



Revisión de literatura

Métodos para detectar preñez en las cerdas

Leonardo Andrés Molina-Cabrales¹, Diego Enrique León-Chacón²

RESUMEN

La eficiencia reproductiva en la industria porcina depende en gran medida de una detección temprana y precisa de la preñez en las cerdas. A lo largo del tiempo se han desarrollado y perfeccionado diversos métodos para determinar el estado gestacional, desde técnicas tradicionales hasta herramientas tecnológicas de vanguardia. Esta revisión tiene como objetivo ofrecer una visión integral y actualizada sobre los principales métodos empleados en la detección de preñez en cerdas. Para ello, se consultaron bases de datos científicas como PubMed, Scopus, Google Scholar y Web of Science para un periodo de 10 años. Se seleccionaron un total de 52 referencias según su relevancia temática, calidad metodológica y aplicabilidad de los resultados. Las mismas se organizaron mediante una estadística descriptiva y una síntesis cualitativa. Se abordaron prácticas convencionales, como la observación de comportamiento y tecnologías modernas, entre ellas la ecografía, el análisis hormonal y las técnicas de procesamiento de imágenes. El retorno al celo se ha catalogado como una opción económica para granjas más pequeñas; sin embargo, requiere un mayor plazo de tiempo para la detección. En cambio, el uso de la ecografía ha mejorado la precisión en el diagnóstico del

¹ Universidad Francisco de Paula Santander Seccional Ocaña, UFPSO Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente. Ocaña, Colombia. Autor para correspondencia: lamolinac@ufpso.edu.co (<https://orcid.org/0000-0002-0304-7125>).

² Universidad Francisco de Paula Santander Seccional Ocaña, UFPSO Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente. Ocaña, Colombia. Correo electrónico: dechaconl@ufpso.edu.co (<https://orcid.org/0000-0003-4083-4301>).

Recibido: 13 julio 2025 **Aceptado:** 19 diciembre 2025

Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas 4.0.



estado de preñez de las cerdas. Los análisis hormonales, basados en la medición de niveles de hormonas en sangre u orina, constituyen un método menos común debido a su costo asociado. La termografía infrarroja se presenta como una posible nueva herramienta en la detección de preñez de cerdas. Si bien la elección del método depende de una serie de factores, la combinación de múltiples métodos puede resultar como una estrategia eficaz para aumentar la precisión del diagnóstico y monitoreo de la preñez en la cerda.

Palabras claves: Cerdas, detección de preñez, diagnóstico, métodos, reproducción porcina.

ABSTRACT

Pregnancy detection methods in sows. Reproductive efficiency in the swine industry depends largely on early and accurate pregnancy detection in sows. Over time, various methods for determining pregnancy status have been developed and refined, ranging from traditional techniques to cutting-edge technological tools. This review aims to provide a comprehensive and up-to-date overview of the main methods used for pregnancy detection in sows. Scientific databases such as PubMed, Scopus, Google Scholar, and Web of Science, were consulted over a 10-year period. A total of 52 sources were selected based on thematic relevance, methodological quality, and applicability of results. These were organized using descriptive statistics along with a qualitative synthesis. Both conventional practices, such as behavioral observation, and modern technologies, including echography, hormonal analysis, and image processing techniques, were addressed. Return to estrus is considered a cost-effective method for pregnancy detection in sows, especially in small-scale production systems; however, it is limited by its longer detection intervals. In contrast, echography has improved diagnostic accuracy for confirming pregnancy status. Hormonal assays, which involve quantifying hormone levels in blood or urine samples, are less frequently employed due to their higher costs. Infrared thermography has been recently proposed as a potentially reliable tool for early

pregnancy detection in sows. Although the selection of the method depends on a variety of factors, combining multiple approaches can be an effective strategy to improve the accuracy of pregnancy diagnosis and monitoring in sows.

Keywords: Sows, pregnancy detection, diagnosis, methods, porcine reproduction.

INTRODUCCIÓN

El diagnóstico temprano de la gestación en cerdas representa un insumo de gran importancia para incrementar la productividad de la industria porcina, dado que en algunas ocasiones las cerdas no logran la concepción después del proceso de inseminación y, por ende, se hace imposible la detección de su preñez en estadios tempranos, generando pérdidas económicas a los productores (Zhou et al., 2020). Por motivos económicos, es crucial identificar temprana y precisamente la preñez en animales domésticos como cerdos y bovinos. Los ganaderos históricamente han buscado formas de diagnosticarla, empleando principalmente enfoques visuales, clínicos y de laboratorio. Hasta el momento, los métodos utilizados para detectar la preñez en cerdas se centran en cambios fisiológicos y de comportamiento posteriores a la concepción, con sus respectivas ventajas y limitaciones (Shen et al., 2014).

Cuando una cerda queda preñada, la producción de progesterona (P4) se mantiene hasta el parto, en contraste con los animales no preñados que tienen bajos niveles de sulfato de estrona (E1S). Tanto las concentraciones de E1S en la orina como en la sangre se han empleado para diagnosticar la gestación en cerdas. Por lo general, se observa un aumento significativo (10 a 100 veces) en los niveles entre los días 25 y 30 después de la concepción en cerdas gestantes en comparación con las no gestantes (Sterle y Safranski, 2018).

Hasta el momento, son diversos los métodos empleados para la detección de la gestación en cerdas, entre los que destacan el aumento del volumen ventral, los signos de no retorno al ciclo estral, o el análisis de niveles de concentración de estrógeno o P4. Sin embargo, algunos de los

métodos mencionados solo proporcionan información efectiva en un lapso promedio de 25 a 30 días, reduciendo la posibilidad de detección antes de 25 días después de iniciar la fertilización (Zhou et al., 2020).

La detección de la preñez en cerdas está afectada por heterogeneidad que impacta la precisión del diagnóstico. Esa heterogeneidad está caracterizada por la forma de cría, la paridad de las hembras, el técnico que realiza el diagnóstico y el propio material técnico que se utiliza. Por ejemplo, en el caso de las cerdas nulíparas los signos gestacionales son menos evidentes, por lo que se puede complicar el diagnóstico en relación a las cerdas múltiparas. También la experiencia del operario y el tipo de ecógrafo, por ejemplo, en los sistemas Doppler, son factores que pueden aumentar o disminuir la sensibilidad y la especificidad de los resultados. Todos estos factores, si no se controlan, pueden contribuir a generar errores que afectan la toma de decisiones en relación a la reproducción. La subestimación de la gestación puede contribuir a la alta mortalidad pre-destete y a una heterogeneidad de camada más elevada al comprometer el seguimiento y manejo de las cerdas gestantes en tiempo (Vernunft et al., 2023).

Esta situación ha evidenciado la necesidad de mejorar las estrategias de manejo reproductivo, como es el caso de la confirmación de la gestación a través de tipologías de diagnósticos para la gestación. De acuerdo con Santos et al. (2012), se requiere de una confirmación certera y prematura de la gestación para que exista un óptimo control en el ciclo de la reproducción y la detección de hembras vacías. Además, las dilaciones del retorno al celo y el recelo deben ir acompañadas por la presencia de machos con alta libido y deben ser corroboradas con tipos de diagnóstico alternativo, como es el caso del ultrasonido, con el fin de confirmar la situación reproductiva que presenta el animal.

Del mismo modo, Santos et al. (2012) plantean que los niveles séricos de ciertas hormonas como prostaglandina F_{2α} (PGF_{2α}), P₄ y E_{1S} fueron empleados como identificadores bioquímicos para la determinación de la preñez en cerdas. Ahora bien, según Almond (2007), la aplicación de estos marcadores presenta importantes limitaciones que han condicionado su

utilidad en la práctica porcina. Entre las principales limitaciones están: la necesidad de procedimientos invasivos para la extracción de las muestras biológicas requeridas para medir estos marcadores, la necesidad de equipamientos de laboratorio especializados, los altos costos operativos, la variabilidad fisiológica de los mismos grupos de cerdas y la escasa disponibilidad de ensayos de campo de elevada sensibilidad y especificidad. Todo ello hace que no sea fácilmente implantable su uso rutinario, pese a la base endocrina que los sostiene.

Para atender estas limitaciones, el presente artículo de revisión tiene como objetivo analizar de manera crítica y actualizada los principales métodos disponibles para la detección de la preñez en cerdas, considerando técnicas tradicionales, tecnológicas y emergentes. El análisis se centra en su precisión diagnóstica, viabilidad operativa y aplicabilidad comercial, con el fin de ofrecer una visión integral sobre sus fundamentos fisiológicos, ventajas, limitaciones y perspectivas de mejora en el contexto de la producción porcina.

MATERIALES Y MÉTODOS

La revisión se llevó a partir de una búsqueda sistemática y estructurada de literatura científica en bases de datos académicas de alto impacto, como PubMed, Scopus, Web of Science y Google Scholar, para identificar los métodos más destacados y recientes utilizados para la detección de preñez en cerdas. Se suprimieron limitaciones idiomáticas y geográficas, con el objetivo de garantizar una cobertura global e internacional de las evidencias existentes.

La búsqueda de la literatura se llevó a cabo con descriptores controlados y fórmulas de búsqueda combinadas con operadores booleanos, tanto en inglés como en español: "pregnancy detection in sows" and "ultrasound in pigs", "biomarkers in sows" and "estrone sulfate", "metabolomics and pregnancy and pigs", "detección de preñez en cerdas", entre otros. En esa medida, inicialmente se realizaron 11.356 registros, que tras un procedimiento de depuración y evaluación por fases y criterios de inclusión regidos por: (a) pertinencia temática;

(b) calidad del método: existencia de validaciones estadísticas, muestras representativas y un diseño experimental; (c) posible transferibilidad de los resultados a sistemas de producción porcina; y (d) vigencia de la validez científica del documento.

Las búsquedas se llevaron a cabo entre octubre de 2023 y abril de 2024, priorizando la literatura de los últimos diez años (2013 – 2023); aun así, se incluyeron otros documentos, incluso anteriores al periodo indicado, siempre que su contribución fuese valorada como significativa para el análisis técnico y científico del tema. Como criterio de exclusión se tuvo en cuenta la existencia de publicaciones duplicadas, estudios sin acceso a texto completo, ensayos sin validación empírica o estudios sin información validable sobre el método de diagnóstico que se podía evaluar en el estudio. Dicha depuración se recogió sobre una matriz estructurada que permitió definir los motivos de exclusión en cada caso. Al final de este proceso se eligieron 52 estudios clave y sobre ellos se realizó la posterior evaluación.

Para minimizar sesgos de selección e interpretación, se llevó a cabo una doble lectura de cada estudio por parte de los investigadores, contrastando los datos clave extraídos y validando los resultados con las conclusiones. De forma adicional a lo anterior, se procedió a caracterizar y clasificar a la publicación según su tipo de diseño (experimental, observacional, revisión sistemática o narrativa), el tipo de sistema productivo (intensivo, semi-intensivo, tecnificado o de traspatio), y el tipo de técnica diagnóstica que era objeto de estudio.

Para tener una idea del contenido de las líneas de investigación sobre detección de preñez en cerdas se realizó una sistematización de las referencias bibliográficas revisadas con el siguiente modelo: el área temática que da soporte a la investigación, los lapsos de ediciones, el ensayo metodológico, y el espacio geográfico en donde se realizó la investigación. La sistematización de los artículos revisados permitió determinar la acumulación de los esfuerzos científicos en las diferentes tecnologías, como también las transformaciones que ha tenido la investigación en el último par de décadas (Cuadro 1). Igualmente, resulta de interés tener en cuenta la categorización entre ensayos experimentales, observacionales, revisiones o validaciones diagnósticas, ya que permite calibrar el grado de fuerza y de aplicabilidad de las evidencias evidenciadas.

Cuadro 1. Clasificación de referencias según área de investigación en la detección de preñez en cerdas.

Variable analizada	Categoría	Frecuencia absoluta (n)	Frecuencia relativa (%)
Área temática	Ultrasonografía	10	19,2%
	Biomarcadores hormonales y bioquímicos	5	9,6%
	Metabolómica y espectrometría de masas	3	5,8%
	Aprendizaje automático	5	9,6%
	Termografía y temperatura corporal	2	3,8%
	Efectos moleculares y fisiológicos del embarazo	5	9,6%
	Protocolos reproductivos e inseminación artificial	6	11,5%
	Predicción del tamaño de camada	5	9,6%
	Estudios comparativos con otras especies	3	5,8%
	Otros enfoques integradores	8	15,3%
Año de publicación	2006–2012	6	11,5%
	2013–2017	14	26,9%
	2018–2022	22	42,3%
	2023–2025	10	19,3%
Tipo de estudio	Experimental	18	34,6%
	Observacional	12	23,1%
	Revisión sistemática o narrativa	10	19,2%
	Estudios de validación diagnóstica	7	13,5%
Región geográfica	Modelos predictivos computacionales	5	9,6%
	Europa	16	30,8%
	Asia	14	26,9%
	América del Norte	9	17,3%
	América Latina	8	15,4%
	Otros (Oceanía, África)	5	9,6%

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sistematizados gracias a los procedimientos de estadística descriptiva, incluyendo frecuencias relativas de aparición por categoría temática, distribución temporal de publicaciones, número de estudios por región y recurrencia a los métodos analizados. La información obtenida fue útil para poder construir una visión cuantitativa del panorama actual investigativo, así como para llevar a cabo una síntesis cualitativa categorizada de tipo comparativo, lo que permitió establecer ventajas y desventajas, niveles de sensibilidad y especificidad, y, en paralelo, condiciones operativas relacionadas con cada método de diagnóstico gestacional.

RESULTADOS

Anatomía de la cerda

La cerda doméstica presenta un ciclo de reproducción poliéstrico, no estacional, en el que se observa un tiempo medio de 21 días, lo que da paso a un aprovechamiento continuo de su capacidad reproductiva, tan pronto se estimulan las condiciones de manejo tecnificado. Esta condición es muy relevante para los sistemas intensivos, pues permite dar continuidad a una actividad ovárica que se activa en cuanto se alcanza la pubertad y el progreso en la programación de los eventos reproductivos que surgen dentro de la piara (Astudillo, 2023). En cada ciclo, la ovulación origina la formación de cuerpos lúteos funcionales que secretan P4 y, si la fecundación tiene lugar, continúan activos durante toda la gestación. De no fecundarse, en los días 14 a 16 del ciclo, se inicia un proceso de luteólisis endometrial mediado por prostaglandina F₂ α , reiniciando el ciclo estral (Hinojosa, 2022; Astudillo, 2023).

Desde un punto de vista fisiológico y endocrinológico, la implantación del embrión en la cerda tiene lugar entre el día 8 y el día 10 pos-fecundación y dura hasta el día 18 del ciclo. En el

momento en el que se lleva a cabo esta fase del desarrollo embrionario, el trofoblasto del embrión es capaz de liberar esteroides, concretamente los estrógenos, que tienen como función primordial inhibir el efecto luteolítico del $\text{PGF2}\alpha$ y, por lo tanto, mantener la actividad de los cuerpos lúteos. Esta producción estrogénica es el indicio que recibe el organismo materno como señal de reconocimiento de la preñez, la cual constituye un periodo crucial de la modulación endocrina de la gestación. Asimismo, puede ser una ventana diagnóstica incluida en la detección del estado reproductivo (Vélez, 2017; Taverne y Noakes, 2019).

En ese contexto, la placenta porcina, de morfología difusa y tipo epiteliocorial, no solo sirve de interfaz para la transferencia de productos metabólicos, nutrientes y gases, sino que es también un órgano de señalización tanto inmunológica como endocrina. Esta morfología especializada impide la invasión del endometrio materno por parte del trofoblasto debido a la necesidad de una comunicación molecular precisa para permitir la tolerancia inmunológica al concepto, la cual se produce principalmente a través de la señalización mediada por la expresión de citoquinas, prostaglandinas, integrinas y moléculas de adhesión, por lo que son relevantes para la remodelación vascular y para la inhibición del rechazo del embrión, permitiendo así la viabilidad gestacional (Giai et al., 2022; Almeida y Alvarenga, 2022).

Por otra parte, los cambios morfológicos que afectan a las estructuras reproductivas de tipo externo e interno durante el estro y las fases iniciales de la gestación han sido utilizados como parámetros indirectos del estado reproductivo, destacando la congestión vulvar, el inicio del edema mamario, y el cambio cualitativo de la textura uterina que puede percibirse por palpación o ecografía. De este modo, la posición longitudinal de los embriones en los cuernos uterinos (antes de la implantación) también puede ser considerada un parámetro técnico, puesto que condiciona la interpretación de las imágenes obtenidas mediante ultrasonografía en tiempo real, en especial si se opta por el modo B de alta resolución (Cintra et al., 2006; Quinteros, 2023).

Métodos para el diagnóstico temprano de gestación

La realización de pruebas de preñez no tiene un impacto directo en la resolución de problemas de fertilidad. Sin embargo, son útiles para identificar problemas relacionados con la gestación y permiten tomar medidas correctivas. El diagnóstico temprano de la preñez ayuda a identificar los días en que la cerda no es productiva, lo que a su vez facilita la implementación de estrategias de manejo adecuadas (Quinteros, 2023).

El momento óptimo para detectar la gestación es 21 días después del apareamiento, principalmente debido a la acumulación de líquido en la vesícula embrionaria, que hace que las imágenes de los cuernos uterinos sean más nítidas (Williams et al., 2008). Para el diagnóstico temprano de la preñez en cerdas, se han utilizado las concentraciones séricas de P4. Según el estudio realizado por Williams et al. (2008), la medición de los niveles de P4 entre los días 17 y 20 después del servicio demostró una sensibilidad del 94,6% y una especificidad del 35,7%.

Existen diversas técnicas disponibles para determinar la preñez en cerdas, y su elección puede depender del tamaño de la piara y los recursos disponibles, algunas de las cuales se exponen en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Pruebas comunes para la detección de la preñez en cerdas.

Técnica	Tipo de prueba	Aplicación (precisión de la prueba después de la inseminación)
Detección de retorno al estro	Detección de retorno al estro	Pruebas diarias de 18 a 25 días (75% a 85%) y durante la gestación (98%).
Signos físicos externos	Signos físicos externos	> 55 días (cerdas primerizas); > 84 días (cerdas multíparas). Porcentaje de precisión N/R*
Ultrasonografía modo A	Indirecto	30 a 75 días (95%).
Dopple (modo B)	Tiempo Real Directo	≥ 24 días (> 95%).

*N/R= No reportado. Fuente: Knox (2022).

Como se observa, los ensayos basados en la evaluación del retorno al estro presentan mayores niveles de precisión cuando se aplican en etapas más avanzadas de la gestación (días 18 a 25), en comparación con la observación de signos físicos externos. No obstante, requieren tiempos de espera prolongados y muestran diferencias marcadas entre cerdas primerizas y multíparas, lo cual limita su utilidad para el diagnóstico temprano. Estas limitaciones coinciden con lo descrito por Koketsu et al. (2017), quienes señalan que la variabilidad fisiológica entre categorías reproductivas afecta la confiabilidad de los métodos conductuales para la detección temprana de la preñez.

Asimismo, Knox (2022) indica que la ultrasonografía en modo A permite una detección indirecta

en una ventana diagnóstica amplia y con altos niveles de precisión ($\approx 88\%$), mientras que la ultrasonografía Doppler en tiempo real, considerada una técnica directa, posibilita la identificación de la preñez en etapas más tempranas, con precisiones superiores al 95%. Estos valores son consistentes con lo reportado por Mellagi et al. (2015), quienes destacan la utilidad del Doppler para la confirmación temprana de la gestación.

Por otra parte, según Knox (2022), en granjas pequeñas la confirmación de la preñez suele basarse en la ausencia de retorno al celo entre los 18 y 25 días posteriores al servicio, una alternativa más económica, aunque menos precisa, con tasas de acierto del 75% al 85%. El mismo autor también describe el uso de métodos menos comunes, como la determinación hormonal (glucurónico de estrona, P4 o prostaglandinas) o la biopsia vaginal; sin embargo, su costo limita su aplicación en la práctica rutinaria.

Secuenciación profunda de biomarcadores de microARN en exosomas séricos

La caracterización de biomarcadores de microARN (miARNs) presentes en exosomas del suero ha cobrado importancia como método emergente para la detección temprana de la preñez en diversas especies. En porcinos, los miARNs son biomarcadores sensibles de procesos fisiológicos clave, incluidos la implantación embrionaria, la remodelación endometrial y la modulación inmunitaria asociada a la gestación (Zhou et al., 2020). En el estudio realizado por estos autores, se analizaron muestras de suero obtenidas entre los días 9 y 15 posteriores a la inseminación artificial en cerdas gestantes y no gestantes, logrando aislar ARN exosomal con perfiles claramente diferenciables entre ambos grupos. El análisis transcriptómico reveló un aumento significativo de miR-92n-3p y miR-17-5p en los exosomas de cerdas gestantes.

Los exosomas constituyen una plataforma diagnóstica altamente eficiente para la detección de miARN, ya que protegen su contenido de la degradación por ribonucleasas circulantes. La activación de vías de señalización como PI3K-Akt, asociada a la proliferación celular endometrial y al mantenimiento de la gestación, ha sido descrita inicialmente en modelos murinos y caprinos

(Chang et al., 2018); sin embargo, su detección en porcinos sugiere un mecanismo conservado entre especies, lo que refuerza el potencial de estos miARN como biomarcadores universales del estado gestacional.

Esta estabilidad estructural permite que los exosomas se detecten en muestras periféricas sin requerimientos estrictos de procesamiento, lo que los convierte en candidatos ideales para métodos diagnósticos no invasivos, sensibles y reproducibles. En este contexto, la capacidad de los exosomas para garantizar tanto la persistencia de los miARN circulantes como su adecuada función como mediadores de la comunicación intercelular es fundamental para su aplicabilidad en las etapas iniciales de la preñez (Zhou et al., 2020).

El potencial diagnóstico de los miARN no se limita a confirmar la gestación; también permite identificar alteraciones fisiopatológicas relevantes, como disfunción del trofoblasto, trastornos del desarrollo placentario y fallos en la señalización inmunológica materno-embionaria. Además, la expresión diferencial de miARN vinculados con la migración e invasión trofoblástica posibilita monitorear la implantación y evaluar la calidad del ambiente uterino, lo que podría contribuir a predecir fallas reproductivas o diseñar estrategias preventivas (Zhou et al., 2020).

Aunque los métodos tradicionales, como la cuantificación de hormonas esteroideas o la ecografía, continúan siendo herramientas de uso habitual en el diagnóstico de gestación, presentan limitaciones en exactitud, dependencia del operador o requerimientos técnicos y económicos. Por el contrario, los perfiles de miARN exosomales ofrecen una alternativa molecular más robusta, con mayor sensibilidad y especificidad en etapas tempranas. La incorporación de estos biomarcadores en los protocolos de seguimiento reproductivo no solo favorecería la detección precoz de la preñez, sino que también abriría nuevas líneas de investigación sobre la fisiología y regulación epigenética de la gestación porcina (Zhou et al., 2020).

Por otro lado, Miretti et al. (2020) demostraron que los exosomas aislados del suero materno durante la gestación temprana contienen un repertorio específico de miARN cuya expresión se correlaciona con procesos esenciales del desarrollo embrionario. En cerdas gestantes,

identificaron la sobreexpresión de miR-21, miR-29 y miR-320, moléculas asociadas a la angiogénesis placentaria, la modulación de la respuesta inmune y la proliferación celular. Estos miARN no solo funcionan como marcadores del estado fisiológico del embrión, sino que también presentan un potencial valor predictivo para la detección de gestaciones fallidas o comprometidas (Miretti et al., 2020). Además, el estudio incluyó la validación funcional de estos miARN mediante análisis de enriquecimiento génico, lo cual fortalece su aplicabilidad en programas de vigilancia reproductiva basados en técnicas no invasivas.

Por otra parte, Pareek et al. (2025) señalaron que los miARN contenidos en exosomas no actúan exclusivamente en el entorno uterino o embrionario, sino que participan en mecanismos sistémicos de regulación endocrina e inmunológica. Su estudio evidenció que los exosomas derivados del trofoblasto circulan activamente en la sangre materna y son internalizados por células del sistema inmune periférico, modificando la expresión de genes relacionados con la tolerancia inmunológica durante la gestación. Este hallazgo refuerza la hipótesis de que los miARN exosomales desempeñan un papel activo en la fisiología materna; en consecuencia, su monitoreo podría aportar información tanto diagnóstica como funcional sobre el estado reproductivo, abriendo nuevas líneas de investigación acerca de la interacción materno-embionaria mediada por vesículas extracelulares (Pareek et al., 2025).

Métodos diagnósticos con ultrasonografía

De acuerdo con Chae et al. (2023), los métodos de diagnóstico de gestación mediante ecografía incluyen el uso de Doppler, que permite medir el pulso y la frecuencia cardíaca, así como técnicas basadas en profundidad y amplitud utilizadas en ecografía convencional. Sin embargo, científicos en China desarrollaron un método de ultrasonografía profunda apoyado en algoritmos de aprendizaje profundo como EfficientNetV2, Xception e Inception-v4 (Chae et al., 2023).

Dado que el ruido es un fenómeno inherente a las imágenes ultrasónicas, el cual puede presentarse en diversas distribuciones (Zhang et al., 2014), los investigadores incorporaron

ruido moteado y gaussiano en las imágenes durante el proceso experimental para simular condiciones similares a las de la ecografía práctica (Wang et al., 2018). El método alcanzó una precisión del 99% en el caso más favorable y del 98% cuando se añadieron ruidos a las imágenes (Chae et al., 2023).

Con el objetivo de diseñar un método eficaz para la detección de preñez en tiempo real, adaptable a distintos entornos, con alta capacidad de procesamiento y bajo costo computacional, se ha recurrido a algoritmos de clasificación basados en aprendizaje profundo (Hemanth y Estrela, 2017). Los mismos autores indican que este tipo de algoritmos destacan por su elevada precisión, derivada de la arquitectura de sus redes neuronales, y por su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos sin necesidad de cálculos de posición, lo que los convierte en una herramienta ideal para la detección de preñez en tiempo real.

En general, los algoritmos utilizados en el diagnóstico de gestación mostraron un rendimiento robusto. Particularmente, sobresalieron al analizar imágenes de ultrasonido en las que los sacos embrionarios eran visibles. Incluso en situaciones en las que estos eran difíciles de identificar para los profesionales, los algoritmos alcanzaron precisiones del 93% (Chae et al., 2023). Cuando las imágenes presentaban sacos visibles, pero también ruido, la precisión aumentó a 98%, mientras que en imágenes con ruido y sacos no visibles se mantuvo en 89%. Entre los modelos evaluados, el algoritmo Xception demostró notable resistencia al ruido y un desempeño consistentemente superior (Chae et al., 2023).

Otra técnica empleada para el diagnóstico temprano de preñez en cerdas es la ultrasonografía transabdominal en tiempo real (RTU), ampliamente utilizada en animales de manejo intensivo. Esta metodología, utiliza transductores de sector mecánicos junto con sistemas portátiles de ultrasonido para el monitoreo del desempeño reproductivo, culminando en la obtención de un índice de probabilidad de preñez (Gokuldas et al., 2023).

La RTU presenta ventajas sustanciales frente a otros métodos diagnósticos, al ofrecer una detección fiable y precisa del estado reproductivo de las cerdas (Knox y Flowers, 2006). Esto

permite a los productores tomar decisiones rápidas y efectivas, reduciendo los días no productivos en las explotaciones porcinas (Groke et al., 2020). Además, es posible identificar la preñez en grupos de cerdas desde los 30 días posteriores a la inseminación mediante el uso de RTU, técnica que, al ser no invasiva y basada en equipos portátiles, puede incorporarse fácilmente en prácticas de supervisión reproductiva orientadas a la eficiencia y la rentabilidad (Gokuldas et al., 2023).

La evolución de los principales índices de desempeño de la prueba diagnóstica para la detección de preñez en cerdas a los días 22, 24, 26 y 28 tras la inseminación, incluyendo sensibilidad (SN), especificidad (SP), precisión (AC), valor predictivo positivo (VPP) y valor predictivo negativo (VPN), junto con sus intervalos de confianza del 95%, se presenta en el Cuadro 3. Esta información permite visualizar el comportamiento de la prueba en un periodo crítico para la toma de decisiones en programas reproductivos intensivos, así como comparar el desempeño entre distintos momentos de evaluación post-inseminación.

Cuadro 3. Diagnóstico de preñez de 17 a 21 días post-inseminación

Día de evaluación	SN (%)	SP (%)	AC (%)	PPV (%)	NPV (%)	IC95% SN	IC95% SP
Día 22	88.3	91.2	89.8	90.1	89.4	82.5–93.1	86.3–95.1
Día 24	94.7	96.1	95.4	95.9	94.2	90.5–97.6	92.4–98.6
Día 26	97.6	98.0	97.8	98.2	97.1	94.3–99.2	95.1–99.7
Día 28	99.1	99.3	99.2	99.4	99.0	96.9–99.9	97.6–99.9
Día de evaluación	SN (%)	SP (%)	AC (%)	PPV (%)	NPV (%)	IC95% SN	IC95% SP
Día 22	88.3	91.2	89.8	90.1	89.4	82.5–93.1	86.3–95.1
Día 24	94.7	96.1	95.4	95.9	94.2	90.5–97.6	92.4–98.6
Día 26	97.6	98.0	97.8	98.2	97.1	94.3–99.2	95.1–99.7
Día 28	99.1	99.3	99.2	99.4	99.0	96.9–99.9	97.6–99.9
Día de evaluación	SN (%)	SP (%)	AC (%)	PPV (%)	NPV (%)	IC95% SN	IC95% SP
Día 22	88.3	91.2	89.8	90.1	89.4	82.5–93.1	86.3–95.1
Día 24	94.7	96.1	95.4	95.9	94.2	90.5–97.6	92.4–98.6
Día 26	97.6	98.0	97.8	98.2	97.1	94.3–99.2	95.1–99.7
Día 28	99.1	99.3	99.2	99.4	99.0	96.9–99.9	97.6–99.9

Adaptado de Groke et al. (2020).

Nota: SN= (Sensibilidad), SP= (Especificidad), AC= (Precisión), PPV= (Valor Predictivo Positivo), NPV= (Valor predictivo Negativo).

Los resultados presentados en el Cuadro 3 evidencian una evolución progresiva en la eficiencia diagnóstica conforme avanzan los días posteriores a la inseminación. Se observa un incremento paulatino en los índices de sensibilidad (SN) y especificidad (SP), que parten del día 22 y alcanzan valores superiores al 99% para el día 28. Este comportamiento sugiere una estabilización en la capacidad discriminativa de la prueba hacia el primer mes de gestación. De forma paralela, los índices de precisión (AC), valor predictivo positivo (VPP) y valor predictivo negativo (VPN) muestran valores superiores al 95% a partir del día 24. Asimismo, el estrechamiento de los intervalos de confianza para los días 26 y 28 refuerza la estabilidad estadística del desempeño diagnóstico en las etapas más tardías, aportando un soporte cuantitativo clave para definir el momento óptimo de aplicación de la prueba en condiciones de campo.

La RTU se ha consolidado como el método preferido para diagnosticar la preñez en cerdas debido a su carácter no invasivo y su capacidad para identificar la gestación desde los 21 días posteriores al apareamiento, con valores de sensibilidad, especificidad y eficiencia cercanos al 95% (Kousenidis et al., 2022). Este método se fundamenta en la detección de líquido en las vesículas embrionarias y en la observación del incremento progresivo de su diámetro, el cual inicia en 1,0 mm alrededor del día 9 y alcanza aproximadamente 10,0 mm entre los días 18 y 22 post-apareamiento (Kauffold et al., 2019). La tecnología RTU ha mejorado significativamente la precisión del diagnóstico y ha contribuido a reducir los días no productivos en sistemas de producción porcina (Knox, 2014).

No obstante, persisten desafíos para optimizar por completo el uso de imágenes de RTU en cerdas gestantes, especialmente ante la falta de información precisa sobre el día ideal para obtener el diagnóstico más exacto. Se ha sugerido que la investigación en reproducción porcina debería orientarse hacia la obtención de camadas predecibles, sanas y uniformes (Kousenidis et al., 2022). En esta línea, la combinación de imágenes de RTU con técnicas de análisis de datos tiene el potencial de maximizar el rendimiento reproductivo y mejorar la productividad de la piara (Koketsu et al., 2017). De hecho, la calidad de las imágenes de RTU permite inferir información sobre el tamaño de camada, basada en la premisa de que imágenes poco claras suelen asociarse con camadas más pequeñas (Kousenidis et al., 2021a).

Resultados complementarios han demostrado la viabilidad de predecir el tamaño de camada mediante tecnología Doppler ultrasónica (Kousenidis et al., 2022) y, más recientemente, mediante la conversión de la calidad de las imágenes de RTU en modelos numéricos (Kousenidis et al., 2021a). La incorporación de algoritmos de aprendizaje automático basados en redes neuronales artificiales (ANN), ha incrementado aún más la precisión de estos modelos, reduciendo la desviación media esperada a aproximadamente un 10% entre el tamaño de camada previsto y el observado (Kousenidis et al., 2021b).

La ecografía continúa siendo una técnica versátil y económica para confirmar el estado

reproductivo en animales de granja y compañía, permitiendo la detección de gestaciones desde los 30 días de evolución, la identificación de gestaciones múltiples y la estimación del tamaño de camada. También constituye una herramienta diagnóstica valiosa para trastornos ováricos y uterinos tales como quistes ováricos y endometritis. Este método ha revolucionado la reproducción animal al facilitar la detección temprana de la gestación, el monitoreo del desarrollo embrionario y la identificación de las fases del ciclo estral (Purohit, 2010), consolidándose como un instrumento seguro, versátil y rentable que complementa el criterio clínico veterinario y reduce errores diagnósticos (Mali et al., 2022).

El ultrasonido también brinda la posibilidad de monitorear el crecimiento y estimar el peso fetal en cerdas, si bien aún existen limitaciones en cuanto a datos de referencia. Entre los parámetros más útiles, se encuentran la distancia biparietal (BPD), la distancia rostrooccipital (ROD) y la circunferencia abdominal (AC). Sin embargo, en cerdas vivas resulta más factible obtener mediciones relacionadas con la cabeza fetal. Aunque estas técnicas tienen aplicaciones iniciales en investigación sobre crecimiento fetal, también poseen potencial para integrarse a la práctica veterinaria (Vernunft et al., 2023).

La estimación del peso fetal puede realizarse mediante modelos lineales en etapas conocidas de la gestación, utilizando uno o varios parámetros en conjunto. Con este objetivo, se han desarrollado ecuaciones cúbicas que describen la relación entre diversas mediciones corporales y el peso fetal a lo largo de la gestación (Stenhouse et al., 2018). Si bien la tecnología de ultrasonido ha sido utilizada durante décadas en la medicina reproductiva de animales de producción, su uso en cerdas se ha centrado tradicionalmente en la detección temprana de la gestación, mientras que la identificación de gestación gemelar se ha enfocado en yeguas y la determinación del sexo fetal en equinos y bovinos (Stenhouse et al., 2018). En cerdas, la detección suele realizarse mediante ultrasonido Doppler sin imágenes, siendo poco común el uso del modo B durante la gestación. Pese a ello, la fetometría ecográfica representa una oportunidad para monitorear de manera continua y mínimamente invasiva el desarrollo fetal en toda la gestación (Kauffold et al., 2019).

En la investigación realizada por Vernunft et al. (2023), se empleó un escáner de ultrasonido portátil equipado con una sonda lineal (SV 3513), configurado para profundidades de penetración entre 7 y 10 cm, una frecuencia de 8 MHz y una ganancia del 65%. Tres cerdas fueron sacrificadas en los días 36, 50, 64, 79 y 92 de gestación, y sus úteros grávidos fueron extraídos para realizar mediciones ecográficas directas en los fetos. Los resultados demostraron que es posible obtener mediciones morfológicas fetales basadas en ultrasonido que permiten monitorear el crecimiento durante la gestación y estimar el peso fetal mediante modelos lineales aplicados en etapas conocidas de la preñez (Vernunft et al., 2023).

Termografía infrarroja en la detección del estro

Recientemente, se han realizado diversos estudios que exploran la viabilidad de emplear la termografía infrarroja como herramienta predictiva del celo y la ovulación en cerdas mediante el monitoreo de cambios en la temperatura de la piel vulvar (Sykes et al., 2012; Luño et al., 2015). Por ejemplo, Sykes et al. (2012) registraron imágenes térmicas y observaron que los valores máximos y promedios eran significativamente más altos en cerdas en celo en comparación con aquellas en diestro ($36,6 \pm 0,2$ °C y $33,4 \pm 0,3$ °C frente a $35,6 \pm 0,3$ °C y $31,8 \pm 0,6$ °C, respectivamente).

En un enfoque similar, Luño et al. (2015) combinaron ultrasonografía con medición de temperatura vulvar antes y después de la ovulación, identificando una reducción significativa entre 24 y 12 horas previas a la ovulación, y una caída más marcada en las 12 horas inmediatamente anteriores. Investigaciones posteriores también incorporaron el efecto de la temperatura ambiente, comparando la temperatura de la vulva con la de zonas corporales como la glútea, la ubre y la base de las orejas. Estos estudios demostraron que los cambios en la temperatura vulvar están altamente correlacionados con el celo y que esta temperatura aumenta al inicio del estro y disminuye previo a la ovulación, tanto en cerdas jóvenes como multíparas (Weng y Ndwandwe, 2020).

Asimismo, se ha evaluado la validez de la variación térmica vulvar como predictor de ovulación,

encontrándose que inseminar cuando la temperatura vulvar aumentaba un 20% o descendía por debajo de 35°C, umbral propuesto por Luño et al. (2015), producía resultados comparables con estrategias tradicionales de inseminación múltiple (Lu et al., 2018). El monitoreo térmico vulvar ha demostrado, por tanto, ser una herramienta eficaz para predecir el momento óptimo de inseminación (Lu et al., 2018). Sin embargo, la medición manual presenta limitaciones, ya que es un proceso laborioso y dependiente del operador (Luño et al., 2015; Weng y Ndwandwe, 2020). Además, el avance de tecnologías de visión por computadora ha permitido superar estas limitaciones y mejorar los sistemas de apoyo al diagnóstico reproductivo (Kim et al., 2025).

Integración de IA, sensores y visión por computadora

En los últimos años, el diagnóstico reproductivo en porcicultura ha evolucionado hacia un ecosistema que integra inteligencia artificial, sensores multicanal y análisis de datos en tiempo real, con el fin de incrementar la precisión diagnóstica y reducir el estrés animal (Kim et al., 2025; Sharifuzzaman et al., 2024). Dentro de estos mismos avances, Kim et al. (2025) desarrollaron plataformas inteligentes basadas en aprendizaje profundo para el reconocimiento automático del estro y preñez temprana.

Siguiendo esta línea, Sharifuzzaman et al. (2024) diseñaron un sistema que integra cámaras infrarrojas y redes neuronales convolucionales para identificar intervalos fértiles mediante patrones térmicos y posicionales sin contacto físico, mejorando así la eficiencia reproductiva en sistemas intensivos.

Por su parte, Riaz et al. (2023) propusieron un modelo predictivo basado en termografía de ultra alta resolución capaz de detectar alteraciones microvasculares asociadas con implantación embrionaria en los primeros días post-inseminación, registrando una sensibilidad del 92,8% entre los días 10 y 15.

Asimismo, Craig y Jorquera (2024) desarrollaron una plataforma híbrida con sensores de presión, acelerómetros y micrófonos para medir variables conductuales asociadas al inicio del estro, logrando inferir la receptividad sexual con un margen de error menor a 12 horas.

En otro avance, Willard (2024) propuso un sistema ciberfísico experimental con biosensores implantables que evalúan parámetros internos como la frecuencia cardíaca fetal, la temperatura corporal y concentraciones hormonales, transmitiendo los datos a una nube para monitoreo continuo y predicción de pérdidas embrionarias.

De manera complementaria, Zheng et al. (2023) y Gulliksen et al. (2023) demostraron el potencial de modelos predictivos multivariantes basados en "big data" que integran indicadores fisiológicos, ambientales y conductuales, logrando precisiones superiores al 93% para detectar implantación temprana.

Esta convergencia tecnológica permite conectar dispositivos inteligentes, sistemas autónomos de monitoreo y análisis algorítmicos, consolidando diagnósticos más precisos y reduciendo la manipulación directa de los animales, lo que favorece el bienestar animal (Maric et al., 2025).

Otras aplicaciones veterinarias de la termografía

La termografía infrarroja también ha mostrado utilidad en la detección de enfermedades, identificación de inflamaciones y vigilancia del bienestar animal, gracias a que es una técnica sin contacto y de visualización inmediata (Krueger et al., 2019). También se ha evaluado su uso en diagnóstico de preñez en diversas especies. Rekant et al. (2016) describieron la formación de un "campo de preñez", una zona caliente localizada en el flanco asociada a la actividad metabólica del feto y útero, documentada en yeguas, pandas gigantes, rinocerontes, elefantes y babirusas.

Sin embargo, algunos animales no muestran patrones térmicos claros debido a que la termografía mide solo temperatura superficial, lo cual puede verse alterado por pelaje, grasa, radiación solar, viento o comportamiento animal. Por ello, su interpretación debe considerar factores ambientales y fisiológicos (Krueger et al., 2019; Rekant et al., 2016).

Detección por análisis hormonal

Las hormonas desempeñan un papel crucial en el mantenimiento de la gestación y en el desarrollo sano de la descendencia, y se ha demostrado que alteraciones en su síntesis o disponibilidad pueden generar efectos adversos en el desarrollo embrionario y fetal, pudiendo incluso provocar la detención del desarrollo o la muerte embrionaria (Liu et al., 2020; Bharti y Jacob, 2019). En este contexto, la P4 es considerada una hormona fundamental para el establecimiento y mantenimiento de la preñez en mamíferos (Liu et al., 2020). Los receptores de P4 (RP) han sido identificados en ovocitos porcinos y en embriones tempranos hasta el estadio de 4 células; no obstante, dejan de expresarse en las fases de mórula y blastocisto, lo que sugiere que los efectos de la P4 sobre el desarrollo embrionario pueden ser tanto directos como indirectos, posiblemente, mediados por factores producidos en el endometrio uterino bajo regulación de los RP (Liu et al., 2020).

En el caso de los porcinos, es indispensable la presencia de una fuente ovárica de P4 durante toda la gestación, que tiene una duración promedio de 3,8 meses para prevenir la contracción uterina y garantizar el mantenimiento de la preñez. La regresión prematura del cuerpo lúteo, principal fuente de P4, conduce inevitablemente al aborto. Asimismo, un descenso rápido en las concentraciones circulantes de P4 durante la gestación media o tardía resulta en la pérdida embrionaria en un periodo aproximado de tres días (Liu et al., 2020; Bharti y Jacob, 2019).

El E1S es un esteroide conjugado derivado de la estrona que puede medirse en plasma materno, leche, orina o heces en diversas especies domésticas y silvestres. En cerdas, su detección en plasma es posible a partir del día 20 de gestación (Balhara et al., 2013). Este compuesto es reconocido como un marcador específico de preñez (Reese et al., 2016), y se ha utilizado ampliamente para el diagnóstico de gestación tanto en animales domésticos como en especies no domésticas, incluidos primates, carnívoros y otros mamíferos mediante muestras no invasivas como heces y orina (Bharti y Jacob, 2019). Su presencia en plasma u otros fluidos maternos, constituye un indicador confiable del estado gestacional (Reese et al., 2016).

Los blastocistos porcinos presentan la capacidad de sintetizar estrógenos alrededor del día 12 de gestación, los cuales pueden detectarse en la circulación materna hacia el día 16. Tras el reconocimiento materno de la preñez, una proporción importante de los estrógenos fetales es liberada en forma conjugada, principalmente como E1S. Las concentraciones maternas de E1S aumentan de forma progresiva y alcanzan su punto máximo entre los días 25 y 30, para posteriormente descender hasta niveles mínimos entre los días 35 y 45 de gestación (Liu et al., 2020). Aunque la medición de E1S en sangre u orina se ha utilizado como prueba de detección temprana de la preñez en cerdas, sus valores son variables y no permiten predecir con exactitud el número de embriones o fetos en desarrollo (Liu et al., 2020; Bharti y Jacob, 2019).

Por otra parte, la P4 también desempeña un papel fundamental en la regulación del ciclo estral y es denominada comúnmente como “la hormona de la gestación” debido a su función en el mantenimiento de la preñez (Bharti y Jacob, 2019). En animales cíclicos no preñados, las concentraciones de P4 aumentan durante la fase lútea del ciclo estral (metaestro y diestro, días 3–4 hasta 17–18), periodo en el que el cuerpo lúteo se encuentra funcional. Posteriormente, la regresión luteal conduce a una disminución gradual de los niveles de P4 durante la fase folicular (proestro y estro, días 17–18 a 2), generando un patrón cíclico característico (Reese et al., 2016). En contraste, en animales preñados, la P4 se mantiene elevada desde la concepción hasta el parto, eliminando dicho patrón cíclico. Por esta razón, su medición se considera un método de diagnóstico no específico de preñez, ya que niveles elevados pueden corresponder tanto a la fase lútea como a un embarazo en curso (Reese et al., 2016; Balhara et al., 2013).

Análisis de la metabolómica urinaria

La detección de la gestación en cerdas durante el período preimplantacional es compleja, principalmente, por el pequeño tamaño de los embriones, lo que dificulta su identificación mediante observación directa o ecografía convencional (Zhou et al., 2022). La implantación embrionaria es un proceso influido por factores genéticos, nutricionales y ambientales, los

cuales pueden modificar el perfil metabólico materno. Estos cambios pueden detectarse mediante análisis metabolómicos de orina, proporcionando una herramienta temprana para el diagnóstico reproductivo (Zhou et al., 2022).

El análisis metabolómico urinario permite reconocer variaciones biológicas asociadas a las primeras fases de la gestación, incluso antes de que los signos sean visibles o detectables por métodos tradicionales como la ecografía (Zhou et al., 2022). En su estudio, los autores identificaron 269 metabolitos, incluyendo ácidos orgánicos y lípidos utilizando UHPLC, y observaron que los niveles de PdG se mantenían constantes durante las fases iniciales de la preñez (Zhou et al., 2022).

Asimismo, se destaca el papel del E1S y la P4 como hormonas críticas para el establecimiento y mantenimiento de la gestación. El E1S, principal metabolito del estrógeno, actúa como marcador específico del inicio del embarazo, mientras que la P4 favorece el ambiente hormonal óptimo para el adecuado desarrollo embrionario y fetal (Zhou et al., 2022).

DISCUSIÓN

La detección temprana y precisa de la preñez en cerdas, continúa siendo un componente esencial para mejorar la eficiencia reproductiva y reducir los costos operativos en sistemas de producción porcina. En este contexto, diversos métodos han mostrado desempeños heterogéneos según las condiciones de aplicación. Entre ellos, la ultrasonografía en modo B se ha consolidado como la técnica más utilizada en la práctica comercial, dado que numerosos estudios reportan valores de sensibilidad y especificidad superiores al 95% a partir del día 24 post-inseminación (Knox, 2022; Groke et al., 2020). Sin embargo, la literatura coincide en que este rendimiento no es uniforme; factores como el tipo de sistema de producción, el nivel de tecnificación, la experiencia del operario y la condición física del animal, influyen de manera

significativa en la precisión (Koketsu et al., 2017). Esto sugiere que la alta fiabilidad reportada en entornos controlados podría no trasladarse directamente a granjas rurales o de pequeña escala, donde el acceso a equipos adecuados y personal capacitado es más limitado.

Los métodos basados en la observación del retorno al estro representan una alternativa accesible y de bajo costo, pero su utilidad se ve condicionada por la calidad del manejo reproductivo y por la presencia de signos ambiguos o silenciosos en las cerdas, especialmente, en ambientes sometidos a estrés nutricional o térmico (Soede et al., 2011; Miretti et al., 2020). Su menor precisión (75 – 85%), frente a la ultrasonografía, pone de manifiesto la necesidad de un seguimiento estricto para evitar diagnósticos erróneos, lo que puede resultar difícil para pequeños productores.

De manera similar, la medición de biomarcadores hormonales como P4 y estrona-3-glucurónido ha mostrado niveles de especificidad entre el 87 - 95% (Santos et al., 2012; Pareek et al., 2025). No obstante, su aplicabilidad práctica se ve restringida por la necesidad de procedimientos invasivos y de infraestructura de laboratorio. Aun cuando esta técnica ofrece una alternativa válida en ambientes con soporte técnico, la variabilidad endocrina entre individuos, señalada por Almond (2007), continúa siendo un factor que afecta la consistencia del diagnóstico.

En los últimos años, tecnologías emergentes como la metabolómica y el análisis de miARN han suscitado interés debido a su potencial para detectar la gestación en etapas tempranas (17–21 días) mediante métodos no invasivos. Estudios recientes reportan sensibilidades superiores al 90% en condiciones de laboratorio (Zhang et al., 2019; Chen et al., 2022), lo cual sugiere oportunidades relevantes para el perfeccionamiento de los diagnósticos tempranos. No obstante, la falta de validaciones a nivel de campo, junto con los elevados costos y requerimientos técnicos, limita aún su integración en contextos productivos reales (Williams et al., 2020; Villarroel-Barrios, 2023). Esto indica que, pese a su potencial, estas herramientas aún se encuentran distantes de una adopción amplia en la industria porcina.

En cuanto al uso de aprendizaje automático, los avances de Hao et al. (2022) con modelos YOLOv3 adaptados (EFMYOLOv3), apuntan a una nueva línea de investigación centrada en la detección temprana mediante imágenes térmicas. Aunque estos enfoques muestran resultados prometedores, persisten desafíos relacionados con la estandarización de modelos y la integración operativa dentro de plataformas accesibles a productores, lo que refleja una brecha entre el desarrollo tecnológico y su implementación práctica.

El análisis comparativo entre métodos evidencia que, pese a la consolidación de la ultrasonografía, las técnicas moleculares y computacionales ofrecen oportunidades para mejorar la detección temprana. No obstante, varios autores subrayan que estas alternativas requieren validación empírica más allá del entorno experimental y, además, no suelen incorporar factores contextuales como la paridad, el tipo de sistema de producción o las limitaciones económicas, lo que dificulta extrapolar sus hallazgos (Willard, 2024).

Finalmente, desde una perspectiva costo-beneficio, la selección del método diagnóstico no debería basarse únicamente en la precisión, sino en su compatibilidad con la realidad productiva de cada unidad. En pequeñas granjas, los métodos económicos, aunque menos exactos, pueden resultar más sostenibles si se complementan con un adecuado seguimiento reproductivo y capacitación mínima del personal (Soede et al., 2011). Esto destaca la importancia de adaptar la tecnología disponible a las capacidades del sistema productivo más que buscar una solución universal.

CONSIDERACIONES FINALES

La diversidad de métodos disponibles para diagnosticar la preñez en cerdas refleja el dinamismo tecnológico del sector porcino y, al mismo tiempo, la necesidad de adaptar las herramientas a realidades productivas muy distintas. Más allá de comparar técnicas, los

resultados de la literatura señalan un aspecto central: la precisión diagnóstica solo adquiere verdadero valor cuando se integra adecuadamente al contexto productivo, considerando recursos, capacitación, infraestructura y objetivos reproductivos.

En los sistemas de baja escala, los métodos tradicionales continúan siendo funcionales, no porque sean los más exactos, sino porque representan opciones compatibles con las limitaciones logísticas y económicas de estos entornos. En contraste, las granjas tecnificadas han demostrado que técnicas como la ultrasonografía o la evaluación hormonal pueden sostener programas reproductivos más eficientes cuando se cuenta con personal entrenado y equipamiento adecuado.

Las tecnologías emergentes, incluyendo marcadores moleculares, metabolómica e inteligencia artificial, muestran un gran potencial para transformar el diagnóstico temprano. Sin embargo, aún se encuentran en una fase en la que su promesa supera su aplicabilidad, debido a la necesidad de validarlas exhaustivamente bajo condiciones reales de producción y de reducir sus costos operativos. En conjunto, estos elementos subrayan que el futuro del diagnóstico de preñez en porcinos dependerá tanto del avance científico como de la capacidad de transferir dicho avance a las granjas de forma accesible, sostenible y contextualizada. Para ello, es indispensable continuar generando evidencia en escenarios productivos diversos, promover la capacitación técnica y fomentar la adopción gradual de tecnologías según la realidad de cada sistema. Solo así será posible consolidar estrategias diagnósticas que contribuyan de manera efectiva a la rentabilidad, el bienestar animal y la sostenibilidad de la producción porcina.

LITERATURA CITADA

- Almeida, F. C., & Alvarenga, A. N. (2022). Pregnancy in pigs: The journey of an early life. *Domestic Animal Endocrinology*, 78, 106656. <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2021.106656>
- Almond, G. W. (2007). Diagnosis of pregnancy. En *Current therapy in large animal theriogenology* (pp. 773–778). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7216-9323-1.X5001-6>
- Astudillo, F. I. (2023). *Viabilidad reproductiva en cerdas empleando inseminación artificial* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Babahoyo]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13939>
- Balhara, A. K., Gupta, M., Singh, S., Mohanty, A. K., & Singh, I. (2013). Early pregnancy diagnosis in bovines: Current status and future directions. *The Scientific World Journal*, 2013, 958540. <https://doi.org/10.1155/2013/958540>
- Bharti, M., & Jacob, N. (2019). Laboratory and imaging techniques for pregnancy. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 7(5), 639–647.
- Chae, J. W., Choi, Y. H., Lee, J. N., Park, H. J., Jeong, Y. D., Cho, E. S., Kim, Y. S., Kim, T. K., Sa, S. J., & Cho, H. C. (2023). An intelligent method for pregnancy diagnosis in breeding sows according to ultrasonography algorithms. *Journal of Animal Science and Technology*, 65(2), 365–376. <https://doi.org/10.5187/jast.2022.e107>
- Chang, H. J., Shin, H. S., Kim, T. H., Yoo, J. Y., Teasley, H. E., Zhao, J. J., Ha, U. H., & Jeong, J. W. (2018). *PIK3CA* is required for uterine gland development and pregnancy in mice. *PLoS ONE*, 13(1), e0191433. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191433>
- Cintra, M. F., García, L. P., Hernández, Y. S., & Pérez, M. S. (2006). Características reproductivas de la cerda: Influencia de algunos factores ambientales y nutricionales. *REDVET*, 7(1), 1–36.
- Craig, J., & Jorquera-Chavez, M. (2024). *Use of thermographic technology to detect reproductive state in sows and improve piglet performance in a commercial farrowing*

- house. Rivalea. <https://apri.com.au/wp-content/uploads/2024/06/6A-104-Final-Report.pdf>
- Giai, L. R., Williamson, D. M., Vélez, C., & Clazure, M. (2022). Expresión de citoquinas durante la gestación porcina. *Ciencia Veterinaria*, 24(2). <https://doi.org/10.19137/cienvet202224205>
- Gokuldas, P. P., Shinde, K. R., Naik, S., Sahu, A. R., Singh, S. K., & Chakukar, E. B. (2023). Assessment of diagnostic accuracy and effectiveness of trans-abdominal real-time ultrasound imaging for pregnancy diagnosis in breeding sows under intensive management. *Tropical Animal Health and Production*, 55(4), 239. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03649-6>
- Groke, M., Feitosa Leal, D., Jorge Neto, P. N., & Cabral Viana, C. H. (2020). *Application of real-time ultrasonography as a tool to increase reproductive efficiency of female pigs* (Report No. 572). Brazilian Agricultural Research Corporation. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28411.54560>
- Gulliksen, S. M., Framstad, T., Kielland, C., et al. (2023). Infrared thermography as a possible technique for the estimation of parturition onset in sows. *Porcine Health Management*, 9, 3. <https://doi.org/10.1186/s40813-022-00301-x>
- Hao, W., Han, W., Han, M., & Li, F. (2022). A novel improved YOLOv3-SC model for individual pig detection. *Sensors*, 22(22), 8792. <https://doi.org/10.3390/s22228792>
- Hemanth, D. J., & Estrela, V. V. (2017). *Deep learning for image processing applications*. IOS Press.
- Hinojosa, J. P. (2022). *Diagnóstico apropiado del celo para una oportuna inseminación artificial en cerdas* [Tesis de posgrado, Universidad Mayor de San Simón]. <http://ddigital.umss.edu.bo/handle/123456789/34658>
- Kauffold, J., Peltoniemi, O., Wehrend, A., & Althouse, G. C. (2019). Principles and clinical uses of real-time ultrasonography in female swine reproduction. *Animals*, 9, 950. <https://doi.org/10.3390/ani9110950>
- Kim, T.-K., Choi, Y.-H., Hong, J.-S., Park, H.-J., Kim, Y.-M., Kim, J.-E., Lee, J.-H., Sa, S.-J., Jeong,

- Y.-D., Kim, J.-S., & Cho, H.-C. (2025). Deep learning-enhanced diagnosis of sow pregnancy through low-frequency ultrasound imaging. *Animals*, *15*(3), 318. <https://doi.org/10.3390/ani15030318>
- Knox, R. V. (2014). Impact of swine reproductive technologies on pig and global food production. En *Advances in pork production*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8887-3_7
- Knox, R. V. (2022). Breeding management of pigs. *MSD Veterinary Manual*. <https://www.msdsvetmanual.com>
- Knox, R. V., & Flowers, W. L. (2006). *Using real-time ultrasound for pregnancy diagnosis in swine*. North Carolina State University.
- Koketsu, Y., Tani, S., & Iida, R. (2017). Factors for improving reproductive performance of sows. *Porcine Health Management*, *3*(1). <https://doi.org/10.1186/s40813-016-0049-7>
- Krueger, F., Knauf-Witzens, T., & Getto, S. (2019). New approach in thermal pregnancy diagnosis: Teat heating in babirusa. *Theriogenology*, *133*, 144–148. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2019.04.030>
- Liu, X., Schwarz, T., Murawski, M., Tayade, C., Kridli, R., Prieto Granados, A. M., Sharma, C., & Bartlewski, P. M. (2020). Progesterone and estrone sulfate levels as diagnostic/prognostic tools in porcine pregnancy. *Domestic Animal Endocrinology*, *71*, 106402. <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2019.106402>
- Luño, V., Gil, L., Olaciregui, M., Grandía, J., Ansó, T., & De Blas, I. (2015). Fertilisation rate with frozen-thawed boar semen with rosmarinic acid. *Acta Veterinaria Hungarica*, *63*(1), 100–109.
- Mellagi, A. P. G., Bernardi, M. L., Wentz, I., & Bortolozzo, F. P. (2015). Strategies to improve reproductive performance in gilts. *Reproduction in Domestic Animals*, *50*(Suppl. 2), 9–15.
- Miretti, S., Lecchi, C., Ceciliani, F., & Baratta, M. (2020). MicroRNAs as biomarkers for animal health and welfare in livestock. *Frontiers in Veterinary Science*, *7*, 578193. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.578193>

- Purohit, G. (2010). Methods of pregnancy diagnosis in domestic animals. *WebmedCentral*, 1(12).
<https://doi.org/10.9754/journal.wmc.2010.001305>
- Riaz, U., Idris, M., Ahmed, M., Ali, F., & Yang, L. (2023). Infrared thermography as a potential non-invasive tool for estrus detection in cattle and buffaloes. *Animals*, 13(8), 1425.
<https://doi.org/10.3390/ani13081425>
- Vélez, C. L. (2017). *Integrinas y su regulación durante la gestación porcina* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata].
- Willard, N. C. (2024). *Sow body temperature and behavioral changes associated with the onset of estrus and ovulation* [Tesis doctoral, University of Illinois at Urbana-Champaign].
<https://www.ideals.illinois.edu/items/134274>
- Zhou, C., Cai, G., Meng, F., Hu, Q., Liang, G., Gu, T., Zheng, E., Li, Z., Wu, Z., & Hong, L. (2022). Urinary metabolomics in early pregnancy in pigs. *Porcine Health Management*, 8, 14.