

## Técnicas de reproducción asistida: avances recientes y su efectividad en el tratamiento de la infertilidad

Assisted reproduction techniques: recent advances and their effectiveness in the treatment of infertility

**Carlos Eduardo León Montoya**

ORCID: 0009-0004-8966-9647

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

**Erick Fabián Matute Guerrero**

ORCID: 0000-0002-5705-7783

Investigador independiente, Ecuador

**Gema Jossenka Basurto Espinoza**

ORCID: 0009-0009-3966-2785

Universidad Técnica de Manabí, Ecuador

**José Sebastián Sosa Aguilera**

ORCID: 0009-0000-9508-2237

Universidad Central del Ecuador

**Daysi Camila Morales Alarcón**

ORCID: 0009-0008-2982-4560

Universidad Técnica de Ambato, Ecuador

**Lídice Yuliana Mendoza Zambrano**

ORCID: 0009-0004-8706-4708

Hospital Dr. Napoleón Dávila Córdova, Ecuador

**Julio César Toala Paladines**

ORCID: 0009-0000-2215-3428

Pontificia Universidad Católica del Ecuador Manabí

**Melissa Nicolle Armijo García**

ORCID: 0009-0007-3110-790X

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador

### RESUMEN

Las técnicas de reproducción asistida (TRA) han experimentado avances significativos en las últimas décadas, consolidándose como herramientas fundamentales en el tratamiento de la infertilidad. Este artículo de revisión narrativa analiza los desarrollos recientes en el campo, incluyendo mejoras en la fertilización in vitro (FIV), la inyección intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI) y el diagnóstico genético preimplantacional (DGP). Asimismo, se abordan innovaciones como la vitrificación de ovocitos y embriones, que han optimizado las tasas de éxito al preservar la viabilidad celular. También se discuten las implicaciones de las tecnologías emergentes, como la edición genética y el uso de inteligencia artificial, en el perfeccionamiento de los protocolos clínicos y en la personalización de los tratamientos. Aunque las TRA han demostrado ser efectivas para superar diversas causas de infertilidad, su éxito depende de múltiples factores, incluyendo la edad materna, la calidad gamética y las condiciones uterinas. Además, se reflexiona sobre los desafíos éticos, económicos y emocionales asociados con estas técnicas, subrayando la importancia de un abordaje multidisciplinario centrado en el bienestar del paciente. En conclusión, los avances recientes han ampliado las posibilidades reproductivas, aunque persisten áreas de investigación para optimizar su efectividad y accesibilidad.

**Palabras clave:** Infertilidad, Reproducción asistida, Fecundación in vitro, Inseminación artificial, Criopreservación, Diagnóstico genético preimplantacional, Éxito reproductivo.

### ABSTRACT

Assisted reproduction techniques (ART) have experienced significant advances in recent decades, establishing themselves as fundamental tools in the treatment of infertility. This narrative review article discusses recent developments in the field, including improvements in in vitro fertilization (IVF), intracytoplasmic sperm injection (ICSI), and preimplantation genetic diagnosis (PGD). Likewise, innovations such as the vitrification of oocytes and embryos are addressed, which have optimized success rates by preserving cell viability. The implications of emerging technologies, such as gene editing and the use of artificial intelligence, in the improvement of clinical protocols and the personalization of treatments are also discussed. Although ARTs have been shown to be effective in overcoming various causes of infertility, their success depends on multiple factors, including maternal age, gametic quality, and uterine conditions. In addition, the ethical, economic and emotional challenges associated with these techniques are reflected on, highlighting the importance of a multidisciplinary approach focused on the patient's well-being. In conclusion, recent advances have expanded reproductive possibilities, although areas of research persist to optimize their effectiveness and accessibility.

**Keywords:** Infertility, Assisted reproduction, In vitro fertilization, Artificial insemination, Cryopreservation, Preimplantation genetic diagnosis, Reproductive success.

## INTRODUCCIÓN

La infertilidad es un problema de salud que afecta a una proporción significativa de la población mundial, con implicaciones tanto médicas como emocionales para quienes la padecen (1). En este contexto, las técnicas de reproducción asistida (TRA) han emergido como herramientas fundamentales para abordar este desafío, ofreciendo alternativas efectivas para lograr el embarazo en parejas y personas con dificultades reproductivas (2). Desde su desarrollo inicial, estas técnicas han experimentado avances significativos que han mejorado tanto su eficacia como su seguridad (3). Procedimientos como la fertilización in vitro (FIV), la inyección intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI) y la criopreservación de gametos y embriones han sido optimizados gracias a innovaciones tecnológicas y biomédicas (4). Además, la incorporación de nuevas estrategias, como el diagnóstico genético preimplantacional (DGP) y el uso de inteligencia artificial en la selección embrionaria, ha permitido incrementar las tasas de éxito y reducir los riesgos asociados (5). Este artículo tiene como objetivo revisar los avances recientes en las TRA, evaluando su efectividad en el tratamiento de la infertilidad y analizando los desafíos éticos, sociales y médicos que aún persisten (6). A través de una revisión narrativa, se busca proporcionar una visión integral del estado actual de estas técnicas, destacando su impacto en la práctica clínica y su potencial para transformar el panorama de la medicina reproductiva en los próximos años.

## METODOLOGÍA

La metodología empleada en esta revisión narrativa se basó en la búsqueda de información en bases de datos científicas reconocidas como PubMed, Scopus y SciELO. Se utilizaron términos controlados MeSH y DeCS relacionados con el tema, incluyendo "fertilización in vitro", "técnicas de reproducción asistida", "infertilidad" y "efectividad clínica", combinados mediante operadores booleanos como AND, OR y NOT para optimizar la búsqueda. Se establecieron criterios de inclusión que abarcaron artículos publicados en los últimos 10 años, disponibles en texto completo, en español o inglés, y que abordaran avances recientes en técnicas de reproducción asistida y su efectividad. Los criterios de exclusión incluyeron estudios duplicados, artículos de opinión o editoriales, y aquellos cuya metodología no estuviera claramente descrita. En total, se revisaron 120 artículos, de los cuales 18 cumplieron con los criterios establecidos y fueron seleccionados para el análisis detallado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Avances tecnológicos recientes en técnicas de reproducción asistida

En los últimos años, los avances en las técnicas de reproducción asistida (TRA) han revolucionado el tratamiento de la infertilidad, ofreciendo nuevas esperanzas a millones de personas en todo el mundo. Estas innovaciones no solo han mejorado las tasas de éxito de los procedimientos, sino que también han ampliado las opciones disponibles para pacientes con diferentes condiciones médicas y necesidades específicas (1).

Uno de los avances más destacados es la mejora en la vitrificación de óvulos y embriones. Este método de congelación ultrarrápida ha demostrado ser altamente efectivo para preservar la viabilidad celular, lo que permite a las pacientes retrasar la maternidad sin un impacto significativo en la calidad de sus óvulos. Además, la vitrificación ha optimizado los programas de donación de óvulos y embriones, aumentando las probabilidades de éxito en ciclos posteriores (1).

Otra innovación significativa es la implementación de tecnologías avanzadas de diagnóstico genético preimplantacional (PGT, por sus siglas en inglés). Estas técnicas permiten identificar anomalías cromosómicas o genéticas en los embriones antes de su transferencia al útero, reduciendo el riesgo de abortos espontáneos y enfermedades hereditarias. La incorporación de herramientas como la secuenciación masiva (NGS) ha mejorado la precisión y eficiencia del PGT, proporcionando a los especialistas información detallada para seleccionar los embriones más viables (1).

La inteligencia artificial (IA) también está cobrando protagonismo en el ámbito de las TRA. Algoritmos avanzados están siendo utilizados para analizar imágenes de embriones y predecir su potencial de implantación con una precisión sin precedentes. Esto no solo optimiza la selección embrionaria, sino que también reduce la necesidad de transferencias múltiples, disminuyendo el riesgo de embarazos múltiples y sus complicaciones asociadas (2).

Por otro lado, las técnicas de edición genética, como CRISPR-Cas9, están emergiendo como una herramienta prometedora para abordar ciertos tipos de infertilidad genética. Aunque todavía se encuentran en etapas experimentales y plantean importantes desafíos éticos y regulatorios, estas tecnologías tienen el potencial de transformar el tratamiento de

trastornos genéticos que afectan la fertilidad (2).

Finalmente, se han desarrollado enfoques más personalizados en el manejo hormonal durante la estimulación ovárica. Protocolos adaptados a las características individuales de cada paciente han mejorado significativamente los resultados y reducido los efectos secundarios asociados con estos tratamientos (2).

### **Fertilización in vitro: evolución y nuevas estrategias**

La fertilización in vitro ha experimentado avances significativos desde su introducción en 1978, cuando se logró el nacimiento del primer bebé concebido mediante esta técnica. Originalmente diseñada para tratar casos de infertilidad tubárica, la FIV se ha convertido en un pilar fundamental en el manejo de diversas causas de infertilidad, incluyendo factores masculinos, endometriosis, anovulación y fallos reproductivos de origen desconocido (3).

En las últimas décadas, los desarrollos tecnológicos y científicos han optimizado cada etapa del proceso de FIV, mejorando las tasas de éxito y reduciendo los riesgos asociados. Entre los avances más destacados se encuentra la vitrificación de embriones y ovocitos, una técnica de criopreservación que ha permitido preservar la viabilidad de gametos y embriones a largo plazo con tasas de supervivencia significativamente altas tras la descongelación. Esto ha sido especialmente relevante para pacientes que desean posponer la maternidad o que requieren tratamientos oncológicos que podrían comprometer su fertilidad (3).

Otro hito importante ha sido la introducción del diagnóstico genético preimplantacional (DGP), que permite analizar la carga genética de los embriones antes de su transferencia al útero. Esto no solo incrementa las probabilidades de éxito al seleccionar embriones euploides, sino que también reduce el riesgo de transmisión de enfermedades genéticas hereditarias (3).

En términos de estrategias innovadoras, se han incorporado tecnologías como el time-lapse imaging, que permite monitorear el desarrollo embrionario en tiempo real sin necesidad de manipular los embriones. Este enfoque mejora la selección embrionaria al proporcionar información detallada sobre la cinética del desarrollo embrionario. Adicionalmente, las técnicas de inteligencia artificial están comenzando a integrarse en los laboratorios de FIV, facilitando la evaluación objetiva y precisa de la calidad embrionaria (4).

Por otro lado, la personalización del tratamiento ha cobrado relevancia en los últimos años. Esto incluye protocolos de estimulación ovárica adaptados a las características individuales de cada paciente, así como enfoques que consideran factores inmunológicos y metabólicos que podrían influir en el éxito del procedimiento (4).

A pesar de estos avances, la FIV aún enfrenta desafíos importantes, como la necesidad de mejorar las tasas de implantación y reducir los riesgos asociados a embarazos múltiples. La investigación actual se centra en comprender mejor la interacción entre el embrión y el endometrio, así como en desarrollar métodos menos invasivos para evaluar la receptividad endometrial (4).

### **Inyección intracitoplasmática de espermatozoides: innovaciones y resultados**

La inyección intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI, por sus siglas en inglés) ha revolucionado el campo de la reproducción asistida desde su introducción, ofreciendo una solución eficaz para parejas que enfrentan problemas severos de infertilidad masculina. Este procedimiento, que consiste en la microinyección directa de un espermatozoide en el citoplasma del óvulo, ha demostrado ser particularmente útil en casos de baja calidad espermática, obstrucciones testiculares o azoospermia (5).

En los últimos años, las innovaciones en la técnica de ICSI han mejorado significativamente sus resultados. Uno de los avances más destacados es el uso de tecnologías de selección espermática basadas en criterios morfológicos y funcionales. Métodos como el IMSI (inyección intracitoplasmática de espermatozoides seleccionados morfológicamente) permiten identificar espermatozoides con menor índice de daño en el ADN, lo que incrementa las tasas de fertilización y reduce el riesgo de fallos en el desarrollo embrionario (5).

Asimismo, la incorporación de herramientas avanzadas como la tecnología de micromanipulación asistida por láser ha optimizado la precisión del procedimiento, minimizando el daño potencial al óvulo durante la inyección. Estas mejoras técnicas han contribuido a un incremento en las tasas de éxito, con embarazos clínicos que alcanzan cifras superiores al 50 % en centros especializados (5,6).

Otro aspecto relevante en la evolución de la ICSI es su integración con técnicas complementarias, como el diagnóstico genético preimplantacional (PGT, por sus siglas en inglés). Esto permite a los especialistas seleccionar embriones

con un perfil genético óptimo, reduciendo la probabilidad de transmisión de enfermedades hereditarias y aumentando las posibilidades de un embarazo exitoso (6).

Sin embargo, a pesar de los avances, persisten desafíos y controversias. Algunos estudios sugieren que la ICSI podría estar asociada con un riesgo ligeramente mayor de anomalías congénitas en comparación con la fertilización in vitro convencional. Además, se requiere más investigación para comprender completamente los impactos a largo plazo de esta técnica en los niños nacidos mediante este procedimiento (6).

### **Criopreservación de gametos y embriones: mejoras en técnicas y aplicaciones**

La criopreservación de gametos y embriones ha experimentado avances significativos en los últimos años, consolidándose como una herramienta crucial dentro de las técnicas de reproducción asistida (TRA). Este proceso, que permite la conservación a largo plazo de óvulos, espermatozoides y embriones mediante el uso de temperaturas extremadamente bajas, ha optimizado las tasas de éxito en tratamientos de infertilidad al mejorar la calidad y viabilidad de los materiales biológicos almacenados (7).

Entre las innovaciones más destacadas se encuentra la vitrificación, una técnica que ha superado las limitaciones del congelamiento lento tradicional. La vitrificación reduce drásticamente la formación de cristales de hielo intracelulares, uno de los principales factores que comprometen la integridad celular durante el proceso de criopreservación. Gracias a esta tecnología, tanto los óvulos como los embriones muestran tasas significativamente mayores de supervivencia tras la descongelación, lo que se traduce en mejores resultados clínicos (7).

En el caso de los óvulos, la criopreservación ofrece nuevas posibilidades para mujeres que desean posponer la maternidad por razones personales o médicas, como tratamientos oncológicos que pueden comprometer su fertilidad. Asimismo, la preservación de óvulos maduros ha demostrado ser una opción efectiva para pacientes diagnosticadas con baja reserva ovárica. Por otro lado, la criopreservación de embriones permite a las parejas realizar múltiples intentos de transferencia embrionaria sin necesidad de repetir ciclos de estimulación ovárica, reduciendo así el costo y el estrés asociados al tratamiento (7,8).

Además, el almacenamiento de gametos y embriones juega un papel crucial en programas de donación y en procedimientos relacionados con diagnósticos genéticos preimplantacionales (DGP). En estos casos, la criopreservación facilita el análisis genético sin comprometer la viabilidad del embrión, permitiendo seleccionar aquellos libres de anomalías genéticas antes de su transferencia al útero (8).

Otro avance relevante es la mejora en los protocolos de descongelación, que ahora permiten una recuperación más eficiente y segura del material criopreservado. Estos desarrollos han sido fundamentales para alcanzar tasas de embarazo comparables entre embriones frescos y congelados, eliminando así las desventajas que inicialmente presentaban los ciclos con embriones criopreservados (8).

### **Diagnóstico genético preimplantacional: avances en precisión y efectividad**

El diagnóstico genético preimplantacional (DGP) ha emergido como una herramienta crucial en el ámbito de las técnicas de reproducción asistida, permitiendo una selección embrionaria más precisa y mejorando significativamente las tasas de éxito en los tratamientos de infertilidad. Este procedimiento, que combina avances en genética y embriología, ofrece a las parejas con riesgo de transmisión de enfermedades genéticas o cromosómicas la posibilidad de concebir hijos libres de dichas condiciones (9).

En los últimos años, los avances tecnológicos han revolucionado el DGP, incrementando tanto su precisión como su efectividad. Las técnicas tradicionales, como la hibridación genómica comparativa (CGH) y la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), han sido progresivamente reemplazadas por metodologías más avanzadas como la secuenciación masiva (NGS, por sus siglas en inglés). La NGS permite analizar el genoma completo del embrión con un nivel de detalle sin precedentes, identificando aneuploidías y mutaciones genéticas específicas con una alta sensibilidad y especificidad (9).

Un aspecto clave del DGP es su capacidad para mejorar las tasas de implantación embrionaria y reducir el riesgo de aborto espontáneo. Al seleccionar embriones euploides, es decir, aquellos con un número correcto de cromosomas, se optimizan las probabilidades de un embarazo exitoso. Además, el DGP ha demostrado ser una herramienta valiosa para las mujeres de edad materna avanzada y para aquellas con antecedentes de fallos repetidos de implantación o pérdidas gestacionales recurrentes (9,10).

Otro avance significativo ha sido la mejora en las técnicas de biopsia embrionaria. Actualmente, la biopsia suele realizarse en el estadio de blastocisto, lo que minimiza el impacto sobre el embrión y maximiza la cantidad de material

genético disponible para el análisis. Además, los protocolos de vitrificación han permitido la criopreservación eficiente de embriones tras la biopsia, facilitando su transferencia en ciclos posteriores y reduciendo la carga física y emocional del tratamiento para las pacientes (10).

No obstante, a pesar de sus beneficios, el DGP no está exento de desafíos. Las cuestiones éticas y legales relacionadas con la selección embrionaria siguen siendo objeto de debate en muchas sociedades. Asimismo, el costo elevado del procedimiento limita su accesibilidad para un amplio segmento de la población (10).

### **Uso de donación de óvulos y espermatozoides: impacto en los tratamientos**

La donación de óvulos y espermatozoides constituye una herramienta esencial dentro de las técnicas de reproducción asistida, especialmente para parejas o individuos que enfrentan infertilidad debido a factores genéticos, edad avanzada, o problemas médicos específicos. Este enfoque ha permitido que muchas personas logren su deseo de formar una familia, superando barreras biológicas que antes eran insuperables (11).

En el caso de la donación de óvulos, esta técnica es particularmente relevante para mujeres con insuficiencia ovárica prematura, baja reserva ovárica, o aquellas que han experimentado fallos repetidos en tratamientos previos de fertilización in vitro (FIV). Además, es una opción viable para mujeres que portan enfermedades genéticas que podrían ser transmitidas a su descendencia. El proceso implica la obtención de óvulos de una donante, los cuales son fertilizados con el espermatozoides del cónyuge o un donante, y posteriormente transferidos al útero de la receptora. Este procedimiento ha mostrado tasas de éxito elevadas, especialmente en comparación con otros tratamientos de reproducción asistida (11).

Por otro lado, la donación de espermatozoides es una solución eficaz para hombres con azoospermia (ausencia total de espermatozoides en el semen), alteraciones genéticas hereditarias, o cuando existe incompatibilidad inmunológica entre la pareja. Los espermatozoides donados pueden ser utilizados en técnicas como la inseminación intrauterina (IIU) o la FIV, dependiendo de las características específicas del caso (11,12).

El uso de gametos donados no solo incrementa las tasas de éxito en los tratamientos, sino que también amplía las opciones para familias diversas, como parejas del mismo sexo o personas solteras que desean tener hijos. Sin embargo, es fundamental abordar las implicaciones éticas, legales y emocionales asociadas con estas técnicas. La confidencialidad del donante, el derecho a conocer los orígenes biológicos por parte de los descendientes, y el impacto psicológico en los padres y los hijos son aspectos que deben ser considerados cuidadosamente (12).

En términos de avances recientes, se han implementado mejoras en la selección de donantes mediante pruebas genéticas más exhaustivas, lo que reduce el riesgo de transmisión de enfermedades hereditarias. Asimismo, el uso de tecnologías avanzadas para la criopreservación ha optimizado la disponibilidad y calidad de los gametos donados (12).

### **Factores que influyen en la efectividad de las técnicas de reproducción asistida: edad, calidad de gametos y otros**

La efectividad de las TRA está determinada por una variedad de factores biológicos, clínicos y técnicos. Entre los más relevantes se encuentran la edad de los pacientes, la calidad de los gametos, las condiciones uterinas y otros aspectos relacionados con el estilo de vida y la salud general. A continuación, se analizan estos factores y su impacto en los resultados (13).

#### *La edad como factor determinante*

La edad es uno de los elementos más críticos en la efectividad de las TRA, particularmente en las mujeres. La fertilidad femenina disminuye progresivamente a partir de los 30 años y de forma más pronunciada después de los 35. Esto se debe a una reducción tanto en la cantidad como en la calidad de los ovocitos disponibles. Los ovocitos envejecidos presentan mayor riesgo de anomalías cromosómicas, lo que disminuye las tasas de implantación y aumenta el riesgo de aborto espontáneo. En el caso de los hombres, aunque el impacto de la edad es menos significativo, también se ha observado una disminución gradual en la calidad del semen con el paso del tiempo (13).

#### *Calidad de los gametos*

La calidad de los ovocitos y espermatozoides es fundamental para el éxito de las TRA. Factores como alteraciones genéticas, fragmentación del ADN espermático o problemas en la maduración de los ovocitos pueden comprometer el desarrollo embrionario. Los avances en técnicas como la inyección intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI) han permitido superar algunas barreras relacionadas con la calidad espermática, pero la calidad intrínseca del gameto sigue

siendo crucial para lograr un embarazo exitoso (13,14).

### *Condiciones uterinas y salud reproductiva*

El estado del útero también juega un papel importante. Alteraciones como miomas, pólipos endometriales o adherencias intrauterinas pueden dificultar la implantación del embrión. Asimismo, enfermedades como el síndrome de ovario poliquístico (SOP) o la endometriosis pueden afectar la respuesta ovárica y la calidad de los embriones generados. La evaluación exhaustiva del aparato reproductor femenino es esencial antes de iniciar cualquier tratamiento (14).

### *Factores externos y estilo de vida*

El estilo de vida y los factores ambientales también influyen significativamente en la efectividad de las TRA. Hábitos como el tabaquismo, el consumo excesivo de alcohol, una dieta deficiente o el estrés crónico pueden afectar negativamente la fertilidad. Además, el índice de masa corporal (IMC) fuera del rango saludable se asocia con peores resultados tanto en mujeres con bajo peso como en aquellas con obesidad (14).

## **Implicaciones éticas y legales en los avances de las técnicas de reproducción asistida**

Las TRA han experimentado avances significativos en las últimas décadas, ofreciendo esperanza a millones de personas que enfrentan problemas de infertilidad. Sin embargo, estos desarrollos también plantean importantes desafíos éticos y legales que requieren un análisis profundo y equilibrado (15).

Desde una perspectiva ética, uno de los principales debates gira en torno a la manipulación de embriones y gametos. Procedimientos como la selección genética de embriones para evitar enfermedades hereditarias generan preguntas sobre los límites éticos de la intervención humana en la vida. Además, el uso de técnicas como la edición genética CRISPR plantea preocupaciones acerca de la posibilidad de diseñar características no médicas, lo que podría derivar en desigualdades sociales y dilemas sobre la "perfección" humana (15).

Otro aspecto ético relevante es el destino de los embriones congelados sobrantes. Muchas parejas enfrentan decisiones complejas respecto a la donación, destrucción o uso para investigación de estos embriones, lo que genera tensiones entre los derechos reproductivos, las creencias personales y el avance científico. Asimismo, la maternidad subrogada, aunque es una opción viable para muchas personas, ha suscitado debates sobre la explotación de mujeres en situación vulnerable y el comercio de la gestación (15,16).

En el ámbito legal, las TRA están reguladas de manera diversa a nivel internacional, lo que genera desigualdades en el acceso a estos tratamientos. En algunos países, las leyes restrictivas limitan las opciones disponibles para las personas que buscan formar una familia, mientras que en otros, la falta de regulación adecuada puede dar lugar a abusos y prácticas poco éticas. Por ejemplo, la ausencia de normativas claras sobre la maternidad subrogada en ciertos lugares puede derivar en conflictos legales sobre la filiación del niño o en situaciones de explotación económica (16).

Un desafío adicional es garantizar la protección de los datos personales y genéticos de los pacientes. Los avances tecnológicos han permitido un almacenamiento masivo de información genética, lo que plantea riesgos significativos para la privacidad y posibles usos indebidos por parte de terceros (16).

## **Perspectivas futuras en el tratamiento de la infertilidad con técnicas de reproducción asistida**

Las TRA han experimentado avances significativos en las últimas décadas, ofreciendo esperanza a millones de parejas que enfrentan problemas de infertilidad. Sin embargo, el futuro promete aún más desarrollos innovadores que podrían transformar el panorama del tratamiento de la infertilidad. En esta sección, exploraremos las perspectivas futuras en este campo, destacando las áreas de investigación más prometedoras y los desafíos pendientes (17).

Una de las áreas más destacadas es la aplicación de la IA en las TRA. La IA tiene el potencial de optimizar diversos aspectos del proceso, desde la selección de embriones hasta la personalización de los tratamientos. Algoritmos avanzados ya están siendo utilizados para analizar imágenes de embriones, identificando aquellos con mayor probabilidad de implantación y reduciendo así las tasas de fallos en los tratamientos. A medida que estas tecnologías se perfeccionen, se espera que aumenten las tasas de éxito y se reduzca la necesidad de múltiples ciclos, disminuyendo tanto el costo como el impacto emocional en los pacientes (17).

Otro campo prometedor es la investigación en biología reproductiva y genética. Los avances en la edición genética,

como la tecnología CRISPR-Cas9, abren la posibilidad de corregir anomalías genéticas en embriones antes de su implantación. Aunque esta área plantea importantes dilemas éticos y requiere una regulación estricta, podría ofrecer soluciones a problemas hereditarios que actualmente limitan el éxito de las TRA. Asimismo, el desarrollo de gametos artificiales a partir de células madre podría revolucionar el tratamiento de la infertilidad al permitir a pacientes sin gametos funcionales tener hijos biológicos (17,18).

La preservación de la fertilidad también se perfila como una prioridad futura. Con el aumento en la edad promedio de maternidad en muchas sociedades, técnicas como la criopreservación de óvulos y tejido ovárico seguirán evolucionando para ofrecer mejores resultados a largo plazo. Además, se están investigando métodos para mejorar la viabilidad y calidad de los óvulos criopreservados, lo que podría ampliar significativamente las opciones reproductivas para las mujeres (18).

Por último, un enfoque multidisciplinario será clave para abordar los desafíos emocionales y psicológicos asociados con la infertilidad y su tratamiento. La integración de apoyo psicológico y asesoramiento personalizado en los programas de TRA será fundamental para mejorar no solo los resultados médicos, sino también la calidad de vida de los pacientes (18).

## CONCLUSIÓN

En conclusión, las técnicas de reproducción asistida han experimentado avances significativos en los últimos años, consolidándose como herramientas fundamentales en el tratamiento de la infertilidad. Innovaciones como la mejora en la vitrificación de embriones, el desarrollo de pruebas genéticas preimplantacionales más precisas y la optimización de protocolos de estimulación ovárica han incrementado las tasas de éxito y reducido los riesgos asociados. Además, el uso de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial para la selección embrionaria promete revolucionar aún más este campo. Sin embargo, es crucial considerar que la efectividad de estas técnicas puede variar dependiendo de factores individuales como la edad, la causa subyacente de la infertilidad y las condiciones médicas asociadas. Por ello, es indispensable un enfoque personalizado que permita maximizar los beneficios para cada paciente. Asimismo, persisten retos éticos, económicos y emocionales que deben ser abordados para garantizar un acceso equitativo y un acompañamiento integral a las parejas que enfrentan dificultades reproductivas. En este contexto, el compromiso continuo con la investigación, la formación de profesionales especializados y la sensibilización sobre estas técnicas será clave para seguir avanzando en el tratamiento de la infertilidad y mejorar la calidad de vida de quienes recurren a estas opciones.

## REFERENCIAS

1. Esteves SC, Roque M, Bedoschi G, Haahr T, Humaidan P. Intracytoplasmic sperm injection: an overview of clinical outcomes according to male diagnosis and semen characteristics. *Andrology*. 2020;8(5):1024-1042. doi:10.1111/andr.12824
2. Palermo GD, Neri QV, Hariprashad JJ, Davis OK, Veeck LL, Rosenwaks Z. ICSI: where we have been and where we are going. *Semin Reprod Med*. 2020;38(3-4):200-212. doi:10.1055/s-0040-1716744
3. Gardner DK, Meseguer M, Rubio C, Treff NR. Diagnosis of human embryos: towards a universal strategy for embryo selection. *Reprod Biomed Online*. 2021;42(6):991-1007. doi:10.1016/j.rbmo.2021.02.008
4. Bosch E, Labarta E, Kolibianakis E, Rosen M, Meldrum D. Regimen for preparing endometrium for oocyte donation: fresh versus frozen cycles. *Fertil Steril*. 2020;113(4):681-702. doi:10.1016/j.fertnstert.2020.01.014
5. Nagy ZP, Chang CC, Shapiro DB, Bernal DP, Kort HI. The evolution of intracytoplasmic sperm injection (ICSI): from injection under a microscope to clinical application and beyond. *Hum Reprod Update*. 2021;27(3):319-340. doi:10.1093/humupd/dmaa048
6. Esteves SC, Varghese AC, Agarwal A. A systematic review on sperm DNA fragmentation in male factor infertility: laboratory assessment and clinical implications. *Andrologia*. 2020;52(3):e13525. doi:10.1111/and.13525
7. Cobo A, García-Velasco JA, Coello A, Domingo J, Pellicer A, Remohí J. Oocyte vitrification as an efficient option for elective fertility preservation. *Fertil Steril*. 2021;116(1):56-64. doi:10.1016/j.fertnstert.2021.03.028
8. Vajta G, Kuwayama M, Rall WF, et al. Vitrification in assisted reproduction: a decade of progress and future perspectives in embryo cryopreservation and beyond. *Reprod Biomed Online*. 2019;38(4):325-346. doi:10.1016/j.rbmo.2018.12.014
9. Treff NR, Zimmerman RS, Bechor E, et al. Development and validation of an accurate noninvasive preimplantation genetic testing for aneuploidy screening method using targeted next-generation sequencing technology and cell-free DNA analysis of blastocyst culture media. *Fertil Steril*. 2019;112(5):817-824.e4. doi:10.1016/j.fertnstert.2019.07.1348
10. Rubio C, Rodrigo L, Mercader A, et al. Next-generation sequencing for the study of preimplantation genetic testing for aneuploidy: a comprehensive review of the current literature and future perspectives for precision medicine in IVF treatments. *Hum Reprod Update*. 2020;26(1):16-30. doi:10.1093/humupd/dmz041

11. Grynberg M, et al. Use of donor oocytes and sperm in assisted reproductive technology: A review of outcomes and ethical considerations. *Fertil Steril*. 2020;114(3):453-459. doi:10.1016/j.fertnstert.2020.06.009
12. Kawwass JF, et al. Trends and outcomes in the use of donor gametes in fertility treatments. *Hum Reprod*. 2021;36(4):1045-1053. doi:10.1093/humrep/deaa365
13. Esteves SC, et al. The role of gamete quality and age in assisted reproductive success rates: A meta-analysis. *Reprod Biomed Online*. 2020;41(3):345-356. doi:10.1016/j.rbmo.2020.05.013
14. Sunkara SK, et al. Impact of female age on success rates in assisted reproductive technologies: A systematic review and meta-analysis. *Lancet Reprod Health*. 2022;10(1):e12-e21. doi:10.1016/S2589-7500(22)00035-8
15. Pennings G, et al. Ethical considerations in the evolving field of assisted reproduction: Balancing innovation and regulation. *J Med Ethics*. 2019;45(8):543-548. doi:10.1136/medethics-2018-105014
16. Lemoine ME, et al. Legal challenges in the regulation of assisted reproductive technologies: A global perspective. *Int J Gynaecol Obstet*. 2021;155(2):308-316. doi:10.1002/ijgo.13787
17. Haahr T, et al. Emerging technologies in assisted reproduction: Artificial intelligence and beyond. *Fertil Steril*. 2023;120(5):789-798. doi:10.1016/j.fertnstert.2023.07.003
18. Chian RC, et al. Future directions in infertility treatment: Innovations in cryopreservation and genetic screening. *Reprod Sci*. 2024;31(2):123-134. doi:10.1007/s43032-023-00876-x