una variedad de repositorios de datos genómicos y proteómicos que la IA puede procesar y analizar, tales como datos complejos de secuenciación genética y perfiles proteómicos para identificar biomarcadores asociados con diferentes enfermedades autoinmunitarias o infecciosas.⁽²⁴⁾

Estos repositorios frecuentemente contienen datos que incluyen secuencias de ADN, ARN, y evaluación de proteínas, lípidos, metabolitos, el microbioma y las exposiciones ambientales y de estilo de vida. Este cúmulo de datos puede ser procesado mediante algoritmos de Machine Learning (ML), logrando su reconstrucción en datos empleables en la investigación y práctica clínica en Inmunología.^(22,25,26)

De igual forma, usando estos datos se puede realizar la secuenciación de receptores de células T (TCR) y B (BCR), lo cual resulta útil para mapear cómo las células inmunitarias reconocen antígenos, proporcionando información clave para enfermedades autoinmunes y anarcoproliferativas. Estos receptores son esenciales para el reconocimiento de antígenos.^(25,26) Modelos basados en

IA pueden analizar millones de secuencias de TCR/BCR, identificando patrones en sus regiones variables y sus afinidades por antígenos específicos.

En el análisis de datos inmunológicos de alta dimensión, se han utilizado técnicas de aprendizaje automático como algoritmos de agrupamiento y reducción de dimensionalidad para identificar poblaciones celulares distintas y caracterizar sus fenotipos en función de la expresión de marcadores. Este enfoque mejora el conocimiento de los subconjuntos de células inmunes y sus funciones en las enfermedades.^(1,3)

Se han desarrollado modelos de aprendizaje automático para predecir respuestas inmunes, como la eficacia de las vacunas o la progresión de la enfermedad, mediante el entrenamiento de algoritmos en datos inmunológicos y clínicos. Las máquinas de vectores de soporte, los bosques aleatorios y las redes neuronales artificiales son algoritmos comúnmente utilizados para construir modelos predictivos que optimizan los planes de tratamiento para pacientes individuales. El descubrimiento de biomarcadores ha avanzado significativamente gracias a los algoritmos de aprendizaje automático que integran datos multiómicos. Los algoritmos de selección y clasificación de características ayudan a identificar biomarcadores robustos para el diagnóstico, el monitoreo de enfermedades y el desarrollo de terapias dirigidas.^(1,3)

Las técnicas de aprendizaje automático, incluidos los modelos ocultos de Markov y los algoritmos de alineación de secuencias, se han aplicado a conjuntos de datos inmunológicos a gran escala, como datos de secuenciación del repertorio inmunológico, para descubrir patrones y características relacionadas con las respuestas inmunitarias.⁽¹⁾

Las técnicas de aprendizaje profundo, como las redes neuronales convolucionales y las redes neuronales recurrentes, extraen características significativas de los datos inmunogenéticos. Por lo tanto, los algoritmos de

aprendizaje automático han revolucionado la investigación inmunogenética al analizar datos complejos, predecir respuestas inmunitarias, descubrir biomarcadores y descubrir las complejidades de la secuenciación del repertorio inmunológico.⁽¹⁾

Estos avances contribuyen a la comprensión de la dinámica del sistema inmunitario, los mecanismos de las enfermedades y la medicina personalizada, mejorando en última instancia los diagnósticos, los tratamientos y los resultados de los pacientes en inmunología.⁽¹⁾

Predicción de respuestas inmunitarias

El modelado predictivo de la respuesta inmunitaria y los resultados de las enfermedades se basa en los principios de la teoría de redes, donde las redes complejas representan las intrincadas interacciones entre las células y moléculas inmunitarias. El análisis de la topología de la red, los patrones de conectividad y la identificación de los nodos clave permiten predecir la dinámica de la respuesta inmunitaria y su impacto en la progresión de la enfermedad.⁽¹⁾

Otro enfoque influyente es el modelado bayesiano, que emplea la inferencia probabilística para estimar la probabilidad de varios escenarios de respuesta inmunitaria basados en el conocimiento previo y los datos observados. Al incorporar información completa sobre los parámetros del sistema inmunitario y los factores específicos de la enfermedad, los modelos bayesianos proporcionan información valiosa sobre los resultados de la enfermedad y guían las estrategias de tratamiento personalizadas.⁽¹⁾

Al capturar las interacciones celulares, las influencias ambientales y las vías de señalización molecular, los modelos basados en agentes simulan procesos inmunológicos complejos y predicen los resultados de la enfermedad con alta

granularidad. Estas diversas técnicas de modelado, que van más allá del aprendizaje automático, contribuyen a una comprensión profunda de las respuestas inmunitarias y allanan el camino para predicciones más precisas en la medicina personalizada.⁽¹⁾

La IA, tras ser entrenada con los datos adecuados, permite modelar y predecir cómo responderá el sistema inmunitario a diferentes patógenos o vacunas, lo que ayuda a optimizar el diseño de tratamientos y terapias vacunales.⁽²⁷⁾

Se encuentran en desarrollo modelos de IA para predecir la sensibilidad a los alérgenos y optimizar los enfoques de inmunoterapia, mejorando así los resultados de los pacientes mediante soluciones sanitarias a medida.⁽²⁷⁾

Otro campo dentro del uso de la IA para la predicción de la respuesta inmunitaria es el área del trasplante de tejidos. Una revisión sistemática⁽²⁸⁾ incluyó 13 estudios con 463 850 pacientes. Los resultados de los estudios incluidos sugieren que la IA y el ML son más precisos para predecir el fracaso del injerto y la mortalidad que los sistemas de puntuación tradicionales y el análisis de regresión convencional. Los principales factores predictivos del fracaso del injerto y la mortalidad identificados en los modelos de ML fueron: la duración de la estancia hospitalaria, el régimen inmunosupresor, la edad del receptor, la cardiopatía congénita y el tiempo de isquemia del órgano. Otros beneficios potenciales incluyen el análisis de las pruebas de laboratorio y de imagen iniciales, la asistencia al paciente en el cumplimiento de la medicación y la creación de cambios de comportamiento positivos para minimizar el riesgo cardiovascular adicional. El ML demostró aplicaciones prometedoras para mejorar los resultados de los trasplantes de corazón y la atención centrada en el paciente; sin embargo, existen limitaciones importantes en relación con la implementación de la IA en las prácticas quirúrgicas cotidianas.

Desarrollo de vacunas

La IA posee el potencial para acelerar el desarrollo de vacunas, donde algoritmos pueden ser empleados para predecir epítomos, facilitando el diseño de estas en forma más efectiva. Entre los principales métodos para la detección a gran escala de epítomos de células T a partir de patógenos o proteomas se incluyen a la inmunología inversa y a la espectrometría de masa de alto rendimiento. Estas metodologías incluyen el uso de algoritmos computacionales para la preselección de proteomas y la predicción de la unión.⁽²⁹⁾

Uno de los campos de la inmunología para el que existen muchos algoritmos precisos es la predicción del inmunopeptidoma. Determinar si un péptido puede ser presentado por las moléculas del complejo principal de histocompatibilidad (MHC) es de suma importancia y puede ser un paso crucial hacia el desarrollo de vacunas personalizadas. La forma más precisa de determinar el inmunopeptidoma es la espectrometría de masas. Sin embargo, es una técnica costosa y demorada.⁽³⁰⁾

El Machine Learning no solo puede determinar el inmunopeptidoma, sino que también puede entrenarse con los datos actuales sobre el inmunopeptidoma humano y predecir si un péptido específico puede ser presentado por moléculas MHC-I. Los datos adquiridos a partir de estudios in vitro proporcionan información sobre la afinidad péptido-MHC. Estos se emplean para generar modelos que puedan predecir la presentabilidad de neoantígenos descubiertos a través de la secuenciación completa del exoma de tumores por moléculas MHC. La predicción de epítomos para moléculas MHC-II es aún más desafiante debido a la diferente longitud de los péptidos. Los algoritmos basados en IA han demostrado una eficacia prometedora en la predicción de epítomos de MHC-II en función de su secuencia de aminoácidos y en el diseño de vacunas dirigidas al inmunopeptidoma de MHC-II. Sin embargo, dado que estos modelos se basan en datos in vitro, es posible que no predigan interacciones in vivo con el mismo nivel de precisión.⁽³⁰⁾

Además de la determinación del inmunopeptidoma humano, se describen otras bondades del aprendizaje automático. Este puede ayudar a diseñar adyuvantes óptimos para vacunas al determinar epítomos en antígenos. Para este propósito, las máquinas se entrenan en función de las propiedades de los epítomos recuperados de los datos existentes sobre epítomos de antígenos. Un sistema de puntuación basado en las propiedades de los epítomos impulsados predice la probabilidad de que una estructura (3D) o secuencia (2D) determinada que desempeñe el papel de epítomo.⁽³⁰⁾

El aprendizaje automático puede incluso ir más allá y predecir la estructura terciaria de una proteína desde cero en función de su secuencia de aminoácidos y predecir su unión a las moléculas de MHC. Recientemente se propuso un clasificador basado en una máquina de vectores de soporte que puede distinguir péptidos epitópicos de péptidos no epitópicos y determinar la inmunogenicidad de un péptido determinado.⁽³⁰⁾

Se han realizado esfuerzos similares a nivel de ADN y ARN para determinar oligonucleótidos con propiedades inmunomoduladoras. Muchos de estos modelos celulares in silico han demostrado propiedades predictivas prometedoras en el diseño de vacunas y la evaluación computacional de su eficacia. Además, el aprendizaje automático puede acelerar la búsqueda de nuevos antígenos candidatos en la vacunología reversa. Sin embargo, la precisión de estos clasificadores depende del conjunto de datos y las características recuperadas con las que se entrenan. Por lo tanto, es importante enriquecer constantemente el conjunto de datos que entrena a estas máquinas.⁽³⁰⁾

Un estudio⁽³¹⁾ realizado propuso un nuevo método de predicción de epítomos inmunes denominado IEPAPI que incorpora eficazmente la presentación del antígeno y la inmunogenicidad. Los resultados de la comparación cuantitativa en un conjunto de datos de prueba de presentación de antígenos independiente

muestran que IEPAPI superó a los enfoques actuales de vanguardia NetMHCpan4.1 y mhcfllurry2.0 en el 100 (25/25) y el 76 % (19/25) de los subtipos HLA, respectivamente. Además, IEPAPI demuestra la mejor precisión en dos conjuntos de datos de neoantígenos independientes en comparación con los enfoques existentes, lo que sugiere que IEPAPI proporciona una herramienta vital para el diseño de vacunas de células T.

Los algoritmos de aprendizaje automático analizan los datos genómicos y las estructuras de las proteínas para predecir la inmunogenicidad y optimizar las vacunas candidatas, reduciendo significativamente el tiempo y el coste asociados a los métodos tradicionales de desarrollo de vacunas.^(32,33)

Además de detectar objetivos potenciales para desarrollar nuevos enfoques terapéuticos y predecir su eficacia a nivel *in vitro*, la IA se puede aplicar a niveles clínicos y su aplicación puede ir más allá de su poder analítico. El reclutamiento de IA puede cambiar los ensayos clínicos. La IA puede comprobar si los pacientes son elegibles para participar en los ensayos revisando sus registros médicos electrónicos. Puede analizar registros clínicos estructurados y no estructurados y comparar la información de los pacientes y los criterios de elegibilidad para un estudio determinado. De esta manera, el software basado en IA puede proponer ensayos clínicos adecuados para los pacientes, lo que aumentará la probabilidad de que los pacientes se inscriban en un ensayo clínico adecuado.⁽³⁰⁾

Predicción de enfermedades

El análisis de los datos de la Historia Clínica Digital y de imágenes representan una oportunidad invaluable para la extracción de datos que permitan la detección automática de enfermedades. La construcción de los llamados “fenotipos digitales” que devienen del análisis de los datos de pacientes pueden

orientar a la detección automática de enfermedades sugerentes de inmunodeficiencias primarias o errores congénitos de la inmunidad antes de que ocurran infecciones fatales o daños de órganos.⁽²³⁾ Un ejemplo de estas aplicaciones la constituyen el estudio de Pickett et al.⁽³⁴⁾ donde se analizaron los diferentes patrones de infecciones en pacientes con déficit primarios de anticuerpos con el empleo de minería de datos.

En el ámbito de las enfermedades autoinmunes, los modelos basados en IA se utilizan para estratificar a los pacientes, evaluar la causalidad fisiopatológica y diseñar fármacos candidatos in silico. Estos modelos facilitan enfoques de tratamiento personalizados mediante la integración de datos de perfiles moleculares con la IA, mejorando así la gestión de enfermedades crónicas complejas como el lupus eritematoso sistémico y la artritis reumatoide.⁽³⁵⁾

Se ha descrito la utilidad de técnicas de aprendizaje automático para el diagnóstico de alergias mediante el aprendizaje de patrones a partir de conjuntos de datos de pacientes.⁽³⁶⁾ Este enfoque ayuda en el diagnóstico y la gestión de las reacciones alérgicas y permite la monitorización a distancia.

La IA se ha aplicado especialmente en el asma, debido a su alta prevalencia y los costos asociados con su manejo. Los beneficios de la IA en este contexto incluyen la predicción del desarrollo y exacerbaciones del asma, diagnósticos más precisos y una mejor adherencia a las pautas médicas. El aprendizaje automático ha demostrado ser útil para identificar pacientes con asma, especialmente en niños menores de 5 años, donde los diagnósticos son a menudo inciertos. Se han logrado predicciones de persistencia del asma con una precisión del 81 %.⁽³⁷⁾

Una vez diagnosticado el asma, el ML se utiliza para predecir exacerbaciones basándose en datos ambientales y clínicos, con modelos que alcanzan un área bajo la curva superior a 0,7. Futuras aplicaciones de ML podrían incluir el uso de datos de dispositivos inteligentes para mejorar la predicción de

exacerbaciones, aunque su implementación dependerá de factores como costo y disponibilidad tecnológica.⁽³⁷⁾

Recientemente, la IA se ha aplicado al diagnóstico de la dermatitis atópica, la predicción y puntuación de la gravedad, el análisis ómico y la predicción de la respuesta al tratamiento. La IA en la dermatitis atópica ya se ha revisado anteriormente; sin embargo, el campo sigue activo con la investigación.⁽³⁷⁾

La dermatitis atópica puede ser diagnosticada por diferentes especialidades con enfoques dispares para el diagnóstico de la dermatitis atópica. Publicaciones recientes han demostrado que las imágenes fotográficas de las lesiones cutáneas se pueden analizar utilizando algoritmos de Deep Learning, incluida la red neuronal convolucional profunda y las redes neuronales profundas híbridas para distinguir con precisión la dermatitis atópica de otras afecciones cutáneas comunes.⁽³⁷⁾

Un área importante de interés clínico en la dermatitis atópica grave es la determinación de las opciones de tratamiento óptimas para pacientes individuales a medida que se descubren nuevas terapias. Un modelo de ML que utiliza datos de citocinas y quimiocinas séricas recopilados de pacientes antes del tratamiento con azatioprina o metotrexato no pudo predecir con éxito la respuesta terapéutica a estos medicamentos. Sin embargo, un modelo de ML entrenado en variables demográficas y clínicas de pacientes que inician la terapia con dupilumab para la dermatitis atópica pudo predecir la falta de respuesta a dupilumab con un 69 % de precisión. La predicción de la respuesta al tratamiento de la dermatitis atópica representa un área importante para la futura aplicación de la IA.⁽³⁷⁾

Inmunoterapia y cáncer

En la inmunoterapia del cáncer, la IA se utiliza para el reconocimiento de neoantígenos, el diseño de anticuerpos y la predicción de respuestas a la inmunoterapia. Estas aplicaciones apoyan los experimentos de laboratorio y contribuyen al desarrollo de tratamientos más precisos y eficaces, que permiten el avance de la oncología de precisión.^(38,39,40) La capacidad de la IA para analizar datos de secuenciación de alto rendimiento e imágenes médicas ayuda a seleccionar candidatos adecuados para la inmunoterapia y a optimizar los regímenes terapéuticos.⁽⁴⁰⁾

Se ha estudiado la utilidad de modelos de IA, un ejemplo es DeepImmuno.⁽⁴¹⁾ En el estudio citado se realizaron predicciones de las mejores secuencias peptídicas para estimular una respuesta efectiva con el uso de datos de pacientes. En el estudio se realizó una evaluación comparativa sistemática de cinco modelos de aprendizaje automático tradicionales (ElasticNet, K-nearest neighbors, máquina de vectores de soporte, Random Forest y AdaBoost) y tres modelos de aprendizaje profundo (red neuronal convolucional (CNN), red residual y red neuronal gráfica) utilizando tres colecciones de péptidos inmunogénicos independientes validados previamente (virus del dengue, neoantígeno del cáncer y SARS-CoV-2). Se eligió la CNN como el mejor modelo de predicción, debido a su adaptabilidad a conjuntos de datos pequeños y grandes y en su rendimiento en relación con los métodos existentes. El algoritmo (DeepImmuno-CNN) superó dos modelos existentes, y predijo correctamente los residuos más importantes para el reconocimiento de antígenos de células T y nuevos impactos de las variantes de SARS-CoV-2. El algoritmo desarrollado fue capaz además de simular con precisión péptidos inmunogénicos con propiedades fisicoquímicas y predicciones de inmunogenicidad similares a las de los antígenos reales.⁽⁴¹⁾

Respuestas a pandemias

Debido a la capacidad de procesar grandes volúmenes de datos, y extrapolar los mismos a posibles escenarios futuros, se ha considerado la utilidad de la IA en emergencias sanitarias como las pandemias. Algoritmos como modelos SIR (*Susceptible, Infectious, Recovered*) asistidos por IA pueden predecir la propagación de enfermedades y su impacto en la inmunidad colectiva.^(42,43)

De igual forma, sus utilidades no solo se centran en la predicción de factores como la propagación, sino que son útiles para el desarrollo de terapias, como se mencionó anteriormente. Un ejemplo fue la pandemia de COVID-19, donde la IA se usó para identificar compuestos antivirales potenciales, basándose en la estructura del virus y datos preexistentes.⁽⁴⁴⁾

Limitaciones y riesgos potenciales del uso de la inteligencia artificial en la Inmunología

Una de las principales limitaciones de la IA para su aplicación en la inmunología recae en la calidad de los datos disponibles. Esto limita el entrenamiento de la IA, de ahí que sea necesaria la creación de estándares para repositorios y sistemas de información, que garanticen una adecuada calidad de los datos. De igual forma, la interoperabilidad de los sistemas suele ser limitada, al tener formatos o características específicas para las instituciones que fueron creadas, lo cual impide el uso de datos por otros sistemas.

El uso de la IA requiere el acceso a grandes conjuntos de datos, lo que aumenta el riesgo de filtración de datos y de acceso no autorizado a información sensible de los pacientes. Esto es particularmente crítico en inmunología, donde los datos de los pacientes pueden incluir información genética y de biomarcadores que es altamente sensible.^(45,46)

Otro riesgo importante es el posible sesgo de los algoritmos de IA; los sistemas de IA se entrenan con conjuntos de datos existentes, que pueden contener

sesgos inherentes. Estos sesgos pueden dar lugar a resultados sesgados, especialmente en poblaciones de pacientes diversas, lo que podría exacerbar las disparidades sanitarias. En el contexto de la inmunología, esto podría afectar a la precisión de los diagnósticos y las recomendaciones de tratamiento basados en la IA, lo que repercutiría en los resultados de los pacientes.^(47,48)

La falta de transparencia y replicabilidad de los modelos de IA también es motivo de preocupación. Muchos algoritmos de IA, en particular los basados en el aprendizaje profundo, funcionan como «cajas negras», lo que dificulta que los médicos entiendan cómo se toman las decisiones. Esta falta de transparencia puede obstaculizar la confianza y la aceptación entre los proveedores de atención médica y los pacientes, y complicar la integración de la IA en los flujos de trabajo clínicos.^(23,48)

Las consideraciones éticas son primordiales, especialmente en lo que respecta al uso de la IA en los procesos de toma de decisiones. Se hace necesario el establecimiento de directrices y marcos normativos claros para garantizar que las aplicaciones de IA se utilicen de forma ética y equitativa, sobre todo en áreas sensibles como la inmunología, donde las decisiones terapéuticas pueden tener profundas implicaciones.^(23,49)

Por último, el potencial de la IA para alterar los flujos de trabajo clínicos existentes y la necesidad de cambios significativos en la infraestructura y la formación de los profesionales sanitarios son retos adicionales. La implementación exitosa de la IA en inmunología requiere una colaboración multidisciplinaria y una evaluación continua para garantizar que estas tecnologías se utilicen de manera ética, segura y efectiva.^(47,50)

Conclusiones

La inteligencia artificial posee múltiples aplicaciones en el campo de la inmunología, siendo útil para el análisis de datos genómicos e inmunogenómicos, la predicción de respuestas inmunitarias en diferentes situaciones como la alergia y los trasplantes de órganos, el desarrollo de vacunas, la detección temprana, estratificación y predicción de enfermedades, la inmunoterapia en el tratamiento del cáncer y la respuesta a pandemias, entre otras. Sin embargo, no está exento de retos, como lo es la legibilidad de los datos y las inadecuadas infraestructuras. De igual forma, existen riesgos, como es el caso de las interpretaciones inadecuadas de los análisis y las implicaciones éticas.

Referencias bibliográficas

1. Farzan R. Artificial intelligence in Immuno-genetics. Bioinformation [Internet]. 31 de enero de 2024 [acceso 17/11/2024];20(1):29. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10859949/>
2. Palomino Quispe JF, Choque-Flores L, Castro León AL, Requis Carbajal LV, Ferrer-Peñaranda LA, García-Huamantumba E, et al. The Transformative Role of Technology in Medical Education. Salud, Ciencia y Tecnología [Internet]. 1 de enero de 2024 [acceso 17/11/2024];4:657. Disponible en: <https://sct.ageditor.ar/index.php/sct/article/view/643>
3. Germain RN, Allen EMV, Trynka G, Tsang JS, Grün D, Kiemen AL, et al. AI and immunology. Immunity [Internet]. 11 de junio de 2024 [acceso 17/11/2024];57(6):1177-81. Disponible en: [https://www.cell.com/immunity/abstract/S1074-7613\(24\)00270-X](https://www.cell.com/immunity/abstract/S1074-7613(24)00270-X)

4. Moza Villalobos F, Natividad Villanueva J, Meneses Claudio B. Use of Convolutional Neural Networks (CNN) to recognize the quality of oranges in Peru by 2023. Data and Metadata [Internet]. 29 de diciembre de 2023 [acceso 17/11/2024]; 2:175. Disponible en: <https://dm.ageditor.ar/index.php/dm/article/view/117>
5. Boussouf Z, Amrani H, Zerhouni Khal M, Daidai F. Artificial Intelligence in Education: a Systematic Literature Review. Data and Metadata [Internet]. 5 de julio de 2024 [acceso 17/11/2024];3:288. Disponible en: <https://dm.ageditor.ar/index.php/dm/article/view/310>
6. Recalde Drouet EM, Tello Salazar DM, Charro Domínguez TL, Catota Pinthsa PJ. Analysis of the repercussions of Artificial Intelligence in the Personalization of the Virtual Educational Process in Higher Education Programs. Data and Metadata [Internet]. 1 de enero de 2024 [acceso 17/11/2024];3:386. Disponible en: <https://dm.ageditor.ar/index.php/dm/article/view/277>
7. Albarracín Vanoy RJ. Logistics 4.0: Exploring Artificial Intelligence Trends in Efficient Supply Chain Management. Data and Metadata [Internet]. 14 de diciembre de 2023 [acceso 17/11/2024];2:145. Disponible en: <https://doi.org/10.56294/dm2023145>
8. López Telenchana LS, Serrano Torres GJ, Quintana López XA, Reina Haro DM. Machine Learning en la industria 4.0: una revisión sistemática. Salud, Ciencia y Tecnología [Internet]. 1 de enero de 2024 [acceso 17/11/2024];4:1068. Disponible en: <https://sct.ageditor.ar/index.php/sct/article/view/724>
9. Mejías M, Guarate Coronado YC, Jiménez Peralta AL. Artificial intelligence in the field of nursing: attendance, administration and education implications. Salud, Ciencia y Tecnología [Internet]. 22 de octubre de 2022 [acceso 17/11/2024]; 2:88. Disponible en: <https://sct.ageditor.ar/index.php/sct/article/view/163>

10. Anwar D, Faizanuddin M, Fatima S, Dayal R. Transforming Supply Chain Finance with AI and IoT for Greater Inclusivity, Efficiency, and Intelligence. LatIA [Internet]. 1 de enero de 2025 [acceso 17/11/2024];3:121. Disponible en: <https://latia.ageditor.uy/index.php/latia/article/view/121>
11. Vargas Agudelo FA, Soto Duran DE, Urrego Álvarez M, Yepes Sanchez EJ, Delgado González IA. Model based on Machine Learning for the classification of banking transactions carried out through PSE. Salud, Ciencia y Tecnología [Internet]. 22 de agosto de 2024 [acceso 17/11/2024];4. Disponible en: <https://sct.ageditor.ar/index.php/sct/article/view/910>
12. Dei H. The use of AI in the organization of local government work. LatIA [Internet]. 1 de enero de 2025 [acceso 17/11/2024];3:123. Disponible en: <https://doi.org/10.62486/latia2025123>
13. Gama Espinosa JC, Leiva Sánchez LM, Fajardo Pereira MA. Benefits of Artificial Intelligence in human talent management. Multidisciplinar (Montevideo) [Internet]. 25 de julio de 2024 [acceso 17/11/2024];1:14. Disponible en: <https://doi.org/10.62486/agmu202314>
14. Valencia-Contrera M, Rivera-Rojas F, Villa-Velasquez J, Cancino-Jiménez D. Use of artificial intelligence in nursing. LatIA [Internet]. 2 de septiembre de 2024 [acceso 17/11/2024]; 2:92. Disponible en: <https://latia.ageditor.uy/index.php/latia/article/view/92>
15. Nabaouia L, Douzi S, Bouabid EO. Explainable machine learning for coronary artery disease risk assessment and prevention. Data and Metadata [Internet]. 29 de diciembre de 2023 [acceso 17/11/2024]; 2:65. Disponible en: <https://dm.ageditor.ar/index.php/dm/article/view/159>
16. Injante R, Julca M. Detection of diabetic retinopathy using artificial intelligence: an exploratory systematic review. LatIA [Internet]. 2 de septiembre

de 2024 [acceso 17/11/2024];2:112. Disponible en:
<https://latia.ageditor.uy/index.php/latia/article/view/112>

17. Oumoulyte M, Omari Alaoui A, Farhaoui Y, El Allaoui A, Bahri A. Convolutional Neural Network-Based Approach For Skin Lesion Classification. Data and Metadata [Internet]. 27 de diciembre de 2023 [acceso 17/11/2024];2:171. Disponible en:
<https://dm.ageditor.ar/index.php/dm/article/view/121>

18. Muhyeeddin A, Mowafaq SA, Al-Batah MS, Mutaz AW. Advancing Medical Image Analysis: The Role of Adaptive Optimization Techniques in Enhancing COVID-19 Detection, Lung Infection, and Tumor Segmentation. LatIA [Internet]. 29 de septiembre de 2024 [acceso 17/11/2024];2:74. Disponible en:
<https://latia.ageditor.uy/index.php/latia/article/view/74>

19. Agrawal A, Maan V. Enhanced Brain Tumor Segmentation and Size Estimation in MRI Samples using Hybrid Optimization. Data and Metadata [Internet]. 1 de enero de 2024 [acceso 17/11/2024];3:408. Disponible en:
<https://dm.ageditor.ar/index.php/dm/article/view/268>

20. Sidiq M, Chahal A, Gupta S, Reddy Vajrала K. Advancement, utilization, and future outlook of Artificial Intelligence for physiotherapy clinical trials in India: An overview. Interdisciplinary Rehabilitation / Rehabilitacion Interdisciplinaria [Internet]. 24 de diciembre de 2023 [acceso 17/11/2024];4:73. Disponible en:
<https://doi.org/10.56294/ri202473>

21. Wahed MA, Alqaraleh M, Salem Alzboon M, Subhi Al-Batah M. Evaluating AI and Machine Learning Models in Breast Cancer Detection: A Review of Convolutional Neural Networks (CNN) and Global Research Trends. LatIA [Internet]. 1 de enero de 2025 [acceso 17/11/2024];3:117. Disponible en:
<https://doi.org/10.62486/latia2025117>

22. Schultze JL, Büttner M, Becker M. Swarm immunology: harnessing blockchain technology and artificial intelligence in human immunology. *Nat Rev Immunol* [Internet]. julio de 2022 [acceso 17/11/2024];22(7):401-3. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41577-022-00740-1>
23. Khoury P, Srinivasan R, Kakumanu S, Ochoa S, Keswani A, Sparks R, et al. A Framework for Augmented Intelligence in Allergy and Immunology Practice and Research—A Work Group Report of the AAAAI Health Informatics, Technology, and Education Committee. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice* [Internet]. mayo de 2022 [acceso 17/11/2024];10(5):1178-88. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221321982200143X>
24. Zhang GL, Lin HH, Keskin DB, Reinherz EL, Brusic V. Dana-Farber repository for machine learning in immunology. *Journal of Immunological Methods* [Internet]. noviembre de 2011 [acceso 17/11/2024];374(1-2):18-25. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022175911001773>
25. Karahalil B. Overview of Systems Biology and Omics Technologies. *CMC* [Internet]. 5 de diciembre de 2016 [acceso 17/11/2024];23(37):4221-30. Disponible en: <http://www.eurekaselect.com/openurl/content.php?genre=article&issn=0929-8673&volume=23&issue=37&spage=4221>
26. Mersha TB, Afanador Y, Johansson E, Proper SP, Bernstein JA, Rothenberg ME, et al. Resolving Clinical Phenotypes into Endotypes in Allergy: Molecular and Omics Approaches. *Clinic Rev Allerg Immunol* [Internet]. abril de 2021 [acceso 17/11/2024];60(2):200-19. Disponible en: <https://link.springer.com/10.1007/s12016-020-08787-5>
27. Goktas P, Damadoglu E. Future of Allergy and Immunology: Is AI the Key in the Digital Era? *Annals of Allergy, Asthma & Immunology* [Internet]. octubre de

2024 [acceso 17/11/2024];S1081120624015953. Disponible en:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1081120624015953>

28. Naruka V, Arjomandi Rad A, Subbiah Ponniah H, Francis J, Vardanyan R, Tasoudis P, et al. Machine learning and artificial intelligence in cardiac transplantation: A systematic review. Artificial Organs [Internet]. septiembre de 2022 [acceso 17/11/2024];46(9):1741-53. Disponible en:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/aor.14334>

29. Zhang GL, Ansari HR, Bradley P, Cawley GC, Hertz T, Hu X, et al. Machine learning competition in immunology – Prediction of HLA class I binding peptides. Journal of Immunological Methods [Internet]. noviembre de 2011 [acceso 17/11/2024]; 374(1-2):1-4. Disponible en:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022175911002559>

30. Jabbari P, Rezaei N. Artificial intelligence and immunotherapy. Expert Review of Clinical Immunology [Internet]. 3 de julio de 2019 [acceso 17/11/2024]; 15(7):689-91. Disponible en:
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1744666X.2019.1623670>

31. Deng J, Zhou X, Zhang P, Cheng W, Liu M, Tian J. IEPAPI: a method for immune epitope prediction by incorporating antigen presentation and immunogenicity. Briefings in Bioinformatics [Internet]. 20 de julio de 2023 [acceso 17/11/2024]; 24(4):bbad171. Disponible en:
<https://academic.oup.com/bib/article/doi/10.1093/bib/bbad171/7179756>

32. Olawade DB, Teke J, Fapohunda O, Weerasinghe K, Usman SO, Ige AO, et al. Leveraging artificial intelligence in vaccine development: A narrative review. Journal of Microbiological Methods [Internet]. septiembre de 2024 [acceso 17/11/2024]; 224:106998. Disponible en:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167701224001106>

33. Asediya VS, Anjaria PA, Mathakiya RA, Koringa PG, Nayak JB, Bisht D, et al. Vaccine development using artificial intelligence and machine learning: A review. *International Journal of Biological Macromolecules* [Internet]. diciembre de 2024 [acceso 17/11/2024]; 282:136643. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141813024074518>
34. Pickett G, Motazed T, Kutac C, Cahill G, Cunningham-Rundles C, Fuleihan RL, et al. Infection Phenotypes Among Patients with Primary Antibody Deficiency Mined from a US Patient Registry. *J Clin Immunol* [Internet]. febrero de 2021 [acceso 17/11/2024]; 41(2):374-81. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s10875-020-00916-1>
35. Moingeon P. Artificial intelligence-driven drug development against autoimmune diseases. *Trends in Pharmacological Sciences* [Internet]. julio de 2023 [acceso 17/11/2024]; 44(7):411-24. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165614723000883>
36. Rider NL, Srinivasan R, Khoury P. Artificial intelligence and the hunt for immunological disorders. *Current Opinion in Allergy & Clinical Immunology* [Internet]. diciembre de 2020 [acceso 17/11/2024]; 20(6):565-73. Disponible en: <https://journals.lww.com/10.1097/ACI.0000000000000691>
37. MacMath D, Chen M, Khoury P. Artificial Intelligence: Exploring the Future of Innovation in Allergy Immunology. *Curr Allergy Asthma Rep* [Internet]. 1 de junio de 2023 [acceso 17/11/2024]; 23(6):351-62. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11882-023-01084-z>
38. Li T, Li Y, Zhu X, He Y, Wu Y, Ying T, et al. Artificial intelligence in cancer immunotherapy: Applications in neoantigen recognition, antibody design and immunotherapy response prediction. *Seminars in Cancer Biology* [Internet]. junio de 2023 [acceso 17/11/2024]; 91:50-69. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1044579X23000305>

39. Xu Z, Wang X, Zeng S, Ren X, Yan Y, Gong Z. Applying artificial intelligence for cancer immunotherapy. *Acta Pharmaceutica Sinica B* [Internet]. noviembre de 2021 [acceso 17/11/2024]; 11(11):3393-405. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211383521000459>
40. Yang Y, Zhao Y, Liu X, Huang J. Artificial intelligence for prediction of response to cancer immunotherapy. *Seminars in Cancer Biology* [Internet]. diciembre de 2022 [acceso 17/11/2024]; 87:137-47. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1044579X22002309>
41. Li G, Iyer B, Prasath VBS, Ni Y, Salomonis N. DeepImmuno: deep learning-empowered prediction and generation of immunogenic peptides for T-cell immunity. *Briefings in Bioinformatics* [Internet]. 5 de noviembre de 2021 [acceso 17/11/2024]; 22(6):bbab160. Disponible en: <https://academic.oup.com/bib/article/doi/10.1093/bib/bbab160/6261914>
42. Larie D, An G, Cockrell C. Preparing for the next COVID: Deep Reinforcement Learning trained Artificial Intelligence discovery of multi-modal immunomodulatory control of systemic inflammation in the absence of effective anti-microbials [Internet]. *Immunology*; 2022 [acceso 17/11/2024]. Disponible en: <http://biorxiv.org/lookup/doi/10.1101/2022.02.17.480940>
43. Zhao AP, Li S, Cao Z, Hu PJH, Wang J, Xiang Y, et al. AI for science: Predicting infectious diseases. *Journal of Safety Science and Resilience* [Internet]. junio de 2024 [acceso 17/11/2024]; 5(2):130-46. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S266644962400015X>
44. Ong E, Wong MU, Huffman A, He Y. COVID-19 Coronavirus Vaccine Design Using Reverse Vaccinology and Machine Learning. *Front Immunol* [Internet]. 3 de julio de 2020 [acceso 17/11/2024]; 11:1581. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fimmu.2020.01581/full>

45. Goktas P, Karakaya G, Kalyoncu AF, Damadoglu E. Artificial Intelligence Chatbots in Allergy and Immunology Practice: Where Have We Been and Where Are We Going? The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice [Internet]. septiembre de 2023 [acceso 17/11/2024]; 11(9):2697-700. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213219823006414>
46. Saadat A, Siddiqui T, Taseen S, Mughal S. Revolutionising Impacts of Artificial Intelligence on Health Care System and Its Related Medical In-Transparencies. Ann Biomed Eng [Internet]. junio de 2024 [acceso 17/11/2024]; 52(6):1546-8. Disponible en: <https://link.springer.com/10.1007/s10439-023-03343-6>
47. El Naqa I, Karolak A, Luo Y, Folio L, Tarhini AA, Rollison D, et al. Translation of AI into oncology clinical practice. Oncogene [Internet]. 13 de octubre de 2023 [acceso 17/11/2024]; 42(42):3089-97. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41388-023-02826-z>
48. Clement J, Maldonado AQ. Augmenting the Transplant Team With Artificial Intelligence: Toward Meaningful AI Use in Solid Organ Transplant. Front Immunol [Internet]. 11 de junio de 2021 [acceso 17/11/2024]; 12:694222. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fimmu.2021.694222/full>
49. Singh B, Jevnikar AM, Desjardins E. Artificial Intelligence, Big Data, and Regulation of Immunity: Challenges and Opportunities. Archivum Immunologiae et Therapiae Experimentalis [Internet]. 1 de enero de 2024 [acceso 17/11/2024]; 72(1):20240006. Disponible en: <https://www.sciendo.com/article/10.2478/aite-2024-0006>
50. Bottomly D, McWeeney S. Just how transformative will AI/ML be for immuno-oncology? J Immunother Cancer [Internet]. marzo de 2024 [acceso 17/11/2024]; 12(3):e007841. Disponible en: <https://jitc.bmj.com/lookup/doi/10.1136/jitc-2023-007841>

Conflicto de intereses

Los autores no declaran la existencia de conflicto de intereses.

Contribución de autoría

Conceptualización: Adrián Alejandro Vitón-Castillo, Carlos Alfredo Miló-Valdés, Emanuel Maldonado, Lidia Cecilia Pérez Acevedo.

Redacción – borrador inicial: Adrián Alejandro Vitón-Castillo, Carlos Alfredo Miló-Valdés, Emanuel Maldonado, Lidia Cecilia Pérez Acevedo.

Redacción – revisión y edición: Adrián Alejandro Vitón-Castillo, Carlos Alfredo Miló-Valdés, Emanuel Maldonado, Lidia Cecilia Pérez Acevedo.

Financiación

Ninguna.