

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD XOCHIMILCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA Y ANIMAL

LICENCIATURA EN MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

INFORME FINAL DE SERVICIO SOCIAL

**Termoestabilidad en el lechón recién nacido y su madre: mecanismos de termorregulación, cambios microcirculatorios durante el parto, estrategias empleadas para reducir la pérdida de calor y factores que contribuyen en la hipotermia del neonato**

Prestador Del Servicio Social:



Jocelyn Gómez Prado

Matricula: 2173025424

ASESOR:



Interno: Dr. Daniel Mota Rojas

Número Económico: 26806

LUGAR DE REALIZACIÓN:

Biblioteca digital de la UAM y Departamento de Producción Agrícola y Animal de la Universidad Autónoma Metropolitana (100% en línea – Proyecto emergente UAMX)

Tiempo de dedicación: 480 horas.

**Fecha de inicio y término:**

12 de octubre, 2021 – 12 de abril 2022.

## ÍNDICE

1. RESUMEN
2. INTRODUCCIÓN
3. JUSTIFICACIÓN
4. MARCO TEÓRICO
5. OBJETIVO GENERAL
6. OBJETIVOS ESPECIFICOS
7. METODOLOGÍA UTILIZADA
8. ACTIVIDADES REALIZADAS
9. OBJETIVOS Y METAS ALCANZADAS
10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN
  - 10.1. Capítulo 1— Mecanismos y conductas de termorregulación frente al estrés calórico presentes en los cerdos adultos
    - 10.1.1. Introducción
    - 10.1.2. Material y métodos
    - 10.1.3. Aspectos anatomofisiológicos y termorregulación en el cerdo adulto: respuestas fisiológicas y conductuales
    - 10.1.4. Perspectivas
    - 10.1.5. Conclusiones
  - 10.2. Capítulo 2— Cambios de temperatura en la cerda durante el parto y su causalidad
    - 10.2.1. Introducción
    - 10.2.2. Material y métodos
    - 10.2.3. Cambios de temperatura en la cerda durante el parto: fisiológicos, asociados a enfermedad o a estrés por calor
      - 10.2.3.1. Consecuencias del cambio de temperatura asociado al estrés por calor
      - 10.2.3.2. Aplicación del estudio de los cambios de temperatura originados por el síndrome de disgalactia posparto
    - 10.2.4. Perspectivas
    - 10.2.5. Conclusiones
  - 10.3. Capítulo 3— Factores que influyen en la termoestabilidad del lechón recién nacido
    - 10.3.1. Introducción
    - 10.3.2. Material y métodos
    - 10.3.3. Aspectos anatomofisiológicos y la efectividad de los mecanismos de termorregulación en los lechones
      - 10.3.3.1. Termogénesis del BAT
      - 10.3.3.2. Termogénesis por temblor
      - 10.3.3.3. Conducta termorreguladora
    - 10.3.4. Factores que influyen en la termorregulación del lechón recién nacido
      - 10.3.4.1. Peso al nacimiento
      - 10.3.4.2. Retraso en el crecimiento intrauterino

- 10.3.4.3. Orden de nacimiento
- 10.3.4.4. Sexo
- 10.3.4.5. Raza
- 10.3.4.6. Ingesta de calostro
- 10.3.4.7. Factores ambientales: temperatura, velocidad del viento y tipo de suelo
- 10.3.4.8. Factores relacionados con la madre
- 10.3.5. Perspectivas
- 10.3.6. Conclusiones
- 10.4. Capítulo 4— Estrategias empleadas para reducir la pérdida de calor en el lechón recién nacido
  - 10.4.1. Introducción
  - 10.4.2. Material y métodos
  - 10.4.3. Estrategias empleadas para reducir la pérdida de calor
  - 10.4.4. Perspectivas
  - 10.4.5. Conclusiones
- 11. CONCLUSIONES GENERALES**
- 12. RECOMENDACIONES**
- 13. LITERATURA CITADA**
- 14. ARTÍCULO CIENTÍFICO**

## **1. RESUMEN**

Los mamíferos cuentan con mecanismos fisiológicos y conductuales que les permiten conservar su temperatura corporal central dentro de un estrecho rango; sin embargo, los cerdos, dadas sus características anatomofisiológicas, son susceptibles a experimentar estrés térmico tanto de lechones (hipotermia) como de adultos (hipertermia). Debido a la variación de la temperatura global por efecto del calentamiento global, esta situación además de representar una problemática para el bienestar animal de la especie implica pérdidas económicas de billones de dólares, pues el estrés térmico puede repercutir en la calidad de la carne (ej. conduciendo a carne PSE o DFD), la reproducción (ej. provocando una reducción en la tasa de fertilidad) y la productividad (ej. ocasionando un decremento en la ganancia de peso de los lechones por la disminución de la producción láctea). Por la misma razón, las unidades de producción porcícolas han puesto en práctica diferentes alternativas para evitar o mitigar el estrés térmico, demostrando así la relevancia de analizar la implementación de nuevas estrategias y de estudiar la termorregulación de esta especie. Es por ello que el objetivo del presente proyecto de Servicio Social fue evaluar la termoestabilidad en el lechón recién nacido y su madre, destacando los mecanismos de termorregulación, los cambios microcirculatorios durante el parto, los factores que contribuyen en la hipotermia del neonato y las estrategias empleadas para reducir la pérdida de calor.

## **2. INTRODUCCIÓN**

Desde finales del siglo XX se ha apreciado una mayor preocupación por adquirir productos cárnicos de calidad, que provengan de animales que hayan sido criados y sacrificados en sistemas de producción que funcionen bajo los conceptos de higiene, calidad ética, bienestar animal y sustentabilidad (Warriss et al., 2006; Cecchin et al., 2018;). No sólo los consumidores están dispuestos a pagar más por productos que garanticen el bienestar animal, sino que también, los propietarios de las granjas están interesados en conocer los efectos positivos de prácticas orientadas a entender las necesidades de los animales y mejorar el nivel de confort y bienestar de los animales, debido a las repercusiones económicas que pueden llegar a tener como resultado del incremento de la productividad, la ganancia de peso o la eficiencia reproductiva y la reducción de animales enfermos

y disminución de conductas patológicas en el lechón destetado o cerdo adulto (Henningsson et al., 2018; Gómez-Prado et al., 2022).

En el caso particular de los cerdos, esta especie puede ser expuesta a situaciones estresantes como el destete precoz (Lykhach et al., 2020) y la mezcla con congéneres desconocidos (Verdon et al., 2019). De igual forma, dadas sus características anatomofisiológicas (escasas glándulas sudoríparas funcionales y una capa gruesa de tejido adiposo subcutáneo), tiende a experimentar estrés térmico debido a su imposibilidad de perder calor a través del sudor (Mayorga et al., 2019).

El estrés térmico puede repercutir en el sistema endocrino reproductivo de las cerdas provocando retraso en el estro, reducción en la tasa de fertilidad, decremento en la ganancia de peso de lechones, disminución en la producción de leche, incremento en la pérdida de peso a través de la lactancia y aumento en la tasa de mortalidad (Cao et al., 2021). Por su parte, los lechones experimentan estrés cuando son sometidos a un entorno con una temperatura 10°C menor a la intrauterina, después de permanecer en un ambiente como el útero, donde se mantiene una temperatura relativamente constante (Herpin et al., 2002; McArthur & Ousey, 1994; Plush et al., 2016).

Los mamíferos cuentan con mecanismos fisiológicos (por ejemplo, la vasodilatación) y conductuales (por ejemplo, la búsqueda de sombra) que les permiten mantener su temperatura corporal central dentro de un estrecho rango (Mota-Rojas, et al., 2021). No obstante, se debe contemplar que esta especie es particularmente sensible a temperaturas ambientales elevadas, especialmente si por efecto del estrés se ven comprometidos otros mecanismos de termorregulación (Flores-Peinado et al., 2020), y que los neonatos no son capaces de desarrollar la termogénesis sin temblor por efecto del tejido adiposo pardo (Nowack et al., 2019). A nivel global, se estiman pérdidas económicas de billones de dólares por efecto de estrés térmico en los cerdos (St-Pierre et al., 2003). Ya sea que los cerdos sean expuestos a temperaturas altas o bajas, la calidad de su carne se puede ver afectada. Ante temperaturas bajas, los lechones recién nacidos titiritean, lo cual acelera el agotamiento de las reservas de glucógeno en músculo, contribuyendo a la incidencia de muerte por hipotermia, mientras que en el cerdo adulto un incremento del pH debido al mismo efecto de agotamiento de las reservas de glucógeno ocasionado por el estrés *antemortem* como el transporte y

la matanza, es resultado de carne oscura, firme y seca (DFD, por sus siglas en inglés). En cambio, frente a temperaturas elevadas o un estrés de tipo agudo donde el cerdo se encuentre en hiperglucemia justo previo a su muerte, incrementa las posibilidades de que el pH de la carne se reduzca drásticamente y como consecuencia aumenta el riesgo de que se obtenga carne pálida, suave y exudativa (PSE, por sus siglas en inglés) (Flores-Peinado et al., 2020).

Por lo tanto, es necesario adquirir conocimiento en torno al estrés térmico y los efectos que éste tiene sobre el bienestar y la productividad de los cerdos desde el nacimiento hasta su muerte en el rastro (Caldara et al., 2014; Sevegnani et al., 2016; Gómez-Prado et al., 2022). Por lo anteriormente señalado el objetivo del presente proyecto es evaluar la termoestabilidad en el lechón recién nacido y su madre, destacando los mecanismos de termorregulación, cambios microcirculatorios durante el parto, factores que contribuyen en la hipotermia del neonato y estrategias empleadas para reducir la pérdida de calor.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

Los lechones recién nacidos y los cerdos adultos presentan problemas para termorregularse. Por un lado, los lechones, quienes presentan dificultades para mantenerse en homeotermia, se muestran susceptibles a experimentar hipotermia; en cambio, los adultos son sensibles a altas temperaturas y les resulta difícil disipar el calor corporal frente a procesos de estrés. Considerando que la temperatura es clave ya que puede representar un reflejo del estado de salud del individuo y es un mecanismo de respuesta fisiológica frente a procesos sistémicos, como también de desbalances térmicos relacionados con estados emocionales negativos como el miedo, el dolor o la ansiedad y en general eventos estresantes de curso crónico o agudo. Por estos motivos todos ellos fundamentales, no solo para preservar la salud de los cerdos, sino también para incrementar su nivel de confort y bienestar es que este proyecto es interesante y novedoso. Por ello estudiar los factores que intervienen en la termoestabilidad de la madres y sus crías recién nacidas hasta alcanzar la edad adulta, no solo ayudaran a preservar la salud y el bienestar de los cerdos. Animales sanos y en equilibrio térmico serán más productivos, lo que sin duda repercutirá en mayor número de lechones por cerda por año y mayor número de cerdos al mercado,

beneficiado también el estado financiero del productor. Además, debido al creciente interés por asegurar que los animales de producción experimenten un buen nivel de bienestar, resulta indispensable identificar y analizar las situaciones que producen estrés térmico en los cerdos para posteriormente sugerir estrategias que mejoren tanto el bienestar animal como la productividad.

#### **4. MARCO TEÓRICO**

Se estima que en el periodo que abarca entre 1961 y 2013, la producción de monogástricos (cerdos y aves) contribuyó con el 30-53% de los alimentos de origen animal (Lassaletta et al., 2016). La producción global de cerdos se ha cuadruplicado en los últimos 50 años, debido a la creciente demanda de productos pecuarios, la automatización, el comercio de piensos baratos, así como las mejoras en torno a la genética y la alimentación (Gerber et al., 2010; Lassaletta et al., 2019). De acuerdo con Alexandratos y Bruinsma (2012), se espera que la producción porcícola continúe incrementando durante las siguientes tres décadas.

Al mismo tiempo, ha incrementado la preocupación por el nivel de bienestar que experimentan los cerdos en los sistemas de producción. Los consumidores están dispuestos a pagar más por carne que provenga de animales que hayan sido criados y sacrificados bajo sistemas que procuren el bienestar animal, la calidad de vida de los trabajadores y la sustentabilidad ambiental (Cecchin et al., 2018; Warriss et al., 2006).

En los sistemas de producción los cerdos pueden enfrentarse a factores estresantes físicos como: hambre, sed, fatiga, lesiones y temperaturas ambientales extremas. Debido a la anatomía de esta especie, los cerdos se encuentran susceptibles a experimentar estrés térmico, particularmente hipertermia (Flores-Peinado et al., 2020). Una gran variedad de estudios científicos han analizado el estrés por calor que pueden presentar las cerdas durante la lactancia (etapa considerada un período de alta carga metabólica que sensibiliza a los individuos a la temperatura ambiental), llegando a la conclusión de que las hembras afectadas por lo general reducen su consumo de alimento, pierden su condición corporal, presentan problemas relacionados con una función ovárica inadecuada o una producción láctea reducida que puede repercutir en el

crecimiento de los lechones y su peso al destete. Sin embargo, las cerdas también pueden verse afectadas durante la gestación; si experimentan estrés por calor durante la gestación temprana, puede aumentar la mortalidad embrionaria y verse afectado el tamaño de la camada. En cambio, si el estrés por calor lo experimentan en etapas más avanzadas (gestación tardía), incrementan los lechones nacidos muertos y aquellos que sobreviven muestran un peso reducido (Lucy & Safranski, 2017).

Por su parte, los neonatos de esta especie precocial son susceptibles al frío debido a su pobre aislamiento y sus pocas reservas de energía (~1.5% de contenido adiposo). Asimismo, forman parte de las especies que no presentan el tejido adiposo pardo responsable del desarrollo de la termogénesis sin temblor (Clarke & Symonds, 1998; Herpin et al., 2002). Aunado a ello, los neonatos, impregnados con líquido amniótico, experimentan una pérdida de calor abrupta por efecto de la evaporación de dicho fluido, durante las primeras horas posteriores al parto. Todas estas características contribuyen a la aparición de hipotermia en los lechones, la cual puede llevar a la inanición, el aplastamiento y la enfermedad (Villanueva-García et al., 2021), pues ante una disminución de 2°C los lechones sufren un vigor locomotor reducido que lleva a que sean menos eficientes en la competencia por calostro y estén propensos a ser aplastados por la madre (Pattison et al., 1990).

Con la finalidad de lograr mantener estable la temperatura corporal central, los mamíferos han desarrollado mecanismos de termorregulación conductuales y fisiológicos. Dentro de las conductas termorreguladoras para evitar la hipotermia se encuentra el agruparse y construir nidos, mientras que en las conductas para evitar la hipertermia se encuentra la reducción de la actividad locomotora y el consumo de energía (Terrien et al., 2011). Por otro lado, los mecanismos termorreguladores fisiológicos constituyen respuestas autónomas que involucran el uso de recursos corporales valiosos como el agua y la energía. Al igual que las respuestas conductuales, se clasifican en los mecanismos desarrollados para disipar el calor y en aquellos que lo conservan. En los primeros se destaca la vasodilatación y la sudoración, estando ésta última limitada en los cerdos debido a sus escasas glándulas sudoríparas funcionales (Mayorga et al., 2019). Las respuestas neurofisiológicas para el control de la hipotermia incluyen la



vasoconstricción cutánea y la termogénesis con o sin temblor (Mota-Rojas, Gonçalves, et al., 2021).

A pesar de que se ha observado que desde los primeros dos días postnatales los lechones presentan termogénesis con temblor –lo que sugiere que tienen bien desarrollada dicha respuesta y que ésta es el principal mecanismo termogénico que presentan durante la exposición al frío a corto plazo (Berthon et al., 1994)–, la detección de una temperatura ligeramente más baja (-1.1°C) en los cerdos expuestos al frío sugiere que en ellos no existe un adecuado desarrollo de los sistemas de termorregulación al nacer (Berthon et al., 1996). Estudios científicos han evidenciado la existencia de otro mecanismo de termorregulación que involucra una termogénesis muscular sin temblor. Dicha respuesta parece constituir el mecanismo principal de termogénesis durante el estrés por frío en mamíferos grandes que carecen del tejido adiposo pardo, como es el caso de los lechones de jabalí; sin embargo, se desconoce si los cerdos domésticos también la poseen (Nowack et al., 2019).

Según la intensidad y la duración de la exposición a factores estresantes, será el impacto que tendrá en el bienestar animal y en la calidad de la carne, debido a que por efecto del estrés el sistema nervioso liberará hormona adrenocorticotrófica que a su vez provocará la liberación de catecolaminas y glucocorticoides adrenales que actuarán sobre el metabolismo energético, el cual al aumentar ejercerá un efecto adverso en los cerdos (Flores-Peinado et al., 2020). Diversos estudios han reportado una mayor ocurrencia de carne DFD en cerdos expuestos a temperaturas bajas; no obstante, hay autores que señalan que es en la temporada de invierno cuando se observa una mayor prevalencia de carne RSE (roja, firme y no exudativa), por lo que aún queda inconcluso el efecto que tiene este tipo de temperatura en la calidad de la canal. Por su parte, los climas cálidos tienen un impacto en el metabolismo *antemortem* y *postmortem* del músculo. Ante condiciones de estrés por calor, los cerdos modifican sus mecanismos fisiológicos y conductuales. Incrementan su consumo de agua para compensar la que pierden por efecto de la evaporación respiratoria y reducen su ingesta de alimento para ralentizar su producción de calor, lo cual resulta en una reducción en el grosor de la grasa dorsal y en un mayor catabolismo de las proteínas, que degrada aún más la calidad de la canal. Los músculos de cerdos con estrés por calor presentan una caída rápida de pH que, junto con una temperatura elevada de la canal, provocan

desnaturalización de las proteínas musculares y una reducción en la capacidad de retención de agua, lo que lleva a la presencia de carne PSE (Čobanović et al., 2020; Gregory, 2010).

Con la finalidad de evitar o mitigar el estrés térmico, las unidades de producción han puesto en práctica diferentes alternativas. En el lechón, dichas prácticas se han enfocado en minimizar la pérdida de calor y maximizar la ingesta de calostro (crucial para proveer protección inmune y energía que servirá para la termorregulación y el crecimiento). Algunas de estas estrategias son secar a los neonatos y colocarlos debajo de lámparas de calor inmediatamente después de su nacimiento, secar los lechones y colocarlos cerca de la ubre o asistirlos para que encuentren la teta (Muns, 2013). En el caso del estrés por calor, se ha reportado que con el uso de sistemas de enfriamiento por evaporación dentro de los establos, la temperatura ambiente puede disminuir entre 5 y 7°C, según la temperatura del exterior y la humedad relativa (Lucy & Safranski, 2017).

De manera sintética, el estrés térmico puede afectar en diferente magnitud la frecuencia respiratoria, temperatura corporal central, temperatura rectal, temperatura de la piel, ingesta de agua y alimento, y rendimiento (por ejemplo, tasa de embarazo). Por lo tanto, a través del estudio de las respuestas fisiológicas y conductuales del animal, así como de su producción, es posible conocer el nivel de estrés térmico que puede estar experimentando un individuo (Cao et al., 2021), aspecto que resulta de utilidad para determinar preferencias de temperatura (Robbins et al., 2020), especialmente ahora que la temperatura global aumenta (Johnson et al., 2018) y que se reporta un rendimiento de crecimiento disminuido y un aumento en la morbilidad y mortalidad, a pesar de los avances tecnológicos (Johnson et al., 2015). Por ello, resulta indispensable continuar con el estudio de la termorregulación de esta especie y del desarrollo de nuevas estrategias para mitigar esta problemática.

## **5. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la termoestabilidad en el lechón recién nacido y su madre, destacando los mecanismos de termorregulación, cambios microcirculatorios durante el parto, factores que contribuyen en la hipotermia del neonato y estrategias empleadas para reducir la pérdida de calor.

## **6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

**6.1.** Analizar los hallazgos recientes sobre los mecanismos y conductas de termorregulación frente al estrés calórico (calor extremo, transporte) presentes en los cerdos adultos.

**6.2.** Discutir sobre los cambios de temperatura que puede experimentar la madre durante el parto, así como su causalidad.

**6.3.** Analizar y discutir los factores que influyen en la termoestabilidad del lechón recién nacido.

**6.4.** Discutir y evaluar las estrategias empleadas para reducir la pérdida de calor en el lechón recién nacido.

## **7. METODOLOGÍA**

Durante la realización de este proyecto documental se recopiló literatura científica publicada entre los años 2000-2022. Las bases de datos consultadas fueron Web of Science, Science Direct y PubMed, y las palabras claves utilizadas se enfocaron a la temática de cada uno de los objetivos particulares.

## 8. ACTIVIDADES REALIZADAS

Etapas	Duración					
<b>ACTIVIDADES NOVIEMBRE 2021-ABRIL 2022</b>						
Búsqueda y análisis de información bibliográfica.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Analizar los hallazgos recientes sobre los mecanismos y conductas de termorregulación frente al estrés calórico (calor extremo, transporte) presentes en los cerdos adultos.	✓	✓				
Discutir sobre los cambios de temperatura que puede experimentar la madre durante el parto, así como sus consecuencias.			✓	✓		
Analizar y discutir los factores que influyen en la termoestabilidad del lechón recién nacido.				✓	✓	
Discutir y evaluar las estrategias empleadas para reducir la pérdida de calor en el lechón recién nacido.					✓	✓

## 9. OBJETIVOS Y METAS ALCANZADAS

- 9.1.** Se obtuvo información actual sobre los mecanismos de termorregulación fisiológicos y conductuales que desarrollan los cerdos adultos frente a situaciones de estrés calórico.
- 9.2.** Se dieron a conocer los cambios de temperatura que experimenta la cerda durante el parto, los factores asociados a dichos cambios y las aplicaciones de estos hallazgos.
- 9.3.** Se transmitieron los factores que deben contemplarse para evitar que los lechones experimenten hipotermia.
- 9.4.** Se compararon las estrategias propuestas para reducir la pérdida de calor en lechones y se determinaron aquellas que han demostrado mejores resultados.

## 10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 10.1. **Capítulo 1— Mecanismos y conductas de termorregulación frente al estrés calórico presentes en los cerdos adultos**

#### 10.1.1. Introducción

Los cerdos son animales homeotermos, es decir que a pesar de los cambios en el clima pueden mantener su temperatura corporal relativamente constante por medio de adaptaciones conductuales y fisiológicas (Renaudeau et al., 2008). Si estas adaptaciones no logran ser suficientes los cerdos experimentan estrés térmico, ya sea por calor o frío (Miranda-de la Lama et al., 2021; Gómez-Prado et al., 2022). El estrés por calor surge cuando los animales no logran disipar de forma eficiente el calor y sin que se tengan pérdidas importantes en el rendimiento (Gourdine et al., 2017). La exposición a estrés térmico extremo o de forma prolongada tiene repercusiones en el bienestar animal y puede conducir a la muerte por falla multiorgánica (Gómez-Prado et al., 2022). Desafortunadamente cada vez es más frecuente este padecimiento en los cerdos debido a que a través de la selección genética se ha reducido la capacidad de los cerdos para termorregularse, pues el progreso en la tasa de crecimiento del tejido magro ha aumentado la producción de calor metabólico (Renaudeau et al., 2011).

Aunado a ello, cada vez se perciben más efectos de uno de los principales problemas del siglo XXI, el calentamiento global. Se ha estimado que en los próximos años algunas regiones de la Unión Europea experimentarán un aumento en la temperatura de 1.4-4.2°C y fenómenos meteorológicos extremos como las olas de calor (Renaudeau & Dourmad, 2022). Esta elevación de la temperatura ambiental no sólo comprometería la cosecha de los alimentos que consume el cerdo, sino que también repercutiría en el bienestar, la salud, el rendimiento y la productividad de la especie (Reis et al., 2017; Gourdine et al., 2021). Por ejemplo, por efecto de la vasodilatación periférica frente al calor, la morfología intestinal se vería alterada (Abuajamieh et al., 2018), las uniones intercelulares se volverían permeables y se facilitaría el paso de bacterias y productos bacterianos hacia la

circulación sistémica (Pearce et al., 2013). De igual forma, el propio estrés con el aumento periférico de glucocorticoides podría afectar los componentes del sistema inmunológico y aumentar aún más la susceptibilidad de los cerdos a enfermedades (Renaudeau & Dourmad, 2022). Referente a la reproducción, el estrés por calor produciría un inicio tardío de la pubertad, reduciría la implantación, comprometería el desarrollo embrionario y provocaría una reducción en la producción de leche (Vilas Boas et al., 2018) y en la calidad seminal de los verracos (Renaudeau et al., 2012). Todo ello se traduciría en pérdidas económicas dada la eficiencia reducida, el incremento de costos en la atención médica, la disminución de la calidad de la canal y el aumento de la mortalidad, especialmente en las etapas con alta actividad metabólica, como la lactancia y el engorde (Baumgard & Rhoads, 2013).

Considerando que el cerdo adulto es susceptible al calor y que el continuo aumento de la temperatura global provoca alteraciones no sólo fisiológicas, sino que también en parámetros productivos, reproductivos y de la calidad de la carne (Gonzalez-Rivas et al., 2020; Serviento et al., 2020), la presente revisión tiene el objetivo de analizar los hallazgos recientes sobre los mecanismos y conductas de termorregulación frente al estrés calórico (en instalaciones y transporte) presentes en los cerdos adultos.

#### 10.1.2. Material y métodos

Se consultó literatura publicada entre 2000 y 2022 en las bases de datos Web of Science, Science Direct y PubMed. La búsqueda se perfeccionó empleando conceptos claves como: termorregulación en cerdos adultos, respuestas fisiológicas, respuestas conductuales, estrés por calor, transporte al rastro, hipertermia maligna, choque térmico y cambio climático. También se revisaron las referencias citadas en los artículos, con la finalidad de ampliar la búsqueda y agregar material relevante.

#### 10.1.3. Aspectos anatomofisiológicos y termorregulación en el cerdo adulto: respuestas fisiológicas y conductuales

El clima es uno de los factores que más puede afectar el desempeño productivo de los animales de granja. La temperatura ambiental, la humedad relativa y la velocidad del viento son capaces de provocar estrés térmico, deteriorar la salud e incluso desencadenar la muerte de los cerdos, dependiendo de la severidad y el

tiempo de exposición a estas condiciones (Renaudeau et al., 2012). El límite superior de la zona termoneutral para cerdos en crecimiento es de 25°C (Renaudeau et al., 2007) y de 21°C para cerdos al sacrificio (Fox, 2013). Cuando se rebasa este límite los cerdos experimentan hipertermia, la cual tiene repercusiones en el metabolismo y puede provocar daño celular en el sistema nervioso central (Terrien et al., 2011).

Con la finalidad de mantener su homeostasis, los animales expuestos al calor desarrollan respuestas fisiológicas y conductuales que promuevan la disipación del calor corporal o que ayuden a reducir la producción de calor corporal. Los cerdos logran perder calor principalmente por convección (al aumentar la temperatura cutánea por efecto de la vasodilatación periférica) y evaporación (al evaporarse el agua presente en la superficie cutánea o el tracto respiratorio), y por cambios de postura (Martin, 2012). El jadeo es una de las respuestas más destacadas, pues el aumento de la frecuencia respiratoria permite disipar grandes cantidades de calor corporal en esta especie que no puede obtener el mismo efecto por medio de la sudoración. Además del jadeo, otras estrategias que llevan a cabo los cerdos para disipar el calor corporal son aumentar la ingesta de agua - para compensar la pérdida de agua por el jadeo-, mantener contacto directo con superficies frías y bañarse en zonas frescas (Fox, 2013; Pereira et al., 2018).

Dentro de las estrategias para reducir la producción de calor se destaca el disminuir la ingesta de energía pues esta actividad representa una fuente de generación de calor; además, la exposición al calor provoca que haya pocos gastos energéticos, por lo que las necesidades de ingesta calórica se reducen (Terrien et al., 2011).

Sin embargo, es importante señalar que el estrés por calor puede inducir alteraciones fisiológicas graves que podrían impedir que los animales lleven a cabo ajustes en su comportamiento para lograr termorregularse (Terrien et al., 2011). Aunado a ello, a pesar de tener un centro termorregulador maduro, los cerdos son propensos a sufrir de hipertermia por ciertas particularidades anatomofisiológicas. Dentro de ellas se enlista su limitado número de glándulas sudoríparas funcionales (30/cm<sup>2</sup>; la mayoría se encuentran queratinizadas), una capa de grasa subcutánea gruesa que dificulta la transferencia de calor al medio ambiente mediante la vasodilatación, unos pulmones de tamaño pequeño, en

relación con la masa corporal, y un hocico corto, todas ellas características que reducen su capacidad para disipar el calor (Bracke, 2011; Voslarova et al., 2016; Gourdine et al., 2021; Gómez-Prado et al., 2022;). Es por ello que esta especie es vulnerable frente a temperaturas ambientales elevadas, especialmente cuando hay alta humedad relativa, razón por la cual la tasa de mortalidad es elevada durante el transporte y la estabulación en los rastros (Arduini et al., 2014). De igual forma, ante situaciones de estrés por calor existe mayor riesgo de aparición de carne PSE como resultado de un impacto en el metabolismo muscular *antemortem* y *postmortem* (Correa et al., 2013). El estrés térmico agudo antes del sacrificio acelera la glucogenólisis muscular y aumenta la concentración de ácido láctico, lo que produce una rápida disminución del pH del músculo, dando como resultado la carne PSE con menor capacidad de retención de agua. En cambio, cuando el estrés térmico es crónico el animal tiene reducidas reservas de glucógeno muscular, lo que lleva a una menor producción de ácido láctico, un pH muscular alto y una mayor capacidad de retención de agua, dando lugar así a la carne DFD (Miranda-de la Lama et al., 2021).

Considerando la relevancia y el impacto de esta temática, Čobanović et al. (2020) decidieron evaluar el efecto de la estación del año en el comportamiento, la salud (presencia de neumonía, pleuritis y pericarditis), el bienestar y la calidad de la carne (pH, temperatura, color, marmoleo y pérdidas por goteo, descongelación y cocción) de 480 cerdos destinados para consumo humano. Cabe mencionar que durante el estudio los cerdos fueron transportados en camiones que contaban con rejillas de ventilación en la parte trasera y a los costados, y que una vez que arribaron al rastro los cerdos permanecieron 3 horas en los corrales de espera donde tenían libre acceso al agua, pero no a comida ni a aspersores de agua. Dentro de los hallazgos reportados se destaca que los cerdos sacrificados en el verano (julio y agosto) presentaron un menor peso vivo (97.94 kg), peso de la canal (75.96 kg) y espesor de la grasa dorsal (13.07 mm) que aquellos sacrificados durante el invierno. Estos resultados se deben a que los cerdos llegan a consumir al día 16% menos de alimento durante el período más cálido del año (Myer et al., 2008), esto como una respuesta conductual que se da para disminuir la producción metabólica de calor (Terrien et al., 2011). Por otra parte, la reducción del espesor de la grasa dorsal en temperaturas ambientales elevadas también se debe a la inhibición de la deposición de proteínas por efecto del aumento del



catabolismo de las proteínas, situación que degrada aún más la calidad de la canal (Nakev et al., 2016), impactando de forma negativa en la producción y economía de la industria porcícola (Fox, 2013). Referente al comportamiento, el verano fue la única estación del año en la que los cerdos llevaron a cabo la conducta de jadear, tanto en el desembarque como en los corrales (18.33% y 47.50%, respectivamente). Durante este periodo los cerdos fueron expuestos a velocidades de viento bajas (0-1 km/h), humedad relativa alta (73.20-82.00%) y temperaturas de 31.5-34.0°C, las cuales rebasaban la temperatura crítica para cerdos al sacrificio (Fox, 2013). Estos hallazgos concuerdan con el hecho de que los cerdos son sensibles a altas temperaturas y humedad relativa debido a que tienen una capacidad limitada para disipar el calor corporal (Voslarova et al., 2016) y que no pueden termorregularse a través de la sudoración, por lo que desarrollan conductas como el jadear (Fox, 2013). De acuerdo con Čobanović et al. (2020), si el estrés por calor continúa, el jadeo resulta insuficiente para disipar el calor, lo que conduce a que los cerdos experimenten ajustes fisiológicos y metabólicos, lo cual puede explicar que los cerdos sacrificados en el verano presentaran mayores concentraciones de lactato y glucosa (16.96 y 10.12 mmol/L, respectivamente) en sangre. Respecto a la calidad de la carne, los cerdos sacrificados en verano tuvieron el pH más bajo (5.62), una mayor pérdida de agua por descongelación (6.58%) y una mayor presencia de carne con miopatía PSE (56.67%). Estos resultados confirman que el calor extremo con una alta humedad relativa provoca una respuesta de estrés adrenérgico donde por efecto de la adrenalina se produce vasodilatación periférica y glucogenólisis muscular, provocando hipoxia, acidosis metabólica (que explica los niveles elevados de lactato y glucosa en sangre), mayor temperatura corporal y menor pH sanguíneo. Cabe señalar que la rápida caída del pH junto con el aumento de la temperatura en la canal provoca la desnaturalización de las proteínas y la reducción de la capacidad de retención de agua, llevando así a la aparición de carne PSE en cerdos estresados por calor (Correa et al., 2013).

De igual forma se ha cuestionado si la respuesta frente al estrés térmico difiere entre razas de cerdos, pues se ha informado la existencia de una respuesta diferente a corto plazo entre verracos halotano positivos y negativos (Tauson et al., 1998). Es por ello que Renaudeau et al. (2007) decidieron comparar las respuestas de dos razas de cerdos diferentes frente a temperaturas ambientales

elevadas. Para ello utilizaron 48 cerdos de las razas Large White (LW) y criolla (CR), siendo que esta última se caracteriza por adaptarse a ambientes tropicales severos. Los autores mantuvieron a los cerdos en una habitación con una temperatura de 24°C durante 10 días (período de adaptación) para después exponerlos a una temperatura de 31°C por 16 o 20 días. Tras comparar los resultados se determinó que independientemente de la raza, la temperatura cutánea de los cerdos aumentó linealmente 0.22°C por cada grado adicional en la temperatura ambiental. Esta elevación se explica por el aumento del volumen de sangre en los vasos sanguíneos de la piel para promover la disipación de calor. A pesar de que las respuestas de la temperatura cutánea frente al estrés fueron similares entre ambas razas, la temperatura cutánea promedio en los cerdos LW fue mayor que en los CR (32.29±0.77 vs. 30.95±0.80°C, respectivamente). Por otra parte, la frecuencia respiratoria aumentó en mayor medida en los cerdos CR en comparación con los LW (16.0 vs. 11.8 rpm/°C, respectivamente). Cabe señalar que la temperatura ambiental de ruptura (a partir de la cual se detectó un incremento en la frecuencia respiratoria) fue mayor en los cerdos CR que en los LW (27.8 vs. 25.0°C, respectivamente). A partir de estos resultados, Renaudeau et al. (2007) plantearon la hipótesis de que una menor producción de calor metabólico en los cerdos CR explicaría su menor uso del jadeo (estrechamente relacionado con la frecuencia respiratoria) para regular su temperatura corporal a corto plazo. Cabe mencionar que en el estudio también se observó que los cerdos necesitaron más de 20 días para lograr que la temperatura rectal se mantuviera en un valor constante después de la exposición a una temperatura ambiental más elevada, lo cual sugiere que esta especie requiere al menos 20 días para habituarse a un ambiente más cálido. En síntesis, los autores demostraron que las reacciones fisiológicas durante la exposición al calor se ven afectadas por la raza, aunque en ambas razas se observó una aclimatación al calor (reducción en la temperatura rectal, cutánea y la frecuencia respiratoria) después de 20 días. De acuerdo con Renaudeau et al. (2007), la variación entre las razas podría estar relacionada con la diferencia que existe entre el peso de compartimentos corporales metabólicamente activos, como la masa magra.

Resultados similares al estudio anterior fueron reportados por Serviento et al. (2020) quienes después de estudiar a 48 hembras que fueron expuestas a 22°C o 32°C por 21 días, concluyeron que los individuos sometidos a condiciones de

calor tuvieron una temperatura cutánea (de hasta 38.5°C) y una frecuencia respiratoria (de hasta 100 rpm) constantemente superior a la de aquellos que se encontraban en un ambiente termoneutral. La temperatura rectal de las cerdas expuestas a temperaturas elevadas llegó a superar los 39.6°C y después fue disminuyendo lentamente hasta estabilizarse 6 días después del incremento de la temperatura, aunque cabe mencionar que aún se mantuvo más elevada que la de los individuos en el ambiente termoneutral. Estos hallazgos demostraron que los cerdos expuestos a estrés calórico intentan mantener su temperatura corporal primero disipando el calor a través de vías sensibles (demostrado con el ascenso de la temperatura cutánea) y después a través de la vía de evaporación (demostrado con una frecuencia respiratoria más elevada). Por su parte, el aumento en la temperatura rectal indica que a partir de los 32°C los cerdos ya no pueden perder más calor corporal; sin embargo, la posterior disminución gradual demuestra una habituación a la temperatura ambiental, similar a lo reportado en el estudio anterior. Dicha habituación estaría relacionada con la reducción de la producción de calor por efecto de un menor consumo de alimento (Collin et al., 2001), pues se observó que los individuos expuestos al calor redujeron su ingesta promedio diaria en un 18% (5 g/kg de peso corporal) y pasaron menos tiempo en el comedero (22 minutos menos que el grupo control). Cabe señalar que la disminución en la ingesta tuvo repercusiones en el peso de las cerdas pues la ganancia de peso corporal se redujo en un 21% (-6.1 kg). Por lo tanto, los autores concluyeron que la exposición a condiciones de calor resulta en cerdos más livianos y con una mayor proporción de grasa perirrenal. De acuerdo con Le Bellego et al. (2002), en condiciones de calor se limita la deposición de proteínas debido a su alto costo biológico, lo cual explicaría que en los individuos expuestos a estrés calórico la energía se haya redirigido para la deposición de lípidos. Según Le Dividich et al. (1998), el almacenar grasa de forma interna (grasa perirrenal) en lugar de forma externa (grasa dorsal) podría ser una estrategia adaptativa para reducir el aislamiento corporal y facilitar la disipación del calor, lo cual concuerda con los resultados de Demo et al. (1995), quienes demostraron que el grosor de la grasa dorsal fue mayor en cerdos mantenidos en un ambiente de 12°C que en uno de 24°C ( $3.2 \pm 0.5$  vs.  $2.9 \pm 0.2$  cm, respectivamente). Estos hallazgos llevan a concluir que la exposición a condiciones climáticas extremas no sólo compromete la salud y el bienestar de los cerdos, sino que también tiene repercusiones en la calidad de la canal (Čobanović et al., 2020), lo cual es de

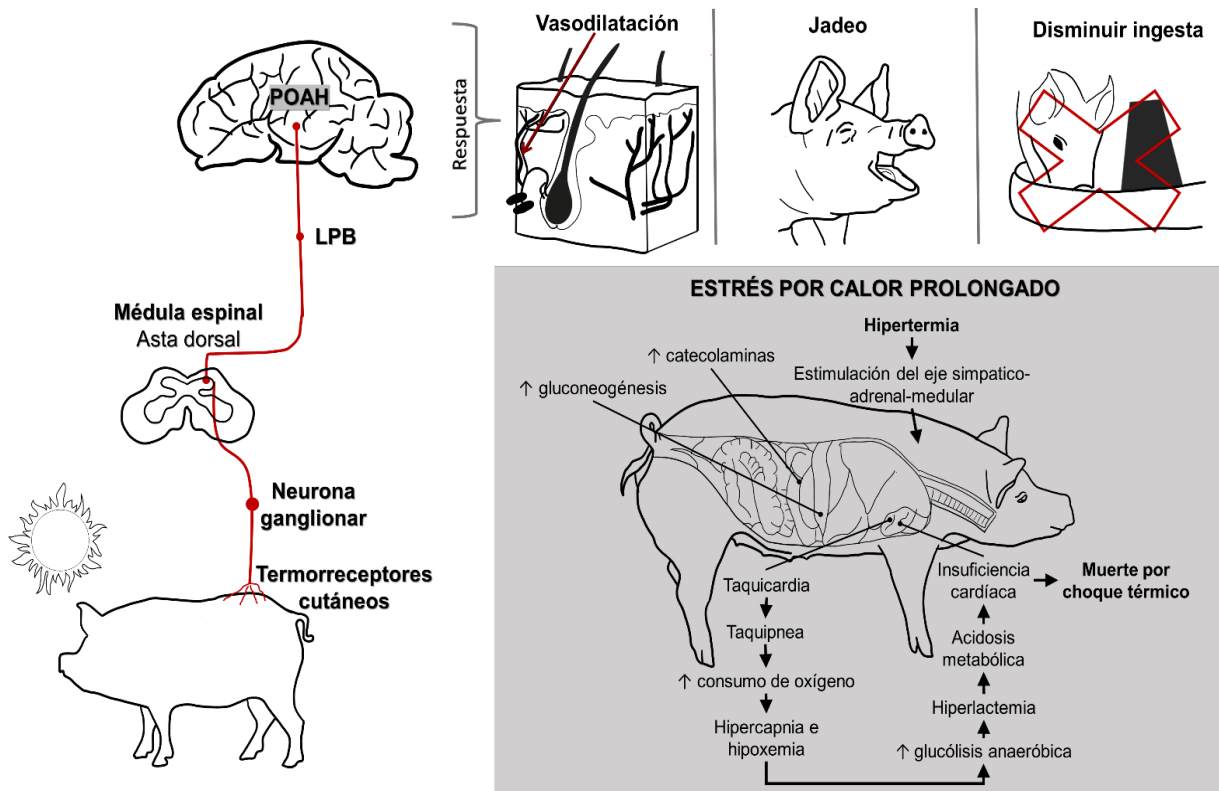
relevancia internacional dado que es una de las carnes más consumidas en el mundo (Gourdine et al., 2021).

Además de reducir la ingesta de alimento, los cerdos pueden disminuir su nivel de actividad y su contacto físico con otros individuos, y preferir acostarse en las zonas más frescas del corral tratando de aumentar la superficie de contacto con el suelo para lograr termorregularse (Spoolder et al., 2012). Referente a los niveles de actividad, se ha reportado que el comportamiento de reposo aumenta aproximadamente 0.66% por cada °C que sube la temperatura ambiental, particularmente cuando el ambiente está por encima de los 28°C. De igual forma, por cada °C que sube la temperatura ambiental se observa que los cerdos pasan menos tiempo (hasta 32% menos) recostados a lado de otros congéneres (Pedersen et al., 2003). De hecho, se ha observado que cuando los cerdos no cuentan con el espacio para poder acostarse sin tener contacto con sus congéneres, se irritan y pueden iniciar conductas estereotípicas o de agresión, las cuales pueden provocar lesiones, poca ganancia de peso e incluso trastornos de la fertilidad (Olczak et al., 2015). Cabe mencionar que la postura que toman los cerdos también cambia según la temperatura en el ambiente. En un estudio realizado por Ducreux et al. (2002) se observó que frente a una temperatura de 18°C el 66% de los cerdos se encontraba recostado en posición esternal y el 34% restante se encontraba tumbado lateralmente; en cambio, cuando la temperatura aumentaba a 27°C estas cifras pasaron a ser 44% y 55%, respectivamente, lo cual se explica por el hecho de que al acostarse lateralmente aumenta la superficie del cuerpo que entra en contacto con el piso frío (Huynh et al., 2005), en comparación a cuando se recuestan en posición esternal. Por otro lado, evidencia científica indica que el tipo de piso en el que se recuestan los cerdos también puede variar según la temperatura. De acuerdo con Savary et al. (2009) y Aarnink et al. (2006), a medida que aumenta la temperatura ambiental incrementa en aproximadamente 10% el número de cerdos acostados en piso de rejilla, posiblemente debido a las propiedades aislantes del material, que en piso sólido o con paja.

Aunado a ello, ante temperaturas elevadas se ha visto que los cerdos desarrollan conductas como buscar sombra, incrementar el consumo de agua y revolcarse en lodo o en zonas húmedas. Diversos estudios han demostrado que esta última conducta puede reducir la temperatura corporal en hasta 2°C, esto debido a que

los cerdos quedan con una capa de barro que promueve la pérdida por evaporación a largo plazo (por hasta 2 horas), evitando así la hipertermia (Olczak et al., 2015). Se ha reportado que en sistemas intensivos donde los cerdos no tienen acceso a piscinas donde puedan llevar a cabo dicho comportamiento, ante temperaturas muy elevadas los animales pueden llegar a revolcarse en su propia orina y heces, a pesar de su deseo natural de evitar el contacto con su excremento (Spoolder et al., 2012). Asimismo, se ha observado que a medida que aumenta la temperatura ambiental hay un incremento en la incidencia de cerdos que orinan mientras están acostados o que son bañados con la orina de otros cerdos, demostrando así que esta especie está dispuesta a desarrollar dichas conductas con tal de refrescarse (Huynh et al., 2005). Por otro lado, la conducta de hozar, también característica de la especie, se ha observado como comportamiento termorregulador, pues cuando la temperatura ambiente supera los 20°C los cerdos llevan a cabo esta conducta en el bebedero o en el área destinada para revolcarse, con la finalidad de refrescarse (Andresen & Redbo, 1999).

Durante el transporte los cerdos están expuestos a una gran variedad de factores estresantes como la privación de comida y agua, la mezcla con otros grupos, las vibraciones y los ruidos fuertes (Mota-Rojas et al., 2014). Sin embargo, las temperaturas ambientales extremas en el viaje son señaladas como una de las principales causas del aumento de la tasa de mortalidad a la llegada al rastro (Averós et al., 2010). Al no lograr mantener un balance entre la ganancia y pérdida de calor, los cerdos experimentan estrés por calor y la activación del eje simpático-adrenal-medular. La activación de dicho eje provoca un aumento en la síntesis y secreción de catecolaminas, lo cual resulta en un incremento de la gluconeogénesis, taquicardia y taquipnea. La taquipnea y el incremento en el consumo de oxígeno conducen a un estado de hipercapnia e hipoxia, al que se le suma hiperlactemia por el aumento de la glucólisis anaeróbica. Finalmente, la combinación de estas condiciones produce acidosis metabólica que afecta la función cardíaca y puede culminar con la muerte del individuo (Figura 1) (Mota-Rojas et al., 2016).



**Figura 1.** Respuestas termorreguladoras del cerdo expuesto a estrés calórico (figura basada en el artículo de Gómez-Prado et al. (2022)). Al igual que como se ha descrito en otros mamíferos, los termorreceptores de la piel detectan un incremento en la temperatura ambiental y envían una señal a través de fibras nerviosas aferentes hasta el asta dorsal de la médula espinal donde se activan las neuronas sensoriales sensibles al calor. Estas últimas transmiten un impulso al núcleo lateral parabraquial (LPB) y posteriormente al hipotálamo preóptico anterior (POAH), estructura responsable del desarrollo de respuestas fisiológicas y conductuales para lograr la termorregulación. Sin embargo, existe la posibilidad de que dichas respuestas termorreguladoras no sean suficientes y se desencadene una serie de eventos que culminen con la muerte del cerdo por choque térmico.

Con la finalidad de determinar si existe alguna diferencia en el calor que experimentan los cerdos durante el transporte según la zona en la que se encuentren, Machado et al. (2021) monitorearon el viaje vespertino de 192 cerdos en tráileres con 12 compartimentos (4 en la región frontal, 4 en el centro y 4 en la región trasera del vehículo) distribuidos en un piso inferior y un piso superior. Los autores observaron que ante una temperatura de 26.8-31°C y una humedad relativa de 66-72%, la zona térmica con mayor calor (núcleo térmico) se encontraba en la región frontal del camión, particularmente en el piso inferior, mientras que el piso superior fue en el que se detectó mayor ventilación. De hecho, los cerdos transportados en el piso inferior presentaron una mayor frecuencia respiratoria ( $94 \pm 1.30$  vs.  $90 \pm 1.25$  rpm) y mayor temperatura rectal que aquellos

que se encontraban en el piso superior ( $39.72 \pm 0.47$  vs.  $38.92 \pm 0.43^\circ\text{C}$ ), sugiriendo así que los primeros eran más susceptibles al estrés térmico debido a la formación del núcleo térmico y a una tasa reducida de eliminación de calor en dicha área del vehículo. Los cerdos que se encontraban en el piso superior contaban con condiciones de ventilación más favorables; sin embargo, presentaron una temperatura corporal más alta que la de los cerdos en el piso inferior ( $38.98 \pm 0.23$  vs.  $38.15 \pm 0.33^\circ\text{C}$ ), debido a que los primeros estaban expuestos directamente al sol por la falta de una cubierta. Cabe mencionar que durante la embarcación los cerdos fueron mojados con el fin de reducir el impacto del estrés térmico; no obstante, esta práctica pudo haber contribuido negativamente en la disipación del calor pues puede propiciar la acumulación de agua y expandir el contenido de vapor especialmente en las regiones frontal y central del piso inferior (Pinheiro et al., 2020).

Resultados similares al estudio anterior fueron reportados en 216 lechones destetados (Machado, Martin, et al., 2021): en la zona más cercana a la cabina del camión (región frontal) del piso inferior los lechones presentaron mayor temperatura rectal ( $+1.8^\circ\text{C}$ ) y frecuencia respiratoria ( $94 \pm 1.3$  vs.  $86 \pm 1.3$  rpm) que en los demás compartimentos, demostrando así el riesgo que puede representar esta zona para el bienestar de los cerdos.

#### 10.1.4. Perspectivas

A pesar de toda la información que se tiene en la actualidad, aún quedan dudas sobre los mecanismos que permiten que existan diferencias entre razas en las respuestas de aclimatación (Renaudeau et al., 2007). Asimismo, en el ámbito del transporte queda como interrogante si el uso de cubiertas puede ser una alternativa para que los cerdos transportados en el piso superior se mantengan libres tanto de estrés por calor como de estrés físico por efecto de la radiación. Teniendo en cuenta los resultados de Machado et al. (2021) también permanece la incógnita de si el mojar a los cerdos previo al traslado hacia el matadero los beneficia y si reduce la tasa de mortalidad a la llegada. Es por ello necesario continuar desarrollando estudios en el presente tema. Cabe mencionar que dentro de los artículos citados pocos se han llevado a cabo en países latinoamericanos, por lo que se incita a realizar más investigaciones en estos países antes ambientes desérticos semiáridos, como tropicales, donde el clima es muy variado.

Tomando en cuenta que la ubicación de los cerdos en el transporte sí tiene repercusiones en el bienestar animal (Machado, Barbosa-Filho, et al., 2021), se sugiere que se lleven a cabo estudios donde prueben distintas alternativas para reducir el impacto de la temperatura en los cerdos, especialmente para aquellos que se encuentran en el cajón frontal del piso inferior. Algunas de estas estrategias podrían ser la instalación de bebederos o el empleo de equipo para aumentar la ventilación en todo el camión. También se ha observado que el rociar agua inmediatamente antes y después del transporte reduce la temperatura del tracto gastrointestinal de los cerdos (Fox et al., 2014); sin embargo, aún se requiere de estudios para determinar si prácticas como éstas realmente ayudan a reducir el estrés térmico. De detectarse resultados significativos, sería imprescindible que a partir de los hallazgos se desarrollen protocolos para prevenir el estrés por calor en cerdos. Dichos protocolos también deberán hacer énfasis en la densidad máxima permitida, la tasa mínima de ventilación, las horas de transporte permitidas (aquellas en las que la temperatura sea la más baja) y la cantidad de agua que se deberá suministrar según el número de horas en el transporte, todo ello tomando en cuenta los datos climatológicos de cada región.

De igual forma sería oportuno que en los países con climas tropicales se analizara el efecto en el comportamiento y la termorregulación del uso de corrales con sistemas de piscinas poco profundas, pues este tipo de instalaciones permitirían que los cerdos ejecuten la conducta natural de revolcarse, la cual aumenta la pérdida de calor a través de la conducción y convección, facilitando así el proceso de termorregulación de la especie (Biazzi et al., 2014).

En la producción avícola se ha visto que el ofrecer el 80-100% de la dieta en la tarde ha mejorado el rendimiento de los pavos expuestos a calor por estrés (Farghly et al., 2018), por lo que sería interesante evaluar el efecto de distintas estrategias de alimentación en la respuesta de los cerdos frente al estrés calórico para determinar si alguna frecuencia u hora de alimentación específica puede ayudar a afrontar mejor esta situación.

También se ha sugerido que los productores pueden reducir efectos negativos del estrés por calor, como menor consumo de alimento y mala calidad de la canal, disminuyendo el contenido de proteína cruda en la dieta y aumentando el contenido de grasa, pues se cree que el aumentar de 1 a 8% el porcentaje de



grasa en la comida puede ayudar a compensar la supresión del apetito y la tasa de crecimiento, lo que resultaría en una mayor ganancia de peso diaria y canales de mejor calidad (Gregory, 2010).

Otras estrategias que se han recomendado son proporcionar suficiente agua potable fresca a través de bebederos (Welfare Quality®, 2009) y enfriar a los cerdos con ayuda de sistemas de aspersion de agua en combinación con ventilación asistida, tanto en los corrales como en los camiones (Nannoni et al., 2014). Haciendo énfasis en el transporte, se sugiere que durante el verano los traslados se realicen muy temprano en la mañana, al final de la tarde o por la noche (National Pork Board, 2017). En sintonía con ello, se aconseja que los cerdos se sacrifiquen inmediatamente después de su llegada al matadero para así minimizar el estrés térmico que se puede dar en los corrales de espera, de tal forma que también se obtenga carne de mejor calidad (Dalla Costa et al., 2019). No obstante, cabe señalar que algunas de estas estrategias pueden ser costosas, tanto a nivel económico como ambiental (Čobanović et al., 2020), o pueden no tener la misma efectividad si continúan agravándose los efectos del calentamiento global, por lo que se invita a continuar estudiando éstas y otras alternativas para enfrentar esta problemática. De igual forma, se incita a analizar datos fenotípicos y genéticos relacionados con la termorregulación, pues la selección de individuos con genotipos tolerantes al estrés por calor parece ser una opción prometedora a largo plazo (Gourdine et al., 2021).

#### 10.1.5. Conclusión

Los estudios científicos actuales han llevado a concluir que, independientemente de la raza, los principales mecanismos empleados por los cerdos para termorregularse en ambientes cálidos son la vasodilatación periférica (que se traduce en el aumento de la temperatura cutánea) y el jadeo (que resulta en la evaporación del agua presente en el tracto respiratorio). Aunado a ello, los cerdos desarrollan conductas como disminuir su nivel de actividad diaria, el tiempo que pasan en el comedero y la ingesta promedio diaria de alimento, con la finalidad de reducir la producción metabólica de calor. No obstante, tal y como han reportado diversos autores, existe la posibilidad de que estos mecanismos no sean suficientes para evitar el estrés por calor y por lo tanto se obtengan cerdos con menor ganancia de peso y canales más livianas, con menor espesor de grasa

dorsal, menor pH, mayor pérdida de agua por descongelación y mayor porcentaje de carne con miopatía PSE por efecto del catabolismo de las proteínas; todas ellas características que afectan la calidad de la carne y por ende el estado financiero de los productores.

Por otro lado, las investigaciones también han demostrado que ante temperaturas ambientales elevadas los cerdos reducen el contacto físico con sus congéneres, se revuelcan en lodo y prefieren recostarse sobre el piso de rejilla y de forma lateral para aumentar la superficie del cuerpo que entra en contacto con el piso frío. Dichos hallazgos evidencian la importancia de que las unidades de producción tengan instalaciones diseñadas de acuerdo a las necesidades de los cerdos para que puedan desarrollar libremente estas conductas propias de la especie, pues de lo contrario los cerdos comenzarán a pelearse con sus congéneres, a revolcarse en su propia orina o a realizar comportamientos estereotipados.

Referente al transporte, se ha comprobado que los cerdos ubicados en el compartimento frontal del piso inferior del camión son más susceptibles al estrés térmico debido a la falta de ventilación. Aunque los cerdos situados en el piso superior del camión reciben mayor ventilación también pueden experimentar estrés por calor debido a que están expuestos a la radiación solar.

Todos estos hallazgos permiten identificar tanto los signos de un cerdo experimentando estrés térmico, como todas las situaciones que aumentan la posibilidad de que lo padezca, y que por ende tendrían que sufrir algún ajuste. Es por ello que se incita a continuar analizando estrategias que se podrían emplear para prevenir o reducir el estrés por calor en cerdos adultos, sobre todo considerando que se trata de una problemática que afecta el bienestar de los animales y la producción porcícola, y que podría agravarse por efecto del cambio climático.

## 10.2. **Capítulo 2– Cambios de temperatura en la cerda durante el parto y su causalidad**

### 10.2.1. Introducción

La gestación de las cerdas dura aproximadamente 115 días, aunque el parto también puede ocurrir entre el día 111 y 120 (Local Land Services, 2021). En este período se da una interacción hormonal compleja. Durante los primeros dos tercios de la gestación la progesterona se encuentra en concentraciones altas de forma constante para preservar el progreso de la gestación (van der Meulen et al., 1988). Mientras tanto, el resto de las hormonas (hormona luteinizante, prostaglandinas, cortisol, relaxina, oxitocina y prolactina) se mantienen en niveles basales. Sin embargo, esta actividad hormonal cambia por completo entre las 48 y 24 horas previas al parto. En la proximidad del parto, la concentración de progesterona disminuye rápidamente, lo cual repercute en las concentraciones de casi todas las demás hormonas. Por un lado, la caída de la progesterona permite que aumenten los receptores de oxitocina en el útero (Oliviero et al., 2008) y, por ende, las concentraciones de oxitocina, hormona clave para regular las contracciones del miometrio durante el parto. A su vez, incrementan los niveles de prostaglandina y prolactina, aunque, a diferencia de la prostaglandina, el aumento de la prolactina es paulatino hasta el inicio de la lactancia. Por otra parte, los niveles de estrógenos también aumentan, pero éstos descienden gradualmente después de alcanzar su punto máximo (Gilbert et al., 1994; Anderson, 2000;).

Mientras disminuyen las concentraciones séricas de la progesterona y el estradiol, los niveles de cortisol aumentan temporalmente para movilizar la glucosa de las reservas de glucógeno, pues la cerda necesita pasar de un estado anabólico a uno catabólico para producir grandes cantidades de leche (Mosnier et al., 2010). No obstante, cabe mencionar que existen otros eventos biológicos que pueden elevar los niveles de cortisol, como el estrés y la inflamación (Kaiser et al., 2018).

Por otro lado, diversos estudios científicos han demostrado que durante este período la temperatura corporal de la cerda también sufre un cambio, pues en las 12-48 horas preparto la temperatura aumenta gradualmente 1-1.5°C (Elmore et al., 1979). La frecuencia respiratoria y cardíaca también experimentan una

elevación que, a diferencia de la temperatura corporal, se degrada después del parto (Kelley & Curtis, 1978). Por su parte, el aumento de la temperatura corporal alcanza su punto máximo 1-2 horas después de la expulsión del último lechón y posteriormente disminuye durante el primer día postparto, pero sin alcanzar los valores previos al parto (Littledike et al., 1979).

Debido a que el parto es un evento que tiene un impacto económico importante en las unidades de producción y que factores como el clima (particularmente durante los meses de verano) y las enfermedades pueden alterar directa o indirectamente el proceso fisiológico de éste, los productores vigilan a detalle este período (Byrd et al., 2019). En él se presta especial atención a la temperatura corporal de los animales, la cual es considerada un parámetro fundamental en la evaluación del estado de salud (Chung et al., 2010). Es necesario mencionar que los productores se preocupan por vigilar el estado de las cerdas antes, durante y después del parto, debido a que este período influye en el desarrollo y la salud de los lechones (Oliviero, 2010).

Es por ello que la presente revisión pretende discutir los cambios de temperatura que experimenta la madre durante el parto, los factores asociados a ello, las consecuencias de dichos cambios y las posibles aplicaciones de los hallazgos.

#### 10.2.2. Material y métodos

Se consultó literatura publicada entre 2000 y 2022 en las bases de datos Web of Science, Science Direct y PubMed. La búsqueda se perfeccionó empleando conceptos claves como: cambios térmicos en el parto, estrés térmico, termorregulación en la cerda parturienta, respuestas fisiológicas durante el parto y efectos del estrés térmico durante la gestación y la lactancia. También se revisaron las fuentes citadas en los artículos, con la finalidad de ampliar la búsqueda y agregar material relevante.

#### 10.2.3. Cambios de temperatura en la cerda durante el parto: aspectos fisiopatológicos asociados a enfermedad o a estrés por calor

Durante la gestación y la lactancia se recomienda mantener a las cerdas en temperaturas ambientales entre los 18 y 23°C (Malmkvist et al., 2009), debido a que esta especie es particularmente sensible al calor y a que ambos períodos son

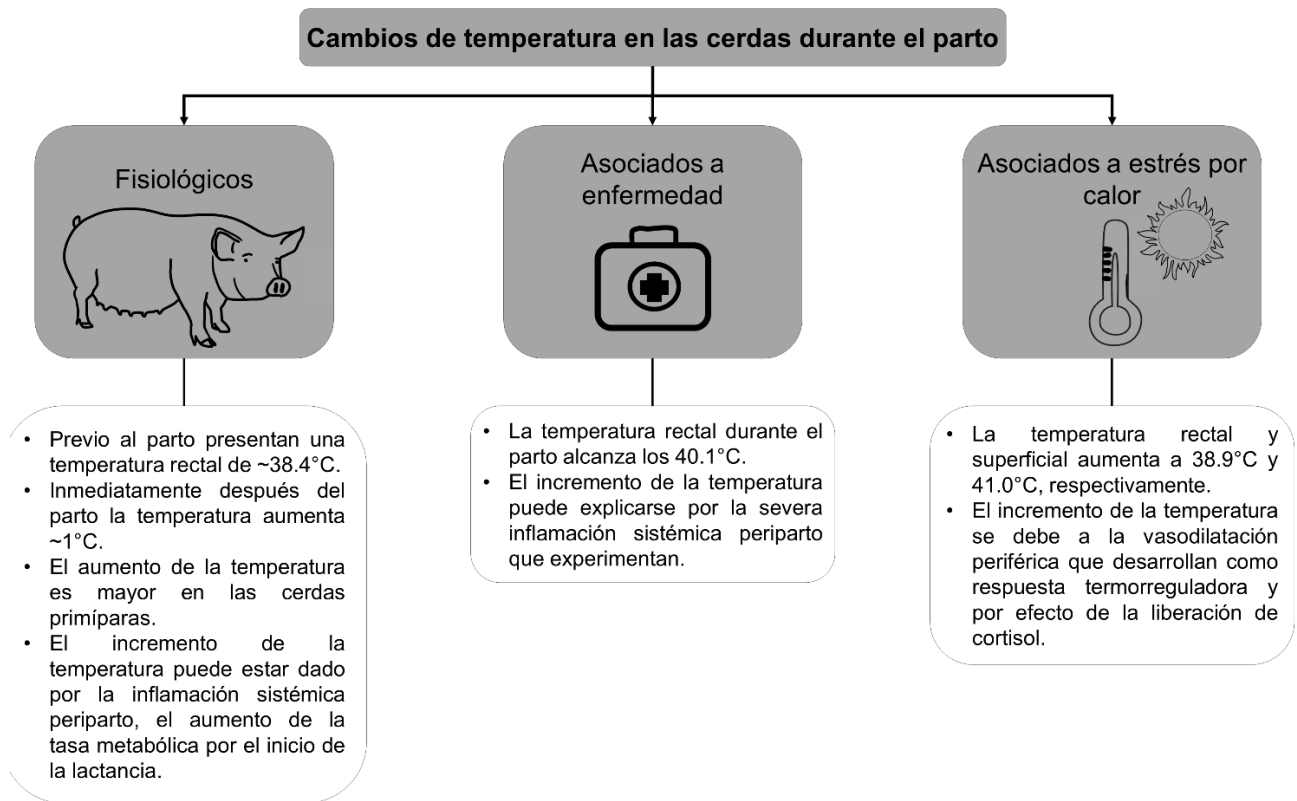
críticos por el desarrollo fetal y el inicio de la producción de leche, respectivamente (Hawkins et al., 2000).

Estudios científicos han demostrado que independientemente de si cerdas primíparas se encuentran en ambientes termoneutrales (18-20°C) o cálidos (24-30°C), éstas presentan en la sala de parición una temperatura rectal de aproximadamente 38.4°C, la cual aumenta alrededor de 1°C (39.4°C) inmediatamente después del parto. Posteriormente, la temperatura sufre un ligero descenso de tal forma que se queda en un punto medio entre la alcanzada durante la gestación y el parto, para finalmente volver a aumentar en el transcurso de la lactancia hasta llegar a los 39.36±0.01°C. Resultados similares fueron reportados por Sipos et al. (2013) quienes observaron tanto en cerdas primíparas (n=33) como en multíparas (n=50) una temperatura promedio de 38.2°C en el día 113 de gestación, la cual aumentó hasta los 39.1°C durante el parto y posteriormente se mantuvo relativamente constante hasta que en la segunda semana de lactancia (días 7-14 postparto) alcanzó los 39.7°C para luego disminuir hasta 38.6°C un día después de llevar a cabo el destete. No obstante resulta necesario mencionar que el número de partos impacta en la magnitud del incremento de la temperatura, pues las cerdas primíparas presentan un mayor aumento que las multíparas (Lucy & Safranski, 2017; Sipos et al., 2013).

Estos hallazgos han llevado a concluir que la temperatura rectal depende de la fase reproductiva en la que se encuentre la cerda, siendo el parto y la lactancia las etapas donde se detectan los incrementos más significativos debido al alto estado metabólico al que están sometidas las hembras. Aunado a ello se ha sugerido que el incremento uniforme de la temperatura rectal una hora después del parto puede estar dado por el aumento de la tasa metabólica por efecto del inicio de la lactancia (Williams et al., 2013). Sin embargo, el aumento de la temperatura también puede deberse a la inflamación sistémica periparto que se desencadena por la liberación de citocinas y proteínas de fase aguda que se produce por el trauma tisular que puede provocar el feto en el canal de parto, por la involución del útero o por la movilización del tejido adiposo (Vailati-Riboni et al., 2017). De hecho, Kaiser et al. (2018) demostraron a través de una evaluación hematológica y bioquímica que tanto cerdas sanas como aquellas afectadas por el síndrome de disgalactia posparto (PDS, por sus siglas en inglés) desarrollan inflamación sistémica periparto, aunque parece ser que la inflamación presente en

las cerdas con PDS es más severa, provocando que la temperatura rectal durante el parto llegue hasta los 40.1°C, mientras que en las cerdas sanas no superan los 39.3°C (Kaiser, Jacobson, et al., 2018). Cabe mencionar que pirógenos como las citocinas liberadas durante la respuesta inflamatoria aguda en el parto pueden cambiar el punto de ajuste de la temperatura central a nivel del hipotálamo (Rowsey, 2013; Gessner et al., 2015; Morrison, 2016), de tal forma que las hembras pueden presentar una temperatura rectal más elevada pero no requerir el desarrollo de respuestas termorreguladoras, como el jadeo.

Así como algunas patologías pueden provocar que la temperatura de las cerdas incremente aún más durante el parto, lo mismo sucede con el estrés térmico ocasionado por el calentamiento global. Tal y como comprobaron He et al. (2018) quienes después de estudiar el efecto de un ambiente termoneutral (18-22°C) o cálido (28-32°C) en la temperatura rectal y superficial de 12 cerdas primíparas próximas al parto encontraron que tanto la temperatura rectal (38.9 vs. 38.5°C) como la superficial (ubre 41.0 vs. 36.0°C; región ocular 40.5 vs. 36.5°C; hocico 40.0 vs. 31.5°C) es mayor en las cerdas expuestas al calor. Los autores sugieren que el aumento de la temperatura superficial se debe al inicio de la respuesta termorreguladora de vasodilatación periférica donde la sangre de los órganos internos se desvía a la circulación periférica para tratar de disipar el calor. Por otra parte, en el estudio se encontró que las concentraciones séricas de la hormona adrenocorticotrópica (ACTH, por sus siglas en inglés) y del cortisol también aumentaron en el grupo de cerdas expuestas al calor, demostrando así que en respuesta al estrés calórico el eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HPA, por sus siglas en inglés) se activa para la secreción de cortisol, pues esta hormona actúa como vasodilatador y también como estimulante de la proteólisis y la lipólisis, ambos procesos catabólicos necesarios para proporcionar energía al cuerpo y compensar la reducción de la ingesta de alimento (Cunningham & Klein, 2007) (Figura 2). De hecho, se han reportado resultados similares en cerdas gestantes expuestas a la calefacción del suelo (33.5°C), lo que lleva a concluir que la actividad del eje HPA puede verse modificada por cambios metabólicos, hormonales y térmicos (Malmkvist et al., 2009).



**Figura 2.** Cambios de temperatura que experimentan las cerdas durante el parto y su causalidad.

A continuación se discuten las consecuencias del aumento de la temperatura en las cerdas por efecto del cambio climático, así como la aplicación del estudio de los cambios de temperatura originados por el síndrome de disgalactia posparto.

#### 10.2.3.1. Consecuencias del cambio de temperatura asociado al estrés por calor

En los últimos años se ha mejorado el rendimiento productivo de las cerdas (Boulot et al., 2008), pero a la par de ello ha aumentado su producción de calor metabólico, por lo que las cerdas ahora llegan a experimentar estrés por calor incluso en climas templados (Bloemhof et al., 2013). Esta situación resulta alarmante considerando que se tiene estimado que la temperatura aumente hasta 4.2°C por efecto del calentamiento global (Renaudeau & Dourmad, 2022).

Inicialmente los estudios sobre estrés por calor se centraron en la cerda lactante, debido a la alta carga metabólica que se da en dicho periodo; sin embargo, se ha comenzado a analizar el efecto de la temperatura ambiental durante la gestación por las repercusiones que puede tener particularmente en la etapa previa al parto. Ha sido a través de dichos estudios que se ha observado que las cerdas gestantes

expuestas al estrés calórico experimentan un incremento en la frecuencia respiratoria y la temperatura superficial y rectal; cabe señalar que la magnitud del aumento de la temperatura rectal dependerá del tiempo de exposición al estrés térmico, de tal forma que el incremento será mayor cuando la exposición a dichas condiciones sea por un período prolongado (Lucy et al., 2012; Williams et al., 2013). Por otra parte, también se ha reportado que bajo estrés por calor las cerdas reducen su actividad física, de modo que puede cambiar su composición corporal y aumentar la relación grasa-músculo, especialmente cuando la exposición a estas condiciones ha sido durante toda la gestación. Lo anterior fue comprobado por Lucy y Safranski (2017) quienes determinaron que las cerdas expuestas a estrés térmico tienen más peso corporal, área del lomo y grasa dorsal.

Además de las repercusiones que puede tener en las madres, la exposición a altas temperaturas ambientales puede afectar el propio proceso de parto, tal y como señalan Liu et al. (2021) y Lucy y Safranski (2017), quienes observaron que el período de gestación fue más corto (por 1.5 días) y el tiempo de parto fue más prolongado que bajo condiciones termoneutrales (6.5 vs. 5.2 horas, respectivamente), especialmente durante la expulsión de los dos primeros lechones (17.17±1.93 vs. 8.3±1.02 segundos, respectivamente). En condiciones normales la oxitocina plasmática aumenta entre las 24 y 5 horas previas al parto (Damm et al., 2003; Gilbert et al., 2002) e incluso incrementa aún más con cada expulsión fetal. Sin embargo, por efecto de factores estresantes como el calor, aumentan las concentraciones de las hormonas del eje HPA, las cuales pueden inhibir la liberación de oxitocina y, por ende, prolongar el parto (Lawrence et al., 1992). No obstante, resulta necesario mencionar que en algunos estudios no se han identificado cambios en la concentración de oxitocina por efecto de la exposición al calor (Malmkvist et al., 2009), por lo que debe continuar la investigación en este ámbito.

Por otra parte, la hipertermia intrauterina en las cerdas también puede impactar en la supervivencia y el desarrollo de los lechones (Graham et al., 1998; Wegner et al., 2016). Se ha visto que aquellos lechones que descienden de cerdas expuestas a estrés calórico presentan un peso al nacer reducido (1180±50 vs. 1409±59 g; (Lucy & Safranski, 2017)) y son 0.5 kg más ligeros al destete (Williams et al., 2013); todo ello a pesar de que se ha reportado que estos mismos lechones tardan menos tiempo en iniciar el primer amamantamiento que los descendientes



de cerdas en ambientes termoneutrales (Malmkvist et al., 2006). En primera instancia, el bajo peso al nacer podría ser consecuencia de la vasodilatación periférica que desarrollan las cerdas como respuesta termorreguladora al estrés por calor, pues en rumiantes se ha descrito que por efecto de la vasodilatación periférica se reduce el flujo sanguíneo umbilical, provocando una disminución en la absorción de nutrientes y gases (Dreiling et al., 1991), llevando así al nacimiento de lechones delgados. Aunado a lo anterior, el aumento de la secreción de glucocorticoides en la madre por efecto del estrés también disminuye la permeabilidad del intestino neonatal a los anticuerpos, dando así un efecto inmunosupresor (Morris & Morris, 1976) que conlleva a menores concentraciones de inmunoglobulina G (IgG) tanto en la sangre de los lechones (19.6 mg/ml) como en el calostro (64.1 mg/ml) (Machado-Neto et al., 1987), siendo esto último un factor que también podría explicar el bajo peso al destete. De igual forma, el bajo peso al destete podría deberse a que la exposición de las madres a estrés calórico durante la gestación tardía induce respuestas metabólicas (He et al., 2018) como el catabolismo proteico, el cual puede repercutir en la síntesis de proteínas de la leche (Cowley et al., 2015) y, por ende, en la nutrición y el peso de los lechones.

Aunado a ello, se ha observado que los lechones provenientes de cerdas expuestas al calor exhiben una temperatura corporal central crónicamente elevada (posiblemente por efecto de una alteración en el eje HPA debido a la exposición intrauterina al cortisol), mayor deposición de grasa, menor acumulación de proteínas, alteración en el desarrollo gonadal y mayor número de intentos de escape e interacciones agresivas (Byrd et al., 2019; Lucy & Safranski, 2017); demostrando así que la hipertermia durante la gestación y el parto puede repercutir en el crecimiento, comportamiento y metabolismo de la descendencia (Chen et al., 2010; Shiota & Kayamura, 1989), lo cual representaría pérdidas económicas importantes.

Ahora conociendo las repercusiones que produce el estrés por calor se sabe que se debe evitar el uso de calefacción del suelo durante el parto (Malmkvist et al., 2009, 2012), mientras que se sugiere la implementación de almohadillas o cubiertas superiores con agua refrigerada; ambas estrategias que además de mejorar el bienestar de las cerdas gestantes, procuran evitar que se afecte la temperatura de los lechones (Pang et al., 2011; Parois et al., 2018).

#### 10.2.3.2. Aplicación del estudio de los cambios de temperatura originados por el síndrome de disgalactia posparto

Durante la lactación temprana las cerdas pueden presentar PDS, una patología con prevalencia del 6-48.2% que se caracteriza por signos como anorexia, ubre inflamada, actividad física disminuida y temperatura rectal elevada (Kaiser, Jacobson, et al., 2018). Sin embargo, el diagnóstico de esta enfermedad suele ser complicado debido a que la mayoría de los casos son subclínicos y sólo se detectan cuando se observa que los lechones están perdiendo peso. Considerando que diversos autores señalan que una temperatura rectal superior a los 39.5°C estaría indicando a las cerdas como positivas a PDS (Madec & Leon, 1992) y que existe una mayor prevalencia de mortinatos en camadas de cerdas que presentan fiebre antes y después del parto (Hales et al., 2013), se han desarrollado estudios para determinar si la medición de la temperatura rectal de las cerdas próximas al parto es suficiente para el diagnóstico oportuno del PDS.

Dichos estudios han de mostrado que a pesar de que la temperatura rectal es considerada un parámetro de diagnóstico importante, se debe evitar emplearla como un indicador automático para el diagnóstico de PDS pues se ha demostrado que cerdas clínicamente sanas llegan a tener una temperatura por encima de los 39.5°C por efecto del proceso fisiológico durante el parto y el inicio de la lactación (Sipos et al., 2013). Aunado a ello, la temperatura puede estar influenciada por varios factores por lo que para el diagnóstico de esta patología se recomienda complementar los resultados con concentraciones séricas de citocinas proinflamatorias (como el factor de necrosis tumoral alfa y la interleucina 6), las cuales se muestran elevadas después del parto, y el recuento de glóbulos blancos y neutrófilos, el cual se encuentra elevado inmediatamente antes y después del parto, pero disminuye a partir de las 12 horas posparto. Cabe recordar que las cerdas clínicamente sanas también experimentan inflamación sistémica, pero ésta es más severa en las hembras afectadas por el síndrome (Kaiser, Jacobson, et al., 2018).

#### 10.2.4. Perspectivas

Estudios como el de Sipos et al. (2013) y He et al. (2018) han ayudado a determinar que durante el parto la temperatura de la madre aumenta por efecto de la inflamación sistémica periparto que se produce y no necesariamente por el

desarrollo de una patología o estrés calórico; sin embargo, aún queda por esclarecerse si el incremento de la temperatura durante esta etapa facilita el parto, hace más efectivo el transporte de los nutrientes hacia la leche o si proporciona alguna otra ventaja (Lucy & Safranski, 2017). Igualmente, queda pendiente la explicación de por qué en las cerdas primerizas el incremento de la temperatura es mayor que en las multíparas. De la misma forma, aún queda por dilucidar si, independientemente de la temperatura ambiental, las madres experimentan un cambio en el “punto de ajuste” de la termorregulación cuando pasan de la gestación a la lactancia, el cual les permite mantener una temperatura rectal y superficial superior sin la necesidad de que incrementen su frecuencia respiratoria o desarrollen alguna otra conducta termorreguladora (Williams et al., 2013).

Asimismo, debería ahondarse en la investigación sobre el estrés calórico en las cerdas durante la gestación y el parto para lograr determinar si el calor realmente provoca un descenso en la concentración de oxitocina (Lawrence et al., 1992) o no (Malmkvist et al., 2009). Posiblemente los resultados contradictorios que se han reportado se deben a que en los estudios anteriores se manejaron temperaturas ambientales, métodos de muestreo, genotipos y paridades diferentes, por lo que se recomendaría el desarrollo de varias investigaciones bajo las mismas condiciones o de una sola investigación, pero con un tamaño de muestra mayor.

Continuando con la temática de estrés por calor, a lo largo de los años se ha sugerido la posibilidad de que las madres expuestas al calor logren transferir tolerancia térmica a su descendencia, de forma que se saque provecho de la hipertermia intrauterina reproduciendo a los lechones con mayor resistencia a dichas condiciones. Sin embargo, Johnson et al. (2013) han reportado que los lechones provenientes de cerdas sometidas a estrés calórico se muestran más hipertérmicos que aquellos provenientes de madres expuestas a un ambiente termoneutral, sugiriendo así que los primeros tienen menor capacidad de termorregulación, lo cual de ser cierto representaría una amenaza durante el destete o el transporte (Byrd et al., 2019). De hecho, los autores también observaron que los lechones provenientes de cerdas sometidas a estrés calórico tardan más tiempo en incrementar su frecuencia respiratoria. No obstante, existe la posibilidad de que estos resultados estén indicando que debido a modificaciones epigenéticas los lechones lograron ser tolerantes a temperaturas

corporales más elevadas y sin la necesidad de desarrollar conductas termorreguladoras de inmediato. Es por ello que resulta necesario realizar más estudios para tener claridad sobre esta controversia y lograr determinar si es posible obtener por medio de mejoramiento genético hembras cuya reproducción, gestación y parto no se vea afectada por el calentamiento global. De igual forma, sería interesante determinar si por medio de la genética es factible obtener cerdas con una tasa metabólica que pueda regularse de manera más efectiva durante períodos de alto consumo de energía, particularmente ahora que los tamaños de camada son más grandes, con la finalidad de mejorar la tolerancia térmica. Pero para ello será necesario que se terminen de identificar las regiones genómicas asociadas a la temperatura rectal (Kim et al., 2018) y se concluya si se obtienen mejores resultados con algunas razas o cruza en particular (Lucy & Safranski, 2017).

No obstante, sabiendo que la implementación de herramientas genéticas requiere de tiempo, resulta indispensable continuar con los avances relacionados con la temperatura de la cerda. Por muchos años se ha puesto especial atención a la temperatura rectal debido a que en esta región se obtienen los resultados más confiables sobre los cambios de temperatura durante el ciclo de reproducción (Sipos et al., 2013); sin embargo, puede resultar complicado evaluar constantemente la temperatura rectal en una etapa fisiológica como el parto, por lo que se recomendaría explorar el uso de la termografía infrarroja para futuros estudios, sobre todo si se busca desarrollar un índice de predicción temprana de infección como el que se ha obtenido para el ganado (Schaefer et al., 2004).

#### 10.2.5. Conclusión

Durante el parto las hembras se enfrentan a cambios hormonales, metabólicos y térmicos. Al tratarse de un evento con un impacto económico importante en la producción porcícola, resulta necesario cuantificar la temperatura de las cerdas para conocer los cambios que pueden experimentar por efecto del propio proceso fisiológico o por la intervención de factores como las enfermedades y el clima.

Los estudios científicos han demostrado que independientemente de la temperatura ambiental y el número de partos, las cerdas clínicamente sanas presentan cambios en la temperatura corporal durante la transición de la gestación a la lactancia. Dentro de dichos cambios se destaca el aumento de

aproximadamente 1°C que surge inmediatamente después del parto debido a la inflamación sistémica periparto que se produce y al incremento de la tasa metabólica que se da por efecto del inicio de la lactancia. Por su parte, se ha comprobado que las cerdas que padecen de PDS también experimentan inflamación sistémica periparto, pero más severa, lo que provoca que el aumento de la temperatura sea aún mayor. Similar a ello, se ha evidenciado que ante ambientes cálidos el incremento de la temperatura en las cerdas es más severo debido a que por el estrés calórico se libera cortisol, el cual produce vasodilatación. Ha sido a través de estas mismas investigaciones que se ha determinado la importancia de evitar el estrés por calor en las cerdas pues también puede provocar un aumento en la relación grasa-músculo en la madre, partos más prolongados y el nacimiento de lechones con alteración gonadal, mayor deposición de grasa y menor peso al nacimiento y al destete, todas ellas consecuencias con repercusiones económicas importantes.

Todos estos hallazgos son valiosos para comprender los cambios de temperatura que se dan de forma natural (evitando así que diagnostiquen erróneamente patologías), para identificar los cuidados que se deben seguir para prevenir cambios de mayor magnitud (por ejemplo, evitando el uso de calefacción de suelo) y para valorar la aplicación de estrategias que ayuden a reducir el impacto de la temperatura ambiental (como con las cubiertas con agua refrigerada) sin que se comprometa el desarrollo y bienestar de los lechones. Asimismo, se puede evaluar la aplicación de este conocimiento para el diagnóstico oportuno del PDS, especialmente cuando no es posible la realización de estudios hematológicos. Cabe señalar que se ha demostrado que no se puede hacer un diagnóstico del síndrome basándose únicamente en la temperatura, por lo que resulta necesario complementar los resultados con la frecuencia cardíaca y respiratoria, y el comportamiento.

A pesar de las investigaciones que se han realizado aún queda por dilucidar diversos aspectos como el por qué en las cerdas primerizas el aumento de la temperatura es mayor que en las multíparas, si el estrés por calor repercute en la liberación de oxitocina o si las madres pueden transferir tolerancia térmica a sus lechones y éstos a su vez a su descendencia. Como se mencionó anteriormente, son pocos los estudios que se han enfocado en evaluar los cambios de temperatura que experimentan las cerdas durante el parto, posiblemente por la

dificultad de monitorear constantemente la temperatura rectal, por lo que se sugiere que en futuras investigaciones implementen herramientas no invasivas como la termografía infrarroja.

## 10.3. **Capítulo 3— Factores que influyen en la termoestabilidad del lechón recién nacido**

### 10.3.1. Introducción

Los cerdos entran dentro de la categoría de animales homeotérmicos dado que pueden mantener su temperatura corporal central relativamente constante, a pesar de las variaciones climáticas en su entorno (Gourdine et al., 2021). Sin embargo, los lechones son considerados animales semialtriciales, debido a que nacen con sistemas y órganos funcionales, pero no pueden termorregularse apropiadamente (Bienboire-Frosini et al., 2023). Esto se debe a que los lechones nacen con un centro termorregulador inmaduro, un mecanismo de gluconeogénesis inmaduro, poco pelo, poco tejido adiposo, una elevada relación superficie-volumen corporal y la ausencia de tejido adiposo pardo (BAT, por sus siglas en inglés) (Close, 1992; Herpin et al., 2002; Soerensen & Pedersen, 2015; Mirkov et al., 2021)..

Al nacer, los lechones pasan de una temperatura uterina de 38-40°C a una temperatura ambiental de 20-22°C (que coincide con la zona termoneutral de la cerda) (Berthon et al., 1993; Tuchscherer et al., 2000; Malmkvist et al., 2009) y de un suministro continuo de glucosa a una dotación de calostro discontinua (Herpin et al., 2002). Además, se encuentran cubiertos por aproximadamente 23 g de fluido amniótico que al evaporarse agrava la pérdida de calor (Nuntapaitoon & Tummaruk, 2015). Todo ello conduce a que durante las primeras 48 horas de vida los lechones experimenten un drástico descenso de hasta 2°C en la temperatura central del cuerpo, conocido como hipotermia postnatal ( Herpin et al., 2002; ; Kammergaard et al., 2011; Vasdal et al., 2011; Muns et al., 2016; Haverkamp et al., 2018; Vande Pol et al., 2020a; Lezama-García et al., 2022; ). De acuerdo con Lossec et al. (1998) y Sosnowski et al. (2015) la hipotermia postnatal ocurre naturalmente en la mayoría de los neonatos mamíferos, incluso cuando éstos poseen mecanismos de termorregulación totalmente funcionales; sin embargo, tanto la caída de la temperatura como el tiempo necesario para la recuperación son muy variables. En el caso de los cerdos el descenso de la temperatura ocurre

en los primeros 20 minutos de vida y es hasta las 48 horas postparto que logran aumentar su temperatura a valores normales (38-39°C) (Close, 1992; Herpin et al., 2002). No obstante, debido a su anatomofisiología, algunos lechones no logran recuperarse del descenso de la temperatura (Muns, 2013; Olczak et al., 2015) y al volverse hipotérmicos presentan problemas de orientación y locomoción (De Roth & Downie, 1976; Svendsen et al., 1986) que aumentan la probabilidad de que sean aplastados por la madre (Kammersgaard et al., 2011), contribuyendo así a la problemática de la elevada tasa de mortalidad predestete (Villanueva-García et al., 2021).

Debido a que se ha reportado la existencia de diferencias individuales en lo que respecta a la recuperación exitosa de la hipotermia postnatal (Kammersgaard et al., 2011), resulta importante identificar los elementos que podrían estar impactando en la capacidad termorreguladora de los lechones. Es por ello que el objetivo de esta revisión es analizar y discutir los factores que influyen en la termoestabilidad del lechón recién nacido, para que éstos sean tomados en cuenta al momento de proponer estrategias para evitar la hipotermia postnatal severa.

### 10.3.2. Material y métodos

Se consultó literatura publicada entre 2000 y 2022 en las bases de datos Web of Science, Science Direct y PubMed. La búsqueda se perfeccionó empleando conceptos claves como: termorregulación del lechón, hipotermia neonatal y factores asociados al desarrollo de habilidades termorreguladoras. También se revisaron las fuentes citadas en los artículos, con la finalidad de ampliar la búsqueda y agregar material relevante.

### 10.3.3. Aspectos anatomofisiológicos y la efectividad de los mecanismos de termorregulación en los lechones

Los lechones recién nacidos presentan una epidermis con un grosor de entre 33-68  $\mu\text{m}$  (Gauthier et al., 2018) y 730 folículos pilosos/ $\text{cm}^2$  (Fujita et al., 2018). Por una parte, a pesar de su escaso pelo, los lechones pueden desarrollar piloerección (Mowafy & Cassens, 1975), una respuesta termorreguladora que les permite conservar el calor al formar una capa de aire caliente alrededor del cuerpo (Villanueva-García et al., 2021). Por otra parte, se ha demostrado que también



pueden detener el descenso de la temperatura superficial por medio de la vasoconstricción periférica, aunque el impacto de esta respuesta se ha descrito como muy limitado (Herpin et al., 2002).

Tomando en cuenta lo anterior, los lechones recurren en primera instancia a la movilización de dos sustratos energéticos para la producción de calor: la grasa y el glucógeno (Villanueva-García et al., 2021). Durante las primeras horas de vida se moviliza la grasa; sin embargo, dado que los lechones recién nacidos poseen poco tejido adiposo (1.5-4%) (Mersmann et al., 1975; Herpin et al., 2002;) y la mayoría de éste es estructural (Herpin et al., 2002), es limitado su uso para la producción de calor y el aislamiento térmico (Curtis, 1970; Hood & Allen, 1977). Es por ello que los neonatos dependen principalmente del glucógeno como reserva energética. Las reservas de glucógeno se encuentran en mayor medida en el hígado (120 mg/g de peso corporal) y en el músculo esquelético (100 mg/g de peso corporal) (Elliot & Lodge, 1977). Debido a que se ha visto que de acuerdo a la disponibilidad de las reservas corporales es que se determina si el neonato podrá evitar la hipotermia, se ha intentado mejorar la cantidad de reservas corporales en los lechones, pero no se ha tenido éxito pues la mayoría de estas reservas se depositan en el último trimestre de la gestación y resulta difícil manipularlas por medio de la dieta (Close, 1992).

Cabe mencionar que los lechones pueden aumentar su tasa metabólica hasta tres veces (Mount & Stephens, 1970), pero no pueden mantener su tasa de producción de calor por períodos largos, pues las reservas energéticas se agotan después de las 32 horas de vida. Además, el uso excesivo de las reservas de glucógeno hepático o muscular puede conducir a un estado de acidosis metabólica que derive en un coma o la muerte (Mota-Rojas, et al., 2021; Villanueva-García et al., 2021).

Debido a que los aspectos anatomofisiológicos no contribuyen en gran medida al desarrollo de la homeotermia, los lechones pueden emplear otros mecanismos para intentar compensar la pérdida de calor. Dentro de los mecanismos termorreguladores empleados por los mamíferos se destacan la termogénesis por temblor y la termogénesis del BAT (Mota-Rojas et al., 2021). A continuación se describirá la participación de éstas y otras respuestas en la termorregulación de los lechones; sin embargo, cabe destacar que estudios de neuroimagen sugieren

que el tálamo y el hipotálamo del lechón alcanzan su madurez hasta las 5 semanas de vida, por lo que se concluye que nacen con un centro termorregulador inmaduro (Poore & Fowden, 2003; Ferreira et al., 2007; Conrad et al., 2012).

#### 10.3.3.1. Termogénesis del BAT

La termogénesis del BAT es considerada una respuesta termorreguladora de gran importancia para los neonatos (Mrowka & Reuter, 2016). Ésta se da gracias a que el BAT contiene la proteína desacopladora-1 (UCP1), la cual puede aumentar la producción de calor al desacoplar la respiración celular de la síntesis de ATP. Sin embargo, los lechones no pueden emplear este mecanismo para termorregularse debido a que no poseen este tejido (Herpin et al., 2002). No obstante, se ha observado que las células de los lechones ejecutan un proceso conocido como “browning” en el tejido adiposo blanco, el cual les permite llevar a cabo termogénesis sin temblor (Hou et al., 2018). Aun así, si las reservas de este tejido no son suficientes, la capacidad termorreguladora disminuye.

#### 10.3.3.2. Termogénesis por temblor

La respuesta termogénica del lechón recién nacido no incluye la termogénesis sin temblor (Berthon et al., 1996), por lo cual, el músculo esquelético desempeña un papel clave en la preservación de la homeotermia por medio de la termogénesis con temblores ( Berthon et al., 1995; Berg et al., 2006; Bal et al., 2016; Bienboire-Frosini et al., 2023). La termogénesis por temblor consiste en la producción de calor a través del proceso repetitivo de contracción muscular (Berthon et al., 1994; Theil et al., 2014) donde se da la hidrólisis del ATP (Little & Seebacher, 2013; Rowland et al., 2015). Lo anterior fue confirmado por Berthon et al. (1996), quienes después de exponer lechones a un ambiente frío (25°C) observaron mayor actividad de temblor en el músculo *Longissimus dorsi* ( $121.3 \pm 25.4$  vs.  $4.6 \pm 1.4$  mV/min) y, por consiguiente, mayor producción de calor ( $32.1 \pm 0.9$  vs.  $19.8 \pm 0.7$  kJ/h/kg de peso corporal) que en aquellos lechones que se encontraban a 34°C.

No obstante, la termogénesis por temblor es un mecanismo energéticamente costoso que puede comprometer la función muscular (Periasamy et al., 2017). Además, en los lechones se ha descrito la ausencia de masa de microfibrillas (encargadas de la potencia de contracción muscular) y una irrigación muscular disminuida, aspectos que comprometen la respuesta termorreguladora y explican

por qué es que se han detectado lechones con baja temperatura rectal a pesar del desarrollo de este mecanismo (Bienboire-Frosini et al., 2023). Se sabe que el suministro de sangre al músculo, la masa mitocondrial y la densidad del volumen de las miofibrillas mejora notablemente a los 5 días de edad (Herpin et al., 2002), lo cual lleva a concluir que incluso llevando a cabo esta respuesta termorreguladora los neonatos siguen siendo susceptibles a la hipotermia.

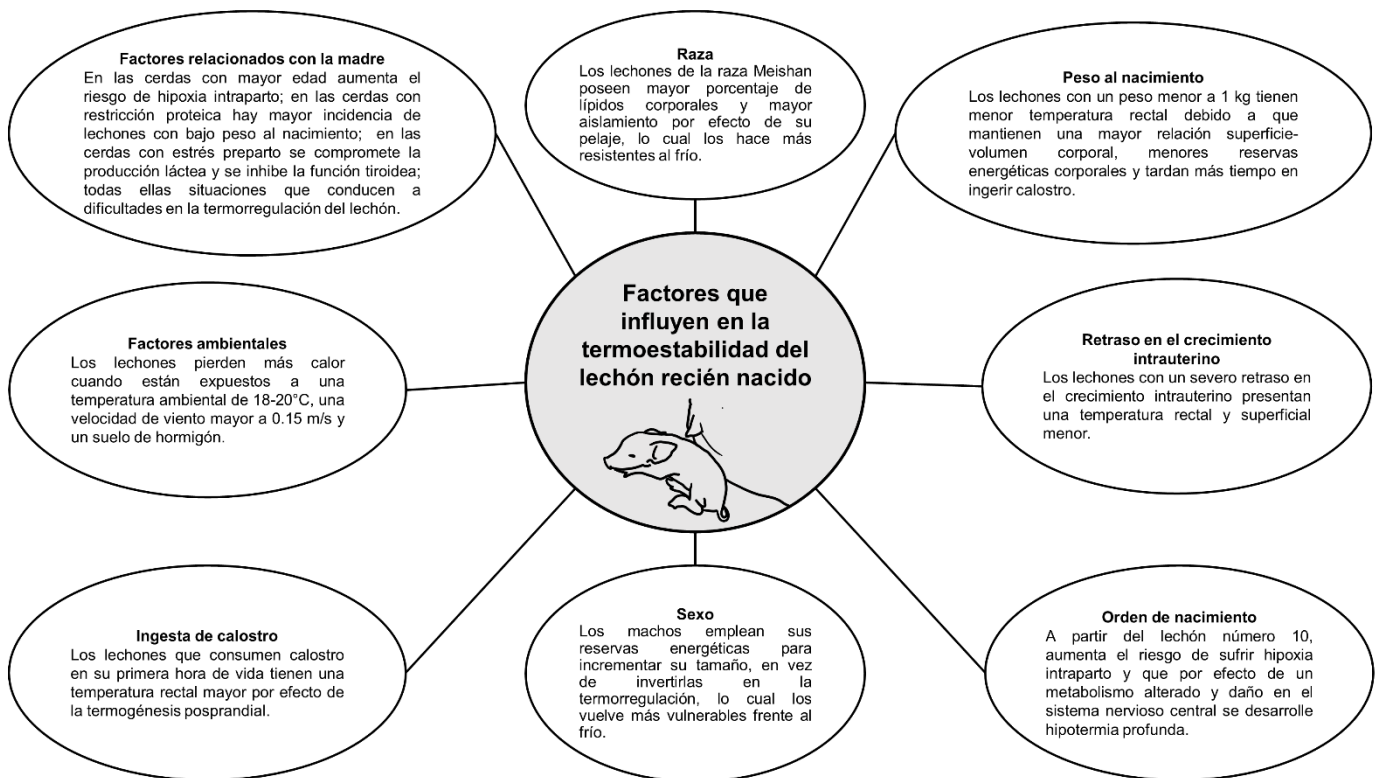
#### 10.3.3.3. Conducta termorreguladora

Los lechones también pueden desarrollar estrategias de comportamiento, como adoptar una postura esternal, para limitar la pérdida de calor conductivo (Mount, 1967; Vasdal et al., 2009; Kammergaard et al., 2011; al disminuir la superficie de contacto con el piso (Terrien et al., 2011). Asimismo, se ha observado que los lechones obtienen una ventaja térmica al estar en contacto con la ubre de la cerda por periodos prolongados, debido a que adquieren calor por medio de la conducción. Lo mismo sucede cuando se acurrucan con el resto de los lechones de la camada y reducen la superficie corporal expuesta a la baja temperatura ambiental y a las corrientes de aire (Kammergaard et al., 2011, 2013). De hecho, se ha demostrado que los lechones que se encuentran alejados de la ubre presentan una menor temperatura corporal en comparación con aquellos que se mantienen junto a sus congéneres o a la ubre de la madre (Kammergaard et al., 2011; Melišová et al., 2014). Estos hallazgos evidencian que las adaptaciones en el comportamiento de los lechones ayudan a disminuir la pérdida de calor (Vasdal et al., 2009).

A manera de síntesis se puede concluir que el desarrollo hipotalámico incompleto sumado a la relativa inmadurez fisiológica y metabólica de los lechones son los responsables de la incapacidad del neonato para superar un ambiente desafiante como el extrauterino (Lezama-García et al., 2022), especialmente cuando pierden calor por evaporación (fluidos fetales), radiación (poco pelo), convección (flujo de aire) y conducción (exposición a objetos fríos) (Theil et al., 2014).

### 10.3.4. Factores que influyen en la termorregulación del lechón recién nacido

Además de las características anatomofisiológicas y los mecanismos de termorregulación en los lechones recién nacidos, existen otros factores que pueden comprometer su termoestabilidad y volverlos aún más susceptibles a la hipotermia (Figura 3). A continuación, se desglosan los hallazgos que se conocen sobre cada uno de ellos.



**Figura 3.** Factores que influyen en la termorregulación del lechón recién nacido.

#### 10.3.4.1. Peso al nacimiento

De acuerdo con Muns et al. (2016) y Caldara et al. (2014), el peso al nacimiento es un factor que impacta directamente en la capacidad de termorregulación en los lechones. De hecho, se ha demostrado que el peso al nacer está correlacionado positivamente con la temperatura rectal (Schmitt & O'Driscoll, 2021), de tal forma que los lechones con mayor peso (1.5 kg) tienen una temperatura rectal ( $37.3 \pm 0.38^\circ\text{C}$  vs.  $35.7 \pm 0.41$ ) y superficial ( $36.5 \pm 0.35^\circ\text{C}$  vs.  $35.2 \pm 0.36$  en la base de la oreja) mayor que la registrada en individuos con un peso al nacimiento de 0.27-1.27 kg; aspecto que ha sido corroborado por Kammergaard et al. (2011).

Por una parte, se ha explicado que estos resultados se deben a que los lechones menos pesados cuentan con una mayor relación superficie-volumen corporal, lo cual los hace más propensos a perder calor en un ambiente frío (Stanton et al., 1973). Sin embargo, también se ha observado que los lechones con menor peso poseen menos reservas energéticas corporales (Panzardi et al., 2013). Lo anterior fue comprobado por Vanden Hole et al. (2019), quienes reportaron que los lechones con bajo peso al nacimiento ( $0.79 \pm 0.26$  kg) presentan hasta 50% menos cantidad de glucógeno que los lechones con peso normal ( $1.37 \pm 0.29$  kg), además de que emplean las reservas energéticas en su hígado y extremidades pelvianas hasta después de las 96 y 8 horas postparto, respectivamente. Aunado a ello, se sabe que los lechones más pesados tardan menos tiempo en ingerir calostro (Kammersgaard et al., 2011), mientras que los que nacen con un peso corporal menor a 800 g usualmente no son capaces de consumir calostro, pues sus bajas reservas energéticas presentes en el músculo les impiden llevar a cabo su primer amamantamiento (Herpin et al., 2004) o al menos no de forma rápida, lo que puede derivar en que elijan una glándula mamaria menos productiva (Panzardi et al., 2013). Posteriormente, la inanición e hipotermia provocan problemas de locomoción que aumentan el riesgo de aplastamiento y, por ende, de mortalidad en las primeras 24 horas postparto.

Cabe mencionar que existen diferentes factores que pueden influir en el peso corporal que obtienen los lechones al nacer, dentro de los cuales se encuentran la localización fetal y el tamaño de la camada. Respecto a la posición fetal, se ha observado menor peso en los fetos de la región anterior del cuerno uterino (Kim et al., 2009). En el caso del tamaño de la camada, se sabe que en las cerdas con mayor tamaño de camada nacen lechones con bajo peso corporal. En ambas situaciones el bajo peso estaría dado por la reducción del espacio uterino (Kammersgaard et al., 2011; Quiniou et al., 2002) y el desarrollo de una placenta pequeña, la cual resulta en un pobre suministro de glucosa y, por consiguiente, en una menor tasa de crecimiento (Muns et al., 2016; Roehe & Kalm, 2000). Al influir en el peso al nacimiento, estos dos factores podrían estar repercutiendo de forma indirecta en la capacidad termorreguladora de los lechones.

En síntesis, el peso al nacimiento influye en la capacidad termorreguladora del lechón (Schmitt & O'Driscoll, 2021). Los lechones con bajo peso (<1 kg), debido a sus pocas reservas energéticas y a su mayor relación superficie-volumen corporal,

tienen dificultades para mantener su temperatura y para recuperarse del descenso que se produce durante la primera hora de vida (Muns et al., 2016), por lo que sólo el 28% de estos lechones logra sobrevivir (Marchant et al., 2000).

#### 10.3.4.2. Retraso en el crecimiento intrauterino

Algunos lechones no alcanzan un crecimiento óptimo durante la etapa de gestación, situación que se conoce como retraso del crecimiento intrauterino. Los lechones que lo padecen se caracterizan por presentar una cabeza en forma de delfín, ojos saltones, arrugas alrededor del hocico y un cuerpo anormalmente largo y delgado (Hales et al., 2013). Dependiendo de la gravedad de este retraso, los lechones pueden tener entre dos a cuatro veces mayor riesgo de morir antes del destete (Hansen et al., 2019). Parte del incremento en la mortalidad de estos lechones podría deberse al efecto que tiene este padecimiento en la termorregulación, pues se ha comprobado que los lechones con un severo retraso presentan una temperatura rectal ( $35.8 \pm 0.46$  vs.  $37.2 \pm 0.42^\circ\text{C}$ ) y superficial ( $35.1 \pm 0.42$  vs.  $36.3 \pm 0.36^\circ\text{C}$ ) más baja que los lechones normales (Schmitt & O'Driscoll, 2021). Estos resultados llevan a concluir que, al igual que el peso al nacimiento, el nivel de retraso en el crecimiento intrauterino repercute en la termoestabilidad de los lechones. Resulta necesario mencionar que el bajo peso al nacimiento y el retraso en el crecimiento intrauterino son dos condiciones independientes que describen diferentes poblaciones, aun cuando pueden afectar a los mismos lechones, porque su probabilidad de supervivencia puede ser diferente (Rutherford et al., 2013).

#### 10.3.4.3. Orden de nacimiento

Se ha observado que los lechones que nacen al último (a partir del lechón número 10) tienen mayor probabilidad de sufrir hipoxia durante el parto debido al efecto acumulativo de las contracciones uterinas (Alonso-Spilsbury et al., 2005). La hipoxia intraparto daña el sistema nervioso central, disminuye la capacidad del lechón para competir por alimento y altera el metabolismo de los carbohidratos, lo cual aumenta el riesgo de que desarrollen hipotermia profunda y mueran (Herpin et al., 2002; Panzardi et al., 2013; Muns et al., 2016).

#### 10.3.4.4. Sexo

A pesar de que los machos nacen con un peso corporal (1342 vs. 1296 g) y niveles de glucosa (0.23 mmol/l) más elevados que las hembras (Staarvik et al., 2019), no se han detectado efectos significativos del sexo en los parámetros fisiológicos (Tuchscherer et al., 2000). No obstante, se ha reportado que los lechones machos tienen mayor riesgo de morir, pues mientras las hembras invierten sus recursos energéticos en termorregularse, los machos los invierten en incrementar su tamaño y composición corporal, predisponiéndolos así al frío y a morir por factores asociados con la demanda energética (Baxter et al., 2012; Muns, 2013).

#### 10.3.4.5. Raza

Un estudio llevado a cabo por Le Dividich et al. (1991) demostró que los lechones de la raza china Meishan suelen ser más resistentes al frío y al hambre debido a que poseen un mayor porcentaje de lípidos corporales y un mayor aislamiento por su pelaje, características que sugieren que los lechones de esta raza son fisiológicamente más maduros al nacer (Herpin et al., 1993), por lo que incluso los lechones más delgados tienen mayor potencial metabólico que los lechones europeos (Herpin & Hulin, 2000). Dichos hallazgos llevan a plantear la existencia de diferencias en la capacidad termorreguladora de los lechones de otras razas.

#### 10.3.4.6. Ingesta de calostro

Con la finalidad de generar calor y evitar una caída drástica de los niveles de glucosa en sangre, los lechones ingieren calostro, la primera leche secretada por la glándula mamaria hasta las 12-24 horas postparto (Auldist et al., 2000; Ferreira et al., 2007; Quesnel et al., 2012; Muns et al., 2016;). Este alimento es una fuente rica en nutrientes digestibles, inmunoglobulinas (IgA, IgM y particularmente IgG), enzimas hidrolíticas, hormonas y factores de crecimiento (Baxter et al., 2011; Quesnel & Farmer, 2019; Rooke & Bland, 2002; Wu et al., 2010). Dentro de los nutrientes digestibles se encuentran la grasa (5.4%) y la lactosa (2.0%), las cuales son utilizadas para generar hasta el 60% de la energía que requiere el lechón para mantenerse en homeotermia durante su primer día de vida (Brandenburg &

Wilson, 1973; Caldara et al., 2014; Devillers et al., 2007; Kielland et al., 2015; Le Dividich et al., 2005; Le Dividich & Herpin, 1994; Quesnel et al., 2012), por medio de la termogénesis posprandial (Herpin et al., 2002).

Diferentes estudios han demostrado que la temperatura corporal y la producción de calor en los lechones está correlacionada positivamente con la ingesta de calostro ( Noblet & Le Dividich, 1981; Devillers et al., 2011; Muns et al., 2016). De hecho, se ha evidenciado que los lechones que ingieren calostro en la primera hora postparto tienen una temperatura rectal casi 1°C más elevada que aquellos que no lo consumieron (37.5 vs. 36.6°C) (Amdi et al., 2017). Sin embargo, se sabe que la ingesta normal de calostro durante el primer día de vida es insuficiente para lograr la estabilidad térmica; además de que su efecto sobre el aumento de la temperatura rectal es significativo hasta después de las 15 horas de vida (Le Dividich & Noblet, 1981).

Por ello se concluye que el consumo de calostro es de importancia para que los lechones aumenten su metabolismo y mejoren su termorregulación (Caldara et al., 2014; Close, 1992; Devillers et al., 2011; Ferreira et al., 2007; Herpin et al., 2002), aunque para lograr el éxito termorregulador resulta necesaria la preservación del calor y la movilización de las reservas energéticas (Close, 1992; Kammersgaard et al., 2011).

#### 10.3.4.7. Factores ambientales: temperatura, velocidad del viento y tipo de suelo

Referente a la temperatura ambiental, se ha observado que la exposición a un ambiente frío perjudica el desarrollo de la termoestabilidad en los lechones (Close, 1992). Estudios como el llevado a cabo por Le Dividich y Noblet (1981) han demostrado que a los 20 minutos postparto los lechones mantenidos a una temperatura ambiental de 18-20°C presentan una temperatura rectal 2°C menor que la de aquellos que están expuestos a un ambiente con 30-32°C. Asimismo, se ha reportado que el tiempo que requieren los lechones para lograr superar la hipotermia inicial es mayor cuando están expuestos a una temperatura ambiental baja, especialmente si tienen bajo peso al nacer (Close, 1992). En parte estos resultados se podrían explicar por la alteración que provoca la hipotermia profunda en el metabolismo de los carbohidratos al suprimir la liberación de insulina y



disminuir la sensibilidad de los tejidos hacia ella (Herpin et al., 2002), dificultando así la termogénesis.

De igual forma, se ha comprobado que los lechones son vulnerables al movimiento del aire, pues éste puede aumentar la pérdida de calor por convección si supera los 0.15 m/s (Close, 1992).

Por otro lado, diferentes autores han demostrado que las características térmicas del suelo también influyen en la tasa de intercambio de calor conductivo. Mientras que en un suelo de hormigón la pérdida de calor por conducción es de 0.15, en un suelo de madera el valor se reduce a 0.06 (equivalente a elevar la temperatura del piso 12°C); sin embargo, el suelo de poliestireno expandido es en el que se tiene un valor de sólo 0.02 (Mount, 1968). No obstante, se debe tomar en cuenta que, independientemente del material del suelo, la pérdida de calor también depende de la postura del animal y la temperatura ambiental (Close, 1992).

#### 10.3.4.8. Factores relacionados con la madre

Las cerdas de mayor edad tienden a tener partos más prolongados debido al exceso de grasa y al tono muscular uterino reducido, lo cual aumenta la probabilidad de que los lechones sufran hipoxia intraparto y, por tal motivo, tengan dificultades para termorregularse (Zaleski & Hacker, 1993).

Referente al peso al nacimiento, se ha demostrado que las madres que recibieron dietas de gestación con restricción de proteínas o con un perfil de aminoácidos desequilibrado presentan una mayor incidencia de lechones con bajo peso corporal (Kim et al., 2009), lo cual a su vez repercute en la termoestabilidad de las crías.

Por otra parte, se ha descrito que los lechones nacidos de cerdas estresadas presentan una mayor mortalidad, posiblemente debido a que el estrés preparto provoca la inhibición de la función tiroidea y, en consecuencia, reduce la capacidad de termorregulación de los lechones (Muns et al., 2014). De igual forma, el estrés puede comprometer la producción de calostro y, por ende, el suministro energético que los lechones requieren para lograr la homeotermia (Muns et al., 2016).

### 10.3.5. Perspectivas

Los estudios anteriormente citados han permitido identificar que el peso al nacimiento, la ingesta de calostro y la temperatura ambiental son sólo algunos de los factores que repercuten en la termoestabilidad de los lechones. No obstante, la mayoría de estas investigaciones se han llevado a cabo en sitios con climas templados o fríos, por lo que resulta necesario que se realicen estudios similares ante climas tropicales y cálidos para que se determine si el impacto de estos factores es el mismo independientemente del ambiente (Muns et al., 2016).

En sintonía con lo anterior, sería de gran valor que se efectuaran los mismos estudios con distintas razas y líneas genéticas (Sasaki et al., 2016) para poder comparar los resultados e incluso lograr identificar aspectos como el peso mínimo que deberían tener los lechones de cada raza al nacer para lograr la homeotermia en el menor tiempo posible y sobrevivir a la hipotermia postnatal (Kammersgaard et al., 2011). De igual forma, conociendo esta información se podría intentar aplicar el mejoramiento genético y reproducir aquellas cerdas que tengan camadas de lechones con el peso esperado. No obstante, es necesario señalar que resulta complicado controlar este tipo de características, especialmente cuando las granjas comerciales tienen como objetivo que cada cerda destete de 30 lechones al año (Knox, 2005).

También se ha descrito como dificultoso lograr incrementar las reservas energéticas de los lechones recién nacidos; sin embargo, se ha observado que los lechones provenientes de cerdas que recibieron suplementos de grasa al final de la gestación tienen mayor termoestabilidad a las 54 horas de vida que aquellos procedentes de cerdas a las que se les dio una dieta isoenergética (Seerley et al., 1974). Es por ello que se incita a que continúe esta línea de investigación para que se compruebe si a través de esta estrategia es posible obtener lechones que alcancen confort térmico a las pocas horas de nacer.

Por último, resulta necesario destacar que la mayoría de los estudios han evaluado la capacidad de termorregulación de los lechones por medio de la temperatura rectal (Panzardi et al., 2013). Pero al demostrarse que la termografía infrarroja se puede emplear para la detección de lechones con problemas de crecimiento (Sasaki et al., 2016) y que existe una correlación entre la temperatura

superficial máxima y la temperatura rectal (Kammersgaard et al., 2013), surge la posibilidad de que esta herramienta se pueda utilizar para diagnosticar oportunamente a los lechones que, basándose en los factores anteriormente descritos, tienen mayor riesgo de sufrir hipotermia. De comprobarse su utilidad como herramienta diagnóstica se podría tratar de forma rápida a los lechones para así reducir la tasa de mortalidad neonatal.

#### 10.3.6. Conclusión

En los lechones la transición de la vida intrauterina a la extrauterina está acompañada por un descenso de la temperatura ambiental que contribuye a la caída precipitada de la temperatura corporal de los neonatos. Dicha pérdida de calor está influenciada por mecanismos de conducción, convección, evaporación y radiación, así como por las propias características de la especie (poco pelo, escaso tejido adiposo, BAT ausente y reservas energéticas limitadas). Los lechones se apoyan de mecanismos termorreguladores como la vasoconstricción periférica, piloerección, termogénesis por temblor y cambios conductuales para intentar restablecer su temperatura corporal. Sin embargo, debido al desarrollo hipotalámico incompleto que presentan los lechones, estos mecanismos pueden no ser suficientes para superar el desafío térmico.

La evidencia científica ha llevado a concluir que factores como el peso al nacimiento, retraso en el crecimiento intrauterino, orden de nacimiento, sexo, raza, ingesta de calostro, temperatura ambiental, velocidad de viento, tipo de suelo, edad de la madre y estrés preparto, influyen de manera directa o indirecta en la termoestabilidad de los lechones.

A partir de estos hallazgos los médicos veterinarios pueden detectar de forma temprana aquellos lechones que deben mantenerse vigilados debido a que tienen más riesgo de padecer hipotermia profunda (lechones de camadas con más de 10 individuos, con un peso menor a 1 kg, machos, con severo retraso en el crecimiento intrauterino o que tardan más tiempo en ingerir calostro). Asimismo, pueden desarrollar estrategias enfocadas en ayudar a los lechones a lograr la homeotermia lo antes posible, como por ejemplo al asegurar la ingesta de calostro durante la primera hora postparto, utilizar suelos con buenas características térmicas (ej. poliestireno expandido) y evitar temperaturas ambientales por debajo

de los 20°C y velocidades de viento por arriba de los 0.15 m/s. De aplicar estas estrategias mejoraría el nivel de bienestar animal, aumentaría la supervivencia y se reducirían las pérdidas económicas que experimentan los productores por la elevada tasa de mortalidad pre-destete.

No obstante, aún queda por estudiar el impacto de estos mismos factores, pero en distintas razas, bajo climas cálidos y con ayuda de herramientas no invasivas como la termografía infrarroja. De igual forma, se incita a continuar investigando si es posible incrementar las reservas energéticas de los lechones recién nacidos o aplicar el mejoramiento genético para obtener camadas de lechones con un peso apropiado.

## 10.4. **Capítulo 4— Estrategias empleadas para reducir la pérdida de calor en el lechón recién nacido**

### 10.4.1. Introducción

La supervivencia de los lechones depende del resultado de interacciones entre el ambiente, la madre y el propio lechón. No obstante, se sabe que los lechones nacen sin BAT, con poco pelo y con pocas reservas móviles de lípidos y glucógeno (Herpin et al., 2002), lo cual llega a complicar aún más su supervivencia, dando como resultado elevadas tasas de mortalidad antes del destete de hasta el 20% (Devillers et al., 2011).

Dentro de las principales causas de muerte en lechones recién nacidos se encuentra el aplastamiento (18%) y la inanición (43%) (English y Smith, 1975), pero ambas suelen ser consecuencia de la hipotermia perinatal (Andersen & Pedersen, 2016; Edwards, 2002). Los lechones recién nacidos pueden estar a una temperatura mínima de 34°C, pero si la temperatura ambiental está por debajo de este valor comienzan a experimentar estrés por frío (Andersen et al., 2009). Cuando los lechones padecen de hipotermia se muestran letárgicos, menos competitivos y propensos a lograr una buena ingesta de calostro (Kelley, 1985). Los lechones llegan a tardar hasta más de 3 horas en lograr su primer amamantamiento exitoso y mientras lo logran sufren una gran pérdida de calor y energía, lo cual los lleva a pasar más tiempo cerca de la cerda aumentando así el riesgo de ser aplastados (Weary et al., 1996). Es por ello que el 60-80% de la mortalidad durante la lactancia suele ocurrir en los primeros 2 o 3 días después del parto (Andersen et al., 2009).

En los últimos años el número de lechones destetados ha aumentado, pero por efecto del incremento en el número total de lechones nacidos, no porque haya una reducción en la tasa de mortalidad. De hecho, la industria porcícola está interesada en reducir las altas tasas de mortalidad y mejorar el nivel de bienestar animal (Larsen et al., 2017) y para ello han sugerido la implementación de diversas estrategias. Una de las prácticas más empleadas para reducir la muerte de los lechones es la incorporación de parideras para limitar el movimiento de la madre y evitar el aplastamiento de los lechones. Diversos estudios han demostrado una

mejora en la supervivencia de los lechones al utilizar las parideras (Edwards & Fraser, 1997); sin embargo, esta estrategia por sí sola no ayuda a evitar o reducir la hipotermia perinatal, además de que impacta en el bienestar de las cerdas (Edwards & Baxter, 2015). Es por ello que el objetivo del presente escrito es discutir y evaluar las estrategias empleadas para reducir la pérdida de calor en el lechón recién nacido.

#### 10.4.2. Material y métodos

Se consultó literatura publicada entre 2000 y 2022 en las bases de datos Web of Science, Science Direct y PubMed. La búsqueda se perfeccionó empleando conceptos claves como: estrés térmico en lechones, supervivencia neonatal en cerdos y prevención de la hipotermia neonatal. También se revisaron las fuentes citadas en los artículos, con la finalidad de ampliar la búsqueda y agregar material relevante.

#### 10.4.3. Estrategias empleadas para reducir la pérdida de calor

Al nacer, los lechones se enfrentan a una temperatura ambiental de 15 a 20°C por debajo de la temperatura a la que se encontraban en el útero (39°C), lo cual provoca un descenso en su temperatura corporal. La magnitud de la caída depende de factores en el entorno; sin embargo, se ha observado que incluso estando en ambientes con temperatura de 38-40°C, la temperatura rectal de los lechones experimenta una disminución inmediatamente después de nacer (Kammersgaard, 2013).

Estando en la naturaleza los lechones recién nacidos son colocados en nidos creados por la madre, los cuales ayudan en su termorregulación. No obstante, en la mayoría de los sistemas de producción no se le proporciona material de anidación a las cerdas o si acaso se les otorga en cantidades inadecuadas. Aunado a ello, los lechones están en contacto directo con el piso de concreto o de rejillas, aspecto que promueve la pérdida de calor por convección. De igual manera, la presencia de líquido amniótico en la superficie corporal de los lechones (~23 g de fluido/kg de peso) complica aún más la situación provocando una rápida pérdida de calor por evaporación de 2-4°C en la primera hora de vida (Pedersen et al., 2013). Es por ello que resulta importante que a los lechones se les proporcione calor inmediatamente después de nacer para evitar la hipotermia

postnatal. A continuación se analizan las estrategias que se han sugerido para lograrlo.

Dentro de las estrategias enfocadas en la modificación del entorno se encuentra la implementación de paneles de calefacción radiante, lámparas de calor o suelo radiante. En relación a la primera, Andersen y Pedersen (2016) decidieron estudiar el efecto de proporcionar calefacción radiante en el área de parto para determinar si esta estrategia reduce la caída de la temperatura corporal en los lechones de Danish Landrace x Yorkshire. Para ello, colocaron dos paneles de calefacción radiante de 450 W en la pared trasera del corral del grupo experimental, de tal forma que la superficie del piso de esa área alcanzara una temperatura de 26-34°C media hora después de encender los paneles. Posteriormente registraron la temperatura rectal de los lechones a los 15, 30, 60, 120, 180 y 240 minutos después de nacer, así como a los 720, 840 y 1140 minutos después de nacer el primer lechón de la camada. Los resultados demostraron que la temperatura rectal fue mayor en los lechones expuestos a los paneles de calefacción desde el minuto 30 (34.9 vs. 34.3°C) hasta el minuto 240 (37.7 vs. 37.3°C), en comparación con el grupo control. Aunado a ello observaron que los lechones del grupo experimental tardaron hasta 4 minutos más en alejarse del área con calefacción, aunque demoraron el mismo tiempo en alcanzar la ubre y beber calostro que en el grupo control. Estos hallazgos llevaron a los autores a concluir que el uso de calefacción radiante logró reducir la caída de la temperatura rectal poco después del nacimiento y que también permitió que ésta se mantuviera más alta hasta 4 horas después del nacimiento. Demostrando así el gran beneficio de esta estrategia para mejorar la supervivencia de los lechones, pues información científica ha demostrado que la temperatura rectal de los lechones en las primeras 2 horas de vida es un importante indicador de supervivencia postnatal debido a que existe una correlación negativa entre la caída de la temperatura rectal y la probabilidad de supervivencia (Pedersen et al., 2011).

Por otro lado, en un estudio llevado a cabo por Pedersen et al. (2013) donde se evaluó el efecto del uso de suelo radiante ( $34.8 \pm 2.6^\circ\text{C}$  por 12 o 48 horas después de nacer el primer lechón) junto con diferentes temperaturas ambientales (15, 20 o 25°C) en los corrales de maternidad sin parideras, en la temperatura rectal de lechones recién nacidos, se observó que los lechones que se encontraban en

corrales con un ambiente de 25°C presentaban una temperatura rectal mínima mayor que la reportada en los grupos con 20 y 15°C de temperatura ( $35.8 \pm 0.19$  vs.  $35.0 \pm 0.18$  y  $34.6 \pm 0.19$ °C, respectivamente). No obstante, los resultados mostraron que el uso de suelo radiante durante 48 horas no trajo más beneficios que utilizarlo por 12 horas, independientemente de la temperatura ambiental, pues el riesgo de padecer hipotermia fue el mismo, además de que la probabilidad de morir durante los primeros 7 días fue 1.6 veces mayor en el grupo donde el suelo radiante se mantuvo por 48 horas, aspecto que contrasta con lo reportado anteriormente por Malmkvist et al. (2006). Aunado a ello, Pedersen et al. (2013) resaltan el hecho de que el suelo radiante consume energía y puede llegar a desafiar la termorregulación de la cerda (Malmkvist et al., 2012), por lo que se concluye que se puede mejorar el confort térmico de los lechones manteniendo la temperatura ambiental alta y utilizando suelo radiante durante las primeras 12 horas postparto.

Respecto a las estrategias enfocadas en la intervención del personal, una de las más estudiadas ha sido el secado de los lechones, actividad que tiene como finalidad eliminar los restos de fluidos fetales y puede desempeñarse con materiales como toallas de papel, paja y desecantes o absorbentes de humedad comerciales. Son precisamente estos últimos cuyo efecto en la prevención de la hipotermia evaluaron Mirkov et al. (2021). Para ello distribuyeron 92 lechones en un grupo control y un grupo experimental, al cual se le aplicó absorbente de humedad cutánea. Los autores registraron un aumento significativo en la temperatura rectal de los lechones en el grupo experimental en contraste con el grupo control (diferencia de  $2.69 \pm 0.30$  vs.  $1.32 \pm 0.22$ °C) durante las primeras 24 horas de vida. Aunado a ello, los lechones del grupo experimental tuvieron una ganancia de peso significativamente mayor en el mismo periodo de tiempo ( $0.23 \pm 0.05$  vs.  $0.07 \pm 0.02$  kg). Dichos hallazgos llevan a concluir que esta estrategia es efectiva para limitar el impacto de la hipotermia postnatal, mientras favorece la ganancia de peso.

De hecho, se han realizado estudios comparando el efecto de diferentes productos para el secado de los lechones al nacimiento. Tal fue el caso de Vande Pol et al. (2020b) quienes compararon el impacto de utilizar un desecante a base de celulosa o una toalla de papel en la temperatura rectal de 618 lechones en sus



primeras 24 horas de vida. Al nacer los lechones de los tres grupos (dos grupos experimentales y uno de control) presentaron una temperatura de  $\sim 39^{\circ}\text{C}$ ; sin embargo, entre los 20 y los 120 minutos post nacimiento la temperatura de los lechones que fueron secados con desecante o con papel fue similar ( $37.3$  y  $37.0^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, a los 45 minutos), aunque fue superior a la del grupo control ( $36.0^{\circ}\text{C}$ ). En los tres grupos se detectó un descenso en la temperatura, sugiriendo que la evaporación del líquido amniótico puede no ser la principal causa de pérdida de calor en los primeros 10 minutos de vida; no obstante, esta caída fue significativamente menor cuando se llevó a cabo el secado, demostrando así que independientemente del material empleado, esta práctica es un método eficaz para reducir la magnitud del descenso de la temperatura rectal a partir de los primeros 20 minutos de vida.

Por otro lado, se ha reportado que el consumo de calostro a las 24 horas de vida incrementa la temperatura rectal de los lechones ( $36.6 \pm 0.15^{\circ}\text{C}$ ) y que ambas variables mantienen una relación positiva con la concentración de glucosa en sangre, demostrando así que la ingesta de calostro es vital para la supervivencia de los lechones, pues funge un papel importante en la termorregulación y el suministro de energía (Devillers et al., 2011). Es por ello mismo que se sugiere la intervención del humano para asegurar el consumo de al menos 200 gramos de calostro lo más pronto posible para que además reciban una transferencia satisfactoria de inmunidad y logren un crecimiento satisfactorio. El personal en las unidades de producción puede ayudar colocando a los lechones cerca de la glándula mamaria para garantizar la ingesta temprana y adecuada de calostro. En caso de camadas muy grandes se podría optar por dividir la camada en dos grupos y permitir a cada grupo estar cerca de la ubre por un período de tiempo específico para así reducir la competencia y asegurar que todos los lechones ingieran calostro (Edwards & Baxter, 2015). De igual forma se podría emplear la técnica de crianza cruzada (traspasar lechones a otra cerda), pero para ello es necesario que los lechones no sean movilizados antes de las 6 horas de vida, para no privarlos del acceso al calostro, ni después de las 24-48 horas de edad, para evitar el posible rechazo de la madre adoptiva (Price et al., 1994). En última instancia también existe la opción de recolectar y almacenar calostro para después administrarlo con biberón a los lechones en riesgo (Devillers et al., 2011).

No sólo se ha comparado el efecto de mezclar estrategias centradas en la intervención del personal, sino que también entre estas estrategias y aquellas relacionadas con la modificación del entorno, como en el caso del estudio realizado por Andersen et al. (2009) quienes decidieron evaluar el impacto de colocar lechones recién nacidos debajo de lámparas de calor infrarrojo (150 W) con o sin previamente haberlos secado con paja y toallas de papel. Para ello dividieron 67 camadas en tres grupos diferentes: el grupo control cuyo parto se llevó a cabo sin supervisión, el grupo que sólo fue expuesto a la lámpara térmica y el grupo que antes de ser expuesto a la lámpara térmica fue secado. Durante el estudio los autores calcularon la mortalidad en cada uno de los grupos y determinaron si la muerte se debía a aplastamiento, inanición o alguna otra causa. Después de comparar los resultados, Andersen et al. (2009) reportaron una mortalidad significativamente menor en los grupos expuestos a la lámpara térmica sin (~6.2%) y con previo secado (~6.4%), en comparación con el grupo control (~11.8%). A pesar de que en este estudio no se cuantificó la temperatura corporal de los lechones, los autores observaron que en las camadas que fueron secadas y después expuestas a lámparas térmicas el porcentaje de aplastamiento fue significativamente menor (13.6%) en comparación con las camadas que sólo fueron expuestas a la lámpara de calor (34.8%) y con las del grupo control (47.9%). Estos hallazgos sugieren que prácticas como colocar a los lechones cerca de lámparas de calor y secarlos reducen la pérdida de calor (por convección y por evaporación, respectivamente) y estimulan la circulación sanguínea, lo cual les permite a los lechones utilizar sus reservas energéticas para encontrar la ubre, alimentarse y aumentar su probabilidad de supervivencia, particularmente durante los primeros 3 días de vida que son en los cuales se reportó más del 70% de los aplastamientos. A través de este estudio se demostró que mediante prácticas sencillas como el secado o la exposición a lámparas infrarrojas se puede reducir significativamente la mortalidad de los lechones recién nacidos, aunque la combinación de estas dos estrategias proporciona mejores resultados, lo cual también se ve reflejado en un mayor beneficio económico. Cabe mencionar que las lámparas de calor suelen tener 200-300 W menos que los paneles de calefacción radiante, por lo que existe la posibilidad que los lechones se sequen más rápido que empleando lámparas de calor o suelo radiante (Andersen & Pedersen, 2016).

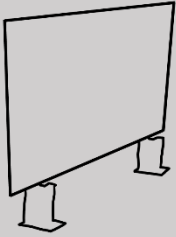
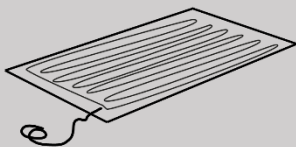


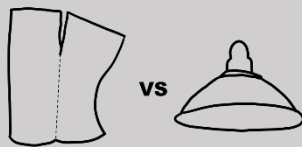
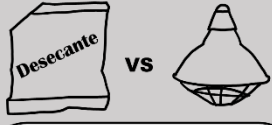

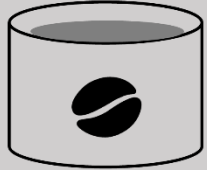
En un estudio más reciente, Vande Pol et al. (2020a) comparó en 866 lechones el efecto de secarlos utilizando un desecante comercial, colocarlos en una caja de plástico debajo de una lámpara de calor (a  $35.3 \pm 3.64^\circ\text{C}$ ), secarlos y calentarlos utilizando los materiales anteriormente descritos, o no secarlos ni calentarlos (grupo control). Los resultados arrojaron que al nacer los lechones en los cuatro grupos presentaron una temperatura rectal de  $38.9^\circ\text{C}$ , pero entre el minuto 10 y 120 después de nacer los lechones en el grupo control exhibían una temperatura significativamente menor ( $35.2^\circ\text{C}$  a los 30 minutos) que en los tres grupos experimentales. No obstante, se observó que en su mayoría la temperatura de los lechones expuestos tanto al secado como a la lámpara de calor fue mayor ( $38.1^\circ\text{C}$ ) que cuando sólo fueron secados o colocados frente a la lámpara ( $37.2^\circ\text{C}$  en ambos grupos). Por lo tanto, al igual que Andersen et al. (2009), los autores concluyeron que tanto el secado como el calentamiento son estrategias efectivas para reducir el descenso de la temperatura en las primeras 24 horas de vida, pero la combinación de ambas prácticas es más efectiva, particularmente durante la primera hora postparto.

Resulta necesario mencionar que existen estrategias que se pueden llevar a cabo incluso antes del parto, tal y como lo demostraron Superchi et al. (2013) al evaluar si la administración oral de cafeína en las cerdas podía contrarrestar los efectos de la hipoxia neonatal (acidosis metabólica, hipercapnia y alteraciones en la termorregulación y las respuestas vasculares). En el estudio los autores seleccionaron 9 cerdas a las cuales en el día 113 de gestación se les ofreció una mezcla de alimento estándar (200 g) con cafeína (27 mg/kg de peso corporal). Inmediatamente después del parto se determinó la temperatura timpánica de los lechones y se volvió a registrar a las 24 horas postparto. Tras comparar los resultados del grupo experimental con el grupo control se concluyó que los lechones de las cerdas en el grupo experimental mostraron una mayor capacidad termorreguladora ( $39.31 \pm 0.10$  vs.  $38.83 \pm 0.08^\circ\text{C}$  a las 24 horas de edad) y una puntuación de viabilidad más alta en comparación con los del grupo control ( $9.15 \pm 0.21$  vs.  $7.86 \pm 0.17$ , respectivamente). Estos hallazgos se deben a que la cafeína fortalece la contractilidad muscular (Magkos & Kavouras, 2005), bloquea los receptores de adenosina (purina implicada en la hipoxia crónica inducida) y tiene efecto en neurotransmisores involucrados en la termorregulación, como la serotonina, dopamina y norepinefrina (Pechlivanova et al., 2010). Por lo tanto,

Superchi et al. (2013) evidenciaron que la administración oral de cafeína en cerdas previas al parto es efectiva para contrarrestar la asfixia y la hipotermia perinatal, lo cual representa una excelente alternativa considerando que la administración oral o subcutánea de cafeína en lechones puede ser más complicada e incluso no brindar los mismos resultados.

#### 10.4.4. Perspectivas

Diversos estudios han evaluado el efecto de implementar estrategias enfocadas en el ambiente, la cerda o los lechones, para reducir la mortalidad perinatal de estos últimos; sin embargo, un número reducido de ellas está encaminada a reducir el riesgo de que los lechones presenten hipotermia (Figura 4).

 <p><b>Paneles de calefacción radiante</b> Reduce la caída de la temperatura rectal y la mantiene elevada hasta 4 horas después del nacimiento (Andersen y Pedersen, 2016).</p>	 <p><b>Suelo radiante</b> Mejora el confort térmico de los lechones cuando se mantiene activado por 12 horas y se combina con una temperatura ambiental de al menos 25°C (Pedersen et al., 2013).</p>	 <p><b>Ingesta de calostro</b> El consumo en las primeras 24 horas de vida producen un aumento en la temperatura rectal y en las concentraciones de glucosa en sangre (Devillers et al., 2011).</p>	 <p><b>Secado con desecante a base de celulosa o con toalla de papel</b> Ambos métodos reducen la magnitud de la caída de la temperatura rectal de los lechones a partir de los 20 minutos post parto (Vande Pol et al., 2020).</p>
 <p><b>Secado con papel y/o lámparas infrarrojas</b> Tanto el secado como el uso de lámparas de calor reduce la pérdida de calor, pero ejecutadas en conjunto reducen de forma significativa el porcentaje de aplastamiento (Andersen et al., 2009).</p>	 <p><b>Secado con desecante y/o lámparas de calor</b> Tanto el secado como el calentamiento de los lechones aumentó significativamente la temperatura hasta por 120 minutos; sin embargo, la combinación de ambas estrategias tuvo mayor efecto (Vande Pol et al., 2020).</p>	 <p><b>Absorbentes de humedad</b> Aumenta significativamente la temperatura rectal y la ganancia de peso (Mirkov et al., 2021).</p>	 <p><b>Administración de cafeína en cerdas</b> Proporciona a los lechones una mayor capacidad de adaptación al ambiente extrauterino (Superchi et al., 2013).</p>

**Figura 4.** Estrategias empleadas para reducir la hipotermia perinatal y sus resultados.

Estudios como el realizado por Andersen et al. (2009) han permitido demostrar que por medio de prácticas como el secar a los lechones y colocarlos frente a lámparas térmicas se obtienen menores porcentajes de mortalidad. No obstante, sería conveniente que se analizara el efecto de éstas y otras prácticas rutinarias llevadas a cabo después del parto bajo diferentes condiciones ambientales, con distintas líneas genéticas y en diferentes escalas; de tal forma que se determine si son efectivas independientemente de si se implementa en granjas comerciales,

con diferentes cruzas y en otros países. Asimismo, sería valioso que se comparara el resultado de ejecutar en conjunto o por separado cada una de estas prácticas para precisar si su efectividad aumenta al combinarlas e incluso si hay alguna rutina más efectiva que otras.

Enfatizando en el uso de paneles de calor radiante, sería interesante evaluar el efecto de colocarlos en otras secciones del área de maternidad y determinar si ello compromete la termorregulación de la madre. De igual forma sería fundamental realizar más estudios para delimitar el tiempo mínimo necesario en el que se debe proporcionar calor -ya sea a través de paneles de calefacción radiante, lámparas de calor o suelo radiante- para evitar la hipotermia.

Continuando con las estrategias orientadas al ambiente, se ha reportado que el uso de ropa de cama con 45% de residuos provenientes del cultivo de hongos como *Flammulina velutipes* y *Pleurotus eryngii*, disminuye significativamente la frecuencia y duración con la que los cerdos de engorde se acurrucan con sus congéneres, así como las concentraciones de cortisol en sangre, mientras se obtienen ganancias de peso diarias y pesos finales promedios más elevados. Dichos resultados sugieren que la implementación de 80 cm de esta ropa de cama podría mejorar el rendimiento de los cerdos al proporcionarles un entorno más cálido (de hasta más de 40°C) durante el invierno; al mantener aislada la superficie corporal del piso, disminuye la necesidad en los cerdos de termorregularse, lo cual se traduce en condiciones menos estresantes y un mayor bienestar (Sheng et al., 2018). Bajo esta lógica sería interesante analizar si la implementación de esta estrategia podría ser igual de eficiente en los lechones. De comprobarse su eficacia en los lechones, sería bueno comparar los resultados del uso de otros materiales que de igual forma sean de bajo costo y que contribuyan al reciclaje de recursos.

En cuanto a las estrategias enfocadas a la cerda, sería conveniente realizar estudios donde se utilice la selección genética para intentar ajustar la producción de calostro. En caso de no obtener resultados favorables sería interesante investigar si hay alguna diferencia en cuanto a la temperatura rectal y la ganancia de peso por efecto del uso de calostro congelado (Devillers et al., 2011).

Finalmente, referente a estrategias centradas en los lechones, sería interesante desarrollar más investigaciones que ayuden a dilucidar si es posible aumentar la supervivencia de los lechones por medio de la cruce y selección de individuos con ciertas características, esto considerando que diferentes razas difieren en cuanto a características de supervivencia y que éstas mismas presentan tasas de heredabilidad de 0.05-0.10 (Edwards, 2002).

#### 10.4.5. Conclusión

La hipotermia postnatal representa un problema con grandes repercusiones económicas en la industria porcícola. Actualmente no existen medicinas ni vacunas que ayuden a combatir esta problemática, razón por la cual se han realizado estudios para evaluar diversas prácticas con la finalidad de identificar aquellas que reduzcan el riesgo de ocurrencia de la hipotermia postnatal o que al menos logren reducir sus efectos.

Las estrategias más estudiadas han sido aquellas que involucran modificaciones en el diseño del entorno o la intervención del personal. Dentro de ellas se ha sugerido el uso de corrales de maternidad; sin embargo, dicha práctica no previene de forma directa la pérdida de calor a diferencia del uso de paneles de calefacción, suelo radiante o lámparas de calor, que han demostrado reducir la caída de la temperatura rectal, especialmente cuando se combina con otras estrategias como el secado con toallas de papel o desecantes. Es importante tomar en cuenta que algunas de estas estrategias serán más efectivas en ciertos sistemas. Por ejemplo, el calor radiante brinda buenos resultados en sistemas con parideras, pero en los sistemas libres de jaulas el suelo radiante parece ser la mejor opción. De igual manera, se puede lograr una mejor capacidad termorreguladora en los lechones asegurando la pronta ingesta de calostro o incluso administrando cafeína vía oral a las cerdas un día previo al parto.

Se incita a continuar analizando la efectividad de éstas y más estrategias, pues resulta necesario determinar cuáles de éstas se pueden aplicar y bajo qué condiciones, con la finalidad de lograr minimizar la pérdida de la temperatura corporal y reducir la mortalidad asociada a la hipotermia postnatal.

## 11. CONCLUSIONES GENERALES

La homeostasis térmica es una prioridad biológica para todas las especies endotérmicas, como es el caso de los cerdos. Gracias a diversos estudios se sabe que los lechones pueden desarrollar vasoconstricción periférica, piloerección, termogénesis por temblor y cambios conductuales para enfrentar la hipotermia postnatal. Sin embargo, se ha observado que debido a su inmadurez fisiológica y metabólica son incapaces de mantener eficazmente la homeotermia durante sus primeras horas de vida, especialmente cuando presentan o están expuestos a alguno de los factores que repercuten en su termoestabilidad (ej. camadas grandes, peso al nacimiento menor a 1 kg, severo retraso en el crecimiento intrauterino, baja temperatura ambiental o estrés preparto). No obstante, se ha demostrado que el uso de paneles de calefacción, suelo radiante y lámparas de calor son eficaces para reducir la hipotermia postnatal, sobre todo cuando se combinan con otras estrategias, como el secado con toallas de papel o desecantes.

Por otro lado, los cerdos adultos son susceptibles a experimentar estrés por calor por lo que emplean como principales mecanismos de termorregulación la vasodilatación periférica, el jadeo y reducen su actividad física, la ingesta de alimento y el contacto físico con congéneres. Sin embargo, similar a los lechones, estos mecanismos pueden no ser suficientes para mantener la homeotermia, especialmente cuando además del estrés por calor los animales se enfrentan a un proceso de por sí estresante, como lo es el parto.

Tanto en lechones como en adultos, la incapacidad de termorregularse adecuadamente representa una problemática para la industria porcícola debido a que compromete el bienestar de la especie y provoca pérdidas económicas por el impacto que tiene en la composición corporal, la calidad de la carne y la tasa de mortalidad.

No obstante, los médicos veterinarios pueden emplear estos conocimientos para identificar a los individuos que pueden experimentar estrés térmico, así como para evitar diagnosticar erróneamente algunas patologías. De igual forma, a partir de esta información pueden desarrollar guías con estrategias eficaces para prevenir

y afrontar el estrés por calor (ej. evitar el uso de calefacción de suelo en las jaulas de maternidad, proporcionar piso de rejilla y realizar cambios en la composición de la dieta o su distribución) y la hipotermia postnatal (ej. asegurar la ingesta de calostro durante la primera hora de vida, utilizar suelo de poliestireno expandido y evitar velocidades de viento mayores a 0.15 m/s), tomando en cuenta las características del sistema de producción y del propio lechón. Con ello se podría mejorar el bienestar y la productividad de los animales.

## **12. RECOMENDACIONES**

A pesar de la cantidad de información que se conoce hoy en día, aún quedan por dilucidar muchos aspectos relacionados con la termorregulación de los cerdos; por ejemplo, si las madres pueden transferir tolerancia térmica a sus lechones y éstos a su vez a su descendencia o si es posible incrementar las reservas energéticas de los lechones recién nacidos. Por ello se incita a continuar investigando sobre la genética de la termorregulación para lograr identificar los fenotipos hereditarios asociados con resistencia o susceptibilidad y poder seleccionar y reproducir a los animales con mejor tolerancia, sin comprometer los rasgos productivos.

Por otro lado, debido a que algunas de las estrategias anteriormente mencionadas implican gastos económicos y ambientales importantes, se recomienda analizar la efectividad de otras estrategias para reducir el estrés térmico, que sean económicas y de fácil implementación.

Finalmente, también se sugiere realizar más estudios en diferentes razas y líneas genéticas para que se determine si hay alguna con mayor tolerancia térmica y, de ser así, cuál se aconsejaría criar dependiendo del clima de la región, esto con la finalidad de intentar igualar el nivel de bienestar animal independientemente del país o el tamaño de la producción porcícola. En este sentido, la termografía infrarroja sería la herramienta indicada para detectar los cambios de temperatura de forma rápida y no invasiva, por lo que se incentiva a desarrollar más investigaciones utilizándola.



### 13. LITERATURA CITADA

- Aarnink, A., Schrama, J., Heetkamp, M., Stefanowska, J., & Huynh, T. (2006). Temperature and body weight affect fouling of pig pens. *Journal of Animal Science*, 84(8), 2224–2231. <https://doi.org/10.2527/jas.2005-521>
- Abuajamieh, M., Kvidera, S., Mayorga, E., Kaiser, A., Lei, S., Seibert, J., Horst, E., Fernandez, M., Ross, J., Selsby, J., Keating, A., Rhoads, R., & Baumgard, L. (2018). The effect of recovery from heat stress on circulating bioenergetics and inflammatory biomarkers. *Journal of Animal Science*, 96(11), 4599–4610. <https://doi.org/10.1093/JAS/SKY345>
- Alexandratos, L., & Bruinsma, J. (2012). *World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision*. Food and Agriculture Organization of United Nations.
- Alonso-Spilsbury, M., Mota-Rojas, D., Villanueva-García, D., Martínez-Burnes, J., Orozco, H., Ramírez-Necoechea, R., Mayagoitia, A., & Trujillo, M. (2005). Perinatal asphyxia pathophysiology in pig and human: A review. *Animal Reproduction Science*, 90(1–2), 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2005.01.007>
- Amdi, C., Jensen, L., Oksbjerg, N., & Hansen, C. (2017). Supplementing newborn intrauterine growth restricted piglets with a bolus of porcine colostrum raises rectal temperatures one degree Celsius. *Journal of Animal Science*, 95(7), 2968–2976. <https://doi.org/10.2527/JAS.2017.1482>
- Andersen, H.-L., & Pedersen, L. (2016). Effect of radiant heat at the birth site in farrowing crates on hypothermia and behaviour in neonatal piglets. *Animal*, 10(1), 128–134. <https://doi.org/10.1017/S1751731115001913>
- Andersen, I., Haukvik, I., & Bøe, K. (2009). Drying and warming immediately after birth may reduce piglet mortality in loose-housed sows. *Animal*, 3(4), 592–597. <https://doi.org/10.1017/S1751731108003650>
- Anderson, L. (2000). Reproductive cycle of pigs. En E. Hafez & B. Hafez (Eds.), *Reproduction in farm animals* (7<sup>a</sup> ed., pp. 189–190). Lippincott.
- Andresen, N., & Redbo, I. (1999). Foraging behaviour of growing pigs on grassland in relation to stocking rate and feed crude protein level. *Applied*

*Animal Behaviour Science*, 62, 183–197. [https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(98\)00221-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(98)00221-4)

Arduini, A., Redaelli, V., Luzi, F., Dall'Olio, S., Pace, V., & Costa, L. (2014). Effect of transport distance and season on some defects of fresh hams destined for DPO production. *Animals*, 4(3), 524–534. <https://doi.org/10.3390/ani4030524>

Auldust, D., Carlson, D., Morrish, L., Wakeford, C., & King, R. (2000). The influence of suckling interval on milk production of sows. *Journal of Animal Science*, 78(8), 2026–2031. <https://doi.org/10.2527/2000.7882026X>

Averós, X., Knowles, T., Brown, S., Warriss, P., & Gosálvez, L. (2010). Factors affecting the mortality of weaned piglets during commercial transport between farms. *Veterinary Record*, 167, 815–819. <https://doi.org/10.1136/vr.c6226>

Bal, N., Maurya, S., Singh, S., Wehrens, X., & Periasamy, M. (2016). Increased reliance on muscle-based thermogenesis upon acute minimization of brown adipose tissue function. *Journal of Biological Chemistry*, 291(33), 17247–17257. <https://doi.org/10.1074/JBC.M116.728188>

Baumgard, L., & Rhoads, R. (2013). Effects of heat stress on postabsorptive metabolism and energetics. *Annual Review of Animal Biosciences*, 1(1), 311–337. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ANIMAL-031412-103644>

Baxter, E., Jarvis, S., Palarea-Albaladejo, J., & Edwards, S. (2012). The weaker sex? The propensity for male-biased piglet mortality. *PLoS ONE*, 7(1), e30318. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030318>

Baxter, E., Lawrence, A., & Edwards, S. (2011). Alternative farrowing systems: Design criteria for farrowing systems based on the biological needs of sows and piglets. *Animal*, 5(4), 580–600. <https://doi.org/10.1017/S1751731110002272>

Berg, F., Gustafson, U., & Andersson, L. (2006). The uncoupling protein 1 gene (UCP1) is disrupted in the pig lineage: A genetic explanation for poor thermoregulation in piglets. *PLOS Genetics*, 2(8), e129.

<https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PGEN.0020129>

- Berthon, D., Herpin, P., Bertin, R., De Marco, F., & Le Dividich, J. (1996). Metabolic changes associated with sustained 48-Hr shivering thermogenesis in the newborn pig. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 114(4), 327–335. [https://doi.org/10.1016/0305-0491\(96\)00044-2](https://doi.org/10.1016/0305-0491(96)00044-2)
- Berthon, D., Herpin, P., Duchamp, C., Dauncey, M., & Le Dividich, J. (1993). Modification of thermogenic capacity in neonatal pigs by changes in thyroid status during late gestation. *Journal of Developmental Physiology*, 19(6), 253–261. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7963301/>
- Berthon, D., Herpin, P., & Le Dividich, J. (1994). Shivering thermogenesis in the neonatal pig. *Journal of Thermal Biology*, 19(6), 413–418. [https://doi.org/10.1016/0306-4565\(94\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0306-4565(94)90040-X)
- Berthon, D., Herpin, P., & Le Dividich, J. (1995). *Shivering is the main thermogenic mechanism in cold-exposed newborn pigs*. Proceedings of the Nutrition Society.
- Biazzi, H., Paiano, D., Nunes, M., Fachinello, M., & Teles, P. (2014). Behavioral, thermoregulatory, and operational aspects of shallow pool pens used in gilts production. *Semina: Ciências Agrárias*, 35(6), 3439. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2014v35n6p3439>
- Bienboire-Frosini, C., Wang, D., Marcet-Rius, M., Villanueva-García, D., Gazzano, A., Domínguez-Oliva, A., Olmos-Hernández, A., Hernández-Ávalos, I., Lezama-García, K., Verduzco-Mendoza, A., Gómez-Prado, J., & Mota-Rojas, D. (2023). The role of brown adipose tissue and energy metabolism in mammalian thermoregulation during the perinatal period. *Animals*, 13(13), 2173. <https://doi.org/10.3390/ani13132173>
- Bloemhof, S., Mathur, P., Knol, E., & van der Waaij, E. (2013). Effect of daily environmental temperature on farrowing rate and total born in dam line sows. *Journal of Animal Science*, 91(6), 2667–2679. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5902>

- Boulot, S., Quesnel, H., & Quiniou, N. (2008). *Management of high prolificacy in French herds: Can we alleviate side effects on piglet survival*. 37<sup>th</sup> BANFF Pork Seminar, Edmonton, Canada.
- Bracke, M. (2011). Review of wallowing in pigs: Description of the behaviour and its motivational basis. *Applied Animal Behaviour Science*, 132(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2011.01.002>
- Brandenburg, A., & Wilson, M. (1973). Immunity to *Escherichia coli* in pigs: IgG immunoglobulin in passive immunity to *E. coli* enteritis. *Immunology*, 24(1), 119–127.
- Byrd, C., Anderson, N., Lugar, D., Safranski, T., Lucy, M., & Johnson, J. (2019). Evaluating the effects of *in utero* heat stress on piglet physiology and behavior following weaning and transport. *Animals*, 9(4), 191. <https://doi.org/10.3390/ani9040191>
- Caldara, F., Dos Santos, L., Machado, S., Moi, M., De Alencar Nääs, I., Foppa, L., Garcia, R., & Dos Santos, R. (2014). Piglets' surface temperature change at different weights at birth. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 27(3), 431–438. <https://doi.org/10.5713/ajas.2013.13505>
- Cao, M., Zong, C., Wang, X., Teng, G., Zhuang, Y., & Lei, K. (2021). Modeling of heat stress in sows — Part 1: Establishment of the prediction model for the equivalent temperature index of the sows. *Animals*, 11(5), 1472. <https://doi.org/10.3390/ani11051472>
- Cecchin, D., Aparecida, F., Sodr e, P., de Oliveira, J., do Carmo, D., Ferreira, P., Torres, A., & Fitas, V. (2018). Welfare in pig housing — Brazilian and Portuguese legislation. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 6(3), 77–83. <https://doi.org/10.31893/2318-1265jabb.v6n3p77-83>
- Chen, X., Fahy, A., Green, A., Anderson, M., Rhoads, R., & Limesand, S. (2010).  $\beta$ 2-adrenergic receptor desensitization in perirenal adipose tissue in fetuses and lambs with placental insufficiency-induced intrauterine growth restriction. *The Journal of Physiology*, 588(18), 3539–3549. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.192310>

- Chung, T.-H., Jung, W.-S., Nam, E.-H., Kim, J.-H., Park, S.-H., & Hwang, C.-Y. (2010). Comparison of rectal and infrared thermometry for obtaining body temperature of gnotobiotic piglets in conventional portable germ free facility. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 23(10), 1364–1368. <https://doi.org/10.5713/ajas.2010.90507>
- Clarke, L., & Symonds, M. (1998). Thermoregulation in newborn lambs: Influence of feeding and ambient temperature on brown adipose tissue. *Experimental Physiology*, 83(5), 651–657. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.1998.sp004146>
- Close, W. (1992). Thermoregulation in piglets: Environmental and metabolic consequences. *BSAP Occasional Publication*, 15, 25–33. <https://doi.org/10.1017/S0263967X00004067>
- Čobanović, N., Stajković, S., Blagojević, B., Betić, N., Dimitrijević, M., Vasilev, D., & Karabasil, N. (2020). The effects of season on health, welfare, and carcass and meat quality of slaughter pigs. *International Journal of Biometeorology*, 64(11), 1899–1909. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01977-y>
- Collin, A., van Milgen, J., Dubois, S., & Noblet, J. (2001). Effect of high temperature and feeding level on energy utilization in piglets. *Journal of Animal Science*, 79(7), 1849–1857. <https://doi.org/10.2527/2001.7971849x>
- Conrad, M., Dilger, R., Nickolls, A., & Johnson, R. (2012). Magnetic resonance imaging of the neonatal piglet brain. *Pediatric Research*, 71(2), 179–184. <https://doi.org/10.1038/pr.2011.21>
- Correa, J., Gonyou, H., Torrey, S., Widowski, T., Bergeron, R., Crowe, T., Laforest, J., & Faucitano, L. (2013). Welfare and carcass and meat quality of pigs being transported for two hours using two vehicle types during two seasons of the year. *Canadian Journal of Animal Science*, 93(1), 43–55. <https://doi.org/10.4141/cjas2012-088>
- Cowley, F., Barber, D., Houlihan, A., & Poppi, D. (2015). Immediate and residual effects of heat stress and restricted intake on milk protein and casein composition and energy metabolism. *Journal of Dairy Science*, 98(4), 2356–2368. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8442>

- Cunningham, J., & Klein, B. (2007). *Veterinary physiology* (4<sup>a</sup> ed.). Saunders Elsevier.
- Curtis, S. (1970). Environmental thermoregulatory interactions and neonatal piglet survival. *Journal of Animal Science*, 31(3), 376–380.
- Dalla Costa, F., Dalla Costa, O., Coldebella, A., de Lima, G., & Ferraudo, A. (2019). How do season, on-farm fasting interval and lairage period affect swine welfare, carcass and meat quality traits? *International Journal of Biometeorology*, 63(11), 1497–1505. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1527-1>
- Damm, B., Pedersen, L., Marchant-Forde, J., & Gilbert, G. (2003). Does feed-back from a nest affect periparturient behaviour, heart rate and circulatory cortisol and oxytocin in gilts? *Applied Animal Behaviour Science*, 83(1), 55–76. [https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(03\)00111-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(03)00111-4)
- De Roth, L., & Downie, H. (1976). Evaluation of viability of neonatal swine. *The Canadian Veterinary Journal*, 17(11), 275-279. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1697382/>
- Demo, M., Jentsch, W., & Hoffmann, L. (1995). Effect of long time exposure to different environmental temperatures on heat production of growing pigs. *Livestock Production Science*, 43(2), 149–152. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(95\)00035-J](https://doi.org/10.1016/0301-6226(95)00035-J)
- Devillers, N., Farmer, C., Le Dividich, J., & Prunier, A. (2007). Variability of colostrum yield and colostrum intake in pigs. *Animal*, 1(7), 1033–1041. <https://doi.org/10.1017/S175173110700016X>
- Devillers, N., Le Dividich, J., & Prunier, A. (2011). Influence of colostrum intake on piglet survival and immunity. *Animal*, 5(10), 1605–1612. <https://doi.org/10.1017/S175173111100067X>
- Dreiling, C., Carman, F., & Brown, D. (1991). Maternal endocrine and fetal metabolic responses to heat stress. *Journal of Dairy Science*, 74(1), 312–327. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78175-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78175-7)
- Ducreux, E., Aloui, B., Robin, P., Dourmad, J.-Y., Courboulay, V., & Meunier-

- Salaün, M.-C. (2002). Les porcs affichent leurs préférences vis-à-vis du type de sol en fonction de la température ambiante. *Journées de La Recherche Porcine*, 34, 211–216.
- Edwards, S. (2002). Perinatal mortality in the pig: Environmental or physiological solutions? *Livestock Production Science*, 78(1), 3–12. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(02\)00180-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(02)00180-X)
- Edwards, S., & Baxter, E. (2015). Piglet mortality: Causes and prevention. En *The gestating and lactating sow* (pp. 253–278). Wageningen Academic Publishers.
- Edwards, S., & Fraser, D. (1997). Housing systems for farrowing and lactation. *Pig Journal*, 39, 77–89.
- Elliot, J., & Lodge, G. (1977). Body composition and glycogen reserves in the neonatal pig during the first 96 hours postpartum. *Canadian Journal of Animal Science*, 57(1), 141–150. <https://doi.org/10.4141/CJAS77-017>
- Elmore, R., Martin, C., Riley, J., & Littledike, T. (1979). Body temperatures of farrowing swine. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 174(6), 620–622. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/422467>
- Farghly, M., Alagawany, M., & Abd El-Hack, M. (2018). Feeding time can alleviate negative effects of heat stress on performance, meat quality and health status of turkey. *British Poultry Science*, 59(2), 205–210. <https://doi.org/10.1080/00071668.2017.1413233>
- Ferreira, R., Chiquieri, J., Pierro, P., Vasconcelos, T., Duran, M., & Ribeiro, R. (2007). Comportamento e parâmetros fisiológicos de leitões nas primeiras 24 horas de vida. *Ciência e Agrotecnologia*, 31(6), 1845–1849.
- Flores-Peinado, S., Mota-Rojas, D., Guerrero-Legarreta, I., Mora-Medina, P., Cruz-Monterrosa, R., Gómez-Prado, J., Hernández, M.G., Cruz-Playas, J., & Martínez-Burnes, J. (2020). Physiological responses of pigs to preslaughter handling: Infrared and thermal imaging applications. *International Journal of Veterinary Science and Medicine*, 8(1), 71–84. <https://doi.org/10.1080/23144599.2020.1821574>

- Fox, J., Widowski, T., Torrey, S., Nannoni, E., Bergeron, R., Gonyou, H., Brown, J., Crowe, T., Mainau, E., & Faucitano, L. (2014). Water sprinkling market pigs in a stationary trailer. 1. Effects on pig behaviour, gastrointestinal tract temperature and trailer micro-climate. *Livestock Science*, *160*, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.12.019>
- Fox, J. (2013). *The effect of water sprinkling market pigs transported during summer on pig behaviour, gastrointestinal tract temperature and trailer micro-climate*. [Tesis de maestría, University of Guelph]. [https://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/bitstream/handle/10214/5279/Fox\\_Jessica\\_201301\\_Msc.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/bitstream/handle/10214/5279/Fox_Jessica_201301_Msc.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Fujita, A., da Rocha, R., Escobar, A., de Nardi, A., Bagnato, V., & Campos, P. (2018). Correlation between porcine and human skin models by optical methods. En M. Blumenberg (Ed.), *Human skin cancers – Pathways, mechanisms, targets and treatments* (pp. 161–174). InTech.
- Gauthier, B., Penard, L., Bordier, N., Briffaux, J.-P., & Ruty, B. (2018). Specificities of the skin morphology in juvenile minipigs. *Toxicologic Pathology*, *46*(7), 821–834. <https://doi.org/10.1177/0192623318804520>
- Gerber, P., Vellinga, T., & Steinfeld, H. (2010). Issues and options in addressing the environmental consequences of livestock sector's growth. *Meat Science*, *84*(2), 244–247. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.10.016>
- Gessner, D., Gröne, B., Rosenbaum, S., Most, E., Hillen, S., Becker, S., Erhardt, G., Reiner, G., Ringseis, R., & Eder, K. (2015). Effect of a negative energy balance induced by feed restriction on pro-inflammatory and endoplasmic reticulum stress signalling pathways in the liver and skeletal muscle of lactating sows. *Archives of Animal Nutrition*, *69*(5), 411–423. <https://doi.org/10.1080/1745039X.2015.1075670>
- Gilbert, C., Burne, T., Goode, J., Murfitt, P., & Walton, S. (2002). Indomethacin blocks pre-partum nest building behaviour in the pig (*Sus scrofa*): Effects on plasma prostaglandin F metabolite, oxytocin, cortisol and progesterone. *Journal of Endocrinology*, *172*(3), 507–517. <https://doi.org/10.1677/joe.0.1720507>



- Gilbert, C., Goode, J., & McGrath, T. (1994). Pulsatile secretion of oxytocin during parturition in the pig: Temporal relationship with fetal expulsion. *Journal of Physiology*, 475(1), 129–137. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1994.sp020054>
- Gómez-Prado, J., Pereira, A., Wang, D., Villanueva-García, D., Domínguez-Oliva, A., Mora-Medina, P., Hernández-Avalos, I., Martínez-Burnes, J., Casas-Alvarado, A., Olmos-Hernández, A., Ramírez-Necoechea, R., Verduzco-Mendoza, A., Hernández, A., Torres, F., & Mota-Rojas, D. (2022). Thermoregulation mechanisms and perspectives for validating thermal windows in pigs with hypothermia and hyperthermia: An overview. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 1–21. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.1023294>
- Gonzalez-Rivas, P., Chauhan, S., Ha, M., Fegan, N., Dunshea, F., & Warner, R. (2020). Effects of heat stress on animal physiology, metabolism, and meat quality: A review. *Meat Science*, 162, 108025. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108025>
- Gourdine, J.-L., Mandonnet, N., Giorgi, M., & Renaudeau, D. (2017). Genetic parameters for thermoregulation and production traits in lactating sows reared in tropical climate. *Animal*, 11, 365–374. <https://doi.org/10.1017/S175173111600135X>
- Gourdine, J., Rauw, W., Gilbert, H., & Pouillet, N. (2021). The genetics of thermoregulation in pigs: A review. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 770480. <https://doi.org/10.3389/FVETS.2021.770480>
- Graham, J., Edwards, M., & Edwards, M. (1998). Teratogen update: Gestational effects of maternal hyperthermia due to febrile illnesses and resultant patterns of defects in humans. *Teratology*, 58(5), 209–221. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9926\(199811\)58:5<209::AID-TERA8>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9926(199811)58:5<209::AID-TERA8>3.0.CO;2-Q)
- Gregory, N. (2010). How climatic changes could affect meat quality. *Food Research International*, 43(7), 1866–1873. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.05.018>
- Hales, J., Moustsen, V., Nielsen, M., & Hansen, C. (2013). Individual physical

characteristics of neonatal piglets affect preweaning survival of piglets born in a noncrated system. *Journal of Animal Science*, 91(10), 4991–5003. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5740>

Hansen, C., Hales, J., Amdi, C., & Moustsen, V. (2019). Intrauterine growth-restricted piglets defined by their head shape have impaired survival and growth during the suckling period. *Animal Production Science*, 59(6), 1056–1062. <https://doi.org/10.1071/AN17581>

Haverkamp, F., Giesbrecht, G., & Tan, E. (2018). The prehospital management of hypothermia — An up-to-date overview. *Injury*, 49(2), 149–164. <https://doi.org/10.1016/J.INJURY.2017.11.001>

Hawkins, P., Steyn, C., McGarrigle, H., Calder, N., Saito, T., Stratford, L., Noakes, D., & Hanson, M. (2000). Cardiovascular and hypothalamic-pituitary-adrenal axis development in late gestation fetal sheep and young lambs following modest maternal nutrient restriction in early gestation. *Reproduction, Fertility and Development*, 12(8), 443–456. <https://doi.org/10.1071/RD99071>

He, T., He, L., Gao, E., Hu, J., Zang, J., Wang, C., Zhao, J., & Ma, X. (2018). Fat deposition deficiency is critical for the high mortality of pre-weanling newborn piglets. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 9(1), 66. <https://doi.org/10.1186/s40104-018-0280-y>

Henningsen, A., Czekaj, T., Forkman, B., Lund, M., & Nielsen, A. (2018). The relationship between animal welfare and economic performance at farm level: A quantitative study of danish pig producers. *Journal of Agricultural Economics*, 69(1), 142–162. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12228>

Herpin, P., Damon, M., & Le Dividich, J. (2002). Development of thermoregulation and neonatal survival in pigs. *Livestock Production Science*, 78(1), 25–45. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(02\)00183-5](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(02)00183-5)

Herpin, P., & Hulin, J. (2000). *Effect of birth weight on thermoregulatory abilities of Chinese (Meishan) and European (Large X Pietrain) newborn piglets*. 15<sup>th</sup> Symposium on Energy Metabolism in Animals (pp. 93–96), Snekkersten, Dinamarca.

- Herpin, P., Le Dividich, J., & Amaral, N. (1993). Effect of selection for lean tissue growth on body composition and physiological state of the pig at birth. *Journal of Animal Science*, 71(10), 2645–2653. <https://doi.org/10.2527/1993.71102645x>
- Herpin, P., Vincent, A., & Damon, M. (2004). Effect of breed and body weight on thermoregulatory abilities of European (Piétrain×(Landrace×Large White)) and Chinese (Meishan) piglets at birth. *Livestock Production Science*, 88(1–2), 17–26. <https://doi.org/10.1016/J.LIVPRODSCI.2003.11.006>
- Hood, R., & Allen, C. (1977). Cellularity of porcine adipose tissue: Effects of growth and adiposity. *Journal of Lipid Research*, 18(3), 275–284.
- Hou, L., Xie, M., Cao, L., Shi, J., Xu, G., Hu, C., & Wang, C. (2018). Browning of pig white preadipocytes by co-overexpressing pig PGC-1 $\alpha$  and mice UCP1. *Cellular Physiology and Biochemistry*, 48(2), 556–568. <https://doi.org/10.1159/000491885>
- Huynh, T., Aarnink, A., Gerrits, W., Heetkamp, M., Canh, T., Spoolder, H., Kemp, B., & Verstegen, M. (2005). Thermal behaviour of growing pigs in response to high temperature and humidity. *Applied Animal Behaviour Science*, 91(1–2), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2004.10.020>
- Johnson, J., Aardsma, M., Duttlinger, A., & Kpodo, K. (2018). Early life thermal stress: Impact on future thermotolerance, stress response, behavior, and intestinal morphology in piglets exposed to a heat stress challenge during simulated transport. *Journal of Animal Science*, 96(5), 1640–1653. <https://doi.org/10.1093/jas/sky107>
- Johnson, J., Boddicker, R., Sanz-Fernandez, M., Ross, J., Selsby, J., Lucy, M., Safranski, T., Rhoads, R., & Baumgard, L. (2013). Effects of mammalian *in utero* heat stress on adolescent body temperature. *International Journal of Hyperthermia*, 29(7), 696–702. <https://doi.org/10.3109/02656736.2013.843723>
- Johnson, J., Sanz, M., Seibert, J., Ross, J., Lucy, M., Safranski, T., Elsasser, T., Kahl, S., Rhoads, R., & Baumgard, H. (2015). *In utero* heat stress increases postnatal core body temperature in pigs. *Journal of Animal Science*, 93(9),

Kaiser, M., Jacobsen, S., Andersen, P., Bækbo, P., Cerón, J., Dahl, J., Escribano, D., Theil, P., & Jacobson, M. (2018). Hormonal and metabolic indicators before and after farrowing in sows affected with postpartum dysgalactia syndrome. *BMC Veterinary Research*, *14*(1), 334. <https://doi.org/10.1186/s12917-018-1649-z>

Kaiser, M., Jacobson, M., Andersen, P., Bækbo, P., Cerón, J., Dahl, J., Escribano, D., & Jacobsen, S. (2018). Inflammatory markers before and after farrowing in healthy sows and in sows affected with postpartum dysgalactia syndrome. *BMC Veterinary Research*, *14*(1), 83. <https://doi.org/10.1186/s12917-018-1382-7>

Kammersgaard, T. (2013). *Thermoregulation and thermal needs of neonatal piglets*. [Tesis de doctorado, Aarhus University].

Kammersgaard, T., Malmkvist, J., & Pedersen, L. (2013). Infrared thermography — A non-invasive tool to evaluate thermal status of neonatal pigs based on surface temperature. *Animal*, *7*(12), 2026–2034. <https://doi.org/10.1017/S1751731113001778>

Kammersgaard, T., Pedersen, L., & Jorgensen, E. (2011). Hypothermia in neonatal piglets: Interactions and causes of individual differences. *Journal of Animal Science*, *89*(7), 2073–2085. <https://doi.org/10.2527/JAS.2010-3022>

Kelley, K. (1985). Environmental effects on the immune system of pigs. *Pig News and Information*, *3*, 395–399.

Kelley, K., & Curtis, S. (1978). Effects of heat stress on rectal temperature, respiratory rate and activity rates in peripartal sows and gilts. *Journal of Animal Science*, *46*(2), 356–361. <https://doi.org/10.2527/jas1978.462356x>

Kielland, C., Rootwelt, V., Reksen, O., & Framstad, T. (2015). The association between immunoglobulin G in sow colostrum and piglet plasma. *Journal of Animal Science*, *93*(9), 4453–4462. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8713>

Kim, K.-S., Seibert, J., Edea, Z., Graves, K., Kim, E.-S., Keating, A., Baumgard, L., Ross, J., & Rothschild, M. (2018). Characterization of the acute heat

- stress response in gilts: III. Genome-wide association studies of thermotolerance traits in pigs. *Journal of Animal Science*, 96(6), 2074–2085. <https://doi.org/10.1093/jas/sky131>
- Kim, S., Hurley, W., Wu, G., & Ji, F. (2009). Ideal amino acid balance for sows during gestation and lactation. *Journal of Animal Science*, 87(suppl\_14), E123–E132. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-1452>
- Knox, R. (2005). *Getting to 30 pigs weaned/sow/year*. Proceedings of the London Swine Conference, Londres, Inglaterra.
- Larsen, M., Thodberg, K., & Pedersen, L. (2017). Radiant heat increases piglets' use of the heated creep area on the critical days after birth. *Livestock Science*, 201, 74–77. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.05.008>
- Lassaletta, L., Billen, G., Garnier, J., Bouwman, L., Velazquez, E., Mueller, N., & Gerber, J. (2016). Nitrogen use in the global food system: Past trends and future trajectories of agronomic performance, pollution, trade, and dietary demand. *Environmental Research Letters*, 11(9), 095007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/095007>
- Lassaletta, L., Estellés, F., Beusen, A., Bouwman, L., Calvet, S., van Grinsven, H., Doelman, J., Stehfest, E., Uwizeye, A., & Westhoek, H. (2019). Future global pig production systems according to the Shared Socioeconomic Pathways. *Science of The Total Environment*, 665, 739–751. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.079>
- Lawrence, A., Petherick, J., McLean, K., Gilbert, C., Chapman, C., & Russell, J. (1992). Naloxone prevents interruption of parturition and increases plasma oxytocin following environmental disturbance in parturient sows. *Physiology & Behavior*, 52(5), 917–923. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(92\)90371-8](https://doi.org/10.1016/0031-9384(92)90371-8)
- Le Bellego, L., van Milgen, J., & Noblet, J. (2002). Effect of high ambient temperature on protein and lipid deposition and energy utilization in growing pigs. *Animal Science*, 75(1), 85–96. <https://doi.org/10.1017/S1357729800052863>
- Le Dividich, J., & Herpin, P. (1994). Effects of climatic conditions on the

- performance, metabolism and health status of weaned piglets: A review. *Livestock Production Science*, 38(2), 79–90. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(94\)90052-3](https://doi.org/10.1016/0301-6226(94)90052-3)
- Le Dividich, J., Mormède, P., Catheline, M., & Caritez, J. (1991). Body composition and cold resistance of the neonatal pig from European (Large White) and Chinese (Meishan) breeds. *Neonatology*, 59(5), 268–277. <https://doi.org/10.1159/000243360>
- Le Dividich, J., & Noblet, J. (1981). Colostrum intake and thermoregulation in the neonatal pig in relation to environmental temperature. *Biology of the Neonate*, 40(3-4), 167–174. <https://doi.org/10.1159/000241486>
- Le Dividich, J., Noblet, J., Herpin, P., van Milgen, J., & Quiniou, N. (1998). Thermoregulation. En J. Wiseman, M. Varley, & J. Chadwick (Eds.), *Progress in Pig Science* (pp. 229–263). Nottingham University Press.
- Le Dividich, J., Rooke, J., & Herpin, P. (2005). Nutritional and immunological importance of colostrum for the new-born pig. *The Journal of Agricultural Science*, 143(6), 469–485. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005642>
- Lezama-García, K., Mota-Rojas, D., Martínez-Burnes, J., Villanueva-García, D., Domínguez-Oliva, A., Gómez-Prado, J., Mora-Medina, P., Casas-Alvarado, A., Olmos-Hernández, A., Soto, P., & Muns, R. (2022). Strategies for hypothermia compensation in altricial and precocial newborn mammals and their monitoring by infrared thermography. *Veterinary Sciences*, 9(5), 246. <https://doi.org/10.3390/VETSCI9050246>
- Little, A., & Seebacher, F. (2013). Thyroid hormone regulates muscle function during cold acclimation in zebrafish (*Danio rerio*). *The Journal of Experimental Biology*, 216(Pt 18), 3514–3521. <https://doi.org/10.1242/JEB.089136>
- Littledike, E., Witzel, D., & Riley, J. (1979). Body temperature changes in sows during the periparturient period. *Laboratory Animal Science*, 29(5), 621–624.
- Liu, L., Tai, M., Yao, W., Zhao, R., & Shen, M. (2021). Effects of heat stress on posture transitions and reproductive performance of primiparous sows during

- late gestation. *Journal of Thermal Biology*, 96, 102828.  
<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102828>
- Local Land Services. (julio de 2021). *Breeding — Pregnancy and Farrowing*.  
[https://www.lls.nsw.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0009/1377666/Pig-Newsletter-16-Pregnancy-and-Farrowing.pdf](https://www.lls.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0009/1377666/Pig-Newsletter-16-Pregnancy-and-Farrowing.pdf)
- Lossec, G., Herpin, P., & Le Dividich, J. (1998). Thermoregulatory responses of the newborn pig during experimentally induced hypothermia and rewarming. *Experimental Physiology*, 83(5), 667–678.  
<https://doi.org/10.1113/EXPPHYSIOL.1998.SP004148>
- Lucy, M., & Safranski, T. (2017). Heat stress in pregnant sows: Thermal responses and subsequent performance of sows and their offspring. *Molecular Reproduction and Development*, 84(9), 946–956.  
<https://doi.org/10.1002/mrd.22844>
- Lucy, M., Safranski, T., Rhoades, J., Ross, J., Gabler, N., Rhoads, R., & Baumgard, L. (2012). Effect of heat stress (HS) on thermal regulation during pregnancy in first parity sows. *Journal of Animal Science*, 90(Suppl 3), 574.
- Lykhach, A., Lykhach, V., Shpetny, M., Mykhalko, O., & Zhyzhka, S. (2020). Influence of toys on behavioural patterns of pigs and their association with the concentration of serotonin in blood plasma. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 11(1), 146–150. <https://doi.org/10.15421/022022>
- Machado-Neto, R., Graves, C., & Curtis, S. (1987). Immunoglobulins in piglets from sows heat-stressed prepartum. *Journal of Animal Science*, 65(2), 445–455. <https://doi.org/10.2527/jas1987.652445x>
- Machado, N., Barbosa-Filho, J., Ramalho, G., Pandorfi, H., & Silva, I. (2021). Trailer heat zones and their relation to heat stress in pig transport. *Engenharia Agrícola*, 41(4), 427–437. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v41n4p427-437/2021>
- Machado, N., Martin, J., Barbosa-Filho, J., Dias, C., Pinheiro, D., de Oliveira, K., & Souza-Junior, J. (2021). Identification of trailer heat zones and associated heat stress in weaner pigs transported by road in tropical climates. *Journal of*

*Thermal Biology*, 97, 102882. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102882>

Madec, F., & Leon, E. (1992). Farrowing disorders in the sow: A field study. *Journal of Veterinary Medicine Series A*, 39(1–10), 433–444. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0442.1992.tb00202.x>

Magkos, F., & Kavouras, S. (2005). Caffeine use in sports, pharmacokinetics in man, and cellular mechanisms of action. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 45(7-8), 535–562. <https://doi.org/10.1080/1040-830491379245>

Malmkvist, J., Damgaard, B., Pedersen, L., Jørgensen, E., Thodberg, K., Chaloupková, H., & Bruckmaier, R. (2009). Effects of thermal environment on hypothalamic-pituitary-adrenal axis hormones, oxytocin, and behavioral activity in periparturient sows. *Journal of Animal Science*, 87(9), 2796–2805. <https://doi.org/10.2527/JAS.2008-1592>

Malmkvist, J., Pedersen, L., Damgaard, B., Thodberg, K., Jørgensen, E., & Labouriau, R. (2006). Does floor heating around parturition affect the vitality of piglets born to loose housed sows? *Applied Animal Behaviour Science*, 99(1-2), 88–105. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2005.10.007>

Malmkvist, J., Pedersen, L., Kammersgaard, T., & Jørgensen, E. (2012). Influence of thermal environment on sows around farrowing and during the lactation period. *Journal of Animal Science*, 90(9), 3186–3199. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4342>

Marchant, J., Rudd, A., Mendl, M., Broom, D., Meredith, M., Corning, S., & Simmins, P. (2000). Timing and causes of piglet mortality in alternative and conventional farrowing systems. *Veterinary Record*, 147(8), 209–214. <https://doi.org/10.1136/vr.147.8.209>

Martin, W. (2012). *Effects of heat stress on thermoregulation, reproduction and performance of different parity sows*. [Tesis de maestría, University of Missouri]. <https://mospace.umsystem.edu/xmlui/bitstream/handle/10355/15290/Research.pdf?sequence=2>

Mayorga, E., Renaudeau, D., Ramirez, B., Ross, J., & Baumgard, L. (2019). Heat



- stress adaptations in pigs. *Animal Frontiers*, 9(1), 54–61.  
<https://doi.org/10.1093/af/vfy035>
- McArthur, A., & Ousey, J. (1994). Heat loss from a wet animal: Changes with time in the heat balance of a physical model representing a newborn homeotherm. *Journal of Thermal Biology*, 19(2), 81–89. [https://doi.org/10.1016/0306-4565\(94\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0306-4565(94)90054-X)
- Melišová, M., Illmann, G., Chaloupková, H., & Bozděchová, B. (2014). Sow postural changes, responsiveness to piglet screams, and their impact on piglet mortality in pens and crates. *Journal of Animal Science*, 92(7), 3064–3072. <https://doi.org/10.2527/JAS.2013-7340>
- Mersmann, H., Goodman, J., & Brown, L. (1975). Development of swine adipose tissue: Morphology and chemical composition. *Journal of Lipid Research*, 16(4), 269–279. [https://doi.org/10.1016/s0022-2275\(20\)36714-6](https://doi.org/10.1016/s0022-2275(20)36714-6)
- Miranda-de la Lama, G., Bermejo-Poza, R., Formoso-Rafferty, N., Mitchell, M., Barreiro, P., & Villarroel, M. (2021). Long-distance transport of finisher pigs in the Iberian Peninsula: Effects of season on thermal and enthalpy conditions, welfare indicators and meat pH. *Animals*, 11(8), 2410. <https://doi.org/10.3390/ani11082410>
- Mirkov, M., Radović, I., Cincović, M., Horvatović, M., & Dragin, S. (2021). The influence of hypothermia prevention by application of skin moisture absorbent on the value of body temperature, body weight and blood parameters in piglets. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 73(5), 1058–1066. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-12371>
- Morris, B., & Morris, R. (1976). The effects of corticosterone and cortisone on the uptake of polyvinyl pyrrolidone and the transmission of immunoglobulin G by the small intestine in young rats. *The Journal of Physiology*, 254(2), 389–403. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1976.sp011237>
- Morrison, S. (2016). Central control of body temperature. *F1000Research*, 5, 880. <https://doi.org/10.12688/F1000RESEARCH.7958.1>
- Mosnier, E., Etienne, M., Ramaekers, P., & Père, M. (2010). The metabolic status

- during the *peri partum* period affects the voluntary feed intake and the metabolism of the lactating multiparous sow. *Livestock Science*, 127(2-3), 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.06.023>
- Mota-Rojas, D., Gonçalves, C., Orihuela, A., Martínez-Burnes, J., Gómez-Prado, J., Torres-Bernal, F., Flores-Padilla, K., Carvajal-de la Fuente, V., & Wang, D. (2021). Physiological and behavioral mechanisms of thermoregulation in mammals. *Animals*, 11(6), 1733. <https://doi.org/10.3390/ani11061733>
- Mota-Rojas, D., Olmos-Hernández, A., Verduzco-Mendoza, A., Lecona-Butrón, H., Martínez-Burnes, J., Mora-Medina, P., Gómez-Prado, J., & Orihuela, A. (2021). Infrared thermal imaging associated with pain in laboratory animals. *Experimental Animals*, 70(1), 1–12. <https://doi.org/10.1538/EXPANIM.20-0052>
- Mota-Rojas, D., Velarde, A., Maris-Huertas, S., & Cajiao, M. (2016). *Bienestar animal, una vision global en Iberoamérica* (3ª ed.). Elsevier.
- Mota-Rojas, D., Roldán-Santiago, P., Pérez-Pedraza, E., Martínez-Rodríguez, R., Hernández-Trujillo, E., & Trujillo-Ortega, M. (2014). Stress factors in weaned piglet. *Veterinaria México*, 45, 37–51. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0301-50922014000200005&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-50922014000200005&lng=es&tlng=es).
- Mount, L. (1967). The heat loss from new-born pigs to the floor. *Research in Veterinary Science*, 8(2), 175–186. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6040642/>
- Mount, L. (1968). *The climatic physiology of the pig*. Edward Arnold Ltd.
- Mount, L., & Stephens, D. (1970). The relation between body size and maximum and minimum metabolic rates in the new-born pig. *Journal of Physiology*, 207(2), 417–427. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1970.sp009070>
- Mowafy, M., & Cassens, R. (1975). Microscopic structure of pig skin. *Journal of Animal Science*, 41(5), 1281–1290. <https://doi.org/10.2527/jas1975.4151281x>

- Mrowka, R., & Reuter, S. (2016). Thermoregulation. *Acta Physiologica*, 217(1), 3–5. <https://doi.org/10.1111/APHA.12664>
- Muns, R., Manzanilla, E., Manteca, X., & Gasa, J. (2014). Effect of gestation management system on gilt and piglet performance. *Animal Welfare*, 23(3), 343–351. <https://doi.org/10.7120/09627286.23.3.343>
- Muns, R., Nuntapaitoon, M., & Tummaruk, P. (2016). Non-infectious causes of pre-weaning mortality in piglets. *Livestock Science*, 184, 46–57. <https://doi.org/10.1016/J.LIVSCI.2015.11.025>
- Muns, V. (2013). *Welfare and management strategies to reduce preweaning mortality in piglets*. [Tesis de doctorado, Facultat de Veterinaria de Barcelona].  
<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/120198/rmv1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Myer, R., Brendemuhl, J., & Bucklin, R. (2008). Effect of season on growth performance of finishing pigs fed low-protein, amino acid supplemented diets. *Journal of Applied Animal Research*, 34(1), 1–8. <https://doi.org/10.1080/09712119.2008.9706930>
- Nakev, J., Popova, T., Ignatova, M., Marinova, P., & Nikolova, T. (2016). Seasonal and year dynamics in the quality characteristics in pig carcasses. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 32(4), 341–352. <https://doi.org/10.2298/BAH1604341N>
- Nannoni, E., Widowski, T., Torrey, S., Fox, J., Rocha, L., Gonyou, H., Weschenfelder, A., Crowe, T., Martelli, G., & Faucitano, L. (2014). Water sprinkling market pigs in a stationary trailer. 2. Effects on selected exsanguination blood parameters and carcass and meat quality variation. *Livestock Science*, 160, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.11.022>
- National Pork Board. (2017). *Transport quality assurance handbook (version 6)*. National Pork Board.
- Noblet, J., & Le Dividich, J. (1981). Energy metabolism of the newborn pig during

- the first 24 h of life. *Neonatology*, 40(3–4), 175–182.  
<https://doi.org/10.1159/000241487>
- Nowack, J., Vetter, S., Stalder, G., Painer, J., Kral, M., Smith, S., Hien, M., Jurcevic, P., Bieber, C., Arnold, W., & Ruf, T. (2019). Muscle nonshivering thermogenesis in a feral mammal. *Scientific Reports*, 9(1), 6378.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-42756-z>
- Nuntapaitoon, M., & Tummaruk, P. (2015). Piglet preweaning mortality in a commercial swine herd in Thailand. *Tropical Animal Health and Production*, 47(8), 1539–1546. <https://doi.org/10.1007/S11250-015-0895-3>
- Olczak, K., Nowicki, J., & Klocek, C. (2015). Pig behaviour in relation to weather conditions — A review. *Annals of Animal Science*, 15(3), 601–610.  
<https://doi.org/10.1515/aoas-2015-0024>
- Oliviero, C. (2010). *Successful farrowing in sows*. [Tesis de doctorado, University of Helsinki]. <https://core.ac.uk/download/pdf/14914529.pdf>
- Oliviero, C., Heinonen, M., Valros, A., Hälli, O., & Peltoniemi, O. (2008). Effect of the environment on the physiology of the sow during late pregnancy, farrowing and early lactation. *Animal Reproduction Science*, 105(3–4), 365–377. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2007.03.015>
- Pang, Z., Li, B., Xin, H., Xi, L., Cao, W., Wang, C., & Li, W. (2011). Field evaluation of a water-cooled cover for cooling sows in hot and humid climates. *Biosystems Engineering*, 110(4), 413–420.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.08.012>
- Panzardi, A., Bernardi, M., Mellagi, A., Bierhals, T., Bortolozzo, F., & Wentz, I. (2013). Newborn piglet traits associated with survival and growth performance until weaning. *Preventive Veterinary Medicine*, 110(2), 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2012.11.016>
- Parois, S., Cabezón, F., Schinckel, A., Johnson, J., Stwalley, R., & Marchant-Forde, J. (2018). Effect of floor cooling on behavior and heart rate of late lactation sows under acute heat stress. *Frontiers in Veterinary Science*, 5, 1–8. <https://doi.org/10.3389/fvets.2018.00223>

- Pattison, R., English, P., MacPherson, O., Roden, J., & Birnie, M. (1990). Hypothermia and its attempted control in newborn piglets. *Proceedings of the British Society of Animal Production* (1972), 1990, 81. <https://doi.org/10.1017/S0308229600018626>
- Pearce, S., Gabler, N., Ross, J., Escobar, J., Patience, J., Rhoads, R., & Baumgard, L. (2013). The effects of heat stress and plane of nutrition on metabolism in growing pigs. *Journal of Animal Science*, 91(5), 2108–2118. <https://doi.org/10.2527/JAS.2012-5738>
- Pechlivanova, D., Tchekalarova, J., Nikolov, R., & Yakimova, K. (2010). Dose-dependent effects of caffeine on behavior and thermoregulation in a chronic unpredictable stress model of depression in rats. *Behavioural Brain Research*, 209(2), 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2010.01.037>
- Pedersen, L., Berg, P., Jørgensen, G., & Andersen, I. (2011). Neonatal piglet traits of importance for survival in crates and indoor pens. *Journal of Animal Science*, 89(4), 1207–1218. <https://doi.org/10.2527/JAS.2010-3248>
- Pedersen, L., Malmkvist, J., Kammersgaard, T., & Jørgensen, E. (2013). Avoiding hypothermia in neonatal pigs: Effect of duration of floor heating at different room temperatures. *Journal of Animal Science*, 91(1), 425–432. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4534>
- Pedersen, S., Sousa, P., Andersen, L., & Jensen, K. (2003). Thermoregulatory behaviour of growing-finishing pigs in pens with access to outdoor areas. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal of Scientific Research and Development*, 03, 1–16.
- Pereira, T., Titto, E., Conte, S., Devillers, N., Somavilla, R., Diesel, T., Dalla Costa, F., Guay, F., Friendship, R., Crowe, T., & Faucitano, L. (2018). Application of a ventilation fan-misting bank on pigs kept in a stationary trailer before unloading: Effects on trailer microclimate, and pig behaviour and physiological response. *Livestock Science*, 216, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.07.013>
- Periasamy, M., Herrera, J., & Reis, F. (2017). Skeletal muscle thermogenesis and its role in whole body energy metabolism. *Diabetes & Metabolism Journal*,

41(5), 327–336. <https://doi.org/10.4093/DMJ.2017.41.5.327>

Pinheiro, D., Barbosa-Filho, J., & Machado, N. (2020). Effect of wetting method on the broiler transport in Brazilian Northeast. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 8(3), 168–173. <https://doi.org/10.31893/jabb.20022>

Plush, K., Brien, F., Hebart, M., & Hynd, P. (2016). Thermogenesis and physiological maturity in neonatal lambs: A unifying concept in lamb survival. *Animal Production Science*, 56(4), 736–745. <https://doi.org/10.1071/AN15099>

Poore, K., & Fowden, A. (2003). The effect of birth weight on hypothalamo-pituitary-adrenal axis function in juvenile and adult pigs. *The Journal of Physiology*, 547(Pt 1), 107–116. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2002.024349>

Price, E., Hutson, G., Price, M., & Borgwardt, R. (1994). Fostering in swine as affected by age of offspring. *Journal of Animal Science*, 72(7), 1697–1701. <https://doi.org/10.2527/1994.7271697x>

Quesnel, H., & Farmer, C. (2019). Review: Nutritional and endocrine control of colostrogenesis in swine. *Animal*, 13(S1), S26–S34. <https://doi.org/10.1017/S1751731118003555>

Quesnel, H., Farmer, C., & Devillers, N. (2012). Colostrum intake: Influence on piglet performance and factors of variation. *Livestock Science*, 146(2–3), 105–114. <https://doi.org/10.1016/J.LIVSCI.2012.03.010>

Quiniou, N., Dagorn, J., & Gaudré, D. (2002). Variation of piglets' birth weight and consequences on subsequent performance. *Livestock Production Science*, 78(1), 63–70. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(02\)00181-1](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(02)00181-1)

Reis, P., Le Floc'h, N., Noblet, J., & Renaudeau, D. (2017). Physiological responses of growing pigs to high ambient temperature and/or inflammatory challenges. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 46(6), 537–544. <https://doi.org/10.1590/S1806-92902017000600009>

Renaudeau, D., Collin, A., Yahav, S., De Basilio, V., Gourdine, J., & Collier, R. (2012). Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in

livestock production. *Animal*, 6(5), 707–728.  
<https://doi.org/10.1017/S1751731111002448>

Renaudeau, D., & Dourmad, J. (2022). Review: Future consequences of climate change for European Union pig production. *Animal*, 16(2), 100372.  
<https://doi.org/10.1016/J.ANIMAL.2021.100372>

Renaudeau, D., Gourdine, J., & St-Pierre, N. (2011). A meta-analysis of the effects of high ambient temperature on growth performance of growing-finishing pigs. *Journal of Animal Science*, 89(7), 2220–2230.  
<https://doi.org/10.2527/JAS.2010-3329>

Renaudeau, D., Huc, E., & Noblet, J. (2007). Acclimation to high ambient temperature in Large White and Caribbean Creole growing pigs. *Journal of Animal Science*, 85(3), 779–790. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-430>

Renaudeau, D., Kerdoncuff, M., Anaïs, C., & Gourdine, J. (2008). Effect of temperature level on thermal acclimation in Large White growing pigs. *Animal*, 2(11), 1619–1626. <https://doi.org/10.1017/S1751731108002814>

Robbins, L., Green-Miller, A., Johnson, J., & Gaskill, B. (2020). Early life thermal stress: Impacts on future temperature preference in weaned pigs (3 to 15 kg). *Journal of Animal Science*, 98(12), skaa327.  
<https://doi.org/10.1093/jas/skaa327>

Roehe, R., & Kalm, E. (2000). Estimation of genetic and environmental risk factors associated with pre-weaning mortality in piglets using generalized linear mixed models. *Animal Science*, 70(2), 227–240.  
<https://doi.org/10.1017/S1357729800054692>

Rooke, J., & Bland, I. (2002). The acquisition of passive immunity in the new-born piglet. *Livestock Production Science*, 78(1), 13–23.  
[https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(02\)00182-3](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(02)00182-3)

Rowland, L., Bal, N., & Periasamy, M. (2015). The role of skeletal-muscle-based thermogenic mechanisms in vertebrate endothermy. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 90(4), 1279–1297.  
<https://doi.org/10.1111/BRV.12157>

- Rowsey, P. (2013). Thermoregulation: Cytokines involved in fever and exercise. *Annual Review of Nursing Research*, 31(1), 19–46. <https://doi.org/10.1891/0739-6686.31.19>
- Rutherford, K., Baxter, E., D'Eath, R., Turner, S., Arnott, G., Roehe, R., Ask, B., Sandøe, P., Moustsen, V., Thorup, F., Edwards, S., Berg, P., & Lawrence, A. (2013). The welfare implications of large litter size in the domestic pig I: Biological factors. *Animal Welfare*, 22(2), 199–218. <https://doi.org/10.7120/09627286.22.2.199>
- Sasaki, Y., Furusho, K., Ushijima, R., Tokunaga, T., Uemura, R., & Sueyoshi, M. (2016). Body surface temperature of suckling piglets measured by infrared thermography and its association with body weight change. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 50(4), 361–368. <https://doi.org/10.6090/jarq.50.361>
- Savary, P., Gygax, L., Wechsler, B., & Hauser, R. (2009). Effect of a synthetic plate in the lying area on lying behaviour, degree of fouling and skin lesions at the leg joints of finishing pigs. *Applied Animal Behaviour Science*, 118(1-2), 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2009.02.006>
- Schaefer, A., Cook, N., Tessaro, S., Deregt, D., Desroches, G., Dubeski, P., Tong, A., & Godson, D. (2004). Early detection and prediction of infection using infrared thermography. *Canadian Journal of Animal Science*, 84(1), 73–80. <https://doi.org/10.4141/A02-104>
- Schmitt, O., & O'Driscoll, K. (2021). Use of infrared thermography to noninvasively assess neonatal piglet temperature. *Translational Animal Science*, 5(1), txaa208. <https://doi.org/10.1093/tas/txaa208>
- Seerley, R., Pace, T., Foley, C., & Scarth, R. (1974). Effect of energy intake prior to parturition on milk lipids and survival rate, thermostability and carcass composition of piglets. *Journal of Animal Science*, 38(1), 64–70. <https://doi.org/10.2527/jas1974.38164x>
- Serviento, A., Labussière, E., Castex, M., & Renaudeau, D. (2020). Effect of heat stress and feeding management on growth performance and physiological responses of finishing pigs. *Journal of Animal Science*, 98(12), 1–15.



<https://doi.org/10.1093/jas/skaa387>

- Sevegnani, K., Fernandes, D., & da Silva, S. (2016). Evaluation of thermoregulatory capacity of dairy buffaloes using infrared thermography. *Engenharia Agrícola*, 36(1), 1–12. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n1p1-12/2016>
- Sheng, Q., Liu, J., Han, H., Han, J., & Wan, L. (2018). Effect of incorporating fungal-media residue in bedding on domestic-pig growth performance and welfare in winter. *Animal Production Science*, 58(6), 1133–1140. <https://doi.org/10.1071/AN16058>
- Shiota, K., & Kayamura, T. (1989). Effects of prenatal heat stress on postnatal growth, behavior and learning capacity in mice. *Neonatology*, 56(1), 6–14. <https://doi.org/10.1159/000242981>
- Sipos, W., Wiener, S., Entenfellner, F., & Sipos, S. (2013). Physiological changes of rectal temperature, pulse rate and respiratory rate of pigs at different ages including the critical peripartal period. *Wiener Tierärztliche Monatsschrift*, 100(3), 93–98.
- Soerensen, D., & Pedersen, L. (2015). Infrared skin temperature measurements for monitoring health in pigs: A review. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 57(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s13028-015-0094-2>
- Sosnowski, P., Mikrut, K., & Krauss, H. (2015). Hypothermia — Mechanism of action and pathophysiological changes in the human body. *Postepy Higieny Medycyny Doswiadczalnej*, 69, 69–79. <https://doi.org/10.5604/17322693.1136382>
- Spoolder, H., Aarnink, A., Vermeer, H., van Riel, J., & Edwards, S. (2012). Effect of increasing temperature on space requirements of group housed finishing pigs. *Applied Animal Behaviour Science*, 138(3-4), 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2012.02.010>
- St-Pierre, N., Cobanov, B., & Schnitkey, G. (2003). Economic losses from heat stress by US livestock industries. *Journal of Dairy Science*, 86, E52–E77. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)74040-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)74040-5)

- Staarvik, T., Framstad, T., Heggelund, M., Brynjulvsrud, S., & Kielland, C. (2019). Blood-glucose levels in newborn piglets and the associations between blood-glucose levels, intrauterine growth restriction and pre-weaning mortality. *Porcine Health Management*, 5(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s40813-019-0129-6>
- Stanton, H., Brown, J., & Mueller, R. (1973). Interrelationships between maternal and neonatal factors and thermoregulation in fasted neonatal swine (*Sus domesticus*). *Comparative Biochemistry and Physiology*, 44(1), 97–105. [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(73\)90373-3](https://doi.org/10.1016/0300-9629(73)90373-3)
- Superchi, P., Mazzoni, C., Zanardelli, P., Piancastelli, C., Zambini, E., Beretti, V., & Sabbioni, A. (2013). Effects of oral caffeine administration to sows with induced parturition on hypoxia in piglets. *Livestock Science*, 157(1), 372–377. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.08.003>
- Svendsen, J., Svendsen, S., & Bengtsson, A. (1986). Reducing perinatal mortality in swine. En A. Leman, B. Straw, R. Glock, R. Penny, & E. Scholl (Eds.), *Diseases of swine* (6<sup>a</sup> ed., pp. 813–824). Iowa State University Press.
- Tauson, A., Chwalibog, A., Ludvigsen, J., Jakobsen, K., & Thorbek, G. (1998). Effect of short-term exposure to high ambient temperatures on gas exchange and heat production in boars of different breeds. *Animal Science*, 66, 431–440.
- Terrien, J., Perret, M., & Aujard, F. (2011). Behavioral thermoregulation in mammals: A review. *Frontiers in Bioscience*, 16(4), 1428–1444. <https://doi.org/10.2741/3797>
- Theil, P., Lauridsen, C., & Quesnel, H. (2014). Neonatal piglet survival: Impact of sow nutrition around parturition on fetal glycogen deposition and production and composition of colostrum and transient milk. *Animal*, 8(7), 1021–1030. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000950>
- Tuchscherer, M., Puppe, B., Tuchscherer, A., & Tiemann, U. (2000). Early identification of neonates at risk: Traits of newborn piglets with respect to survival. *Theriogenology*, 54(3), 371–388. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(00\)00355-1](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(00)00355-1)

- Vailati-Riboni, M., Farina, G., Batistel, F., Heiser, A., Mitchell, M., Crookenden, M., Walker, C., Kay, J., Meier, S., Roche, J., & Loor, J. (2017). Far-off and close-up dry matter intake modulate indicators of immunometabolic adaptations to lactation in subcutaneous adipose tissue of pasture-based transition dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *100*(3), 2334–2350. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11790>
- van der Meulen, J., Helmond, F., & Oudenaarden, C. (1988). Effect of flushing of blastocysts on days 10-13 on the life-span of the corpora lutea in the pig. *Reproduction*, *84*(1), 157–162. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.0840157>
- Vande Pol, K., Tolosa, A., Shull, C., Brown, C., Alencar, S., & Ellis, M. (2020a). Effect of drying and/or warming piglets at birth on rectal temperature over the first 24 h after birth. *Translational Animal Science*, *4*(4), 1–9. <https://doi.org/10.1093/TAS/TXAA184>
- Vande Pol, K., Tolosa, A., Shull, C., Brown, C., Alencar, S., & Ellis, M. (2020b). Effect of method of drying piglets at birth on rectal temperature over the first 24 h after birth. *Translational Animal Science*, *4*(4), 1–12. <https://doi.org/10.1093/tas/txaa183>
- Vanden Hole, C., Ayuso, M., Aerts, P., Prims, S., Van Cruchten, S., & Van Ginneken, C. (2019). Glucose and glycogen levels in piglets that differ in birth weight and vitality. *Heliyon*, *5*(9), e02510. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02510>
- Vasdal, G., Østensen, I., Melišová, M., Bozděchová, B., Illmann, G., & Andersen, I. (2011). Management routines at the time of farrowing — Effects on teat success and postnatal piglet mortality from loose housed sows. *Livestock Science*, *136*(2–3), 225–231. <https://doi.org/10.1016/J.LIVSCI.2010.09.012>
- Vasdal, G., Wheeler, E., & Bøe, K. (2009). Effect of infrared temperature on thermoregulatory behaviour in suckling piglets. *Animal*, *3*(10), 1449–1454. <https://doi.org/10.1017/S1751731109990309>
- Verdon, M., Morrison, R., & Rault, J.-L. (2019). Group lactation from 7 or 14 days of age reduces piglet aggression at weaning compared to farrowing crate housing. *Animal*, *13*(10), 2327–2335.

<https://doi.org/10.1017/S1751731119000478>

Vilas Boas, B., Lanferdini, E., Pérez, J., Gomes, M., Teixeira de Abreu, M., de Souza Cantarelli, V., & Ferreira, R. (2018). Heat negatively affects lactating swine: A meta-analysis. *Journal of Thermal Biology*, *74*, 325–330. <https://doi.org/10.1016/J.JTHERBIO.2018.04.015>

Villanueva-García, D., Mota-Rojas, D., Martínez-Burnes, J., Olmos-Hernández, A., Mora-Medina, P., Salmerón, C., Gómez, J., Boscato, L., Gutiérrez-Pérez, O., Cruz, V., Reyes, B., & González-Lozano, M. (2021). Hypothermia in newly born piglets: Mechanisms of thermoregulation and pathophysiology of death. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, *9*(1), 1–10. <https://doi.org/10.31893/jabb.21001>

Voslarova, E., Vecerek, V., Passantino, A., Chloupek, P., & Bedanova, I. (2016). Transport losses in finisher pigs: Impact of transport distance and season of the year. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, *30*(1), 119–124. <https://doi.org/10.5713/ajas.16.0265>

Warriss, P., Brown, S., & Paściak, P. (2006). The colour of the adductor muscle as a predictor of pork quality in the loin. *Meat Science*, *73*(4), 565–569. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.02.009>

Weary, D., Pajor, E., Thompson, B., & Fraser, D. (1996). Risky behaviour by piglets: A trade off between feeding and the risk of mortality by maternal crushing? *Animal Behaviour*, *51*(3), 619–624. <https://doi.org/10.1006/anbe.1996.0066>

Wegner, K., Lambertz, C., Das, G., Reiner, G., & Gauly, M. (2016). Effects of temperature and temperature-humidity index on the reproductive performance of sows during summer months under a temperate climate. *Animal Science Journal*, *87*(11), 1334–1339. <https://doi.org/10.1111/asj.12569>

Welfare Quality®. (2009). *Welfare Quality® assessment for pigs (sows and piglets, growing and finishing pigs)*. Welfare Quality® Consortium.

Williams, A., Safranski, T., Spiers, D., Eichen, P., Coate, E., & Lucy, M. (2013).

Effects of a controlled heat stress during late gestation, lactation, and after weaning on thermoregulation, metabolism, and reproduction of primiparous sows. *Journal of Animal Science*, 91(6), 2700–2714. <https://doi.org/10.2527/JAS.2012-6055>

Wu, W., Wang, X., Wu, G., Kim, S., Chen, F., & Wang, J. (2010). Differential composition of proteomes in sow colostrum and milk from anterior and posterior mammary glands. *Journal of Animal Science*, 88(8), 2657–2664. <https://doi.org/10.2527/JAS.2010-2972>

Zaleski, H., & Hacker, R. (1993). Variables related to the progress of parturition and probability of stillbirth in swine. *The Canadian Veterinary Journal*, 34(2), 109–113. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17424163>



## OPEN ACCESS

## EDITED BY

Fabio Luis Henrique,  
Associated Colleges of Uberaba, Brazil

## REVIEWED BY

Francesca Arfuso,  
University of Messina, Italy  
Ute Knierim,  
University of Kassel, Germany

## \*CORRESPONDENCE

Daniel Mota-Rojas  
dmota100@yahoo.com.mx

## SPECIALTY SECTION

This article was submitted to  
Animal Behavior and Welfare,  
a section of the journal  
Frontiers in Veterinary Science

RECEIVED 19 August 2022

ACCEPTED 17 November 2022

PUBLISHED 01 December 2022

## CITATION

Gómez-Prado J, Pereira AMF, Wang D,  
Villanueva-García D,  
Dominguez-Oliva A, Mora-Medina P,  
Hernández-Avalos I,  
Martínez-Burnes J, Casas-Alvarado A,  
Olmos-Hernández A,  
Ramírez-Necoechea R,  
Verduzco-Mendoza A, Hernández A,  
Torres F and Mota-Rojas D (2022)  
Thermoregulation mechanisms and  
perspectives for validating thermal  
windows in pigs with hypothermia and  
hyperthermia: An overview.  
*Front. Vet. Sci.* 9:1023294.  
doi: 10.3389/fvets.2022.1023294

## COPYRIGHT

© 2022 Gómez-Prado, Pereira, Wang,  
Villanueva-García, Domínguez-Oliva,  
Mora-Medina, Hernández-Avalos,  
Martínez-Burnes, Casas-Alvarado,  
Olmos-Hernández,  
Ramírez-Necoechea,  
Verduzco-Mendoza, Hernández,  
Torres and Mota-Rojas. This is an  
open-access article distributed under  
the terms of the [Creative Commons  
Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). The use,  
distribution or reproduction in other  
forums is permitted, provided the  
original author(s) and the copyright  
owner(s) are credited and that the  
original publication in this journal is  
cited, in accordance with accepted  
academic practice. No use, distribution  
or reproduction is permitted which  
does not comply with these terms.

# Thermoregulation mechanisms and perspectives for validating thermal windows in pigs with hypothermia and hyperthermia: An overview

Jocelyn Gómez-Prado<sup>1</sup>, Alfredo M. F. Pereira<sup>2</sup>, Dehua Wang<sup>3</sup>,  
Dina Villanueva-García<sup>4</sup>, Adriana Domínguez-Oliva<sup>1</sup>,  
Patricia Mora-Medina<sup>5</sup>, Ismael Hernández-Avalos<sup>5</sup>,  
Julio Martínez-Burnes<sup>6</sup>, Alejandro Casas-Alvarado<sup>1</sup>,  
Adriana Olmos-Hernández<sup>7</sup>, Ramiro Ramírez-Necoechea<sup>1</sup>,  
Antonio Verduzco-Mendoza<sup>7</sup>, Astrid Hernández<sup>1</sup>,  
Fabiola Torres<sup>1</sup> and Daniel Mota-Rojas<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Neurophysiology, Behavior and Animal Welfare Assessment, DPAA, Xochimilco Campus, Universidad Autónoma Metropolitana, Mexico City, Mexico, <sup>2</sup>Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development (MED), Institute for Advanced Studies and Research, Universidade de Évora, Polo da Mitra, Évora, Portugal, <sup>3</sup>School of Life Sciences, Shandong University, Qingdao, China, <sup>4</sup>Division of Neonatology, Hospital Infantil de México Federico Gómez, Mexico City, Mexico, <sup>5</sup>Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, Mexico, <sup>6</sup>Animal Health Group, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Ciudad Victoria, Mexico, <sup>7</sup>Division of Biotechnology—Bioterio and Experimental Surgery, Instituto Nacional de Rehabilitación-Luis Guillermo Ibarra Ibarra, Mexico City, Mexico

Specific anatomical characteristics make the porcine species especially sensitive to extreme temperature changes, predisposing them to pathologies and even death due to thermal stress. Interest in improving animal welfare and porcine productivity has led to the development of various lines of research that seek to understand the effect of certain environmental conditions on productivity and the impact of implementing strategies designed to mitigate adverse effects. The non-invasive infrared thermography technique is one of the tools most widely used to carry out these studies, based on detecting changes in microcirculation. However, evaluations using this tool require reliable thermal windows; this can be challenging because several factors can affect the sensitivity and specificity of the regions selected. This review discusses the thermal windows used with domestic pigs and the association of thermal changes in these regions with the thermoregulatory capacity of piglets and hogs.

## KEYWORDS

hypothermia, heat stress, infrared thermography, piglet, hog

## Introduction

The regulation of body temperature in homeotherms is ensured by mechanisms of thermolysis and thermogenesis (1). Thermoregulatory adjustments can be induced by changes in environmental temperature and various physiological situations, including age, fasting, food intake, and stress conditions (2–4). Therefore, the evaluation of body temperature represents a valuable tool to monitor animals' physiologic status, welfare, and stress responses. Under stressful conditions, the activation of the sympathetic system and the hypothalamic-pituitary-adrenal axis (HPA) releases effector hormones such as catecholamine and glucocorticoids, respectively. Stress-induced hyperthermia, a condition triggered by the sympathetic system, consists of increasing core body temperature and the consequences on the thermoregulatory mechanism of animals (5).

The thermoregulation mechanisms of domesticated swine face challenges during all stages of growth due to certain anatomical-physiological characteristics of this species (6) that make these animals sensitive and susceptible to neonatal hypothermia, or hyperthermia in adulthood (7, 8), events that can trigger not only physiological alterations but also a predisposition to pathologies and mortality due to thermal stress (9). This impact productive and reproductive parameters and the quality of meat, milk, and other products of animal origin (10). The anatomical features that influence thermoregulation in swine include fine hair that helps reduce heat loss to a small degree under exposure to cold climates (11) and protects the skin from direct solar radiation in hot environments (12). The lack of functional sweat glands (13, 14) and low amounts of brown adipose tissue (BAT) at birth also impact the thermal response of domesticated pigs to diverse stimuli (15). However, some of these characteristics –like the lack of hair and heat-insulating fat behind the ears and near the sternum– make certain body regions candidates as thermal windows that can reflect heat exchange between the animal and its environment (16).

Infrared thermography (IRT) is used to measure the amount of heat that a body radiates (17, 18) as a result of vasomotor control that dilates or constricts peripheral capillaries (8). The discovery of this relationship suggested that IRT could be useful in veterinary medicine to evaluate circulatory changes caused by inflammatory or infectious processes, wounds, thermal stress, and stressful events (19). IRT could help perform detailed analyses of thermoregulation and the compensation mechanisms involved in returning to a state of homeothermy. However, achieving this goal requires identifying adequate anatomical regions and the information they can provide depending on their vasculature and location.

To date, the ocular, auricular, and nasal regions are most often employed to quantify the heat that animals dissipate or conserve (17, 20, 21). In species like swine and canines,

appendicular regions are recognized as being more sensitive to temperature decreases due to prominent blood vessels that contract to prevent active heat loss (7, 22). IRT can detect changes of this kind in the surface vasculature of the skin, depending on the anatomical components of the region (15, 23). The use of IRT is, however, still controversial because studies have shown variability in indices of sensitivity and specificity, two parameters that can be affected by diverse factors, both internal (e.g., presence of hair, bare skin, and hair length, among others) (24), and external, that limit its use in veterinary medicine (11, 24).

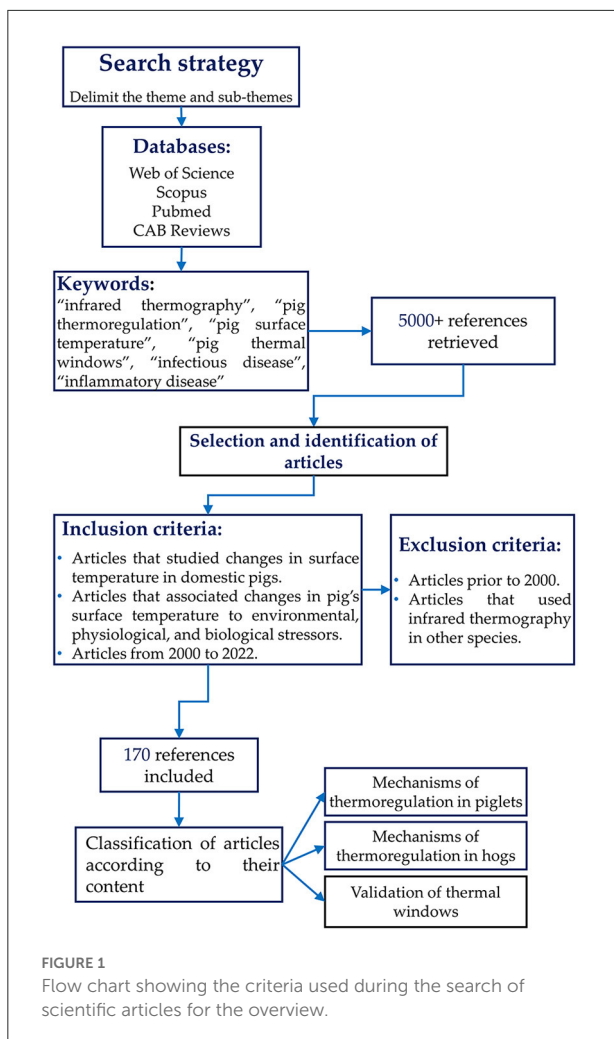
This review aims to analyze (i) the thermoregulation mechanisms of piglets and adult pigs (hogs); (ii) the thermoregulatory adjustments that pigs of different ages confront; (iii) evidence for the use of various thermal windows with domesticated swine; (iv) the factors that affect their validation; and (v) possible limitations on applying IRT with this species.

## Review methodology

The search was conducted in Web of Science, Scopus, PubMed, and CAB Reviews databases. The keywords used to find the literature were: “pig thermoregulation”, “pig surface temperature”, “infrared thermography”, “pig thermal windows”, and “infectious or inflammatory disease”. The inclusion criteria for the articles and books cited in the present review ( $n = 174$ ) were those regarding the changes in surface temperature in domestic pigs in response to environmental, physiological, or biological stressors. In addition, articles between the years 2000 and 2022 were considered. Studies that did not meet the inclusion criteria or reported the use of infrared thermography in other species were excluded. Figure 1 describes the overall methodology for this review.

## Thermoregulatory contrasts between piglets and hogs, anatomical-physiological aspects, and differences in thermo-stabilization

The anatomical-physiological particularities that affect thermoregulation in pigs include scarce fine hair (25), apocrine glands distributed throughout the body, and the absence of eccrine sweat glands (26). However, these characteristics differ in distinct stages of development and growth. For example, due to the absence of BAT and microfibril mass and low fat and glycogen reserves, the piglet's thermoregulatory immaturity (27) helps explain why newborns are vulnerable to environmental challenges when the temperature is around 18–20°C. Piglets require the activation of compensatory mechanisms such as



shivering thermogenesis, piloerection, and vasoconstriction in the first hours and days of life to impede heat loss from vital organs.

In hogs, in contrast, the disposition of adipose tissue is considered a factor that affects their heat-dissipating capacity, especially during exposure to high environmental temperatures. Hogs rely on peripheral vasodilation and panting to dissipate excess heat. However, due to their few functional sweat glands and the subcutaneous layer of backfat that impedes heat loss, they are susceptible to thermal shock that can also lead to death (Figure 2) (28–30).

Regarding behavioral thermoregulatory responses such as panting, pigs use a wide repertoire of changes to maintain their core temperature. For example, newborns huddle as the primary method to prevent heat loss, representing around 61.2–73.8% of their time (31). In sows, responses to cold environments include postural changes (sternal recumbency) (32), decreased locomotion (33), and an increase in food and water intake (34). In contrast, wallowing is the first reaction, when exposed to heat

stress, and reduction in feed intake and motivation to search for warm places are frequently observed (27, 35).

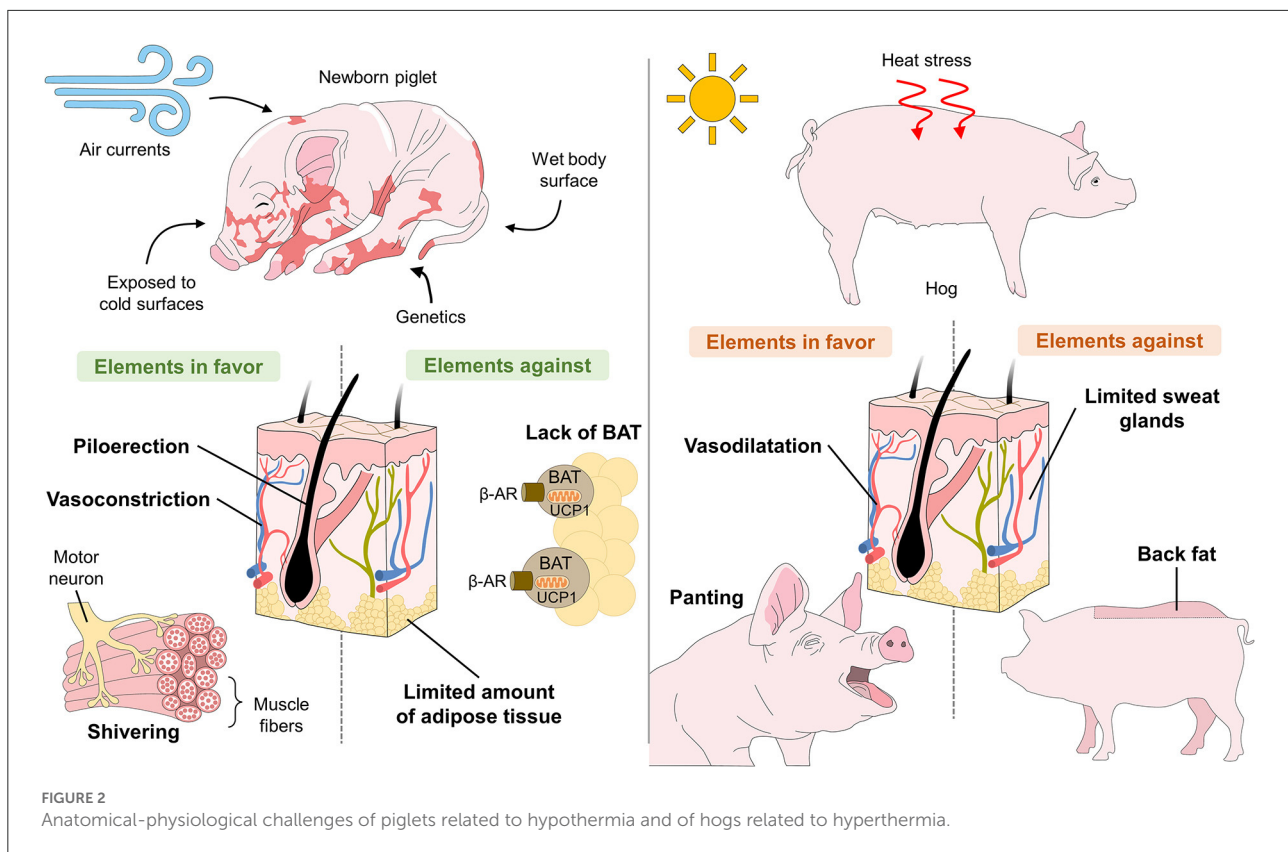
A significant difference between piglets and hogs is the thickness of the skin and its supporting structures. The dermis and subcutaneous tissue of hogs measures around 3 mm, 21–26  $\mu\text{m}$  (36). The thickness of the epidermis varies from one anatomical site to another, but ranges around 30–140  $\mu\text{m}$ , which can be considered a barrier against cold temperatures (37). The skin is thicker and has numerous crests in the shoulders and snout but is thin around the dorsum and hips (38). In contrast, studies of one-day-old piglets report a skin thickness of 0.3–1.4 mm, a stratum corneum of 11–48  $\mu\text{m}$ , and an epidermis of 33–68  $\mu\text{m}$  (39). This influences their thermoregulatory capacity, tolerance to extreme climates, and interaction with the vascular anatomy that, in neonates, is similar to that of human skin (36).

Two other factors related to the skin are glandular structures and the presence of hair follicles. Piglets have a capillary: follicle ratio of 730/ $\text{cm}^2$ , but reports on hogs estimate just 10.16 follicles/ $\text{cm}^2$  (36). The importance of these structures during the first days of life lies in their heat-conserving function generated by piloerection. In this regard, while swine are considered a species with scarce hair distribution, a study of Hampshire hogs weighing 100–120 kg reported the union of an arrector pili muscle with the outer root sheath (40) that supports the effects of piloerection and heat retention.

Another important characteristic that distinguishes swine from other species is the structure of their sweat glands. Unlike human sweat glands of the eccrine type and function mainly to cool the skin, pigs have apocrine glands that end in the epidermis, near hair follicles (41). They have been loosely described as simple, though the ones in the snout are considered more complex, as they are coiled and distributed in a ratio of 1:1 with respect to the follicles (40, 41).

Adipose tissue is another essential element for thermoregulation that differs significantly among swine of distinct ages. Neonate piglets have small fat deposits (around 15 g  $\text{Kg}^{-1}$ ) available in the abdomen and on the back (42), limiting their capacity to produce heat through food consumption (43, 44). Research has shown that piglets –which lack BAT at birth– use the process called “browning of white adipose tissue” (WAT) to perform non-shivering thermogenesis (45). Mersmann et al. (46) reported that the piglet’s organism has 4% fat immediately postpartum. Other authors mention just 1%, but this can increase to 16.4% during the first 24 days of life (47, 48). In pigs, the fat-producing process begins in the fetal stage. From 0 to 68 days of gestation, the fat content has been reported to be around 0.06 g/d, but increases to 1.09 g/d at day 69 (47). As the age of the animal advances, the fat percentage increases to 9.3–24.3% (49), with an average of 30% of extramuscular fat (44). This means that mortality by hypothermia is not a major challenge in hogs as it is in piglets. Instead, the increase in the thickness of the layer of adipose tissue reduces emissions of cutaneous heat into the environment through



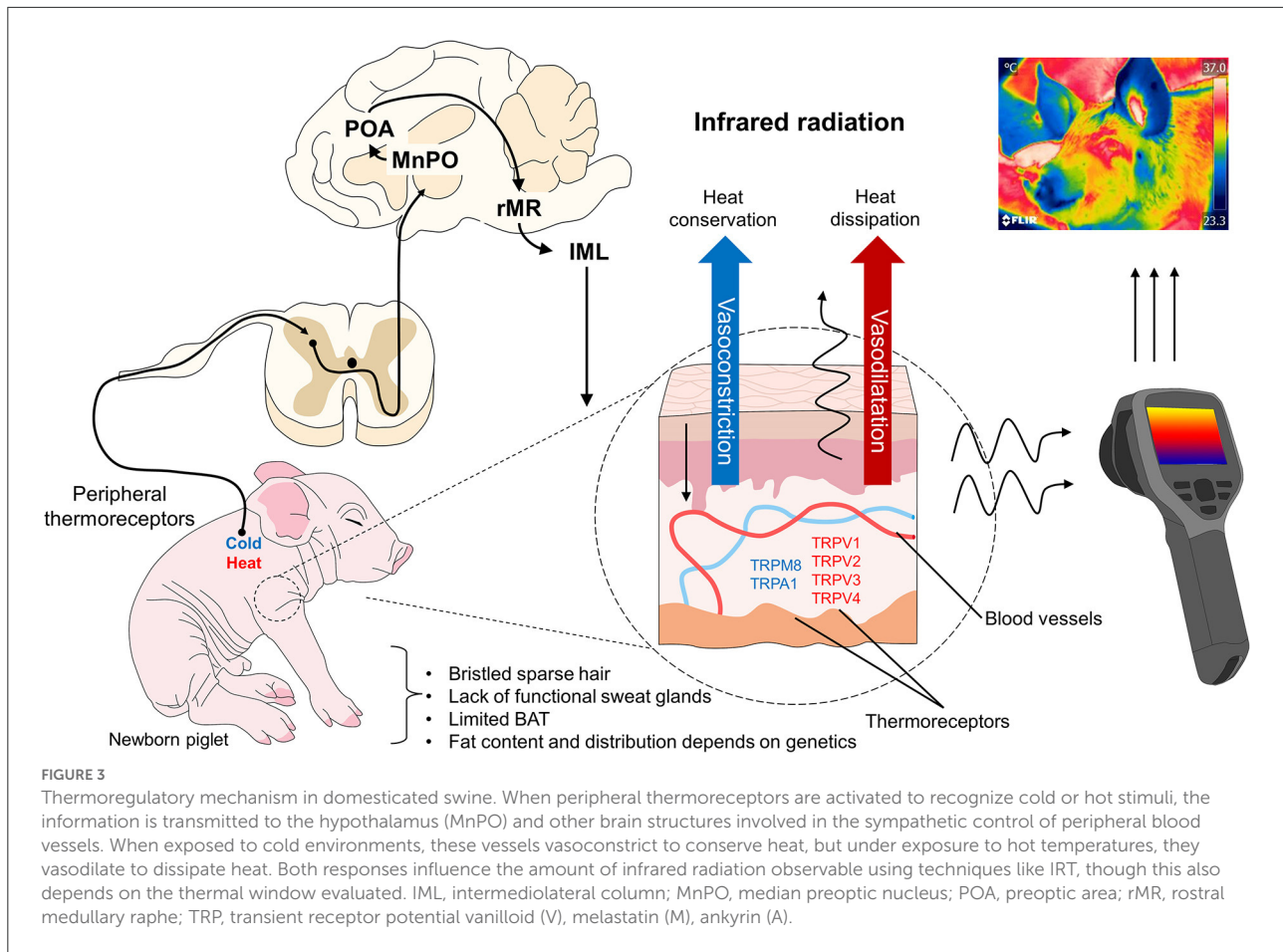


vasodilatation. This situation becomes complicated, however, when we consider the reduced functionality of sweat glands in swine, and the limited effectiveness of thermoregulatory behaviors like panting. These elements can cause imbalances when hogs are exposed to high environmental temperatures of 24–30°C and leave them susceptible to hyperthermia (known as an elevation of body temperature caused by an imbalance of thermoregulatory mechanisms that leaves them unable to eliminate heat at the same rate as it is produced) or heat stroke (50, 51).

Regarding the characteristics of the muscle required to perform shivering thermogenesis, skeletal muscle fibers are classified into “slow-twitch” (type I) and “fast-twitch” (type II with subsequent subtypes IIa, IIb, IIx), according to the isoform of myosin heavy chain and the contraction speed, where type IIb is the fastest (52). Vanden Hole et al. (53) determined that the percentage of type II muscle fibers in the pelvic limbs of piglets represents 95.58% of total muscle fiber. It has been reported that piglets have predominantly secondary muscle fibers, that these correlate positively with muscle weight ( $r = 0.39$ ) (54), and that low temperatures of  $15 \pm 1^\circ\text{C}$  in 21-day-old piglets increase the expression of type IIa fibers (55). In hogs, an immunohistochemical study of muscle tissue samples showed a higher proportion of type-II muscle fibers (56), which can increase quadratically with parity (3<sup>rd</sup> birth,  $r_2 = 0.44$ ; 4<sup>th</sup>

birth,  $r_2 = 0.54$ ). Other studies of animals weighing 100 kg showed that the longissimus muscle expresses three isoforms of type II muscle fibers but not IIb, which were not observed in Lefaucheur et al.’s work (56). These fibers’ distribution consists in islets of type I fibers surrounded by peripherally-located IIa- and IIb-type fibers (56). In hogs, the percentages of type I, IIa, and IIb fibers are 4, 8, and 88%, respectively (57), lower than the figures for piglets. The importance of the predominance of certain fibers is that while type II are fast, they require ATP production to initiate non-shivering thermogenesis, a substrate that may be limited in piglets. In contrast, type I rely on oxidative metabolism to thermoregulate (58), and a shift toward oxidative muscle can occur in piglets (55). Finally, reduced muscle irrigation, added to the absence of microfibril mass that controls the potency of muscular contraction, also compromises the mechanism of shivering thermogenesis (43), leaving piglets susceptible to neonatal hypothermia.

Concerning the metabolic mechanisms that pigs use for thermoregulation, glycogen reserves in skeletal muscle (around 30–35 g  $\text{Kg}^{-1}$ ) and liver are the main sources of energy in the first hours of life (43, 59). Glycogen concentrations in the skeletal muscle, front and hind legs, and liver of 32 neonates of a Topigs x German Pietrain breed were studied in the first 96 h of life. In that study, low birth weight in the piglets (body mass =  $0.79 \pm 0.26$  kg) was associated with reduced



glycogen utilization in the hind legs, as those reserves were not utilized until 8 h postpartum. Moreover, those newborns had as much as 50% less glycogen than normal-weight piglets (mass body =  $1.37 \pm 0.29$  kg). An evaluation of the amount of glycogen in the liver showed that low-weight piglets did not utilize their reserves for 96 h, in contrast to the normal-weight ones that consumed half of that glycogen in the first 8 h of life ( $P = 0.0238$ ) (60). Another energy reserve available at birth is glucose. Staarvik et al. (61) evaluated this in one-day-old piglets, finding average blood glucose concentrations of 5.48 mmol/l. Interestingly, they also found that male piglets had higher glucose levels than females, while those born in large litters had glucose concentrations as much as 0.07 mmol/l lower. Because glycogen and glucose are energy reserves that can be depleted quickly, consuming colostrum is essential for providing the energy newborns require for thermoregulation and the passive immunity needed to reduce the risks of low vitality (43, 59).

Recognizing the anatomical differences between newborn and adult pigs allows us to determine the resources each age group utilizes when exposed to environmental challenges like thermal stress, and also helps identify the responses that

occur when those mechanisms are activated. Moreover, this information serves as a guide for planning strategies to prevent, diagnose, and manage affectations of the thermoregulation of swine in relation to their physiological stage of development.

## Thermoregulation in the newborn piglet

At birth and during the first 48 h of life, piglets rely on shivering thermogenesis as their principal thermoregulation mechanism (62) (Figure 3) to compensate for low environmental temperatures of 20–22°C (43, 63), which can cause a drastic drop in body temperature, perhaps as great as 2°C (15, 64). The placental fluids (including amniotic liquid) that cover piglets together with the high body conductance and the high specific surface area at birth worsen this temperature drop due to the evaporation of 50% of those liquids that usually occurs in the first 5–30 min post-birth (65, 66). Hence, the main challenge for piglets is hypothermia. Their immature thermoregulatory center also plays an important role during birth; in fact, neuroimaging studies suggest that their thalamus

and hypothalamus do not reach maturity until week 5 of life (67). This immaturity added to their relative physiological and metabolic immaturity, helps explain the incapacity of neonate pigs to thermoregulate when facing environmental challenges (15).

Because they do not have a mature thermoregulatory center (67, 68), newborn piglets first mobilize energy reserves (glycogen, fat, skeletal muscle, in descending order) to produce heat and survive in the extrauterine environment (7). The lack of microfibril mass that controls the potency of muscle fiber contraction (56) and the predominance of secondary muscle fibers help piglets produce heat through a muscular contraction so they can remain metabolically active. This may confer a particular advantage for achieving thermoregulatory success, but only in a limited way. Causes of thermoregulatory incapacity in piglets include reduced muscular irrigation, low mitochondrial mass responsible for the oxidative potential of muscle and, hence, the energy supply, and the level of bioavailability of carbohydrates as an energy source that leads to a biochemical modification of the oxidation of non-structural fatty acids, compromising the mechanism of shivering thermogenesis and leaving piglets susceptible to neonatal hypothermia (43).

The total amount of fat in piglets at birth and usually 42% of the limited muscle glycogen reserves are used in the first 12 h of life to satisfy its energy requirements. Nonetheless, the expenditure depends on factors such as body mass and vitality since piglets with low vitality have less muscle volume and liver glycogen stored at birth (69). Therefore, for this species, colostrum intake is critical for their survival. Reports show that colostrum provides around 5.4% of fat and 2.0% of lactose as bioavailable carbohydrates that support the newborn's survival. However, colostrum also gives piglets passive immunity by supplying immunoglobulin G, substantially reducing susceptibility to infections by agents like *E. coli* (70, 71). Under these conditions, piglets that are born weak with body weights <800 g (72) are rarely able to ingest colostrum and milk, their two main sources of energy, because of (i) low energy reserves in their muscles that impede initial attempts to suckle, and (ii) insufficient insulation given their higher surface/body mass ratio that can lead to hypothermia (73).

- Inanition and hypothermia hinder locomotion, increasing the risk of crushing and death in the first 24 h post-birth. The piglet's organism may consume glycogen reserves in the liver or muscles during the first 6 h of life, striving to achieve thermoregulation despite hypoglycemia and limited glycogen reserves (74), but this can trigger metabolic acidosis, which that can end in coma or death by cardiac arrhythmia (7, 75). Studies show that piglets' 10–13% of perinatal mortality is due to underlying events like crushing and cold stress (43). Due to the reported correlation between piglet survival and the degree and

duration of postnatal hypothermia (76), swine producers are interested in studies of hypothermia that may help prevent this condition that causes significant economic losses (77) as the leading cause of perinatal death (7, 78). The main threat to neonate piglets is a cold extrauterine environment that provokes active heat loss through evaporation and exposure to low temperatures and cold objects or fluids. Their limited thermoregulatory capacity exacerbates this due to scarce energy resources that are quickly depleted in such a challenging environment. Therefore, the timely recognition of hypothermia is crucial to avoid dire physiological consequences.

## Thermoregulation of hogs at the slaughterhouse

In contrast to piglets, hogs may be exposed to elevated environmental temperatures that affect growth, food conversion, reproduction, health, and welfare. Though hogs have a mature thermoregulatory center, they are susceptible to heat stress because they have few functional sweat glands (30/cm<sup>2</sup>) (79). Hogs radiate heat by convection and evaporation through vasodilatation by increasing their respiratory rate and changing postures (80). However, when temperatures exceed their body's thermoneutral zone (81), they cannot lose heat at the same rate as acquired. Stressful situations can also compromise the mechanism of peripheral vasodilatation and, hence, thermoregulation (82). Moreover, the effectiveness of the evaporative thermoregulatory response varies with the degree of humidity in the environment: the higher the humidity (50% or more), the less effective evaporative cooling will be. Hogs can suffer heat stress at lower temperatures than when the air is drier because less liquid evaporates from the respiratory tract and skin in humid environments (80).

It is important to understand that the magnitude of heat production and exchange in hogs depends, as well, on the stage of growth, gestation, lactation, diet, stocking density [1 vs. 2 m<sup>2</sup>/pig (83)], the air movement index, and convection and conduction methods (80). Animals in stages marked by high metabolic activity (e.g., early growth, lactation) tend to be more susceptible to heat stress, so sows, boars, and finishing hogs weighing over 50 kg may begin to experience the adverse effects of heat stress at temperatures that barely exceed 20°C (79).

Another critical characteristic of hogs is the layer of subcutaneous fat that insulates the skin but impedes thermolysis, leaving them especially sensitive to heat stress (84). The thickness of the hog's back fat is another relevant trait. Autochthonous, non-selected breeds like Iberian pigs have a thick layer of subcutaneous fat that can increase their sensitivity to high temperatures compared to leaner breeds (85). According to Usala et al. (86), the heritability of back fat depth is greater in conditions free of heat stress ( $h^2 = 0.34$  vs. 0.28). In line

with these results, studies have proven that hogs weighing over 51.4 kg are more susceptible to heat stress than lighter animals, likely due to a limited heat-dissipating capacity because they have more adipose tissue (87). This corroborates the idea that certain anatomical features of hogs promote greater susceptibility to heat stress.

During transport to an abattoir, hogs may be exposed to stressors like dense loading densities and high ambient temperatures that can compromise homeothermy (88). When unable to maintain a balance between heat gain and loss, hogs suffer heat stress that can trigger myocardial and circulatory insufficiency, perhaps ending in death (89). The development of these insufficiencies is due to metabolic disorders like an increased flow of  $\text{Ca}^{2+}$  and consumption of adipose tissue, which foster a sustained temperature increase (90, 91) that can lead to oxygen deficiency, electrolyte imbalance, and oxidative stress caused by the activation of myeloperoxidase and eosinophil peroxidase enzymes which serve as indicators of ischemic changes (92).

## Adverse effects of hyperthermia for the health of hogs

In hyperthermic conditions, blood irrigation of the splanchnic tissues is channeled toward the periphery to dissipate heat. When this increase in body temperature is sustained for a certain time, it is classified as acute hyperthermia (93). Greater susceptibility to acute hyperthermia has been registered in hogs raised in tropical zones and during summertime in regions with temperate climates. This predisposition is greater than in other species; one of the factors is the lack of functional sweat glands. Heat dissipation occurs through two evaporative mechanisms (respiratory and dermal), but hogs dissipate <50% of the heat produced *via* respiratory evaporation. Evaporation through the skin involves two types of processes: one passive, when water diffuses through the skin, and the other active, called sweating. However, hogs have a very low density of sweat glands (30/cm<sup>2</sup>) compared to species like bovines (800–2,000/cm<sup>2</sup>), and the few they have are not stimulated by heat stress, so little heat is lost by sweating. The second factor is subcutaneous fat. Heavier hogs (e.g., gestating or lactating sows and hogs of commercial weight) require greater energy consumption in relation to their productive stage but also present a lower heat-dissipating capacity because of a low surface: mass ratio (volume) and larger amounts of fatty subcutaneous tissues that impede heat dissipation (93, 94).

At the organ level, during hyperthermia, the gastrointestinal system is affected by hypoxia of the intestinal mucosa because blood flow (nutrients and blood) is diverted to the periphery. This damages the intestinal tract by reducing the height of the villi and the depth of crypts, increasing permeability, and

intensifying the inflammatory response (93). There are also reports of tachycardia, hypertension, and supraventricular or ventricular arrhythmias, possibly indicative of cardiovascular damage after an hyperthermia episode (94, 95). Chen et al. (96) identified polymorphonuclear leucocytes in heart tissue sections from hogs affected by heat stress, suggesting that the animals were in an acute stage and may have developed myocardial lesions. As environmental temperatures rise, efficiency is compromised because maintaining a stable body temperature becomes the priority, so nutrients are channeled to achieve eutheria, pushing the synthesis of products (meat, milk) to a second plane. Hyperthermia also affects numerous intracellular signaling pathways responsible for survival and productivity (97). The effects of high temperatures on production can vary widely. Sows may present late-onset puberty and long intervals between weaning and estrus. In addition, the proportion of impregnated sows that give birth may be low. In boars, seminal quality may decrease (94), causing economic losses in the industry due to reduced efficiency, higher outlays for veterinary care, low meat quality because of increased lipids and reduced proteins, and higher mortality, especially under challenging stages for dissipating heat (e.g., gestation, fattening) (97).

Unfortunately, common hyperthermia is not the only condition threatening existing swine populations, for recent increases in demand for pork have intensified the breeding of genetic lines that reach the meat-production stage more quickly. While this process produces pigs with a higher muscle-to-fat ratio, it also brings undesirable traits, including a recessive, monogenic hereditary autosomal syndrome called malignant hyperthermia or porcine stress syndrome (PSS) (98). This pathology is described as a hypermetabolic reaction of skeletal muscle caused primarily by alterations of calcium channels in skeletal muscle cells and the central nervous system (Purkinje cells). If untreated, it can be fatal. Studies have described a mutant ryanodine 1 receptor gene (RYR1) that can cause episodes of malignant hyperthermia under adverse or stressful conditions, such as high environmental temperatures, intense exercise, reproductive activity, transport to the abattoir, or the application of inhaled halogenated anesthetic agents (95). Unlike the hyperthermia described earlier, which develops progressively, malignant hyperthermia is characterized by a sudden increase in body temperature and metabolic index. It usually ends in death. The dysfunction of calcium channels in skeletal muscle cells caused by mutations of the RYR1 gene produces a high concentration of intraplasmatic calcium because the  $\text{Ca}^{2+}$ -releasing channels anchored to the membrane of the endoplasmic reticulum stay open (99). This disorder has become more rare due to the extensive removal of carriers of this gene mutation (100–102); the environment and the facilities where the animals are kept continue to be a factor in the development of disrupted thermal states.

The evolution of PSS passes through 3 phases. The first is marked by increased skeletal muscle metabolism, greater oxygen and glucose consumption, hypercapnia, and higher CO<sup>2</sup> concentrations at the end of expirations that lead to hyperventilation. As energy supplies are consumed, the hog presents hypoxemia and hypoglycemia. Then, attempting to revert this, it intensifies glycolysis, which can produce lactacidemia. In the second phase, local hypoxia, an acid-base imbalance, and fever lead muscle cells to suffer necrosis. Combined with edema, this can trigger compartment syndrome. The rupturing of skeletal muscle fibers releases their content into the bloodstream (rhabdomyolysis). The electrolytes that enter the blood can cause fatal organ damage, while increases in plasma myoglobin and creatine phosphate kinase (CK) levels can trigger acute renal insufficiency. In stage three, the hog suffers systemic metabolic disorders, core hyperthermia, arrhythmia, heart damage, and continuous rupturing of myocytes that, finally, cause disseminated intravascular coagulation (DIC), multiple organ failure and death (95).

Nevertheless, even hogs that do not present the RYR1 gene mutation can die of heat stroke. A hog exposed to excessive heat may develop hyperthermia and activation of the sympathetic-adrenal-medullary axis (SAM), as in other stressful situations. Activation of this axis culminates in increased catecholamines synthesis and secretion, increasing gluconeogenesis, tachycardia, and tachypnea (103). It is important to understand that tachypnea –that is, panting– helps eliminate heat by evaporating liquid from the respiratory tract (27). Hyperventilation and greater oxygen consumption lead to hypercapnia and hypoxia, aggravated by hyperlactatemia due to increased anaerobic glycolysis. Finally, all these conditions together produce metabolic acidosis that affects heart function and, possibly, death (Figure 4) (103).

In recent years, besides changes in pig farm management and handling, alternative tools have been proposed to aid in assessing the thermal states of piglets and hogs. One of these complementary tools is IRT (104, 105).

## Infrared thermography (IRT) as a tool to evaluate the thermal and physiological state of swine

IRT measures surface temperature non-invasively by quantifying the radiation emitted by a biological body that reflects modifications in peripheral blood circulation (18, 23). Using IRT with humans and animals requires identifying body regions with specific characteristics called thermal windows, characterized by a high density of blood capillaries, arteriovenous anastomosis, and glabrous skin. In veterinary medicine, the eye, auricular pavilion, and tail are usually the foci of IRT used in species like rats, dogs, and large ruminants (23, 75, 106). However, the usefulness of IRT has been

questioned because physiological and circulatory responses can differ among individuals and species depending on the region chosen due, for example, to the properties of hair in dogs or the skin thickness of large ruminants (11).

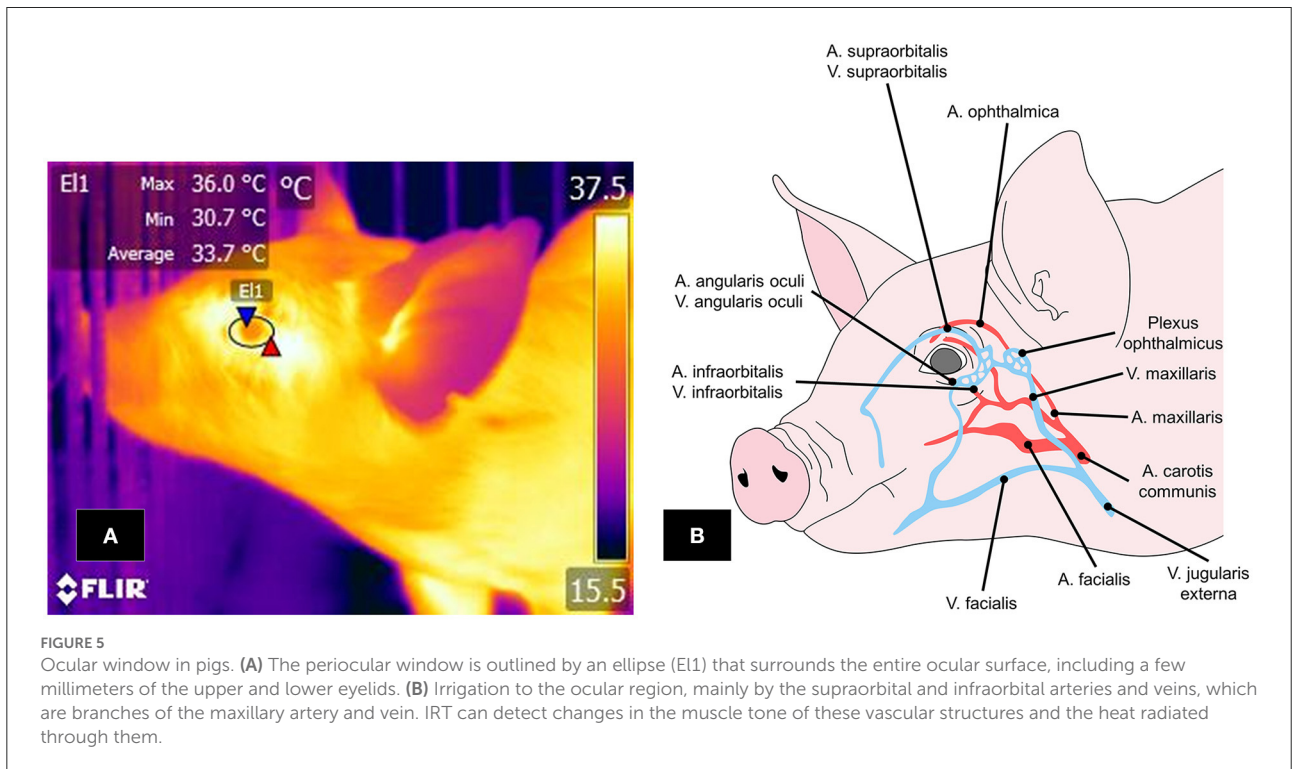
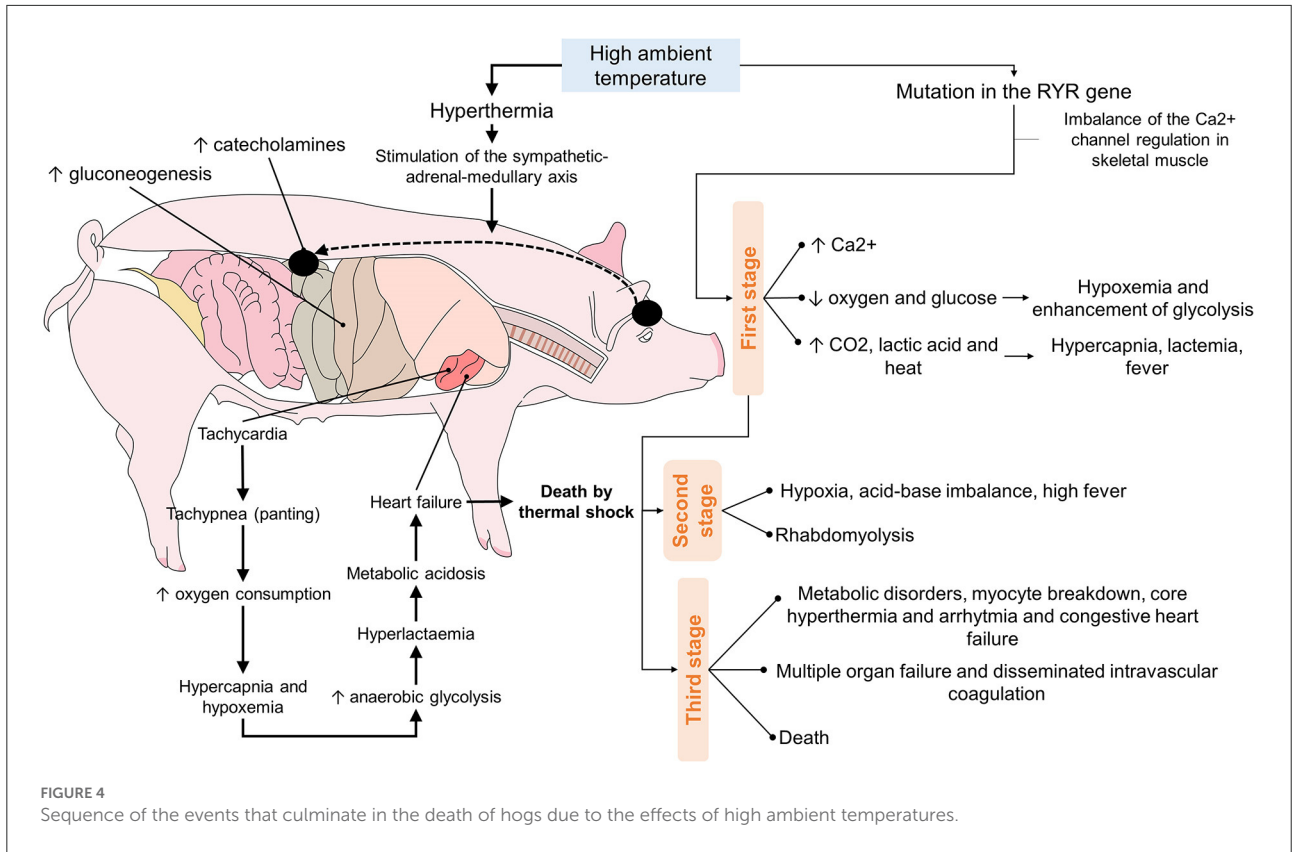
In newborn piglets, the entire body is considered a thermal window because of its low-fat content. In contrast, in adults, as the fat levels increase and reduce heat emissivity (50, 51), the main thermal windows proposed are the eyes (50, 107), ears, vulva, udder (108), armpit, back, shoulder, and snout, all of which have successfully been correlated positively with average rectal temperature values. However, the sites with reports of greatest reliability and accessibility are the base of the ear, shoulder, and udder (50, 108). Scientific evidence for thermoregulation in swine demonstrates that environmental temperatures play a particular role, so any attempt to determine the efficiency of thermal windows must consider this external factor.

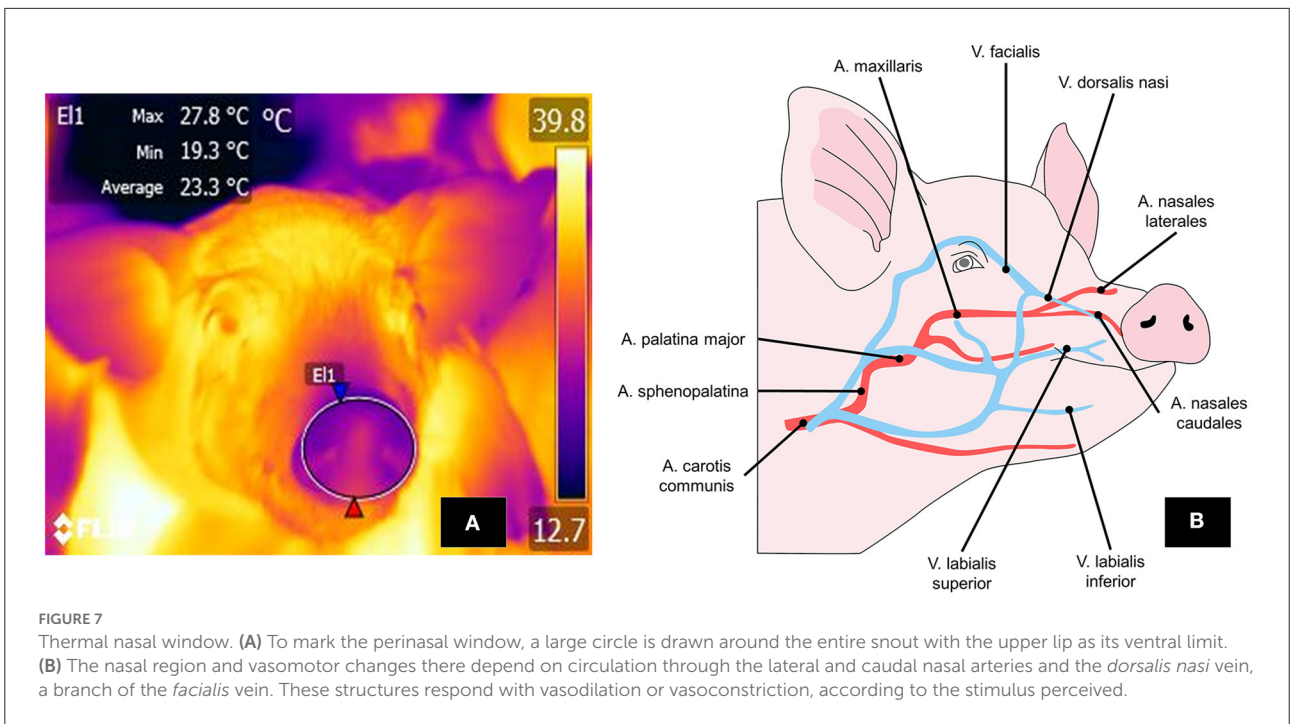
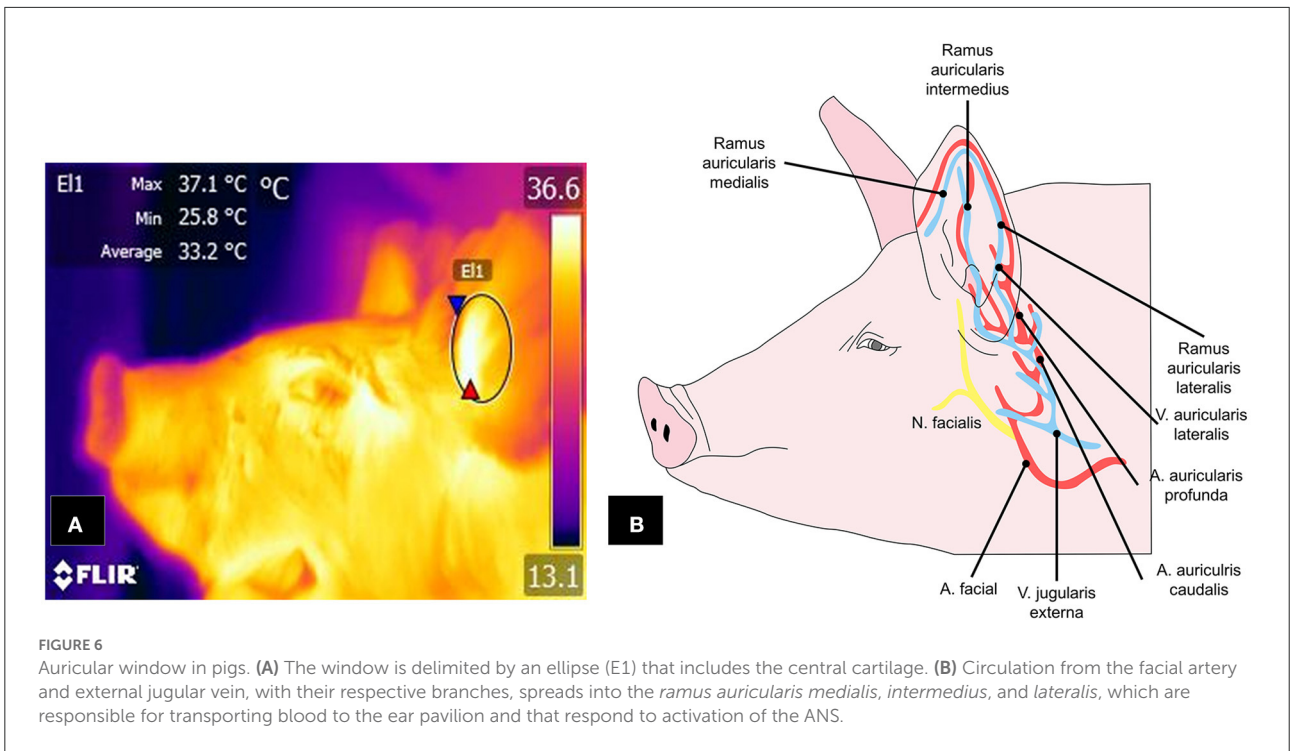
To date, IRT has been used to detect febrile viral states, diagnose pathologies of public interest in pigs (109, 110), or inflammatory processes such as lameness in reproductive females (111).

## Thermal window: Orbital zone (periocular area and lacrimal caruncle)

Two thermal windows have been identified in the orbital region: the lacrimal caruncle and periocular area. The infraorbital and supraorbital arteries pass through this region as ramifications of the maxillary artery, supplying blood to the eyelids and ocular muscles (112). The infraorbital artery also has ramifications of the facial nerve, sympathetic fibers that permit vasomotor control by activating the autonomous nervous system (ANS) (113) (Figure 5).

The ocular window has been studied mainly to determine the thermal state of animals and evaluate body temperature non-invasively due to its contiguity to the CNS (114, 115). This was proven in a study by Barbieri et al. (107), who evaluated if this thermal window could help to determine body temperature in 108 pigs. They obtained temperature readings with IRT and a calibrated digital rectal thermometer. The mean rectal temperature was  $38.9 \pm 0.4^\circ\text{C}$  (min =  $37.9^\circ\text{C}$ ; max =  $40.1^\circ\text{C}$ ), while the mean ocular temperature was  $36.7 \pm 0.1^\circ\text{C}$  (min =  $34.8^\circ\text{C}$ ; max =  $38.8^\circ\text{C}$ ). In general, the authors observed a moderate correlation between ocular and rectal temperatures ( $r = 0.58$ ,  $P < 0.01$ ), meaning that surface ocular readings and rectal values increased; however, the correlation varied from strong in recently-weaned pigs ( $r = 0.73$ ,  $P < 0.01$ ) to weak in fattening animals ( $r = 0.23$ ,  $P < 0.05$ ). This correlation may be because food intake and the age of the individual are factors that affect the animal's thermoregulation level. This situation has become evident in piglets, where the colostrum intake





improves their thermoregulatory capacity and compensates for the limited availability of energy resources at birth. In older animals, food intake helps to maintain the temperature within the thermoneutrality zone which tends to be narrow. Therefore,

during a state of hyperthermia, Therefore, the pig decreases feed intake (7, 43). These studies demonstrate the validity of IRT for determining thermal states in animals when significant temperature alterations occur. Results coincided with those

mentioned in a scientific review, which stated that temperatures recorded in the ocular region reflect the circulatory control present in that area and its close relation to the ANS (8).

The physiological explanation of the temperature increase is based on greater cardiac activity in response to the catecholamine neurosecretion (adrenaline, noradrenaline) stimulating sympathetic nervous system activity (SNSi), affecting body temperature, a condition called stress-induced hyperthermia (88). Since this phenomenon induces a state of hyperthermia, IRT could serve to detect the increase. Pulido-Rodríguez et al. (116) evaluated the relation between temperatures in the ocular region (thermographic images taken while keeping a distance of 0.50–1 m) and cortisol levels in 66 piglets for 7 weeks post-weaning. They found that in the first 2 weeks, saliva cortisol levels and ocular temperatures presented a strong positive correlation ( $r = 0.89$ ,  $P < 0.05$ ) and concluded that higher temperatures in this region serve as a reliable indicator for detecting stress-induced hyperthermia and adrenal response.

These findings were confirmed by Machado et al. (117) in their study of 192 hogs transported for 170 km, where they recorded rectal and ocular temperatures (with a fixed distance of 0.50 m between the animal and the observer), saliva cortisol levels, respiratory rate, and lactate levels, while also comparing the influence of the upper and lower transport levels inside the vehicle. They observed that the average post-transport temperature in the animals at the upper level was higher than those below (upper =  $39.9^{\circ}\text{C}$ , lower =  $38.1^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 0.022$ ). That finding coincided with higher lactate levels (upper =  $61.63$  mg/dL, lower =  $58.26$  mg/dL;  $P < 0.001$ ) to indicate that temperature readings provide information on both the thermal state of animals and their welfare levels (51, 114).

When considering hyperthermia, Weschenfelder et al. (118) evaluated 258 hogs prior to sacrifice to determine the effect of the pre-slaughter process and the influence of meat quality. Those authors measured ocular temperatures using IRT (keeping a distance of 0.25 m) and the pH of mass in the long dorsal, semi-membranous, and adductor muscles. Although observations showed that ocular temperatures correlated with plasma lactate levels ( $r = 0.20$ ,  $P = 0.001$ ), with pH at 1-hour postmortem ( $r = 0.18$ ,  $P = 0.03$ ), and with pH of the semi-membranous muscle ( $r = 0.20$ ,  $P = 0.02$ ), the degree of correlation was weak. The authors concluded that the accuracy of IRT should consider elements such as dirt, hair, and humidity. Results coincided with those mentioned in a scientific review, which stated that temperatures recorded in the ocular region reflect the circulatory control present in that area and its close relation to the ANS (8).

The use of the ocular region to detect hyperthermia could also be used to identify other conditions, such as febrile states. Mota-Rojas et al.'s scientific review (104) observed that because IRT is used to detect anatomical regions with increased radiated heat, the ocular area could be utilized to recognize febrile states caused by infection. During infection, the physiological

difference that causes the temperature increase during the fever must be the release of cytokines like interleukin-1, interleukin-6, and prostaglandin. Those substances are classified as pyrogenic molecules that stimulate the preoptic area of the hypothalamus to increase body heat (104).

The effects of febrile states were proven in a study of 124 Landrace x Yorkshire pigs diagnosed with *Actinobacillus sp.* infection. The researchers found that IRT taken at a distance of 0.50–1 m predicted body temperature increases of  $0.80$  and  $0.35^{\circ}\text{C}$  (119). That evidence was confirmed by Loughmiller et al. (120), who evaluated febrile responses in 28 pigs using IRT (keeping a distance of 2 m). In the six animals inoculated with *Actinobacillus pleuropneumoniae*, the authors observed a significant interaction between IRT temperature readings and inoculation with the pathogenic agent ( $P < 0.001$ ), as temperatures were significantly higher than in the control animals (infected =  $39.6 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$  vs. non-infected =  $32.6 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ,  $P < 0.05$ ). These results demonstrate IRT's sensitivity for detecting febrile states and the need to analyze this thermal window for evaluating body temperature.

Febrile responses are not necessarily associated with pathological conditions in animals, as they can also occur as biomarkers of immune responses to vaccination (109). This was proven in a study of vaccinated pigs in which IRT (thermographic images of a group of pigs were taken keeping a distance of 2 m) detected a temperature increase of  $1^{\circ}\text{C}$  in the 3–8 h post-injection (121). Scientific evidence thus conclusively shows that the ocular region has useful clinical applications for treating sick animals. Other authors, however, argue in favor of using the lacrimal caruncle region because it is innervated by sympathetic fibers and responds to ANS activity and, therefore, could be a biomarker of stress (23, 24).

The thermal window of the lacrimal caruncle has been utilized in studies like one by Lonardi et al. (122) that evaluated 2500 Large White and Belgian Landrace pigs' eye temperature (keeping a distance of 0.8 m between camera and skin surface) under two conditions: castration and non-surgical handling. Those researchers observed that the temperature of the lacrimal caruncle was higher in the first group than in the one that received only handling at 3 h post-surgery ( $35.6 \pm 0.08^{\circ}\text{C}$  vs.  $35.4 \pm 0.09^{\circ}\text{C}$ ,  $P < 0.05$ ). They also found that the temperature increase had a weak correlation with rectal temperatures ( $r = 0.31$ ,  $P < 0.01$ ), perhaps indicating that the ocular window is more specific for painful conditions or stress in swine. However, it has also been suggested that this window may be more helpful in identifying temperature decreases caused by increased sympathetic activity. This precise increase that triggers neurosecretion of catecholamines which causes vasoconstriction of the capillaries to reduce heat radiation, as has been reported in other species (18, 123). The behavior of this window continues to be studied, but its clinical utility is undeniable, as is the assistance it offers veterinarians. For this reason, it is necessary to gather additional data to efficiently demonstrate the



information obtained from the ocular region in order to achieve a strong validation.

Another important factor is the thickness of the skin because it influences heat radiation. Moreover, the capacity to dissipate heat differs among anatomical sites like the ear, eye, back, and buttocks (108). This situation explains that thicker skin impedes dissipation, in contrast to thinner-skinned animals like the water buffalo (124–126) (pig: 30–140  $\mu\text{m}$  vs. water buffalo: 50–115  $\mu\text{m}$ ) (24, 38). Zhang et al. (127) suggest that these variations are related to the reflection of radiant energy and emissivity, which vary at different anatomical sites, given that infrared cameras detect infrared radiation of 0.75–1.4  $\mu\text{m}$  and thermal radiation of 8–15  $\mu\text{m}$  (128). For example, the recommended emissivity values for pigs range from 0.94 to 0.98 (129, 130). However, the thoracic limbs and eyes values are 0.94 and 0.93, respectively. Therefore, the anatomical characteristics of the pig must be considered to achieve precise evaluations of surface temperatures in real-time. It is also essential to emphasize that other techniques must confirm IRT diagnoses. Thus, the best approach is to use IRT and other tools to optimize pig farm management.

## Thermal window: Auricular

Another area that has been shown to satisfy the characteristics for consideration as a thermal window is the auricular region. Figure 6 shows the vasculature of the auricular pavilion, mediated by the caudal auricular artery (*auricularis caudalis*) divided into three regions: lateral (*lateralis*), intermediate (*intermedius*), and medial (*medialis*) (131). Innervation of this region depends on the auriculopalpebral nerve (*auriculopalpebralis*), a ramification of the facial nerve (*facialis*) (112).

Contrary to observations of the ocular window and its capacity to recognize hyperthermic states, the auricular area has been used to recognize hypothermia in piglets (7). In animals aged 1–13 days, the surface temperature of the auricular region presented a strong correlation ( $r = 0.89$ ,  $P < 0.01$ ) with rectal temperatures (132), so it may be indicative of the information provided by the pavilion. This theory was posited by Schmitt and O'Driscoll (133) to validate IRT for evaluating temperature in piglets. The authors assessed 67 animals by recording temperatures of the ear and back. Results showed that, in general, the temperature of the ear was lower in low-weight animals (1.5 kg =  $35.2 \pm 0.36^\circ\text{C}$  vs. 1.74 kg =  $36.5 \pm 0.35^\circ\text{C}$ ,  $P < 0.001$ ). This finding was similar to observations of low rectal temperatures in animals with severe growth delay (severe =  $35.8 \pm 0.46^\circ\text{C}$  vs. mild =  $37.2 \pm 0.42^\circ\text{C}$ ,  $P < 0.05$ ).

Some authors concur with this idea, according to Schmitt et al. (134), who evaluated the thermoregulatory capacity (taking thermographic images of the auricular window at a distance of 1 m) of two lines of piglets with differences in food consumption.

They found that post-birth, the high-consumption animals had lower temperatures than those with low consumption ( $24.7 \pm 0.37^\circ\text{C}$  vs.  $26.3 \pm 0.36^\circ\text{C}$ ,  $P < 0.005$ ). The explanation offered is that exposure to cold induces heat production by metabolic thermogenesis, which intensifies consumption of energy resources like BAT, while in neonates with scarce energy resources, food consumption increases to compensate for and regulate temperature (27). This explanation makes it possible to argue that the performance of thermoregulation in the first weeks of life, up to weaning –when the temperature is strongly influenced by factors like humidity and the animal's weight and average food consumption– corroborates the importance of monitoring this condition (7, 135). Vascularization and innervation of the auricular window responding to changes in ANS tone as an activation of the SNSi, as we saw in the section on the ocular window. This was posited in a study by Yañez et al. (136) based on an evaluation of 64 piglets weaned with or without social disruption who did or did not receive environmental enrichment. The study animals received environmental enrichment in suspended ropes, aromatized bottles, toys, and balls, while the control group did not. The authors found that temperatures in the auricular pavilion did not present changes under any of the treatments but that the temperature of the lacrimal caruncle was  $1.7^\circ\text{C}$  lower in the animals that did not receive enrichment but experienced disruption of the social order ( $P < 0.05$ ; at a uniform distance of 1 m). In contrast, the animals without disruption and with environmental enrichment had higher lacrimal caruncle temperatures than controls ( $P < 0.05$ ). From a comparative perspective, these results demonstrate that the meaning of the thermal response observed differed with the condition to which the animals were exposed and that areas like the ocular region, specifically the lacrimal caruncle, can help evaluate acute stress responses. In contrast, the ear region may indicate an animal's overall thermal state (137).

The results just reviewed contrast to those of Rocha et al. (138), who set out to validate anatomical sites like the ear, ocular region, neck, and rump (taking thermographic images at a distance of 1.50 and 2.6 m) in 120 pigs under two treatments, in this case, rough vs. gentle handling. They evaluated physiological parameters like heart and respiratory rate and body temperature, in addition to surface temperatures at the anatomical sites chosen for study. Observations included increased heart rate, body temperature, and saliva cortisol levels in the animals that received rough handling, with temperature increases in the ocular region and the ears of  $7 \pm 0.29^\circ\text{C}$  and  $5.86 \pm 0.46^\circ\text{C}$ , respectively. It is important to mention that those authors found moderate correlations for the regions of the eye and ear as saliva cortisol levels increased in the animals handled roughly ( $r = 0.49$  and  $r = 0.50$ , respectively,  $P < 0.001$ ). This study provides sufficient evidence to validate the lacrimal caruncle and ear region as areas where stress responses in pigs can be evaluated. Some authors, however, mention that readings from these areas

can be affected by other factors, such as the distance at which they are taken, the specific region evaluated, humidity, and skin thickness, so these elements must be considered when choosing and evaluating anatomical sites (24, 132).

The auricular region, then, can be considered a thermal window due to its vascularization, which makes it especially sensitive to changes in environmental temperatures. It is a good site for detecting hypothermic states in neonates. Its innervation plays a vital role in changes in the diameter of the capillaries that can respond to catecholamine levels under stressful conditions, but it has the additional advantage of having been validated, like the ocular window (138).

## Thermal window: Nasal

The nasal thermal window, located in the region of the same name, receives blood flow from the nasal artery, a ramification of the maxillary artery (*artery maxillaris*) (139) (Figure 7). This window has been used to evaluate the temperature of the nostrils because they can lose heat by evaporation through respiration (140).

Research on humans has analyzed the effects of stressful psychosocial and physical conditions on vasomotor control of the nose (141). The blood supply to the nose region is sensitive to activation of the SNSi, and, therefore, vasoconstriction of surface blood capillaries, translates into the reduced blood flow and less heat irradiating into the environment (136). However, interpretations of surface temperature readings from the nostrils must consider that respiration produces vapor. While the presence of this inspired vapor is undoubtedly a drawback regarding the usefulness of this thermal window, it can also be considered an advantage because it permits quantifying other parameters, such as respiratory rate. Ricci et al.'s (19) 7-day study of 26 pregnant sows collected data on the parameters of respiratory rate and rectal temperature together with IRT readings from the nasal window (from a distance of 1 and 1.5 m) in the morning and at night. The animals showed a moderate correlation between nasal temperature and respiratory rate ( $r = 0.350$ ), meaning that as the temperature of the nasal region increases, the respiratory rate increases due to tachypnea as a thermoregulatory compensation mechanism, although there is no direct relationship between these two variables.

Similarly, Jorquera-Chavez et al. (142) conducted a pilot study with pigs infected with *Actinobacillus pleuropneumoniae*. They determined that the respiratory rate in the sick animals, evaluated by IRT of the nasal area, increased by an average of 10 breaths/min (rpm) compared to the healthy animals. This coincides with reports on bovines, where the use of this window has been explored as a non-invasive way to record respiratory function (24). However, this application requires additional study because free-moving pigs infected in a normal on-farm environment have not been tested (142). Furthermore, as was

reported in a study of 24 male growing pigs exposed to heat stress (at 34°C), to date only rectal temperature has been associated efficiently to determine respiratory rate, with R2 values of 0.997 and 0.993 for acute and chronic heat stress, respectively (143). These findings reaffirm that said thermal window could be associated with the causal factors of heat stress.

Taking into account that rectal temperature is considered the gold standard for quantifying body temperature, Malmkvist et al. (144) analyzed the influence of the thermal environment (15°, 20°, 25°C) on sows during farrowing and lactation based on thermal responses in the head and body regions, as well as in rectal temperature. In their analysis of the data, the authors found that the temperature of the snout increased gradually in relation to the temperature of the holding room, as they recorded average values of 33°, 35°, and 36°C, respectively. They further reported that the rectal temperatures behaved similarly, showing influence by room temperature (38.0°, 38.7°, and 39.0°C, respectively). However, the nasal temperature of the sows maintained a weak correlation coefficient of 0.10 with rectal temperature, a value lower than those obtained for the ocular window (0.24) and udder (0.36). It is worth mentioning that the temperature increase of the snout was accompanied by tachypnoea, as rpm increased from 29 to 58 in rooms maintained at 15° and 25°C, respectively. Due to these findings, it is possible to affirm that the nasal window could be used to associate it with respiratory rate, not with rectal temperature, but it is subject to environmental variations and the effect of social stress factors (145).

These data provide a better understanding of the influence of the environment on the thermoregulation mechanisms of swine in different production stages. In the case of 16 gilts (primiparous sows), pregnant sows, lactating sows, and suckling piglets, IRT was evaluated in seven body regions, including the nose. In general, in all groups, this window showed the lowest temperature values, with an average of 33°C, in contrast to the temperatures registered in the ear root or the tail base (36.2° and 37.1°C, respectively). Their findings led the authors to suggest that IRT could serve to frequently monitor environmental temperatures or early disease states (146) since temperatures reflect the health status of animals (147).

## Other thermal windows of the body

Pigs are endothermic animals that retain or dissipate heat depending on environmental and physiological conditions. They use metabolism for thermogenesis or vasomotor changes to perform heat exchange (148). Assessment of body temperature in pigs helps determine their health status non-invasively (127, 138). The ocular, nasal, and auricular zones are considered the main thermal windows, but they are not free of difficulties. In the case of the ocular window, the size of the orbital surface can affect temperature readings, and periocular

structures like the eyelashes can occlude images. Likewise, animals tend to close their eyes when in agony, precluding the use of IRT. In the auricular zone, meanwhile, the conformation and position of the ear may restrict IRT's usefulness. Differences between breeds with erect or droopy ears can also cause temperature variations due to blood vessels' projection and hair's presence (149, 150).

The alternative proposed is to evaluate the temperature in broader regions like the back, flanks, thorax, or abdomen. A study of 99 Landrace x Yorkshire pigs by Feng et al. (119) found that shoulder, center-back, and rump temperatures (taken at a distance of 0.5 and 1 m) had an overall moderate to strong and positive correlation of 0.5–0.7 with rectal temperatures. Therefore, IRT can potentially evaluate the core temperature of animals. Similarly, a report on 91 newborn piglets captured back and flank temperatures at 11 time points between birth and 48 h postpartum. Due to the strong correlation ( $r = 0.82$ ) with rectal temperatures found, the authors determined maximum surface temperature and rectal values, discovering that they were affected by time. At 25 and 30 min, respectively, those values decreased by 0.25 and 0.42°C. Moreover, they found that a maximum surface temperature of 30°C was indicative of rectal values <32°C (65). What these authors observed would confirm that other regions may be related to thermoregulation processes. For example, local temperature in the nostril is affected by other factors, while regions such as the shoulder or back are known as a pathway to losing heat, then body temperature influences its values (104).

The thermal response of the back can also be used to indicate the mental state of animals. In 46 pigs involved in agonistic interaction, back and ear temperatures decreased significantly, by 0.9°C, during a conspecific confrontation event, and this variation had a moderate negative correlation with higher lactate ( $r = -0.49$ ) and glucose ( $r = -0.32$ ) levels, where temperature decreases were accompanied by increases in both endocrine markers (149). The branches of the vertebral arteries that supply the transverse spinal muscles are the biological foundation of these changes, as the branches of the spinal nerves are susceptible to sympathetic stimulation during stress responses, in which they also participate (112).

Other regions that have been suggested as thermal windows? are the gluteal and vulvar areas. Scolari et al. (151) mention that these areas (monitored from a distance of 0.61 m) tend to change the temperature during estrus. Specifically, the vulvar region increased its temperature by 1.5°C 12 h before ovulation due to the hemodynamic changes that occur during estrus. This was confirmed by Simões et al. (152), who found that vulvar-gluteal temperatures (monitored from a distance of 1 m) increased during proestrus and 25 h before estrus but decreased by  $1.1 \pm 0.9^\circ\text{C}$  6 h after estrus. These changes suggest the possibility of adopting this window to predict estrus and increase reproductive success. In addition, a high success rate of IRT in detecting estrus and ovulation in 80 sows was achieved

by assessing these conditions in conjunction with ultrasonic sensors (153).

Regardless of the region used as a thermal window, it is important to consider that environmental, technical, and individual factors can cause variations in the results (154). In the case of environmental factors, Basak et al. (155) determined the relation of temperature and humidity inside pig barns to surface temperatures measured on the right and left flanks, forehead, and back. They found an association between the temperatures of the barn and the body. In addition to these two variables, they concluded that other elements –wind speed, air pressure, body weight, and food consumption– require models to determine their influence on IRT. Those findings are similar to the observations by Barreto et al. (156), who found a positive correlation between solar radiation, environmental humidity, and wind with body surface temperatures.

Regarding technical factors, the distance between the camera and the animal, the angle of view, and the resolution of the thermographic image are the main ones (154). Leizi et al. (157), after evaluating the influence of camera angle on body surface temperature readings, determined differences  $>2^\circ\text{C}$  between angles of  $74^\circ$  vs.  $76^\circ$ . A technical report on six pigs published by Banhazi et al. (158) stated that perpendicular images taken at angles  $\leq 60^\circ$  minimized the error percentage of readings and made it possible to detect a thermal response called a cooling effect 10–15 min after wetting, even though the percentage of the wetting effect was registered only during the first minute. Strategies for minimizing the effect of the angle of view include using IRT with kinetic sensors, as this reduced temperature differences in a febrile swine model from  $2^\circ\text{C}$  without the sensor to  $0.03\text{--}1.2^\circ\text{C}$  with it (157).

On the other hand, the distance between the camera and the animal also shows ample variation from one study to another that can affect thermographic readings. Playá-Montmany and Tattersall (159) found a negative and moderate correlation between ocular temperatures ( $r = -0.58$ ) and distance. They observed less temperature variation at a distance of 1.5 m than at 10–15 m. This can be attributed to the dynamics of radiation which tends to disperse toward other objects in the environment, causing a reduction in the values registered by IRT, which is why some authors recommend that thermograms should not be taken at a distance  $>1$  meter (129). However, others recommend distances of 60 (130) or just 20 cm and maintaining a position perpendicular to the body (155). Given this variation, studies must be conducted to identify how distance affects temperature readings, and establish a standard.

Finally, within the individual factors, the presence of hair has been shown to cause temperature variations as large as  $0.2^\circ\text{C}$  (23), while a dark-colored layer can increase heat retention by impeding dissipation (11, 24). Pigs, however, have only fine hair that, on the one hand, impedes heat retention (160) but, on the other, leaves them susceptible to sudden temperature decreases, above all in the neonatal stage.

## Future directions

Research into the use of IRT with swine seeks to confirm its applicability in new areas of study due to its information on physiological states and animal health. One possibility could be to implement IRT continuously to evaluate the temperature in real time on production units in both individual animals and entire herds and so determine the presence of lesions or infectious diseases (161, 162). Although these future applications would be the areas to be developed, it is necessary to establish the reliability of IRT at different body regions. For example, the ocular window has been shown to suffer less surface temperature variation than areas such as the back, where solar radiation, humidity, or dirt can alter the reading (107).

In this regard, IRT could aid in the early identification of sick animals that present clinical signs of fever (163). The presence of fever, and the vasomotor responses at the peripheral level that it generates, constitute an area of opportunity for applying IRT in farming systems since it can identify pathological processes based on changes in surface temperature (128). For example, Islam et al. (129) used IRT with piglets' head, body, and tail regions to detect signs of gastrointestinal infection caused by *Salmonella typhimurium* and *Escherichia coli*. They found increases in body surface temperatures at 24 h with a peak at 72 h (41° and 37.4°C, respectively;  $p < 0.005$ ). In relation to the respiratory disease caused by *Actinobacillus pleuropneumoniae* in pigs, thermography detected changes in ocular and auricular temperatures (an increase of up to 1.8° and 8.1°C, respectively, in sick pigs) 4–6 h before the appearance of the first clinical signs (142), while at the thoracic level, IRT achieved 100% specificity and sensitivity (CI 95%: 69–100%) as a method for orienting lung biopsies (110). Determining such temperature increases could also be applied in pigs sent for slaughter to identify those with systemic infections and then program quarantine measures for them (164). However, it is important to emphasize that its use is recommended in conjunction with other innovative methods, such as accelerometers, to evaluate the activity of animals (165). Other diagnostic tools are computerized tomography (166), radio-frequency identification, and machine-learning technologies that can estimate animals' productive parameters (161).

Likewise, IRT monitoring may help reduce economic losses for producers while simultaneously procuring animal welfare by allowing early detection of diseased individuals (162) or recognizing injured animals during transport and the association that this might have on meat quality due to acute stress or dehydration (8, 162). Applying IRT prior to slaughter, for example, makes it possible to estimate levels of well-being (118). In that period, pigs are susceptible to increases in body temperature due to transport and environmental temperatures inside the vehicle (167). IRT could be applied during transport to identify states of fatigue or hyperemia caused by travel, as

Warriss et al. (168) demonstrated in their study of 28 pigs in which increases in ear temperatures (from 27.3 to 35.0°C) had a strong-to-moderate correlation with higher blood temperatures ( $r = 0.71$ ,  $p < 0.001$ ) and creatine kinase ( $r = 0.55$ ) and serum cortisol concentrations ( $r = 0.50$ ). Because increases in body temperature and the activation of metabolic pathways can impact meat quality, IRT has been suggested as a way to determine animal welfare and predict pork quality (118), given that pre-slaughter stress involves a physiological response that alters thermoregulation and affects meat quality, as has been shown in cattle (169). In the case of pigs, an IRT study of the dorsal region from neck to rump of 500 pre-stunning animals successfully detected animals with defective carcasses. In pigs with skin surface temperatures above 32.2°C, 71% of 49 animals showed such defects as pale, soft, exudative meat (PSE, 6%) and dark, firm, dry meat (DFD, 22%) (130).

IRT may also make it possible to evaluate other key parameters, such as respiratory rates, based on changes in local thermal patterns in the nasal region. Indeed, this has been suggested to assess states of health continuously and non-invasively, and has been tested in cattle (24). The reproductive efficiency and fertility of breeding boars are affected by heat stress and its effects on spermatogenesis (170), a process that requires scrotal temperatures 4–6°C below the boar's body temperature to maintain semen quality and prevent infertility (171). Stravogianni et al. (172) evaluated this in five boars, reporting a strong, significant negative correlation ( $r^2 > 0.5$ ) between increases in scrotal temperature measured by IRT and a rapid, progressive reduction of sperm motility and velocity. These applications suggest that IRT could help detect thermal changes that alter fertility in boars. However, additional information is required on the sensitivity of this tool in such assessments.

The mammary window of sows is another region that could yield more sensitive information on states of health, as Rosengart et al. (173) argued in their study of 513 postpartum hybrid Viktoria sows. After birth, the piglets produced were divided into three groups: healthy, sick, and suspicious, by measuring the surface temperature of the sows' mammary glands. The authors found that the temperature of this window increased by 1.1°C in sick animals compared to healthy ones ( $P < 0.05$ ). This could indicate a discrepancy in the sensitivity of other windows compared to the mammary region, which might mean that this anatomical region is ideal for determining pathological states due to its particular characteristics (108). This same window might also be useful for complementing diagnoses of conditions like postpartum dysgalactia, which causes a temperature increase in the mammary gland. Studies have proven that IRT can detect this pathology with a sensitivity of 94.4% and a specificity of 89.5%, so it may be able to corroborate that the anatomomorphological characteristics of this window make it effective for evaluating states of health (174).

Finally, the vulvar region of sows has been studied due to the possibility that certain circulatory changes in those animals may indicate of their physiological condition; that is, IRT could help identify the estrus cycle and support assisted reproduction (175). Some authors suggest that a temperature increase of 2°C in this region can be indicative of estrus, which can be associated with the number of navicular cells (176). However, no reports have yet determined the sensitivity and specificity that would lead to validating this window in sows.

IRT has promising applications for the continuous monitoring of animal health. However, it is necessary to recognize that future research must consider some parameters that still need to be discovered, such as the cut-off points for identifying when an animal is outside its thermo neutrality zone, a field that has only been studied in large ruminants (24). Likewise, improving a sensitive automatic technique that can reduce the influence of intrinsic and extrinsic factors that alter heat radiation must be considered to reduce the underestimation of thermal changes at critical points during the pig production process.

## Conclusions

Scientific evidence for the anatomical-physiological differences between piglets and adult hogs is clear. Because neonate piglets have immature thermoregulation systems and limited energy resources to compensate for ambient temperatures, their most important challenge is to prevent hypothermia during the drastic change from intrauterine to extrauterine conditions. In contrast, the adipose tissue deposits in adults can aid heat retention, though their scarce sweat glands impede dissipation. Hence, their greatest challenge is to avoid thermal stress. In light of this evidence, continuously evaluating these animals' thermal state is imperative.

Up to now, thermal windows like the armpit, back, shoulder, and snout are considered to have the greatest similarity to average rectal temperatures values, though the sites with reports of the best reliability and accessibility are the base of the ear, shoulder, and udder. The ocular and auricular thermal windows have emerged as viable options for evaluating thermal states in

pigs and also for identifying stressful conditions since specific characteristics of this species make it possible to validate their effectiveness. The structure of the nasal window allows non-invasive evaluations of physiological parameters like respiratory rates, an obvious clinical application. On the other hand, the results obtained after evaluating the temperature of the dorsal, scrotal, mammary, and vulvar regions, suggest its efficacy in detecting defective carcasses and changes that alter fertility in boars, postpartum dysgalactia, and estrus, respectively. Scientific evidence for pigs, then, has demonstrated that the thermal windows analyzed herein aid in obtaining information on this species's general state of health.

Most studies have sought to validate thermal windows to ensure greater objectivity when using IRT with this species. However, to obtain accurate evaluations of the surface temperature, it must be considered that factors such as environmental temperature, the thickness of the hair or fur of each individual, and perfusion in the zones considered thermal windows cause considerable variations in the results.

## Author contributions

All authors contributed to the conceptualization, writing, reading, and approval of the final manuscript.

## Conflict of interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

## Publisher's note

All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

## References

- Giannetto C, Arfuso F, Giudice E, Giansella M, Fazio F, Panzera M, et al. Infrared methodologies for the assessment of skin temperature daily rhythm in two domestic mammalian species. *J Therm Biol.* (2020) 92:102677. doi: 10.1016/j.jtherbio.2020.102677
- Rizzo M, Arfuso F, Giudice E, Abbate F, Longo F, Piccione G. Core and surface temperature modification during road transport and physical exercise in horse after acupuncture needle stimulation. *J Equine Vet Sci.* (2017) 55:84–9. doi: 10.1016/j.jevs.2017.03.224
- Giansella M, Arfuso F, Fiore E, Giambelluca S, Giudice E, Armato L, et al. Infrared thermography as a rapid and non-invasive diagnostic tool to detect inflammatory foot diseases in dairy cows. *Pol J Vet Sci.* (2018) 21:299–305.
- Rizzo M, Arfuso F, Alberghina D, Giudice E, Giansella M, Piccione G. Monitoring changes in body surface temperature associated with treadmill exercise in dogs by use of infrared methodology. *J Therm Biol.* (2017) 69:64–8. doi: 10.1016/j.jtherbio.2017.06.007

5. Arfuso F, Aciri G, Piccione G, Sansotta C, Fazio F, Giudice E, et al. Eye surface infrared thermography usefulness as a noninvasive method of measuring stress response in sheep during shearing: Correlations with serum cortisol and rectal temperature values. *Physiol Behav.* (2022) 250:113781. doi: 10.1016/j.physbeh.2022.113781
6. Seibert JT, Graves KL, Hale BJ, Keating AF, Baumgard LH, Ross JW. Characterizing the acute heat stress response in gilts: I. Thermoregulatory and production variables. *J Anim Sci.* (2018) 96:941–9. doi: 10.1093/jas/skx036
7. Villanueva-García D, Mota-Rojas D, Martínez-Burnes J, Olmos-Hernández A, Mora-Medina P, Salmerón C, et al. Hypothermia in newly born piglets: Mechanisms of thermoregulation and pathophysiology of death. *J Anim Behav Biometeorol.* (2021) 9:2101. doi: 10.31893/jabb.21001
8. Flores-Peinado S, Mota-Rojas D, Guerrero-Legarreta I, Mora-Medina P, Cruz-Monterrosa R, Gómez-Prado J, et al. Physiological responses of pigs to preslaughter handling: infrared and thermal imaging applications. *Int J Vet Sci Med.* (2020) 8:71–84. doi: 10.1080/23144599.2020.1821574
9. Mayorga EJ, Renaudeau D, Ramirez BC, Ross JW, Baumgard LH. Heat stress adaptations in pigs. *Anim Front.* (2019) 9:54–61. doi: 10.1093/af/vfy035
10. Gonzalez-Rivas PA, Chauhan SS, Ha M, Fegan N, Dunshea FR, Warner RD. Effects of heat stress on animal physiology, metabolism, and meat quality: a review. *Meat Sci.* (2020) 162:108025. doi: 10.1016/j.meatsci.2019.108025
11. Mota-Rojas D, Titto CG, de Mira Geraldo A, Martínez-Burnes J, Gómez J, Hernández-Ávalos I, et al. Efficacy and function of feathers, hair, and glabrous skin in the thermoregulation strategies of domestic animals. *Animals.* (2021) 11:3472. doi: 10.3390/ani11123472
12. Madzimure J, Chimonyo M, Zander K, Dzama K. Diurnal heat-related physiological and behavioural responses in South African indigenous gilts. *J Arid Environ.* (2012) 87:29–34. doi: 10.1016/j.jaridenv.2012.05.010
13. Montagna W, Yun JS. The skin of the domestic pig. *J Invest Dermatol.* (1964) 43:11–21. doi: 10.1038/jid.1964.110
14. Rittié L, Sachs DL, Orringer JS, Voorhees JJ, Fisher GJ. Eccrine sweat glands are major contributors to reepithelialization of human wounds. *Am J Pathol.* (2013) 182:163–71. doi: 10.1016/j.ajpath.2012.09.019
15. Lezama-García K, Mota-Rojas D, Martínez-Burnes J, Villanueva-García D, Domínguez-Oliva A, Gómez-Prado J, et al. Strategies for hypothermia compensation in altricial and precocial newborn mammals and their monitoring by infrared thermography. *Vet Sci.* (2022) 9:246. doi: 10.3390/vetsci9050246
16. Racewicz P, Ludwiczak A, Skrzypczak E, Składanowska-Baryza J, Biesiada H, Nowak T, et al. Welfare health and productivity in commercial pig herds. *Animals.* (2021) 11:1176. doi: 10.3390/ani11041176
17. Travain T, Valsecchi P. Infrared thermography in the study of animals' emotional responses: a critical review. *Animals.* (2021) 11:2510. doi: 10.3390/ani11092510
18. Casas-Alvarado A, Mota-Rojas D, Hernández-Ávalos I, Mora-Medina P, Olmos-Hernández A, Verdusco-Mendoza A, et al. Advances in infrared thermography: Surgical aspects, vascular changes, and pain monitoring in veterinary medicine. *J Therm Biol.* (2020) 92:102664. doi: 10.1016/j.jtherbio.2020.102664
19. Ricci G, Dela, da Silva-Miranda KO, Titto CG. Infrared thermography as a non-invasive method for the evaluation of heat stress in pigs kept in pens free of cages in the maternity. *Comput Electron Agric.* (2019) 157:403–9. doi: 10.1016/j.compag.2019.01.017
20. Giannetto C, Di Pietro S, Falcone A, Pennisi M, Giudice E, Piccione G, et al. Thermographic ocular temperature correlated with rectal temperature in cats. *J Therm Biol.* (2021) 102:103104. doi: 10.1016/j.jtherbio.2021.103104
21. Aragona F, Di Pietro S, Arfuso F, Fazio F, Piccione G, Giudice E, et al. Correlation between ocular and rectal temperature with intra ocular pressure in horse during exercise. *Animals.* (2022) 12:1850. doi: 10.3390/ani12141850
22. Reyes-Sotelo B, Mota-Rojas D, Martínez-Burnes J, Olmos-Hernández A, Hernández-Ávalos I, José N, et al. Thermal homeostasis in the newborn puppy: behavioral and physiological responses. *J Anim Behav Biometeorol.* (2021) 9:1–25. doi: 10.31893/jabb.21012
23. Casas-Alvarado A, Martínez-Burnes J, Mora-Medina P, Hernández-Ávalos I, Domínguez-Oliva A, Lezama-García K, et al. Thermal and circulatory changes in diverse body regions in dogs and cats evaluated by infrared thermography. *Animals.* (2022) 12:789. doi: 10.3390/ani12060789
24. Mota-Rojas D, Pereira AM, Wang D, Martínez-Burnes J, Ghezzi M, Hernández-Ávalos I, et al. Clinical applications and factors involved in validating thermal windows used in infrared thermography in cattle and river buffalo to assess health and productivity. *Animals.* (2021) 11:2247. doi: 10.3390/ani11082247
25. Clarkson ED, Gordon RK. Rapid decontamination of chemical warfare agents from the skin. In: Gupta RC, editor. *Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents.* San Diego: Academic Press (2015). p. 1127–39.
26. Ignacio G, El-Amin I, Mendenhall V. Animal models for wound healing. In: Albanna MZ, Holmes IVJH, editors. *Skin Tissue Engineering and Regenerative Medicine.* San Diego: Academic Press (2016). p. 387–400.
27. Mota-Rojas D, Titto CG, Orihuela A, Martínez-Burnes J, Gómez-Prado J, Torres-Bernal F, et al. Physiological and behavioral mechanisms of thermoregulation in mammals. *Animals.* (2021) 11:1733. doi: 10.3390/ani11061733
28. Moreira VE, Veroneze R, Teixeira ADR, Campos LD, Lino LFL, Santos GA, et al. Effects of ambient temperature on the performance and thermoregulatory responses of commercial and crossbred (Brazilian Piau purebred sires × commercial dams) growing-finishing pigs. *Animals.* (2021) 11:3303. doi: 10.3390/ani11113303
29. Kozak LP, Young ME. Heat from calcium cycling melts fat. *Nat Med.* (2012) 18:1458–9. doi: 10.1038/nm.2956
30. Zhao J, Tao C, Chen C, Wang Y, Liu T. Formation of thermogenic adipocytes: what we have learned from pigs. *Fundam Res.* (2021) 1:495–502. doi: 10.1016/j.fmre.2021.05.004
31. Conrad L, Aubé L, Heuchan E, Conte S, Bergeron R, Devillers N. Effects of farrowing hut design on maternal and thermoregulatory behaviour in outdoor housed sows and piglets. *Appl Anim Behav Sci.* (2022) 251:105616. doi: 10.1016/j.applanim.2022.105616
32. Hayne S, Tennessen T, Anderson D. The responses of growing pigs exposed to cold with varying amounts of straw bedding. *Can J Anim Sci.* (2000) 80:539–46. doi: 10.4141/A00-003
33. Swiergiel A. Decrease in body temperature and locomotor activity as an adaptational response in piglets exposed to cold on restricted feeding. *Physiol Behav.* (1987) 40:117–25. doi: 10.1016/0031-9384(87)90193-4
34. Whittemore E, Kyriazakis I, Emmans G, Tolcamp B. Tests of two theories of food intake using growing pigs 1. The effect of ambient temperature on the intake of foods of differing bulk content. *Anim Sci.* (2001) 72:351–60. doi: 10.1017/S1357729800055855
35. Huynh T, Aarnink A, Versteegen M. Reactions of pigs to a hot environment. *Livestock Environment VII; 2005 May 18–20; Beijing, China.* Beijing: American Society of Agricultural and Biological Engineers (2005). p. 544.
36. Fujita AKL, da Rocha RW, Escobar A, de Nardi AB, Bagnato VS, Campos PF. Correlation between porcine and human skin models by optical methods. In: Blumenberg M, editor. *Human Skin Cancers - Pathways, Mechanisms, Targets and Treatments.* London: InTech (2018) p. 161–74.
37. Renaudeau D, Leclercq-Smekens M, Herin M. Differences in skin characteristics in European (Large White) and Caribbean (Creole) growing pigs with reference to thermoregulation. *Anim Res.* (2006) 55:209–17. doi: 10.1051/animres:2006012
38. Branski LK, Mittermayr R, Herndon DN, Norbury WB, Masters OE, Hofmann M, et al. A porcine model of full-thickness burn, excision and skin autografting. *Burns.* (2008) 34:1119–27. doi: 10.1016/j.burns.2008.03.013
39. Gauthier BE, Penard L, Bordier NF, Briffaux J-PJ, Ruty BM. Specificities of the skin morphology in juvenile minipigs. *Toxicol Pathol.* (2018) 46:821–34. doi: 10.1177/0192623318804520
40. Mowafy M, Cassens R. Microscopic structure of pig skin. *J Anim Sci.* (1975) 41:1281–90. doi: 10.2527/jas1975.4151281x
41. Ferry LL, Argentero G, Lochner DH. The comparative histology of porcine and guinea pig skin with respect to iontophoretic drug delivery. *Pharm Acta Helv.* (1995) 70:43–56. doi: 10.1016/0031-6865(94)00050-6
42. Hausman GJ. The origin and purpose of layers of subcutaneous adipose tissue in pigs and man. *Horm Mol Biol Clin Invest.* (2018) 33:20180001. doi: 10.1515/hmbci-2018-0001
43. Herpin P, Damon M, Le Dividich J. Development of thermoregulation and neonatal survival in pigs. *Livest Prod Sci.* (2002) 78:25–45. doi: 10.1016/S0301-6226(02)00183-5
44. Hood RL, Allen CE. Cellularity of porcine adipose tissue: effects of growth and adiposity. *J Lipid Res.* (1977) 18:275–84. doi: 10.1016/S0022-2275(20)41676-1
45. Hou L, Xie M, Cao L, Shi J, Xu G, Hu C, et al. Browning of pig white preadipocytes by co-overexpressing pig PGC-1 $\alpha$  and mice UCP1. *Cell Physiol Biochem.* (2018) 48:556–68. doi: 10.1159/000491885
46. Mersmann H, Goodman J, Brown L. Development of swine adipose tissue: morphology and chemical composition. *J Lipid Res.* (1975) 16:269–79. doi: 10.1016/S0022-2275(20)36714-6

47. He T, He L, Gao E, Hu J, Zang J, Wang C, et al. Fat deposition deficiency is critical for the high mortality of pre-weaning newborn piglets. *J Anim Sci Biotechnol.* (2018) 9:66. doi: 10.1186/s40104-018-0280-y
48. Frondas-Chauty A, Louveau I, Le Huërou-Luron I, Rozé J-C, Darmaun D. Air-displacement plethysmography for determining body composition in neonates: validation using live piglets. *Pediatr Res.* (2012) 72:26–31. doi: 10.1038/pr.2012.35
49. Mitchell AD, Conway JM, Potts WJ. Body composition analysis of pigs by dual-energy x-ray absorptiometry. *J Anim Sci.* (1996) 74:2663. doi: 10.2527/1996.74112663x
50. Soerensen DD, Clausen S, Mercer JB, Pedersen LJ. Determining the emissivity of pig skin for accurate infrared thermography. *Comput Electron Agric.* (2014) 109:52–8. doi: 10.1016/j.compag.2014.09.003
51. Soerensen DD, Pedersen LJ. Infrared skin temperature measurements for monitoring health in pigs: a review. *Acta Vet Scand.* (2015) 57:5. doi: 10.1186/s13028-015-0094-2
52. Talbot J, Maves L. Skeletal muscle fiber type: using insights from muscle developmental biology to dissect targets for susceptibility and resistance to muscle disease. *WIREs Dev Biol.* (2016) 5:518–34. doi: 10.1002/wdev.230
53. Vanden Hole C, Cleuren S, Van Ginneken C, Prims S, Ayuso M, Van Cruchten S, et al. How does intrauterine crowding affect locomotor performance in newborn pigs? A study of force generating capacity and muscle composition of the hind limb. *PLoS ONE.* (2018) 13:e0209233. doi: 10.1371/journal.pone.0209233
54. da Silva A, Dalto D, Lozano A, de Oliveira E, Gavioli D, de Oliveira J, et al. Differences in muscle characteristics of piglets related to the sow parity. *Can J Anim Sci.* (2013) 93:471–5. doi: 10.4141/cjas2013-049
55. Yu J, Chen S, Zeng Z, Xing S, Chen D, Yu B, et al. Effects of cold exposure on performance and skeletal muscle fiber in weaned piglets. *Animals.* (2021) 11:2148. doi: 10.3390/ani11072148
56. Lefaucheur L, Ecolan P, Plantard L, Gueguen N. New insights into muscle fiber types in the pig. *J Histochem Cytochem.* (2002) 50:719–30. doi: 10.1177/002215540205000513
57. Lefaucheur L, Edom F, Ecolan P, Butler-Browne GS. Pattern of muscle fiber type formation in the pig. *Dev Dyn.* (1995) 203:27–41. doi: 10.1002/aja.1002030104
58. Lévy F, Nowak R. The role of olfaction in maternal care and offspring survival. In: Nielsen BL, editor. *Olfaction in Animal Behaviour and Welfare.* Wallingford: CABI (2017). p. 102–22.
59. De Vos M, Huygelen V, Hesta M, Willemsen SA, Franssen E, Casteleyn C, et al. Birthweight has no influence on chemical body composition and muscle energy stores in suckling piglets. *Anim Prod Sci.* (2016) 56:844. doi: 10.1071/AN13467
60. Vanden Hole C, Ayuso M, Aerts P, Prims S, Van Cruchten S, Van Ginneken C. Glucose and glycogen levels in piglets that differ in birth weight and vitality. *Heliyon.* (2019) 5:e02510. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02510
61. Staarvik T, Framstad T, Heggelund M, Brynjulvsrud Fremgaard S, Kielland C. Blood-glucose levels in newborn piglets and the associations between blood-glucose levels, intrauterine growth restriction and pre-weaning mortality. *Porc Heal Manag.* (2019) 5:22. doi: 10.1186/s40813-019-0129-6
62. Berg F, Gustafson U, Andersson L. The uncoupling protein 1 gene (UCP1) is disrupted in the pig lineage: a genetic explanation for poor thermoregulation in piglets. *PLoS Genet.* (2006) 2:e129. doi: 10.1371/journal.pgen.0020129
63. Vasdal G, Østensen I, Melišová M, Bozděchová B, Illmann G, Andersen IL. Management routines at the time of farrowing—effects on teat success and postnatal piglet mortality from loose housed sows. *Livest Sci.* (2011) 2–3:225–31. doi: 10.1016/j.livsci.2010.09.012
64. Vande KD, Tolosa AF, Shull CM, Brown CB, Alencar SA, Ellis M. Effect of drying and/or warming piglets at birth on rectal temperature over the first 24 h after birth. *Transl Anim Sci.* (2020) 4:1–9. doi: 10.1093/tas/txaa183
65. Kammersgaard T, Malmkvist J, Pedersen L. Infrared thermography – a non-invasive tool to evaluate thermal status of neonatal pigs based on surface temperature. *Animal.* (2013) 7:2026–34. doi: 10.1017/S1751731113001778
66. Muns R, Nuntapaitoon M, Tummaruk P. Non-infectious causes of pre-weaning mortality in piglets. *Livest Sci.* (2016) 184:46–57. doi: 10.1016/j.livsci.2015.11.025
67. Conrad MS, Dilger RN, Nickolls A, Johnson RW. Magnetic resonance imaging of the neonatal piglet brain. *Pediatr Res.* (2012) 71:179–84. doi: 10.1038/pr.2011.21
68. Poore KR, Fowden AL. The effect of birth weight on hypothalamo-pituitary-adrenal axis function in juvenile and adult pigs. *J Physiol.* (2003) 547:107–16. doi: 10.1113/jphysiol.2002.024349
69. Farmer C, Edwards S. Review: Improving the performance of neonatal piglets. *animal.* (2022) 16:100350. doi: 10.1016/j.animal.2021.100350
70. Kielland C, Rootwelt V, Reksen O, Framstad T. The association between immunoglobulin G in sow colostrum and piglet plasma. *J Anim Sci.* (2015) 93:4453–62. doi: 10.2527/jas.2014-8713
71. Brandenburg AC, Wilson MR. Immunity to *Escherichia coli* in pigs: IgG immunoglobulin in passive immunity to *E. coli* enteritis. *Immunology.* (1973) 24:119–27.
72. Herpin P, Vincent A, Damon M. Effect of breed and body weight on thermoregulatory abilities of European (Pietrain×(Landrace×Large White)) and Chinese (Meishan) piglets at birth. *Livest Prod Sci.* (2004) 88:17–26. doi: 10.1016/j.livprodsci.2003.11.006
73. Svendsen J, Svendsen S, Bengtsson A. Reducing perinatal mortality in swine. In: Leman A, Straw B, Glock R, Penny E, editors. *Diseases of Swine.* Ames: Iowa State University Press (1986). p. 813–24.
74. Elliot J, Lodge G. Body composition and glycogen reserves in the neonatal pig during the first 96 hours postpartum. *Can J Anim Sci.* (2011) 57:141–50. doi: 10.4141/cjas77-017
75. Mota-Rojas D, Olmos-Hernández A, Verduzco-Mendoza A, Lecona-Butrón H, Martínez-Burnes J, Mora-Medina P, et al. Infrared thermal imaging associated with pain in laboratory animals. *Exp Anim.* (2021) 70:1–12. doi: 10.1538/expanim.20-0052
76. Tuchscherer M, Puppe B, Tuchscherer A, Tiemann U. Early identification of neonates at risk: traits of newborn piglets with respect to survival. *Theriogenology.* (2000) 54:371–88. doi: 10.1016/S0093-691X(00)00355-1
77. PigChamp. *Benchmarking Summaries.* (2019). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7672461/#CIT0009> (accessed October 1, 2022).
78. Kammersgaard T, Pedersen L, Jorgensen E. Hypothermia in neonatal piglets: Interactions and causes of individual differences. *J Anim Sci.* (2011) 89:2073–85. doi: 10.2527/jas.2010-3022
79. Gourdière JL, Rauw WM, Gilbert H, Pouillet N. The genetics of thermoregulation in pigs: A review. *Front Vet Sci.* (2021) 8:770480. doi: 10.3389/fvets.2021.770480
80. Martin W. Effects of heat stress on thermoregulation, reproduction and performance of different parity sows. Master's thesis. Columbia: University of Missouri (2012).
81. Nielsen SS, Alvarez J, Bicoût DJ, Calistri P, Depner K, Drewe JA, et al. Welfare of pigs at slaughter. *EFSA J.* (2020) 18:e06148. doi: 10.2903/j.efsa.2020.6148
82. Bonelli A, Schifferli C. Síndrome estrés porcino. *Arch Med Vet.* (2001) 33:125–35. doi: 10.4067/S0301-732X2001000200001
83. Kerr CA, Giles LR, Jones MR, Reverter A. Effects of grouping unfamiliar cohorts, high ambient temperature and stocking density on live performance of growing pigs. *J Anim Sci.* (2005) 83:908–15. doi: 10.2527/2005.834908x
84. Pardo Z, Seiquer I, Lachica M, Nieto R, Lara L, Fernández-Figueras I. Exposure of growing Iberian pigs to heat stress and effects of dietary betaine and zinc on heat tolerance. *J Therm Biol.* (2022) 106:103230. doi: 10.1016/j.jtherbio.2022.103230
85. Barea R, Nieto R, Lara L, García M, Vilchez M, Aguilera J. Effects of dietary protein content and feeding level on carcass characteristics and organ weights of Iberian pigs growing between 50 and 100 kg live weight. *Anim Sci.* (2006) 82:405–13. doi: 10.1079/ASC200645
86. Usala M, Macciotta NPP, Bergamaschi M, Maltecca C, Fix J, Schwab C, et al. Genetic parameters for tolerance to heat stress in crossbred swine carcass traits. *Front Genet.* (2021) 11:1821. doi: 10.3389/fgenet.2020.612815
87. Renaudeau D, Gourdière J, St-Pierre N. A meta-analysis of the effects of high ambient temperature on growth performance of growing-finishing pigs. *J Anim Sci.* (2011) 89:2220–30. doi: 10.2527/jas.2010-3329
88. Mota-Rojas D, Orihuela A, Martínez-Burnes J, Gómez J, Mora-Medina P, Alavez B, et al. Neurological modulation of facial expressions in pigs and implications for production. *J Anim Behav Biometeorol.* (2020) 8:232–43. doi: 10.31893/jabb.20031
89. Renaudeau D, Noblet J. Effects of exposure to high ambient temperature and dietary protein level on sow milk production and performance of piglets. *J Anim Sci.* (2001) 79:1540–8. doi: 10.2527/2001.7961540x
90. Seibert JT, Abuajamieh M, Sanz MV, Johnson JS, Kvidera SK, Horst EA, et al. Effects of heat stress and insulin sensitizers on pig adipose tissue. *J Anim Sci.* (2018) 96:510–20. doi: 10.1093/jas/skx067
91. Lassche G, Frenzel T, Mignot MH, Jonker MA, van der Hoeven JG, van Herpen CML, et al. Thermal distribution, physiological effects and toxicities of extracorporeally induced whole-body hyperthermia in a pig model. *Physiol Rep.* (2020) 8:e14366. doi: 10.14814/phy2.14366
92. Urban-Chmiel R, Pyz-Lukasik R, Dudzic A, Wernicki A. Oxidative parameters and expression of 70kDa heat shock proteins in pig heart tissue after transport and slaughter. *Pol J Vet Sci.* (2014) 17:433–9. doi: 10.2478/pjvs-2014-0062

93. Kpodo KR, Duttlinger AW, Radcliffe JS, Johnson JS. Time course determination of the effects of rapid and gradual cooling after acute hyperthermia on body temperature and intestinal integrity in pigs. *J Therm Biol.* (2020) 87:102481. doi: 10.1016/j.jtherbio.2019.102481
94. Renaudeau D, Collin A, Yahav S, De Basilio V, Gourdiere J, Collier R. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal.* (2012) 6:707–28. doi: 10.1017/S1751731111002448
95. Bin X, Wang B, Tang Z. Malignant hyperthermia: a killer if ignored. *J PeriAnesthesia Nurs.* (2022) 37:1–10. doi: 10.1016/j.jopan.2021.08.018
96. Chen M-Y, Lin J-H, Tai D-Y, Chang W-F, Lin C-C, Hseu T-H, et al. Alteration of arterial blood pressure and myocardial injury induced by whole body hyperthermia in pigs. *J Mol Cell Cardiol.* (2006) 40:1009. doi: 10.1016/j.yjmcc.2006.03.260
97. Baumgard LH, Rhoads RP. Effects of heat stress on postabsorptive metabolism and energetics. *Annu Rev Anim Biosci.* (2013) 1:311–37. doi: 10.1146/annurev-animal-031412-103644
98. Acosta DB, Español LÁ, Figueroa CE, Marini SJ, Mac Allister ME, Carpinetti BN, et al. Wild pigs (*Sus scrofa*) population as reservoirs for deleterious mutations in the RYR1 gene associated with Porcine Stress Syndrome. *Vet Anim Sci.* (2021) 11:100160. doi: 10.1016/j.vas.2020.100160
99. Ríos E. Calcium-induced release of calcium in muscle: 50 years of work and the emerging consensus. *J Gen Physiol.* (2018) 150:521–37. doi: 10.1085/jgp.201711959
100. Hao Y, Cui Y, Gu X. Genome-wide DNA methylation profiles changes associated with constant heat stress in pigs as measured by bisulfite sequencing. *Sci Rep.* (2016) 6:27507. doi: 10.1038/srep27507
101. Band G de O, Guimarães SEF, Lopes PS, Schierholt AS, Silva KM, Pires AV, et al. Relationship between the Porcine Stress Syndrome gene and pork quality traits of F2 pigs resulting from divergent crosses. *Genet Mol Biol.* (2005) 28:88–91. doi: 10.1590/S1415-47572005000100015
102. Cobanovic N, Stajkovic S, Grkovic N, Suvajdzic B, Vasilev D, Karabasil N. Effects of RYR1 gene mutation on the health, welfare, carcass and meat quality in slaughter pigs. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci.* (2019) 333:012051. doi: 10.1088/1755-1315/333/1/012051
103. Mota-Rojas D, Velarde A, Maris-Huertas S, Cajiao MN, editors. *Animal Welfare, A Global Vision in Ibero-America*. 3rd ed. Elsevier: Barcelona (2016). p. 1–516.
104. Mota-Rojas D, Wang D, Titto CG, Gómez-Prado J, Carvajal-de la Fuente V, Ghezzi M, et al. Pathophysiology of fever and application of infrared thermography (IRT) in the detection of sick domestic animals: recent advances. *Animals.* (2021) 11:2316. doi: 10.3390/ani11082316
105. Mota-Rojas D, Habeeb A, Ghezzi MD, Kanth P, Napolitano F, Lendze PA, et al. Water buffalo thermoregulation: neurobiological mechanisms, microcirculatory changes and practical applications of infrared thermography. In: Napolitano F, Mota-Rojas D, Guerrero-Legarreta I, Orihuela A, editors. *El búfalo de agua en Latinoamérica, hallazgos recientes*. Ciudad de México: BM Editores (2020). p. 923–58.
106. Verduzco-Mendoza A, Bueno-Nava A, Wang D, Martínez-Burnes J, Olmos-Hernández A, Casas A, et al. Experimental applications and factors involved in validating thermal windows using infrared thermography to assess the health and thermostability of laboratory animals. *Animals.* (2021) 11:3448. doi: 10.3390/ani11123448
107. Barbieri S, Talamonti Z, Nannoni E, Heinzl EUL, Minero M, Canali E. Use of thermography in pigs: relationship between surface and core temperature. *Vet Ital.* (2021) 57:79–82. doi: 10.12834/VETIT.1077.5873.2
108. Schmidt M, Lahrmann KH, Ammon C, Berg W, Schön P, Hoffmann G. Assessment of body temperature in sows by two infrared thermography methods at various body surface locations. *J Swine Heal Prod.* (2013) 21:203–9.
109. Cook N, Chabot B, Lui T, Bench C, Schaefer A. Infrared thermography detects febrile and behavioural responses to vaccination of weaned piglets. *Animal.* (2015) 9:339–46. doi: 10.1017/S1751731114002481
110. Menzel A, Beyerbach M, Siewert C, Gundlach M, Hoeltig D, Graage R, et al. *Actinobacillus pleuropneumoniae* challenge in swine: diagnostic of lung alterations by infrared thermography. *BMC Vet Res.* (2014) 10:199. doi: 10.1186/s12917-014-0199-2
111. Kroustallas FG, Papadopoulos GA, Chalvatzi S, Skampardonis V, Leontides L, Fortomaris P. Infrared thermography evaluation of feet temperature and its association with claw lengths and anisodactylia in purebred sows of three greek herds. *Vet Sci.* (2021) 8:309. doi: 10.3390/vetsci8120309
112. International Committee Veterinary Gross Anatomical Nomenclature. *Nómina Anatómica Veterinaria*. Hanover: Editorial Committee Hanover; Ghent, Columbia, MO: Rio de Janeiro (2017).
113. Henker R, Scholz M, Gaffling S, Asano N, Hampel U, Garreis F, et al. Morphological features of the porcine lacrimal gland and its compatibility for human lacrimal gland xenografting. *PLoS ONE.* (2013) 8:e74046. doi: 10.1371/journal.pone.0074046
114. Nääs I, Garcia R, Caldara F. Infrared thermal image for assessing animal health and welfare. *J Anim Behav Biometeorol.* (2014) 2:66–72. doi: 10.14269/2318-1265/jabb.v2n3p66-72
115. Zhang Z, Zhang H, Liu T. Study on body temperature detection of pig based on infrared technology: a review. *Artif Intell Agric.* (2019) 1:14–26. doi: 10.1016/j.aiaa.2019.02.002
116. Pulido-Rodríguez LF, Titto EAL, Henrique FL, Longo ALS, Hooper HB, Pereira TL, et al. Termografia infravermelha da superfície ocular como indicador de estresse em suínos na fase de creche. *Pesqui Veterinária Bras.* (2017) 37:453–8. doi: 10.1590/s0100-736x2017000500005
117. Machado NA, Barbosa-Filho JA, Ramalho GL, Pandorf H, Da Silva IJ. Trailer heat zones and their relation to heat stress in pig transport. *Eng Agrícola.* (2021) 41:427–37. doi: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v41n4p427-437/2021
118. Weschenfelder AV, Saucier L, Maldague X, Rocha LM, Schaefer AL, Faucitano L. Use of infrared ocular thermography to assess physiological conditions of pigs prior to slaughter and predict pork quality variation. *Meat Sci.* (2013) 95:616–20. doi: 10.1016/j.meatsci.2013.06.003
119. Feng Y-Z, Zhao H-T, Jia G-F, Ojukwu C, Tan H-Q. Establishment of validated models for non-invasive prediction of rectal temperature of sows using infrared thermography and chemometrics. *Int J Biometeorol.* (2019) 63:1405–15. doi: 10.1007/s00484-019-01758-2
120. Loughmiller JA, Spire MF, Dritz SS, Fenwick BW, Hosni MH, Hogge SB. Relationship between mean body surface temperature measured by use of infrared thermography and ambient temperature in clinically normal pigs and pigs inoculated with *Actinobacillus pleuropneumoniae*. *Am J Vet Res.* (2001) 62:676–81. doi: 10.2460/ajvr.2001.62.676
121. Cook N, Bench C, Liu T, Chabot B, Schaefer A. The automated analysis of clustering behaviour of piglets from thermal images in response to immune challenge by vaccination. *Animal.* (2018) 12:122–33. doi: 10.1017/S1751731117001239
122. Lonardi C, Scollo A, Normando S, Brscic M, Gottardo F. Can novel methods be useful for pain assessment of castrated piglets? *Animal.* (2015) 9:871–7. doi: 10.1017/S1751731114003176
123. Stewart M, Webster J, Verkerk G, Schaefer A, Colyn J, Stafford K. Non-invasive measurement of stress in dairy cows using infrared thermography. *Physiol Behav.* (2007) 92:520–5. doi: 10.1016/j.physbeh.2007.04.034
124. Bertoni A, Napolitano F, Mota-Rojas D, Sabia E, Álvarez-Macias A, Mora-Medina P, et al. Similarities and differences between river buffaloes and cattle: Health, physiological, behavioral and productivity aspects. *J Buffalo Sci.* (2020) 9:92–109. doi: 10.6000/1927-520X.2020.09.12
125. Mota-Rojas D, Wang D, Titto CG, Martínez-Burnes J, Villanueva-García D, Lezama K, et al. Neonatal infrared thermography images in the hypothermic ruminant model: anatomical-morphological-physiological aspects and mechanisms for thermoregulation. *Front Vet Sci.* (2022) 9:963205. doi: 10.3389/fvets.2022.963205
126. Bertoni A, Mota-Rojas D, Álvarez-Macias A, Mora-Medina P, Guerrero-Legarreta I, Morales-Canela A, et al. Scientific findings related to changes in vascular microcirculation using infrared thermography in the river buffalo. *J Anim Behav Biometeorol.* (2020) 8:288–97. doi: 10.31893/jabb.20038
127. Zhang K, Jiao L, Zhao X, Dong D. An instantaneous approach for determining the infrared emissivity of swine surface and the influencing factors. *J Therm Biol.* (2016) 57:78–83. doi: 10.1016/j.jtherbio.2016.03.003
128. Arulmozhi E, Bhujel A, Moon B-E, Kim H-T. The application of cameras in precision pig farming: an overview for swine-keeping professionals. *Animals.* (2021) 11:2343. doi: 10.3390/ani11082343
129. Islam MM, Ahmed ST, Mun H-S, Bostami A, Kim Y-J, Yang C-J. Use of thermal imaging for the early detection of signs of disease in pigs challenged orally with and *Escherichia coli*. *African J Microbiol Res.* (2015) 9:1667–74. doi: 10.5897/AJMR2015.7580
130. Garipey C, Amiot J, Nadai S. Ante-mortem detection of PSE and DFD by infrared thermography of pigs before stunning. *Meat Sci.* (1989) 25:37–41. doi: 10.1016/0309-1740(89)90064-8
131. Duisit J, Debluts D, Behets C, Gerdom A, Vlassenbroek A, Coche E, et al. Porcine ear: a new model in large animals for the study of facial subunit allotransplantation. *JPRAS Open.* (2017) 12:47–58. doi: 10.1016/j.jprra.2017.01.004
132. Schmid SM, Büscher W, Steinhoff-Wagner J. Suitability of different thermometers for measuring body core and skin temperatures in suckling piglets. *Animals.* (2021) 11:1004. doi: 10.3390/ani11041004



133. Schmitt O, O'Driscoll K. Use of infrared thermography to noninvasively assess neonatal piglet temperature. *Transl Anim Sci.* (2021) 5:txaa208. doi: 10.1093/tas/txaa208
134. Schmitt O, Reigner S, Bailly J, Ravon L, Billon Y, Gress L, et al. Thermoregulation at birth differs between piglets from two genetic lines divergent for residual feed intake. *Animal.* (2021) 15:100069. doi: 10.1016/j.animal.2020.100069
135. Ramírez-de la Torre H, Sánchez-Chipres D, Moreno-Llamas G, Jiménez-Cordero A. Noninvasive thermography evaluation of the thermal condition of piglets in the first month of life. *J Environ Sci Nat Resour.* (2021) 7:29–37. doi: 10.35429/JESN.2021.20.7.13.29.37
136. Yañez P, Mota-Rojas D, Ramírez-Necoechea R, Castillo-Rivera M, Santiago R, Mora-Medina P, et al. Application of infrared thermography to assess the effect of different types of environmental enrichment on the ocular, auricular pavilion and nose area temperatures of weaned piglets. *Comput Electron Agric.* (2019) 156:33–42. doi: 10.1016/j.compag.2018.11.010
137. Sutherland M, Dowling S, Backus B, Stewart M. The use of infrared thermography to assess stress in pigs. In: Guarino M, Berckmans D, editors. *7th European Conference on Precision Livestock Farming.* Milan: Università degli Studi di Milano (2015). p. 691–9.
138. Rocha LM, Devillers N, Maldague X, Kabemba FZ, Fleuret J, Guay F, et al. Validation of anatomical sites for the measurement of infrared body surface temperature variation in response to handling and transport. *Animals.* (2019) 9:425. doi: 10.3390/ani9070425
139. Ghoshal NG, Khamas WA. Blood supply of the nasal cavity of the normal pig. *Anat Histol Embryol.* (1986) 15:14–22. doi: 10.1111/j.1439-0264.1986.tb00528.x
140. Godyn D, Herbut P, Angrecka S, Corrêa Vieira FM. Use of different cooling methods in pig facilities to alleviate the effects of heat stress—a review. *Animals.* (2020) 10:1459. doi: 10.3390/ani10091459
141. Cho Y, Bianchi-Berthouze N, Oliveira M, Holloway C, Julier S. Nose heat: Exploring stress-induced nasal thermal variability through mobile thermal imaging. In: *8th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII).* Cambridge: IEEE (2019). p. 566–72.
142. Jorquera-Chavez M, Fuentes S, Dunshea FR, Warner RD, Poblete T, Morrison RS, et al. Remotely sensed imagery for early detection of respiratory disease in pigs: a pilot study. *Animals.* (2020) 10:451. doi: 10.3390/ani10030451
143. de Oliveira RF, Ferreira RA, Abreu LH, Yanagi Júnior T, Lourençoni D. Estimation of respiratory frequency and rectal temperature on pigs in heat stress by fuzzy logic. *Eng Agrícola.* (2018) 38:457–70. doi: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n4p457-470/2018
144. Malmkvist J, Pedersen L, Kammersgaard T, Jørgensen E. Influence of thermal environment on sows around farrowing and during the lactation period. *J Anim Sci.* (2012) 90:3186–99. doi: 10.2527/jas.2011-4342
145. Lowe G, Sutherland M, Waas J, Schaefer A, Cox N, Stewart M. Infrared thermography—A non-invasive method of measuring respiration rate in calves. *Animals.* (2019) 9:535. doi: 10.3390/ani9080535
146. Xie Q, Wu M, Yang M, Bao J, Li X, Liu H, et al. A deep learning-based fusion method of infrared thermography and visible image for pig body temperature detection. In: *International Symposium on Animal Environment and Welfare.* Chongqing, China (2021). p. 326–33.
147. Arfuso F, Rizzo M, Giannetto C, Giudice E, Fazio F, Piccione G. Age-related changes of serum mitochondrial uncoupling 1, rumen and rectal temperature in goats. *J Therm Biol.* (2016) 59:47–51. doi: 10.1016/j.jtherbio.2016.05.002
148. Cook N, Chabot B, Liu T, Froehlich D, Basarab J, Juarez M. Radiated temperature from thermal imaging is related to feed consumption, growth rate and feed efficiency in grower pigs. *J Therm Biol.* (2020) 94:102747. doi: 10.1016/j.jtherbio.2020.102747
149. Boileau A, Farish M, Turner SP, Camerlink I. Infrared thermography of agonistic behaviour in pigs. *Physiol Behav.* (2019) 210:112637. doi: 10.1016/j.physbeh.2019.112637
150. Stukelj M, Hajdinjak M, Pusknik I. Stress-free measurement of body temperature of pigs by using thermal imaging – Useful fact or wishful thinking. *Comput Electron Agric.* (2022) 193:106656. doi: 10.1016/j.compag.2021.106656
151. Scolari SC, Clark SG, Knox RV, Tamassia MA. Vulvar skin temperature changes significantly during estrus in swine as determined by digital infrared thermography. *J Swine Heal Prod.* (2011) 19:151–5.
152. Simões VG, Lyazrhi F, Picard-Hagen N, Gayrard V, Martineau G-P, Waret-Szkuta A. Variations in the vulvar temperature of sows during proestrus and estrus as determined by infrared thermography and its relation to ovulation. *Theriogenology.* (2014) 82:1080–5. doi: 10.1016/j.theriogenology.2014.07.017
153. Lee JH, Lee DH, Yun W, Oh HJ, An JS, Kim YG, et al. Quantifiable and feasible estrus detection using the ultrasonic sensor array and digital infrared thermography. *J Anim Sci Technol.* (2019) 61:163–9. doi: 10.5187/jast.2019.61.3.163
154. Fernández-Cuevas I, Bouzas JC, Arnáiz J, Gómez PM, Piñonosa S, García-Concepción MA, et al. Classification of factors influencing the use of infrared thermography in humans: a review. *Infrared Phys Technol.* (2015) 71:28–55. doi: 10.1016/j.infrared.2015.02.007
155. Basak JK, Arulmozhi E, Khan F, Okyere FG, Park J, Kim HT. Modeling of ambient environment and thermal status relationship of pig's body in a pig barn. *Indian J Anim Res.* (2020) 54:1049–54. doi: 10.18805/ijar.B-1186
156. Barreto CD, Alves FV, de Oliveira CEC, de Paula MC, Leite LC, Junior NK. Infrared thermography for evaluation of the environmental thermal comfort for livestock. *Int J Biometeorol.* (2020) 64:881–8. doi: 10.1007/s00484-020-01878-0
157. Jiao L, Dong D, Zhao X, Han P. Compensation method for the influence of angle of view on animal temperature measurement using thermal imaging camera combined with depth image. *J Therm Biol.* (2016) 62:15–9. doi: 10.1016/j.jtherbio.2016.07.021
158. Banhazi T, Kitchen J, Tivey D. Potential of using infrared thermography for determination of skin wetness and thus perceived thermal comfort of pigs. *Aust J Multi-Disciplinary Eng.* (2009) 7:47–54. doi: 10.1080/14488388.2009.11464798
159. Playà-Montmany N, Tattersall GJ. Spot size, distance and emissivity errors in field applications of infrared thermography. *Methods Ecol Evol.* (2021) 12:828–40. doi: 10.1111/2041-210X.13563
160. Bracke M. Review of wallowing in pigs: description of the behaviour and its motivational basis. *Appl Anim Behav Sci.* (2011) 132:1–13. doi: 10.1016/j.applanim.2011.01.002
161. Mahfuz S, Mun H-S, Dilawar MA, Yang C-J. Applications of smart technology as a sustainable strategy in modern swine farming. *Sustainability.* (2022) 14:2607. doi: 10.3390/su14052607
162. Mota-Rojas D, Martínez-Burnes J, Casas-Alvarado A, Gómez-Prado J, Hernández-Ávalos I, Domínguez-Oliva A, et al. Clinical usefulness of infrared thermography to detect sick animals: frequent and current cases. *CABI Rev.* (2022) 17:1–17. doi: 10.1079/cabreviews202217040
163. Schaefer A, Cook N, Tessaro S, Deregé D, Desroches G, Dubeski P, et al. Early detection and prediction of infection using infrared thermography. *Can J Anim Sci.* (2004) 84:73–80. doi: 10.4141/A02-104
164. Ross J, Hale B, Gabler N, Rhoads R, Keating A, Baumgard L. Physiological consequences of heat stress in pigs. *Anim Prod Sci.* (2015) 55:1381–90. doi: 10.1071/AN15267
165. Stewart M, Wilson M, Schaefer A, Huddart F, Sutherland M. The use of infrared thermography and accelerometers for remote monitoring of dairy cow health and welfare. *J Dairy Sci.* (2017) 100:3893–901. doi: 10.3168/jds.2016-12055
166. Menzel A, Siewert C, Gasse H, Seifert H, Hoeltig D, Hennig-Pauka I. Infrared thermography of the pig thorax: an assessment of selected regions of interest by computed tomographical and anatomical parameters. *Anat Histol Embryol.* (2015) 44:107–17. doi: 10.1111/ah.12115
167. Cockram M. Condition of animals on arrival at the abattoir and their management during lairage. In: Grandin T, Cockram M, editors. *The Slaughter of Farmed Animals: Practical Ways of Enhancing Animal Welfare.* Oxfordshire: CAB International (2020). p. 49–77.
168. Warriss P, Pope S, Brown S, Wilkins L, Knowles T. Estimating the body temperature of groups of pigs by thermal imaging. *Vet Rec.* (2006) 158:331–4. doi: 10.1136/vr.158.10.331
169. Jorquera-Chavez M, Fuentes S, Dunshea FR, Jongman EC, Warner RD. Computer vision and remote sensing to assess physiological responses of cattle to pre-slaughter stress, and its impact on beef quality: a review. *Meat Sci.* (2019) 156:11–22. doi: 10.1016/j.meatsci.2019.05.007
170. Bao Z-Q, Liao T-T, Yang W-R, Wang Y, Luo H-Y, Wang X-Z. Heat stress-induced autophagy promotes lactate secretion in cultured immature boar Sertoli cells by inhibiting apoptosis and driving SLC2A3, LDHA, and SLC16A1 expression. *Theriogenology.* (2017) 87:339–48. doi: 10.1016/j.theriogenology.2016.09.016
171. Peña Jr ST, Gummow B, Parker AJ, Paris DB. Revisiting summer infertility in the pig: could heat stress-induced sperm DNA damage negatively affect early embryo development? *Anim Prod Sci.* (2017) 57:1975. doi: 10.1071/AN16079
172. Stravogianni V, Samaras T, Boscos CM, Markakis J, Krystallidou E, Basioura A, et al. The use of animal's body, scrotal temperature and motion

monitoring in evaluating boar semen production capacity. *Animals*. (2022) 12:829. doi: 10.3390/ani12070829

173. Rosengart S, Chuppava B, Schubert DC, Trost L-S, Henne H, Tetens J, et al. Infrared thermography of the mammary gland in sows with regard to health and performance. *Agriculture*. (2021) 11:1013. doi: 10.3390/agriculture11101013

174. Latynina ES, Dyulger GP, Leontiev LB. Informative value of the use of infrared thermography in the complex diagnosis of

postpartum dysgalactia syndrome in sows. *BIO Web Conf*. (2021) 37:00104. doi: 10.1051/bioconf/20213700104

175. Stiehler T, Heuwieser W, Pfützner A, Burfeind O. The course of rectal and vaginal temperature in early postpartum sows. *J Swine Heal Prod*. (2015) 23:72–83.

176. Weng R-C. Variations in the body surface temperature of sows during the post weaning period and its relation to subsequent reproductive performance. *Asian-Australasian J Anim Sci*. (2020) 33:1138–47. doi: 10.5713/ajas.19.0576