

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER
en
Biología y Tecnología Aplicada a la
Reproducción Humana Asistida

**LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL
ESTUDIO DE LA INFERTILIDAD
MASCULINA.**

Autor: Rodrigo Pérez Alonso

Tutor: Alberto Pacheco Castro

Cotutor: David Sanz Rosa

Alcobendas, Septiembre 2025

ÍNDICE

RESUMEN	3
PALABRAS CLAVE	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. La infertilidad masculina como problema de salud pública	4
1.2. Técnicas de diagnóstico tradicionales, fortalezas y debilidades	5
1.3. Introducción a la inteligencia artificial y sus aplicaciones en la medicina	9
1.3.1. Inteligencia artificial: Definición y principales enfoques	9
1.3.2. Aplicaciones de la IA en medicina.....	11
1.4. Inteligencia artificial e infertilidad masculina.....	15
2. OBJETIVOS	18
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
4. RESULTADOS.....	19
4.1. Aplicaciones de la inteligencia artificial en andrología	19
4.1.1. Inteligencia artificial en el análisis de semen	19
4.1.2. Inteligencia artificial y selección de espermatozoides para técnicas de reproducción asistida.....	23
4.1.3. Inteligencia artificial en el manejo de las cirugías andrológicas.....	24
4.2. Limitaciones y retos de la inteligencia artificial en andrología	27
5. ARGUMENTACIÓN CRÍTICA	28
6. CONCLUSIONES	31
7. BIBLIOGRAFÍA.....	32

RESUMEN

El factor masculino contribuye hasta en un 50% de los casos de infertilidad a nivel global. No obstante, y pese a los recientes avances en andrología, una proporción significativa de los casos no presenta una etiología clara, lo que limita las opciones terapéuticas. En este contexto, la inteligencia artificial ha emergido como una posible herramienta para lograr diagnósticos más precisos y optimizar los tratamientos asociados a la infertilidad masculina.

Este Trabajo de Fin de Máster explora las diversas aplicaciones de la inteligencia artificial en el campo de la andrología, abarcando áreas como el análisis seminal, la selección de espermatozoides para técnicas de reproducción asistida o la predicción de resultados quirúrgicos, así como sus retos y limitaciones.

Los resultados de la revisión sugieren que la inteligencia artificial es una herramienta prometedora con un alto potencial para transformar el manejo clínico del varón infértil. Sin embargo, presenta varios retos para su implementación a gran escala, como la falta de bases de datos amplias y diversas, lo que puede dar lugar a sesgos, o la variabilidad metodológica entre estudios. Además, desde el punto de vista ético y legal, el uso de la inteligencia artificial en salud reproductiva plantea cuestiones sensibles.

PALABRAS CLAVE

Inteligencia artificial; infertilidad masculina; aprendizaje automático; diagnóstico tradicional; análisis seminal.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. La infertilidad masculina como problema de salud pública

La infertilidad es un problema de salud pública que afecta a entre el 10 y el 15% de las parejas a nivel global. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se estima que alrededor de 186 millones de personas en todo el mundo son infériles. Se define como la incapacidad de una pareja para concebir un hijo después doce meses o más de relaciones sexuales regulares sin protección. En los países en desarrollo, la carga de la infertilidad es generalmente mayor, siendo más complicado identificarla y gestionarla. Esto se debe a la escasez de recursos médicos y al elevado costo del tratamiento, a temores, tabúes y estigmas sociales y culturales (Infertilidad, www.who.int).

Entre el 20 y el 30% de todos los casos de infertilidad son debidos únicamente a factores masculinos, contribuyendo los hombres hasta el 50% de los casos. Sin embargo, cabe destacar una falta de estadísticas precisas sobre las tasas de infertilidad masculina a nivel mundial. Al menos 30 millones de hombres en todo el mundo son infériles, con las tasas más altas registradas en África y Europa del Este (Agarwal et al., 2015; Qaderi et al., 2025).

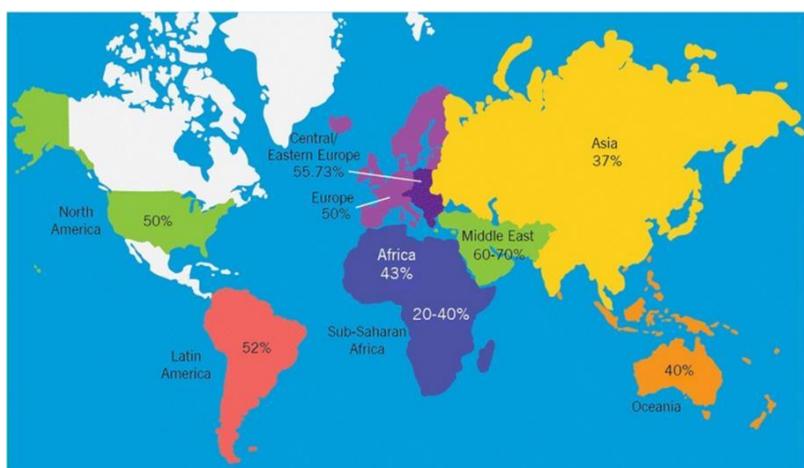


Fig. 1: Mapa mundial que muestra los porcentajes de casos de infertilidad atribuibles al factor masculino (Agarwal et al., 2015)

Por otra parte, en las últimas décadas se ha observado una tendencia preocupante a nivel global: la reducción de la concentración y el recuento total de espermatozoides en los hombres. Aunque no se conocen las causas exactas de este fenómeno, se cree que la exposición prolongada a toxinas ambientales y la mejora de la atención médica global, que permite que más hombres con problemas de salud participen en actividades reproductivas, podrían estar contribuyendo a esta tendencia. Sin embargo, también es posible que la disminución reportada en el recuento de espermatozoides se deba a diferencias en las técnicas de laboratorio, criterios de laboratorio inconsistentes y métodos de recuento variables (Leslie et al., 2024).

La infertilidad masculina puede deberse a múltiples causas, como hormonales, genéticas y ambientales y de estilo de vida. No obstante, en alrededor de un 40% de los casos no existe una

etiología clara, requiriéndose más estudios para conocer los factores subyacentes y abordar el manejo clínico de los hombres infértilles. La OMS está trabajando en el abordaje de la infertilidad masculina, elaborando directrices sobre la prevención, el diagnóstico y el tratamiento de la misma (Babakhanzadeh et al., 2020; Infertilidad, www.who.int).

1.2. Técnicas de diagnóstico tradicionales, fortalezas y debilidades

La evaluación de la infertilidad masculina tiene como principal objetivo la identificación de los factores contribuyentes para, así, ofrecer tratamiento para los reversibles, determinar si el paciente es candidato a técnicas de reproducción asistida y ofrecer asesoramiento para afecciones irreversibles e intratables. En un 18% de los casos se presentan causas tratables de infertilidad masculina, tales como azoospermia obstructiva, varicocele, deficiencia de gonadotropina, trastornos de la función sexual o autoinmunidad de los espermatozoides. Hasta un 70% de los casos corresponden a infertilidad o subfertilidad incorregible, incluyendo oligozoospermia, astenozoospermia o teratozoospermia, y estando indicado generalmente el uso de técnicas de reproducción asistida. Por último, el 12% de los casos restantes pertenecen a esterilidad masculina intratable (Leslie et al., 2024).

El manejo clínico de la infertilidad masculina comienza con la recopilación de información sobre el historial médico y reproductivo del paciente, así como con una exploración física. Además, se realiza un análisis de semen en el laboratorio, recolectándose al menos dos muestras seminales del paciente separadas por un intervalo de tiempo de mínimo una semana y cada una precedida por al menos tres días de abstinencia. Esto último se considera la piedra angular tanto del diagnóstico como del tratamiento clínico de la infertilidad masculina, siendo de gran ayuda para identificar y determinar la gravedad de cualquier factor masculino implicado (Barratt et al., 2017; Leslie et al., 2024; Naik et al., 2024).

La OMS ha publicado guías para la evaluación del semen que son ampliamente utilizadas en la práctica clínica y la investigación. El semen se evalúa de acuerdo al volumen, pH, licuefacción, presencia de leucocitos y células germinales inmaduras. Por su parte, los parámetros espermáticos a evaluar son la concentración de espermatozoides, la motilidad, la morfología, la vitalidad y la integridad del DNA. No obstante, el análisis de semen se considera una herramienta de diagnóstico imperfecta y alrededor del 50% de los pacientes no tendrán una causa de infertilidad identificable, clasificándose como infertilidad masculina idiopática (Leslie et al., 2024; Naik et al., 2024).

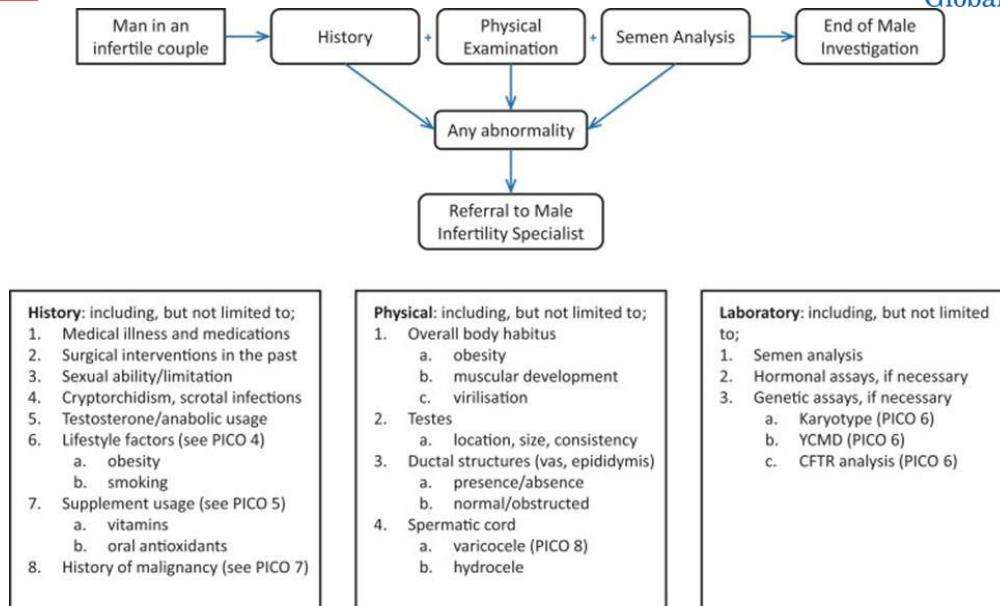


Fig. 2: Diagrama de flujo que resume el algoritmo para el diagnóstico de la infertilidad masculina. Las pruebas de primera línea deben incluir la anamnesis, la exploración física y el análisis de semen (además de ensayos hormonales y genéticos si fuera necesario). Barratt et al., 2017

En el marco de la evaluación de los parámetros espermáticos mencionados, la concentración de espermatozoides debe ser superior a 15 millones por mililitro para considerar una muestra como normal. Dicho parámetro resulta fundamental en el diagnóstico de oligozoospermia o azoospermia. La motilidad espermática mide la capacidad de movimiento de los espermatozoides, clasificándolos en móviles progresivos, móviles no progresivos e inmóviles. Aquí, el límite de referencia inferior según la OMS es de un 40% de motilidad total, clasificándose como astenozoospérmicas las muestras con movilidad reducida. Por otra parte, la vitalidad espermática determina el porcentaje de espermatozoides vivos en una muestra, evaluándose dicho parámetro cuando hay una elevada proporción de espermatozoides inmóviles. Se usan tinciones vitales (eosina-nigrosina) o pruebas de integridad de la membrana. Para catalogar la muestra como normal en este caso, según la OMS, debe haber al menos 58% de espermatozoides vivos (Leslie et al., 2024).

En relación a la morfología espermática, una muestra se define como normal cuando al menos el 4% de los espermatozoides son morfológicamente normales según los criterios de Kruger-Tygerberg. Sin embargo, existe una amplia variabilidad morfológica en las muestras definidas como normales, lo que resulta un problema en técnicas como la inyección intracitoplasmática (ICSI) en la que no ocurre una selección natural óvulo-espermatozoide. Además, los criterios que evalúan la morfología espermática se han ido volviendo más estrictos por la baja correlación con los resultados clínicos (Cherouveim et al., 2023; Leslie et al., 2024).

Para la evaluación de la morfología se emplean métodos de tinción con el objetivo de mejorar la visualización de los espermatozoides al aumentar el contraste espermático. Sin embargo, se han descrito diferencias significativas en las dimensiones espermáticas entre estos métodos debido a la diferente osmolalidad de las tinciones y fijadores que podría provocar hinchazón o

estrechamiento de las cabezas de los espermatozoides. Sumado a esto, el proceso de tinción puede afectar a la vitalidad y motilidad espermáticas, dejando a los espermatozoides como inservibles para posteriores técnicas de reproducción asistida. A fin de resolver estos problemas, se han desarrollado métodos no invasivos para evaluar la morfología espermática, como el contraste de interferencia diferencial y la microscopía de contraste de fase. Aun así, la selección manual de espermatozoides basada en la morfología con dichos métodos para su utilización en ICSI resulta un proceso que además de subjetivo requiere mucho tiempo, lo que resulta contraproducente. Esto es debido a que la polivinilpirrolidona, que es una sustancia usada en el proceso de ICSI, aumenta el grado de fragmentación del DNA espermático con una exposición prolongada, por lo que es necesaria una técnica que reduzca el tiempo de evaluación de la morfología espermática, además de la subjetividad asociada (Cherouveim et al., 2023).

Otro parámetro importante que influye en las tasas de éxito de los tratamientos de fertilidad es la fragmentación del DNA espermático. Existen técnicas como la microfluídica y la unión de ácido hialurónico que reducen la fragmentación del DNA de una muestra espermática, aunque aún no han demostrado su valor para mejorar los resultados clínicos. Por otra parte, kits como el ensayo de estructura de la cromatina del esperma, el marcaje terminal de los extremos de la desoxinucleotidil transferasa UTP, la dispersión de la cromatina del esperma y la electroforesis en gel de una sola célula evalúan el índice de fragmentación del DNA espermático, aunque a nivel de toda la muestra y luego extrapolándose a nivel de un solo espermatozoide. Por lo tanto, dichas técnicas son limitadas en su aplicación para la selección final de espermatozoides, ya que no evalúan la calidad individual de un espermatozoide, además de ser invasivas. Resulta necesario un método no invasivo y confiable que pueda valorar la fragmentación del DNA a nivel de un solo espermatozoide (Cherouveim et al., 2023).

Los tratamientos pueden estar o bien dirigidos a la fisiopatología subyacente específica, como por ejemplo una varicocelectomía o la extracción testicular de espermatozoides (TESE), o bien ser tratamientos generalizados enfocados en aspectos como el aumento de la producción de esperma, cambios en el estilo de vida, y recuperación de esperma y/o técnicas de reproducción asistida. Sin embargo, hoy en día dichos tratamientos son prohibitivos en términos de costo para muchos pacientes. Por otro lado, la tasa de éxito de la extracción quirúrgica de espermatozoides no pasa del 50-60%, incluso en entornos ideales (Naik et al., 2024).

Pese al creciente número de tratamientos basados en técnicas de reproducción asistida (TRA) que se realizan a nivel mundial, las tasas de fecundación y embarazo se han mantenido relativamente constantes en los últimos años, siendo la selección de espermatozoides un factor clave. Los embriólogos tienen la complicada labor de seleccionar unos pocos espermatozoides entre los millones que puede haber en una muestra para su uso en TRA, siendo esta una tarea larga, subjetiva y que puede incluso dañar los espermatozoides, dejándolos inutilizables. Dicha tarea cobra aún más importancia en los casos en los que se debe seleccionar un solo espermatozoide.

para la ICSI. Cabe resaltar que el proceso de selección de espermatozoides es altamente subjetivo y dependiente del operador, lo que influirá en el éxito de la TRA. Además, los embriólogos no disponen de tiempo suficiente para evaluar de manera integral una muestra de espermatozoides completa (Cherouveim et al., 2023).

Para dicha selección de espermatozoides existen un conjunto de procedimientos de laboratorio disponibles que se basan en separar los espermatozoides altamente móviles (swim-up) y eliminar las células muertas y desechos (gradientes de densidad). La selección final de espermatozoides se realiza en gran medida de forma manual por un embriólogo en base a los criterios de la OMS para la morfología espermática y la evaluación de la motilidad. No obstante, cabe destacar que el análisis de la morfología espermática presenta una naturaleza subjetiva que conduce a la variabilidad interobservador e interlaboratorio en la selección de espermatozoides (Cherouveim et al., 2023).

Pese a los esfuerzos por comprender la etiopatogenia de la infertilidad masculina, gran parte de los casos siguen siendo desconocidos, lo que muestra una falta de comprensión de los mecanismos involucrados en ello. Las herramientas de diagnóstico convencionales suelen carecer de precisión para detectar causas sutiles o multifactoriales de infertilidad, lo que limita su capacidad para guiar intervenciones personalizadas. La interacción entre los múltiples factores clínicos, ambientales y de estilo de vida también es difícil de modelar con los modelos predictivos basados en métodos estadísticos tradicionales, lo que resulta en una precisión subóptima para pronosticar el éxito del tratamiento de fertilidad (Qaderi et al., 2025).

Con todo, los parámetros tradicionales de evaluación del semen presentan un valor predictivo relativamente bajo para la capacidad de fecundación de los espermatozoides y los resultados reproductivos. Además, su evaluación es subjetiva, lo que lleva a una elevada variabilidad interobservador e interlaboratorio, y es un proceso lento, especialmente en laboratorios con mucha actividad. La toma de decisiones clínicas puede verse influenciada por esta subjetividad en el análisis de los parámetros microscópicos del esperma, el error humano y la alta variabilidad entre operadores. Por otra parte, intervenciones como la TESE tienen un éxito limitado del 40 al 60%. Todo ello, sumado al coste de los tratamientos y a la carga psicológica de los pacientes, lleva a una necesidad de nuevas herramientas de diagnóstico y tratamiento para mejorar la eficacia de la atención de la infertilidad masculina (Dai et al., 2022; Ghayda et al., 2024; Naik et al., 2024).

La investigación en pruebas genéticas y el uso de marcadores epigenéticos, proteomas seminales y radiómica está abriendo nuevas puertas para entender las causas subyacentes de la infertilidad masculina. Además, los progresos en las técnicas de preservación de la fertilidad masculina ofrecen una nueva esperanza para los hombres con cáncer que se someten a tratamientos que pueden dañar su fertilidad. Asimismo, la aplicación futura de la inteligencia artificial (IA) en la práctica de la infertilidad podría revolucionar la forma en que se diagnostican y tratan los problemas de fertilidad masculina. La IA podría ayudar a establecer diagnósticos más precisos y

proporcionar información valiosa sobre el pronóstico de la fertilidad y el resultado reproductivo.

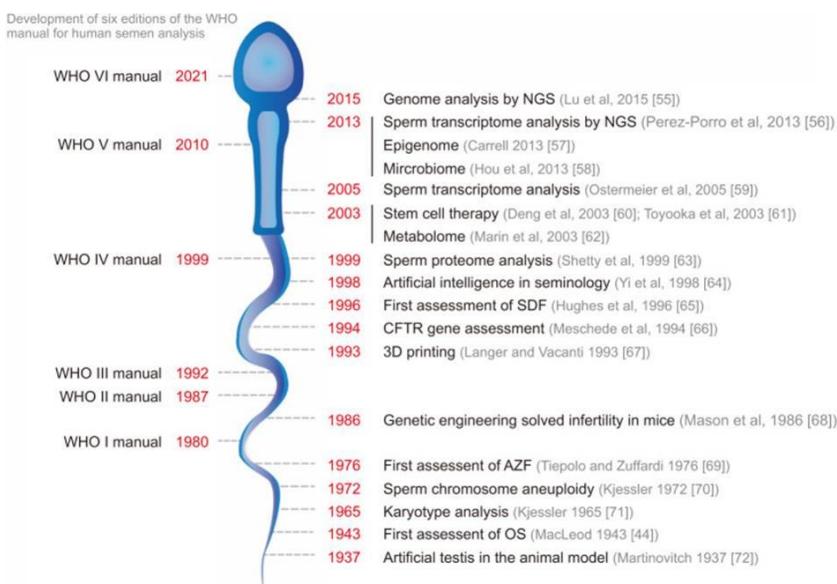


Fig. 3: Avances significativos en el campo de la infertilidad masculina en los últimos 85 años, algunos de los cuales incluyen: genética y tecnologías ómicas, estudios sobre estrés oxidativo y fragmentación del DNA espermático, actualizaciones en el análisis de semen por la OMS, preservación de la fertilidad en supervivientes de cáncer, impresión 3D, terapia con células madre, estudios sobre el microbioma seminal, y la aplicación de la IA. Calogero et al., 2023.

Por último, los esfuerzos de las organizaciones profesionales de andrología están dirigidos a mejorar la difusión del conocimiento y la práctica clínica en este campo. Al reducir la brecha entre la investigación y la práctica clínica, se espera mejorar la atención y el tratamiento de los hombres con problemas de fertilidad (Calogero et al., 2023; Gül et al., 2024; Motawi et al., 2024).

1.3. Introducción a la inteligencia artificial y sus aplicaciones en la medicina

1.3.1. Inteligencia artificial: Definición y principales enfoques

La IA se refiere al desarrollo de sistemas informáticos y robots que pueden realizar tareas que normalmente requieren inteligencia o maniobrabilidad humana. La norma ISO/IEC TR 24028:2020 define la IA como la capacidad de un sistema diseñado para adquirir, procesar y aplicar conocimientos y habilidades (Ghayda et al., 2024).

La IA ha experimentado varios auges desde su nacimiento en la Conferencia de Dartmouth de 1956, donde John McCarthy acuñó el término y se estableció formalmente el campo. El tercer auge, que comenzó en 2010, se caracteriza por la rápida evolución y diversificación de la IA, con tecnologías clave como el aprendizaje automático y el aprendizaje profundo. En la industria, la IA está entrando en una fase de implementación, y se espera que impulse el desarrollo de aplicaciones y contribuya a un nuevo auge económico (Kobayashi, 2024).

La IA abarca varios enfoques. Por un lado, el aprendizaje automático (*Machine learning*, ML) es una disciplina científica que implica entrenar a las computadoras para realizar tareas utilizando datos y algoritmos, y tiene diversas aplicaciones, desde el reconocimiento de caracteres hasta el diagnóstico médico. Para desarrollar ML, se necesitan grandes conjuntos de datos para entrenar

el algoritmo y encontrar patrones complejos. El proceso de modelado en ML consta de tres etapas: preparación de datos, selección del modelo y evaluación (Ghayda et al., 2024; Kobayashi, 2024).

Los algoritmos de ML funcionan mediante tres mecanismos principales: aprendizaje supervisado, no supervisado y aprendizaje por refuerzo. Cada técnica se utiliza para resolver diferentes tareas, como el reconocimiento de patrones o la agrupación en clústeres. En el aprendizaje supervisado, el algoritmo se entrena con datos etiquetados para aprender la relación entre los datos y el resultado deseado, lo que le permite predecir resultados en nuevos datos sin procesar. Un ejemplo de esto es el reconocimiento de huellas dactilares en teléfonos inteligentes. En cambio, en el aprendizaje no supervisado, el algoritmo solo recibe datos de entrada y debe descubrir patrones o estructuras en los datos por sí solo. Esto se utiliza para tareas como la agrupación de datos o la detección de relaciones entre variables (Ghayda et al., 2024).

Un tipo de algoritmo de aprendizaje supervisado es el árbol de decisiones, que resuelve una pregunta basándose en atributos específicos mediante una estructura en forma de árbol. Un algoritmo de bosque aleatorio es una colección de árboles de decisión que se utilizan para obtener resultados más precisos al combinar las respuestas de varios árboles. De esta manera, se puede mejorar la precisión y la robustez de las predicciones (Ghayda et al., 2024).

Cabe destacar también el desarrollo de la IA sin código, que es un servicio que permite el aprendizaje automático sin necesidad de programación, lo que ha transformado diversos ámbitos, como la ingeniería de procesos industriales y la automatización de procesos de negocio. La IA sin código está revolucionando el acceso a la inteligencia artificial para profesionales clínicos e investigadores biomédicos, permitiéndoles crear modelos de IA de manera autónoma y eficiente. Esto no solo aumenta la autonomía, sino que también reduce la necesidad de equipos de expertos (Kobayashi, 2024).

Otro tipo de inteligencia artificial son las redes neuronales, las cuales están inspiradas en el funcionamiento del cerebro humano. Estas redes están compuestas por cuatro elementos clave: entradas, ponderaciones, sesgo y salida. Su función es procesar conjuntos de datos de entrenamiento para reconocer patrones y desarrollar algoritmos que puedan predecir resultados en nuevos conjuntos de datos. La estructura básica de una red neuronal consta de una capa de entrada, capas ocultas y una capa de salida. Las capas ocultas están formadas por nodos que procesan la información y producen una salida que se transmite a la siguiente capa. Por ejemplo, una red neuronal puede ser entrenada con millones de imágenes de dígitos escritos a mano para reconocer patrones y predecir el dígito correcto en nuevas imágenes. Por otro lado, el aprendizaje profundo (*Deep learning*, DL) es una forma de red neuronal que se caracteriza por tener múltiples capas ocultas, lo que le permite abordar problemas complejos y sofisticados como el reconocimiento de imágenes y voz. Estas redes neuronales profundas son capaces de automatizar gran parte del proceso de extracción de características y permiten el uso de grandes conjuntos de datos, lo que las hace escalables y precisas (Ghayda et al., 2024).

Por último, el procesamiento del lenguaje natural (PNL) es una parte de la IA que se centra en desarrollar la capacidad de una máquina para comprender el lenguaje humano (Ghayda et al., 2024).

Tipo de IA	Características / Descripción	Ejemplo / Aplicación
Aprendizaje Supervisado	Algoritmos entrenados con datos etiquetados para predecir resultados.	Reconocimiento de huellas dactilares en smartphones
Aprendizaje No Supervisado	Algoritmos identifican patrones y estructuras sin etiquetas previas.	Agrupación de datos y detección de relaciones
Aprendizaje por Refuerzo	Algoritmos aprenden a través de recompensas y castigos tras interacciones con el entorno.	Optimización de procesos y juegos
Árbol de Decisión	Estructura de árbol que toma decisiones basadas en atributos específicos.	Clasificación de pacientes según síntomas
Bosque Aleatorio	Conjunto de árboles de decisión combinados para mejorar precisión y robustez.	Predicciones médicas más precisas
Redes Neuronales	Inspiradas en el cerebro humano, procesan datos mediante entradas, ponderaciones, sesgo y salida.	Reconocimiento de dígitos escritos a mano
Aprendizaje Profundo (Deep Learning)	Redes neuronales con múltiples capas ocultas para problemas complejos.	Reconocimiento de imágenes y voz
IA sin código	Permite crear modelos de ML sin necesidad de programación.	Modelos clínicos personalizados creados por médicos
Procesamiento de Lenguaje Natural (PNL)	Permite a las máquinas comprender y procesar el lenguaje humano.	Ánalisis de registros médicos escritos

Tabla 1: Características de cada tipo de IA. Ghayda et al., 2024.

1.3.2. Aplicaciones de la IA en medicina

La medicina está experimentando una revolución gracias a la inteligencia artificial (IA), que está mejorando la precisión de los diagnósticos, los resultados de las cirugías y la creación de medicamentos. Debido a la disminución prevista de profesionales médicos en los países desarrollados, es esencial aprovechar la tecnología digital para transformar los servicios de salud. La IA se ha vuelto una herramienta clave en la medicina moderna, impulsada por avances en tecnología informática y robótica. Se están creando aplicaciones de IA para ayudar a los médicos en diferentes contextos, con el objetivo de ofrecer una atención médica personalizada y centrada en el paciente (Ghayda et al., 2024; Kobayashi, 2024).

A pesar de que la IA en la atención médica aún está en sus primeras etapas y enfrenta obstáculos como la falta de datos y el sesgo racial, se anticipa que tendrá un impacto considerable en la atención primaria y en áreas como el análisis de imágenes médicas, el desarrollo de fármacos y la medicina personalizada (Kobayashi, 2024).

Para desarrollar modelos de IA médica exitosos, es fundamental que los ingenieros de IA trabajen en estrecha colaboración con los usuarios y sigan un proceso estándar como el Proceso Estándar Intersectorial para Minería de Datos (CRISP-DM). Este modelo consta de seis fases:

1. Comprensión empresarial: entender la situación del negocio y comunicarse con el usuario.
2. Comprensión de datos: comprender los datos y la terminología correspondiente.
3. Preparación de datos: convertir los datos a un formato adecuado para el desarrollo de IA.
4. Modelado: crear un modelo de IA que satisfaga los requisitos del cliente.

5. Evaluación: evaluar el modelo de IA y mejorar si es necesario.
6. Implementación: implementar el modelo en el campo y diseñar una interfaz de usuario fácil de usar.

El modelo CRISP-DM es versátil y se puede aplicar a diferentes áreas y desafíos específicos, lo que garantiza que los proyectos de IA médica sean efectivos y se desarrollen sin contratiempos. Además, la IA sin código podría integrarse con el modelo CRISP-DM, lo que agilizaría aún más el desarrollo de modelos de IA y mejoraría la eficiencia en la práctica clínica (Kobayashi, 2024).

Sería ideal que los médicos adquirieran conocimientos de IA y crearan sus propios modelos de IA. Afortunadamente, las herramientas de IA sin código permiten a los usuarios preparar datos y desarrollar modelos de IA de forma independiente, sin necesidad de un equipo de expertos. Esto es especialmente beneficioso porque permite a los usuarios crear modelos de IA personalizados y adaptados a sus necesidades específicas, lo que aumenta la accesibilidad y la eficiencia en la práctica clínica (Kobayashi, 2024).

Los servicios de salud están en constante evolución y expansión, lo que ha generado la necesidad de sistemas de gestión de datos avanzados para manejar la complejidad del sector. La IA y el aprendizaje automático (ML) pueden aprovechar los datos almacenados en las historias clínicas electrónicas (HCE) para mejorar la precisión en la clasificación de enfermedades y tomar decisiones informadas (Ghayda et al., 2024).

La inteligencia artificial puede generar evidencia de alta calidad al recopilar y analizar datos de diversas fuentes, creando una red global de información médica. Esto puede transformar la práctica médica al combinar datos de registros médicos electrónicos, imágenes médicas, análisis de laboratorio e históricos médicos, lo que se traduce en beneficios como:

- Diagnósticos más específicos y precisos
- Más datos para centros de salud nacionales e internacionales
- Investigación de alta calidad
- Reducción del coste de la atención sanitaria
- Compensación de la escasez de personal médico
- Reducción de la brecha en los servicios de salud entre zonas urbanas y rurales

En definitiva, la inteligencia artificial puede ayudar a los servicios de salud a aprovechar los datos de las historias clínicas electrónicas para predecir patrones, verificar valores atípicos y mejorar modelos de predicción (Ghayda et al., 2024).

Sin embargo, la IA enfrenta desafíos relacionados con la seguridad y privacidad de los datos sensibles de los pacientes. Por lo tanto, es fundamental garantizar la seguridad de los datos. Los datos estructurados relacionados con la salud son comúnmente utilizados en IA, mientras que los datos no estructurados, como texto e imágenes, requieren técnicas de procesamiento del lenguaje

natural (PLN) para extraer información significativa (Ghayda et al., 2024).

El procesamiento del lenguaje natural (PLN) es una rama de la inteligencia artificial que se enfoca en permitir que las máquinas comprendan el lenguaje humano. Desarrollada en la década de 1950 a partir de la intersección de la lingüística y la inteligencia artificial, su aplicación en medicina es fundamental para analizar grandes cantidades de datos, como los registros médicos escritos por los doctores (Ghayda et al., 2024).

Esta tecnología permite a las máquinas identificar patrones y clasificaciones, como códigos de diagnóstico, a partir de textos no estructurados, lo que facilita a los médicos escribir de manera natural sin necesidad de formatos específicos. En definitiva, transforma datos sin procesar en datos estructurados que pueden ser analizados por modelos de aprendizaje automático.

Al ser una herramienta de autoaprendizaje, el PLN mejora su precisión a medida que se alimenta de más datos, lo que la hace más representativa de la población de pacientes (Ghayda et al., 2024).

En este contexto, también es importante destacar la utilidad de la radiómica, un enfoque médico que utiliza algoritmos de caracterización de datos para extraer características cuantitativas de imágenes médicas. Puede ser realizada de forma manual, semiautomática o automática mediante IA. El software radiómico se enfoca en la cuantificación y segmentación de regiones, lo que permite evaluar las características de las lesiones, como tumores, y su microambiente circundante (Ghayda et al., 2024; Gül et al., 2024).

La radiómica se puede aplicar en diversas modalidades de imagen, como radiografía, ultrasonido, tomografía computarizada (TC), resonancia magnética (RM) y tomografía por emisión de positrones (TEP). Esta técnica proporciona información cuantitativa sobre características biológicas significativas y facilita la automatización del diagnóstico por imagen (Ghayda et al., 2024).

La radiómica ha demostrado su potencial para mejorar la precisión diagnóstica, la evaluación pronóstica y la predicción de la respuesta al tratamiento, especialmente cuando se combina con datos clínicos, bioquímicos y genéticos. Se han publicado estudios que destacan su utilidad en diversos campos del sistema sanitario, como la patología y los tumores cerebrales, carcinoma colorrectal, enfermedad cardíaca coronaria y diabetes. Con todo ello, la radiómica es considerada una herramienta prometedora para mejorar la toma de decisiones clínicas (Ghayda et al., 2024).

La inteligencia artificial en medicina es un área en constante expansión, con una inversión global estimada en tecnologías de IA para el cuidado de la salud que alcanzará los 45.000 millones de dólares en 2026. La IA ya se ha utilizado en muchos campos médicos, con más de 12.000 artículos publicados desde el año 2000 sobre atención médica al paciente, aunque solo unos pocos se han enfocado recientemente en el campo de la andrología. Puede aplicarse para tomar decisiones informadas, como acelerar el descubrimiento de fármacos, proporcionar información para diagnósticos y tratamientos personalizados, y automatizar tareas administrativas. Un ejemplo destacado es su eficacia en la detección temprana del cáncer, donde sistemas aprobados por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) utilizan IA para analizar imágenes y detectar patrones que podrían pasar desapercibidos para los expertos humanos, lo que facilita diagnósticos más certeros y tratamientos oportunos (Carini et al., 2024; Ghayda et al., 2024).

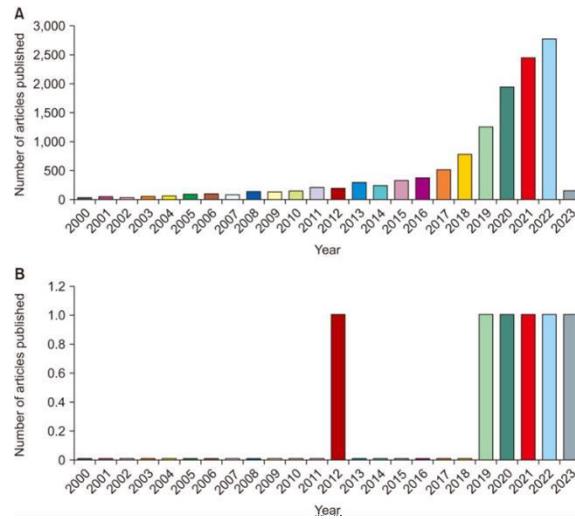


Fig. 4: Gráficos que muestran el número de artículos publicados desde el año 2000 sobre IA y medicina (A), y sobre IA y andrología (B). Ghayda et al., 2024.

En síntesis, la inteligencia artificial ha transformado la atención médica al mejorar notablemente la precisión y eficiencia en diagnósticos por imágenes y análisis clínicos, reduciendo la carga de trabajo de los profesionales de la salud (Liu et al., 2021).

Área de Aplicación	Descripción	Referencias
Diagnóstico y análisis de imágenes	IA mejora la precisión de diagnósticos mediante análisis de imágenes médicas, radiómica y PLN.	Ghayda et al., 2024; Kobayashi, 2024; Carini et al., 2024
Medicina personalizada	Permite crear modelos de predicción basados en datos clínicos y genéticos para tratamientos individualizados.	Ghayda et al., 2024; Kobayashi, 2024
Descubrimiento de fármacos	IA acelera el desarrollo de medicamentos mediante análisis de grandes bases de datos y predicción de eficacia.	Ghayda et al., 2024
Gestión de datos clínicos	Uso de HCE y técnicas de aprendizaje automático para clasificar enfermedades y prever patrones de salud.	Ghayda et al., 2024
Procesamiento del lenguaje natural (PLN)	Transforma datos no estructurados en estructurados para análisis y clasificación automática.	Ghayda et al., 2024
Automatización y eficiencia	IA reduce carga administrativa y mejora eficiencia operativa en hospitales y clínicas.	Liu et al., 2021
Supervisión regulatoria y seguridad	Considera los desafíos éticos, legales y técnicos, asegurando la validez clínica y protección de datos.	Crossnohere et al., 2022; Naik et al., 2024

Tabla 2: Resumen de las diversas aplicaciones de la IA en la Medicina.

Sin embargo, existen preocupaciones sobre la falta de supervisión y regulación en el desarrollo y expansión de la IA en medicina. Los expertos han señalado debilidades y limitaciones, incluyendo desafíos éticos, legales y técnicos, como el sesgo implícito y la validez clínica.

También se cuestiona la solidez y rigor de los métodos de desarrollo y evaluación de la IA en

comparación con otras intervenciones médicas (Crossnohere et al., 2022).

La supervisión regulatoria de la IA en medicina aún está en sus inicios. En 2021, la FDA de EE. UU. presentó un plan de acción para regular la implementación de la inteligencia artificial en dispositivos médicos y salud digital. Hasta la fecha, la FDA ha aprobado más de 880 dispositivos médicos que incorporan inteligencia artificial. Asimismo, la Comisión Europea y la Agencia Europea de Medicamentos están liderando iniciativas para aumentar la confiabilidad y regulación de la IA en el sector sanitario. Es fundamental abordar estos desafíos para garantizar el uso seguro y efectivo de la IA en medicina (Crossnohere et al., 2022; Naik et al., 2024).

1.4. Inteligencia artificial e infertilidad masculina

En la última década, la inteligencia artificial y sus diferentes enfoques, tales como el aprendizaje automático, las redes neuronales artificiales y el aprendizaje profundo, han revolucionado la atención médica, destacadamente en tecnologías de reproducción asistida como la fecundación in vitro (FIV) por la creciente cantidad de datos disponibles en este campo. La integración de la IA en el laboratorio de FIV es una tecnología prometedora que podría transformar la forma en que se realizan estos procedimientos. Por ejemplo, la morfología embrionaria es crucial en la toma de decisiones clínicas, pero depende de evaluaciones visuales subjetivas y propensas a errores. Con la implementación de algoritmos de IA en los laboratorios de FIV se pueden ejecutar evaluaciones objetivas y precisas, mejorando la calidad y eficiencia del proceso (Ghayda et al., 2024; Jiang et al., 2023).

La IA tiene el potencial de mejorar varios aspectos de la FIV, como la evaluación de la calidad de los ovocitos y la selección de espermatozoides, la predicción de la ploidía embrionaria y la selección de embriones para transferencia. También puede automatizar procesos y mejorar los resultados clínicos mediante la predicción precisa del potencial de desarrollo de los embriones y la identificación de ubicaciones óptimas para técnicas de micromanipulación (Jiang et al., 2023).

Las redes de análisis de imágenes basadas en IA pueden eliminar la subjetividad humana en la clasificación de embriones y predecir resultados de desarrollo e implantación. Esto podría revolucionar la medicina reproductiva y mejorar el rendimiento de las técnicas de FIV (Jiang et al., 2023).

Particularmente, la inteligencia artificial tiene el potencial de transformar el diagnóstico y tratamiento de la infertilidad masculina. Los algoritmos de IA pueden mejorar la precisión del diagnóstico al automatizar la evaluación de los espermatozoides, reduciendo la variabilidad y detectando anomalías con mayor consistencia que los métodos tradicionales (Qaderi et al., 2025).

Los modelos de aprendizaje automático pueden analizar con precisión la morfología, motilidad y la integridad del DNA de los espermatozoides, superando la subjetividad de las evaluaciones manuales. Además, las herramientas predictivas de IA pueden integrar datos clínicos, imágenes

y antecedentes del paciente para predecir con mayor precisión el éxito de la recuperación de espermatozoides y los resultados de la FIV (Qaderi et al., 2025).

En casos complejos como la azoospermia no obstructiva, la IA puede ayudar a identificar espermatozoides viables en biopsias testiculares, una tarea desafiante con técnicas actuales. La IA también puede optimizar la selección del tratamiento al identificar a los pacientes que se beneficiarían de intervenciones específicas, evitando procedimientos innecesarios y mejorando los resultados (Qaderi et al., 2025).

Adicionalmente, la evaluación clínica de la fertilidad masculina puede verse afectada por sesgos y errores debido a la interpretación subjetiva de factores como la concentración, motilidad y morfología de los espermatozoides, así como a errores humanos y variaciones entre los técnicos. Para abordar estos desafíos, en las últimas décadas se ha implementado el análisis de semen asistido por computadora (CASA), una tecnología que utiliza cámaras y software avanzados para evaluar parámetros microscópicos del semen y proporcionar resultados precisos y objetivos (Finelli et al., 2021; Ghayda et al., 2024).

Desarrollado en la década de 1980 gracias a la digitalización de imágenes, el CASA se diseñó para aumentar la velocidad y objetividad en la medición de la concentración y motilidad de los espermatozoides, siendo una de las primeras aplicaciones de inteligencia artificial en medicina (Finelli et al., 2021). Los sistemas CASA permiten evaluar la cinemática y la hiperactivación de los espermatozoides con precisión, tal como lo recomienda el manual de laboratorio de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 2021. Su uso es más objetivo y reproducible que la evaluación manual y ofrece ventajas en la predicción de resultados de fecundación in vitro al evaluar parámetros cinemáticos junto con el recuento de espermatozoides (Ghayda et al., 2024).

Actualmente, hay varios sistemas CASA disponibles en el mercado. Algunos ejemplos incluyen:

- El analizador de clase de esperma (SCA) de Microptics SL (Barcelona, España), que mide la concentración y motilidad del semen mediante el procesamiento de imágenes obtenidas por microscopía de contraste de fases.
- El SQA-V GOLD de Medical Electronic Systems (Los Ángeles, California, EE.UU.), que utiliza tecnología electroóptica para rastrear la concentración y motilidad de los espermatozoides
- Los sistemas IVOS y CEROS de Hamilton-Thorne (Beverly, Massachusetts, EE. UU.), que son sistemas de procesamiento de imágenes equipados con un microscopio y una cámara para evaluar parámetros seminales (Finelli et al., 2021).



Fig. 5: Representación gráfica de los sistemas CASA más utilizados en los laboratorios de Andrología. MES, Sistemas Electrónicos Médicos; SCA, Analizador de Clase de Espermatozoides; SQA, Analizador de Calidad de Espermatozoides. Finelli et al., 2021.

Sin embargo, a pesar de los avances, el CASA enfrenta ciertas limitaciones que impiden su implementación rutinaria en todos los laboratorios y casos. Una revisión sistemática encontró una alta correlación entre los resultados obtenidos manualmente y los obtenidos con CASA en cuanto a concentración y motilidad espermáticas, pero solo en muestras con concentraciones promedio de espermatozoides (entre 15 y 60 millones/mL) (Finelli et al., 2021). La evaluación de la morfología de los espermatozoides sigue siendo un desafío debido a la complejidad de las anomalías y los diferentes sistemas de clasificación (Naik et al., 2024).

Además, la presencia de residuos, partículas y células no espermáticas en las muestras, así como las diferencias entre los instrumentos CASA, pueden contribuir a la variabilidad en los resultados, especialmente en muestras con concentraciones bajas o altas de espermatozoides y en la evaluación de la morfología debido a la heterogeneidad de las muestras. Esto representa una limitación importante, especialmente en casos de oligozoospermia, definida como una concentración de espermatozoides inferior a 15 millones/mL (Finelli et al., 2021; Naik et al., 2024).

Para superar estos obstáculos, la tecnología de microscopía óptica con inteligencia artificial (AIOM) podría ser clave en el futuro. Las redes de aprendizaje profundo (DL) actuales son mucho más avanzadas que las primeras tecnologías, con cientos de capas y miles de millones de nodos que pueden procesar grandes cantidades de datos de manera eficiente. Estas tecnologías podrían permitir a los sistemas CASA "aprender" a clasificar correctamente la morfología de los espermatozoides y mejorar la precisión y confiabilidad del análisis de semen (Ghayda et al., 2024). Aunque se requieren más investigaciones para determinar su eficacia, los métodos de inteligencia artificial podrían ser fundamentales para estandarizar y mejorar la eficiencia del análisis de semen, reduciendo la variabilidad y brindando resultados más confiables para el tratamiento de pacientes con problemas de infertilidad (Naik et al., 2024).

Como conclusión, dado el enorme potencial que ofrece la IA en el campo de la reproducción humana asistida, este trabajo se centra en revisar las posibles aplicaciones de la IA en el estudio de la infertilidad masculina, con el propósito de identificar oportunidades y desafíos en su integración clínica.

2. OBJETIVOS

Evaluar de manera integral el papel de la inteligencia artificial en la infertilidad masculina, considerando sus aplicaciones diagnósticas y terapéuticas, su impacto en la reproducción asistida y los desafíos éticos y clínicos asociados a su implementación.

- Analizar las posibles aplicaciones de la inteligencia artificial en el campo de la andrología, abarcando desde el análisis seminal hasta técnicas más avanzadas de diagnóstico y tratamiento.
- Evaluar los avances en el uso de IA para la selección espermática en técnicas de reproducción asistida, como FIV e ICSI, identificando modelos que mejoren la tasa de éxito reproductivo.
- Revisar las limitaciones éticas, técnicas y clínicas que plantea la incorporación de la IA en el estudio de la infertilidad masculina.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una búsqueda exhaustiva en las bases de datos PubMed, Scopus y Google Scholar, utilizando términos de búsqueda específicos relacionados con el tema objeto de la revisión, tales como “artificial intelligence”, “male infertility”, “traditional diagnosis”, “machine learning” y “CASA”. La búsqueda se realizó entre abril y julio de 2025, estableciéndose los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos publicados entre 2015 y 2025	Publicaciones anteriores a 2015
Estudios en inglés o español	Estudios en otros idiomas sin traducción disponible
Estudios centrados en la infertilidad masculina	Investigaciones exclusivas sobre infertilidad femenina
Publicaciones sobre aplicaciones de IA en andrología o reproducción asistida	Estudios sin relación directa con IA o sin aplicación práctica en infertilidad masculina
Revisiones sistemáticas, revisiones narrativas, metaanálisis y estudios originales	Artículos sin base empírica o sin relevancia clínica o técnica significativa

Tabla 3: Criterios de inclusión y exclusión de artículos para la elaboración del trabajo.

Aplicando los criterios descritos, se seleccionaron 22 artículos científicos que abordan diferentes aspectos relacionados con la IA y el estudio de la infertilidad masculina. Se llevó a cabo una

lectura crítica de los mismos, así como la extracción y categorización de contenidos relevantes para el trabajo.

Además, se utilizó el gestor de referencias bibliográficas Zotero, siendo las referencias citadas mediante el estilo APA (7^a edición).

4. RESULTADOS

4.1. Aplicaciones de la inteligencia artificial en andrología

Existen numerosas aplicaciones de la IA en el campo de la andrología, tales como el análisis de vídeos de esperma, el análisis de la morfología espermática, la selección de espermatozoides óptimos para ICSI o la predicción de la recuperación de espermatozoides a partir de biopsias testiculares. Además, también presenta utilidades en el manejo quirúrgico de enfermedades andrológicas, como la cirugía asistida por realidad aumentada o la cirugía robótica de fertilidad para la infertilidad masculina (Kobayashi, 2024; Ghayda et al., 2024).

4.1.1. Inteligencia artificial en el análisis de semen

El análisis de semen es una prueba diagnóstica fundamental para la infertilidad masculina, pero la mayoría de los parámetros espermáticos se calculan manualmente, lo que puede ser un proceso lento y propenso a errores. La evaluación manual requiere una larga capacitación y es altamente subjetiva, lo que puede llevar a la variabilidad interobservador y al error humano (Ghayda et al., 2024).

La IA puede superar estos obstáculos y mejorar la precisión y eficiencia del análisis de semen.

Puede ser utilizada para evaluar la motilidad y concentración de los espermatozoides, que son marcadores de diagnóstico importantes en la evaluación de la infertilidad. Se han desarrollado métodos de IA que han mostrado resultados rápidos y consistentes, pudiendo superar a los métodos tradicionales en

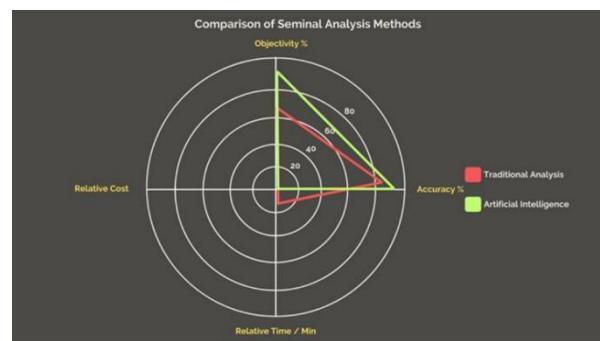


Fig. 6: Comparación de los métodos de análisis de semen tradicionales con aquellos basados en modelos de IA en términos de objetividad, precisión, costo y tiempo. Gongora, 2025.

algunas métricas. Además, los modelos predictivos de IA pueden ser capaces de dilucidar la relación entre variables diversas, como factores de estilo de vida y parámetros hematológicos, y la calidad del semen. Algunos estudios han encontrado asociaciones significativas entre ciertos parámetros y la calidad del semen, lo que sugiere que la IA podría ser utilizada para asesorar a los pacientes sobre factores que pueden predecir la calidad del semen (Ghayda et al., 2024; Naik et al., 2024).

Así, mediante el empleo de algoritmos de visión artificial y aprendizaje profundo, la IA puede analizar imágenes de espermatozoides obtenidas a través de microscopios o sistemas de vídeo

digital y realizar varias tareas importantes.

Entre estas tareas se incluyen la identificación y segmentación de espermatozoides, que implica distinguir entre espermatozoides y otros elementos en la muestra, como glóbulos blancos o células epiteliales. La IA también puede cuantificar características morfológicas y de movimiento de los espermatozoides, proporcionando datos precisos sobre su forma, tamaño y movilidad (Góngora, 2025).

Además, la IA puede clasificar a los espermatozoides como normales o anormales según criterios morfológicos establecidos, o incluso predecir la probabilidad de éxito en la fecundación basándose en patrones identificados por redes neuronales. Cuando se entrena con grandes conjuntos de datos anotados por expertos, la IA puede alcanzar o superar la capacidad diagnóstica humana en aspectos específicos de la evaluación de espermatozoides (Góngora, 2025).

Esto permite una evaluación más precisa y eficiente de la fertilidad masculina, lo que puede ser beneficioso para el diagnóstico y tratamiento de problemas de fertilidad. La IA puede ayudar a los médicos y especialistas a tomar decisiones más informadas y precisas, lo que puede mejorar los resultados para los pacientes que buscan tratamiento para la infertilidad (Naik et al., 2024).

Los modelos clásicos de aprendizaje automático, como los árboles de decisión, las máquinas de vectores de soporte (SVM) y los bosques aleatorios, necesitan que un experto identifique y extraiga manualmente las características más importantes de los datos. En el análisis de esperma, esto significa que un especialista debe definir específicamente los atributos que se van a evaluar, como el tamaño y la forma de la cabeza del espermatozoide, la simetría de la pieza intermedia y otros parámetros morfológicos relevantes (Góngora, 2025).

Una vez que se han definido estas características, el algoritmo de aprendizaje automático puede aprender a relacionarlas con la variable objetivo, como clasificar a los espermatozoides como normales o anormales, o determinar si hay fragmentación del DNA. Sin embargo, el éxito de estos modelos depende en gran medida de la experiencia y habilidad del especialista en la selección de las características más relevantes y en la preparación adecuada de los datos (Góngora, 2025; Naik et al., 2024).

Esto significa que la calidad de los resultados obtenidos con estos modelos puede variar según la pericia del especialista y la calidad de los datos utilizados. La selección de características relevantes y el preprocessamiento de datos son pasos críticos que pueden afectar significativamente el rendimiento del modelo. Por lo tanto, es fundamental que los especialistas en aprendizaje automático trabajen en estrecha colaboración con expertos en el dominio para asegurarse de que los modelos sean precisos y efectivos (Góngora, 2025; Naik et al., 2024).

Por su parte, en el aprendizaje profundo, las redes neuronales convolucionales (CNN) realizan la extracción de características de manera automática y eficiente a través de múltiples capas. El

proceso comienza con la capa de entrada, que recibe la imagen original de un espermatozoide (Góngora, 2025).

A medida que la imagen pasa por las capas convolucionales y de agrupación, se aplican filtros para detectar patrones y características morfológicas importantes, como bordes y texturas. Estas capas permiten que la red neuronal aprenda a identificar características relevantes en la imagen.

Luego, las capas totalmente conectadas interpretan los patrones detectados y los traducen en probabilidades de pertenencia a ciertas clases, como espermatozoides normales o anormales. Finalmente, la capa de salida proporciona la clasificación final o la probabilidad de ciertas características, como la movilidad o la integridad estructural (Góngora, 2025).

Este enfoque ha demostrado ser altamente efectivo para detectar anomalías sutiles en la forma o movilidad de los espermatozoides que podrían pasar desapercibidas para el ojo humano.

Además, las redes neuronales son escalables y adaptables, lo que permite mejorar continuamente su rendimiento a medida que se incorporan más datos y se ajustan los parámetros del modelo (Góngora, 2025).

La capacidad de las CNN para aprender patrones complejos y detectar características importantes las hace ideales para aplicaciones en las que la precisión y la detección de patrones complejos son fundamentales. En el contexto del análisis de espermatozoides, esto puede ayudar a mejorar la precisión y eficiencia en la evaluación de la fertilidad masculina (Cherouveim et al., 2023; Naik et al., 2024).

Finalmente, la visión artificial también se aplica en el análisis de la motilidad de los espermatozoides de manera dinámica y precisa. Los algoritmos de seguimiento permiten rastrear la trayectoria de cada espermatozoide en un video y calcular parámetros importantes como la velocidad, la linealidad del movimiento y la frecuencia del batido flagelar. Con esta información, es posible clasificar los tipos de motilidad y predecir la probabilidad de una fecundación exitosa. Un ejemplo de esto es el uso de algoritmos de flujo óptico, que estiman el desplazamiento de píxeles en secuencias de video y permiten detectar movimientos sutiles (Góngora, 2025).

La IA se integra con estos algoritmos para clasificar los movimientos como adecuados o inadecuados para la reproducción, lo que proporciona una evaluación más precisa y objetiva de la motilidad espermática. Esto puede ser útil para evaluar la fertilidad masculina y predecir el éxito de la fecundación, lo que puede ayudar a los médicos y especialistas a tomar decisiones más informadas y precisas (Ghayda et al., 2024; Góngora, 2025).

La combinación de visión artificial y IA permite una evaluación más detallada y precisa de la motilidad espermática, lo que puede ser beneficioso para los pacientes que buscan tratamiento para la infertilidad. Al proporcionar una evaluación más objetiva y precisa, la IA puede ayudar a mejorar los resultados de la fecundación y aumentar las posibilidades de éxito en el tratamiento

de la infertilidad (Góngora, 2025).

4.1.1.1. *Movilidad espermática*

A pesar de que el análisis de espermatozoides asistido por computadora (CASA) es el estándar de referencia actual para evaluar la motilidad de los espermatozoides a nivel de muestra, éste tiene limitaciones en cuanto a la evaluación de la motilidad individual.

Recientes estudios han explorado alternativas para analizar la motilidad de los espermatozoides individuales, como el análisis del batido de cola, que puede proporcionar información valiosa sobre la motilidad y la calidad de los espermatozoides. La combinación de técnicas de imágenes holográficas de alta definición y alta resolución con plataformas microfluídicas ha permitido analizar patrones de batido de cola y rastrear espermatozoides individuales con alta precisión (Cherouveim et al., 2023).

Por otra parte, cabe destacar el desarrollo de herramientas innovadoras para evaluar la fertilidad masculina como Bemaner, una aplicación para teléfonos inteligentes diseñada para medir la motilidad de los espermatozoides en casa. Esta aplicación utiliza un algoritmo de IA de reconocimiento de imágenes para analizar videos de espermatozoides capturados por el usuario y proporciona resultados precisos sobre la concentración total y móvil de espermatozoides, así como el porcentaje de motorización (Gül et al., 2024; Tsai et al., 2020).

Los resultados del análisis de Bemaner han demostrado una fuerte correlación con las calificaciones ofrecidas por andrólogos experimentados, lo que sugiere que esta tecnología puede ser una herramienta útil para la detección de infertilidad masculina y la monitorización del tratamiento. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta aplicación no reemplaza una evaluación formal completa, que incluye la presencia de leucocitos, aglutinación de espermatozoides y otras pistas microscópicas de patología potencial (Gül et al., 2024; Tsai et al., 2020).

El sistema Bemaner es un ejemplo de cómo la tecnología de IA puede ser utilizada para mejorar la accesibilidad y la eficiencia en la evaluación de la fertilidad masculina. La aplicación utiliza un microscopio y módulos microfluídicos para capturar y analizar videos de espermatozoides, y el marco de procesamiento de datos puede ser actualizado y mejorado a medida que se recopilan más datos (Tsai et al., 2020).

4.1.1.2. *Morfología espermática*

La OMS establece criterios específicos para evaluar la morfología de los espermatozoides, que pueden ser utilizados para entrenar algoritmos de IA destinados a este propósito. Estos algoritmos, como las redes neuronales profundas y las máquinas de vectores de soporte (SVM), han demostrado ser efectivos en la evaluación de la morfología de los espermatozoides y pueden ser utilizados para estandarizar y agilizar el análisis de semen (Cherouveim et al., 2023).

Los investigadores han informado un alto rendimiento de estas redes en una variedad de tareas, incluida la clasificación de espermatozoides de diferentes especies, espermatozoides normales y espermatozoides bajo estrés, la clasificación de espermatozoides en diferentes categorías morfológicas y la predicción de resultados embriológicos y de embarazo (Cherouveim et al., 2023).

Estos algoritmos de IA pueden ser utilizados como complemento o incluso como mejora de los métodos ya existentes de análisis de semen. Las aplicaciones son innumerables, incluida la evaluación de la morfología de los espermatozoides mediante teléfonos móviles, lo que podría ser especialmente útil en entornos con recursos deficientes (Cherouveim et al., 2023; Naik et al., 2024).

Tecnología / Aplicación	Propósito	Tipo de IA / Método	Beneficio	Referencia
Evaluación de motilidad y concentración	Analizar parámetros espermáticos clave	Visión por computadora, algoritmos predictivos	Mayor precisión y eficiencia que métodos manuales	Ghayda et al., 2024; Naik et al., 2024
Identificación y segmentación de espermatozoides	Diferenciar espermatozoides de otras células	Aprendizaje profundo / CNN	Clasificación precisa y rápida de espermatozoides	Góngora, 2025
Clasificación morfológica	Clasificar espermatozoides normales o anormales	Redes neuronales, SVM	Mejora de diagnóstico y predicción de fertilidad	Cherouveim et al., 2023; Naik et al., 2024
Análisis de motilidad individual	Rastrear trayectoria y batido de cola	Visión artificial, flujo óptico	Evaluación precisa de motilidad y probabilidad de fecundación	Góngora, 2025; Cherouveim et al., 2023
Aplicaciones móviles (Bemaner)	Evaluar motilidad en casa	Reconocimiento de imágenes IA	Accesible y eficiente, correlación con especialistas	Gül et al., 2024; Tsai et al., 2020

Tabla 4: Aplicaciones de la IA en el análisis de semen.

4.1.2. Inteligencia artificial y selección de espermatozoides para técnicas de reproducción asistida

A pesar de que las técnicas de reproducción asistida emplean espermatozoides individuales para fertilizar óvulos, aún no hay un método ampliamente aceptado para elegir los gametos masculinos más funcionales. Un método óptimo de selección de espermatozoides para estas técnicas debería ser mínimamente invasivo, económicamente viable y capaz de identificar espermatozoides de alta calidad, lo que a su vez debería traducirse en tasas de éxito elevadas y consistentes en embarazos y nacimientos (Ghayda et al., 2024).

La aplicación de tecnologías de IA y DL en la selección de espermatozoides para la fecundación in vitro (FIV) y la inyección intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI) es muy prometedora. El análisis tradicional de la morfología espermática tiene limitaciones debido a la variabilidad en la evaluación entre observadores, pero la IA puede ofrecer una solución más precisa y eficiente. Un estudio reciente evaluó un software de selección de espermatozoides que utiliza IA

comparándolo con la selección realizada por embriólogos experimentados. Los resultados mostraron que tanto la IA como los embriólogos lograron resultados similares en la selección de espermatozoides de alta calidad. Esto sugiere que la IA está alcanzando un nivel de predicción comparable al de los expertos humanos. Además, el uso de IA podría reducir el sesgo y la variabilidad en la selección, al tiempo que optimiza el tiempo necesario para este proceso (Jiang et al., 2023; Naik et al., 2024).

Así, la IA puede reconocer espermatozoides con morfología óptima, clasificarlos según su movilidad y detectar características sutiles que pueden predecir problemas en el desarrollo y la salud embrionaria. La integración de IA con el análisis de video permite evaluar las diferencias en la motilidad de los espermatozoides con mayor precisión y rapidez, y puede incluso superar el rendimiento de los enfoques estándar en la clasificación de la motilidad. Además, un estudio reciente demostró que la IA puede predecir la fragmentación del ADN de los espermatozoides con una precisión moderada, lo que podría ser útil para mejorar la selección de espermatozoides y optimizar las tasas de fecundación y desarrollo del embrión (Jiang et al., 2023).

Por otra parte, un sistema de IA puede ser entrenado para predecir las probabilidades de éxito de la inyección intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI) teniendo en cuenta diversos factores, como la calidad del semen, la edad y el estado de salud del paciente, así como su historial de tratamientos de fertilidad anteriores. Al analizar una amplia variedad de parámetros, el sistema podría ofrecer una evaluación detallada y determinar en qué casos sería más adecuado aplicar la ICSI, lo que permitiría optimizar su uso y evitar procedimientos innecesarios (Sengupta et al., 2024).

4.1.3. Inteligencia artificial en el manejo de las cirugías andrológicas

La inteligencia artificial también puede ser fundamental en las cirugías andrológicas. Un ejemplo es el uso de modelos de aprendizaje automático (ML) guiados por algoritmos de IA para predecir los resultados quirúrgicos. En un estudio realizado por Ory et al, se utilizó un modelo de ML que analizó datos preoperatorios de análisis hormonales, clínicos y de esperma para predecir con éxito una mejora significativa en los parámetros espermáticos después de una varicocelectomía. Además, se han realizado intentos para predecir la recuperación de espermatozoides en pacientes con azoospermia no obstructiva (NOA) sometidos a microdissección testicular de espermatozoides (mTESE) utilizando técnicas de IA. Esto sugiere que la IA puede ser una herramienta valiosa para mejorar la planificación y los resultados de las cirugías andrológicas (Gül et al., 2024).

La azoospermia no obstructiva (NOA) es una forma grave de infertilidad masculina que se caracteriza por la ausencia de espermatozoides en el semen debido a problemas en los testículos. Esta condición puede ser devastadora para las parejas que desean tener hijos biológicos. Sin embargo, existen tratamientos eficaces para abordar esta condición, como la microdissección

testicular de espermatozoides (m-TESE), un procedimiento quirúrgico que implica una exploración minuciosa de los testículos para encontrar y extraer espermatozoides que puedan utilizarse para la fecundación in vitro (Jamalirad et al., 2024).

Aunque la m-TESE ha demostrado ser muy exitosa en la recuperación de espermatozoides, con tasas de éxito que alcanzan hasta el 64% para los casos elegibles, no todos los procedimientos tienen éxito. Esto puede suponer una carga física, emocional y económica para los pacientes.

Por lo tanto, predecir con precisión el éxito de la m-TESE es fundamental para el manejo eficaz de la NOA (Jamalirad et al., 2024).

La inteligencia artificial puede ser de gran ayuda en este sentido. Los modelos predictivos de IA pueden analizar diversos factores, como datos clínicos, niveles hormonales e información genética, para predecir el éxito de la recuperación de espermatozoides. Al integrar estos factores, los modelos de IA pueden optimizar la toma de decisiones y mejorar los resultados de los pacientes, reduciendo el número de procedimientos fallidos (Jamalirad et al., 2024).

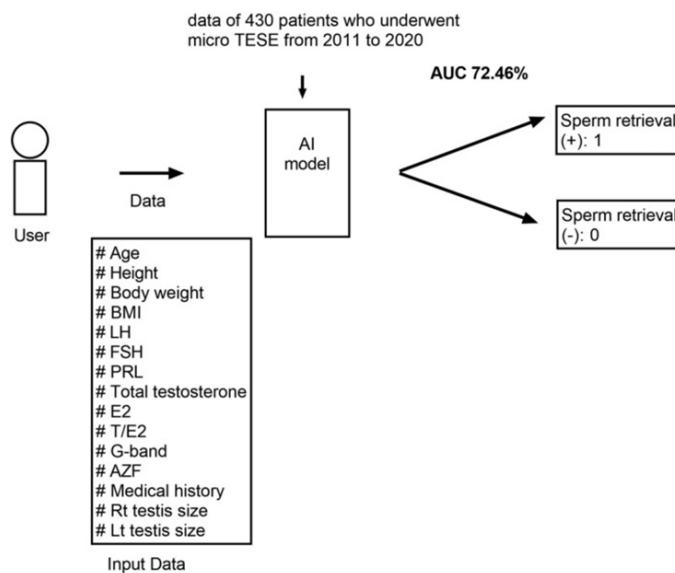


Fig. 7: Modelo de IA para predecir la recuperación de espermatozoides en pacientes con NOA antes de someterse a micro-TESE. Se utilizaron datos de 430 pacientes y se analizaron varios parámetros clínicos y hormonales. El modelo de IA alcanzó una precisión aceptable y determinó que la relación entre testosterona y estradiol (T/E2) era el factor más importante para predecir la recuperación de espermatozoides. Kobayashi, 2024.

La NOA puede ser causada por varios factores, incluyendo causas adquiridas como la criptorquidia y exposición a quimioterapia gonadotóxica o radiación pélvica, así como causas genéticas como el síndrome de Klinefelter y las microdelecciones del cromosoma Y. Los modelos predictivos de IA pueden ayudar a identificar a los pacientes que tienen más probabilidades de beneficiarse de la m-TESE (Jamalirad et al., 2024).

Además, la evaluación de la histología testicular es un criterio de valoración importante en el abordaje del paciente azoospérmico. Se verifica el estado del testículo mediante la recolección de una muestra de tejido testicular en la TESE, donde la escala de Johnsen evalúa el potencial

espermatozógeno que varía de 1 a 10 puntos. Las escalas de Johnsen se determinan mediante exámenes patológicos. Sin embargo, el tiempo que tardan los pacientes en conocer el resultado no solo supone una carga emocional para ellos, sino que también dificulta los planes de tratamiento (Kobayashi, 2024).

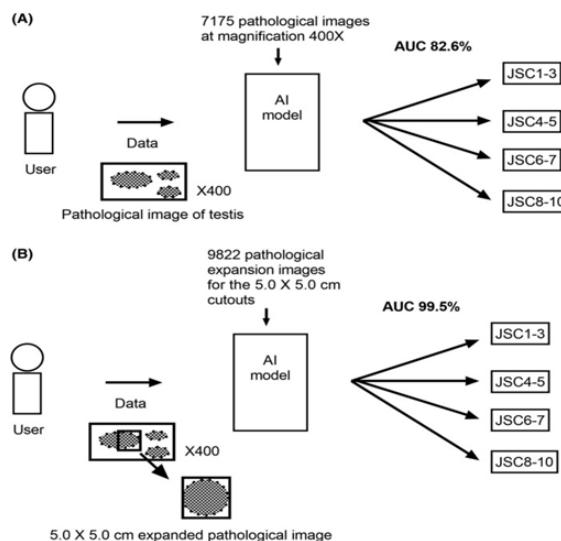


Fig. 8: Algoritmo basado en IA para predecir las puntuaciones de Johnsen. Se definieron cuatro rangos para clasificar las puntuaciones de Johnsen utilizando un enfoque de IA sin código : puntuación de Johnsen 1-3, 4-5, 6-7 y 8-10. Brevemente, se obtuvo un conjunto de datos de 7155 imágenes de tejido testicular con un aumento de 400X y se desarrolló un algoritmo basado en IA para evaluar las puntuaciones de Johnsen, con un área bajo la curva (AUC) del 82,6 %. También se obtuvo un conjunto de datos de 9822 imágenes de expansión para recortes de 5,0 X 5,0 cm y se desarrolló un algoritmo basado en IA para evaluar las puntuaciones de Johnsen, con un AUC del 99,5 %. Kobayashi, 2024.

Para abordar este desafío, se han desarrollado algoritmos de visión por computadora para clasificar las puntuaciones de Johnsen utilizando un enfoque de IA sin código. Estos algoritmos tienen el potencial de respaldar las evaluaciones de los patólogos y podrían usarse como una alternativa a la puntuación tradicional de Johnsen (Kobayashi, 2024).

Adicionalmente, el ML supervisado también se ha usado en el desarrollo de una calculadora de puntuación para identificar a pacientes con síndrome de Klinefelter entre pacientes azoospérmicos, con el fin de optimizar el diagnóstico y las pautas de tratamiento (Ghayda et al., 2024).

Además de las aplicaciones mencionadas, la IA muestra también un gran potencial en la evaluación preoperatoria y la planificación quirúrgica. Así, los modelos de ML pueden combinar datos clínicos, histológicos y hormonales para identificar a los pacientes con mayor probabilidad de éxito en la m-TESE, optimizando la selección de candidatos y reduciendo el riesgo de procedimientos fallidos (Jamalirad et al., 2024; Kobayashi, 2024).

La IA también puede ser útil en la interpretación de imágenes y datos histológicos, facilitando la estandarización de la puntuación de Johnsen y la detección de características relevantes de los túbulos seminíferos. De esta forma, los cirujanos pueden tomar decisiones más informadas sobre la técnica y el alcance de la cirugía, incluso antes de entrar al quirófano (Ghayda et al., 2024; Kobayashi, 2024).

En conclusión, todas estas aplicaciones reflejan que la IA tiene potencial para mejorar en gran medida la planificación quirúrgica, la toma de decisiones y la seguridad del paciente, convirtiéndose en un gran aliado en el manejo de la infertilidad masculina en este contexto.

Tecnología / Aplicación	Propósito en cirugía andrológica	Tipo de IA / Método	Beneficio principal	Referencias
Modelos de ML predictivos	Predecir éxito de varicocelectomía y m-TESE	Aprendizaje automático supervisado	Optimización de selección de pacientes, reducción de procedimientos fallidos	Gül et al., 2024; Jamalirad et al., 2024
Algoritmos de visión por computadora para histología	Clasificación de puntuaciones de Johnsen	Visión por computadora, IA sin código	Apoyo a patólogos, estandarización de evaluación testicular	Kobayashi, 2024
Calculadora ML para síndrome de Klinefelter	Identificación de pacientes azoospermáticos con Klinefelter	Aprendizaje supervisado	Optimización de diagnóstico y pautas de tratamiento	Ghayda et al., 2024
Modelos de análisis de imágenes y datos clínicos integrados	Predicción preoperatoria del éxito de m-TESE	ML combinado con análisis de imágenes	Mejora de la planificación quirúrgica y selección de candidatos	Jamalirad et al., 2024; Kobayashi, 2024

Tabla 5: Algunas de las aplicaciones de la IA en el manejo de las cirugías andrológicas.

4.2. Limitaciones y retos de la inteligencia artificial en andrología

A pesar del creciente entusiasmo por la aplicación de la inteligencia artificial en andrología, su implementación clínica aún enfrenta numerosas limitaciones y desafíos que deben ser cuidadosamente abordados antes de una adopción generalizada. La mayoría de los estudios actuales se encuentran en etapas exploratorias, con resultados prometedores pero aún poco estandarizados, lo cual limita su aplicabilidad directa en entornos reales de atención médica (Qaderi et al., 2025; Naik et al., 2024).

Uno de los principales retos es la falta de bases de datos amplias, diversas y bien anotadas. Muchos modelos de IA se entrena con conjuntos de datos limitados o procedentes de una única institución, lo que puede introducir sesgos y reducir su capacidad para generalizar en otras poblaciones o contextos clínicos (Gül et al., 2024; Kobayashi, 2024). Esta carencia afecta especialmente a áreas como el análisis de semen automatizado o la predicción de resultados en tratamientos de fertilidad asistida, donde las variaciones entre laboratorios y técnicas pueden ser significativas.

Además, existe una ausencia de estandarización en los métodos de validación de los modelos de IA, lo que dificulta la comparación entre estudios y su replicabilidad (Cherouveim et al., 2023; Ghayda et al., 2024). La mayoría de los algoritmos han sido evaluados en entornos controlados, sin pruebas rigurosas en cohortes independientes o ensayos clínicos multicéntricos, lo cual es fundamental para establecer su eficacia y seguridad.

Otra limitación importante es la interpretabilidad de los modelos. Muchos sistemas de IA, especialmente los basados en aprendizaje profundo, funcionan como "cajas negras", sin ofrecer explicaciones claras de cómo llegan a sus conclusiones. Esta falta de transparencia genera desconfianza entre los profesionales de la salud y dificulta su integración en la práctica clínica (Naik et al., 2024; Góngora, 2025).

Desde un punto de vista ético y legal, surgen también cuestiones relevantes relacionadas con la

protección de datos, el consentimiento informado y la responsabilidad médica ante errores o resultados inesperados generados por algoritmos (Ghayda et al., 2024). Además, se ha señalado la necesidad de establecer marcos regulatorios claros que definen cómo deben desarrollarse, evaluarse y utilizarse estas herramientas dentro del ámbito médico.

Finalmente, el desbalance entre desarrollo tecnológico y formación clínica representa un obstáculo adicional. Muchos profesionales en andrología aún no disponen de formación específica en IA, lo que limita su comprensión y aceptación de estas tecnologías (Gül et al., 2024).

En conjunto, estos retos no invalidan el potencial transformador de la inteligencia artificial en andrología, pero subrayan la necesidad de un enfoque interdisciplinar, ético y regulado para garantizar su aplicación segura y efectiva.

Por último, en la tabla 6 se resumen las aplicaciones de la IA en andrología, sus beneficios y limitaciones.

Área de aplicación	¿Para qué se usa la IA?	Beneficios principales	Observaciones / Limitaciones	Fuentes
Diagnóstico de infertilidad masculina	Detectar causas como azoospermia sin procedimientos invasivos	Más rápido y menos doloroso	Aún en fase de prueba	Kobayashi (2024), Qaderi et al. (2025), Ghayda et al. (2024)
Análisis del semen	Contar espermatozoides, evaluar forma y movimiento	Más preciso y objetivo que análisis manual	Requiere equipos digitales específicos	Cherouveim et al. (2023), Gongora (2025), Ghayda et al. (2024)
Selección de espermatozoides para FIV/ICSI	Elegir automáticamente los mejores espermatozoides	Aumenta chances de embarazo en tratamientos	Tecnología aún poco difundida	Cherouveim et al. (2023), Ghayda et al. (2024), Naik et al. (2024)
Predicción del éxito en tratamientos de fertilidad	Estimar si un tratamiento puede funcionar con los datos del paciente	Apoya decisiones más personalizadas	Completa, no reemplaza, la opinión médica	Qaderi et al. (2025), Gül et al. (2024)
Detección de daño en el ADN del espermatozoide	Identificar alteraciones genéticas sin destruir la muestra	Permite elegir los espermatozoides más sanos	Tecnología emergente	Ghayda et al. (2024), Gongora (2025)
Evaluación de imágenes médicas (biopsias testiculares)	Analizar muestras para saber si hay espermatozoides recuperables	Evita procedimientos innecesarios	Requiere buena calidad de imágenes	Kobayashi (2024), Ghayda et al. (2024)
Apoyo general al médico	Organizar datos del paciente, sugerir diagnósticos o tratamientos	Ahorra tiempo y reduce errores potenciales	Siempre debe supervisarlo el médico	Naik et al. (2024), Gül et al. (2024)

Tabla 6: Resumen de las aplicaciones de la IA en andrología.

5. ARGUMENTACIÓN CRÍTICA

La infertilidad masculina representa un reto clínico significativo que afecta a millones de parejas en todo el mundo, y cuya etiología sigue siendo multifactorial y, en muchos casos, idiopática. En este contexto, la inteligencia artificial ha emergido como una herramienta innovadora con el potencial de transformar el enfoque diagnóstico y terapéutico de esta condición. A lo largo de este trabajo se ha analizado el papel de la IA en distintas fases del estudio andrológico, identificando tanto sus contribuciones actuales como las barreras que aún limitan su aplicación clínica.

En primer lugar, uno de los campos con mayor desarrollo ha sido el análisis de semen asistido

por IA, utilizando algoritmos de visión por computadora y redes neuronales convolucionales para mejorar la evaluación de parámetros espermáticos como la movilidad, morfología y concentración. Estas herramientas han demostrado ser más rápidas, objetivas y reproducibles que las técnicas manuales tradicionales, sujetas a la variabilidad interobservador (Ghayda et al., 2024; Góngora, 2025). Además, el uso de la IA ha permitido detectar patrones sutiles no perceptibles por el ojo humano, lo que puede abrir nuevas vías en la identificación de biomarcadores digitales de fertilidad masculina.

Un segundo ámbito destacado es el de la selección espermática, donde los algoritmos de IA han sido aplicados para identificar espermatozoides con mayor potencial fecundante, especialmente en contextos como la inyección intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI). Estudios como el de Cherouveim et al. en 2023 han revisado sistemáticamente modelos que combinan imágenes de alta resolución con análisis algorítmico, lo que ha resultado en una mejora en las tasas de fecundación y desarrollo embrionario, si bien estos avances aún no se han traducido de forma uniforme en mejores tasas de embarazo clínico o nacidos vivos.

Asimismo, los sistemas de IA también han sido empleados en modelos predictivos de éxito reproductivo en técnicas de fecundación in vitro (FIV) y en el pronóstico de tratamientos basados en datos clínicos, seminales y hormonales (Qaderi et al., 2025; Naik et al., 2024). Estos modelos permiten una estimación personalizada de la probabilidad de éxito, lo que podría facilitar la toma de decisiones tanto para el médico como para las parejas, optimizando recursos y evitando tratamientos innecesarios.

La IA también está empezando a desempeñar un papel importante en la interpretación de imágenes médicas aplicadas a la andrología, apoyando la detección de anomalías estructurales o inflamatorias que pueden estar asociadas a infertilidad (Gül et al., 2024; Ghayda et al., 2024). Esta capacidad diagnóstica avanzada podría ser clave en la evaluación de pacientes con azoospermia, varicocele u otras causas anatómicas.

No obstante, y a pesar del potencial evidente de estas tecnologías, existen importantes limitaciones que deben ser consideradas. En primer lugar, gran parte de la investigación actual se basa en estudios de prueba de concepto o en cohortes retrospectivas, con muestras pequeñas y poco heterogéneas. Esta falta de validación externa y de estandarización dificulta la generalización de los resultados y plantea dudas sobre su aplicabilidad en contextos clínicos reales (Kobayashi, 2024; Qaderi et al., 2025).

Además, la mayoría de los modelos de IA empleados en andrología presentan una baja interpretabilidad. En otras palabras, no siempre es posible comprender cómo el sistema ha llegado a una determinada conclusión o predicción, lo que puede generar desconfianza entre los profesionales sanitarios y limitar su integración en la práctica clínica diaria (Naik et al., 2024; Góngora, 2025). Este es un aspecto especialmente relevante en medicina, donde el juicio clínico

y la toma de decisiones deben poder justificarse ante los pacientes y otros profesionales.

Desde el punto de vista ético y legal, el uso de IA en salud reproductiva plantea cuestiones sensibles, como la privacidad de los datos biomédicos, la necesidad de consentimiento informado para el uso de datos en el entrenamiento de algoritmos, o la responsabilidad médica ante decisiones basadas en recomendaciones algorítmicas (Ghayda et al., 2024). La falta de una normativa específica y armonizada en torno al uso de IA en medicina reproductiva puede constituir una barrera significativa para su implantación efectiva.

Por otro lado, también se ha identificado un desajuste entre el ritmo de desarrollo tecnológico y la formación del personal sanitario. Muchos andrólogos, embriólogos y urólogos no cuentan aún con competencias suficientes en inteligencia artificial o análisis de datos, lo que puede generar una brecha en la adopción e interpretación crítica de estas tecnologías (Gül et al., 2024).

La investigación en IA médica debería estar liderada por profesionales médicos, ya que solo ellos pueden comprender las necesidades específicas y emitir juicios exhaustivos para determinar las enfermedades que se pueden tratar con IA. Aunque los ingenieros de IA pueden crear modelos de clasificación de imágenes, no pueden deducir las necesidades clínicas específicas (Kobayashi, 2024).

En definitiva, la inteligencia artificial constituye una herramienta prometedora para mejorar la precisión diagnóstica, la personalización de tratamientos y la eficiencia en la atención a la infertilidad masculina. Sin embargo, su aplicación clínica todavía requiere superar retos importantes relacionados con la calidad de los datos, la validación de modelos, la transparencia algorítmica, las cuestiones éticas y la capacitación de los profesionales. En última instancia, el desarrollo de sistemas de IA robustos, transparentes, regulados y centrados en el paciente será clave para que estas tecnologías puedan consolidarse como una verdadera revolución en la andrología moderna.

6. CONCLUSIONES

- La IA es una herramienta prometedora en el estudio de la infertilidad masculina.
- Mejora la precisión del análisis seminal y la selección espermática en FIV e ICSI.
- Los modelos predictivos ayudan a personalizar los tratamientos y estimar el éxito reproductivo.
- Persisten retos importantes: datos limitados, falta de validación y cuestiones éticas.
- Si se desarrolla de forma regulada y transparente, la IA puede transformar la andrología moderna.

7. BIBLIOGRAFÍA

Agarwal, A., Mulgund, A., Hamada, A., & Chyatte, M. R. (2015). A unique view on male infertility around the globe. *Reproductive Biology and Endocrinology: RB&E*, 13, 37. <https://doi.org/10.1186/s12958-015-0032-1>

Babakhanzadeh, E., Nazari, M., Ghasemifar, S., & Khodadadian, A. (2020). Some of the factors involved in male infertility: A prospective review. *International Journal of General Medicine*, 13, 29–41. <https://doi.org/10.2147/IJGM.S241099>

Barratt, C. L. R., Björndahl, L., De Jonge, C. J., Lamb, D. J., Osorio Martini, F., McLachlan, R., Oates, R. D., van der Poel, S., St John, B., Sigman, M., Sokol, R., & Tournaye, H. (2017). The diagnosis of male infertility: An analysis of the evidence to support the development of global WHO guidelines—Challenges and future research opportunities. *Human Reproduction Update*, 23(6), 660–680. <https://doi.org/10.1093/humupd/dmx021>

Calogero, A. E., Cannarella, R., Agarwal, A., Hamoda, T. A. A. A. M., Rambhatla, A., Saleh, R., ... & Shah, R. (2023). The renaissance of male infertility management in the golden age of andrology. *The World Journal of Men's Health*, 41(2), 237.

Carini, C., & Seyhan, A. A. (2024). Tribulations and future opportunities for artificial intelligence in precision medicine. *Journal of Translational Medicine*, 22(1), 411. <https://doi.org/10.1186/s12967-024-05067-0>

Cherouveim, P., Velmahos, C., & Bormann, C. L. (2023). Artificial intelligence for sperm selection—A systematic review. *Fertility and Sterility*, 120(1), 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2023.05.157>

Crossnohere, N. L., Elsaied, M., Paskett, J., Bose-Brill, S., & Bridges, J. F. P. (2022). Guidelines for artificial intelligence in medicine: Literature review and content analysis of frameworks. *Journal of Medical Internet Research*, 24(8), e36823. <https://doi.org/10.2196/36823>

Dai, Y., Liu, J., Yuan, E., Li, Y., Shi, Y., & Zhang, L. (2022). Relationship among traditional semen parameters, sperm DNA fragmentation, and unexplained recurrent miscarriage: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Endocrinology*, 12, 802632. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.802632>

Finelli, R., Leisegang, K., Tumallapalli, S., Henkel, R., & Agarwal, A. (2021). Validity and reliability of computer-aided semen analyzers for semen analysis: A systematic review.

Ghayda, R. A., Cannarella, R., Calogero, A. E., Shah, R., Rambhatla, A., Zohdy, W., Kavoussi, P., Avidor-Reiss, T., Boitrelle, F., Mostafa, T., Saleh, R., Toprak, T., Birowo, P., Salvio, G., Calik, G., Kuroda, S., Kaiyal, R. S., Ziouziou, I., Crafa, A., Phuoc, N. H. V., ... Foro Global de Andrología. (2024). Artificial intelligence in andrology: From semen analysis to imaging diagnosis. *The World Journal of Men's Health*, 42(1), 39–61. <https://doi.org/10.5534/wjmh.230050>

Gongora, A. (2025). A new perspective on sperm analysis through artificial intelligence: The path toward personalized reproductive medicine. *Annals of Clinical Medicine and Case Reports*, 14(11), 1–10.

Gül, M., Russo, G. I., Kandil, H., Boitrelle, F., Saleh, R., Chung, E., Kavoussi, P., Mostafa, T., Shah, R., & Agarwal, A. (2024). Male infertility: New developments, current challenges, and future directions. *The World Journal of Men's Health*, 42(3), 502–517. <https://doi.org/10.5534/wjmh.230232>

Infertilidad, www.who.int

Jamalirad, H., Jajroudi, M., Khajehpour, B., Sadighi Gilani, M. A., Eslami, S., Sabbaghian, M., & Vakili Arki, H. (2024). AI predictive models and advancements in microdissection testicular sperm extraction for non-obstructive azoospermia: A systematic scoping review. *Human Reproduction Open*, 2025(1), hoae070. <https://doi.org/10.1093/hropen/hoae070>

Jiang, V. S., & Bormann, C. L. (2023). Artificial intelligence in the in vitro fertilization laboratory: A review of advancements over the last decade. *Fertility and Sterility*, 120(1), 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2023.05.149>

Kobayashi, H. (2024). Potential for artificial intelligence in medicine and its application to male infertility. *Reproductive Medicine and Biology*, 23(1), e12590. <https://doi.org/10.1002/rmb2.12590>

Leslie, S. W., Soon-Sutton, T. L., & Khan, M. A. B. (2024). Male infertility. In *StatPearls*. StatPearls Publishing.

Liu, P. R., Lu, L., Zhang, J. Y., Huo, T. T., Liu, S. X., & Ye, Z. W. (2021). Application of artificial intelligence in medicine: An overview. *Current Medical Science*, 41(6), 1105–1115. <https://doi.org/10.1007/s11596-021-2474-3>

Motawi, A., Crafa, A., Hamoda, T., Shah, R., & Agarwal, A. (2024). The andrological landscape in the 21st century: Understanding advances in male infertility management for busy clinicians. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(9), 1222. <https://doi.org/10.3390/ijerph21091222>

Naik, N., Roth, B., & Lundy, S. D. (2024). Artificial intelligence for clinical management of male infertility: A scoping review. *Current Urology Reports*, 26(1), 17. <https://doi.org/10.1007/s11934-024-01239-z>

Qaderi, K., Sharifpour, F., Dabir, M., Shams, R., & Behmanesh, A. (2025). Artificial intelligence (AI) approaches for male infertility in IVF: A mapping review. *European Journal of Medical Research*, 30(1), 246. <https://doi.org/10.1186/s40001-025-02479-6>

Sengupta, P., Dutta, S., Jegasothy, R., Slama, P., Cho, C. L., & Roychoudhury, S. (2024). “ICSI paradox” and “andrological ignorance”: AI in the Fourth Industrial Revolution to overcome blind spots. *Reproductive Biology and Endocrinology*, 22(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s12958-024-01193-y>

Tsai, V. F., Zhuang, B., Pong, Y. H., Hsieh, J. T., & Chang, H. C. (2020). Artificial intelligence and web-based image recognition for sperm motility analysis: Verification study. *JMIR Medical Informatics*, 8(11), e20031. <https://doi.org/10.2196/20031>