



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v11i4.4546>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Aplicaciones de la biotecnología en la mejora de la fertilidad y reproducción asistida en cerdos

Applications of biotechnology in improving fertility and assisted reproduction in pigs

Aplicações da biotecnologia na melhoria da fertilidade e reprodução assistida em suínos

José Ignacio Cárdenas-Posligua^I
jose.cardenas2015@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0005-7060-7953>

Alex Adonis Guerrero-Quintana^{II}
alex.guerreroq2015@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0007-3048-5837>

Estefany Raquel Cadena-Simbaña^{III}
ercadenas96@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-9418-4257>

José Rafael Santana-Chávez^{IV}
jose.santana2014@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5249-9876>

Correspondencia: jose.cardenas2015@uteq.edu.ec

***Recibido:** 27 de agosto de 2025 ***Aceptado:** 18 de septiembre de 2025 * **Publicado:** 14 de octubre de 2025

- I. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- II. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- III. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- IV. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.

Resumen

El presente artículo tiene como objetivo analizar las principales aplicaciones de la biotecnología reproductiva en la mejora de la fertilidad y reproducción asistida en el cerdo, evaluando los avances alcanzados en técnicas como inseminación artificial (IA), fertilización in vitro (IVF), microinyección intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI), transferencia embrionaria no quirúrgica profunda, criopreservación y vitrificación. El estudio busca integrar los aportes científicos más recientes para identificar los factores técnicos y biológicos que limitan o potencian la eficiencia reproductiva porcina. Se realizó una revisión sistemática descriptiva basada en literatura científica indexada en PubMed, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink y Latindex, abarcando el período comprendido entre 2019 y 2025, aplicando combinaciones de descriptores controlados (MeSH y DeCS) y operadores booleanos relacionados con biotecnología reproductiva, fertilidad y especie porcina. La inseminación artificial se consolidó como la técnica más difundida y rentable, las técnicas de IVF y ICSI mostraron progresos en el desarrollo embrionario mediante optimización de medios de cultivo, activación ovocitaria y control de daño espermático; sin embargo, la eficiencia sigue siendo inferior respecto a otras especies domésticas. La transferencia embrionaria no quirúrgica profunda emergió como alternativa viable frente a la laparotomía, ofreciendo resultados reproductivos comparables cuando se utilizan embriones frescos o vitrificados. En el ámbito de la criopreservación, la vitrificación se destacó como la técnica más prometedora al minimizar el daño estructural celular, aunque persisten alteraciones moleculares y epigenéticas que afectan la viabilidad embrionaria, finalmente, se reconoce el potencial de la manipulación androgenética y la edición génica (CRISPR/Cas9) para modular la calidad espermática, resistencia a enfermedades y mejora genética controlada. En conclusión, la biotecnología reproductiva en cerdos ha experimentado una expansión significativa, pero aún enfrenta limitaciones derivadas de la fisiología específica de la especie, aunque con el empleo de estrategias integradas proyecta un futuro orientado hacia una reproducción más eficiente, sostenible y controlada genéticamente.

Palabras clave: Fertilidad animal; inseminación artificial; criopreservación embrionaria; biotecnología reproductiva porcina.

Abstract

This article aims to analyze the main applications of reproductive biotechnology in improving fertility and assisted reproduction in pigs, evaluating the advances achieved in techniques such as artificial

Aplicaciones de la biotecnología en la mejora de la fertilidad y reproducción asistida en cerdos

insemination (AI), in vitro fertilization (IVF), intracytoplasmic sperm injection (ICSI), non-surgical deep embryo transfer, cryopreservation, and vitrification. The study seeks to integrate the most recent scientific contributions to identify the technical and biological factors that limit or enhance reproductive efficiency in pigs. A descriptive systematic review was conducted based on scientific literature indexed in PubMed, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, and Latindex, covering the period from 2019 to 2025, applying combinations of controlled descriptors (MeSH and DeCS) and Boolean operators related to reproductive biotechnology, fertility, and the pig species. Artificial insemination has established itself as the most widespread and cost-effective technique. IVF and ICSI have shown progress in embryo development through optimization of culture media, oocyte activation, and control of sperm damage; however, their efficiency remains lower than that of other domesticated species. Non-surgical deep embryo transfer (DET) has emerged as a viable alternative to laparotomy, offering comparable reproductive outcomes when using fresh or vitrified embryos. In the field of cryopreservation, vitrification has emerged as the most promising technique, minimizing structural cellular damage, although molecular and epigenetic alterations that affect embryo viability persist. Finally, the potential of androgenetic manipulation and gene editing (CRISPR/Cas9) to modulate sperm quality, disease resistance, and controlled genetic improvement has been recognized. In conclusion, reproductive biotechnology in pigs has experienced significant expansion but still faces limitations derived from the species' specific physiology. However, with the use of integrated strategies, it projects a future oriented toward more efficient, sustainable, and genetically controlled reproduction.

Keywords: Animal fertility; artificial insemination; embryo cryopreservation; porcine reproductive biotechnology.

Resumo

Este artigo tem como objetivo analisar as principais aplicações da biotecnologia reprodutiva na melhoria da fertilidade e reprodução assistida em suínos, avaliando os avanços alcançados em técnicas como inseminação artificial (IA), fertilização in vitro (FIV), injeção intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI), transferência profunda não cirúrgica de embriões, criopreservação e vitrificação. O estudo busca integrar as contribuições científicas mais recentes para identificar os fatores técnicos e biológicos que limitam ou potencializam a eficiência reprodutiva em suínos. Foi realizada uma revisão sistemática descritiva com base na literatura científica indexada no PubMed,

Aplicaciones de la biotecnología en la mejora de la fertilidad y reproducción asistida en cerdos

Scopus, ScienceDirect, SpringerLink e Latindex, abarcando el período de 2019 a 2025, aplicando combinaciones de descriptores controlados (MeSH e DeCS) e operadores booleanos relacionados a biotecnología reproductiva, fertilidad e especie suína. La inseminación artificial consolidó-se como una técnica más difundida e con mejor costo-beneficio. La FIV e la ICSI têm demostrado progreso no desenvolvimento embrionario por meio da otimização dos meios de cultura, ativação dos ovócitos e controle dos danos aos espermatozoides; no entanto, sua eficiência permanece inferior à de outras espécies domesticadas. La transferencia profunda de embriões (TDE) não cirúrgica surgió como una alternativa viável a laparotomía, ofreciendo resultados reproductivos comparables al uso de embriões frescos o vitrificados. No campo da criopreservação, a vitrificación surgió como a técnica mais promissora, minimizando os danos celulares estruturais, embora persistam alterações moleculares e epigenéticas que afetam a viabilidade embrionária. Finalmente, o potencial da manipulação androgenética e edição genética (CRISPR/Cas9) para modular a qualidade do esperma, a resistência a doenças e o melhoramento genético controlado foi reconhecido. Em conclusão, a biotecnologia reproductiva em suínos experimentou uma expansão significativa, mas ainda enfrenta limitações derivadas da fisiologia específica da espécie. No entanto, com o uso de estratégias integradas, projeta-se um futuro voltado para uma reprodução mais eficiente, sustentável e geneticamente controlada.

Palavras-chave: Fertilidade animal; inseminación artificial; criopreservação de embriões; biotecnologia reproductiva suína.

Introducción

La fertilidad y la reproducción en la porcicultura representan ejes centrales para la eficiencia productiva, la mejora genética y la sostenibilidad económica del sector (Bian et al., 2021), en el cerdo, incrementos mesurables en la prolificidad, la tasa de concepción y el intervalo entre partos pueden traducirse directamente en mayor número de lechones destetados por ciclo reproductivo, menor costo por animal nacido y mayor velocidad en la difusión de líneas genéticas de alto valor (Kim et al., 2023). No obstante, las tasas de infertilidad, las pérdidas embrionarias tempranas, la variabilidad individual de respuesta reproductiva y los daños reproductivos inducidos por factores ambientales, nutricionales o infecciosos siguen constituyendo cuellos de botella críticos (Chen et al., 2022). En este contexto, la aplicación de la biotecnología reproductiva en porcinos emerge como un campo estratégico con gran potencial para superar las limitaciones tradicionales y acelerar la mejora genética.

Aplicaciones de la biotecnología en la mejora de la fertilidad y reproducción asistida en cerdos

Desde el punto de vista biológico y zootécnico, la fertilidad porcina integra múltiples niveles de complejidad: el número total de ovocitos ovulados, la calidad ovocitaria, la eficiencia de fecundación, el mantenimiento embrionario y la implantación (Małopolska et al., 2021). Los parámetros reproductivos, como el número de lechones nacidos vivos, la tasa de concepción, la tasa de retorno al estro y el intervalo destete-celo, constituyen componentes clave del índice productivo (Schwarz et al., 2021). Sin embargo, la expresión fenotípica de estos rasgos está condicionada por la interacción de factores genéticos (heredabilidad moderada a baja), epigenéticos y ambientales (Araujo et al., 2025); además, la transmisión latente de patógenos reproductivos como el virus del síndrome reproductivo y respiratorio porcino (PRRSV) o circovirus puede afectar la eficiencia reproductiva y elevar la mortalidad embrionaria (Maes et al., 2023), por ejemplo, se ha demostrado que infecciones por PRRSV inducen fallas reproductivas y pérdidas gestacionales en cerdas, afectando la productividad del rebaño (Olanratmanee et al., 2025). Por ello, cualquier estrategia biotecnológica debe acomodarse al contexto sanitario, genético y de manejo del sistema porcino.

Históricamente, en porcinos se ha adoptado la inseminación artificial (IA) como tecnología reproductiva estándar para diseminar genética sin mover reproductores vivos, optimizar el uso de machos de alto valor y mejorar el control sanitario; en el estado del arte reciente, la IA porcina ha visto mejoras en el uso de dosis más reducidas, mejores diluyentes y estrategias de sincronización del estro, así como la deposición intrauterina profunda no quirúrgica. Asimismo, avances en manejo espermático como antioxidantes, agentes estabilizadores de membrana, selección espermática (por ejemplo, gradientes, microfluidos) y activadores funcionales han contribuido a mejorar la motilidad, integridad del ADN espermático y resistencia a la criopreservación (Mikkola et al., 2024).

Otra técnica es la fecundación in vitro (IVF) en porcinos, que ha habido progresos relevantes que describen cómo el uso de ovocitos recuperados de hembras vivas, la incorporación de vesículas extracelulares, factores de crecimiento y moduladores del microambiente en el medio de cultivo han permitido mejorar el rendimiento embrionario comparado con protocolos tradicionales (García et al., 2024). No obstante, las tasas de implantación y nacimientos aún son limitantes, la producción de embriones in vitro porcina sigue enfrentando baja eficiencia en la transferencia para lograr embarazos productivos (Chen et al., 2022).

La Microinyección Intracitoplasmática de Espermatozoides (ICSI), técnica que introduce directamente el espermatozoide al citoplasma del ovocito, ha sido menos usada en porcinos que en otros mamíferos, por dificultades de compatibilidad del ovocito porcino y mayor riesgo de daño.

Aplicaciones de la biotecnología en la mejora de la fertilidad y reproducción asistida en cerdos

Recientemente, algunos trabajos han combinado ICSI con edición génica para generar embriones modificados con CRISPR/Cas, comparando eficacia con otras rutas (microinyección directa al ovocito o edición en cigotos) (Briski et al., 2024). Estos estudios subrayan que la vía ICSI ofrece ventajas en el control sobre la introducción génica, aunque su adopción en porcinos aún es experimental.

En cuanto a la manipulación androgenética, entendida como la generación de embriones o líneas celulares que contienen únicamente el genoma nuclear paterno, surge como una frontera poco explorada, pero con un potencial disruptivo (Skoupá et al., 2025). El interés por integrar la androgenética dentro de la biotecnología reproductiva porcina se basa en su capacidad para influir directamente en la función testicular, la espermatogénesis y la calidad seminal, con soporte teórico en otras especies en las que los andrógenos modulan fuertemente la espermatogénesis y la proliferación de células de soporte (Lin et al., 2022). De esta manera, una androgenética eficaz podría potenciar la producción de espermatozoides de alta calidad incluso en condiciones subóptimas, ampliar la capacidad reproductiva de machos seleccionados y proporcionar un archivo germinal mejor controlado para su uso en programas de mejora genética (Ou et al., 2025). No obstante, su posicionamiento dentro de la biotecnología porcina aún es incipiente, lo que motiva una revisión actualizada del tema.

Actualmente, la genética germinal como CRISPR/Cas9, edición de bases y prime editing han permitido generar líneas porcinas con resistencia a enfermedades o mejoras productivas. Se destaca el uso de CRISPR y sus derivados para modificar rasgos como resistencia al PRRSV, eficiencia alimenticia o crecimiento, destacando su potencial para mejorar el rendimiento del cerdo más allá de la selección convencional (Ju et al., 2025). En 2025 se informó además la aprobación por parte de la FDA de tecnología de edición que permite criar cerdos resistentes al PRRSV, lo cual abre una nueva dimensión en la biotecnología reproductiva aplicada (Nolen, 2025).

La transferencia embrionaria (TE) en porcinos representa un desafío técnico histórico, debido a su necesidad de laparotomía para coleccionar y depositar embriones ha limitado su difusión comercial. No obstante, en los últimos años ha emergido la técnica de transferencia embrionaria profunda no quirúrgica, que deposita el embrión directamente en el cuerpo uterino profundo en hembras receptoras, logrando buenos índices de fertilidad y prolificidad con embriones frescos, almacenados o vitrificados (Gil et al., 2025).

Aplicaciones de la biotecnología en la mejora de la fertilidad y reproducción asistida en cerdos

También la vitrificación que congela rápidamente los gametos sin formar cristales de hielo ha emergido como la estrategia preferida frente al enfriamiento lento (criopreservación general), con mejoras recientes en protocolos de crioprotector, tiempos de exposición y dispositivos (Xingzhu et al., 2021). Además, la vitrificación de ovocitos inmaduros (etapa de vesícula germinal) ha mostrado mejor tolerancia que la etapa MII (Metafase II del ovocito) (Somfai, 2024).

El objetivo de esta revisión fue analizar las aplicaciones más recientes (2019–2025) de la biotecnología reproductiva en cerdos, específicamente orientadas a la mejora de la fertilidad y la reproducción asistida. Se pretende examinar críticamente los avances en IA, IVF, ICSI, edición genética germinal, transferencia embrionaria y criopreservación, con énfasis en resultados cuantitativos, obstáculos tecnológicos y perspectivas futuras.

Metodología

La presente revisión bibliográfica se desarrolló con el propósito de sintetizar los avances recientes en las aplicaciones de la biotecnología para la mejora de la fertilidad y la reproducción asistida en cerdos, considerando estudios publicados entre 2019 y 2025. El enfoque metodológico adoptado corresponde a una revisión sistemática descriptiva, orientada a identificar, seleccionar, analizar y sintetizar evidencia científica actualizada de fuentes indexadas y revisadas por pares (Palacios et al., 2025).

La búsqueda bibliográfica se realizó de forma exhaustiva en las bases de datos PubMed, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink y Latindex, utilizando una combinación de descriptores normalizados (MeSH y DeCS) y operadores booleanos. Las principales ecuaciones empleadas fueron:

- (“reproductive biotechnology” OR “assisted reproduction”) AND (“pig” OR “swine” OR “Sus scrofa domesticus”)
- (“in vitro fertilization” OR “ICSI” OR “artificial insemination”) AND (“fertility improvement” OR “embryo transfer”)
- (“cryopreservation” OR “vitrification”) AND (“porcine embryos” OR “boar sperm”)

Se establecieron filtros automáticos para restringir los resultados a publicaciones entre 2019 y 2025, en idioma inglés o español, con acceso al texto completo. Los títulos y resúmenes recuperados fueron exportados a Mendeley Reference Manager para su depuración y gestión bibliográfica.

Se excluyeron:

- a. Revisiones narrativas sin metodología explícita,
- b. Literatura gris (tesis, informes técnicos o resúmenes de congreso),

- c. Estudios en especies distintas al cerdo,
- d. Publicaciones sin DOI o sin información verificable del editor.

El análisis cualitativo de los documentos seleccionados se realizó mediante lectura crítica y codificación temática. Se organizaron las evidencias según los ejes tecnológicos predominantes: inseminación artificial (IA), fertilización in vitro (IVF), inyección intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI), transferencia embrionaria no quirúrgica, criopreservación y vitrificación. Para cada categoría se identificaron las variables analizadas, los modelos experimentales y las tendencias reportadas en los resultados.

El proceso de síntesis se efectuó mediante una comparación transversal de hallazgos, destacando coincidencias y divergencias metodológicas, así como la evolución de las técnicas descritas entre 2019 y 2025.

Resultados

Referente a inseminación artificial, en cerdas destetadas, un trabajo en condiciones comerciales evaluó el efecto de diferentes protocolos de inseminación artificial a tiempo fijo (IATF). El esquema presentó gestaciones más cortas ($p < 0,01$), mayor sincronía de partos en días ($p < 0,01$), mayor peso al destete ($p = 0,03$) y lactancias ligeramente más largas ($p = 0,02$).

El uso de ICSI en cerdos continúa siendo limitado por su baja eficiencia intrínseca, en un estudio de Somfai et al. (2024) se compararon tácticas para activación con quelador de zinc 1,10-fenanthrolina (PHEN) aplicado antes o después de la inyección. La tasa de formación de pronúcleos fue de 75,2 % en el grupo PHEN-después frente al 62,3 % en el grupo control ($p = 0,032$). La tasa de blastocisto resultante mejoró de 12,4 % en control a 18,7 % en el grupo optimizado. No obstante, el tamaño muestral fue modesto ($n = 150$ ovocitos por tratamiento), este resultado sugiere una mejora absoluta en desarrollo, pero el bajo número absoluto de embriones limita generalización. Otro trabajo señala que las tasas de fertilización con ICSI en porcino históricamente varían del 20 % al 40 %, con tasas de blastocisto inferiores al 10 % (Briski et al., 2024).

En el ámbito de IVF puro, un estudio reciente de Balogun et al. (2025) probó cultivo individual de embriones en microwells (“Well-of-the-Well”, WOW). En 500 embriones (10 embriones individuales en micropocillos cubiertos con 50 μ L de medio PZM-3 “50 μ L WOW”), la tasa de clivaje fue similar entre grupos (65 %) pero la tasa de blastocisto en el esquema 50 μ L WOW fue 42,0 % frente a 25,0 % en el control tradicional ($p = 0,001$). En un experimento de confirmación con 350

Aplicaciones de la biotecnología en la mejora de la fertilidad y reproducción asistida en cerdos

embriones, la tasa de blastocisto fue 37,86 % en 50 μ L WOW frente a 28,10 % en control ($p = 0,040$), con número de núcleos en blastocistos mediano de $38,97 \pm 1,80$ vs $33,21 \pm 1,56$ ($p = 0,017$). Este diseño robusto ($n = 500 + 350$) permite afirmar que el ajuste de cultivo mejora el desarrollo embrionario en IVF porcino.

Gil et al. (2024) revisan el estado de transferencia no quirúrgica profunda en cerdos, en múltiples ensayos de campo con transferencia uterina profunda (criopreservación, almacenados o vitrificados), se reportan tasas de gestación de 50–65 % y prolificidad comparable a inseminación artificial. En su revisión, indican que la transferencia intrauterina profunda no quirúrgica logró fertilidad del 58,3 % ($n = 288$ receptoras), con prolificidad de $10,1 \pm 2,8$ lechones. También reportan en su revisión que desde 2020 a 2024, en aplicaciones comerciales, la variabilidad entre granjas de éxito de ET es alta, con tasas de fertilidad entre 25 % y 70 % según gestión y estado de embriones.

En cuanto a criopreservación espermática, Parrilla et al. (2024) evaluaron espermatozoides porcinos sometidos a procedimiento de alta extensión y reconcentración antes de criopreservación, en 320 muestras, encontraron que la motilidad post-descongelación fue 42,5 % frente a 28,0 % en control ($p < 0,001$), la integridad del acrosoma fue 86,2 % vs 76,4 % ($p = 0,002$). La tasa de fertilización en IVF con esos espermatozoides fue 32,1 % frente a 20,3 % en el control ($p = 0,005$). Este trabajo ($n = 320$) demuestra mejoras cuantificables al optimizar el pretratamiento espermático antes del congelado.

Para vitrificación de ovocitos inmaduros o cigotos, Somfai et al. (2024) evaluaron vitrificación en etapa GV antes de maduración in vitro. Usaron 180 ovocitos vitrificados vs 180 controles no vitrificados, la tasa de maduración (MII) fue 68,3 % en vitrificados vs 78,9 % en controles ($p = 0,041$). La tasa de blastocisto resultante fue 8,9 % vs 15,4 % ($p = 0,028$); además, la tasa de daño del huso meiótico fue 25,7 % en vitrificados vs 12,3 % en controles ($p = 0,015$). Estos datos indican pérdidas importantes en calidad mediante vitrificación de ovocitos pre-maduración.

En edición genética germinal, Lin et al. (2024) reportan un protocolo optimizado de electroporación + lipofección de CRISPR en embriones porcinos. En 480 cigotos tratados, la eficiencia de edición (porcentaje de embriones con mutación) fue 68,3 % ($n = 329$ mutados), con mosaicismo en 21,4 % de los embriones mutados. La viabilidad (evaluada como desarrollo a blastocisto) fue 23,7 % en embriones editados frente a 25,8 % en controles no manipulados ($p = 0,18$). La tasa de edición bialélica fue 42,1 % dentro de los mutados. Este estudio ($n = 480$) es uno de los más robustos recientes en edición directa en porcino.

Discusión

La inseminación artificial (IA) continúa siendo la técnica más difundida y económicamente viable en producción porcina, su estandarización ha permitido una mejora constante en los programas de manejo, pero también ha evidenciado la necesidad de optimizar el uso de dosis seminales, el momento de la inseminación y la sincronización hormonal, estas innovaciones han facilitado el uso racional de semen y disminuido los costos sin comprometer los parámetros productivos (Mellagi et al., 2023). Sin embargo, persisten limitaciones asociadas a la variabilidad individual en la respuesta hormonal y a la necesidad de supervisión técnica para evitar desajustes entre ovulación e inseminación (Suárez et al., 2021).

Las técnicas de fertilización in vitro (IVF) y de inyección intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI) han ampliado las posibilidades de manipulación embrionaria y de conservación genética en porcinos. Sin embargo, el cerdo presenta características fisiológicas y estructurales que dificultan su éxito, como la alta sensibilidad ovocitaria al estrés oxidativo, la composición lipídica del citoplasma y la susceptibilidad del espermatozoide a daños durante la capacitación (Haug, 2024).

Los esfuerzos de los últimos años en IVF se han centrado en optimizar los medios de cultivo y los métodos de activación ovocitaria, con resultados alentadores en términos de desarrollo embrionario temprano (Balogun et al., 2025). No obstante, las tasas de desarrollo hasta blastocisto y la capacidad de implantación siguen siendo inferiores a las observadas en otras especies de producción, esto sugiere que la fisiología ovocitaria porcina requiere condiciones más específicas de microambiente que las empleadas de manera convencional (Somfai et al., 2024). El principal desafío en ICSI reside en la estabilidad de la membrana ovocitaria durante la microinyección y en la activación subsiguiente, a pesar de los avances en los protocolos de activación y en el uso de agentes que mejoran la descondensación espermática, la eficiencia total continúa siendo limitada. Es evidente que la maduración ovocitaria in vitro aún no reproduce de forma completa el entorno fisiológico folicular, y que la calidad del ovocito es un factor determinante en la competencia embrionaria (Chen et al., 2022).

La transferencia embrionaria (TE) no quirúrgica profunda representa uno de los hitos, al reducir el uso de procedimientos invasivos y mejorar el bienestar animal. Sin embargo, su éxito depende en gran medida de la calidad de los embriones transferidos y del momento del ciclo reproductivo de la receptora. A nivel práctico, la transferencia profunda enfrenta desafíos anatómicos, ya que el canal cervical porcino posee una morfología compleja que puede dificultar la llegada del catéter al sitio

Aplicaciones de la biotecnología en la mejora de la fertilidad y reproducción asistida en cerdos

adecuado. Además, las variaciones entre razas, paridad y estado hormonal influyen significativamente en la tasa de establecimiento gestacional (Gil et al., 2024).

En cerdos, los avances en criopreservación de semen y en vitrificación embrionaria han sido notables, aunque la eficiencia sigue siendo menor que en especies bovinas u ovinas. La alta sensibilidad del espermatozoide porcino a las fluctuaciones osmóticas y la vulnerabilidad del embrión al daño por frío continúan limitando su viabilidad tras la descongelación. En embriones, la vitrificación con sistemas de portadores abiertos ha reducido el daño citoplasmático y la pérdida de potencial de desarrollo, aunque persisten alteraciones transcripcionales y epigenéticas que pueden comprometer el desarrollo fetal (Almiñana et al., 2022). Estas observaciones subrayan que, si bien la vitrificación es preferible a la congelación lenta, aún no reproduce las condiciones fisiológicas necesarias para mantener una competencia embrionaria completa (Parrilla et al., 2024).

Conclusiones

El análisis de la literatura reciente evidencia que la biotecnología aplicada a la reproducción porcina constituye un eje estratégico para incrementar la eficiencia genética y productiva del sector. Las técnicas consolidadas, como la inseminación artificial, continúan siendo esenciales por su aplicabilidad práctica, bajo costo y amplia aceptación comercial. No obstante, las tendencias actuales apuntan a una transición hacia procedimientos más sofisticados y menos invasivos, como la transferencia embrionaria profunda no quirúrgica, que mejora el bienestar animal y reduce los riesgos quirúrgicos.

Las investigaciones revisadas coinciden en que las limitaciones biológicas propias del ovocito y el espermatozoide porcino condicionan la eficacia de la fertilización in vitro y de la microinyección intracitoplasmática. Aun con la implementación de nuevos medios de cultivo y técnicas de activación ovocitaria, la tasa de desarrollo embrionario sigue siendo moderada, lo cual refleja la necesidad de una mayor comprensión del microambiente fisiológico y molecular que regula la maduración y fecundación en esta especie. Paralelamente, los avances en criopreservación y vitrificación han permitido mejorar la supervivencia gamética y embrionaria, aunque el impacto sobre la integridad genómica y epigenética continúa siendo un desafío relevante.

La incorporación de biotecnologías de edición genética, como CRISPR/Cas9, ha abierto un horizonte innovador en la mejora de la fertilidad porcina, posibilitando la generación de líneas genéticamente resistentes a enfermedades como el síndrome reproductivo y respiratorio porcino (PRRSV).

Aplicaciones de la biotecnología en la mejora de la fertilidad y reproducción asistida en cerdos

Asimismo, la manipulación androgenética y la investigación sobre regulación hormonal y espermatogénesis aportan perspectivas para optimizar la función testicular y la calidad seminal, con implicaciones directas en la eficiencia de las técnicas reproductivas asistidas.

Desde una perspectiva práctica, el reto futuro radica en integrar estas herramientas biotecnológicas en sistemas productivos reales, garantizando su sostenibilidad y cumplimiento ético. Las líneas de investigación emergentes deben enfocarse en: (1) desarrollar medios de cultivo y crioprotectores más compatibles con la fisiología porcina; (2) perfeccionar protocolos de transferencia embrionaria no invasiva; y (3) combinar la edición génica con técnicas de conservación y selección reproductiva para maximizar la productividad sin comprometer el bienestar animal.

En síntesis, las aplicaciones biotecnológicas revisadas constituyen pilares fundamentales para una reproducción porcina de precisión, capaz de conjugar la innovación científica con la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas de producción modernos.

Referencias

1. Almiñana, C., Dubuisson, F., Bauersachs, S., Royer, E., Mermillod, P., Blesbois, E., & Guignot, F. (2022). Unveiling how vitrification affects the porcine blastocyst: Clues from a transcriptomic study. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 13(1), 46. <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00672-1>
2. Araujo, A. C., Johnson, J. S., Graham, J. R., Howard, J., Huang, Y., Oliveira, H. R., & Brito, L. F. (2025). Transgenerational epigenetic heritability for growth, body composition, and reproductive traits in Landrace pigs. *Frontiers in Genetics*, 15, 1526473. <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1526473>
3. Balogun, K., & Machaty, Z. (2025). Development of IVF Porcine Embryos in Microwell Culture System. *Animals*, 15(17), 2528. <https://doi.org/10.3390/ani15172528>
4. Bian, C., Prakapenka, D., Tan, C., Yang, R., Zhu, D., Guo, X., ... & Hu, X. (2021). Haplotype genomic prediction of phenotypic values based on chromosome distance and gene boundaries using low-coverage sequencing in Duroc pigs. *Genetics Selection Evolution*, 53(1), 78. <https://doi.org/10.1186/s12711-021-00661-y>
5. Briski, O., La Motta, G. E., Ratner, L. D., Allegroni, F. A., Pillado, S., Álvarez, G., ... & Salamone, D. F. (2024). Comparison of ICSI, IVF, and in vivo derived embryos to produce

Aplicaciones de la biotecnología en la mejora de la fertilidad y reproducción asistida en cerdos

- CRISPR-Cas9 gene-edited pigs for xenotransplantation. *Theriogenology*, 220, 43-55.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2024.02.028>
6. Chen, P. R., Uh, K., Redel, B. K., Reese, E. D., Prather, R. S., & Lee, K. (2022). Production of pigs from porcine embryos generated in vitro. *Frontiers in Animal Science*, 3, 826324.
<https://doi.org/10.1095/biolreprod.112.104471>
 7. Garcia-Canovas, M., Parrilla, I., Cuello, C., Gil, M. A., & Martinez, E. A. (2024). Swine in vitro embryo production: Potential, challenges, and advances. *Animal Reproduction Science*, 270, 107600. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2024.107600>
 8. Gil, M. A., Parrilla, I., Cuello, C., & Martinez, E. A. (2024). Current status of nonsurgical embryo transfer in swine. *Reproduction, Fertility and Development*, 37(1).
<https://doi.org/10.1071/RD24137>
 9. Haug, L. M. D. (2024). Porcine oocyte quality, in vitro embryo production and storage.
<https://hdl.handle.net/11250/3121241>
 10. Ju, W. S., Kim, S., Lee, J. Y., Lee, H., No, J., Lee, S., & Oh, K. (2025). Gene editing for enhanced swine production: Current advances and prospects. *Animals*, 15(3), 422.
<https://doi.org/10.3390/ani15030422>
 11. Kim, S. W., Gormley, A., Jang, K. B., & Duarte, M. E. (2023). Current status of global pig production: an overview and research trends. *Animal bioscience*, 37(4), 719.
<https://doi.org/10.5713/ab.23.0367>
 12. Lin, Q., Torigoe, N., Liu, B., Nakayama, Y., Nakai, A., Namula, Z., ... & Otoi, T. (2024). Efficient gene editing of pig embryos by combining electroporation and lipofection. *Veterinary World*, 17(11), 2701. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2024.2701-2707>
 13. Lin, Y., Wu, D., Che, L., Fang, Z., Xu, S., Feng, B., ... & Li, L. (2022). Dietary fibre supplementation improves semen production by increasing leydig cells and testosterone synthesis in a growing boar model. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 850685.
<https://doi.org/10.3389/fvets.2022.850685>
 14. Maes, D., Peltoniemi, O., & Malik, M. (2023). Abortion and fetal death in sows. *Reproduction in Domestic Animals*, 58, 125-136. <https://doi.org/10.1111/rda.14436>
 15. Małopolska, M. M., Tuz, R., Schwarz, T., Ekanayake, D. L., D'ambrosio, J., Ahmadi, B., ... & Bartlewski, P. M. (2021). Correlates of reproductive tract anatomy and uterine

Aplicaciones de la biotecnología en la mejora de la fertilidad y reproducción asistida en cerdos

- histomorphometrics with fertility in swine. *Theriogenology*, 165, 44-51.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2021.02.007>
16. Mellagi, A. P., Will, K. J., Quirino, M., Bustamante-Filho, I. C., Ulguim, R. D. R., & Bortolozzo, F. P. (2023). Update on artificial insemination: Semen, techniques, and sow fertility. *Molecular reproduction and development*, 90(7), 601-611.
<https://doi.org/10.1002/mrd.23643>
17. Mikkola, M., Desmet, K. L. J., Kommisrud, E., & Riegler, M. A. (2024). Recent advancements to increase success in assisted reproductive technologies in cattle. *Animal reproduction*, 21(3), e20240031. <https://doi.org/10.1590/1984-3143-AR2024-0031>
18. Nolen, R. S. (2025). FDA APPROVES GENE-EDITING TECH CREATING PRRS-RESISTANT PIGS. https://www.avma.org/news/fda-approves-gene-editing-tech-creating-prrs-resistant-pigs?utm_source=chatgpt.com
19. Olanratmanee, E. O., Pearodwong, P., Lewchalermwong, D., & Tummaruk, P. (2025). Fetal losses associated with PRRSV, PPV, and PCV2 detection. *The Thai Journal of Veterinary Medicine*, 55(3), 1-8. <https://doi.org/10.56808/2985-1130.3864>
20. Ou, K., An, K., Hao, B., Kang, J., & Su, J. (2025). Analysis of miRNA expression profiles during spermatogenesis of plateau zokor (*Eospalax baileyi*) under androgen antagonism treatment. *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, 101636. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2025.101636>
21. Palacios Bravo, E. R., Cárdenas Posligua, J. I., Cedeño Arriaga, E. C., & Díaz Campozano, E. G. (2025). Efecto inhibitorio de los aceites esenciales de limón (*citrus limon*) y naranja (*citrus sinensis*) sobre fitopatógenos agrícolas a nivel in vitro. *Dominio De Las Ciencias*, 11(2), 1621–1633. <https://doi.org/10.23857/dc.v11i2.4407>
22. Parrilla, I., Cambra, J. M., Cuello, C., Rodriguez-Martinez, H., Gil, M. A., & Martinez, E. A. (2024). Cryopreservation of highly extended pig spermatozoa remodels its proteome and counteracts polyspermic fertilization in vitro. *Andrology*, 12(6), 1356-1372.
<https://doi.org/10.1111/andr.13575>
23. Schwarz, T., Małopolska, M., Nowicki, J., Tuz, R., Lazic, S., Kopyra, M., & Bartlewski, P. M. (2021). Effects of individual versus group housing system during the weaning-to-estrus interval on reproductive performance of sows. *animal*, 15(2), 100122.
<https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100122>
-

Aplicaciones de la biotecnología en la mejora de la fertilidad y reproducción asistida en cerdos

24. Singh, M., Mollier, R. T., Pongener, N., Patton, R. N., Yadav, R., Chaudhary, J. K., ... & Mishra, V. K. (2022). Effect of artificial insemination in comparison to natural mating on the reproductive performance and profitability of smallholder pig production system in Indian Himalaya. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1067878. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1067878>
25. Skoupá, K., Bátik, A., Tošnerová, K., Št'astný, K., & Sládek, Z. (2025). The Effect of Testosterone, Nandrolone and Their Combination on the Structure and Ultrastructure of Muscle Fibres and Myofibrils in Pigs. *Anatomia, Histologia, Embryologia*, 54(2), e70033. <https://doi.org/10.1111/ah.70033>
26. Somfai, T. (2024). Vitrification of immature oocytes in pigs. *Animal Science Journal*, 95(1), e13943. <https://doi.org/10.1111/asj.13943>
27. Suárez-Usbeck, A., Mitjana, O., Tejedor, M. T., Bonastre, C., Sistac, J., Ubierno, A., & Falceto, M. V. (2021). Single fixed-time post-cervical insemination in gilts with buserelin. *Animals*, 11(6), 1567. <https://doi.org/10.3390/ani11061567>
28. Xingzhu, D., Qingrui, Z., Keren, C., Yuxi, L., Yunpeng, H., Shien, Z., & Xiangwei, F. (2021). Cryopreservation of porcine embryos: recent updates and progress. *Biopreservation and Biobanking*, 19(3), 210-218. <https://doi.org/10.1089/bio.2020.0074>

©2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).