

Sensores inteligentes y técnicas de machine learning para la detección del estrés en ganado bovino.

Systematic review on intelligent sensors and techniques machine learning for the detection of stress in cattle.

Lascano-Rivera, Samuel Benjamín ¹; Rivera-Escriba, Luis Antonio²; Balarezo-Urresta, Luis Rodrigo³; Castañeda-Albán, Jorge Eduardo ⁴.

¹ Universidad Politécnica Estatal del Carchi; Ecuador, Tulcán; <https://orcid.org/0000-0001-5967-6441>; samuel.lascano@upec.edu.ec

² Universidade Estadual do Norte Fluminense; Brasil, Rio de Janeiro; <https://orcid.org/0000-0002-5029-2561>; rivera@uenf.br

³ Universidad Politécnica Estatal del Carchi; Ecuador, Tulcán; <https://orcid.org/0000-0001-5546-1259>; luis.balarezo@upec.edu.ec

⁴ Universidad San Ignacio de Loyola; Perú, Lima; <https://orcid.org/0000-0001-7725-8702>; jorge.castaneda@usil.pe

¹ Autor Correspondencia

 <https://doi.org/10.63618/omd/isi/v3/n3/64>

Cita: Lascano-Rivera, S. B., Rivera-Escriba, L. A., Balarezo-Urresta, L. R., & Castañeda-Albán, J. E. (2025). Sensores inteligentes y técnicas de machine learning para la detección del estrés en ganado bovino. *Innova Science Journal*, 3(3), 336-355. <https://doi.org/10.63618/omd/isi/v3/n3/64>

Recibido: 03/05/2025

Aceptado: 27/06/2025

Publicado: 31/07/2025



Copyright: © 2025 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC).

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Resumen: Este artículo analiza el uso de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en la ganadería de precisión, enfocándose en el monitoreo del bienestar animal y la detección del estrés térmico en bovinos. Se destacan tecnologías como los sensores inteligentes y el Internet de las Cosas (IoT), que permiten un monitoreo continuo, remoto y no invasivo. La revisión se basó en una búsqueda sistemática de artículos publicados desde 2020, empleando descriptores clave. Los resultados muestran que algoritmos como Random Forest y XGBoost logran altos niveles de precisión en la predicción de estados de salud y estrés, con índices de acierto de hasta el 89,3 %. A pesar de estos avances, persisten desafíos en la mejora de la precisión de los modelos y en la integración eficiente de datos para una implementación escalable en entornos ganaderos reales.

Palabras clave: Machine Learning; Ganado Bovino; Sensores Inteligentes; Stress.

Abstract: This article examines the use of artificial intelligence and machine learning in precision livestock farming, focusing on animal welfare monitoring and heat stress detection in cattle. Technologies such as smart sensors and the Internet of Things (IoT) are highlighted for enabling continuous, remote, and non-invasive monitoring. The review was based on a systematic search of articles published since 2020 using key descriptors. Results show that algorithms like Random Forest and XGBoost achieve high accuracy in predicting health and stress states, with success rates reaching up to 89.3 %. Despite these advances, challenges remain in improving model accuracy and efficiently integrating data for scalable implementation in real-world livestock environments.

Keywords: Machine Learning; Cattle; Smart Sensors; Stress.

1. Introducción

La inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático (AA) están siendo cada vez más utilizadas en diversas aplicaciones dentro de la industria ganadera. Las tecnologías digitales emergentes están transformando el monitoreo y manejo del ganado mediante métodos no invasivos y automatizados para evaluar la salud y el bienestar animal (Fuentes et al., 2022), reduciendo significativamente la intervención humana, minimizando errores y evitando perturbaciones externas como etiquetas o marcas tradicionales usadas para identificar los animales (Technologies Y Management, 2023).

El desafío clave radica en integrar de manera eficiente datos, sensores y modelos de IA para abordar problemas prioritarios en la producción ganadera. Esta integración permite aprovechar plenamente el potencial de la inteligencia artificial para mejorar tanto la productividad como el manejo animal (Patel et al., 2022; Neethitajan, 2022).

Entre las técnicas de IA, el aprendizaje profundo destaca por su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos provenientes de sistemas de monitoreo. Estas técnicas pueden superar las dificultades asociadas a la clasificación de datos inciertos, imprecisos o con solapamiento entre clases (Rodríguez-Ramos et al., s.f.).

La ganadería moderna busca incorporar herramientas de agricultura de precisión y tecnologías de aprendizaje automático para incrementar la eficiencia y sostenibilidad de la producción. Sin embargo, estos avances aún se encuentran en una fase incipiente, tanto en términos de madurez tecnológica como de disponibilidad de recursos humanos capacitados, lo que implica la existencia de múltiples desafíos por resolver (Romanzini et al., 2022). En este contexto, la combinación de sensores inteligentes e Internet de las Cosas (IoT) está impulsando una transformación profunda en la gestión ganadera (Tekin et al., 2021).

Algunas aplicaciones basadas en sensores inteligentes incluyen sistemas de monitoreo en pastoreo extensivo, dispositivos para rastrear ubicación, actividad y comportamiento animal, detección temprana de cojeras y enfermedades. Estos sensores generan grandes volúmenes de datos que, al ser procesados y analizados, permiten tomar decisiones más informadas sobre el manejo del ganado y los recursos (Tedeschi et al., 2021), especialmente en cuanto al cuidado continuo y en tiempo real del bienestar animal (Halachmi et al., 2019).

Además, sensores de movimiento, como acelerómetros y GPS, facilitan el seguimiento de la actividad, posición y desplazamientos del ganado (Džermeikaitė et al., 2023), detectando cambios en patrones conductuales que pueden indicar problemas de salud, como estrés o cojera. A su vez, biomarcadores relacionados con la salud y reproducción, como bolos ruminales, actúan como indicadores de trastornos metabólicos (Qiao et al., 2021). Este enfoque se conoce como ganadería de precisión (Tekin et al., 2021; Neethirajan, 2020).

El monitoreo automatizado del estrés es particularmente relevante dada la creciente incidencia de factores climáticos como el cambio global y el calentamiento planetario, que incrementan el riesgo de estrés térmico en el ganado. Este fenómeno afecta negativamente la salud, el bienestar y la productividad animal, además de variar considerablemente entre individuos (Islam et al., 2021).

Por ello, resulta fundamental implementar estrategias personalizadas de monitoreo y mitigación del estrés en bovinos, evaluando parámetros fisiológicos y cambios conductuales mediante una combinación de métodos tradicionales y tecnologías automatizadas, con el objetivo de lograr una detección más precisa y oportuna a nivel individual (Islam et al., 2020). Por ejemplo, Darvesh et al. (2023) han demostrado que la temperatura de la piel es un indicador más confiable del estrés por calor que la temperatura corporal interna, debido a la dificultad para medir esta última en animales con piel gruesa.

La combinación de temperatura ambiente y humedad relativa es clave para determinar los niveles de estrés térmico, los cuales se clasifican en leve (Índice de Temperatura y Humedad -THI- entre 72 y 79), moderado (THI entre 79 y 89) y severo (THI > 89). Los datos recopilados por los sensores son alimentados a algoritmos de aprendizaje automático para predecir el estado general de salud del ganado, incluyendo el nivel de estrés (Jaddoa, 2020). Según Darvesh et al. (2023), los parámetros más utilizados para medir el estrés incluyen: temperatura de la piel, frecuencia cardíaca, nivel de actividad, condiciones ambientales (temperatura y humedad) y patrones de sueño. Estos datos pueden registrarse mediante collares inteligentes.

Por otro lado, Davison et al. sugieren que combinar collares con sensores tipo acelerómetro puede ser una solución viable para detectar y cuantificar automáticamente el estrés en ganado lechero. Gracias al uso integrado de inteligencia artificial y tecnologías sensoriales, la ganadería moderna está viviendo una verdadera revolución en el monitoreo y manejo del bienestar animal. Esto posibilita un control continuo y no invasivo de la salud y productividad del ganado, apoyado por análisis de datos en tiempo real. Tales innovaciones tienen el potencial de ayudar a la industria ganadera a enfrentar eficazmente los desafíos actuales y futuros.

2. Materiales y Métodos

Para esta revisión sistemática sobre el uso de tecnologías de inteligencia artificial y sensores inteligentes en el monitoreo y manejo del estrés en el ganado, surgen las siguientes cuestiones para esclarecer:

P1 ¿Cómo pueden las tecnologías de aprendizaje automático y sensores inteligentes mejorar la detección y gestión del estrés en el ganado?

P2 ¿Qué algoritmos y métodos son más efectivos para clasificar condiciones de salud y estrés térmico en la ganadería?

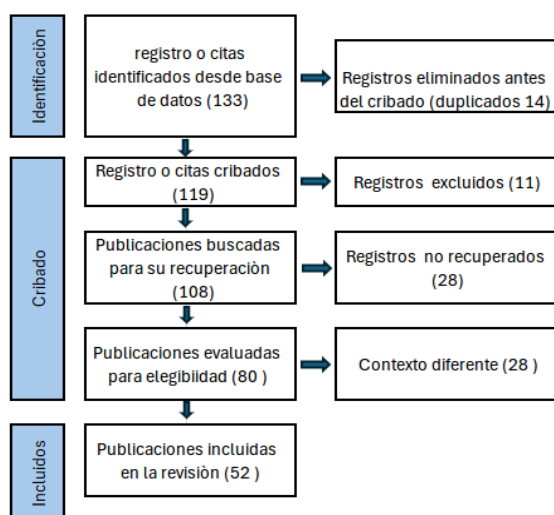
P3 ¿Cuáles son los desafíos y áreas clave para futuras investigaciones en la implementación de estas tecnologías en la ganadería de precisión?

Resolver estas preguntas implica identificar palabras claves relacionadas para la búsqueda en bases de datos científicas. Entonces para la pregunta uno, P1, las palabras clave serán las siguientes: machine learning, intelligent sensors, stress, livestock y detection. Para aclarar la segunda pregunta, P2, se agregaron las palabras clave algoritmos, métodos, salud y heat stress. Finalmente, para pregunta tres, P3 también se le agregaron las palabras clave challenge y precision livestock. La combinación de las palabras claves de P1, P2 y P3 dan como resultado 133 artículos, en bases de datos científicas indexadas.

Los artículos seleccionados se limitan a publicaciones desde 2020 hasta la actualidad para centrarse en las últimas investigaciones relacionadas con los últimos desarrollos. Este marco de búsqueda sintetiza enfoques metodológicos y resultados significativos que ayudan a abordar las preguntas de investigación propuestas y comprenden la aplicación de las tecnologías en la práctica. Los artículos seleccionados se evaluaron en función de la metodología, el rendimiento del algoritmo y los resultados obtenidos. La evaluación se lleva a cabo de forma sistemática siguiendo el diagrama de flujo PRISMA que se muestra en la Figura 1. A través de estos estudios, se buscó métodos efectivos y desafíos en la implementación de tecnologías ganaderas de precisión.

Figura 1:

Diagrama de Flujo PRISMA para la selección del estudio



2.1 Estado de arte de ganadería de precisión

La ganadería de precisión es un enfoque innovador y necesario en la producción animal, ya que emplea tecnologías avanzadas para mejorar los sistemas de manejo y de desempeño. Se describe el estado del arte de las aplicaciones de sensores y la variabilidad que entran en juego en la ganadería de precisión. Los mismos son resumidos en la figura 1, mostrando la forma de operar sobre la eficiencia productiva y el bienestar animal.

2.2 Sensores en GP.

En diversas investigaciones sobre el comportamiento y bienestar del ganado se han utilizado distintos tipos de sensores (Becker et al., 2021; Lardy et al., 2023). Entre ellos, destacan acelerómetros 3D, giroscopios y cámaras para monitorear el comportamiento de rumia y actividad de las vacas lecheras (Gorczyca Y Gebremedhin, 2020), así como unidades de medición inercial (IMU) de 9 ejes y microcontroladores integrados para predecir la actividad del ganado y eventos de estrés por calor (Chapman et al., 2023a; Dineva Y Atanasova, 2023a). Para la predicción de eventos de estrés por calor en vacas lecheras, se han empleado sensores de *rumen bolus* que permiten la recolección de

datos meteorológicos como temperatura del aire, humedad, radiación solar, lluvia y velocidad del viento, además de datos internos de temperatura del rumen, actividad, índice de rumia y eventos de consumo de agua (Chaudhry et al., 2020). Adicionalmente, el uso de sensores GNSS facilita la localización precisa mediante la recolección de datos de latitud, longitud y altitud (Fuentes et al., 2020; Giannuzzi et al., 2022).

En estudios sobre la clasificación de comportamientos en ganado bovino, se ha utilizado el sensor SparkFun 9 degrees of freedom razor IMU MO, que combina acelerómetros y giroscopios de 3 ejes, permitiendo la obtención de magnitudes precisas de aceleración y giroscopio para clasificar diferentes comportamientos (Darvesh et al., 2023). Además, collares Afimilk Silent Herdsman y acelerómetros Axivity han sido empleados para predecir partos en vacas lecheras, registrando actividades como comer, rumiar, nivel relativo de actividad y tiempo de cola en posición elevada (Da Y Rodrigues, 2022).

En la detección temprana de la dermatitis digital en vacas lecheras, se han usado sensores Nedap Smarttag Leg y Nedap Smarttag Neck, los cuales recogen datos sobre el número de pasos, tiempo de pie, tiempo de caminata, tiempo de acostado, tiempo de comida, tiempo de rumia y tiempo de inactividad, proporcionando información crucial para la identificación y manejo temprano de esta afección (Martono et al., 2023; Setiamy Y Deliani, 2019). Por último, se ha destacado el uso de mini acelerómetros triaxiales integrados en cabestros ajustados para recopilar aceleraciones durante la alimentación de las vacas, analizando el comportamiento alimentario que puede ser indicativo del bienestar animal (El Moutaouakil Y Falih, 2024).

2.3 Variables recolectadas en GP

En las investigaciones revisadas, se recolectaron diversas características clave para monitorear el comportamiento y bienestar del ganado. Entre ellas, se encuentran los datos de temperatura, localización (latitud, longitud, altitud), y lecturas de unidades de medición inercial (IMU) que incluyen acelerómetros, giroscopios y magnetómetros (Becker et al., 2021; Chapman et al., 2023a; Chaudhry et al., 2020; Da Y Rodrigues, 2022; Fuentes et al., 2020; Giannuzzi et al., 2022; Lardy et al., 2023). Se registraron datos automatizados como la ingesta de leche, velocidad de consumo de leche, visitas recompensadas y no recompensadas al comedero, ingesta de iniciador, recuento total de pasos y tiempo de acostarse (Darvesh et al., 2023; Dineva Y Atanasova, 2023a; Giannuzzi et al., 2022; Gorczyca Y Gebremedhin, 2020). Además, se obtuvieron características manuales como la puntuación de ultrasonido, peso corporal y estado de IgG (Giannuzzi et al., 2022; Gorczyca Y Gebremedhin, 2020).

Se recolectaron datos sobre la temperatura del rumen, actividad, índice de rumia y eventos de consumo de agua para predecir eventos de estrés por calor en vacas lecheras (Chaudhry et al., 2020; Darvesh et al., 2023; Fuentes et al., 2020). Otras características incluyen actividades como comer, rumiar, nivel relativo de actividad, tiempo de cola en posición elevada, número de pasos, tiempo de pie, tiempo de caminata, tiempo de acostado, tiempo de comida, tiempo de rumia y tiempo de inactividad (Chapman et al., 2023; Lardy et al., 2023; Martono et al., 2023; Setiamy Y Deliani, 2019). En estudios sobre la clasificación de comportamientos en terneros lecheros, se extrajeron 44 características de las magnitudes de la aceleración y el giroscopio (Dineva Y Atanasova, 2023; Giannuzzi et al., 2022).

2.4 Algoritmos utilizados en la GP.

En diversas investigaciones sobre el comportamiento y bienestar del ganado se han utilizado distintos algoritmos de aprendizaje automático. Entre los más importantes están: Bosque Aleatorio (RF), Máquina de Vectores de Soporte (SVM), Árbol de Decisión (DT), K-Vecinos más Cercanos (k-NN), XGBoost, Redes Neuronales (NN), entre otros. RF es utilizado en múltiples estudios para clasificar y predecir el comportamiento y estado de salud del ganado (Brouwers et al., 2023; Cantor et al., 2022; Setiamy Y Deliani, 2019). SVM es usado para la clasificación del comportamiento del ganado, especialmente en la detección de eventos específicos como la metritis y el estrés térmico (Cantor et al., 2022; Martono et al., 2023). DT es utilizado en estudios enfocados en la clasificación del comportamiento del ganado, ofreciendo un buen equilibrio entre sensibilidad y especificidad (Setiamy Y Deliani, 2019), mientras que k-NN es empleado en investigaciones para predecir eventos de salud del ganado como la metritis (Cantor et al., 2022). El algoritmo XGBoost es destacado por su alto rendimiento en la clasificación de comportamientos específicos del ganado como la alimentación y rumia (Dineva Y Atanasova, 2023). En la predicción de respuestas fisiológicas y comportamientos del ganado es utilizado NN es utilizado con buena precisión (Chapman et al., 2023; Gorczyca Y Gebremedhin, 2020). La Tabla 1 sinteriza los algoritmos y tecnologías usados en la detección de factores relacionados con estrés vacuno.

2.5 Desempeño de los algoritmos en la GP.

Entre los algoritmos de aprendizaje automático con mejor desempeño tenemos a RF con una precisión del 81.91% para predecir la producción diaria de leche (Brouwers et al., 2023), de la misma manera se reportaron puntajes F1 entre 92.86% y 100% en la predicción de metritis (Cantor et al., 2022). SVM mostró un desempeño inferior con puntajes F1 entre 23.26% y 65% en la predicción de metritis (Cantor et al., 2022). Mientras que k-NN alcanzó una precisión del 99.34% para la clasificación de comportamiento de alimentación en vacas en la investigación (Martono et al., 2023). En otra investigación destacada (Cantor et al., 2022), tuvo puntajes F1 entre 44.94% y 63.16% en la predicción de metritis. Con uso de Bi-LSTM se logró una precisión del 96.79% en la clasificación de comportamientos bovinos en tiempo real utilizando recolección de energía de radiofrecuencia en la investigación (Setiamy Y Deliani, 2019).

3. Resultados

3.1 Tecnologías de aprendizaje automático y sensores inteligentes en la mejoría de la detección y gestión del estrés en el ganado.

Los estudios demuestran cómo la combinación de tecnologías de aprendizaje automático y sensores inteligentes están revolucionando la forma en que se gestiona el estrés en el ganado, permitiendo intervenciones más precisas y efectivas para mejorar la salud y el bienestar animal, como sintetiza la Tabla 1, los artículos más relevantes como Becker et al. (2021) centran su trabajo en la predicción del estrés térmico en vacas lecheras utilizando técnicas de aprendizaje automático. Los autores emplearon varios algoritmos, destacando que el método de RF en la predicción del estrés por calor, lo que permite a los productores detectar y mitigar los efectos negativos del estrés térmico en la producción de leche. Se utilizó un sistema de puntuación y se integraron sensores

como los de temperatura corporal y frecuencia respiratoria para recoger datos relevantes sobre las condiciones del ganado.

Lardy et al. (2023) investigan la discriminación de condiciones patológicas, reproductivas y de estrés en vacas mediante el análisis de datos de actividad obtenidos de sensores utilizando RF. En este enfoque se sugiere que la integración de datos de sensores puede mejorar significativamente la gestión del ganado. Gorczyca Y Gebremedhin (2020) clasifican los factores de estrés térmico ambiental que afectan a las vacas lecheras mediante algoritmos de ML. Los resultados indican que la temperatura del aire es el factor más influyente en las respuestas fisiológicas de las vacas, lo que resalta la importancia de los sensores ambientales en la detección de estrés térmico. Estos hallazgos pueden ayudar a los ganaderos a implementar intervenciones adecuadas antes de que se produzcan condiciones estresantes. Mientras que Chapman et al. (2023) presentan un modelo de LSTM, que es un tipo de Rede neuronal recurrente (RNN), para pronosticar el estrés térmico en ganado, utilizando datos de comportamiento registrados de forma autónoma. El estudio concluye que los métodos de aprendizaje profundo recurrentes son más precisos que los enfoques estadísticos tradicionales, lo que sugiere que la combinación de datos de sensores y técnicas avanzadas de aprendizaje automático puede mejorar significativamente el bienestar animal y la productividad.

Tabla 1.
Relación de Sensores Inteligentes y Técnicas de Machine

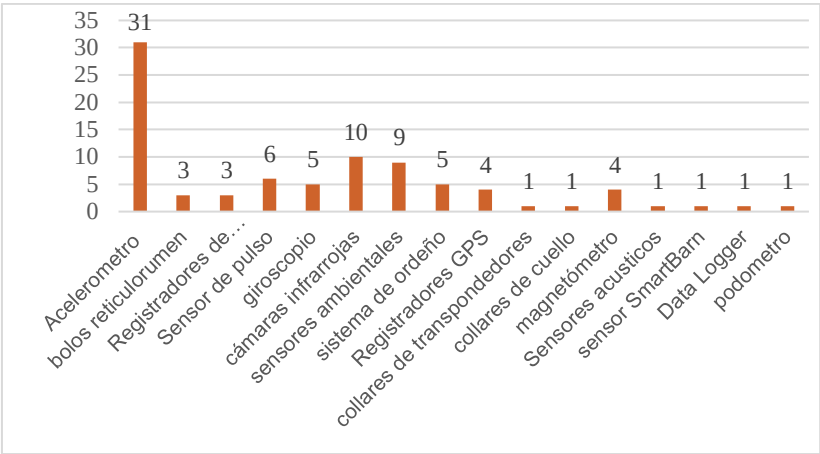
Fuentes	ML Factible	Estrés	Vacas	Sensor
(Becker et al., 2021); (Lardy et al., 2023); (Gorczyca Y Gebremedhin, 2019); (Veissier et al., n.d.); (Veissier et al., n.d.); (Vidal et al., 2023)	RF	*	*	*
(Chapman et al., 2023b)	LSTM	*	*	*
(Dineva Y Atanasova, 2023b); (Chaudhry et al., 2020); (Zhou et al., 2022); (Fadul-Pacheco et al., 2021); (Balasso et al., 2021); (Schmeling et al., 2021); (Marques et al., 2024); (Tran et al., 2021); (Miller et al., 2020); (Schmeling et al., 2021); (Watanabe et al., 2021); (Ghafoor Y Sitkowska, 2021);(Higaki et al., n.d.)	RF		*	*
(Fuentes et al., 2022)	ANN	*	*	*
(Giannuzzi et al., 2022) (El Moutaouakil Y Falih, 2024) (Dac et al., 2022)	ANN		*	*
(Darvesh et al., 2023) (Li et al., 2022) (Riaboff et al., 2020)	XGBoost		*	*
(Da Y Rodrigues, n.d.)	SVM	*	*	*
(Martono et al., 2023)	DT		*	*
(Gorczyca Y Gebremedhin, 2019)	GBM	*	*	*
(Brouwers et al., 2023)	MiniRocket y InceptionTime		*	*
(Zhang et al., n.d.)	LSTM		*	*
(Pedrosa et al., 2024)	MLP		*	*
(Shorten, 2023); (Balasso et al., 2023); (Hosseininoorbin et al., 2021)	CNN		*	*
(Surana Y Sharma, n.d.)	CNN y LSTM		*	*
(Sawada et al., 2023)	LightGBM y NN		*	*
(Shu et al., n.d.)	RNA	*	*	*
(Wagner et al., 2020); (Magana et al., 2023); (Cantor et al., 2022)	k-NN		*	*
(Nogoy et al., 2021)	k-NN	*	*	*
(Dang et al., 2024)	Bi-LSTM		*	*
(Liseune et al., 2021)	C-LSTM		*	*

(Woodward et al., 2024)	CA	*	*	*
(Stygar et al., 2023)	XGBoost.	*	*	*
(Ding et al., 2022)	XGB	*	*	*
(Carslake et al., 2021)	AdaBoost		*	*
(Hernández et al., 2024)	SVM		*	*
(Tian et al., 2021)	k-NN-RF		*	*

Nota: Estudios de machine learning para la detección de estrés en ganado bovino

Figura 2.

Sensores Usados en Ganadería de Precisión con Bovinos



P1: ¿Cómo pueden las tecnologías de aprendizaje automático y sensores inteligentes mejorar la detección y gestión del estrés en el ganado?

Las tecnologías de aprendizaje automático (ML) y los sensores inteligentes permiten un monitoreo continuo, no invasivo y preciso del bienestar del ganado. Estas tecnologías recopilan datos clave como temperatura de la piel, frecuencia cardíaca, actividad física, temperatura y humedad ambiental, entre otros. Los sensores, como acelerómetros, GPS y bolos ruminales, capturan información en tiempo real que luego es procesada por algoritmos de ML para predecir estados de salud y niveles de estrés. Esto facilita la detección temprana de problemas como el estrés térmico y enfermedades, mejorando la gestión individualizada del ganado

3.2 Algoritmos y metodologías efectivas para clasificar condiciones de salud y estrés térmico en la ganadería.

En esta revisión se destacan los algoritmos RF, SVM, ANN y GBM, como se observa en la Figura 3 generada desde la Tabla 1. y Tabla 2, (Lardy et al., 2023), (Gorczyca Y Gebremedhin, 2019), (Chapman et al., 2023b), (Fuentes et al., 2022).

Figura 3.

Algoritmos resultantes eficientes usados con sensores inteligentes en las investigaciones.

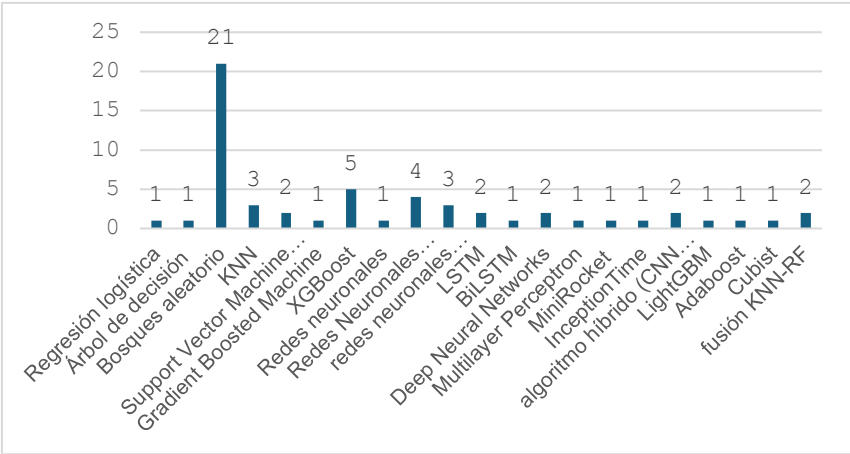


Tabla 2.

Algoritmos efectivos para clasificar condiciones de salud en ganado bovino

ML	Efectividad	Aplicaciones	Ventajas
RF	Alta precisión para predecir el estrés térmico y clasificar condiciones de salud.	Predicción de precisión de sistemas de puntuación de estrés térmico, discriminación de condiciones patológicas, productivas y de estrés.	Alta precisión en la predicción de enfermedades como la cojera y la mastitis.
SVN	Buena precisión en la clasificación de datos complejos.	Clasificación de comportamientos y condiciones de salud basados en datos de sensores.	Eficaz en la predicción de dermatitis digital y otras condiciones de salud.
ANN	Capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y detectar patrones complejos.	Predicción de respuestas fisiológicas al estrés térmico, como temperatura corporal y frecuencia respiratoria.	Alta precisión en la predicción de parámetros fisiológicos complejos.
GBM	Alta precisión en la predicción de condiciones de salud y estrés térmico.	Clasificación de comportamientos y predicción de respuestas fisiológicas.	Mejora continua del modelo a través de la combinación de múltiples árboles de decisión.

La Tabla 3 presenta un resumen de las metodologías utilizadas para clasificar las condiciones de salud en ganado bovino, organizando la información de manera clara y accesible, no solo resume información clave sobre estudios relevantes en el área de salud bovina, sino que también se proporciona un recurso valioso para la comprensión y análisis de las metodologías utilizadas en este campo de investigación.

Tabla 3

Metodologías para clasificar condiciones de salud en ganado bovino.

Título del Estudio	Autores	Metodología	Cita
Predicting dairy cattle health using machine learning techniques	Marufuzzaman, M., Store, A.G., Decker, C.A.	Técnicas de aprendizaje automático	"Predicting dairy cattle health using machine learning techniques."
Discriminating pathological, reproductive or productive conditions in dairy cows using sensor-based activity data	Landy, R., Ruin, Q., Voltaic, L.	Aprendizaje automático basado en datos de actividad de sensores	"Discriminating pathological, reproductive or productive conditions in dairy cows using sensor-based activity data."
Ranking of environmental factors for heat stress in dairy cows using machine learning algorithms	Gorczyca, M.T., Gebremedhin, K.G.	Algoritmos de aprendizaje automático	"Ranking of environmental factors for heat stress in dairy cows using machine learning algorithms."
A deep learning model to forecast cattle heat stress	Chapman, N.M., Chlingaryan, A., Thomson, P.C., Lomax, S., Islam, M.A., Doughty, A.K., Clark, C.E.F.	Modelo de aprendizaje profundo	"A deep learning model to forecast cattle heat stress."
Classification of health status in dairy cows using machine learning and data management on AWS Cloud	Dineva, E., Atanasova, T.	Aprendizaje automático y gestión de datos en AWS Cloud	"Classification of health status in dairy cows using machine learning and data management on AWS Cloud."
IoT and Machine Learning enabled Livestock Monitoring	Chaudhry, A.A., Mumtaz, R., Pakdi, S.M., Tahir, M.A., School, S.M.	Monitoreo de ganado habilitado por IoT y aprendizaje automático	"IoT and Machine Learning enabled Livestock Monitoring."
Artificial Intelligence applied to a robotic dairy farm to model milk productivity and quality	Fuentes, S., Viejo, C.G., Cullen, B., Tongson, E., Chauhan, S.S., Dunshea, F.R.	Inteligencia artificial aplicada a una granja lechera robótica	"Artificial Intelligence applied to a robotic dairy farm to model milk productivity and quality."
Non-invasive evaluation of heat stress in cattle using machine learning and infrared thermography	Rodrigues, A.V.	Aprendizaje automático y termografía infrarroja	"Non-invasive evaluation of heat stress in cattle using machine learning and infrared thermography."

La implementación de tecnologías avanzadas ha demostrado ser efectiva en la detección temprana de enfermedades y en la gestión del estrés térmico. En la tabla 3 se puede identificar las metodologías más efectivas en este campo.

P2: ¿Qué algoritmos y métodos son más efectivos para clasificar condiciones de salud y estrés térmico en la ganadería?

Entre los algoritmos más efectivos se encuentran Bosque Aleatorio (RF), XGBoost, Máquina de Vectores de Soporte (SVM) y Redes Neuronales (NN). RF y XGBoost destacan por su alta precisión en la clasificación del comportamiento animal, con estudios que reportan hasta un 89.3% de precisión en la detección del estrés térmico. SVM es útil para clasificar comportamientos específicos como el estrés térmico o la metritis, mientras que NN ofrece buenos resultados en la predicción de respuestas fisiológicas. Estos métodos son alimentados con datos recolectados por sensores avanzados, lo que asegura un análisis robusto

3.3 Desafíos y áreas clave para futuras investigaciones en la implementación de estas tecnologías en la ganadería de precisión

La adopción de tecnologías en la ganadería de precisión debe hacer frente a varios retos considerables que deben ser abordados para mejorar su adecuado uso. Uno de los principales obstáculos es la integración de los datos de diferentes fuentes, como sensores, dispositivos IoT y sistemas de gestión de datos, en un único sistema. La heterogeneidad de estos datos y la falta de normalización dificultan la interoperabilidad y, por tanto, puede limitar la capacidad de los sistemas para interactuar y trabajar de forma adecuada, por lo que la creación de estándares y protocolos que favorezcan la integración de los datos es fundamental para obtener sistemas que permitan una comunicación fluida entre diferentes sistemas y elementos (Marufuzzaman et al., 2021). Otro reto importante es la calidad y la exactitud de los datos recogidos mediante las diferentes herramientas de control. Las condiciones ambientales y técnicas pueden condicionar la exactitud de estos datos y, por tanto, se pueden tomar decisiones erróneas. Con el fin de poder dar respuesta a este problema, sería necesario mejorar la exactitud y fiabilidad de los sensores y/o algoritmos de corrección de errores que puedan garantizar la calidad de los datos (Landy et al., 2020).

La creación de modelos predictivos exactos que sean capaces de interpretar los volúmenes de datos en tiempo real representaría otro reto relevante. La construcción de estos modelos podría verse obstaculizada por el hecho de que deben adaptarse a diferentes condiciones y contextos con el fin de ser útiles. Por lo tanto, la creación y optimización de algoritmos de aprendizaje automático y modelos de inteligencia artificial que sean capaces de gestionar grandes volúmenes de datos a los fines de ofrecer predicciones exactas y útiles es necesaria (Gorczyca Y Gebremedhin, 2020). La adopción de las nuevas tecnologías por parte de los ganaderos puede ser muy lenta debido a la falta de formación técnica y la resistencia al cambio, así como las interfaces de usuario fáciles de usar. Por lo tanto, la creación de programas de formación y soporte a los ganaderos, así como la creación de interfaces de usuario accesibles y fáciles de utilizar son altamente recomendables. (Chapman et al., 2022).

El coste inicial de la implantación de las tecnologías de precisión puede ser elevado, y los ganaderos tienen que ver un retorno claro para poder justificar dicha inversión. Producir estudios de coste/beneficio y desarrollar modelos de negocio que demuestren el valor económico de la adopción de las tecnologías de precisión es un ámbito clave de futuras investigaciones (Dineva Y Atanasova, 2020). La seguridad y privacidad de los datos puede ser otro aspecto crítico. La recogida y almacenamiento de grandes volúmenes de datos sensibles es un aspecto que implicará cuestiones sobre la seguridad y la privacidad de la información. Es necesario desarrollar soluciones de seguridad adecuadas y políticas de privacidad adecuadas que garanticen que los datos de los ganaderos estén protegidos y que se atengan a la legalidad vigente (Chaudhry et al., 2020).

Siguiendo con las áreas claves para futuras investigaciones, el desarrollo de sensores más avanzados que permitan obtener datos más certeros y en tiempo real sobre la salud y el comportamiento del ganado resulta fundamental. También se requiere mejorar los algoritmos de machine learning para gestionar mejor la variabilidad del dato, y ofrecer predicciones más certeras y prácticas (Fuentes et al., 2020). Desarrollar sistemas de

gestión de datos que sean capaces de integrar y analizar datos provenientes de múltiples fuentes de forma práctica y efectiva también resulta esencial. Llevar a cabo modelos predictivos que puedan prevenir problemas de salud y de comportamiento del ganado, permitiendo así actuaciones tempranas para mejorar el estado del animal, es otra de las áreas clave (Rodrigues, 2020).

También, el diseño de las interfaces de los usuarios que sean intuitivas y fáciles de usar, y que proporcionen a los ganaderos la información que necesitan de un modo claro y accesible resulta crucial para la adopción de estas tecnologías. Realizar estudios de caso y pruebas piloto para observar el valor y la efectividad de las tecnologías de precisión en diferentes contextos y tipos de ganadería también es clave (Marufuzzaman et al., 2021). También se requiere investigación y desarrollo de políticas y regulaciones que apoyen la adopción de las tecnologías de precisión en la ganadería, garantizando que se cumplan los estándares de seguridad y privacidad, lo cual es clave para el éxito de la implementación de estas tecnologías a largo plazo (Landy et al., 2020). La ganadería de precisión presenta distintos críticos, pero también presenta diferentes oportunidades para mejorar la eficiencia, el bienestar animal y la rentabilidad, las investigaciones futuras deben centrarse en comprender esos críticos y en dar solución a través de soluciones innovadoras en busca de la adopción de estas por los ganaderos.

P3: ¿Cuáles son los desafíos y áreas clave para futuras investigaciones en la implementación de estas tecnologías en la ganadería de precisión?

Los principales desafíos incluyen mejorar la precisión de los modelos predictivos, integrar datos provenientes de múltiples fuentes sensoriales y superar limitaciones tecnológicas asociadas al costo y disponibilidad de sensores avanzados. También es crucial desarrollar sistemas adaptados a las condiciones específicas del entorno ganadero. Áreas clave para futuras investigaciones incluyen el perfeccionamiento de algoritmos para manejar incertidumbres en los datos, la personalización del monitoreo a nivel individual y la capacitación técnica para los productores ganaderos.

4. Discusión

El debate en torno a la puesta en marcha de tecnologías relacionadas con el aprendizaje automático y de sensores inteligentes para una buena gestión del estrés en el ganado bovino, está ofreciendo un panorama altamente satisfactorio en pro de una mejora de la salud y de la calidad del bienestar animal. De hecho, la ganadería bovina se a tener que enfrentar a retos más que ostensible sobre el estrés térmico y sobre las condiciones de salud, por tanto, la incorporación de esas tecnologías emergentes implica la aparición de un posible y suficiente remedio.

4.1 Impacto de las Tecnologías en la Detección del Estrés

Los estudios revisados, como el de Becker et al. (2021), indican que el uso de algoritmos de aprendizaje automático, como el de Random Forest, ha permitido a los productores de ganado lechero predecir el estrés térmico con mayor precisión. Tener la capacidad de detectar y reducir los efectos negativos del estrés por calor no sólo mejora la salud animal, sino que también aumenta la producción de leche, lo cual es importante para la rentabilidad de las explotaciones ganaderas. La integración de sensores, como los de temperatura corporal y frecuencia respiratoria, proporciona datos en tiempo real que son fundamentales para la toma de decisiones informadas. Además, el trabajo de Lardy et

al. (2023) resalta la importancia de los datos de actividad obtenidos de sensores para discriminar entre diversas condiciones patológicas y de estrés. Este enfoque no solo mejora la gestión del ganado, sino que también permite a los veterinarios y productores identificar problemas antes de que se conviertan en crisis, promoviendo un enfoque proactivo en la salud animal.

4.2 Algoritmos Efectivos y su Aplicación

El análisis de los algoritmos utilizados para clasificar los estados de salud (que se muestran en la Tabla 2), así como técnicas como SVM y ANN han demostrado ser efectivas para predecir condiciones de salud complejas. Estos algoritmos son especialmente útiles para clasificar datos complejos y detectar patrones invisibles a simple vista. Por ejemplo, las redes neuronales pueden procesar grandes cantidades de datos y probar patrones; Esto es importante en áreas con datos heterogéneos. También es importante la alta precisión del algoritmo GBM a la hora de predecir la salud y el estrés térmico. Este modelo permite la mejora continua mediante la combinación de múltiples árboles de decisión, lo que garantiza una buena distribución de la información.

4.3 Desafíos en la Implementación de Tecnologías

A pesar de las evidentes ventajas, el despliegue de estas innovaciones tropieza con numerosos obstáculos. Una de las principales barreras es la fusión de información de diversos orígenes. "La diversidad de datos y la ausencia de protocolos uniformes hacen que la interoperabilidad sea un desafío, lo que limita la capacidad de los sistemas para intercambiar información de manera efectiva". Otro obstáculo considerable tiene que ver con el calibre y la precisión de la información recopilada por los sensores. Las variables ecológicas y técnicas pueden influir en la precisión de estas cifras, lo que podría provocar elecciones erróneas. Por lo tanto, es importante hacer que los sensores sean más confiables y crear formas de corregir errores en los datos, como recomienda la investigación de Landy et al. (2020).

4.4 Futuras Direcciones de Investigación

Entre áreas clave para investigar en el futuro está el desarrollo de sensores avanzados que puedan proporcionar datos en tiempo real más precisos sobre la salud y el comportamiento del ganado. También es importante mejorar los algoritmos de aprendizaje automático, para que puedan trabajar con una mayor variabilidad de los datos y, por lo tanto, hacer predicciones más útiles. Otra prioridad es la creación de sistemas de gestión de datos eficientes, que puedan integrar y analizar la información de diferentes fuentes. También puede ser que la adopción de nuevas tecnologías sea lenta, ya que los ganaderos pueden carecer de conocimientos técnicos y ser resistentes al cambio. Por lo tanto, es necesario desarrollar interfaces de uso agradables y accesibles, para que no se requieran habilidades especializadas para utilizarlas, además de ofrecer programas de capacitación.

5. Conclusiones

La integración de sensores inteligentes y algoritmos de aprendizaje automático está impulsando una transformación significativa en la ganadería, permitiendo un manejo más eficiente, preciso y proactivo del bienestar animal, especialmente en lo referente al estrés térmico. Este enfoque no solo mejora las condiciones de vida del ganado, sino que también incrementa la productividad y sostenibilidad de los sistemas de producción.

Algoritmos como Random Forest (RF), XGBoost y Support Vector Machine (SVM) se destacan como herramientas clave para la clasificación de estados de salud y detección del estrés en bovinos. Su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos con alta precisión los convierte en aliados fundamentales en el análisis automatizado de indicadores fisiológicos y conductuales.

No obstante, la implementación efectiva de estas tecnologías enfrenta desafíos prácticos y técnicos, entre los cuales se incluyen la integración heterogénea de datos, la accesibilidad a infraestructura tecnológica y la disponibilidad de personal capacitado para su manejo. La superación de estos obstáculos es crucial para maximizar el impacto de la inteligencia artificial en la gestión ganadera.

Este artículo muestra que las tecnologías basadas en inteligencia artificial y sensores inteligentes tienen un papel fundamental en la detección temprana y monitoreo continuo del estrés bovino. Aunque ya se han alcanzado avances prometedores mediante el uso de algoritmos como RF y XGBoost, persisten retos que requieren atención para consolidar su aplicación a gran escala. A medida que estas herramientas continúen evolucionando, es previsible una transformación integral en la ganadería hacia modelos más sostenibles, centrados en el bienestar animal y orientados a una mayor eficiencia productiva.

Referencias Bibliográficas

- Balasso, P., Marchesini, G., Ughelini, N., Serva, L., Y Andrighetto, I. (2021). Machine learning to detect posture and behavior in dairy cows: Information from an accelerometer on the animal's left flank. *Animals*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/ani11102972>
- Balasso, P., Taccioli, C., Serva, L., Magrin, L., Andrighetto, I., Y Marchesini, G. (2023). Uncovering Patterns in Dairy Cow Behaviour: A Deep Learning Approach with Tri-Axial Accelerometer Data. *Animals*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/ani13111886>
- Becker, C. A., Aghalari, A., Marufuzzaman, M., Y Stone, A. E. (2021). Predicting dairy cattle heat stress using machine learning techniques. *Journal of Dairy Science*, 104(1), 501–524. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18653>
- Brouwers, S. P., Simmler, M., Savary, P., Y Scriba, M. F. (2023). Towards a novel method for detecting atypical lying down and standing up behaviors in dairy cows using accelerometers and machine learning. *Smart Agricultural Technology*, 4(November 2022), 100199. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100199>
- Cantor, M. C., Casella, E., Silvestri, S., Renaud, D. L., Y Costa, J. H. C. (2022). Using Machine Learning and Behavioral Patterns Observed by Automated Feeders and Accelerometers for

- the Early Indication of Clinical Bovine Respiratory Disease Status in Preweaned Dairy Calves. *Frontiers in Animal Science*, 3(July), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.852359>
- Carslake, C., Vázquez-Diosdado, J. A., Y Kaler, J. (2021). Machine learning algorithms to classify and quantify multiple behaviours in dairy calves using a sensor—moving beyond classification in precision livestock. *Sensors (Switzerland)*, 21(1), 1–14. <https://doi.org/10.3390/s21010088>
- Chapman, N. H., Chlingaryan, A., Thomson, P. C., Lomax, S., Islam, M. A., Doughty, A. K., Y Clark, C. E. F. (2023a). A deep learning model to forecast cattle heat stress. *Computers and Electronics in Agriculture*, 211(March), 107932. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107932>
- Chaudhry, A. A., Mumtaz, R., Hassan Zaidi, S. M., Tahir, M. A., Y Muzammil School, S. H. (2020). Internet of Things (IoT) and Machine Learning (ML) enabled Livestock Monitoring. *HONET 2020 - IEEE 17th International Conference on Smart Communities: Improving Quality of Life Using ICT, IoT and AI, May 2004*, 151–155. <https://doi.org/10.1109/HONET50430.2020.9322666>
- Da, A. V., Y Rodrigues, S. (2022). *Avaliação não invasiva do estresse térmico de bovinos: uma abordagem baseada em aprendizado de máquina e termografia de infravermelho*.
- Dac, H. H., Viejo, C. G., Lipovetzky, N., Tongson, E., Dunshea, F. R., Y Fuentes, S. (2022). Livestock Identification Using Deep Learning for Traceability. *Sensors*, 22(21). <https://doi.org/10.3390/s22218256>
- Dang, T. H., Nkenyereye, L., Tran, V. T., Y Chung, W. Y. (2024). Self-Powered Cattle Behavior Monitoring System Using 915 MHz Radio Frequency Energy Harvesting. *IEEE Access*, 12, 33779–33791. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3360852>
- Darvesh, K., Khande, N., Avhad, S., Y Khemchandani, M. (2023). IOT and AI based smart cattle health monitoring. *Journal of Livestock Science*, 14(3), 211–218. <https://doi.org/10.33259/jlivestsci.2023.211-218>
- Dineva, K., Y Atanasova, T. (2023a). *and Data Management on AWS Cloud*.
- Dineva, K., Y Atanasova, T. (2023b). Health Status Classification for Cows Using Machine Learning and Data Management on AWS Cloud. *Animals*, 13(20). <https://doi.org/10.3390/ani13203254>
- Ding, L., Lv, Y., Jiang, R., Zhao, W., Li, Q., Yang, B., Yu, L., Ma, W., Gao, R., Y Yu, Q. (2022). Predicting the Feed Intake of Cattle Based on Jaw Movement Using a Triaxial Accelerometer. *Agriculture (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/agriculture12070899>
- El Moutaouakil, K., Y Falih, N. (2024). A comparative study on time series data-based artificial intelligence approaches for classifying cattle feeding behavior. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 33(1), 324–332. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i1.pp324-332>

- Fadul-Pacheco Liliana, Delgado Hector, Y Cabrera Victor E. (2021). *Exploring machine learning algorithms for early prediction of clinical mastitis*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958694621000790>
- Fuentes, S., Gonzalez Viejo, C., Tongson, E., Y Dunshea, F. R. (2022). The livestock farming digital transformation: implementation of new and emerging technologies using artificial intelligence. In *Animal Health Research Reviews* (Vol. 23, Issue 1, pp. 59–71). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S1466252321000177>
- Fuentes, S., Viejo, C. G., Cullen, B., Tongson, E., Chauhan, S. S., Y Dunshea, F. R. (2020). Artificial intelligence applied to a robotic dairy farm to model milk productivity and quality based on cow data and daily environmental parameters. *Sensors (Switzerland)*, 20(10). <https://doi.org/10.3390/s20102975>
- Ghafoor, N. A., Y Sitkowska, B. (2021). MasPA: A Machine Learning Application to Predict Risk of Mastitis in Cattle from AMS Sensor Data. *AgriEngineering*, 3(3), 575–583. <https://doi.org/10.3390/agriengineering3030037>
- Giannuzzi, D., Mota, L. F. M., Pegolo, S., Gallo, L., Schiavon, S., Tagliapietra, F., Katz, G., Fainboym, D., Minuti, A., Trevisi, E., Y Cecchinato, A. (2022). In-line near-infrared analysis of milk coupled with machine learning methods for the daily prediction of blood metabolic profile in dairy cattle. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11799-0>
- Gorczyca, M. T., Y Gebremedhin, K. G. (2020). Ranking of environmental heat stressors for dairy cows using machine learning algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105124>
- Halachmi, I., Guarino, M., Bewley, J., Y Pastell, M. (2019). Smart Animal Agriculture: Application of Real-Time Sensors to Improve Animal Well-Being and Production. *Annual Review of Animal Biosciences*, 7, 403–425. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-020518-114851>
- Hernández, G., González-Sánchez, C., González-Arrieta, A., Sánchez-Brizuela, G., Y Fraile, J. C. (2024). Machine Learning-Based Prediction of Cattle Activity Using Sensor-Based Data. *Sensors*, 24(10). <https://doi.org/10.3390/s24103157>
- Higaki, S., Darhan, H., Suzuki, C., Suda, T., Sakurai, R., Y Yoshioka, K. (n.d.). An attempt at estrus detection in cattle by continuous measurements of ventral tail base surface temperature with supervised machine learning. In *Technology Report-Journal of Reproduction and Development* (Vol. 67, Issue 1).
- Hosseininoorbin, S., Layeghy, S., Kusy, B., Jurdak, R., Bishop-Hurley, G. J., Greenwood, P. L., Y Portmann, M. (2021). Deep learning-based cattle behaviour classification using joint time-frequency data representation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106241>
- Islam, M. A., Lomax, S., Doughty, A., Islam, M. R., Jay, O., Thomson, P., Y Clark, C. (2021). Automated Monitoring of Cattle Heat Stress and Its Mitigation. *Frontiers in Animal Science*, 2(October), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.737213>

- Lardy, R., Ruin, Q., Y Veissier, I. (2023). Discriminating pathological, reproductive or stress conditions in cows using machine learning on sensor-based activity data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204(December 2022), 107556. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107556>
- Li, Y., Shu, H., Bindelle, J., Xu, B., Zhang, W., Jin, Z., Guo, L., Y Wang, W. (2022). Classification and Analysis of Multiple Cattle Unitary Behaviors and Movements Based on Machine Learning Methods. *Animals*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/ani12091060>
- Liseune, A., den Poel, D. Van, Hut, P. R., van Eerdenburg, F. J. C. M., Y Hostens, M. (2021). Leveraging sequential information from multivariate behavioral sensor data to predict the moment of calving in dairy cattle using deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106566>
- Magana, J., Gavojdian, D., Menahem, Y., Lazebnik, T., Zamansky, A., Y Adams-Progar, A. (2023). Machine learning approaches to predict and detect early-onset of digital dermatitis in dairy cows using sensor data. *Frontiers in Veterinary Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1295430>
- Marques, T. C., Marques, L. R., Fernandes, P. B., de Lima, F. S., do Prado Paim, T., Y Leão, K. M. (2024). Machine Learning to Predict Pregnancy in Dairy Cows: An Approach Integrating Automated Activity Monitoring and On-Farm Data. *Animals*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/ani14111567>
- Martono, N. P., Sawado, R., Nonaka, I., Terada, F., Y Ohwada, H. (2023). *Automated Cattle Behavior Classification Using Wearable Sensors and Machine Learning Approach* (Issue November). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7855-7_5
- Miller, G. A., Mitchell, M., Barker, Z. E., Giebel, K., Codling, E. A., Amory, J. R., Michie, C., Davison, C., Tachtatzis, C., Andonovic, I., Y Duthie, C. A. (2020). Using animal-mounted sensor technology and machine learning to predict time-to-calving in beef and dairy cows. *Animal*, 14(6), 1304–1312. <https://doi.org/10.1017/S1751731119003380>
- Neethirajan, S. (2020). The role of sensors, big data and machine learning in modern animal farming. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 29(July), 100367. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2020.100367>
- Nogoy, K. M. C., Park, J., Chon, S. Il, Sivamani, S., Park, M. J., Cho, J. P., Hong, H. K., Lee, D. H., Y Choi, S. H. (2021). Precision detection of real-time conditions of dairy cows using an advanced artificial intelligence hub. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(24). <https://doi.org/10.3390/app112412043>
- Patel, H., Samad, A., Hamza, M., Muazzam, A., Y Harahap, M. K. (2022). Role of Artificial Intelligence in Livestock and Poultry Farming. *Sinkron*, 7(4), 2425–2429. <https://doi.org/10.33395/sinkron.v7i4.11837>
- Pedrosa, V. B., Chen, S.-Y., Gloria, L. S., Doucette, J. S., Boerman, J. P., Rosa, G. J. M., Y Brito, L. F. (2024). Machine learning methods for genomic prediction of cow behavioral traits measured by automatic milking systems in North American Holstein cattle. *Journal of Dairy Science*. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24082>

- Riaboff, L., Poggi, S., Madouasse, A., Couvreur, S., Aubin, S., Bédère, N., Goumand, E., Chauvin, A., Y Plantier, G. (2020). Development of a methodological framework for a robust prediction of the main behaviours of dairy cows using a combination of machine learning algorithms on accelerometer data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105179>
- Rodríguez-Ramos, A., Verde, C., Y Llanes-Santiago, O. (n.d.). *An integrated monitoring system based on deep learning tools for industrial process* ★.
- Romanzini, E. P., Watanabe, R. N., Fonseca, N. V. B., Berça, A. S., Brito, T. R., Bernardes, P. A., Munari, D. P., Y Reis, R. A. (2022). Modern livestock farming under tropical conditions using sensors in grazing systems. *Scientific Reports*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06650-5>
- Sawada, T., Uchino, T., Martono, N. P., Y Ohwada, H. (2023). Efficient Estimation of Cow's Location Using Machine Learning Based on Sensor Data. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*, 477 LNICST, 86–94. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29126-5_7
- Schmeling, L., Elmamooz, G., Hoang, P. T., Kozar, A., Nicklas, D., Sünkel, M., Thurner, S., Y Rauch, E. (2021). Training and validating a machine learning model for the sensor-based monitoring of lying behavior in dairy cows on pasture and in the barn. *Animals*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/ani11092660>
- Setiamy, A. A., Y Deliani, E. (2019). *No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title*. 2(May), 5–10.
- Shorten, P. R. (2023). Acoustic sensors for detecting cow behaviour. *Smart Agricultural Technology*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100071>
- Shu, H., Li, Y., Bindelle, J., Jin, Z., Fang, T., Xing, M., Y Wang, W. (n.d.). *Predicting physiological responses of dairy cows using comprehensive variables 1*.
- Stygar, A. H., Frondelius, L., Berteselli, G. V., Gómez, Y., Canali, E., Niemi, J. K., Llonch, P., Y Pastell, M. (2023). Measuring dairy cow welfare with real-time sensor-based data and farm records: a concept study. *Animal*, 17(12). <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.101023>
- Surana, J., Y Sharma, S. K. (n.d.). International Journal of INTELLIGENT SYSTEMS AND APPLICATIONS IN ENGINEERING Predicting Cow Health with a Smart Framework: A Big Data and Deep Learning-Based IoT Approach. In *Original Research Paper International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering IJISAE* (Vol. 2024, Issue 12s, pp. 487–499). www.ijisae.org
- Tedeschi, L. O., Greenwood, P. L., Y Halachmi, I. (2021). Advancements in sensor technology and decision support intelligent tools to assist smart livestock farming. *Journal of Animal Science*, 99(2), 1–11. <https://doi.org/10.1093/jas/skab038>
- Tekin, K., Yurdakök-Dikmen, B., Kanca, H., Y Guatteo, R. (2021). Precision livestock farming technologies: Novel direction of information flow. *Ankara Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, 68(2), 193–212. <https://doi.org/10.33988/auvfd.837485>

- Tian, F., Wang, J., Xiong, B., Jiang, L., Song, Z., Y Li, F. (2021). Real-Time Behavioral Recognition in Dairy Cows Based on Geomagnetism and Acceleration Information. *IEEE Access*, 9, 109497–109509. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3099212>
- Tran, D. N., Nguyen, T. N., Khanh, P. C. P., Y Trana, D. T. (2021). An IoT-based Design Using Accelerometers in Animal Behavior Recognition Systems. *IEEE Sensors Journal*. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3051194>
- Veissier, I., Lardy, R., Mialon, M.-M., Ruin, Q., Antoine, V., Y Koko, J. (n.d.). *Machine Learning applied to behaviour monitoring to detect diseases, reproductive events and disturbances in dairy cows Machine Learning appliqué au suivi du comportement pour identifier maladies, états reproductifs et perturbations des vaches laitières* (Issue 1). <https://hal.inrae.fr/hal-03943072>
- Vidal, G., Sharpnack, J., Pinedo, P., Tsai, I. C., Lee, A. R., Y Martínez-López, B. (2023). Comparative performance analysis of three machine learning algorithms applied to sensor data registered by a leg-attached accelerometer to predict metritis events in dairy cattle. *Frontiers in Animal Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1157090>
- Wagner, N., Antoine, V., Mialon, M.-M., Lardy, R., Silberberg, M., Koho, J., Veissier, I., Y Koko, J. (2020). Machine learning to detect behavioural anomalies in dairy cows under subacute ruminal acidosis Machine learning to detect behavioural anomalies in dairy cows under subacute ruminal acidosis Metabolic disease Data mining Real-Time Locating System. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 10. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105233>
- Watanabe, R. N., Bernardes, P. A., Romanzini, E. P., Teobaldo, R. W., Reis, R. A., Munari, D. P., Braga, L. G., Y Brito, T. R. (2021). Strategy to predict high and low frequency behaviors using triaxial accelerometers in grazing of beef cattle. *Animals*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/ani11123438>
- Woodward, S. J. R., Edwards, J. P., Verhoek, K. J., Y Jago, J. G. (2024). *JDS Communications® TBC; TBC Identifying and predicting heat stress events for grazing dairy cows using rumen temperature boluses*. <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
- Zhang, Y., Zhang, Y., Gao, M., Dai, B., Kou, S., Fu, X., Y Shen, W. (n.d.). *Digital twin perception and modeling method for 2 feeding behavior of dairy cows*. <https://ssrn.com/abstract=4463418>
- Zhou, X., Xu, C., Wang, H., Xu, W., Zhao, Z., Chen, M., Jia, B., Y Huang, B. (2022). The Early Prediction of Common Disorders in Dairy Cows Monitored by Automatic Systems with Machine Learning Algorithms. *Animals*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/ani12101251>

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del grupo de investigación, así como de los Ingenieros Erika Talcán, David Cisneros, y Brayan Andrade.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

