

ISBN: 978-9942-609-82-3

VET-TECH:

La Revolución de la Medicina Veterinaria
INTEGRATIVA y DIGITAL
TOMO II



AUTOR

Oscar Darwin Criollo Salinas



Instituto de Investigaciones
Transdisciplinarias Ecuador - BINARIO

EDITORIAL BINARIO

Mgs. Susgein Julissa Miranda Cansing

Directora ejecutiva

Lcdo. Wilfrido Rosero Chávez

Gerente operaciones generales

Dra. Sherline Chirinos

Directora de publicaciones y revistas

Lcda. Greguis Reolón Ríos

Directora de marketing y RRSS

La revisión técnica de los documentos correspondió
a especialistas expertos en el área.

ISBN:

978-9942-609-82-3

1era. Edición, septiembre 2026.

Edición con fines educativos no lucrativos

Hecho en Ecuador

Diseño y Tipografía: Greguis Reolón Ríos

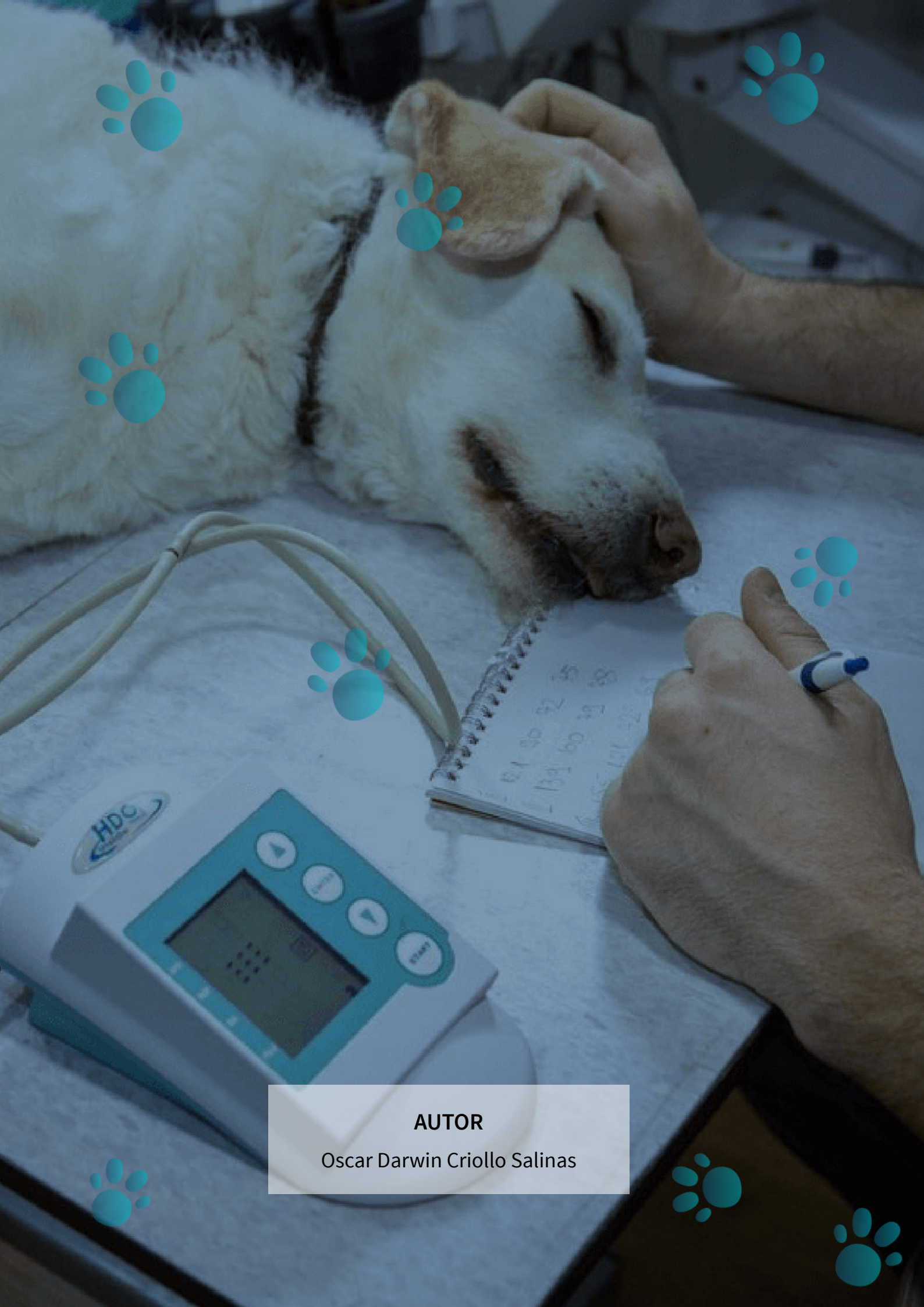
Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización previa por escrito al Instituto de Investigaciones Transdisciplinarias Ecuador (BINARIO).

Instituto de Investigaciones
Transdisciplinarias Ecuador - BINARIO

Cel.: +593 99 571 2751

<http://www.binario.com.ec>





AUTOR

Oscar Darwin Criollo Salinas

PRÓLOGO

La medicina veterinaria se encuentra en un momento de transformación sin precedentes en su historia. A lo largo de varias décadas, el avance en el ámbito clínico se ha logrado mediante la mejora progresiva de las técnicas de diagnóstico físico y el desarrollo de terapias farmacológicas convencionales. No obstante, la convergencia actual entre la aceleración tecnológica y la reevaluación de los modelos fisiológicos globales requiere una transformación estructural en el ejercicio de esta profesión.

No se trata de una simple actualización de herramientas; se está ante la presencia del surgimiento de un nuevo paradigma en la atención de los animales: la integración de la salud virtual y la medicina integrativa.

El concepto de VET-TECH va más allá de la simple inclusión de dispositivos o programas informáticos en la práctica cotidiana. Se presenta un ecosistema en el cual la precisión analítica de la inteligencia artificial, la conectividad en tiempo real del Internet de las Cosas Médicas Veterinarias (IoMT) y la riqueza biomédica de las terapias reguladoras se integran en beneficio del paciente.

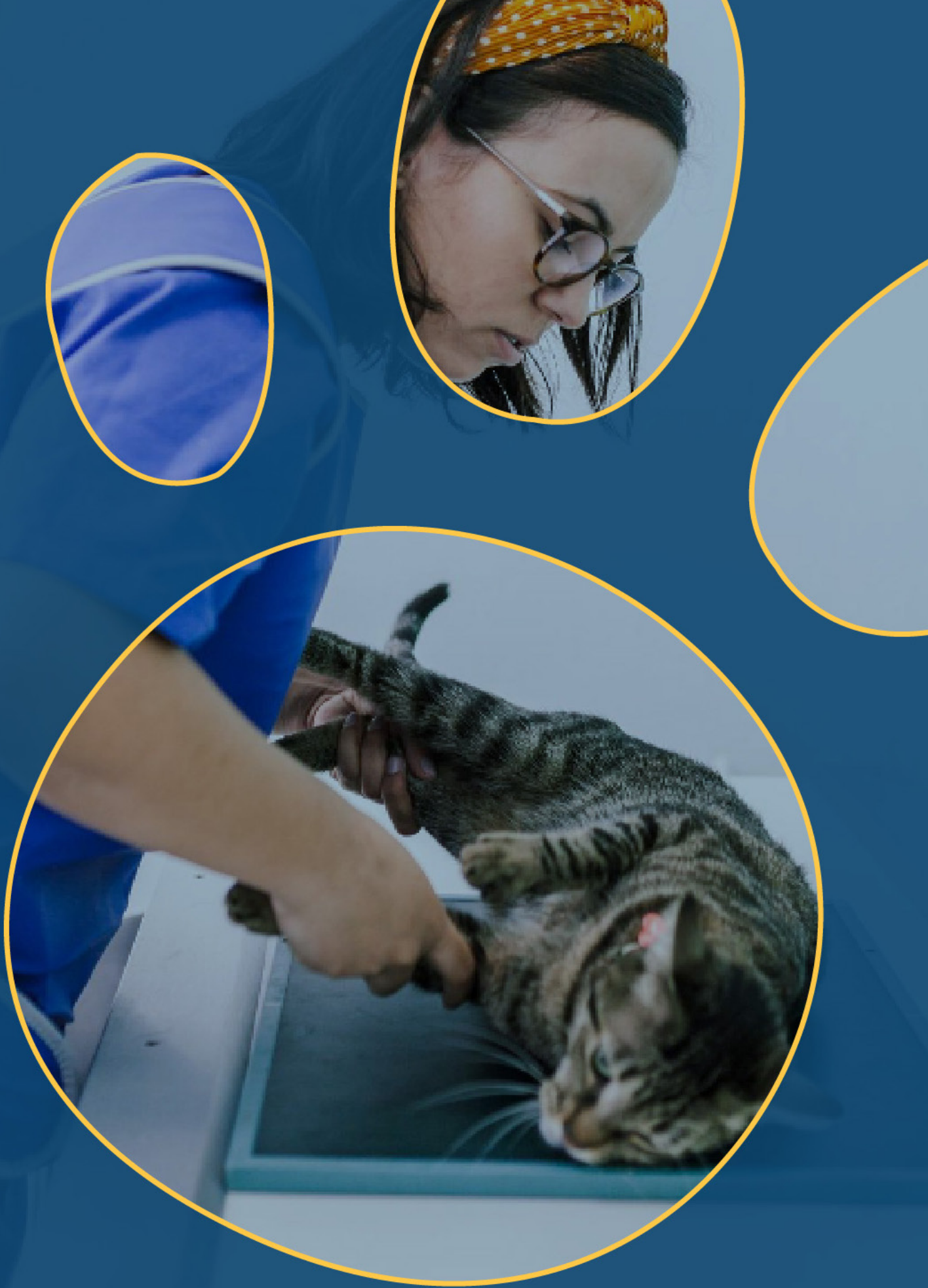
Lejos de separar al clínico de la realidad biológica del animal, la tecnología, cuando se aplica adecuadamente, actúa como un potenciador de la capacidad diagnóstica y como un facilitador de la empatía, permite la transición de una medicina predominantemente reactiva, centrada en la gestión tardía de la enfermedad, a una medicina predictiva, preventiva, individualizada y participativa.

Paralelamente a este avance tecnológico, la investigación científica ha iniciado a validar y sistematizar enfoques terapéuticos que, tradicionalmente, han permanecido al margen de la educación formal. La fotobiomodulación, la modulación del sistema endocannabinoide, la fitoterapia clínica y la ozonoterapia, basadas en la fisiología de la regulación biológica y

la matriz extracelular, constituyen alternativas esenciales para el tratamiento de patologías complejas, crónicas o tumorales.

La integración rigurosa y fundamentada en evidencia de estas disciplinas, junto con las terapias tradicionales, no constituye una opción estética, sino que representa un requisito metodológico para mejorar la calidad de vida de los pacientes.

Este libro tiene como objetivo establecer un vínculo entre dos ámbitos que, durante años, han parecido distantes: la sofisticación algorítmica y el respeto por los mecanismos de autorregulación del organismo. Abordar esta encrucijada demanda un enfoque académico riguroso, una apertura conceptual y una sólida convicción en materia de bioética. La tecnología, cuando carece de un criterio clínico adecuado, puede transformarse en un ruido estéril. Asimismo, la medicina integrativa que no cuenta con un respaldo científico puede derivar en un empirismo desordenado. La propuesta central de esta obra consiste en integrar ambas dimensiones dentro de un marco teórico sólido y aplicable, con el objetivo de guiar al clínico, al investigador y al estudiante en la edificación de la veterinaria contemporánea.



AUTOR



OSCAR DARWIN CRIOLLO SALINAS

Doctor en Medicina Veterinaria y Zootecnia
ocriollo46@gmail.com

Formación académica como Doctor en Medicina Veterinaria y Zootecnia, Magister en cirugía de tejidos blandos en pequeñas especies, diplomados en cirugía avanzada de tejidos blandos, cirugía oncológica, Docente en ciencias veterinarias como fisiología, biología y producción animal, Director de la Clínica Veterinaria Wolf, Gerente de Insval Instituto del Valle, su desempeño y experiencia laboral destaca actividades en clínica con especies domésticas y en campo con especies de producción, transmitiendo siempre el respeto a la naturaleza y sobre todo el bienestar animal, con buenas prácticas veterinarias.

ÍNDICE

PRÓLOGO	4
---------------	---

AUTOR 6

ÍNDICE DE TABLAS	10
------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS	10
-------------------------	----

INTRODUCCIÓN	12
--------------------	----

Capítulo I. Transformación digital y el ecosistema VET-TEC	16
---	-----------

1.1. Fundamentos de la salud digital veterinaria (<i>e-Health</i>) y telemedicina	16
---	----

1.2. El Internet de las Cosas Médicas Veterinarias (IoMT / IoVMT) y Dispositivos Wearables.	21
---	----

1.3. Big Data, Interoperabilidad y la Historia Clínica Electrónica Interconectada	27
---	----

Capítulo II. Inteligencia artificial y big data en el diagnóstico veterinario	34
--	-----------

2.1. Algoritmos de Aprendizaje Automático (*Machine Learning*) y Diagnóstico Predictivo	34
--	----

2.2. Visión por Computadora: IA Aplicada al Diagnóstico por Imagen en Medicina Veterinaria	53
---	----

2.3. Ciología Digital, Hematología Automatizada e Inteligencia Artificial en el Laboratorio Clínico Veterinario	62
--	----

Capítulo III. Fundamentos de la medicina veterinaria integrativa y práctica basada en la evidencia.....	75
--	-----------

3.1. Epistemología de la Medicina Integrativa y el Modelo One Health (Una Sola Salud)75	
---	--

3.2. Fisiología de la Regulación Biológica y Bionutrición Avanzada	86
--	----

Capítulo IV. Terapias avanzadas e integrativas en el paciente oncológico y crónico 98

- 4.1. Fitoterapia clínica y uso reconstructivo de extractos botánicos en oncología 99
- 4.2. Sistema endocannabinoide y aplicación terapéutica de fitocannabinoides..... 104
- 4.3. Terapias bio-oxidativas: Ozonoterapia veterinaria y terapias de soporte 108
- 4.4. Modulación física del dolor: Fotobiomodulación (Láser Clase IV) y magnetoterapia 113

Capítulo V. Monitoreo digital y wearables en la recuperación del paciente..... 120

- 5.1. Telemonitoreo de variables fisiológicas y biomarcadores digitales en tiempo real121
- 5.2. Evaluación tecnológica del bienestar y la movilidad: Actigrafía y análisis de marcha digital 127

Capítulo VI. Bioética y sostenibilidad de la práctica veterinaria..... 135

- 6.1. Bioética en la era de la inteligencia artificial veterinaria y la salud digital..... 135

BIBLIOGRAFÍA 143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aspectos FODA de la telemedicina	19
Tabla 2. Viabilidad operativa del IoVMT basada en cada dispositivo	23
Tabla 3. Protocolos estandarizados VET-TECH	29
Tabla 4. Comparativa de terapias avanzadas e integrativas	117
Tabla 5. Síntesis de biomarcadores digitales y monitoreo IoMT	132
Tabla 6. Esferas del modelo de responsabilidad compartida	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mediadores del proceso caquético	102
Figura 2. Diagrama de movimiento cinemático del animal	128



INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El ejercicio de la medicina veterinaria en la tercera década del siglo XXI requiere la integración de conocimientos multidisciplinarios que sean capaces de abordar la complejidad del paciente contemporáneo. La rápida evolución de las tecnologías de la información y la comunicación, junto con las exigencias de cuidadores de animales de compañía cada vez más informados, ha reconfigurado las dinámicas de la atención clínica.

En este contexto, el presente libro examina la transformación digital no como un objetivo en sí mismo, sino como el sistema de soporte esencial para una medicina integrativa de alta precisión, fundamentada en el enfoque One Health y en la exactitud científica de la técnica basada en la evidencia.

A lo largo de sus páginas, este libro presenta una propuesta metodológica y conceptual que orienta al lector desde los fundamentos tecnológicos hasta las implicaciones bioéticas de su aplicación. La secuencia de los contenidos ha sido elaborada de manera sistemática, lo que permite entender de qué manera la recopilación e interpretación de datos fisiológicos impacta directamente en las estrategias terapéuticas y en el bienestar en el futuro de los animales domésticos.

El desarrollo doctrinal comienza en el **Capítulo I**, en el cual se define la transformación digital y se analiza el ecosistema VET-TECH. En este bloque inicial se establecen los principios de la salud digital veterinaria (*e-Health*) y los marcos de la telemedicina, definiendo sus alcances y valor operativo. Se lleva a cabo un análisis de la integración del Internet de las Cosas Médicas Veterinarias (IoMT) y la biotelemedicina mediante dispositivos portátiles, evidenciando de qué manera la monitorización continua transforma el registro puntual en una serie de datos fisiológicos dinámicos. El capítulo finaliza con un análisis del Big Data, la interoperabilidad y la arquitectura de las historias clínicas digitales interconectadas, elementos fundamentales en el proceso de estandarización de la información médica.

A continuación, el **Capítulo II** se enfoca en el análisis de la inteligencia artificial y el procesamiento masivo de datos en relación con el diagnóstico veterinario. Se analizan los algoritmos de aprendizaje automático orientados al diagnóstico predictivo y a la identificación temprana de patrones patológicos. La exposición abarca la visión por computadora y la aplicación de estructuras neuronales convolucionales en el análisis de imágenes radiológicas y ecográficas. Asimismo, se aborda el avance significativo que reflejan la citología digital y la hematología automatizada en la medicina clínica de laboratorio, lo cual optimiza las velocidades de respuesta y mejora la precisión diagnóstica.

Una vez que se ha establecido la base tecnológica, el **Capítulo III** analiza los fundamentos de la medicina veterinaria integrativa y la práctica basada en la evidencia. En esta sección, se aborda la epistemología de las terapias complementarias y su relación con el modelo One Health, subrayando la interconexión entre la salud humana, animal y ambiental. Se realiza un análisis exhaustivo de la fisiología de la regulación biológica, la matriz extracelular y la bionutrición avanzada, lo cual proporciona el fundamento fisiopatológico que refuerza la utilización de moduladores inmunometabólicos en patologías complejas.

El **Capítulo IV** aplica estos conceptos en el ámbito clínico, centrándose en las terapias avanzadas e integrativas dirigidas a pacientes oncológicos y crónicos. Se expone el uso reconstructivo de la fitoterapia clínica, así como el ajuste del microambiente tumoral a través de extractos botánicos estandarizados. A continuación, se procederá a analizar la fisiología del sistema endocannabinoide, así como la farmacodinámica de los fitocannabinoides en la gestión del dolor refractario y el control de síntomas. El capítulo finaliza con un análisis de los métodos biológicos oxidativos, tales como la ozonoterapia, así como la aplicación de agentes físicos no invasivos para la modulación del dolor, en particular la fotobiomodulación mediante láser de Clase IV y la magnetoterapia.

La convergencia entre la tecnología de seguimiento y la evaluación funcional se establece de manera sólida en el **Capítulo V**, el cual se centra en el monitoreo digital y la utilización de dispositivos portátiles durante el proceso de recuperación del paciente. Se analizan los

protocolos de telemonitoreo de factores fisiológicos y la identificación de biomarcadores digitales en tiempo real, en el contexto de la hospitalización y el seguimiento postquirúrgico. Aparte de eso, se presenta la evaluación tecnológica de la movilidad y el bienestar a través de la actigrafía acelerométrica y el análisis cinemático de la marcha digital, herramientas que permiten objetivar la evolución de patologías ortopédicas y neurológicas.

El **Capítulo VI** proporciona un marco de reflexión esencial sobre la bioética y la sostenibilidad en la práctica veterinaria actual. En el presente capítulo se examinan las implicaciones deontológicas de la inteligencia artificial, la responsabilidad legal asociada a la toma de decisiones mediada por algoritmos y la prevención de sesgos diagnósticos. Igualmente, se lleva a cabo un análisis de la transformación de la relación entre humanos y animales en entornos virtuales, evaluando los desafíos relacionados con la empatía y la comunicación mediada por pantallas. El capítulo finaliza con un análisis sobre la eco-veterinaria, la huella ambiental de la tecnología médica y la necesidad de establecer límites éticos en relación con la ineficacia terapéutica y la distanasia.



Transformación digital y el ecosistema VET-TEC

CAPÍTULO I.

TRANSFORMACIÓN DIGITAL Y EL ECOSISTEMA VET-TEC

Oscar Darwin Criollo Salinas

1.1. Fundamentos de la salud digital veterinaria (*e-Health*) y telemedicina

1.1.1. Introducción y evolución conceptual de la *e-Health* en la medicina veterinaria

El paradigma de la práctica veterinaria está experimentando una transformación estructural, la cual es impulsada por la convergencia de las tecnologías de la información y la comunicación, la inteligencia artificial y las ciencias biomédicas (Chu et al., 2024). Con frecuencia, la atención veterinaria se ha centrado en la interacción física, presencial e intermitente en clínicas y explotaciones ganaderas. Sin embargo, ha evolucionado hacia un modelo continuo, interconectado y fundamentado en datos. Este cambio de paradigma da lugar al concepto de salud digital veterinaria (*veterinary e-Health*), el cual comprende la integración sistemática de soluciones tecnológicas destinadas al manejo sanitario, la vigilancia epidemiológica, la telemedicina, el monitoreo fisiológico remoto y el análisis predictivo de la calidad de vida animal (Abu-Seida, 2024).

En el contexto de la medicina veterinaria actual, la *e-Health* va más allá de la simple digitalización de los registros clínicos. Se establece un ecosistema sociotécnico en el cual se integran plataformas de compatibilidad de datos, sensores biomédicos, herramientas de análisis avanzado e interfaces de comunicación entre el cliente y el veterinario (Chu et al., 2024):

1. La necesidad de incrementar la efectividad operativa de los servicios veterinarios se presenta en el contexto de una carencia mundial de profesionales clínicos y especialistas (American Veterinary Medical Association, 2021).
2. El cambio sociocultural en los esquemas de cuidado de los animales de compañía ha llevado a la exigencia de una atención que sea individualizada, directa y transparente (Karsch, C., & University of Veterinary Medicine Hannover Research Group, 2026).

3. Las exigencias de la salud pública mundial, en el marco del enfoque One Health, requieren la implementación de sistemas automatizados para la detección temprana de zoonosis y la contención del uso de antimicrobianos (World Organization for Animal Health, 2021).

1.1.2. Taxonomía y marco operativo de las modalidades telemáticas

Con el fin de asegurar el cumplimiento de los estándares legales, éticos y clínicos en la práctica diaria, es fundamental establecer la delimitación taxonómica consensuada por los principales organismos reguladores a nivel mundial, como la American Veterinary Medical Association (2021), la World Veterinary Association (WVA) y la Federation of Veterinarians of Europe (FVE). La telesalud veterinaria se define como el concepto general que abarca todas las aplicaciones tecnológicas dirigidas a la educación, la recopilación de datos y la gestión sanitaria (Abu-Seida, 2024). Este concepto se subdivide en las siguientes modalidades operativas:

- **Telemedicina Veterinaria:** Se refiere a la provisión de servicios médicos veterinarios a través de herramientas digitales interactivas, ya sea en tiempo real o mediante el método de almacenamiento y reenvío. Incluye el diagnóstico, la formulación de planes terapéuticos y el monitoreo de condiciones patológicas. Por imperativo ético y legal en la mayoría de las jurisdicciones, la telemedicina veterinaria requiere la existencia previa de una relación acreditada entre el cliente, el veterinario y el paciente (RCVPA) o Veterinary Client-Patient Relationship (VCPR) (American Veterinary Medical Association, 2021).
- **Teleconsulta:** Se refiere a la interconsulta o asesoramiento a distancia entre dos o más profesionales de la medicina veterinaria, en la cual un especialista proporciona su criterio diagnóstico o terapéutico a un médico clínico responsable del tratamiento. Esta modalidad optimiza el acceso a especialidades complejas, tales como radiología, cardiología y oncología, sin la necesidad de trasladar físicamente al paciente (American Veterinary Medical Association, 2021).
- **Telemonitorización (*m-Health* e IoT):** La recolección y transmisión continua o periódica de variables fisiológicas, tales como la frecuencia cardíaca, la temperatura corporal,

los niveles de glucosa, así como los patrones de movimiento y locomoción, se lleva a cabo mediante dispositivos portátiles, sensores adaptables o dispositivos implantables. Facilita el seguimiento longitudinal de pacientes con enfermedades crónicas o en contextos de producción intensiva (Abu-Seida, 2024).

- **Teletriaje:** Evaluación telemática preliminar destinada a determinar la urgencia de una condición clínica y a orientar al tutor o productor sobre la necesidad de atención veterinaria presencial, ya sea de manera inmediata o programada (American Veterinary Medical Association, 2021).
- **Teleorientación / Teleeducación:** Se proporciona asesoramiento general en relación con la nutrición, el comportamiento, las pautas de vacunación, la desparasitación y la medicina preventiva. Es importante señalar que no se emite un diagnóstico formal ni se prescriben medicamentos que requieran receta médica (American Veterinary Medical Association, 2021; Abu-Seida, 2024).

1.1.3. El vector legal y ético: La Relación Cliente-Veterinario-Paciente Acreditada (RCVPA)

La piedra angular que sustenta la telemedicina veterinaria es la RCVPA (American Veterinary Medical Association, 2021). De acuerdo con la RCVPA, se establece la responsabilidad profesional del veterinario hacia el animal y su supervisor, la cual se basa en un conocimiento exhaustivo del estado de salud del paciente. El debate ético internacional se centra en la cuestión de si la RCVPA puede ser establecida de manera exclusivamente virtual o si es necesario realizar una evaluación física previa de forma obligatoria (Karsch, C., & University of Veterinary Medicine Hannover Research Group, 2026).

En diversas jurisdicciones, incluyendo varios estados de los Estados Unidos y países miembros de la Unión Europea, las directrices regulatorias establecen que el examen físico directo es indispensable para determinar la RCVPA inicial. Se permite el uso de la telemedicina únicamente para el seguimiento posterior de condiciones que hayan sido diagnosticadas previamente durante una consulta presencial (AVMA, 2021). Sin embargo, en circunstancias excepcionales,

tales como áreas geográficas aisladas, catástrofes o pandemias, así como en el contexto de marcos regulatorios emergentes, se han establecido protocolos flexibles que cuentan con el respaldo del uso de sensores de diagnóstico remoto de alta precisión y de inteligencia artificial explicable (Royal College of Veterinary Surgeons, 2023; Chu et al., 2024).

La transgresión de los límites establecidos por la RCVPA telemática implica riesgos significativos (Abu-Seida, 2024):

- Prescripción inapropiada de medicamentos, en particular de antimicrobianos y analgésicos.
- Subdiagnóstico de patologías agudas o dolor oculto debido a la falta de palpación, auscultación o exploración detallada.
- Responsabilidad civil y disciplinaria por negligencia o praxis deficiente en entornos virtuales no homologados.

1.1.4. Análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) de la telemedicina

La implementación de la telemedicina en la práctica clínica diaria requiere una evaluación sistemática de sus capacidades operativas y de las barreras que pueden obstaculizar su adopción (Karsch, C., & University of Veterinary Medicine Hannover Research Group, 2026):

Tabla 1. Aspectos FODA de la telemedicina

Dimensión	Aspectos Clave
Fortalezas	• Reducción drástica del estrés en animales al evitar desplazamientos a la clínica (Abu-Seida, 2024). • Optimización del tiempo del equipo veterinario e incremento de la capacidad de atención rutinaria. • Mejora del seguimiento de pacientes crónicos o posquirúrgicos. • Acceso inmediato a opiniones de especialistas globales (American Veterinary Medical Association, 2021).

Oportunidades	• Integración con analítica predictiva basada en inteligencia artificial e IoT (Chu et al., 2024). • Ampliación de la cobertura sanitaria en regiones rurales o desatendidas. • Nuevos modelos de negocio basados en suscripciones y cuidado de bienestar continuo. • Fortalecimiento de la salud pública mediante el seguimiento epidemiológico digital (World Organization for Animal Health, 2021).
Debilidades	• Incapacidad de realizar un examen físico completo (ausencia de palpación, auscultación y olfacción) (Abu-Seida, 2024). • Dependencia crítica de la calidad técnica del equipo, conectividad y destreza digital del usuario. • Dificultad para valorar signos sutiles de dolor o alteración comportamental en vídeos de baja resolución. • Expectativa de gratuidad por parte del cliente en servicios telemáticos basados en texto (Karsch, C., & University of Veterinary Medicine Hannover Research Group, 2026).
Amenazas	• Intrusismo profesional por parte de plataformas no reguladas o consultores no acreditados. • Incertidumbre legal y fragmentación regulatoria entre regiones o países (Royal College of Veterinary Surgeons, 2023). • Riesgos de ciberseguridad, filtración de datos clínicos y violación de privacidad. • Erosión potencial de la relación de confianza presencial entre el clínico y el cliente (Karsch, C., & University of Veterinary Medicine Hannover Research Group, 2026).

Nota. Adaptado de (Karsch, C., & University of Veterinary Medicine Hannover Research Group, 2026).

1.1.5. Interoperabilidad, salud pública e integración en el enfoque One Health

La e-Health veterinaria no es una disciplina aislada; representa un componente esencial dentro del ecosistema global de Una Sola Salud. La interconexión entre la salud humana, animal y ambiental requiere que los datos sanitarios generados en granjas, clínicas veterinarias de pequeños animales y reservorios de vida silvestre sean procesados de acuerdo con estándares rigurosos de interoperabilidad (como HL7 VET y DICOM VET).

Organizaciones internacionales, como la Organización Mundial de Sanidad Animal (World Organization for Animal Health, 2021), han destacado que la digitalización de los servicios veterinarios contribuye a aumentar la resiliencia global frente a brotes de enfermedades zoonóticas emergentes y reemergentes, tales como la influenza aviar altamente patógena y la peste porcina africana. La recolección automatizada de datos mediante plataformas de e-Health facilita la localización geográfica de casos en tiempo real, el mapeo de resistencias antimicrobianas y la emisión de alertas epidemiológicas tempranas a nivel internacional (World Organization for Animal Health, 2021).

1.2. El Internet de las Cosas Médicas Veterinarias (IoMT / IoVMT) y Dispositivos

Wearables.

1.2.1. Arquitectura conceptual del IoVMT: De la biosensórica a la nube

El Internet de las Cosas Médicas Veterinarias, conocido como Internet of Veterinary Medical Things (IoVMT) o IoMT-Vet, representa la evolución y la interconexión de sensores, biosensores, aparatos a medida, sistemas implantables y algoritmos de procesamiento de datos. Estos elementos están diseñados para la monitorización continua, no invasiva y en tiempo real de los parámetros fisiológicos y conductuales de los animales (Halachmi et al., 2025). A diferencia del Internet de las Cosas (IoT) orientado al consumo general, el Internet de los Animales y los Monitores de Tráfico (IoVMT) requiere estándares biológicos, electromecánicos y de transmisión de datos que estén rigurosamente calibrados para soportar entornos adversos, tales como explotaciones ganaderas, áreas de alta humedad y el movimiento

constante de los animales, al tiempo que se preserva una elevada especificidad diagnóstica (Halachmi et al., 2025).

Como señalan Torres y Buitrago (2022), la infraestructura técnica del IoVMT se articula a través de un modelo de arquitectura multicapa bien definido:

- 1. Capa de Captación Biológica (Sensórica):** Dispositivos físicos que se encuentran situados sobre la superficie epidérmica, en los tejidos subcutáneos o dentro del tracto digestivo del animal. Se miden variables tales como la frecuencia cardíaca, la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV), la temperatura corporal central y periférica, la frecuencia respiratoria, los niveles de glucosa, la electromiografía y los patrones de acelerometría triaxial (Gómez & Mazuera, 2024).
- 2. Capa de Transmisión y Comunicación (Borde/Puerta de Enlace):** Módulos de radiofrecuencia de ultra bajo consumo que recopilan la información del sensor y la transmiten a través de protocolos de red de área individual o amplia (Torres, 2022).
- 3. Capa de Procesamiento e Inteligencia de Datos (*Cloud Computing / Machine Learning*):** Plataformas centralizadas en las cuales los datos fisiológicos en bruto son sometidos a procesos de limpieza, filtrado de ruido causado por artefactos de movimiento e interpretación a través de sistemas de aprendizaje (Halachmi et al., 2025).
- 4. Capa de Aplicación Clínica:** Interfaces diseñadas para el médico veterinario y el productor o tutor, que tienen la capacidad de emitir alertas tempranas ante variaciones sutiles en la homeostasis del paciente, antes de que se produzcan señales clínicas evidentes de la enfermedad (Halachmi et al., 2025).

1.2.2. Tecnologías de transmisión y conectividad en entornos veterinarios

La viabilidad operativa del IoVMT depende de la selección adecuada del protocolo de comunicación inalámbrica, el cual debe balancear la tasa de transmisión de datos, la distancia de cobertura y la autonomía energética de los dispositivos (Martínez & Vargas, 2023).

Tabla 2. Viabilidad operativa del IoVMT basada en cada dispositivo

Protocolo	Ancho de Banda / Tasa de Datos	Alcance Efectivo	Consumo Energético	Aplicaciones Principales en Medicina Veterinaria
Bluetooth Low Energy (BLE)	Medio (1 - 2 Mbps)	Corto (10 - 100 m)	Muy Bajo	Parches electrocardiográficos, sensores e-skin, monitoreo continuo de glucosa (CGM) en clínicas de pequeños animales y felinos/caninos en hogar (Arciniegas & Orozco, 2024).
LoRaWAN (Long Range)	Bajo (0.3 - 50 kbps)	Muy Largo (5 - 15 km)	Ultra Bajo (Baterías > 5-8 años)	Monitoreo de ganado en pastoreo extensivo, crotales inteligentes, seguimiento de parámetros microclimáticos y bienestar animal en campo (Halachmi et al., 2025).
RFID (UHF / HF)	Bajo (Lectura por cercanía/ escaneo)	Muy Corto a Medio (< 1-12 m)	Pasivo (Sin batería) / Activo	Trazabilidad individual, identificación oficial, control de acceso a comederos automáticos y básculas electrónicas en producción animal (Martínez & Vargas, 2023).
NB-IoT / 5G	Alto (Hasta > 100 Mbps en 5G)	Largo (Cobertura celular)	Alto a Moderado	Transmisión de vídeo en tiempo real, análisis biomecánico complejo de la marcha en equinos, parches multi-paramétricos de alta resolución (Avilés & Soria, 2025).

Nota. Adaptado de varios autores

1.2.3. Clasificación y biomecánica de los dispositivos *wearables* en pequeños animales y especies de producción

Los dispositivos de ajuste han sido diseñados morfológicamente para ajustarse a la anatomía y al comportamiento de diversas especies, tanto domésticas como silvestres:

A. Pequeños Animales (Caninos y Felinos)

Collares y Arnéses Inteligentes: Equipados con acelerómetros de tres ejes y giroscopios, se utilizan para la clasificación etológica cuantitativa de comportamientos tales como el rasgado, la sacudida de cabeza, el descanso, la carrera y la caminata. Son esenciales para la evaluación objetiva del prurito en dermatología, así como del dolor osteoarticular y los trastornos obsesivo-compulsivos (Avilés & Soria, 2025).

Monitorización Electrocardiográfica Holter Continua (Wearable ECG): Chalecos textiles inteligentes que incorporan electrodos secos o de gel flexible, los cuales permiten el registro del ritmo cardíaco durante un período de 24 a 72 horas sin interferir en la rutina del paciente. Esta tecnología facilita el diagnóstico de arritmias paroxísticas (Arciniegas & Orozco, 2024).

Sensores de Monitorización Continua de Glucosa (CGM): Se han desarrollado parches intersticiales que se aplican en la región dorsal o interescapular, los cuales miden la concentración de glucosa cada 5 a 15 minutos. Esta innovación ha transformado la estabilización y el control de la curva de glucemia en pacientes felinos y caninos diagnosticados con Diabetes Mellitus (Arciniegas & Orozco, 2024).

B. Grandes Animales y Especies de Producción (Bovinos, Porcinos y Equinos)

Crotales (Ear Tags) y Vinchas Inteligentes: Se han instalado dispositivos en la oreja del animal con el propósito de medir la temperatura corporal, la actividad motora y la inclinación de la cabeza. Se emplean para la detección automatizada del celo mediante algoritmos de hiper-motilidad, así como para la identificación temprana de la Enfermedad Respiratoria Bovina (ERB), hasta 48 a 72 horas antes de la manifestación de signos clínicos visibles (Halachmi et al., 2025).

Bolos Rumiantes (Rumen Boli): Dispositivos biodegradables o de alta densidad que se introducen por vía oral y que permanecen de manera permanente en el retículo-rumen. Se miden el pH del rumen, la temperatura interna y la frecuencia de las contracciones ruminales, lo cual es indispensable para prevenir la acidosis ruminal subaguda (SARA) en ganado lechero de alta producción (Gómez & Mazuera, 2024).

Pinchas y Sensores en Casco para Equinos: Se han instalado dispositivos inerciales de alta frecuencia en las extremidades o en el casco de los equinos, los cuales registran la fuerza de impacto, la simetría y la variabilidad del tranco. Estos dispositivos permiten la detección objetiva de cojeras subclínicas y facilitan el análisis del rendimiento en equinos destinados a actividades deportivas (Avilés & Soria, 2025).

1.2.4. Integración de Machine Learning y analítica biométrica en la detección de estrés y estados patológicos

Los datos masivos recolectados por los dispositivos IoVMT carecen d Los datos masivos recopilados por los dispositivos de Internet de las Cosas en el Sector de la Salud (IoVMT) no poseen valor clínico a menos que sean convertidos en conocimiento aplicable. La integración de biosensores con algoritmos de aprendizaje automático, como Bosques Aleatorios, Máquinas de Vectores de Soporte y Redes Neuronales Convolucionales, facilita la identificación de patrones de comportamiento y respuestas fisiológicas complejas (Gómez & Mazuera, 2024; Halachmi et al., 2025).

Un caso paradigmático es la evaluación cuantitativa del estrés y del dolor, según lo expuesto por Gómez y Mazuera en 2024. El estrés fisiológico provoca una activación del eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HHA) y del sistema nervioso simpático, lo que resulta en una disminución sostenida de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (HRV) y en un aumento episódico de la temperatura ocular o auricular, tal como se detecta mediante termografía infrarroja continua. Los modelos de aprendizaje automático entrenados con estas variables biométricas identifican desviaciones del patrón homeostático basal de cada individuo, mediante el cálculo de un "Índice de Estrés Biológico". Este índice permite alertar al personal sobre situaciones de

incomodidad térmica, dolor agudo, fallos en las instalaciones de manejo o la aparición de síntomas patológicos iniciales (Gómez & Mazuera, 2024).

1.2.5. Limitaciones técnicas, biocompatibilidad y desafíos en el manejo masivo de datos

A pesar de su potencial transformador, la adopción generalizada del Internet de las Tecnologías y Equipos (IoVMT) en el ámbito clínico y en los sistemas de producción se enfrenta a limitaciones significativas.

- 1. Biocompatibilidad y Resistencia Mecánica:** Los dispositivos que se encuentran expuestos a condiciones ambientales adversas experimentan la degradación de sus componentes, desplazamientos involuntarios o pérdida debido a procesos de acicalamiento, rozamiento y peleas entre animales de la misma especie (Halachmi et al., 2025).
- 2. Gestión Energética y Sostenibilidad:** La duración de la batería sigue representando un obstáculo significativo para los monitores continuos que requieren un procesamiento intensivo, como es el caso de la inteligencia artificial (Edge AI). Se están investigando soluciones para la recolección de energía a partir de fuentes ambientales, mediante el aprovechamiento de la acción del movimiento o el uso de celdas solares flexibles (Torres, 2022).
- 3. Calibración y Sesgos de Algoritmos:** Un modelo que ha sido entrenado con datos de una raza o sistema de producción específico puede experimentar fallos en la precisión al ser aplicado a razas que presentan morfologías o patrones etológicos significativamente diferentes, como es el caso de las razas braquicefálicas en pequeños animales o las razas Zebuínas en comparación con las Taurinas en la producción bovina (Gómez & Mazuera, 2024).
- 4. Saturación de Datos (*Data Deluge*) y Ciberseguridad:** La recolección continua produce volúmenes significativos de datos no estructurados que pueden sobrepasar la capacidad de análisis del equipo veterinario (Avilés & Soria, 2025). La difusión de información sanitaria a través de redes abiertas necesita la implementación de un

cifrado riguroso con el fin de prevenir ataques informáticos y asegurar la protección de la propiedad intelectual, así como la trazabilidad comercial de las explotaciones ganaderas (Buitrago, 2025).

1.3. Big Data, Interoperabilidad y la Historia Clínica Electrónica Interconectada

1.3.1. Arquitectura y la regla de las 5 "V" del Big Data en la medicina veterinaria

La acelerada digitalización de los centros de atención animal y de las cadenas de producción agropecuaria da lugar a la generación de volúmenes significativos de datos biomédicos, epidemiológicos y de comportamiento (Buitrago, 2025; Rivas & Osorio, 2023). La gestión integral de este flujo informativo se sitúa dentro de la arquitectura de Big Data veterinario, la cual se caracteriza no solo por el volumen cuantitativo de registros, sino también por su capacidad para convertir información diversa en decisiones clínicas y sanitarias predictivas en tiempo real (Rivas & Osorio, 2023).

Como sostienen Rivas y Osorio (2023), la dinámica del Big Data en el entorno VET-TECH se rige bajo las cinco dimensiones operativas (las 5 "V"):

- 1. Volumen:** La acumulación significativa de historiales clínicos, resultados de laboratorio, secuencias genómicas, archivos radiológicos e imágenes DICOM, así como la telemetría continua de dispositivos portátiles Del Portal (Rivas & Osorio, 2023).
- 2. Velocidad:** La frecuencia de generación y recopilación de datos en tiempo real, como el monitoreo continuo de la frecuencia cardíaca o la transmisión inmediata de parámetros ambientales e indicadores de bienestar en entornos agrícolas, es un aspecto relevante (González & Pérez, 2022).
- 3. Variedad:** La coexistencia de datos estructurados, tales como constantes vitales y tablas de dosificación; datos semiestructurados, como notas médicas libres y observaciones de propietarios; y datos no estructurados, que incluyen imágenes de diagnóstico, videos biomecánicos y grabaciones de audio de auscultación (Cabezas, 2021).

4. **Veracidad:** Es imperativo llevar a cabo un proceso de depuración y validación de la calidad metodológica de los datos recopilados. Esto implica la eliminación de sesgos, inconsistencias en el etiquetado y artefactos de medición antes de que dichos datos sean sometidos a modelos predictivos (Martínez & Silva, 2022).
5. **Valor:** La capacidad definitiva del sistema para extraer conocimiento aplicable que optimice el bienestar del paciente, la rentabilidad en la producción y la prevención de infecciones (Buitrago, 2025; Rivas & Osorio, 2023).

1.3.2. La Historia Clínica Electrónica Interconectada (HCEI) y los sistemas de gestión integral

La Historia Clínica Electrónica Interconectada (HCEI) representa el fundamento longitudinal en el que se basa la medicina veterinaria digital (Del Portal, 2021). A diferencia de los registros en papel o de las bases de datos aisladas en servidores locales, una Historia Clínica Electrónica Integrada (HCEI) moderna funciona como una plataforma centralizada y accesible en la nube, la cual unifica el historial clínico del paciente a través de múltiples centros de atención, hospitales de referencia y laboratorios de diagnóstico (Buitrago, 2025).

Los componentes clave de una plataforma HCEI avanzada incluyen (Gómez & Pérez, 2021):

- **Módulo de Registro Longitudinal:** Se garantiza una trazabilidad completa de las intervenciones profilácticas, los eventos patológicos, los esquemas de vacunación y la prescribibilidad farmacológica desde el nacimiento hasta el final de la vida del paciente.
- **Integración de Pruebas Complementarias:** Recepción automatizada de resultados analíticos, incluyendo hematología, bioquímica y urianálisis, así como la vinculación de archivos de imagenología médica mediante dispositivos integrados.
- **Gestión de Consentimientos y Trazabilidad Ético-Legal:** Implementación de un sistema automatizado para el registro de auditorías relacionadas con el uso de principios activos restringidos, en particular los antimicrobianos, asegurando así el cumplimiento de la regulación sanitaria vigente (Martínez & Silva, 2022).

- **Módulos de Comunicación Cliente-Veterinario:** Plataformas de interacción en las cuales el cuidador del animal puede consultar historiales de salud, autorizar procedimientos, programar citas telemáticas y recibir notificaciones relacionadas con la medicina preventiva (Buitrago, 2025).

1.3.3. Estándares de interoperabilidad en la salud animal: Desafíos de integración y taxonomía

El principal obstáculo para la consolidación del Big Data en el ámbito clínico veterinario radica en la disgregación de datos, la cual es consecuencia del uso de software propietario y no interconectado (Cabezas, 2021; Del Portal, 2021). La ausencia de estándares internacionales de comunicación resulta en la fragmentación de la información en "islas informáticas", lo que obstaculiza la continuidad del cuidado cuando un paciente es transferido de una consulta primaria a un centro de alta especialidad (Cabezas, 2021).

Con el fin de alcanzar una interoperabilidad de significado y lógica efectiva, el ecosistema VET-TECH implementa y adapta protocolos estandarizados del sector biomédico (Cabezas, 2021; Del Portal, 2021):

Tabla 3. Protocolos estandarizados VET-TECH

Estándar / Taxonomía	Ámbito de Aplicación	Función en el Ecosistema Veterinario
HL7 VET / FHIR (Fast Healthcare Interoperability Resources)	Intercambio de datos de salud	Define la estructura sintáctica para la transferencia segura de datos clínicos, ordenación de analíticas y recetas electrónicas entre diferentes plataformas de software (Cabezas, 2021).
DICOM VET (Digital Imaging and Communications in Medicine)	Imagenología médica	Estandariza el almacenamiento y transmisión de imágenes radiológicas, ecográficas, tomográficas (TC) y de resonancia magnética (RM) veterinarias (Del Portal, 2021).

SNOMED CT VET	Terminología clínica codificada	Proporciona una ontología unificada para codificar diagnósticos, signos clínicos, procedimientos quirúrgicos y hallazgos anatómicos en múltiples idiomas sin ambigüedad (Cabezas, 2021).
VeNom Coding / AAHA Microchip Standards	Clasificación y registros generales	Utilizados ampliamente para la codificación uniforme de motivos de consulta, nombres de razas y trazabilidad de identificación por microchip (Buitrago, 2025).

Nota. Adaptado de varios autores

1.3.4. Analítica de datos en el diagnóstico, la epidemiología y el paradigma One Health

La carga masiva y desconocida de datos provenientes de la Historia Clínica Electrónica Integrada (HCEI) sustenta redes de vigilancia epidemiológica automatizada, las cuales refuerzan la respuesta sanitaria en el marco del enfoque de Una Sola Salud (One Health) (Rivas & Osorio, 2023).

Al llevar a cabo un análisis combinado de los patrones territoriales y temporales presentes en los registros veterinarios, los algoritmos de analítica avanzada facilitan la identificación de tendencias y comportamientos relevantes (Rivas & Osorio, 2023):

- 1. Detección Precoz de Brotes Zoonóticos:** Identificar niveles inusuales de enfermedades de transmisión múltiple o infecciones emergentes, tales como leptospirosis, leishmaniosis, rabia o influenza aviar, antes de que se produzcan brotes a gran escala en las poblaciones humanas (Rivas & Osorio, 2023).
- 2. Farmacovigilancia y Monitoreo de Resistencias Antimicrobianas (RAM):** Evaluar el uso global de antimicrobianos en la práctica clínica diaria y realizar un seguimiento del mapa de resistencias bacterianas a nivel regional, alineando la prescripción vete-

rinaria con las directrices establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA) (Rivas & Osorio, 2023).

3. **Modelos de Diagnóstico Predictivo Clínico:** Se propone la implementación de herramientas de aprendizaje automático en la Historia Clínica Electrónica Integrada (HCEI) con el objetivo de calcular la probabilidad de desarrollar insuficiencia renal crónica, enfermedades cardíacas u oncologías. Estas herramientas también deberán sugerir intervenciones nutricionales y farmacológicas en etapas tempranas (Buitrago, 2025).

1.3.5. Ciberseguridad, privacidad de datos y custodia de la propiedad intelectual

La gestión masiva de información en entornos digitales presenta a las organizaciones veterinarias riesgos éticos, legales y operacionales que requieren una administración rigurosa (Martínez & Silva, 2022):

- **Protección de Datos Personales de los Cuidadores:** Las bases de datos de la Historia Clínica Electrónica Integral (HCEI) albergan información de carácter personal, incluyendo nombres, direcciones, métodos de pago y localización geográfica. Esta información se encuentra sujeta a regulaciones establecidas por leyes internacionales de protección de datos, tales como el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) en la Unión Europea, así como a legislaciones locales equivalentes. La violación de estas normas expone a las clínicas a sanciones administrativas y a pérdidas significativas en su reputación (Buitrago, 2025).
- **Propiedad de los Datos Sanitarios Animales:** Se plantea un debate jurídico en relación con la titularidad de los datos generados por biosensores y sistemas de gestión. La cuestión que se discute es si dichos datos pertenecen al propietario del animal, al médico veterinario responsable del tratamiento, a la empresa desarrolladora del hardware y software, o a la entidad encargada de la integración analítica. Es fundamental establecer acuerdos de confidencialidad y licencias de uso de datos que sean claros y transparentes (Martínez & Silva, 2022).

- **Continuidad Operativa y Mitigación de Ciberataques:** Las clínicas y centros de referencia deben establecer protocolos sólidos de cifrado de extremo a extremo, autenticación multifactor (MFA) y copias de seguridad redundantes en la nube, con el fin de prevenir ataques de virus informáticos que puedan interrumpir la actividad asistencial y comprometer la vida de los pacientes hospitalizados (Martínez & Silva, 2022).



**Inteligencia artificial y big data
en el diagnóstico veterinario**

CAPÍTULO II.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y BIG DATA EN EL DIAGNÓSTICO VETERINARIO

Oscar Darwin Criollo Salinas

2.1. Algoritmos de Aprendizaje Automático (*Machine Learning*) y Diagnóstico Predictivo

2.1.1. *Introducción y epistemología de la inferencia computacional en la medicina veterinaria*

El diagnóstico en la medicina veterinaria ha sido históricamente conceptualizado como una disciplina empírico-analítica que se fundamenta en la integración heurística de la investigación analítica, el examen físico exhaustivo y la interpretación de pruebas complementarias. El razonamiento clínico tradicional se basa en modelos deductivos e inductivos que son implementados por el cerebro humano. Aunque estos modelos son altamente flexibles y poseen una capacidad de empatía contextual, están intrínsecamente limitados por la capacidad de procesamiento cognitivo, especialmente cuando se enfrentan a volúmenes significativos de datos multidimensionales. En la actualidad, en el contexto de la medicina integrativa y digital, se está produciendo una transformación conceptual significativa. Esta transformación implica un cambio desde un enfoque de medicina que es exclusivamente reactivo e intrahospitalario hacia un nuevo paradigma asistencial que es predictivo, preventivo, personalizado y participativo. Este cambio es impulsado por el desarrollo de la telemedicina veterinaria (Karsch, C., & University of Veterinary Medicine Hannover Research Group, 2026) y se fundamenta en el análisis de datos a gran escala y en la inteligencia artificial.

El aprendizaje automático, conocido como Machine Learning (ML), se encuentra en el centro de esta transformación. Lejos de ser simplemente un conjunto de herramientas informáticas destinadas a la automatización de tareas administrativas, el aprendizaje automático (ML) en la patología clínica y el diagnóstico veterinario constituye una disciplina de la ciencia de la

computación y la estadística aplicada. Esta disciplina permite a los sistemas informáticos identificar patrones complejos, extraer reglas biológicas implícitas y realizar predicciones clínicas precisas a partir de datos históricos, sin necesidad de ser programados de manera explícita para cada escenario patológico específico. Mientras que la programación convencional exige que el investigador humano defina de manera exhaustiva las reglas lógicas y las entradas para obtener un resultado, el aprendizaje automático altera este flujo operativo. En este enfoque, el algoritmo analiza de manera masiva los datos de entrada, tales como perfiles bioquímicos, series temporales de constantes vitales y códigos genéticos, junto con los resultados o diagnósticos confirmados, generando como resultado las reglas matemáticas fundamentales que rigen el proceso patológico correspondiente.

La capacidad para modelar relaciones no lineales, interacciones estocásticas complejas y variables de alta dimensionalidad es de suma importancia en la medicina veterinaria actual. Los animales domésticos, de producción y silvestres exhiben una variabilidad fisiológica inter e intraespecífica que es considerablemente superior a la observada en la especie humana. Las diferencias metabólicas entre las razas caninas, como las variaciones en los rangos basales de hematocrito entre razas lebreles y razas braquicefálicas, así como las respuestas de estrés específicas de la especie en felinos que alteran de manera transitoria los niveles de glucosa e insulina, junto con las dinámicas de grupo en la ganadería de precisión, generan un "ruido biológico" que frecuentemente oculta las etapas iniciales de las enfermedades. Los algoritmos de aprendizaje automático se distinguen por su habilidad para filtrar el ruido ambiental y etológico, identificando desviaciones biológicas subclínicas que pueden preceder a la aparición de síntomas clínicos evidentes por días, semanas o incluso meses.

La incorporación del aprendizaje automático en el diagnóstico veterinario responde a la necesidad apremiante de gestionar el fenómeno del Big Data biomédico. La proliferación de instrumentos hematológicos automáticos, la espectrometría de masas en microbiología, la secuenciación de nueva generación (NGS), la imagenología digitalizada de alta resolución y el monitoreo continuo a través de dispositivos portátiles e IoVMT (Internet de las Cosas en

Medicina Veterinaria) generan un flujo constante de información que supera la capacidad de análisis de cualquier equipo médico humano. Sin la asistencia de algoritmos predictivos avanzados, la mayoría de estos datos permanece subutilizada en las historias clínicas electrónicas, lo que impide la posibilidad de anticipar fallos orgánicos agudos, brotes epidémicos o reacciones adversas a medicamentos en el contexto de la vigilancia epidemiológica y la salud pública (Rivas & Osorio, 2023). En consecuencia, el aprendizaje automático no tiene como objetivo sustituir el juicio diagnóstico ni la intuición clínica del médico veterinario, sino más bien fortalecer su capacidad analítica, disminuir la variabilidad inter-observador y ofrecer un respaldo cuantitativo riguroso para la toma de decisiones terapéuticas.

2.1.2. Ciclo de vida y flujo de procesamiento en el desarrollo de modelos predictivos

El desarrollo de un modelo de aprendizaje automático de grado médico para su aplicación en la patología clínica y el diagnóstico veterinario no constituye un procedimiento monolítico, sino que se trata de un proceso iterativo y altamente estructurado que requiere un rigor metodológico estricto en cada una de sus etapas. Un error en cualquiera de los eslabones del ciclo de vida del proyecto compromete la capacidad de generalización del modelo, lo que puede resultar en diagnósticos incorrectos, inestabilidad o falsas alarmas, con consecuencias éticas y económicas significativas. El flujo de trabajo estándar en la ingeniería de modelos de aprendizaje automático en el ámbito veterinario se organiza en cinco etapas interconectadas de manera secuencial y retroalimentada:

1. Adquisición, Curaduría y Limpieza de Datos (Data Ingestion & Preprocessing)

La materia prima fundamental de todo modelo es el dato biológico. En veterinaria, los datos proceden de fuentes heterogéneas: Historias Clínicas Electrónicas (HCE), LIMS (Laboratory Information Management Systems), archivos DICOM de imagenología y señales continuas de sensores IoT. La primera fase implica la consolidación y depuración de dichos registros. La información clínica frecuentemente exhibe un elevado grado de imperfección, el cual se manifiesta a través de la ausencia de datos, errores de transcripción, lecturas anómalas ocasionadas por artefactos de movimiento en los sensores, así como inconsistencias en la terminología

utilizada por diversos profesionales. Para gestionar los datos faltantes, los especialistas en datos veterinarios aplican técnicas de asignación avanzada (como la imputación múltiple por ecuaciones encadenadas [MICE] o el uso de algoritmos k-NN para imputación), evitando la eliminación indiscriminada de registros que podría introducir sesgos de selección. Igualmente, los datos continuos tales como, concentraciones de urea, creatinina, altitud de segmentos electrocardiográficos deben ser normalizados o estandarizados (mediante transformaciones Z-score o escalado Min-Max) para garantizar que variables con diferentes escalas numéricas no distorsionen el entrenamiento del algoritmo.

1. Ingeniería y Selección de Características (*Feature Engineering & Selection*)

Esta fase constituye el vínculo entre el conocimiento biomédico del patólogo veterinario y la estructura matemática del ordenador. La ingeniería de características implica la conversión de datos en bruto en variables cuantitativas que poseen un alto valor informativo. Por ejemplo, en lugar de registrar únicamente lecturas aisladas de la presión arterial sistólica de un canino hospitalizado, el investigador puede calcular la variabilidad de la presión en intervalos temporales de seis horas, la tasa de cambio angular de la pendiente de la curva o el cociente entre la presión arterial media y la frecuencia cardíaca. Dado que la inclusión de un número excesivo de variables puede resultar en la "maldición de la dimensionalidad" y en el sobreajuste, se implementan algoritmos de selección de características. Los métodos de filtrado, tales como la correlación de Pearson o la ganancia de información, así como los métodos envolventes, como la eliminación recursiva de características (RFE), y las técnicas de penalización L1, como Lasso, permiten identificar el subconjunto mínimo de biomarcadores que optimiza la capacidad explicativa del modelo sin incrementar la complejidad de manera innecesaria.

2. Arquitectura, Entrenamiento y Ajuste de Hiperparámetros (*Model Training & Tuning*)

Una vez que se ha preparado el conjunto de datos, se procede a la fase de modelado. El conjunto total de datos se divide de manera estricta en un mínimo de tres particiones independientes: el conjunto de entrenamiento, que generalmente representa entre el 70% y el 80% de los da-

tos; el conjunto de validación, que abarca entre el 10% y el 15%; y el conjunto de prueba, que también comprende entre el 10% y el 15%. El algoritmo analiza el conjunto de entrenamiento con el propósito de ajustar sus variables internas, tales como los pesos de las conexiones en una red neuronal o las reglas de división en un árbol de decisión. En el transcurso de este proceso, se lleva a cabo el ajuste de hiperparámetros, utilizando técnicas como Grid Search, Random Search o la optimización Bayesiana, con el objetivo de determinar la configuración óptima del algoritmo. Con el fin de prevenir que el modelo se limite a "memorizar" los datos de entrenamiento, lo cual se conoce como sobreajuste, se implementa de manera sistemática la validación cruzada de k-pliegues. Este enfoque asegura que las métricas de rendimiento se mantengan consistentes a través de diversos subconjuntos de pacientes.

3. Evaluación Métrica y Validación Clínica Externa

Un modelo no puede ser considerado adecuado para la práctica clínica únicamente por alcanzar un porcentaje elevado de aciertos globales, dado que en la medicina veterinaria las clases diagnósticas tienden a estar significativamente desbalanceadas. Por ejemplo, la prevalencia de una neoplasia específica en una población general de caninos puede ser inferior al 2%. Esto implicaría que un modelo que clasifique a todos los pacientes como sanos obtendría un 98% de aciertos absolutos, a pesar de que tal enfoque sería clínicamente ineficaz y potencialmente perjudicial. En su lugar, el rendimiento se evalúa utilizando un conjunto de prueba que se encuentra completamente desvinculado del modelo durante la fase de entrenamiento. Esta evaluación se lleva a cabo mediante el análisis de la matriz de confusión y la interpretación de métricas epidemiológicas fundamentales:

- **Sensibilidad (o Exhaustividad):** Evalúe la eficacia del algoritmo en la identificación precisa de pacientes que presentan enfermedades. Representa la proporción de casos verdaderamente patológicos que el sistema es capaz de detectar, asegurando que un número mínimo de individuos afectados no sea identificado como falsos negativos.

- **Especificidad:** Analiza la precisión del modelo en la identificación de pacientes sanos. El sistema demuestra su capacidad para descartar la enfermedad en individuos que no la presentan, minimizando la generación de falsos positivos y evitando así la realización de procedimientos médicos invasivos o innecesarios.
- **Valor Predictivo Positivo (o Precisión):** Cuantifica la fiabilidad de las alarmas del sistema. Indica la probabilidad de que un paciente efectivamente presente la afección cuando el modelo emite un diagnóstico positivo, lo cual es fundamental para la toma de decisiones terapéuticas.
- **Puntuación F1 (F1-Score):** Representa un indicador de balance o media armónica entre el Valor Predictivo Positivo y la Sensibilidad. Proporciona un indicador singular de desempeño global que previene los sesgos generados por el desequilibrio de clases, exigiendo que el algoritmo sea a la vez exhaustivo y preciso.

Al final, el cálculo del Área Bajo la Curva ROC (Característica Operativa del Receptor) y del Área Bajo la Curva de Precisión-Exhaustividad ofrece una evaluación exhaustiva de la capacidad de discriminación del algoritmo. Estas herramientas gráficas y numéricas permiten llevar a cabo un análisis de la robustez diagnóstica del sistema en diversos umbrales de decisión, garantizando así su fiabilidad antes de su implementación en un entorno clínico real.

1. **Despliegue, Monitoreo Continuo y Deriva de Datos (Deployment & Data Drift)**

La fase final del ciclo de vida consiste en la integración del modelo entrenado en la interfaz del software de gestión clínica o en la plataforma IoVMT (Despliegue del Modelo). No obstante, la labor de ingeniería no finaliza con la implementación en producción. Los sistemas biológicos y los entornos de manejo veterinario presentan características dinámicas. Un fenómeno relevante en la inteligencia artificial veterinaria es la deriva de datos, que se manifiesta cuando las características de los pacientes, los métodos analíticos del laboratorio o la epidemiología regional experimentan cambios a lo largo del tiempo, lo que conlleva una degradación gradual de la precisión del modelo. Por esta razón, los sistemas VET-TECH avanzados incluyen módulos de auditoría continua que supervisan el rendimiento en tiempo real y activan procesos au-

tomatizados de reentrenamiento cuando la métrica AUC desciende por debajo de un umbral previamente establecido.

2.1.3. Taxonomía detallada de las familias de algoritmos y sus fundamentos matemáticos

Para apreciar el alcance y las limitaciones del aprendizaje automático en el diagnóstico veterinario, es fundamental llevar a cabo un análisis de la taxonomía de las principales familias algorítmicas, así como profundizar en sus mecanismos matemáticos operativos y en sus aplicaciones específicas en la patología clínica animal.

A. Aprendizaje Supervisado (Supervised Learning)

El aprendizaje supervisado se basa en la disponibilidad de un conjunto de datos de entrenamiento en el que cada instancia está vinculada a una etiqueta de salida conocida. El objetivo del algoritmo consiste en identificar una función de mapeo que minimice la función de pérdida o error al predecir la salida para nuevas observaciones no previamente observadas.

1- Árboles de Decisión y Algoritmos de Ensamble (Random Forest, Gradient Boosting Machines)

Los Árboles de Decisión segmentan de manera iterativa el conjunto de datos en subgrupos cada vez más homogéneos a través de una serie de reglas lógicas condicionales. En cada división o nodo, el algoritmo examina todas las variables disponibles y selecciona aquella que permita la separación más efectiva entre las diferentes categorías diagnósticas o clases, para determinar la división más adecuada en cada etapa, el modelo evalúa la disminución de la impureza del nodo, este objetivo se alcanza mediante el análisis del grado de "mezcla" de las clases dentro del grupo, si un nodo presenta una distribución equitativa de pacientes sanos y enfermos, su impureza alcanza su nivel máximo; en cambio, si logra agrupar exclusivamente a individuos de una única clase, la impureza se reduce a cero. Criterios como el Índice de Gini y la Entropía evalúan de manera precisa la concentración de probabilidad, favoreciendo aquellos cortes que producen subgrupos lo más homogéneos e idénticos

posibles. Aunque un árbol de decisión individual es altamente intuitivo y comprensible para el especialista, presenta limitaciones significativas. Tiende a memorizar en exceso los datos con los que fue entrenado, lo que se conoce como sobreajuste, y es sumamente sensible a pequeñas variaciones en la muestra inicial, lo que se traduce en una alta varianza.

- **Random Forest (Bosques Aleatorios):** Emplea la técnica de agregación por arranque, conocida como bootstrap aggregating o bagging. Se construyen múltiples árboles de decisión de manera paralela, en los cuales cada árbol se entrena utilizando una muestra aleatoria con reemplazo de los datos de entrenamiento. Además, se evalúa únicamente un subconjunto aleatorio de características en cada división. La predicción final se determina mediante un proceso de votación mayoritaria en el caso de la clasificación, o a través del cálculo de un promedio en el contexto de la regresión. Este esquema presenta una notable firmeza ante datos ruidosos y se utiliza de manera extensiva para el procesamiento de perfiles hemato-bioquímicos complejos.
- **Gradient Boosting Machines (XGBoost, LightGBM, CatBoost):** A diferencia del bagging, los métodos de boosting desarrollan árboles de decisión de forma secuencial. Cada nuevo árbol se entrena de manera específica para corregir los errores o residuos generados por los árboles anteriores, optimizando una función de pérdida a través del método de descenso de variación. Los algoritmos como XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) han demostrado una notable precisión en la predicción de fallos orgánicos agudos, así como en la identificación de pancreatitis en felinos y caninos, utilizando bases de datos clínicas multidimensionales.

2. Máquinas de Vectores de Soporte (Support Vector Machines - SVM)

Las Tecnologías de Vectores de Soporte son algoritmos utilizados para la clasificación y la regresión, cuyo objetivo es identificar la frontera de decisión óptima, conocida como hiperplano, que maximice la distancia de separación entre diferentes categorías en un espacio de datos. El objetivo principal consiste en situar esta línea divisoria lo más alejada posible de las

observaciones más cercanas de cada grupo, con el fin de minimizar el riesgo de error en la clasificación de nuevas muestras.

Cuando los patrones diagnósticos muestran relaciones complejas que no pueden ser diferenciadas mediante una simple línea recta o un plano en su dimensión original, el algoritmo emplea el método conocido como "truco del núcleo" (Kernel Trick). Esta técnica proyecta la información de manera matemática hacia un espacio de mayor dimensión, donde la separación se torna factible. Por ejemplo, a través de la utilización de núcleos de Base Radial Gaussiana, el sistema determina la similitud o proximidad entre observaciones en función de su distancia geométrica. De esta manera, los puntos que se encuentran muy próximos tienen una influencia significativa entre sí, lo que posibilita la delineación de fronteras de decisión curvas y altamente flexibles, sin la necesidad de calcular directamente las medidas en dimensiones superiores. En la clínica veterinaria, SVM (Máquina de Vectores de Soporte) ha demostrado una notable eficacia en la discriminación de patrones proteómicos en suero, así como en el análisis de espectros de infrarrojo cercano (NIR) para evaluar la calidad de la leche y en la clasificación de estados inmunológicos complejos, en los cuales el número de muestras generalmente es inferior al número de biomarcadores analizados.

Redes Neuronales Artificiales (Artificial Neural Networks - ANN)

Fundadas conceptualmente en el procesamiento de información de las redes neuronales biológicas, las redes neuronales artificiales (ANN) se componen de capas de unidades de procesamiento, denominadas neuronas, que están interconectadas mediante conexiones ajustables. Una red neuronal de transmisión progresiva se compone de una capa de entrada que recibe los datos iniciales, una o más capas ocultas que se encargan del procesamiento interno, y una capa de salida que produce la predicción final. En este proceso, cada neurona recibe diversas señales de entrada y determina su relevancia de valor relativo mediante la asignación de pesos cuantitativos, a los cuales se les añade un factor de ajuste o sesgo.

El resultado de esta combinación lineal se somete a una función de activación no lineal, como ReLU, sigmoide o Tanh, la cual determina si la neurona debe activarse y la intensidad de la

señal que se transmitirá a la siguiente capa. Esta transformación no lineal es la que permite a la red adquirir patrones complejos que trascienden las relaciones proporcionales simples. El entrenamiento de la red se lleva a cabo mediante el algoritmo de retropropagación del error, en combinación con optimizadores que se fundamentan en el descenso de flujo gradual, tales como Adam o RMSprop.

Las redes neuronales profundas (Deep Neural Networks - DNN) tienen la capacidad de aprender representaciones jerárquicas altamente abstractas, constituyendo un elemento fundamental en el diagnóstico analítico integrado y en la medicina personalizada para pacientes en estado crítico.

B. Aprendizaje No Supervisado (Unsupervised Learning)

El aprendizaje no supervisado se basa en conjuntos de datos que no contienen etiquetas de salida ni diagnósticos predefinidos. Su objetivo matemático consiste en identificar la estructura subyacente, la distribución de probabilidad implícita o las agrupaciones naturales en los datos biomédicos.

Algoritmos de Agrupamiento (*Clustering*: k-Means, DBSCAN, Clustering Jerárquico)

- **k-Means:** Organiza las observaciones en los grupos predefinidos, asignando cada observación al grupo cuyo núcleo exhiba la menor distancia aproximada. Se utiliza de manera extensiva para la segmentación de rebaños ganaderos, basándose en sus patrones de comportamiento y de consumo.
- **DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*):** Los grupos se definen como áreas caracterizadas por una alta concentración de datos, las cuales están delimitadas por zonas de baja concentración. A diferencia del método k-Means (K, representa el número de grupos (clústeres) que se deciden crear, es una variable numérica ,por ejemplo, K=3 significa crear tres grupos) y Means, Medias, hace referencia a la media aritmética,el promedio, el centro de cada grupo (centroide) se calcula promediando la posición de todos los puntos asignados a

ese grupo., DBSCAN(Agrupamiento espacial basado en la densidad de los datos y con tolerancia al ruido.) no requiere la especificación previa del número de grupos y posee la capacidad de identificar agrupaciones de formas arbitrarias, así como de detectar observaciones anómalas o valores atípicos. En el ámbito de la patología veterinaria, el algoritmo DBSCAN es fundamental para identificar nuevos fenotipos de enfermedades complejas y para la detección de alteraciones inusuales en el monitoreo continuo de la fisiología animal.

- **Clustering Jerárquico (Aglomerativo):** Elabora un árbol de agrupamiento (dendrograma) mediante la fusión progresiva de clústeres, utilizando matrices de distancia, como, por ejemplo, la distancia de Ward. Permite observar la jerarquía taxonómica de subgrupos de pacientes que presentan respuestas variadas a los tratamientos farmacológicos.

3. Técnicas de Reducción de Dimensionalidad (PCA, t-SNE, UMAP)

Las bases de datos genéticas, transcriptómicas y los esquemas metabólicos de alta densidad generan una cantidad considerable de variables por paciente. El Análisis de Componentes Principales (PCA) es una técnica lineal que transforma las variables originales, las cuales presentan correlación, en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas, denominadas componentes principales. Estas componentes tienen como objetivo maximizar la varianza explicada del sistema. Por su parte, técnicas no lineales como **t-SNE** (*t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding*) y **UMAP** (*Uniform Manifold Approximation and Projection*) permiten proyectar datos de alta dimensión en espacios bidimensionales o tridimensionales, facilitando la visualización directa de la agrupación celular en citometría de flujo y citología digital.

2.1.4. Aplicaciones clínicas y epidemiológicas del diagnóstico predictivo

La aplicación práctica de los algoritmos de aprendizaje automático en la medicina veterinaria abarca una gran variedad de especialidades clínicas, lo que transforma los procesos de prevención, diagnóstico y pronóstico en especies pequeñas, animales de cría y animales de producción.

A. Nefrología y Urología Veterinaria: Detección Precoz de la Enfermedad Renal Crónica

La Enfermedad Renal Crónica (ERC) se considera una de las patologías degenerativas más frecuentes en la práctica clínica de pequeños animales, afectando hasta el 30% de los felinos hospitalizados. La limitación histórica del diagnóstico radica en que los marcadores tradicionales, como la urea y la creatinina sérica, presentan elevaciones significativas únicamente cuando se ha perdido entre el 66% y el 75% de la masa funcional del hígado. A pesar de que la Dimetilarginina Simétrica (SDMA) ha avanzado en la detección temprana, el análisis independiente de este biomarcador continúa mostrando variaciones individuales.

A través mediante la implementación de algoritmos de Random Forest y Gradient Boosting en los sistemas de Historia Clínica Electrónica (HCE), los investigadores han desarrollado modelos predictivos diagnósticos que analizan a lo largo del tiempo los cambios sutiles en la densidad urinaria, la relación proteína:creatinina en orina (UPC), la concentración de fósforo, el hematocrito y las tendencias microscópicas del sedimento urinario, así como el peso corporal y la edad del paciente (Balsa & Smith, 2024). Estos modelos predictivos tienen la capacidad de informar al profesional clínico sobre el desarrollo próximo de la enfermedad renal crónica en estadio IRIS 1, con un margen de anticipación de 12 a 18 meses antes de que se establezca la hiperazoemia clínica. Esta ventana de oportunidad diagnóstica facilita la implementación de intervenciones nutricionales tempranas, la protección renal farmacológica y la gestión del eje fósforo-calcio, lo que contribuye de manera significativa a disminuir la progresión de la insuficiencia renal y a prolongar la esperanza de vida del paciente.

B. Cuidados Intensivos y Urgencias: Predicción del Sepsis y Choque Séptico

En las Unidades de Cuidados Intensivos (UCI) veterinarias, el Síndrome de Respuesta Inflamatoria Sistémica (SIRS), la sepsis y la coagulación intravascular difusiva (CID) exhiben altas tasas de mortalidad si no se diagnostican en sus etapas iniciales. La monitorización convencional en la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI) produce un flujo continuo de datos, que incluye

la frecuencia cardíaca, la frecuencia respiratoria, la temperatura corporal central, la presión arterial no invasiva, la saturación de oxígeno, la tasa de lactancia y la capnografía.

La implementación de Redes Neuronales Recurrentes (RNN) y unidades de Memoria a Largo y Corto Plazo (LSTM), que han sido diseñadas específicamente para el procesamiento de series temporales y datos secuenciales, facilita el análisis de la dinámica temporal y de las micro-fluctuaciones de estas constantes vitales. Los modelos LSTM son capaces de identificar la disminución de la variabilidad fisiológica normal y patrones sutiles de hipoperfusión tisular, generando alertas de "Riesgo Inminente de Choque Séptico" con una antelación de 4 a 6 horas antes de que ocurra un colapso circulatorio irreversible. Esto proporciona al intensivista el tiempo necesario para optimizar la terapia fluida orientada por objetivos, la administración de vasopresores y la terapia antimicrobiana de amplio espectro.

C. Ganadería de Precisión: Control de Mastitis y Trastornos Metabólicos en Ganado Lechero

En el ámbito de la medicina de rebaños y la producción animal, el diagnóstico predictivo constituye un elemento fundamental de la Ganadería de Precisión (*Precision Livestock Farming* - PLF) y la integración del Internet de las Cosas Veterinarias (IoVMT) (Halachmi et al., 2025). En el ganado vacuno lechero, la mastitis subclínica constituye una de las principales causas de pérdidas económicas y del uso de antimicrobianos.

Sistemas de ordeño automatizado e IoVMT equipados con sensores de conductividad eléctrica de la leche, temperatura del pezón, recuento de células somáticas (RCS) en línea y cambios en el tiempo de rumia procesan estos datos mediante modelos de *Machine Learning* basados en *Naïve Bayes* y *Support Vector Machines*. Los algoritmos evalúan el riesgo individual de cada vaca en tiempo real, identificando casos de mastitis subclínica varios días antes de que se presenten grumos o inflamación en la glándula mamaria. De manera similar, la integración de sensores de actividad en células inteligentes con modelos de regresión logística predictiva facilita la anticipación de trastornos metabólicos peri-parto, como la cetosis subclínica y el desplazamiento de abomaso, lo que optimiza la gestión nutricional del lote en transición.

D. Oncología Veterinaria: Estratificación del Riesgo Neoplásico y Medicina Personalizada

La oncología en animales de compañía se ve favorecida por el análisis integrado de datos biológicos, médicos y clínicos. Los algoritmos de aprendizaje profundo supervisado, aplicados a paneles de alteraciones genéticas y perfiles de expresión de microARNs, permiten la clasificación de subtipos tumorales que son de forma histológica distintos en mastocitomas, linfomas y osteosarcomas en caninos.

Estos modelos no solo emiten un diagnóstico categórico, sino que también ofrecen un pronóstico individualizado. Este índice estima la probabilidad de metástasis a distancia, el tiempo libre de enfermedad y la respuesta predecible a regímenes específicos de quimioterapia o inmunoterapia. La capacidad del aprendizaje automático para estratificar a los pacientes de acuerdo con su perfil bioquímico permite evitar la administración de protocolos antineoplásicos ineficaces, lo que contribuye a la reducción de la toxicidad iatrogénica y a la mejora de la calidad de vida de los animales de compañía.

2.1.5. Transparencia, explicabilidad y la problemática de la "Caja Negra" (Black Box)

A pesar de la indiscutible precisión diagnóstica lograda por los modelos de aprendizaje automático avanzados, en particular las redes neuronales profundas y las estructuras de variación, su adopción generalizada en la práctica clínica se enfrenta a un reto conceptual y ético significativo: el problema relacionado con la opacidad algorítmica, comúnmente conocido como "caja negra".

Un algoritmo de caja negra procesa un conjunto complejo de datos médicos y produce una predicción categórica, como, por ejemplo, "El paciente presenta un 92% de probabilidad de osteosarcoma apendicular", sin ofrecer una representación clara de la cadena de razonamiento lógico que llevó a dicha conclusión. Para el médico veterinario, aceptar de manera incondicional el resultado de un sistema ausente de transparencia plantea consideraciones éticas significa-

tivas. En el caso de un diagnóstico incorrecto resultante de una interpretación algorítmica que carece de transparencia, la responsabilidad legal y moral corresponde al profesional clínico, y no al código informático.

Un algoritmo de caja negra procesa un conjunto complejo de datos médicos y produce una predicción categórica, como, por ejemplo, "El paciente presenta un 92% de probabilidad de osteosarcoma apendicular", sin ofrecer una representación clara de la cadena de razonamiento lógico que llevó a dicha conclusión. Para el médico veterinario, aceptar de manera incondicional el resultado de un sistema ausente de transparencia plantea consideraciones éticas significativas. En el caso de un diagnóstico incorrecto resultante de una interpretación algorítmica que carece de transparencia, la responsabilidad legal y moral corresponde al profesional clínico, y no al código informático.

Igualmente, la falta de explicación complica la identificación de sesgos subyacentes o "conexiones incorrectas" que el algoritmo podría haber internalizado durante la fase de entrenamiento. Por ejemplo, podría asociar la presencia de un marcador específico no con la patología en cuestión, sino con un modelo particular de analizador de laboratorio empleado en el hospital donde se obtuvieron los datos.

Para abordar este dilema y asegurar una integración ética de la tecnología, la investigación avanzada en VET-TECH requiere la adopción de la Inteligencia Artificial Explicable (Explainable AI - XAI) como un enfoque fundamental para el apoyo en la toma de decisiones médicas en el diagnóstico de patologías crónicas (Hernández & Ramírez, 2025). La Inteligencia Artificial Explicable (XAI) abarca un conjunto de marcos matemáticos y herramientas de software que tienen como objetivo desentrañar la complejidad de los algoritmos, traduciendo las interacciones multidimensionales del modelo en explicaciones visuales y cuantitativas que sean comprensibles para el ser humano. El uso de herramientas emergentes, tales como los modelos de lenguaje (LLM) y la inteligencia artificial generativa, requiere la implementación de un conjunto de orientaciones prácticas rigurosas que definan sus aplicaciones y precauciones en el ámbito de la medicina veterinaria (Chu et al., 2024).

1. SHAP (*SHapley Additive exPlanations*)

Basado en la teoría de juegos cooperativos de Lloyd Shapley, el método SHAP determina la contribución marginal de cada característica biomédica a la predicción final realizada para un paciente específico. Los valores SHAP asignan a cada variable, como el hematocrito, la ALT, la edad y la frecuencia cardíaca, un valor numérico que indica su impacto, ya sea positivo o negativo, en relación con el valor estimado promedio del modelo. A través de gráficos de cascada o gráficos de fuerza, el veterinario puede observar con claridad cuáles factores biológicos están influyendo en el aumento o disminución del riesgo en un individuo específico (Hernández & Ramírez, 2025).

2. LIME (*Local Interpretable Model-agnostic Explanations*)

LIME opera alterando de manera local las entradas del paciente individual y analizando la respuesta del modelo complejo ante estas ligeras variaciones. A continuación, LIME entrena un modelo entendible sustituto, como una regresión lineal o un árbol de decisión simple, en el entorno inmediato de la observación específica en cuestión. La explicación obtenida identifica las variables que tuvieron un mayor impacto en la decisión local del algoritmo (Hernández & Ramírez, 2025).

La integración de interfaces de inteligencia artificial explicativa (XAI) convierte el modelo predictivo en una herramienta efectiva para el apoyo en la toma de decisiones médicas (Hernández & Ramírez, 2025). El veterinario no recibe una orden algorítmica, sino un informe analítico detallado que contrasta los hallazgos del aprendizaje automático con la fisiopatología reconocida. Esto le permite corroborar la coherencia biológica de la predicción, validar la hipótesis diagnóstica y comunicar de manera clara el pronóstico al productor ganadero (Balsa & Smith, 2024; Hernández & Ramírez, 2025).

2.1.6. Retos regulatorios, éticos y de gobernanza en la implantación de la IA veterinaria

La incorporación de algoritmos de aprendizaje automático y sistemas de diagnóstico predictivo en el ecosistema VET-TECH va más allá de la simple dimensión técnica, presentando signifi-

cativos desafíos en áreas como la regulación sanitaria, la responsabilidad ética, el manejo de datos y la igualdad en el acceso a la tecnología (Balsa & Smith, 2024; Chu et al., 2024).

A. Marco Regulatorio y Homologación de Software como Dispositivo Médico (SaMD)

A diferencia de la medicina humana, en la cual organismos como la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos) en Estados Unidos y la EMA (Agencia Europea de Medicamentos) en la Unión Europea han implementado marcos regulatorios severos para el "Software como Dispositivo Médico" (Software as a Medical Device - SaMD), la medicina veterinaria enfrenta una notable falta de regulación y una considerable fragmentación normativa (Karsch, C., & University of Veterinary Medicine Hannover Research Group, 2026). En la mayoría de las jurisdicciones, los algoritmos de diagnóstico predictivo en veterinaria no están obligados a someterse a ensayos clínicos prospectivos ni a procesos de homologación antes de su comercialización.

La ausencia de una estandarización regulatoria expone al mercado a la proliferación de software comercial no validado, cuyos modelos predictivos han sido desarrollados utilizando conjuntos de datos limitados, sesgados o de calidad metodológica deficiente (Balsa & Smith, 2024). Con el propósito de reducir estos riesgos, las asociaciones veterinarias internacionales y las sociedades de bioinformática fomentan la creación de agencias de evaluación tecnológica veterinaria. Estas agencias deben exigir la publicación transparente de los conjuntos de datos utilizados para el entrenamiento, la validación en múltiples centros externos y la auditoría periódica del código fuente de los algoritmos destinados al soporte diagnóstico (Chu et al., 2024; Karsch, C., & University of Veterinary Medicine Hannover Research Group, 2026).

B. Sesgos de Datos y Equidad Diagnóstica

Un modelo de aprendizaje automático es tan eficaz como los datos con los que ha sido entrenado, lo que se resume en la expresión "basura entra, basura sale" (Balsa & Smith, 2024). Los sesgos de selección e información que se encuentran en las bases de datos históricas constituyen una amenaza directa para la equidad en el diagnóstico, por ejemplo:

- **Sesgo de Raza y Especie:** Si un modelo predictivo de cardiopatía felina ha sido entrenado principalmente con datos provenientes de hospitales universitarios de referencia en Europa y Norteamérica, donde ciertas razas puras, como el Maine Coon o el Persa, están sobrerrepresentadas, el algoritmo puede experimentar una notable disminución en su sensibilidad y especificidad al ser aplicado a gatos mestizos o a poblaciones felinas de otras regiones geográficas (Balsa & Smith, 2024; Hernández & Ramírez, 2025).
- **Sesgo Socioeconómico y de Recursos:** Los datos de salud recopilados en centros hospitalarios de alta complejidad evidencian que las pautas de diagnóstico y tratamiento son accesibles únicamente para propietarios con un elevado poder adquisitivo. Un algoritmo que ha sido entrenado únicamente con estos datos puede generar recomendaciones que resulten inaccesibles o irrelevantes en clínicas de atención primaria o en entornos rurales que cuentan con recursos limitados (Halachmi et al., 2025).

C. Responsabilidad Legal y Dilemas Ético-Profesionales

La delegación progresiva del estudio en sistemas automatizados genera interrogantes complejos en el ámbito de la responsabilidad civil y penal en relación con la práctica médica deficiente:

- En el caso en que un algoritmo predictivo genere un falso negativo en relación con una patología aguda, como la no identificación de un cuadro de torsión gástrica inicial, y el profesional clínico, confiando en el software, decida no llevar a cabo un procedimiento exploratorio, lo que resulte en la muerte del paciente, surge la cuestión de la responsabilidad jurídica. Esta responsabilidad podría recaer en múltiples actores, incluyendo al desarrollador del algoritmo, por la posible negligencia en la creación de un software que no cumple con los estándares requeridos, así como al profesional de la salud, por la decisión de no realizar el procedimiento exploratorio a pesar de la obligación de ejercer un juicio clínico independiente. La evaluación de la responsabilidad dependerá de las circunstancias específicas del caso y de la normativa vigente en la jurisdicción correspondiente. ¿Se puede atribuir la responsabilidad al veterinario tratante por no

haber ejercido un juicio crítico independiente, a la empresa desarrolladora del algoritmo por un error en el modelo, o a la institución hospitalaria por implementar tecnología que no ha sido suficientemente validada? (Chu et al., 2024).

- La jurisprudencia contemporánea en la mayoría de los sistemas jurídicos internacionales concuerda en que la inteligencia artificial no posee personalidad jurídica ni capacidad de imputación. Por lo tanto, la responsabilidad profesional recae de manera personal e indelegable en el médico veterinario (Chu et al., 2024). La inteligencia artificial debe ser considerada en todo momento como una herramienta complementaria para el diagnóstico. La dependencia excesiva o la total aceptación de las recomendaciones algorítmicas, conocida como “sesgo de automatización”, no exime al profesional de su obligación de actuar con la debida diligencia y de cumplir con la normativa correspondiente (Chu et al., 2024; Karsch, C., & University of Veterinary Medicine Hannover Research Group, 2026).

D. Privacidad de Datos, Propiedad Intelectual y Seguridad Informática

La alimentación continua de programas predictivos requiere la transferencia masiva de registros clínicos desde las clínicas veterinarias hacia servidores centralizados en la nube. Este flujo de información presenta desafíos significativos:

- **Anonimización y Protección de Datos:** en relación con la identificación, los hábitos de vida y la información financiera. Es imperativo asegurar la implementación de procesos rigurosos de anonimización y cifrado. Aunque los datos relacionados con la salud animal no están sujetos directamente a las mismas normativas de privacidad que los datos humanos, como el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD), los expedientes veterinarios contienen información personal altamente sensible de los cuidadores, incluyendo nombres, direcciones y números de contacto. Esto debe ser considerado antes de integrar dichos registros en grandes bases de datos destinadas al entrenamiento de inteligencia artificial (Rivas & Osorio, 2023).

- **Ciberseguridad:** Los modelos de aprendizaje automático pueden ser susceptibles a ataques informáticos específicos, como los ataques adversarios, en los cuales se introducen pequeñas modificaciones imperceptibles en los datos de entrada que pueden inducir al algoritmo a emitir un diagnóstico incorrecto de manera categórica. La garantía de la integridad y la resiliencia cibersegura de los sistemas VET-TECH constituye una condición indispensable para salvaguardar la salud animal y la seguridad alimentaria a nivel global (Halachmi et al., 2025; Rivas & Osorio, 2023).
- **Visión por computadora:** IA aplicada al diagnóstico por imagen

2.2. Visión por Computadora: IA Aplicada al Diagnóstico por Imagen en Medicina Veterinaria

2.2.1 Introducción y Evolución Histórica de la Imagenología Digital

La medicina veterinaria ha experimentado una transformación científica significativa en las últimas décadas, pasando de la simple inspección analógica de radiografías a la incorporación de sistemas avanzados de visión por computadora fundamentados en inteligencia artificial (Burti et al., 2020; McEvoy & Amberger, 2021).

Históricamente, la interpretación diagnóstica ha estado fundamentada exclusivamente en la observación humana, una herramienta biológica notable, pero principalmente sujeta a variaciones entre observadores, fatiga cognitiva, ilusiones ópticas y limitaciones en la percepción de matices sutiles de densidad y contraste (McEvoy & Amberger, 2021).

La digitalización de las imágenes médicas estableció las bases para la superación de estas barreras. La conversión de fenómenos físicos, tales como la atenuación de rayos X, el eco ultrasonográfico o la relajación magnética de los tejidos, en matrices numéricas de píxeles o vóxeles ha permitido que la información visual trascienda su carácter de simple registro, transformándose en un conjunto continuo de datos cuantitativos (McEvoy & Amberger, 2021). No obstante, los primeros intentos de procesamiento digital se basaban en algoritmos analíticos estrictos que requerían reglas definidas programadas por ingenieros, lo que restringía con-

siderablemente su capacidad para adaptarse a la gran variabilidad anatómica presente entre especies, razas y condiciones patológicas (Burti et al., 2020).

El cambio de paradigma significativo se produjo con la llegada del aprendizaje profundo (Deep Learning) y el desarrollo de plataformas especializadas en el procesamiento estructurado de imágenes (Burti et al., 2020; McEvoy & Amberger, 2021).

La visión por computadora contemporánea no tiene como objetivo sustituir la intuición ni el juicio del médico veterinario; en cambio, funciona como un potenciador de las capacidades perceptuales y cognitivas. Este enfoque transforma el flujo de trabajo radiológico tradicional en un ecosistema probabilístico de alta precisión, el cual tiene la capacidad de detectar alteraciones morfológicas y estructurales que son imperceptibles para el ojo humano de manera casi instantánea (Banzato et al., 2021; Burti et al., 2020).

Fundamentos Teóricos de la Visión por Computadora y el Aprendizaje Profundo

La visión por computadora es la disciplina científica que se ocupa de proporcionar a las máquinas la capacidad de extraer, procesar, analizar y comprender de manera automática la información semántica derivada de imágenes estáticas o secuencias de video (Burti et al., 2020).

A diferencia de las señales unidimensionales o de las tablas de datos clínicos estructurados, los archivos de imagen constituyen datos no estructurados de alta dimensionalidad. Para abordar este desafío, el procesamiento contemporáneo se fundamenta en modelos de aprendizaje profundo que han sido diseñados específicamente para conservar la información espacial de los datos (Banzato et al., 2021; Burti et al., 2020).

La Revolución de las Redes Neuronales Convolucionales (CNN)

Las Redes Neuronales Convolucionales representan la arquitectura esencial de la visión por computadora en el ámbito de la salud animal (Banzato et al., 2021; Burti et al., 2020). Su diseño se fundamenta en la organización funcional de la corteza visual primaria de los mamíferos, en la cual células individuales responden de manera selectiva a estímulos visuales dentro de un campo receptivo específico.

En el ámbito de la computación, una red convolucional analiza la imagen mediante una estructura jerárquica de capas especializadas que extraen propiedades de manera progresiva (Burti et al., 2020):

- 1. Capas Convolucionales:** Se emplean filtros espaciales de dimensiones reducidas que se desplazan sobre la superficie de la imagen. En las etapas iniciales, la red se dedica a identificar patrones de bajo nivel, tales como bordes, variaciones abruptas de contraste, líneas rectas y texturas de los materiales. A medida que la información se desplaza hacia niveles más profundos, el sistema integra estos elementos fundamentales para formar estructuras complejas, tales como la silueta de una cámara cardíaca, la interrupción de la corteza ósea o la geometría de un nódulo pulmonar (Banzato et al., 2021; Burti et al., 2020).
- 2. Capas de Reducción o Ajuste (*Pooling*):** El objetivo es consolidar la información pertinente y reducir la dimensionalidad espacial de la imagen. Esto proporciona una propiedad fundamental conocida como invariancia espacial, lo que implica que el algoritmo tiene la capacidad de identificar un patrón patológico, como una masa abdominal, sin depender de su orientación, escala o ubicación precisa dentro del campo de visión (Burti et al., 2020).
- 3. Capas Completamente Conectadas:** Después de la extracción de características jerárquicas, la información se sintetiza en un vector que alimenta una red de clasificación final. Esta etapa evalúa las evidencias identificadas en los niveles anteriores con el propósito de asignar probabilidades diagnósticas a la imagen analizada (Banzato et al., 2021).

Arquitecturas Avanzadas y Redes Generativas

A medida que el campo ha evolucionado, han emergido arquitecturas que trascienden la clasificación básica para abordar tareas más complejas (Burti et al., 2020; McEvoy & Amberger, 2021):

- **Redes para la Segmentación Semántica y de Instancia,** tales como U-Net: Las redes, diseñadas con una estructura en forma de “U”, constan de una fase de contracción,

que captura el contexto global de la imagen, y una fase de expansión, que recupera la precisión espacial. Estas redes permiten delimitar con exactitud las fronteras de una estructura anatómica o patológica, pixel por pixel, resultan esenciales para el cálculo de volúmenes de órganos, el monitoreo del crecimiento tumoral y la planificación quirúrgica (Burti et al., 2020).

- **Mecanismos de Atención y Transformadores Visuales (*Vision Transformers* - ViT):** Adaptados de los modelos de procesamiento de lenguaje natural, los transformadores segmentan la imagen en pequeñas secciones y analizan las relaciones a larga distancia entre todas ellas de manera simultánea. Esto permite comprender el contexto global del paciente, por ejemplo, al relacionar la presencia de una hemorragia pulmonar con la morfología de la silueta cardíaca y las estructuras vasculares circundantes, sin comprometer la resolución de los detalles locales (McEvoy & Amberger, 2021).
- **Redes Generativas Antagónicas (GAN) y Modelos de Difusión:** Estas redes se emplean para el aumento sintético de datos en patologías raras, la reducción del ruido en tomografías de baja dosis y la reconstrucción de imágenes de alta definición a partir de escaneos de menor calidad, lo que permite reducir los tiempos de sedación o anestesia en el paciente (McEvoy & Amberger, 2021).

Aplicaciones Diagnósticas por Modalidad de Imagenología Veterinaria

La versatilidad de la visión por computadora permite su aplicación en diversos métodos de diagnóstico por imagen empleados tanto en animales pequeños como en grandes (Burti et al., 2020; McEvoy & Amberger, 2021).

Radiografía Digital (Tórax, Abdomen y Sistema Osteoarticular)

La radiografía continúa siendo la modalidad diagnóstica más accesible y empleada a nivel mundial. La incorporación de la visión por computadora en este ámbito abarca áreas de gran relevancia:

- **Tórax y Cardiología:** Los algoritmos de inteligencia artificial tienen la capacidad de analizar la silueta cardíaca de manera cuantitativa, permitiendo el cálculo automatizado

de índices relacionados con la cardiomegalia, tales como el Vertebral Heart Score (VHS) y el Vertebral Left Atrial Size (VLAS) en caninos y felinos (Banzato et al., 2021). Esto disminuye de manera considerable la variabilidad entre los operadores al realizar la medición manual de los cuerpos vertebrales. En el tejido pulmonar, los modelos identifican y clasifican patrones radiográficos, tales como alveolar, intersticial, bronquial o vascular, permitiendo la detección temprana de metástasis nodulares de pequeño tamaño o consolidaciones tumorales (Banzato et al., 2021; Burti et al., 2020).

- **Evaluación Traumatológica u Osteoarticular:** Los modelos automatizados realizan una evaluación del grado de congruencia articular con el propósito de detectar de manera temprana la displasia de cadera o codo. Este proceso implica la cuantificación de los ángulos de cobertura acetabular y la identificación de osteofitos incipientes (Burti et al., 2020). De igual manera, facilitan la identificación de microfracturas irregulares que podrían no ser detectadas durante el triaje de urgencias.

Ecografía y Doppler Vascular

La ultrasonografía es una técnica que depende en gran medida de la destreza del operador y es susceptible a la aparición de artefactos en tiempo real. Los sistemas de visión por computadora que están integrados directamente en la consola del ecógrafo proporcionan asistencia al profesional clínico durante el proceso de exploración activa (McEvoy & Amberger, 2021):

- **Ecocardiografía Automatizada:** El software identifica de manera automática los planos anatómicos estándar, tales como la vista paraesternal derecha y la vista apical de cuatro cámaras, y delimita los bordes endocárdicos para llevar a cabo la medición de volúmenes sistólicos y diastólicos, así como de la fracción de eyección y el grosor parietal. Este proceso reduce de manera significativa el tiempo requerido para el estudio (Lafuente, 2025).
- **Caracterización Tisular Abdominal:** En órganos parenquimatosos, tales como el hígado, el bazo o los riñones, la inteligencia artificial evalúa la ecogenética relativa y la textura microestructural. Este análisis contribuye a la diferenciación entre cambios

difusos inflamatorios o patológicos y lesiones infiltradas o neoplásicas focalizadas (Burti et al., 2020).

- **Tomografía Computarizada (TC) y Resonancia Magnética (RM):** En modalidades avanzadas de cortes seccionales, la cantidad de datos generados por cada estudio puede exceder los miles de imágenes por paciente. En este contexto, la visión por computadora se considera esencial para optimizar el proceso de interpretación.
- **Segmentación y Reconstrucción Tridimensional en TC:** Permite el aislamiento con precisión matemática de estructuras óseas, redes vasculares, como en el mapeo de tumores pulmonares intra o extrahepáticos, así como de masas tumorales (Burti et al., 2020). Esto posibilita la elaboración de guías quirúrgicas personalizadas y la producción de impresiones tridimensionales preoperatorias.
- **Diagnóstico Neuro-Imagenológico en RM:** Los algoritmos segmentan el tejido cerebral y la médula espinal con el propósito de caracterizar tumores intracraneales, hernias de disco intervertebral, áreas de isquemia y lesiones inflamatorias. Asimismo, se evalúa el grado de edema perilesional y el efecto de masa sobre las estructuras ventriculares (Banzato et al., 2021).

Retos Específicos de la Imagenología Veterinaria: Diversidad Interespecie y Variabilidad Anatómica

A diferencia de la medicina humana, en la cual los modelos de visión por computadora se desarrollan para una única especie con variaciones anatómicas relativamente predecibles, la medicina veterinaria se enfrenta a un desafío metodológico significativo: la notable diversidad morfológica (McEvoy & Amberger, 2021).

El Desafío del Dimorfismo y la Multiplicidad de Especies

Un algoritmo que ha sido entrenado exclusivamente con imágenes de tórax humano tiene la capacidad de extrapolar sus aprendizajes de manera efectiva entre distintos pacientes. En el ámbito de la medicina veterinaria, un modelo debe ser capaz de interpretar de manera

adecuada la radiografía de un canino de raza Chihuahueño que pesa 1 kg, así como la de un Gran Danés que pesa 80 kg. Además, debe ser capaz de diferenciar las variaciones fisiológicas correspondientes a las razas dolicocefalas, mesocefalas y braquicefalas (Banzato et al., 2021; McEvoy & Amberger, 2021).

En las razas braquicefalas, la conformación torácica y el ángulo de entrada del mediastino modifican de manera significativa la posición relativa del corazón y los patrones de ventilación pulmonar, los cuales se considerarían patológicos en un paciente dolicocefalo. Por consiguiente, los modelos de visión por computadora en el ámbito veterinario deben integrar metadatos contextuales, tales como especie, raza, edad y condición corporal, o ser entrenados con bases de datos heterogéneas con el fin de prevenir la aparición de falsos positivos que puedan surgir de conformaciones anatómicas normales pero extremas (Banzato et al., 2021; McEvoy & Amberger, 2021).

Limitaciones en la Estandarización de Datos

Un obstáculo significativo es la ausencia de estandarización en los protocolos de adquisición de imágenes entre diversos centros veterinarios (Burti et al., 2020; McEvoy & Amberger, 2021):

- **Parámetros de Exposición e Inmovilización:** En pacientes veterinarios, es común observar movimiento, ya sea voluntario o involuntario, durante la realización de radiografías. La decisión de utilizar sedación, la sujeción física por parte de personal capacitado y la variabilidad en los valores de kilovoltaje y miliamperaje generan artefactos que pueden inducir confusión en las redes neuronales, en caso de que estas no hayan sido expuestas a dicho nivel de ruido durante su proceso de entrenamiento (McEvoy & Amberger, 2021).
- **Escasez de Datos Etiquetados (*Ground Truth*):** En el ámbito de la medicina humana, existen extensos repositorios públicos que contienen millones de imágenes, las cuales han sido etiquetadas de acuerdo con consensos alcanzados por radiólogos expertos, en el ámbito de la medicina veterinaria, los conjuntos de datos masivos y adecuadamente curados son limitados, fragmentados y, con frecuencia, se encuentran bajo la protección

de instituciones privadas o académicas. Esto requiere la aplicación de técnicas avanzadas de aprendizaje por transferencia, en las cuales un modelo preentrenado con millones de imágenes generales es reajustado mediante el uso de bases de datos veterinarias especializadas (Burti et al., 2020; McEvoy & Amberger, 2021).

Validación Clínica Externa, Interpretabilidad y Ética en la Decisión Algorítmica

Para que un sistema de visión por computadora se implemente de manera segura en la práctica clínica diaria, no es suficiente que demuestre una alta precisión durante las fases de desarrollo en laboratorio; es necesario que se someta a rigurosos procesos de validación clínica externa (McEvoy & Amberger, 2021).

El Fenómeno del Sesgo y la Generalización

Un modelo de inteligencia artificial puede lograr medidas de rendimiento casi perfectas cuando se evalúa con imágenes procedentes del mismo hospital veterinario en el que fue desarrollado; sin embargo, puede presentar un desempeño deficiente al ser probado en un entorno diferente (McEvoy & Amberger, 2021). Este error en la generalización se produce debido a la existencia de variables de confusión no observables en los datos de entrenamiento, tales como el modelo específico del equipo radiológico, el software de procesamiento del chasis o el formato de las marcas de lateralidad. El algoritmo tiene la capacidad de aprender a asociar de manera inadvertida una marca de una estructura específica con la presencia de una enfermedad, lo que da lugar a la formación de un atajo cognitivo artificial.

La validación externa consiste en evaluar el algoritmo en múltiples centros médicos, utilizando diferentes equipos de imagen e incluyendo poblaciones animales de diversas geografías y manejos clínicos. Este proceso asegura que el modelo sea capaz de identificar correctamente la señal de patología (McEvoy & Amberger, 2021).

Explicabilidad e Interpretabilidad (XAI) en la Consulta Veterinaria

Uno de los principales temores en el ámbito veterinario es el concepto de la "caja negra", que se refiere a la posibilidad de recibir una recomendación diagnóstica generada por un algoritmo

sin tener claridad sobre los fundamentos que sustentan dicha conclusión. (Burti et al., 2020). Para abordar esta cuestión, la visión por computadora contemporánea emplea técnicas de Inteligencia Artificial Explicable (Explainable AI - XAI), entre las cuales se destacan los Mapas de Activación por Gradientes, como es el caso de Grad-CAM. Estos métodos producen un mapa de calor superpuesto sobre la imagen analizada, destacando en tonos cálidos (rojo y amarillo) las áreas específicas de la matriz de píxeles que tuvieron el mayor peso cuantitativo en el proceso de toma de decisiones de la red (Burti et al., 2020). Si el algoritmo diagnostica un patrón alveolar en el lóbulo pulmonar craneal derecho, el mapa de calor debe iluminar precisamente esa región anatómica. Si el mapa ilumina una marca externa de lateralidad o el borde de la colimación, el clínico sabrá inmediatamente que la predicción del modelo carece de validez médica.

Marco Ético y Responsabilidad Profesional

La integración de la visión por computadora plantea cuestiones éticas y legales fundamentales que deben ser consideradas por la comunidad médica (McEvoy & Amberger, 2021):

- **El papel del médico veterinario:** La inteligencia artificial se desempeña como un sistema de apoyo a la decisión clínica (Clinical Decision Support System - CDSS). La responsabilidad legal y ética relacionada con el diagnóstico final, la prescripción de tratamientos o la indicación de intervenciones quirúrgicas corresponde, en última instancia, al médico veterinario debidamente colegiado.
- **Consentimiento Informado e Información al Cuidador:** Los cuidadores de los pacientes deben ser informados sobre la utilización de herramientas analíticas automatizadas en el proceso diagnóstico, asegurando así la transparencia en la gestión de la salud de sus animales.
- **Privacidad de Datos e Intelectualidad:** Las imágenes radiográficas y los registros médicos son considerados propiedad de las clínicas o de los tutores, de acuerdo con la legislación territorial vigente. El empleo de estos datos para la capacitación de

modelos comerciales debe estar sujeto a regulaciones establecidas en acuerdos éticos que garanticen la ocultación y el uso adecuado de la información.

Perspectivas Futuras e Integración Multimodal

El futuro de la visión por computadora en la medicina veterinaria no se restringe al análisis individual de imágenes. La tendencia actual se orienta hacia la integración multimodal, en la cual los modelos de visión se combinan directamente con el Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN) y los grandes modelos de lenguaje. (*Large Language Models - LLMs*) (Portal Animal's Health, 2026).

Un ecosistema diagnóstico integral del futuro próximo procesará simultáneamente la imagen radiográfica de un paciente junto con su historia clínica digitalizada, sus valores hematológicos, sus antecedentes raciales y las notas del análisis redactadas en texto libre (Portal Animal's Health, 2026). De este modo, la visión por computadora contextualizará una observación visual discreta, como un leve patrón bronquial, en relación con un paciente canino que presenta antecedentes de tos crónica, eosinofilia periférica y exposición ambiental. Esto permitirá la emisión de un informe fundamentado, personalizado y coherente con la realidad fisiopatológica del paciente.

La minería de datos basada en imágenes facilitará el descubrimiento de nuevos biomarcadores fenotípicos que no son visibles. Los patrones texturales de un órgano, analizados a nivel microestructural, permitirán identificar predisposiciones genéticas, respuestas tempranas a tratamientos farmacológicos o pronósticos neoplásicos mucho antes de que las manifestaciones macroscópicas se hagan evidentes (McEvoy & Amberger, 2021).

2.3. Ciología Digital, Hematología Automatizada e Inteligencia Artificial en el Laboratorio Clínico Veterinario

2.3.1. Introducción y Evolución Histórica de la Patología Clínica Veterinaria

La patología clínica veterinaria está experimentando una transformación analítica sin precedentes. Históricamente, el diagnóstico en el laboratorio ha estado condicionado por procesos

manuales, una considerable labor humana y el juicio subjetivo del patólogo clínico. El examen microscópico de frotis sanguíneos, así como de aspirados con aguja fina de masas o fluidos corporales, y de muestras citológicas de mucosas y órganos parenquimatosos, ha constituido, durante más de un siglo, la base fundamental sobre la cual se fundamentan las decisiones terapéuticas y pronósticas en animales pequeños y grandes (Stockham & Scott, 2008).

No obstante, los métodos analíticos tradicionales presentan limitaciones intrínsecas. La subjetividad interobservador e intraobservador se refiere a las variaciones en la interpretación y evaluación de datos entre diferentes observadores (interobservador) y dentro del mismo observador en diferentes momentos (intraobservador) (Meyer & Harvey, 2004).

Estos conceptos son fundamentales en la investigación y análisis de datos, ya que pueden influir en la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos, es esencial considerar y minimizar estas subjetividades para garantizar la objetividad en los estudios realizados. La interpretación de una extensión citológica depende de la experiencia del operador, de la fatiga visual acumulada tras jornadas prolongadas y de la presencia de artefactos derivados de la preparación o tinción.

Tiempos de respuesta diferidos. El envío de muestras físicas a laboratorios de referencia centralizados conlleva tiempos de transporte que pueden afectar la atención de pacientes en estado crítico o en unidades de cuidados intensivos.

Variabilidad en la preparación manual: La calidad de la extensión, la celularidad del preparado y las variaciones en los protocolos de tinción, tales como las tinciones rápidas de tipo Romanowsky utilizadas en la práctica ambulatoria en contraposición a las tinciones estandarizadas de Papanicolaou o Wright-Giemsa aplicadas en laboratorios centrales, generan fuentes constantes de error preanalítico (Villiers & Blackwood, 2005).

La incorporación de la citología digital, los analizadores hematológicos automatizados de última generación y los algoritmos de inteligencia artificial (IA) está modificando de manera significativa este contexto. La convergencia entre el escaneo de portaobjetos completos (Whole

Slide Imaging - WSI), la microscopía digitalizada, la citometría de flujo y el aprendizaje profundo (Deep Learning) ha permitido que las muestras biológicas dejen de ser registros morfológicos aislados y se transformen en conjuntos masivos de datos digitales que son cuantificables (Bertram et al., 2020). Este cambio de paradigma no tiene como objetivo reemplazar la experiencia del patólogo o del médico veterinario, sino más bien potenciar su capacidad de detección, estandarizar los procesos analíticos y acelerar el tiempo de respuesta diagnóstica a nivel global (Aeffner et al., 2019).

Citología Digital y Escaneo de Portaobjetos Enteros (Whole Slide Imaging - WSI)

La citología digital se refiere al conjunto de tecnologías que facilitan la captura, el almacenamiento, el análisis y la interpretación digital de muestras citológicas que han sido preparadas en portaobjetos de vidrio. El fundamento de esta disciplina se centra en el escaneo de portaobjetos completos (Whole Slide Imaging - WSI), un procedimiento en el cual un escáner óptico de alta precisión captura miles de imágenes individuales en alta resolución de un preparado microscópico y las integra de manera coherente en un único archivo digital navegable de gigapíxeles (Pantanowitz et al., 2011).

Principios Tecnológicos de la Citología Digital frente a la Histopatología Digital

A diferencia de los cortes histológicos de tejido, en los cuales las muestras son planas, de grosor uniforme (entre 3 y 5 micras) y se encuentran en un único plano focal, los preparados citológicos presentan desafíos técnicos específicos. Distribución tridimensional y superposición celular, las extensiones citológicas presentan una geometría tridimensional que es heterogénea, las células se organizan en aglomerados, grupos tridimensionales o capas superpuestas de grosor variable.

Requerimiento de alta resolución: La caracterización citológica requiere una evaluación minuciosa de los detalles cromatínicos, la identificación de núcleos múltiples o anómalos, la relación entre el núcleo y el citoplasma, así como la detección de microorganismos intracelulares, tales como *Leishmania* spp., *Ehrlichia* spp. o bacterias fagocitadas (Raskin & Meyer, 2016).

Para llevar a cabo este análisis, es necesario utilizar objetivos de alta apertura digital con una magnificación equivalente a 40x o 100x, empleando inmersión en aceite.

Para superar estas limitaciones, los escáneres de imágenes de portaobjetos de microscopía digital (WSI, por sus siglas en inglés) utilizados en citología implementan la técnica de montaje focal o enfoque multiplano (Z-Stacking). Esta técnica implica la captura de la misma región del preparado en múltiples planos focales a lo largo del eje vertical, lo que permite al usuario o al algoritmo de inteligencia artificial realizar una navegación dinámica a través del grosor de la muestra, enfocando diferentes capas celulares de manera análoga a lo que se lograría con el tornillo micrométrico de un microscopio óptico convencional (Farahani et al., 2015).

2.3.2. Telepatología Citológica y Flujos de Trabajo Remotos

La digitalización de las muestras elimina la dependencia de la logística física relacionada con el envío de cristales. La telepatología citológica facilita la transmisión de un tratamiento realizado en una clínica veterinaria de urgencias a un patólogo clínico certificado, en un plazo de minutos, independientemente de su ubicación en el mundo (Massoco et al., 2020). Este aspecto es fundamental en situaciones de diagnóstico intraoperatorio, como la evaluación de márgenes quirúrgicos o la citología de impronta por congelación, así como en la evaluación rápida de la idoneidad de la muestra (Rapid On-Site Evaluation - ROSE). Esto garantiza que el preparado contenga un material diagnóstico suficiente antes de que el paciente sea retirado del procedimiento anestésico (Goyal et al., 2019).

Hematología Automatizada de Última Generación en Medicina Veterinaria

La evaluación del frotis sanguíneo y el establecimiento de los indicadores hematológicos completos, comúnmente conocidos como hemograma, constituyen las pruebas de laboratorio más solicitadas en la práctica veterinaria. La hematología automatizada ha experimentado una evolución significativa, pasando de contadores simples basados en la impedancia eléctrica a sistemas híbridos de alta complejidad. Estos sistemas integran la impedancia analítica, la dispersión de luz láser (fluorescencia óptica láser) y la citometría de flujo (Weiser, 2012).

Fundamentos Analíticos: Impedancia, Dispersión Óptica y Citometría de Fluorescencia

1. **Método de Impedancia Eléctrica:** Se mide la interrupción de una corriente eléctrica que se produce cuando las células, que se encuentran suspendidas en un líquido conductor, atraviesan un pequeño orificio de apertura. La magnitud de la resistencia eléctrica generada es directamente proporcional al volumen de la célula. A pesar de ser una técnica de alta precisión para el recuento total de eritrocitos y plaquetas, presenta limitaciones en la diferenciación de subpoblaciones leucocitarias complejas y en la evaluación de células de tamaño similar, como es el caso de la confusión entre macroplaquetas y eritrocitos de pequeño tamaño en pacientes felinos (Weiser, 2012).
2. **Dispersión Óptica de Luz Láser:** En estos analizadores, una corriente fluida alinea las células en una disposición lineal y las hace transitar a través de un haz de luz láser. La luz se dispersa en diversos ángulos (Thrall et al., 2012):
 - **Dispersión en ángulo frontal (Forward Scatter):** Proporciona información directa sobre el tamaño o volumen celular.
 - **Dispersión en ángulo lateral (Side Scatter):** Evalúa la estructura interna de la célula, reflejando su complejidad nuclear, la lobulación y el grado de granulación citoplasmática.
3. **Citometría de Flujo con Fluorescencia:** Representa la regla de oro en los analizadores de hematología veterinaria de gama alta. Al incubar la muestra sanguínea con colorantes fluorocromos específicos que se unen a los ácidos nucleicos (ARN y ADN), el sistema mide la intensidad de emisión fluorescente. Esta capacidad permite diferenciaciones clave (Weiser, 2012):
 - **Determinación cuantitativa de reticulocitos:** Permite distinguir entre anemias regenerativas y no regenerativas cuantificando de forma precisa la madurez de los eritrocitos jóvenes en función de su contenido de ARN residual.

- **Diferenciación leuco-diferencial de 5 a 6 poblaciones:** Clasifica de forma automatizada neutrófilos, linfocitos, monocitos, eosinófilos, basófilos y granulocitos inmaduros.

2.3.3. Desafíos Específicos de las Especies Domésticas

Los analizadores hematológicos que fueron desarrollados inicialmente para la medicina humana tienden a presentar fallos al ser utilizados en muestras veterinarias, a menos que se cuente con algoritmos específicos adaptados a cada especie. La hematología veterinaria presenta diferencias morfométricas significativas (Stockham & Scott, 2008):

- **Eritrocitos de tamaño variable:** Los caninos presentan eritrocitos de considerable tamaño, que oscilan entre 60 y 70 femtolitros, mientras que los felinos exhiben eritrocitos notablemente más pequeños, con un rango de 39 a 55 femtolitros. Además, los gatos son propensos a la formación de agregados plaquetarios, lo cual se debe a la alta reactividad de sus plaquetas.
- **Presencia de eritrocitos nucleados (Rubricitos):** En diversas condiciones fisiopatológicas, tales como hemólisis severa, intoxicación por plomo o disfunción esplénica, la médula ósea libera eritrocitos nucleados en la circulación. En los analizadores de impedancia convencionales, los eritrocitos nucleados son contabilizados incorrectamente como linfocitos, lo que distorsiona el recuento total de leucocitos, a menos que se implementen algoritmos específicos de fluorescencia (Weiser, 2012).
- **Variaciones en especies de mamíferos exóticos, aves y reptiles:** En aves, reptiles y anfibios, los eritrocitos y las plaquetas, también conocidos como trombocitos, presentan núcleos, lo que invalida la aplicación de los sistemas tradicionales de impedancia y requiere el uso de análisis mediante dispersión láser y citometría adaptada.

Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en el Laboratorio Clínico

El procesamiento de imágenes y el aprendizaje profundo funcionan como un vínculo de integración entre la citología digitalizada y la hematología automatizada. Los algoritmos de redes neuronales convolucionales (CNN) y los modelos de segmentación celular son capaces

de procesar miles de objetos biológicos por segundo, llevando a cabo tareas de clasificación morfológica con una velocidad y reproducibilidad que superan las capacidades para el ojo humano (Aeffner et al., 2019).

Hematología Digital y Análisis de Frotis por Visión por Computadora

Los analizadores de hematología digital de imagen generan fotografías de alta resolución de la monocapa del frotis sanguíneo teñido. A continuación, el sistema de inteligencia artificial lleva a cabo un proceso organizado de procesamiento (Zarella et al., 2019):

- 1. Segmentación de la monocapa:** El algoritmo localiza la región óptima del frotis donde los eritrocitos se distribuyen en una sola capa sin superponerse ni distorsionarse.
- 2. Clasificación celular automatizada:** La red neuronal aísla individualmente cada leucocito y lo clasifica dentro de su categoría correspondiente (neutrófilo maduro, neutrófilo en banda, linfocito, monocito, eosinófilo o basófilo).
- 3. Análisis morfológico cuantitativo:**
 - **Eritromorfología:** Identifica y cuantifica la presencia de poiquilocitos (esferocitos, equinocitos, acantocitos, esquizocitos y diana-citos), ayudando en el diagnóstico precoz de anemias inmunomediadas (AHIM), microangiopatías o fallos hepáticos y renales.
 - **Anomalías leucocitarias:** Detecta signos de toxicidad neutrofílica (cuerpos de Döhle, basofilia citoplasmática, vacuolización) e identifica la presencia de blastos inmaduros sospechosos de leucemia o síndromes mielodisplásicos.
 - **Estimación plaquetaria automatizada:** Calcula la masa plaquetaria total, detecta macroplaquetas y cuantifica la presencia de agregados plaquetarios para alertar sobre pseudotrombocitopenias técnicas.

Citología Oncológica e Inflamatoria

En el análisis de aspirados con aguja fina (AFAF) de masas cutáneas, subcutáneas o viscerales, los modelos de inteligencia artificial han demostrado una notable eficacia en la clasificación automatizada de patrones de desarrollo histogenético (Bertram et al., 2020):

- **Diferenciación entre inflamación y neoplasia:** Los algoritmos llevan a cabo un análisis de la composición celular primaria, permitiendo la identificación rápida de si el preparado está predominantemente constituido por poblaciones leucocitarias, tales como neutrófilos, macrófagos, eosinófilos o células plasmáticas, o si, por el contrario, está dominado por una población epitelial, mesenquimal o de células redondas, ya sean monomórficas o pleomórficas (Raskin & Meyer, 2023).
- **Caracterización de Criterios de Malignidad:** Las redes neuronales profundas evalúan de forma objetiva parámetros morfométricos que tradicionalmente dependían de la apreciación subjetiva del observador (Bertram et al., 2020):
 - Variación en el tamaño celular (anisocitosis) y nuclear (anisocariosis).
 - Aumento de la relación núcleo-citoplasma.
 - Presencia de nucleolos múltiples, gigantes o anómalos.
 - Espesamiento e irregularidad de la membrana nuclear.
 - Presencia y cuantificación automatizada de figuras mitóticas atípicas.
- **Clasificación de Neoplasias de Células Redondas:** Los modelos de aprendizaje automático demuestran ser eficaces en la clasificación citológica de mastocitomas, histiocitomas, linfomas, tumores venéreos transmisibles (TVT) y plasmocitomas. Estos modelos son capaces de identificar características específicas, tales como el grado de granulación citoplasmática en mastocitos o la presencia de microfilamentos lipídicas características (Bertram et al., 2020).

2.3.4. Parasitología Sanguínea y Microorganismos Intracelulares

La identificación visual de agentes infecciosos intracelulares en muestras de sangre o líquidos corporales constituye uno de los ámbitos en los que la inteligencia artificial proporciona una mayor sensibilidad. La inspección manual de numerosos campos microscópicos a una magnificación de 100x requería períodos prolongados de tiempo y conllevaba el riesgo de omitir infecciones de baja intensidad (Solano et al., 2011).

Los algoritmos de visión por computadora están entrenados para escanear millones de eritrocitos y leucocitos en segundos, detectando e identificando agentes como (Lippolis et al., 2022):

- **Morganismos eritrocíticos e intraeritrocíticos:** *Babesia canis*, *Babesia gibsoni*, *Cytauxzoon felis* y *Mycoplasma haemofelis* (hemotropo felino).
- **Organismos leucocíticos y plaquetarios:** Mórulas de *Ehrlichia canis* en monocitos, *Anaplasma phagocytophilum* o *Anaplasma platys* en neutrófilos y plaquetas.
- **Microfilarias:** Identificación morfológica y cuantificación automatizada de *Dirofilaria immitis* o *Acanthocheilonema reconditum* en preparaciones de sangre fresca o gota gruesa digitalizada.

Validación Clínica, Métricas de Rendimiento e Interpretabilidad en la Decisión Algorítmica

Para que una herramienta analítica basada en inteligencia artificial o un analizador hematológico automatizado sea incorporada de manera formal en el laboratorio clínico veterinario, es necesario que supere las pruebas de validación metodológica y clínica, conforme a las directrices establecidas por organizaciones internacionales, como la American Society for Veterinary Clinical Pathology (ASVCP) (Flatland & Freeman, 2020).

Evaluación de la Calidad Analítica y Comparación de Métodos

El rendimiento de un nuevo algoritmo o analizador se evalúa mediante una comparación rigurosa con el método de referencia, conocido como Gold Standard. En el ámbito de la patología clínica, este método de referencia generalmente consiste en la evaluación consensuada realizada por un grupo de patólogos clínicos expertos y certificados (Flatland & Freeman, 2020).

Las métricas clínicas fundamentales incluyen:

- **Sensibilidad Clínica (Exhaustividad):** Mide la probabilidad de que el algoritmo identifique correctamente una alteración celular o una muestra patológica cuando esta se encuentra realmente presente.

- **Especificidad Clínica:** Determina la capacidad del sistema para clasificar adecuadamente como normales aquellas muestras exentas de patología, reduciendo las tasas de falsos positivos que desencadenarían pruebas confirmatorias innecesarias y costosas.
- **Coeficiente de Correlación y Gráficos de Bland-Altman:** Se emplean para evaluar la concordancia cuantitativa entre las cifras emitidas por la máquina y las del patólogo humano (por ejemplo, en el recuento leuco-diferencial absoluto o el recuento de reticulocitos).
- **Precisión Inter e Intra-Ensayos (Coeficiente de Variación - CV):** Garantiza que la herramienta entregue resultados idénticos ante la reevaluación repetida de la misma muestra bajo las mismas condiciones analíticas.

Interpretabilidad e IA Explicable (XAI) en Patología Clínica

El concepto de "caja negra", en el cual un algoritmo proporciona una conclusión diagnóstica, como por ejemplo "Linfoma de Alto Grado", sin revelar el razonamiento morfológico subyacente, es inaceptable en el contexto del diagnóstico médico veterinario (Tizhoosh & Pantanowitz, 2018). Para abordar esta limitación, la patología digital emplea técnicas de Inteligencia Artificial Explicable (Explainable AI - XAI).

A través de la utilización de mapas de activación por gradiente, como Grad-CAM, el software aplica un código de colores sobre la imagen celular que se está analizando. El patólogo tiene la capacidad de verificar, de manera inmediata, las estructuras que fundamentaron la clasificación de la red. Por ejemplo, puede determinar si el sistema iluminó la hendidura nuclear cromo-fina de un blasto o las granulaciones metacromáticas de un mastocito, lo que permite confirmar que la predicción se basa en criterios médicos válidos y no en un artefacto de la tinción o del fondo del portaobjetos (Aeffner et al., 2019). Igualmente, los sistemas modernos disponen de galerías celulares segmentadas, en las cuales el analista humano tiene la capacidad de revisar y reclasificar manualmente las células agrupadas por el algoritmo mediante un simple clic (Zarella et al., 2019).

Consideraciones Prácticas, Control de Calidad y Aspectos Éticos

La implementación de la citología digital y la inteligencia artificial en el laboratorio presenta desafíos operativos, financieros y normativos que requieren una gestión estructurada (Tizhoosh & Pantanowitz, 2018).

Gestión de Errores Preanalíticos y Aseguramiento de la Calidad

La calidad de los resultados generados por un modelo de inteligencia artificial está directamente relacionada con la calidad de los datos de entrada. Los errores preanalíticos continúan siendo la principal causa de fallos en el diagnóstico (Flatland & Freeman, 2020):

- **Grosor del frotis y celularidad:** Extensiones citológicas de considerable grosor dificultan el adecuado enfoque de los escáneres de imágenes de diapositivas completas (WSI) y generan confusión en los modelos de visión, lo que puede resultar en la clasificación errónea de agregados celulares como células malignas (Farahani et al., 2015).
- **Artefactos de tinción y lisis celular:** La presencia de coloración precipitada, el uso de reactivos contaminados o la fragmentación celular durante el proceso de aspiración, como las sombras nucleares o las células en suspensión, requieren que el algoritmo disponga de módulos de detección de calidad que sean capaces de rechazar imágenes que no sean adecuadas para el diagnóstico.
- **Control de Calidad Interno y Externo (CCI / CCE):** Las herramientas analíticas basadas en inteligencia artificial deben someterse a calibraciones periódicas y participar en programas de evaluación externa de la calidad, los cuales son organizados por sociedades profesionales de patología veterinaria.

El Rol del Patólogo en la Era Digital: La Sinergia Hombre-Máquina

Existe un consenso claro dentro de la comunidad médica veterinaria: la inteligencia artificial no sustituye al patólogo clínico; lo transforma, potenciando su eficiencia y estandarizando los diagnósticos a través de un modelo colaborativo (Bertram et al., 2020; Massoco et al., 2020).

2.3.5. Perspectivas Futuras: Patología Integrada, Ómicas y Diagnóstico en el Punto de Atención (POCT)

El horizonte analítico de la patología clínica veterinaria se orienta hacia la convergencia tecnológica y el diagnóstico en el punto de atención, conocido como Point-of-Care Testing (POCT) (Lippolis et al., 2022):

- **Dispositivos POCT con IA integrada:** El avance en la creación de microscopios digitales portátiles de bajo costo, dotados de procesadores dedicados (Edge AI), facilitará que las clínicas veterinarias de menor tamaño y ubicadas en áreas rurales lleven a cabo análisis de frotis sanguíneos, urianálisis y citologías básicas en un lapso de minutos, con una precisión respaldada por redes neuronales que han sido entrenadas en laboratorios centrales.
- **Patología Integrada y Datos Ómicos:** La citología digital se integrará con la información genómica, transcriptómica y proteómica del paciente. Los modelos multimodales tendrán la capacidad de predecir el perfil mutacional o la respuesta a los fármacos quimioterápicos a partir de la evaluación morfológica de las células en una imagen digitalizada, lo que permitirá acelerar el avance de la medicina de precisión en el ámbito de la oncología veterinaria.
- **Análisis de Orina y Fluidos Corporales por Visión Computacional:** La evaluación del sedimento urinario a través de citometría de flujo y la digitalización de imágenes en tiempo real facilitará la identificación automatizada y precisa de cristales, bacterias, cilindros, eritrocitos, leucocitos y células epiteliales, eliminando la variabilidad inherente al análisis manual bajo el microscopio.



**Fundamentos de la medicina
veterinaria integrativa y práctica
basada en la evidencia**

CAPÍTULO III.

FUNDAMENTOS DE LA MEDICINA VETERINARIA INTEGRATIVA Y PRÁCTICA BASADA EN LA EVIDENCIA

Oscar Darwin Criollo Salinas

3.1. Epistemología de la Medicina Integrativa y el Modelo One Health (Una Sola Salud)

3.1.1. Introducción: La Necesidad de una Transformación Paradigmática

La medicina veterinaria contemporánea se encuentra en una encrucijada histórica. En el transcurso del último siglo, el progreso científico y tecnológico, enmarcado en el paradigma positivista, ha permitido a las ciencias veterinarias alcanzar niveles sin precedentes en precisión diagnóstica y eficacia terapéutica (Academia Colombiana de Ciencias Veterinarias (ACCV), 2026). La eliminación de diversas patologías infecciosas a través de la vacunación masiva, el perfeccionamiento de técnicas quirúrgicas, la síntesis de fármacos antimicrobianos de acción específica y el desarrollo de tecnologías avanzadas de imagenología representan evidencias concluyentes de los logros del método reduccionista (Vargas & Morales, 2020).

No obstante, a medida que la sociedad en el siglo XXI enfrenta desafíos ambientales, epidemiológicos y éticos de gran complejidad, se han hecho evidentes las limitaciones del modelo médico tradicional (Ríos D. , 2022). La aparición y reaparición de enfermedades infecciosas, la crisis global relacionada con la resistencia a los antimicrobianos, el aumento de patologías crónico-degenerativas e inflamatorias en animales de compañía, así como la rápida alteración de los ecosistemas en todo el planeta, evidencian que ni la salud animal ni la salud pública pueden ser consideradas como entidades aisladas, expuestas únicamente a organismos patógenos particulares (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2021).

En este ámbito, surge la Medicina Veterinaria Integrativa, no como un rechazo a la biomedicina alopática convencional ni como una alternativa caprichosa, sino como una evolución epistemológica necesaria (Schoen, 2020). La medicina integrativa sugiere la convergencia armónica

de la biomedicina con terapias complementarias basadas en evidencia científica. Este enfoque aborda al paciente de manera holística, considerando su biología, estado emocional, nutrición, entorno y bienestar general (Vargas & Morales, 2020).

De forma similar, el marco de Una Sola Salud (One Health) amplía esta perspectiva desde el individuo hacia la colectividad global, reconociendo formalmente que la salud de los seres humanos, de los animales domésticos y silvestres, así como de los ecosistemas, se encuentra inseparablemente interconectada (World Organization for Animal Health, 2021). Este capítulo examina los fundamentos epistemológicos de dicha integración, la filosofía de la ciencia que la respalda, su conexión con la práctica fundamentada en la evidencia y el papel central que desempeña la veterinaria en el paradigma One Health.

3.1.2. Fundamentos Epistemológicos de la Medicina Veterinaria Integrativa

Para entender la medicina integrativa, es fundamental analizar las corrientes filosóficas que sustentan la generación del conocimiento médico. La ciencia epistemológica, en tanto que disciplina que se ocupa del estudio de la naturaleza, origen y límites del conocimiento científico, facilita el análisis de la transición conceptual desde el reduccionismo tecnológico hacia una perspectiva sistémica y compleja en el ámbito de la salud animal (Vargas & Morales, 2020).

3.1.3. Del Reduccionismo Mecanicista a la Teoría General de Sistemas

El paradigma médico convencional se ha fundamentado históricamente en dos pilares de origen cartesiano y newtoniano (Ríos T. , 2022):

- **Mecanicismo:** La premisa de que el organismo vivo funciona de manera similar a un sistema mecánico sostiene que el análisis detallado de sus componentes individuales, tales como órganos, tejidos, células y moléculas, permite explicar la totalidad biológica (Vargas & Morales, 2020).
- **Causalidad Lineal:** La creencia de que la enfermedad es el resultado de una única causa inicial y determinante, ya sea un agente patógeno, una mutación genética o un trauma, que produce un efecto directo y cuantificable (Ríos D. , 2022).

Si bien este enfoque mantiene una notable efectividad en el tratamiento de condiciones agudas, traumas y emergencias, resulta inadecuado para abordar patologías crónicas, metabólicas, inmunológicas y conductuales (Schoen, 2020). En el contexto actual, la interacción simultánea de factores genéticos, ambientales, nutricionales y estrés da lugar a dinámicas complejas que no pueden ser comprendidas a través de esquemas simples de causa y efecto.

En este contexto, la medicina veterinaria integrativa se fundamenta en los principios de la Teoría General de Sistemas, formulada por Ludwig von Bertalanffy (Vargas & Morales, 2020):

1. El animal se concibe como un sistema abierto y dinámico, que se caracteriza por la autoorganización, la interconexión de sus componentes y la capacidad de autorregulación, incluyendo la homeostasis y la alostasis.
2. La propiedad emergente del sistema, conocida como salud, no se limita a la simple ausencia de enfermedad, sino que se define como un estado dinámico de equilibrio óptimo entre el organismo y su entorno.
3. La enfermedad se interpreta como una perturbación en la red funcional del organismo cuando la capacidad de resiliencia biológica ha sido rebasada.

3.1.4. Paradigmas de Integración: Biomedicina, Complementariedad y Holismo

El diálogo entre la medicina convencional y la medicina integrativa requiere una delimitación conceptual de los términos comúnmente utilizados en la discusión científica (Schoen, 2020):

- **Medicina Alternativa:** Prácticas empleadas en sustitución de la medicina convencional. La sustitución sistemática de terapias alopáticas validadas por prácticas que carecen de evidencia científica en el tratamiento de patologías graves pone en riesgo el bienestar animal y contraviene los principios de la ética profesional (Ríos D. , 2022).
- **Medicina Complementaria:** Utilización de modalidades terapéuticas no convencionales en conjunto con la medicina alopática, con el objetivo de optimizar la respuesta terapéutica o reducir los efectos secundarios (National Center for Biotechnology Information (NCBI), 2000).

- **Medicina Integrativa:** Modelo de síntesis teórica y práctica que integra de manera rigurosa la biomedicina con terapias complementarias que presentan un mecanismo de acción fisiológico plausible, evidenciando su seguridad y eficacia (Schoen, 2020).

La integración informada supera la disyuntiva artificial entre "lo natural" y "lo sintético", enfatizando la efectividad clínica, la seguridad del paciente y la calidad de vida en el núcleo de la práctica veterinaria (Ríos T. , 2022).

3.1.5. La Práctica Basada en la Evidencia en el Contexto Integrativo

Históricamente, la medicina complementaria e integrativa ha sido objeto de críticas por parte de ciertos sectores de la comunidad científica, debido a las limitaciones metodológicas presentes en sus publicaciones iniciales y al uso de explicaciones no verificables empíricamente (Vargas & Morales, 2020). La medicina integrativa contemporánea aborda estas críticas al alinearse con los estándares de la Medicina Veterinaria basada en la Evidencia (MVBE) (Schoen, 2020).

3.1.6. La Tríada de Sackett Aplicada a las Terapias Integrativas

De acuerdo con el paradigma establecido por Sackett et al., adaptado al ámbito de las ciencias de la salud y la bioética, la práctica basada en la evidencia no se restringe a la aplicación dogmática de ensayos clínicos aleatorizados, sino que implica la integración cuidadosa de tres componentes fundamentales (Vargas & Morales, 2020):

1. **La mejor evidencia científica disponible:** Estudios de alta rigurosidad metodológica que respalden la seguridad, farmacocinética, mecanismos biológicos y eficacia de las intervenciones (Schoen, 2020).
2. **La pericia y experiencia clínica del veterinario:** El juicio reflexivo desarrollado a través de la práctica para evaluar cuándo y cómo aplicar una intervención específica según el perfil individual del paciente (Ríos T. , 2022).
3. **Las circunstancias, valores y preferencias del tutor:** Factores económicos, factibilidad de administración, respeto al bienestar del animal y consentimiento informado (Stone, 2018).

3.1.7. Niveles de Evidencia y Plausibilidad Biológica

La evaluación epistemológica de las terapias complementarias, tales como la acupuntura, la fitoterapia médica, la fisioterapia y rehabilitación, la laserterapia y la nutrición funcional, requiere un análisis simultáneo de dos dimensiones (Vargas & Morales, 2020):

- **Plausibilidad Biológica:** Se establece la existencia de un mecanismo de acción que es coherente con los principios de la anatomía, la fisiología, la bioquímica y la farmacología actuales. El efecto analgésico de la electroacupuntura se fundamenta en la neuromodulación del sistema nervioso periférico y central, así como en la modulación de las neuronas en el asta dorsal de la médula espinal y en la liberación de endorfinas naturales (Schoen, 2020).
- **Jerarquía de la Evidencia:** Las intervenciones deben ser evaluadas de acuerdo con la pirámide de evidencia, comenzando desde la observación clínica y los estudios descriptivos, hasta llegar a los ensayos clínicos controlados y cegados, así como a las revisiones sistemáticas que incluyan meta-análisis (Vargas & Morales, 2020).

La adscripción a la Medicina Veterinaria Basada en la Evidencia (MVBE) permite eliminar los prejuicios vinculados a las terapias integrativas, formalizando la inclusión de herramientas efectivas en el equipamiento veterinario y desechando aquellas que resulten ineficaces o que presenten perfiles de riesgo inaceptables (Ríos T. , 2022).

El Modelo One Health (Una Sola Salud): Interconexión Global y Complejidad

El enfoque de Una Sola Salud (One Health) representa la aplicación ecológica y colectiva del pensamiento integrativo, según la Organización Panamericana de la Salud (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2021). Impulsado y consolidado a nivel internacional por la colaboración de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Panamericana de la Salud (OPS), la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), este marco conceptual establece que la salud es una

responsabilidad compartida e interdependiente entre diversos sectores (World Organization for Animal Health, 2021).

Intersección entre la Salud Animal, Humana y Ambiental

El modelo One Health establece que ningún sector profesional ni disciplina científica tiene la capacidad aislada de abordar los problemas de salud contemporáneos (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2021). La interacción entre los tres dominios es constante y bidireccional:

- **Dominio Animal:** Comprende la sanidad, producción y bienestar de los animales de compañía, animales destinados al consumo humano y fauna silvestre en sus hábitats.
- **Dominio Humano:** Engloba la salud pública, la epidemiología humana, la seguridad alimentaria, la medicina ocupacional y los determinantes socioeconómicos de la salud.
- **Dominio Ambiental:** Abarca la integridad ecosistémica, la conservación de la biodiversidad, la calidad del agua y suelo, la gestión del uso de la tierra y el impacto del cambio climático.

La modificación en cualquiera de los vértices de esta estructura impacta de manera directa a los restantes (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2021). La deforestación y la fragmentación de hábitats alteran las dinámicas poblacionales de la fauna silvestre y de los vectores, lo que resulta en un aumento de las tasas de contacto interespecífico y en un mayor riesgo de transmisión de patógenos a los animales domésticos y a los seres humanos (Portal Animal's Health, 2026).

La Interfaz Zoonótica y la Prevención de Pandemias

Aproximadamente el 60% de las enfermedades infecciosas humanas identificadas tienen un origen zoonótico, y más del 75% de los agentes patógenos emergentes identificados en las últimas décadas, tales como los virus de la influenza aviar, Ébola, SARS y hantavirus, se originan en poblaciones animales (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2021).

Desde un enfoque teórico, la gestión tradicional de las zoonosis se caracterizaba por una respuesta reactiva. La medicina humana se ocupaba de los pacientes infectados, mientras que las autoridades de salud intervenían únicamente una vez que se había establecido el brote. El paradigma One Health redirige este enfoque hacia una estrategia preventiva e integral (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2021):

- 1. Vigilancia Epidemiológica en la Interfaz Silvestre-Doméstica:** Monitoreo activo de patógenos en reservorios naturales y animales de producción para identificar mutaciones y saltos de especie de manera precoz.
- 2. Sistemas de Alerta Temprana Interdisciplinarios:** Integración de bases de datos de sanidad animal y salud humana para detectar correlaciones entre brotes animales y la aparición atípica de síntomas en comunidades humanas.
- 3. Manejo Sostenible de la Producción Animal:** Implementación de bioseguridad rigurosa, bienestar animal y nutrición funcional en la ganadería para disminuir el estrés inmunológico y mitigar la amplificación y diseminación de agentes patógenos.

3.1.8. Crisis de Resistencia a los Antimicrobianos (RAM): Un Desafío Integrativo Crucial

La resistencia a los antimicrobianos (RAM) representa uno de los desafíos sanitarios más complejos y críticos en la interrelación entre la medicina veterinaria, la medicina humana y la salud ambiental (World Organization for Animal Health, 2021). La disminución progresiva de la eficacia de los antibióticos representa una amenaza para la disponibilidad de tratamientos para infecciones comunes y puede comprometer la realización de procedimientos médicos rutinarios.

La Cadena de Transmisión de la Resistencia

El uso excesivo e inapropiado de agentes antimicrobianos en la medicina humana y en la producción animal ejerce una presión de selección que favorece la supervivencia y proliferación de cepas bacterianas resistentes (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2021). La diseminación de la resistencia se produce a través de diversas vías:

- **Transmisión Directa:** Contacto cercano entre animales y humanos (veterinarios, personal de granja, criadores o tutores de mascotas), facilitando la colonización por cepas resistentes como *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (SARM) o *Escherichia coli* productora de betalactamasas de espectro extendido (BLEE).
- **Transmisión Alimentaria:** Consumo de alimentos de origen animal contaminados durante el faenado o procesamiento cuando no se garantizan las buenas prácticas de manufactura y los tiempos de retiro de fármacos.
- **Diseminación Ambiental:** Residuos de antibióticos y bacterias resistentes excretados en deyecciones animales (purines y estiércol) o efluentes urbanos e industriales ingresan a suelos y cuerpos de agua. En el ambiente, estas sustancias continúan ejerciendo presión selectiva e interactúan con la microbiota ambiental, promoviendo la transferencia horizontal de genes de resistencia a través de plásmidos y transposones.

El Rol de la Medicina Integrativa en la Mitigación de la RAM

La medicina veterinaria integrativa aporta estrategias para optimizar el uso de antimicrobianos (Antimicrobial Stewardship) (Schoen, 2020):

- **Inmunomodulación y Fitoterapia Médica:** La utilización de extractos botánicos estandarizados con propiedades antimicrobianas o inmunomoduladoras favorece el tratamiento de infecciones leves a moderadas en mucosas y piel, optimizando así la prescripción de antibióticos de amplio espectro (Vargas & Morales, 2020).
- **Salud Digestiva y Microbioma:** La modulación del microbiota intestinal a través del uso estratégico de prebióticos, probióticos y nutrición funcional refuerza la barrera inmunológica innata, lo que conlleva a una reducción de la sensibilidad a enteropatógenos y a una disminución en la necesidad de intervenciones farmacológicas extensivas (Schoen, 2020).
- **Manejo del Estrés y Bienestar Animal:** La disminución de los niveles de cortisol mediante un adecuado enriquecimiento ambiental, fisioterapia y terapias de apoyo contribuye a

mantener la respuesta inmunológica, lo que a su vez incrementa la resiliencia natural de los animales ante desafíos infecciosos (Ríos D. , 2022).

3.1.9. Cambio Climático, Pérdida de Biodiversidad y Dinámica Sanitaria

El cambio climático global y la pérdida de biodiversidad constituyen alteraciones significativas en la dimensión ambiental del concepto de One Health, afectando de manera directa la dinámica, abundancia y distribución geográfica de los agentes patógenos y sus agentes vectores (World Organization for Animal Health, 2021).

Modificación de Vectores y Patógenos

El aumento de la temperatura y la variación en el agua de lluvia alteran los límites biogeográficos de los organismos invertebrados (World Organization for Animal Health, 2021):

- **Garrapatas y Enfermedades Transmitidas por Vectores (ETV):** Especies como *Ixodes ricinus* y *Rhipicephalus sanguineus* han expandido sus rangos hacia mayores latitudes y altitudes, incrementando la incidencia de anaplasmosis, ehrlichiosis, borreliosis (enfermedad de Lyme) y babesiosis en animales de compañía y seres humanos.
- **Mosquitos y Flebótomos:** Temperaturas más elevadas aceleran el desarrollo larvario y reducen el periodo de incubación extrínseca de los patógenos en los vectores (PMC, 2021). Esto favorece la detección de leishmaniosis, dirofilariosis cardiopulmonar y virosis como la Fiebre del Nilo Occidental en latitudes donde previamente su reporte era excepcional.

Degradación de Ecosistemas y el "Efecto Dilución"

La pérdida de biodiversidad, resultado de la deforestación y la urbanización, descompone los ecosistemas (World Organization for Animal Health, 2021). En comunidades ecológicas que presentan una alta diversidad y se encuentran en estado de conservación, se manifiesta el fenómeno conocido como "efecto dilución". Una elevada diversidad de habitantes, muchos de los cuales son poco competentes para la replicación del patógeno, disminuye las proba-

bilidades de que un vector infectado transmita la infección a habitantes que son altamente susceptibles al ser humano.

Cuando un ecosistema se degrada, las especies especialistas suelen extinguirse en primer lugar, mientras que las especies generalistas y altamente competitivas, muchas de las cuales funcionan como reservorios eficientes de patógenos, tienden a proliferar (World Organization for Animal Health, 2021). Esto incrementa el índice de infecciones en los vectores y aumenta el riesgo de transmisión zoonótica hacia los animales domésticos y la población humana (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2021).

3.1.10. Ética, Bienestar Animal y Responsabilidad Profesional en la Era Integrativa

El vínculo entre la epistemología integrativa y el enfoque One Health amplía la dimensión ética del profesional veterinario (Ríos T. , 2022). El juramento veterinario, que históricamente ha estado centrado en la sanidad animal y la producción agropecuaria, se orienta hacia un compromiso socio-ecológico más amplio (Royal College of Veterinary Surgeons, 2023):

La aplicación práctica del enfoque integrativo exige guiarse por los principios de la bioética médica:

- 1. No Maleficencia:** Priorizar ante todo la inocuidad (*Primum non nocere*). Garantizar que la intervención complementaria esté libre de toxicidad y no sustituya ni retrase tratamientos alopáticos indispensables para la supervivencia o integridad del animal (Ríos T., 2022).
- 2. Beneficencia:** Seleccionar combinaciones terapéuticas con evidencia de eficacia que maximicen el bienestar, faciliten la recuperación y reduzcan efectos adversos de tratamientos invasivos (Schoen, 2020).
- 3. Autonomía y Consentimiento Informado:** Informar de manera transparente y fundamentada al tutor legal del paciente sobre el alcance, limitaciones, costos y nivel de evidencia científica de la terapia propuesta (Ríos T. , 2022).

- 4. Justicia Distributiva y Bienestar:** Respetar la condición del animal como ser sintiente, evitando el encarnizamiento terapéutico y priorizando en todo momento su calidad de vida (Ríos T. , 2022).

El Veterinario como Agente Transdisciplinario de Salud Pública

En el contexto del enfoque One Health, el profesional veterinario se establece como un actor fundamental en el ámbito de la salud pública y ambiental (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2021). Esto requiere el fortalecimiento de competencias transdisciplinarias:

- **Comunicación de Riesgos:** Orientar a la comunidad y a los tutores sobre tenencia responsable, prevención de zoonosis y uso racional de medicamentos.
- **Trabajo en Equipos Multidisciplinarios:** Colaborar activamente con profesionales de la medicina humana, epidemiología, ecología y gestión ambiental para el desarrollo de políticas públicas de salud integradas.
- **Participación Comunitaria e Institucional:** Intervenir en decisiones relacionadas con la gestión del territorio, manejo de fauna urbana y silvestre, y estrategias de prevención sanitaria ante contingencias ambientales.

3.1.11. Conclusiones y Horizontes Futuros

La consolidación de la Medicina Veterinaria Integrativa y del modelo One Health representa un avance considerable en el ámbito de las ciencias de la salud (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2021). Lejos de constituir tendencias divergentes aisladas, ambos marcos abordan una necesidad epistemológica fundamental: reestructurar el conocimiento con el fin de comprender y gestionar la complejidad de los sistemas vivos e interconectados.

La integración fundamentada en la evidencia científica y guiada por un marco ético riguroso permite superar los sesgos del reduccionismo mecanicista, sin renunciar al rigor analítico alcanzado por la biomedicina (Schoen, 2020). Al considerar al paciente animal en su contexto biológico y ecológico, y al reconocer que su salud está intrínsecamente relacionada con la salud

humana y ambiental, la profesión veterinaria reafirma su papel fundamental en la preservación del bienestar colectivo y la sostenibilidad global (World Organization for Animal Health, 2021).

3.2. Fisiología de la Regulación Biológica y Bionutrición Avanzada

3.2.1. Introducción: El Organismo Biológico como Sistema Dinámico de Autorregulación

El ejercicio de la medicina veterinaria contemporánea requiere trascender la concepción estática y compartimentada del organismo animal. Durante varias décadas, la comprensión de la fisiología se ha estructurado en torno a la división académica en aparatos y sistemas aislados, tales como el sistema cardiovascular, el sistema digestivo, el sistema endocrino y el sistema inmunitario. Cada uno de estos sistemas ha sido analizado como una entidad independiente con funciones específicas (Klein, 2020). No obstante, los descubrimientos recientes en biología celular, neuroinmunología y bioquímica han evidenciado que el organismo animal opera como una red cibernética altamente integrada y dinámica.

En el núcleo de este paradigma se halla el concepto de regulación biológica. A diferencia de la perspectiva tradicional que considera la salud como un estado estático de equilibrio (homeostasis rígida), la regulación biológica entiende la vida como un proceso continuo de adaptación a los estímulos del entorno interno y externo, proceso que se denomina alostasis (Klein, 2020). El organismo no reacciona a las agresiones de manera lineal, a través de reacciones de causa y efecto. En cambio, responde mediante bucles de retroalimentación multinivel que implican la matriz extracelular, el sistema neuroendocrino-inmune y las vías metabólicas celulares (Pischinger, 2007).

Paralelamente, la bionutrición avanzada se presenta no únicamente como un soporte calórico para el mantenimiento del organismo, sino como una herramienta de intervención biomolecular (Hand et al., 2010). Los nutrientes y compuestos bioactivos que se encuentran en la dieta desempeñan un papel como señales moleculares que pueden alterar la expresión génica, regular la respuesta inflamatoria, restablecer la función mitocondrial y mejorar la comunicación intercelular (Martín et al., 2016).

Se pretende examina las bases fisiológicas de los sistemas de regulación biológica y analiza de qué manera la nutrición clínica avanzada permite la modulación activa de los procesos metabólicos e inmunitarios en la práctica veterinaria actual.

Fisiología de la Regulación Biológica: La Matriz Extracelular y el Sistema de Gran Regulación

Para comprender cómo el organismo coordina sus respuestas adaptativas, es fundamental dirigir la atención desde el interior de la célula hacia el entorno que la rodea. Históricamente, la matriz extracelular (MEC) fue considerada únicamente como un andamiaje estructural inerte, destinado a proporcionar soporte a los tejidos. En la actualidad, se reconoce que la MEC representa el verdadero contexto de la regulación biológica y el procesamiento de información en el organismo animal (Martín et al., 2016).

El Sistema de Gran Regulación de Pischinger

El histólogo Alfred Pischinger (2007) evidenció que las células parenquimatosas de cualquier órgano no mantienen contacto directo con los capilares sanguíneos ni con las terminaciones nerviosas autónomas. En su lugar, hay un espacio intermedio que es ocupado por la matriz extracelular viva, a través del cual deben transitar obligatoriamente todos los nutrientes, el oxígeno, las hormonas, los neurotransmisores y los metabolitos de desecho.

Este conjunto integrado, que comprende las terminaciones nerviosas amielínicas del sistema nervioso autónomo, los capilares terminales (tanto sanguíneos como linfáticos), las células del tejido conectivo (incluyendo fibroblastos, mastocitos y macrófagos) y la matriz fluida y polimérica, se denomina Sistema de Gran Regulación (SGR) (Pischinger, 2007; Martín et al., 2016).

- **Proteoglicanos y Glicosaminoglicanos:** La matriz está constituida por una densa red de macromoléculas altamente polarizadas (como el ácido hialurónico, el condroitínsulfato y el heparínsulfato). Estas moléculas retienen grandes cantidades de agua e iones, comportándose como un filtro molecular dinámico con propiedades de gel y sol.

- **Fenómeno de Transmisión de Información:** La MEC actúa como un conductor biosemiótico. Cualquier cambio en la concentración iónica, el pH o la carga eléctrica en un punto de la matriz altera instantáneamente la conformación tridimensional de los proteoglicanos, transmitiendo señales fisicoquímicas a velocidad casi inmediata hacia los fibroblastos y las células parenquimatosas.

Inflamación Aguda Versus Inflamación Crónica de Bajo Grado

La inflamación constituye la respuesta fisiológica fundamental del Sistema de Gran Regulación ante un daño tisular o una agresión de origen patógeno (Klein, 2020). En su fase aguda, la inflamación constituye un proceso autolimitado y altamente organizado, cuyo propósito es la eliminación del agente agresor, la limpieza del detrito celular a través de macrófagos y la restauración de la estructura tisular original mediante la fase de resolución (Klein, 2020).

No obstante, cuando los estímulos nocivos son persistentes, ya sea a causa de dietas proinflamatorias, acumulación de toxinas ambientales, estrés crónico o disbiosis intestinal, el sistema de regulación se ve saturado. La matriz extracelular disminuye su fluidez y sufre un proceso de gelificación rígida, así como una acumulación de matriz aberrante (Martín et al., 2016). Esto obstaculiza la adecuada difusión de oxígeno y nutrientes hacia las células parenquimatosas e impide la eliminación de los desechos metabólicos.

Este estado da lugar a una inflamación crónica de bajo grado, que también se denomina inflamación metabólica o metainflamación (Martín et al., 2016). A diferencia de la inflamación aguda, que presenta signos clásicos como el calor, el rubor, el tumor y el dolor, la inflamación crónica se caracteriza por ser silenciosa, insidiosa y de naturaleza sistémica.

El sistema inmunitario innato se mantiene en un estado de hiperreactividad constante, caracterizado por la producción continua de citocinas proinflamatorias. Esta situación favorece la degeneración tisular progresiva, la disfunción endotelial y la fibrosis en condiciones patológicas como la enfermedad renal crónica, la osteoartritis y las dermatopatías atópicas (Hand et al., 2010).

Integración Neuro-Endocrino-Inmune: La Red de Comunicación Alostática

Uno de los pilares fundamentales de la regulación biológica es la interconexión inquebrantable entre el sistema nervioso, el sistema endocrino y el sistema inmunitario (García et al., 2012). En el pasado, se consideraba que cada uno de estos sistemas empleaba un "idioma" químico distinto: neurotransmisores en el caso del cerebro, hormonas en relación con las glándulas y citocinas en el sistema inmunológico. La evidencia actual indica que estas moléculas constituyen un lenguaje molecular singular y susceptible de interconversión (Pavlov & Tracey, 2005).

Expresión de Receptores Compartidos

Las células gliales y las neuronas presentan receptores funcionales para citocinas inmunitarias, tales como la interleucina-6 y el factor de necrosis tumoral. Asimismo, los linfocitos, macrófagos y granulocitos presentan receptores para neurotransmisores, tales como la noradrenalina y la acetilcolina, así como para hormonas metabólicas, incluyendo el cortisol, la insulina y la leptina (García et al., 2012).

Esta combinación molecular explica fenómenos fisiológicos complejos:

- **Comportamiento de Enfermedad (Sickness Behavior):** Cuando un animal sufre una infección periférica localizada, las citocinas proinflamatorias generadas en la periferia se trasladan a través del torrente sanguíneo o envían señales vagas al sistema nervioso central (Klein, 2020). En ese contexto, se induce la producción de citocinas en el sistema nervioso central, lo que provoca letargia, anorexia, somnolencia e hiperalgesia. Este cambio conductual no debe considerarse un fallo fisiológico, sino más bien un comportamiento adaptativo de alta prioridad, destinado a conservar energía y redirigir los recursos metabólicos hacia el sistema inmunológico.
- **La Vía Inflamatoria Colinérgica:** El sistema nervioso autónomo ejerce un control directo sobre la inflamación periférica, según lo indicado por Pavlov y Tracey (2005). Las fibras eferentes del nervio vago liberan acetilcolina en los tejidos periféricos, la cual se une a los receptores nicotínicos $\alpha 7$ que se encuentran en la superficie de

los macrófagos. Esta unión inhibe de manera significativa la síntesis y liberación de citocinas proinflamatorias, desempeñando la función de un "freno neurofisiológico" frente a la hiperinflamación.

Carga Alostática y Resiliencia Fisiológica

El concepto de alostasis se refiere a la capacidad del organismo para preservar la estabilidad fisiológica mediante la adaptación a cambios, lo cual se logra a través de la activación de ejes de respuesta, tales como el eje Hipotálamo-Hipófisis-Adrenal (HHA) y el sistema simpático-adrenal (Klein, 2020). No obstante, cuando las demandas ambientales, nutricionales o emocionales son excesivas y se prolongan en el tiempo, el organismo experimenta un costo metabólico acumulativo conocido como carga alostática (Sánchez et al., 2021).

Una carga alostática elevada agota los mecanismos de compensación, lo que provoca la desincronización de los ritmos circadianos, la resistencia de las células inmunitarias a los glucocorticoides y la hiperactivación del tono simpático, predisponiendo así al desarrollo de patologías crónicas multisistémicas (Sánchez, 2021).

Bionutrición Avanzada: Nutraceuticos y Modulación Inmunometabólica

La bionutrición clínica se encuentra en la vanguardia de la regulación biológica. La bionutrición va más allá de la concepción de la nutrición como un simple aporte de macronutrientes (proteínas, lípidos, carbohidratos) destinados a satisfacer los requerimientos calóricos mínimos. Este enfoque analiza la bioactividad funcional de los nutrientes y su capacidad para interactuar con los procesos celulares (Hand et al., 2010).

Nutrigenómica y Epigenética en la Clínica Veterinaria

La nutrigenómica se ocupa del estudio de la interacción entre los componentes de la dieta y el genoma animal, con el objetivo de comprender cómo estas interacciones modifican el proceso de transcripción genética y la síntesis de proteínas. Por su parte, la nutrigenética se centra en el análisis de cómo las variantes genéticas individuales influyen en la respuesta a la dieta (Hand et al., 2010).

A través de mecanismos epigenéticos, tales como la metilación del ADN, la modificación de histonas y la regulación por microARNs no codificantes, los nutrientes tienen la capacidad de modificar la expresión de ciertos genes sin alterar la secuencia primaria del código genético (Hand et al., 2010):

- 1. Activación de la Vía Nrf2 (Factor Nuclear Eritroide 2-Relacionado):** Ciertos fitoquímicos presentes en la dieta, tales como el sulforafano, la curcumina y el resveratrol, tienen la capacidad de disociar el factor de transcripción Nrf2 de su proteína inhibidora en el citoplasma. Una vez que Nrf2 se encuentra libre, se transloca al núcleo celular y se une a los Elementos de Respuesta Antioxidante (ARE), lo que activa la transcripción de manera significativa de enzimas antioxidantes endógenas, tales como la superóxido dismutasa (SOD), la catalasa y la glutatión peroxidasa (Hand et al., 2010). Este proceso fortalece la capacidad de neutralización de radicales libres de manera más efectiva que la administración de antioxidantes externos directos.
- 2. Inhibición de la vía del factor nuclear kappa B (NF- κ B):** El factor NF- κ B se considera el regulador principal de la respuesta inflamatoria a nivel celular. Ante la presencia de estímulos tales como lipopolisacáridos bacterianos o un exceso de ácidos grasos saturados, se activa el factor nuclear kappa B (NF- κ B), lo cual promueve la expresión de genes que codifican enzimas proinflamatorias, como la ciclooxigenasa-2 (COX-2) y la sintetasa inducible de óxido nítrico (iNOS). Los componentes bionutricionales, tales como los ácidos grasos omega-3 de cadena larga y los inhibidores naturales como los polifenoles, tienen la capacidad de bloquear la fosforilación de NF- κ B, lo que contribuye a atenuar el proceso inflamatorio desde su origen genético (Hand et al., 2010).

Moduladores Inmunometabólicos Relevantes

En la práctica clínica de perros y gatos, la bionutrición avanzada emplea moléculas específicas con el propósito de restablecer la homeostasis en el tratamiento de patologías crónicas (Hand et al., 2010):

- Compuesto Bionutricional Mecanismo de Acción Fisiológico Aplicación Clínica Principal.
- Ácidos Grasos Omega-3 (EPA/DHA) Compiten con el ácido araquidónico en las membranas celulares; generan eicosanoides de serie 3 y 5 (menos inflamatorios) y pro-resolutivos (resolvinas y protectinas). Osteoartritis, enfermedad renal crónica, atopia cutánea y cardiopatías (Hand et al., 2010).
- Beta-glucanos (1,3/1,6) Se unen a los receptores de dectina-1 en macrófagos y células dendríticas, induciendo un “entrenamiento” del sistema inmune innato sin sobreactivación inmunomodulación en animales seniles, neoplasias y procesos infecciosos recurrentes (Hand et al., 2010).
- Aminoácidos Funcionales (L-Glutamina, Taurina) La glutamina es el sustrato energético primario de enterocitos y linfocitos; la taurina participa en la conjugación de sales biliares y la función cardiomediada. Síndrome de intestino permeable, rehabilitación postquirúrgica y miocardiopatías.
- Condroprotectores de Matriz (Condroitín Sulfato, Ácido Hialurónico Suministran sustratos directos para la remodelación de la matriz extracelular cartilaginosa e inhiben metaloproteinasas (MMP). Displasia de cadera/codo, osteoartrosis y cistitis idiopática felina.

La Microbiota Intestinal como Órgano Regulador Central

En la intersección entre la regulación biológica y la bionutrición se halla la microbiota intestinal, un ecosistema complejo constituido por billones de microorganismos que han coevolucionado en simbiosis con el hospedador animal (Sánchez et al., 2021). Actualmente, se reconoce a la microbiota, no solo como una comunidad de comensales, sino como un órgano endocrino y metabólicamente activo.

Metabolitos Microbianos y Ácidos Grasos de Cadena Corta (AGCC)

La fermentación de la fibra no digerible y del almidón resistente por bacterias anaerobias estrictas en el colon genera ácidos grasos de cadena corta (AGCC), principalmente acetato, propionato y butirato (Klein, 2020).

- **El Butirato como Regulador Epigenético y Energético:** El butirato actúa como la fuente energética primaria para los colonocitos (cubriendo hasta el 70% de sus requerimientos metabólicos) (Hand et al., 2010). Además, actúa como un inhibidor natural de las histonas deacetilasas (HDAC), lo que promueve la transcripción de genes antiinflamatorios e induce la diferenciación de linfocitos T, que son reguladores esenciales para mantener la tolerancia inmunitaria y prevenir la autoinmunidad (Hand et al., 2010).
- **Integridad de la Barrera Intestinal:** Los AGCC estimulan la producción de mucinas (MUC2) por las células caliciformes y refuerzan las uniones estrechas (tight junctions, compuestas por ocludina, claudinas y zonula occludens-1). La pérdida de esta barrera conduce al Síndrome de Intestino Permeable (Leaky Gut), permitiendo la translocación de lipopolisacáridos bacterianos (LPS) a la circulación portal, lo que desencadena endotoxemia metabólica e inflamación sistémica (Martín et al., 2016).

El Eje Intestino-Cerebro en Veterinaria

La comunicación entre la microbiota intestinal y el sistema nervioso central es bidireccional y se efectúa a través de tres vías principales (Klein, 2020; Pavlov & Tracey, 2005):

1. **Vía Neural Directa:** La microbiota estimula directamente las aferencias del nervio vago en la pared intestinal.
2. **Vía Endocrina y Neurotransmisores:** Las bacterias intestinales producen o modulan la síntesis de neurotransmisores clave. Más del 90% de la serotonina corporal total y una proporción significativa del ácido gamma-aminobutírico (GABA) se sintetizan en el tracto gastrointestinal bajo la influencia del microambiente microbiano.
3. **Vía Inmunitaria:** Los metabolitos microbianos cruzan la barrera hematoencefálica o modulan las células microgliales del cerebro, influyendo en la neuroinflamación, la reactividad al estrés y el comportamiento animal (fobias, ansiedad por separación y agresividad).

Estrategias Bionutricionales en la Inflamación Crónica y el Estrés Metabólico

La aplicación práctica de la bionutrición avanzada implica el diseño de estrategias dietéticas dirigidas a abordar la inflamación crónica, restaurar la sensibilidad metabólica y salvaguardar los órganos diana en pacientes caninos y felinos (Hand et al., 2010).

Manejo del Síndrome Metabólico, Obesidad y Resistencia a la Insulina

La obesidad en animales pequeños no se considera simplemente un depósito pasivo de tejido adiposo, sino que se clasifica como una enfermedad endocrina e inflamatoria crónica (Hand et al., 2010). El adipocito hipertrofiado experimenta una hipoxia relativa y atrae macrófagos proinflamatorios de tipo M1. Estos tejidos secretan adipoquinas inflamatorias, como la leptina en cantidades excesivas, y disminuyen la producción de adipoquinas protectoras, tales como la adiponectina.

La estrategia bionutricional avanzada en el paciente obeso o con resistencia a la insulina incluye (Hand et al., 2010):

- **Restricción de Carbohidratos de Alto Índice Glucémico:** Eliminación de harinas refinadas y azúcares simples que provocan picos insulínicos, los cuales bloquean la lipólisis e inducen lipogénesis de novo en el hígado.
- **Inclusión de Fibras Solubles e Insolubles Funcionales:** Fibras como el psyllium, la inulina de achicoria y la pulpa de remolacha retrasan el vaciamiento gástrico, atenúan la respuesta glucémica postprandial y promueven la producción de propionato, un AGCC que estimula la liberación de péptidos saciantes (GLP-1 y PYY).
- **Suplementación con L-Carnitina y Cromo Picolinato:** La L-carnitina es indispensable para el transporte de ácidos grasos de cadena larga al interior de la matriz mitocondrial para su β -oxidación, mientras que el cromo optimiza la afinidad del receptor de insulina en la membrana celular.

Soporte Bionutricional en la Enfermedad Renal Crónica (ERC)

La enfermedad renal crónica en perros y gatos constituye un desafío significativo en el ámbito de la regulación biológica. La disminución gradual del número de nefronas da lugar a la acumulación de toxinas urémicas, hiperfosfatemia, acidosis metabólica y sobrecarga oxidativa (García et al., 2012).

Frente al enfoque tradicional basado únicamente en la restricción proteica drástica, la bionutrición avanzada propone (Hand et al., 2010; Klein, 2020):

- 1. Proteína de Alta Digestibilidad y Valor Biológico Moderado:** Ajustar la cantidad proteica para minimizar el exceso de residuos nitrogenados, garantizando un perfil equilibrado de aminoácidos esenciales para preservar la masa muscular.
- 2. Restricción Estricta y Precoz de Fósforo:** El control del fósforo sérico y el uso de quelantes intestinales de origen orgánico constituye la medida bionutricional con mayor impacto comprobado en la supervivencia del paciente renal.
- 3. Estrategia de Atrapamiento de Uremia Intestinal (Enteral Dialysis):** La administración de prebióticos fermentables (como los fructooligosacáridos) promueve el crecimiento de bacterias colónicas que utilizan la urea y la creatinina circulantes como fuente de nitrógeno, reduciendo la carga de filtración sobre las nefronas residuales.
- 4. Suplementación con Ácidos Grasos Omega-3 y Antioxidantes Mitocondriales:** El EPA y el DHA reducen la presión intraglomerular, la proteinuria y la inflamación del intersticio renal, mientras que coenzimas como la CoQ10 protegen la función mitocondrial de las células tubulares.

3.2.2. Conclusiones y Proyección Clínica

La fisiología de la regulación biológica y la bionutrición avanzada proporcionan un marco conceptual y práctico esencial para la medicina veterinaria actual (Sánchez, Principios básicos del bienestar, sanidad y etología animal, 2021). Reconocer que la salud es el resultado de una red

compleja de interacciones entre el Sistema de Gran Regulación, el eje neuro-endocrino-inmune y el ecosistema intestinal permite al profesional de la salud adoptar un enfoque que trasciende la mera atención a los síntomas, facilitando así el abordaje de las causas subyacentes de la disfunción biológica (Martín et al., 2016).

La bionutrición evidencia que los alimentos y los nutraceuticos no son recursos inertes, sino que constituyen información biomolecular capaz de reprogramar la expresión genética, modular la inflamación y restaurar la resiliencia del organismo (Hand et al., 2010). Al integrar estos conocimientos fisiológicos con la práctica clínica diaria, el médico veterinario obtiene herramientas precisas, efectivas y fundamentadas científicamente, que le permiten optimizar la salud, prevenir la cronicidad y mejorar la calidad de vida de los pacientes animales (Sánchez et al., 2021).

IV



**Terapias avanzadas e integrativas en
el paciente oncológico y crónico**

CAPÍTULO IV.

TERAPIAS AVANZADAS E INTEGRATIVAS EN EL PACIENTE ONCOLÓGICO Y CRÓNICO

Oscar Darwin Criollo Salinas

Las limitaciones de las terapias alopáticas y de primera línea en la atención convencional del paciente veterinario con patologías oncológicas están documentadas en gran medida. El uso de quimioterapia, citotóxica, AINEs, corticoides, entre otros han demostrado un estrecho margen terapéutico, a la par de efectos adversos acumulativos. De allí que exista una transición paradigmática a nivel global, en el tratamiento de patologías como la osteoartritis o la enfermedad renal crónica, en la búsqueda de la disminución del desarrollo temprano de resistencia molecular o refractariedad celular.

En ese sentido, la medicina veterinaria integrativa propone la optimización de la oncología molecular y los esquemas analgésicos alopáticos convencionales de manera sinérgica y mediante la modulación de objetivos terapéuticos. Se introduce así un enfoque multimodal que busca reducir las dosis efectivas de fármacos de alta toxicidad, mitigar los efectos secundarios sistémicos y restaurar los mecanismos homeostáticos y homeoréticos del hospedador.

Las terapias aplicadas en los pacientes veterinarios oncológicos y crónicos, desde una óptica integrativa hacen confluir los tratamientos tradicionales citotóxicos con aquellos basados en el estudio de la medicina alternativa y de los efectos terapéuticos de plantas para conseguir el bienestar del paciente y sus cuidadores.

Para su estudio, se analizan las bases fisiopatológicas, los mecanismos de señalización celular, así como los protocolos clínicos de vanguardia: la fitoterapia clínica molecular, la modulación del sistema endocannabinoide, las terapias biológicas oxidativas, como la reconocida ozonoterapia y las modalidades físicas avanzadas de modulación del dolor entre las que se cuentan la fotobiomodulación láser de Clase IV y campos electromagnéticos pulsados.

4.1. Fitoterapia clínica y uso reconstructivo de extractos botánicos en oncología

En la medicina tradicional como en la medicina veterinaria, la fitoterapia clínica ha evolucionado desde el empirismo etnobotánico tradicional, fundamentándose en la zoofarmacognosia cuantitativa, la estandarización analítica de quimiotipos y la oncología molecular. En ese aspecto, la fitoterapia actual, dista de ser un ejercicio empírico o aleatorio para la prueba de plantas en condiciones o enfermedades específicas (Delgado, 2020) y se enfoca en la determinación científica de la existencia y concentración necesaria de los compuestos existentes en plantas para el tratamiento, sobre todo de condiciones crónicas y oncológicas en animales.

Entonces, desde la medicina veterinaria integrativa, se considera que el microambiente tumoral (MAT) no es una masa aislada de células en proliferación anárquica, sino un ecosistema dinámico y complejo caracterizado por inflamación crónica persistente, inmunosupresión local, angiogénesis desregulada, remodelación de la matriz extracelular y una marcada evasión de la apoptosis programada. Por lo tanto, el tratamiento debe ser igualmente complejo, considerando la interacción de la farmacología tradicional y la farmacognosia cuantitativa.

Así, por ejemplo, ciertos metabolitos secundarios de origen vegetal, pertenecientes a los grupos de los polifenoles, terpenoides y polisacáridos complejos, han demostrado una notable capacidad para modular estas vías de señalización intracelular de forma pleiotrópica, actuando simultáneamente sobre aspectos que los fármacos monofocales suelen ignorar.

4.1.1. Mecanismos de acción molecular y vías de señalización celular Inhibición de la vía NF- κ B (Factor Nuclear Kappa B)

Dentro del tratamiento integrativo de pacientes veterinarios oncogénicos y crónicos, es vital la observación de la acción molecular y las vías de señalización celular, que permiten verificar la efectividad de los distintos compuestos sobre la acción específica a nivel celular de las condiciones oncogénicas y crónicas en animales.

Por ejemplo, el factor de transcripción NF- κ B es el eslabón molecular definitivo entre la inflamación crónica y la progresión tumoral. En condiciones basales, se encuentra secuestrado en el citoplasma por la proteína inhibitoria I κ B (Dismed, 2026). Frente a estímulos del microambiente, como hipoxia tumoral o citoquinas proinflamatorias, el complejo I κ B quinasa (IKK) fosforila a I κ B, promoviendo su degradación proteasómica y liberando a NF- κ B para su translocación al núcleo.

Fracciones polifenólicas purificadas y estandarizadas de *Cúrcuma longa* (curcumina) inhiben directamente la actividad cinasa de IKK. Esta acción bloquea la fosforilación y subsecuente translocación de NF- κ B, lo que interrumpe de raíz la transcripción de genes críticos implicados en la supervivencia y la quimiorresistencia tumoral, tales como la ciclooxigenasa-2 (COX-2), la sintasa de óxido nítrico inducible (iNOS), y las interleuquinas proinflamatorias IL-1 β , IL-6 y TNF- α .

En líneas celulares de mastocitoma y osteosarcoma canino, la inhibición de esta vía reduce drásticamente la capacidad invasiva local y sensibiliza a las células neoplásicas a la apoptosis inducida por xenobióticos. De esta manera, el uso de la curcumina en un esquema adecuado puede coadyuvar en la efectividad de los tratamientos farmacológicos para la remisión de la enfermedad desde el ámbito celular directamente ligado a la quimiorresistencia tumoral (Dismed, 2026).

4.1.2. Inducción de apoptosis y detención del ciclo celular

Los tumores veterinarios de alta malignidad, como el hemangiosarcoma canino y el linfoma mediastínico felino, muestran mutaciones o disfunciones frecuentes en la proteína supresora de tumores p53, impidiendo la apoptosis fisiológica frente al daño genotóxico (Argyle et al., 2020). En ese caso, los polisacáridos ligados a proteínas (como el polisacárido-K o PSK, y el péptido polisacárido o PSP), extraídos mediante procesos biotecnológicos de hongos basidiomicetos como *Trametes versicolor* (antes *Coriolus versicolor*) y *Ganoderma lucidum* (Reishi), ejercen una modulación epigenética e inmunológica profunda.

Estos compuestos inducen la detención del ciclo celular específicamente en la fase metabólica G2/M y desencadenan la activación de la vía mitocondrial o intrínseca de las caspasas. Este mecanismo ocurre mediante la alteración del equilibrio de las proteínas de la familia Bcl-2: se produce una regulación a la baja de los factores antiapoptóticos (Bcl-2, Bcl-xL) y una sobreexpresión de los factores proapoptóticos (Bax, Bak) (Dismed, 2026).

Como consecuencia directa, se despolariza la membrana externa mitocondrial, liberando el citocromo c hacia el citosol. Este interactúa con Apaf-1 para formar el apoptosoma, activando en cascada la caspasa-9 iniciadora y las caspasas-3 y -7 ejecutoras, forzando la fragmentación del ADN genómico tumoral independientemente del estado de p53.

4.1.3. Modulación selectiva del estrés oxidativo y quimiosensibilización

En otro caso, el epigallocatequina galato (EGCG), el polifenol más abundante y bioactivo extraído de *Camellia sinensis* (té verde), opera bajo un principio de selectividad celular dependiente del pH y el estado metabólico celular. Mientras que en los tejidos somáticos sanos actúa como un barredor de radicales libres de alta eficiencia (Falcón & Falcón, 2024), protegiendo las estructuras celulares del daño por especies reactivas del oxígeno, pues actúa como un limpiador de los químicos, presentes durante procesos de alta malignidad, que ceden ante la disminución de la oxidación dentro del ambiente intracelular.

Dentro del ambiente intracelular neoplásico —caracterizado por una alta tasa glucolítica y acumulación de hierro intracelular (Wu et al., 2024)— el EGCG se autooxida, generando niveles intratumorales masivos de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) que sobrepasan la limitada capacidad antioxidante de las células tumorales, las cuales suelen presentar niveles deficientes de catalasa y glutatión peroxidasa. Este estrés prooxidante selectivo daña los complejos de la cadena respiratoria tumoral y actúa como un quimiosensibilizador de alta potencia.

Al coadministrarse con antraciclinas como la doxorrubicina, el EGCG debilita las bombas de flujo transmembrana de la familia de casetes de unión a ATP (como la glicoproteína-P o P-gp), reduciendo la expulsión activa del fármaco citostático y potenciando su concentración

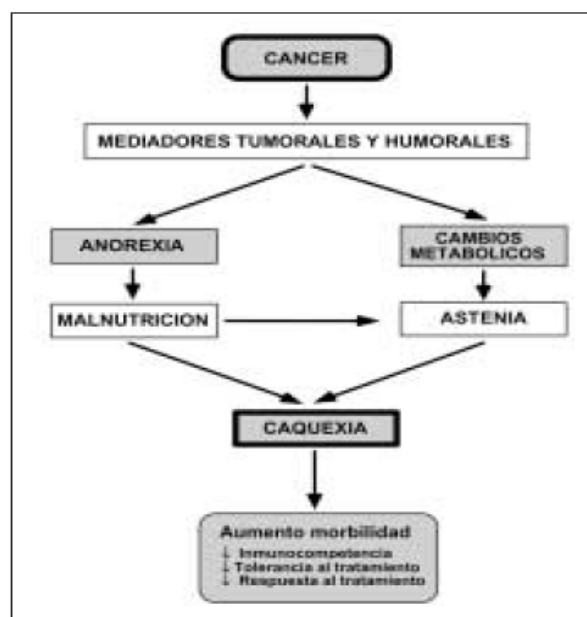
intracelular citotóxica. De esta forma la interacción de los compuestos obtenidos por farmacognosia con aquellos farmacológicos citotóxicos genera una potenciación de los últimos que termina por optimizar la acción intracelular en los casos oncológicos.

4.1.4. Aplicación reconstructiva, inmunomodulación y soporte metabólico

La fitoterapia avanzada en oncología veterinaria se entiende como una estrategia extendida al soporte de los sistemas orgánicos del hospedador caquéctico o inmunosuprimido (Delgado, 2020), su papel clínico, va pues más allá del control de la masa tumoral primaria. En ese sentido, la inmunomodulación y el soporte metabólico pueden brindar una alternativa efectiva en el tratamiento oncológico de animales de compañía, no es solamente un paliativo, sino que representa una base fundamental para la implementación de una terapéutica adecuada que conlleve a la curación.

El síndrome de caquexia tumoral, responsable directo de un alto porcentaje de las eutanasias en perros y gatos, está mediado por la liberación sostenida de factores inductores de proteólisis (PIF) y factores de movilización de lípidos (LMF) por parte de las células neoplásicas, exacerbados por la tormenta de citoquinas sistémica (Argilés et al., 2006).

Figura 1. *Mediadores del proceso caquéctico*



Nota. Extraída de (Argilés et al., 2006)

Plantas clasificadas bajo el concepto farmacológico moderno de "adaptógenos", como *Withania somnifera* (Ashwagandha) y *Astragalus membranaceus*, modulan de manera directa el eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HHA) y disminuyen la expresión de ubiquitina-ligasas musculares (como MuRF1 y MAFbx), frenando el catabolismo proteico muscular proteasómico inducido por el tumor (Argilés et al., 2006). Su acción, está dirigida a fomentar un ambiente intracelular adverso a la proliferación tumoral y a la potenciación del metabolismo proteico en aras de evitar la anorexia y la caquexia oncológica.

Particularmente, *astragalus membranaceus*, a través de sus fracciones purificadas de astragalósidos, interactúa con los receptores tipo Toll (TLR-4) en la superficie de los macrófagos y las células dendríticas, promoviendo la diferenciación de linfocitos T colaboradores hacia el fenotipo Th1. Esto estimula la producción de interferón gamma (IFN- γ) e incrementa la actividad citolítica de las células asesinas naturales (NK) y los linfocitos T citotóxicos ($CD8^{+}$), contrarrestando la inmunosupresión local mediada por las células supresoras derivadas de mieloides (MDSC) dentro del MAT (Argilés et al., 2006).

Asimismo, los astragalósidos protegen el nicho de células madre hematopoyéticas en la médula ósea. Reducen la apoptosis celular inducida por agentes quimioterapéuticos mieloafectivos o radioterapia, acelerando la recuperación de líneas celulares eritroides y mieloides, mitigando clínicamente las leucopenias crónicas secundarias y por tanto mejorando la expectativa de vida de los pacientes veterinarios con condiciones crónicas u oncológicas.

4.1.5. Desafíos galénicos y biodisponibilidad: El sistema fitosómico

A pesar de las ventajas de uso de los adaptógenos y otros compuestos fitoterapéuticos, también se deben considerar los efectos adversos de este tipo de tratamientos, sobre todo si no se emplean de manera integrativa con el compendio farmacológico tradicional. Estos, pueden significar obstáculos importantes en el avance de investigaciones prácticas y la evolución de la práctica clínica de la fitoterapia integrada a la medicina veterinaria tradicional (Argilés et al., 2006).

En ese sentido, uno de los mayores obstáculos para la traducción clínica de los fitocompuestos purificados en medicina de pequeños animales ha sido su baja biodisponibilidad oral intrínseca. Moléculas como la curcumina o la silibinina poseen estructuras químicas altamente polifenólicas e hidrofóbicas, lo que resulta en una disolución deficiente en los fluidos gastrointestinales, un transporte pasivo limitado a través de las membranas enterocitarias y una rápida metabolización por reacciones de fase II (glucuronidación y sulfatación) en el primer paso hepático (Argilés et al., 2006).

Para superar esta limitación biológica, la tecnología medicina veterinaria integrativa aplica la formulación de complejos fitofosfolipídicos que, a diferencia de los liposomas tradicionales, el extracto botánico purificado se une a nivel molecular mediante enlaces de hidrógeno a la cabeza polar hidrofílica de la fosfatidilcolina (un fosfolípido anfipático), integrando el principio activo directamente en la estructura de la membrana lipídica. Al contrario, en los liposomas tradicionales, el principio activo se encuentra libre y disuelto en un núcleo acuoso central rodeado por una bicapa lipídica.

Este direccionamiento nanotecnológico permite que las colas lipofílicas ácidas del fosfolípido se mezclen con los lípidos de la membrana plasmática de las microvellosidades intestinales, para facilitar la absorción del complejo por difusión pasiva no saturable.

Estudios farmacocinéticos comparativos en caninos demuestran que la administración de curcumina en matriz fitosómica incrementa el área bajo la curva de concentración plasmática (AUC) hasta 18 veces en comparación con el extracto de curcumina libre purificado no complejo (Dismed, 2026), alcanzando concentraciones plasmáticas e intratumorales efectivas en rangos micromolares estables sin requerir dosis orales masivas que provoquen intolerancia gastrointestinal.

4.2. Sistema endocannabinoide y aplicación terapéutica de fitocannabinoides

El sistema endocannabinoide (SEC) constituye una red ubicua y altamente conservada de señalización lipídica retrógrada. Su función primordial es mantener la homeostasis celular

frente a perturbaciones ambientales, metabólicas e inmunológicas. En medicina veterinaria, los avances en la caracterización anatómica, topográfica y funcional del SEC en las especies canina y felina han permitido dar un salto cualitativo: transicionar desde el uso anecdótico de derivados cannábicos hacia la prescripción científica rigurosa de fitocannabinoides estandarizados (García & Soler, 2021).

4.2.1. Particularidades neurofisiológicas de las especies veterinarias

La arquitectura neuroanatómica del sistema endocannabinoide muestra diferencias interspecíficas críticas que determinan la farmacodinámica de los fitocannabinoides y definen el perfil de seguridad clínica.

4.2.1.1. Receptores CB1 (CB1R)

Son receptores acoplados a proteínas G localizados predominantemente en el sistema nervioso central y periférico, con una ubicación mayoritariamente presináptica y mucho menos presente a nivel postsináptico. Su activación induce la inhibición de la enzima adenilato ciclasa, reduce los niveles intracelulares de AMPc, bloquea los canales de calcio dependientes de voltaje y activa los canales de potasio rectificadores internos. Esto disminuye drásticamente la liberación de neurotransmisores excitatorios primarios como el glutamato y el aspartato.

La especie canina posee una densidad marcadamente mayor de receptores CB1 distribuidos en el cerebelo, el bulbo olfatorio y la corteza cerebral en comparación con cualquier otra especie de mamífero estudiada, incluidos los humanos, lo que representa una particularidad filogenética crucial. Esta ultraexpresión anatómica explica la extrema susceptibilidad de la especie canina a la toxicidad aguda por tetrahidrocannabinol (Delta 9-THC).

La ingesta de dosis miligramadas de THC desencadena el cuadro clínico conocido como ataxia estática. Durante este estado, el animal permanece de pie de forma rígida, balanceándose de forma oscilatoria, con hipermetría, midriasis y goteo de orina, debido a la saturación de los receptores cerebelares.

4.2.1.2. Receptores CB2 (CB2R)

También acoplados a proteínas G, se expresan de manera predominante en la periferia del organismo, específicamente en la membrana de células del sistema inmunitario (macrófagos, células dendríticas, mastocitos, linfocitos B y T), células gliales (microglía) y en menor grado en el tejido osteoarticular y queratinocitos.

Su activación inhibe la cascada de quinasas reguladas por señales extracelulares (ERK) y frena la degranulación de mastocitos y la liberación de citoquinas proinflamatorias sintéticas, participando de forma directa en el control de la inflamación periférica y el dolor inflamatorio crónico sin inducir efectos psicotrópicos o de alteración cognitiva.

4.2.2. *Objetivos terapéuticos no cannabinoides*

El cannabidiol (CBD) es un fitocannabinoide que posee una afinidad de unión ortostérica extremadamente baja por los receptores (CB1) y (CB2). Su amplio espectro terapéutico se explica a través de mecanismos farmacodinámicos alternativos (García & Soler, 2021):

- Actúa como un modulador alostérico negativo de los receptores (CB1). Esto reduce la potencia y eficacia de los ligandos que se unen al sitio ortostérico (como el THC o el endocannabinoide endógeno anandamida [AEA]), mitigando así los efectos adversos psicotrópicos del THC cuando se administran juntos.
- Funciona como un agonista de alta afinidad del canal de potencial de receptor transitorio vaniloide 1 (TRPV1), desensibilizando térmicamente estos canales encargados de la detección de estímulos nocivos y dolor quemante.
- Inhibe por competencia molecular a la hidrolasa de amidas de ácidos grasos (FAAH), la enzima intracelular responsable de la degradación catabólica de la anandamida. Al bloquear la FAAH, el CBD prolonga la vida media de la anandamida endógena en el espacio sináptico, potenciando el tono endocannabinoide basal de forma indirecta.
- Actúa como un agonista directo del receptor de serotonina (5-HT1A) en el sistema nervioso central, mediando sus efectos ansiolíticos y moduladores del comportamiento neurovegetativo en el dolor crónico.

4.2.3. Farmacocinética comparada y aplicaciones analgésicas

La absorción gastrointestinal de los fitocannabinoides puros en perros y gatos es limitada e inestable debido a su hidrofobicidad extrema. Sin embargo, su biodisponibilidad se incrementa significativamente cuando se administran vehiculizados en aceites ricos en triglicéridos de cadena media (MCT) o de cadena larga (LCT), los cuales estimulan la secreción biliar y la formación de micelas que facilitan su incorporación por la vía linfática intestinal, sorteando parcialmente el metabolismo de primer paso.

La administración por la vía transmucosa oral (aplicación sobre las encías o mucosa yugal) ofrece una cinética de absorción más rápida, alcanzando concentraciones plasmáticas máximas (Cmax) en menores tiempos (Tmax) en comparación con la ingestión mezclada con el alimento.

En el manejo analgésico de la osteoartritis canina, los ensayos clínicos demuestran que la administración diaria de extractos de cáñamo ricos en CBD de espectro completo a dosis de 2.0 mg/kg cada 12 horas genera una reducción estadísticamente significativa en los índices clínicos de dolor evaluados mediante herramientas como la Escala de Dolor de Helsinki (HPI) y el Índice de Brevedad del Dolor Canino (CBPI).

Este beneficio clínico, se atribuye directamente al efecto séquito. Los extractos de espectro completo contienen no solo CBD, sino cantidades traza controladas de fitocannabinoides menores como el cannabigerol [CBG], la cannabidivarina [CBDV] y el cannabicromeno [CBC], junto con terpenos (mirceno, betacariofileno, linalool) y flavonoides.

El betacariofileno, actúa como un agonista selectivo directo del receptor (CB2), potenciando la acción antiinflamatoria del CBD sobre los sinoviocitos y macrófagos articulares de forma sinérgica, logrando una eficacia analgésica superior a la obtenida con aislados de CBD purificado al 99% a dosis equivalentes (Aswad et al., 2025).

4.2.4. Rol sistémico en oncología y cuidados paliativos

Los fitocannabinoides desempeñan un papel multifactorial de soporte avanzado en el paciente oncológico veterinario, pues más allá del control del dolor oncológico de origen mixto

nociceptivo por compresión tisular e inflamación, y neuropático por invasión neural de las células tumorales, el CBD y el CBG modulan las vías intrínsecas de supervivencia neoplásica (García & Soler, 2021).

En líneas celulares de adenocarcinomas mamarios y osteosarcomas, el CBD induce un estrés del retículo endoplásmico mediado por la acumulación de ROS, lo que altera el potencial de membrana mitocondrial e incrementa la síntesis intracelular de ceramidas, un potente supresor lipídico de tumores. Esta acumulación de ceramidas inhibe la vía de señalización Akt/mTOR (vía de supervivencia celular clave), deteniendo el crecimiento celular y promoviendo la autofagia de las células neoplásicas.

Adicionalmente, en la esfera de los cuidados paliativos, el uso controlado de combinaciones equilibradas de CBD y dosis de THC mantenidas por debajo del umbral de toxicidad cerebral mitiga de manera eficiente los síndromes de emesis, náusea anticipatoria e inapetencia inducidos tanto por la progresión tumoral sistémica como por los efectos secundarios de los protocolos de quimioterapia basados en platino (cisplatino, carboplatino).

Este efecto antiemético central y periférico está mediado principalmente por la activación indirecta de los receptores autorreceptores somatodendríticos (5-HT_{1A}) y el bloqueo de los receptores de neuroquinina-1 (NK-1) en el centro del vómito del tronco encefálico.

4.3. Terapias bio-oxidativas: Ozonoterapia veterinaria y terapias de soporte

La ozonoterapia médica veterinaria consiste en la aplicación controlada de una mezcla gaseosa compuesta por un máximo de 5% de ozono (O₃) y no menos de 95% de oxígeno medicinal (O₂), generada in situ mediante descargas eléctricas de alto voltaje a partir de oxígeno puro (Siqueira, 2021). La ozonoterapia se clasifica como una terapia biológica oxidativa que opera bajo el principio farmacológico y fisiológico de la hormesis médica. El ozono no actúa acumulativamente ni posee receptores específicos en el organismo.

Igualmente, el ozono se comporta como un estresor químico transitorio que induce una respuesta celular adaptativa de preconditionamiento, capacitando al organismo para resistir agresiones oxidativas o isquémicas de mayor magnitud.

4.3.1. Mecanismos bioquímicos y mensajeros biológicos secundarios

Debido a su configuración electrónica inestable, el ozono posee un potencial de oxidación extremadamente alto. Al entrar en contacto con fluidos biológicos como la sangre entera o los fluidos intersticiales, el ozono se disuelve de forma instantánea en el agua plasmática y reacciona de manera inmediata con los componentes de la primera línea de defensa antioxidante (ácido ascórbico, ácido úrico, albúmina) y, fundamentalmente, con los ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs) presentes en las membranas celulares y el plasma. Esta reacción química estequiométrica genera de manera cuantitativa dos tipos de mensajeros químicos con vidas medias y dianas biológicas distintas.

1. Especies Reactivas del Oxígeno (ROS)

Se genera principalmente peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en concentraciones micromolares benignas. El peróxido de hidrógeno actúa de forma local e inmediata, ingresando al citoplasma de los eritrocitos, leucocitos y plaquetas, donde modifica transitoriamente las vías metabólicas antes de ser neutralizado rápidamente por la catalasa y el sistema del glutatión.

2. Productos de Oxidación Lipídica (LOPs)

Incluyen alquiperóxidos, radicales lipoxilo y aldehídos lineales hidrofílicos, siendo el 4-hidroxi-nonenal (4-HNE) el más estudiado. A diferencia de las ROS, los LOPs son moléculas estables con vidas medias prolongadas que ingresan a la circulación sistémica. Actúan a distancia como señales moleculares que interactúan con una gran variedad de líneas celulares somáticas.

4.3.2. Activación de la vía Nrf2/ARE y síntesis antioxidante endógena

El mecanismo maestro de la ozonoterapia se desenvuelve a nivel de la regulación genética de la respuesta celular al estrés. En condiciones basales normales, el factor de transcripción Nrf2 (Factor nuclear eritroide 2-relacionado con el factor 2) se mantiene secuestrado en el citoplasma celular unido de forma inactiva a la proteína supresora Keap1 (Proteína asociada a la epoclorohidrina Kelch-like 1). Keap1 actúa como un sensor de estrés que facilita continuamente la ubiquitinación y subsecuente degradación proteasómica de Nrf2.

Cuando los LOPs circulantes (como el 4-HNE a bajas dosis) alcanzan las células de tejidos sanos o parénquimas orgánicos, reaccionan de manera específica con los residuos de cisteína reactivos presentes en la estructura de Keap1. Esta interacción altera la conformación espacial de Keap1, impidiendo la ubiquitinación de Nrf2. Como consecuencia, el Nrf2 recién sintetizado se estabiliza, se acumula en el citosol y se transloca activamente al núcleo celular.

Una vez dentro del núcleo, Nrf2 se heterodimeriza con pequeñas proteínas Maf y se une de forma selectiva al ARE (Elemento de Respuesta Antioxidante), una secuencia promotora de nucleótidos específica en el ADN. Esta unión genética activa la transcripción masiva y coordinada de una batería de genes que codifican para enzimas antioxidantes y desintoxicantes de fase II, incluyendo la Superóxido Dismutasa (SOD), la Catalasa (CAT), la Glutación Peroxidasa (GPx), la Glutación S-Transferasa (GST), la NAD(P)H quinona oxidoreductasa 1 (NQO1) y la Hemoxigenasa-1 (HO-1) (Siqueira, 2021).

Esta respuesta adaptativa dota a los tejidos del paciente geriátrico o con inflamación crónica de una capacidad antioxidante endógena superior, neutralizando de manera eficiente el estrés oxidativo crónico deletéreo responsable del envejecimiento celular acelerado y el fallo orgánico multiorgánico.

4.3.3. Optimización reológica y entrega de oxígeno tisular

El contacto controlado de la mezcla de ozono con los eritrocitos promueve una activación directa de la vía glucolítica de la vía de Embden-Meyerhof, resultando en un incremento medible de los niveles intracelulares de 2,3-difosfoglicerato (2,3-DPG).

El 2,3-DPG actúa como un modulador alostérico de la molécula de hemoglobina, disminuyendo su afinidad química por el oxígeno. Este fenómeno desplaza de forma controlada la curva de disociación de la oxihemoglobina hacia la derecha (Efecto Bohr potenciado), lo que significa que el eritrocito libera el oxígeno transportado con una facilidad drásticamente mayor al transitar por capilares periféricos con tensiones de oxígeno disminuidas.

Adicionalmente, el ozono estimula la producción basal de óxido nítrico endotelial (eNOS), promoviendo la vasodilatación y reestableciendo las cargas eléctricas negativas netas en la superficie de la membrana del eritrocito. Esto, genera la aparición del efecto *rouleaux*, que reduce de forma significativa la viscosidad plasmática total y previene el fenómeno de agregación eritrocitaria en pilas de monedas, optimizando el flujo sanguíneo y la oxigenación tisular en parénquimas con microangiopatías o en áreas isquémicas crónicas.

4.3.4. Vías de administración, dosimetría y aplicaciones clínicas veterinarias

La dosificación en ozonoterapia se rige por un rango terapéutico estricto expresado en microgramos de ozono por mililitro de oxígeno gaseoso multiplicado por el volumen total aplicado, determinando la carga oxidativa neta en microgramos. Las dosis se dividen según su propósito biológico en:

- **Bajas (10 a 20):** Efecto inmunomodulador y de activación metabólica.
- **Medias (20 a 30):** Efecto hormético optimizador del sistema antioxidante.
- **Altas (35 a 50):** Efecto local bactericida, fungicida y virucida (usado exclusivamente en tejidos externos o aplicaciones locales bien delimitadas).

4.3.4.1. Autohemoterapia Mayor (AHTM)

Es la técnica de referencia para efectos sistémicos profundos. Consiste en la extracción aséptica de un volumen predeterminado de sangre venosa del paciente (típicamente 1.0 a 1.5 mL/kg de peso vivo) en un contenedor de vidrio o polímero especializado ozono-resistente con un anticoagulante adecuado (como la citrato-dextrosa, evitando el uso de heparina por riesgo de agregación plaquetaria inducida por ozono).

Se adiciona un volumen idéntico de la mezcla gaseosa de (O₃/O₂) a una concentración hormética estricta de dosis media. Se realiza una agitación suave y homogénea de forma rotatoria durante 3 a 5 minutos, observando el cambio inmediato de coloración de la sangre hacia un rojo brillante, indicativo de la saturación de oxígeno, para posteriormente reinfundir la sangre

ozonizada por la misma vía venosa permeable. Está indicada en el soporte multimodal de neoplasias altamente metastásicas y enfermedades autoinmunes complejas.

4.3.4.2. Autohemoterapia Menor (Ahtm)

Consiste en la extracción de un volumen pequeño de sangre del paciente (3 a 5 mL totales), la cual se mezcla en una jeringa ozono-resistente con un volumen equivalente de gas ozono a concentraciones medias-altas. Tras una agitación vigorosa para emulsionar el gas con la sangre, la mezcla se inyecta inmediatamente por vía intramuscular profunda. La hemólisis local controlada y la liberación de proteínas oxidadas actúan como una autovacuna biológica de alta potencia, estimulando la proliferación de macrófagos y la liberación sistémica de citoquinas moduladoras, siendo el tratamiento de elección para el control de dermatitis atópicas refractarias y piodermas profundas recurrentes.

4.3.5. Insuflación Rectal de Ozono

La insuflación rectal representa la alternativa sistémica no invasiva más versátil y ampliamente adoptada en la clínica diaria de pequeños animales (Pérez & Cordero, 2022). Tras la evacuación de las heces, se introduce una sonda rectal blanda lubricada de calibre adecuado y se administra el gas ozono de forma lenta y continua a dosis horméticas con volúmenes ajustados al tamaño del paciente (15 a 20 mL/kg de peso total).

Dada la profusa y especializada vascularización anatómica de la mucosa colorrectal —caracterizada por el drenaje venoso directo a través del sistema venoso portal hacia el parénquima hepático—, los mensajeros biológicos secundarios (LOPs) generados localmente son absorbidos de inmediato. Esto induce una respuesta de preconditionamiento oxidativo hepático de alta eficiencia, restaurando los niveles de glutatión hepático y ejerciendo un efecto protector sistémico idéntico al de la AHTM, lo que la convierte en la vía predilecta para el manejo crónico de pacientes geriátricos, cardiopatas avanzados o felinos con enfermedad renal crónica donde la cateterización venosa recurrente representa un factor de estrés crítico o inviable.

4.4. Modulación física del dolor: Fotobiomodulación (Láser Clase IV) y magnetoterapia

4.4.1. Fotobiomodulación (PBM) - Láser de Alta Potencia (Clase IV)

La biofísica aplicada a la fisiomedicina veterinaria ha consolidado el uso de herramientas no farmacológicas de alta precisión tecnológica, capaces de interactuar directamente con las estructuras subcelulares y la matriz extracelular para acelerar la reparación de tejidos y modular los impulsos nociceptivos (Plaza & Villalba, 2023). La terapia de fotobiomodulación, anteriormente conocida como terapia láser de baja intensidad o LLLT, consiste en la aplicación de haces de luz monocromática, coherente y colimada sobre los tejidos biológicos.

La tecnología VET-TECH exige el uso de equipos emisores de Láser de Clase IV, definidos operativamente como aquellos dispositivos capaces de entregar potencias de salida continuas o pulsadas superiores a los 0.5 vatios (Plaza & Villalba, 2023). Esta alta potencia es un requisito técnico indispensable en veterinaria para penetrar de forma efectiva el denso pelaje y el espesor de los tejidos blandos de los pacientes caninos de razas grandes y gigantes, permitiendo alcanzar densidades de energía terapéuticas en tejidos profundos, como la cápsula articular coxofemoral o los discos intervertebrales, en tiempos clínicamente viables.

4.4.2. Mecanismo de acción mitocondrial e interacción fotónica

La base molecular de la PBM reside en la absorción de fotones de luz por parte de fotorreceptores celulares específicos localizados dentro de longitudes de onda comprendidas entre 600 nm y 1100 nm, donde la absorción competitiva por parte del agua, la melanina y la hemoglobina es mínima, aquellas conocidas como la "ventana óptica biológica".

El cromóforo fundamental es la enzima Citocromo c Oxidasa (CCO), la unidad funcional IV integrada en la membrana mitocondrial interna que participa directamente en la cadena de transporte de electrones.

En estados de patología crónica, isquemia o inflamación tisular, las células secretan niveles elevados de óxido nítrico (NO). Este gas se une competitivamente al sitio activo de la CCO,

desplazando al oxígeno molecular y bloqueando la respiración celular, lo que deprime la síntesis de ATP e induce un estado de estrés energético celular. Al irradiar el tejido con luz láser en longitudes de onda específicas (como 810 nm o 980 nm), los fotones incidentes interactúan con los centros metálicos de cobre y hierro de la CCO, induciendo la fotodiciación del óxido nítrico (NO).

Al liberarse la CCO de la inhibición mediada por el NO, el oxígeno molecular vuelve a unirse libremente al receptor citocrómico, reactivando de forma inmediata el flujo de electrones a través de la cadena respiratoria. Esta reactivación eleva el potencial eléctrico de la membrana mitocondrial interna y estimula de forma exponencial la actividad de la ATP sintasa, aumentando la producción neta de adenosín trifosfato (ATP) celular.

4.4.3. Cascada de señalización secundaria y efectos clínicos analgésicos

Paralelamente al incremento de ATP, la reactivación de la CCO induce una ráfaga fisiológica transitoria y controlada de especies reactivas del oxígeno (ROS) mitocondriales. Estas ROS actúan como segundos mensajeros intracelulares que activan factores de transcripción implicados en la reparación y regeneración celular. Se estimula la síntesis y liberación del Factor de Crecimiento Endotelial Vascular (VEGF), promoviendo la angiogénesis acelerada en tejidos con úlceras o heridas crónicas, y del Factor de Crecimiento Transformante Beta 1 (TGF-beta1), modulando la proliferación de fibroblastos y la síntesis ordenada de colágeno.

A nivel analgésico clínico, la aplicación de densidades de energía elevadas en puntos de acupuntura o a lo largo de trayectos nerviosos interrumpe la transmisión nociceptiva central. En ese aspecto, el láser de Clase IV induce un bloqueo reversible de la conducción nerviosa periférica en las fibras aferentes amielínicas C y mielínicas delgadas A-delta, disminuyendo la amplitud del potencial de acción nervioso.

Asimismo, reduce de manera local las concentraciones de bradicinina y el transporte axonal de la Sustancia P (el neurotransmisor proalgesico clave en la asta dorsal de la médula espinal), mientras estimula de forma sistémica la liberación de endorfinas endógenas, proporcionando

un alivio sustancial y prolongado del dolor neuropático, radiculopatías por enfermedad de disco intervertebral (EDIV) y crisis dolorosas por osteoartritis avanzada.

4.4.4. Campos Electromagnéticos Pulsados (PEMF) y Magnetoterapia

La magnetoterapia avanzada veterinaria ha evolucionado hacia el uso técnico de los Campos Electromagnéticos Pulsados (PEMF). A diferencia de los imanes estáticos tradicionales de baja efectividad, los sistemas PEMF emplean corrientes eléctricas alternas que fluyen a través de bobinas especializadas para inducir campos electromagnéticos variables en el tiempo (Martínez & Torres, 2024).

Estos campos se caracterizan por ondas de choque específicas en frecuencias extremadamente bajas entre 1 y 100 Hz e intensidades de campo magnético moduladas entre 5 y 50 Gauss, que son capaces de atravesar de manera uniforme todos los tejidos del paciente sin generar calentamiento térmico ni disiparse por la presencia de vendajes o implantes quirúrgicos ortopédicos metálicos.

4.4.5. Modulación del canal de calcio e inducción de óxido nítrico constitutivo

El mecanismo biofísico primario de la terapia PEMF se fundamenta en la modulación del equilibrio electroquímico e iónico transmembrana. El campo electromagnético pulsado incrementa de manera selectiva la afinidad química y la unión cooperativa de los iones de Calcio (Ca^{2+}) a la proteína reguladora intracelular Calmodulina (CaM). La formación acelerada del complejo Calcio-Calmodulina (Ca^{2+} -CaM) activa de forma casi inmediata a las isoformas constitutivas de la enzima óxido nítrico sintasa, específicamente el óxido nítrico sintasa endotelial (eNOS) y la neuronal (nNOS).

Esta activación enzimática desencadena la producción de ráfagas fisiológicas basales de corta duración de óxido nítrico libre (NO). Es fundamental diferenciar este óxido nítrico constitutivo del óxido nítrico inducible (iNOS), el cual es sobreproducido de forma patológica durante la inflamación destructiva. El (NO) fisiológico inducido por los campos PEMF activa de forma inmediata a la guanilato ciclasa soluble, elevando los niveles de GMP cíclico (GMPc).

Todo esto, promueve una vasodilatación capilar inmediata, reduce la permeabilidad endotelial disminuyendo el edema tisular local y bloquea la transcripción de la citoquina proinflamatoria maestra Interleuquina-1 Beta. Como resultado de esta cascada biofísica, se interrumpe la cronificación de la inflamación en tejidos articulares degradados.

4.4.6. Efecto piezoeléctrico estructural en el tejido osteoarticular

En procesos degenerativos del sistema esquelético, como no uniones óseas, retrasos en la consolidación de fracturas y osteoartritis crónica avanzada, la terapia PEMF aprovecha las propiedades biofísicas mecánicas y eléctricas intrínsecas del hueso cortical. La deformación o el paso de un campo electromagnético dinámico a través de las fibras de colágeno tipo I y los cristales de hidroxiapatita del tejido óseo genera corrientes eléctricas de rango microamperométrico debidas al efecto piezoeléctrico.

Estas microcorrientes modifican el potencial de membrana en reposo de las células del linaje osteogénico, abriendo canales de calcio dependientes de voltaje y estimulando directamente a los osteoblastos para aumentar la expresión genética de proteínas de la matriz ósea, como la osteocalcina y el colágeno tipo I, además de potenciar la síntesis del Factor de Crecimiento Fibroblástico 2 (FGF-2) y de las Proteínas Morfogénicas Óseas (BMP-2 y BMP-7).

De forma simultánea, en el cartílago articular hialino, los campos PEMF estimulan a los condrocitos para incrementar la síntesis de glucosaminoglucanos, agregano y colágeno tipo II, al tiempo que reducen la expresión de las metaloproteinasas de la matriz (MMP-3 y MMP-13), frenando de manera estructural la degradación enzimática del cartílago y promoviendo la estabilización de la articulación artrósica crónica.

En ese aspecto, las diferentes terapias integrativas conforman un sistema de tratamiento eficaz del paciente veterinario oncológico y crónico, tanto para la remisión de los síntomas de la condición o enfermedad como para el cuidado de los pacientes veterinarios en términos de la disminución del dolor y de las condiciones subyacentes propias de las enfermedades crónicas, tal como se observa en la tabla siguiente:

Tabla 4. Comparativa de terapias avanzadas e integrativas

Modalidad Terapéutica	Molecular / Celular Primaria	Mecanismo Fisiopatológico Principal	Indicaciones Clínicas de Elección	Parámetros de Control Clínico
Fitoterapia Clínica (Estandarizada)	Vía NF-κB, Complejo IKK, Caspasa-3, Receptores TLR-4.	Inhibición de transcripción proinflamatoria, inducción de apoptosis celular y soporte hematopoyético adaptógeno.	Soporte oncológico, caquexia tumoral, leucopenias quimioterapéuticas.	Concentración plasmática del quimiotipo, hemograma completo y enzimas hepáticas.
Sistema Endocannabinoide (Fitocannabinoides)	Receptores (CB1) (periféricos/centrales), (CB2), Canales TRPV1, Enzima FAAH.	Modulación retrógrada presináptica, bloqueo de liberación de glutamato, desensibilización de nociceptores nocivos y apoptosis por vía ceramida.	Dolor osteoarticular crónico, dolor neuropático mixto, cuidados paliativos oncológicos, náuseas/emesis.	Escala de dolor CBPI/HPI, control estricto de ataxia estática y sedación.
Ozonoterapia Médica	Residuos de Cisteína en Keap1, Vía Nrf2/ARE, Niveles eritrocitarios de 2,3-DPG.	Precondicionamiento oxidativo hormético, inducción de enzimas antioxidantes (SOD, CAT, GPx) y optimización de entrega de (O ₂).	Isquemia tisular crónica, soporte en pacientes geriátricos con disfunción multiorgánica, dermatitis refractarias.	Carga oxidativa neta, perfil bioquímico renal/hepático y gases arteriales.

Fotobiomodulación (Láser Clase IV)	Enzima Citocromo c Oxidasa (Mitocondria), Fibras Nociceptivas C y A-delta.	Fotodisociación de Oxído Nítrico, incremento exponencial de ATP, bloqueo reversible de conducción axónica de Sustancia P.	Enfermedad de disco intervertebral (EDIV), osteoartritis, cicatrización acelerada de heridas complejas infectadas.	Densidad de energía aplicada, potencia de salida (W) y goniometría articular.
---------------------------------------	--	---	---	---

Nota. Adaptado de (Delgado, 2020; García & Soler, 2021).

Estas herramientas basadas en la evidencia eliminan el empirismo intuitivo del pasado, ofreciendo mecanismos de acción rigurosos capaces de interactuar armónicamente con la biología del hospedador.

La integración metodológica y científica de la fitoterapia molecular, la modulación avanzada del sistema endocannabinoide, el preconditionamiento oxidativo por ozono y las modalidades biofísicas de fotobiomodulación y magnetoterapia representa un cambio cualitativo en el ejercicio de la medicina veterinaria moderna.

Al implementar protocolos analgésicos e inmunomoduladores multimodales, el clínico veterinario adquiere la capacidad de mitigar de manera eficiente los vacíos terapéuticos que caracterizan a los tratamientos alopáticos tradicionales, reduciendo la incidencia de toxicidades orgánicas cruzadas y devolviendo la autonomía funcional y el bienestar al paciente crónico y oncológico avanzado.

La correcta aplicación de las tecnologías VET-TECH en estas disciplinas exige un dominio de la farmacocinética fina, la dosimetría molecular y las leyes biofísicas que rigen cada intervención, consolidando una práctica médica donde la tecnología digital y la medicina integrativa convergen para redefinir los estándares mundiales de la salud animal.

V



**Monitoreo digital y wearables en
la recuperación del paciente**

CAPÍTULO V.

MONITOREO DIGITAL Y WEARABLES EN LA RECUPERACIÓN DEL PACIENTE

Oscar Darwin Criollo Salinas

La evolución de la tecnología en la actualidad, toca todos los aspectos de la vida y de las ciencias. La medicina veterinaria no deja de estar inmersa en esta revolución tecnológica, a través de la que se redefinen las bases de la monitorización hospitalaria y el seguimiento postoperatorio domiciliario. Dos esquemas de atención que hasta ahora han sido llevados a cabo de forma intuitiva por los cuidadores, ahora se realiza de manera mucho más detallada a través de dispositivos digitales y de monitorización que conectan directamente al personal médico con el paciente veterinario, sin que medie la interpretación de estos.

Históricamente, la evaluación clínica del paciente convaleciente dependía de interpretaciones analógicas y observaciones intermitentes por parte del equipo médico y la intervención subjetiva de los cuidadores. Estas evaluaciones, frecuentemente sesgadas por el llamado efecto de la bata blanca (Bragg et al., 2015) resultan insuficientes para capturar los eventos fisiológicos transitorios durante el proceso de atención. Adicionalmente, el estrés neurovegetativo derivado del transporte, la manipulación física y el entorno clínico induce respuestas agudas, como taquicardia, taquipnea e hipertensión reactivas, que enmascaran el estado real de los pacientes caninos y felinos (Bragg et al., 2015).

Entonces, la aparición de del Internet de las Cosas en el campo de la medicina veterinaria, conlleva además al desarrollo de biosensores portátiles no invasivos de grado médico (*wearables*) que permiten sortear estas limitaciones bioestadísticas y biológicas (Gasser et al., 2021), logrando la generación de biomarcadores digitales. Estos biomarcadores, surgen de la captura de variables biomédicas de forma continua, remota y en el entorno nativo del animal, que ahora pasa a ser evaluado en su propio contexto y de forma natural, sin que surjan variables derivadas del estrés por manipulación o traslado (Michaux & Tainsky, 2020).

Estos biomarcadores representan flujos de datos objetivos que, procesados mediante algoritmos avanzados de aprendizaje automático, permiten estructurar una medicina veterinaria predictiva, proactiva y personalizada (Michaux & Tainsky, 2020). Una medicina que se sienta sobre bases biofísicas, matemáticas aplicadas y traslación clínica del monitoreo de variables fisiológicas en tiempo real, la variabilidad de la frecuencia cardíaca, los sistemas continuos de monitoreo metabólico y los laboratorios portátiles de análisis cinemático y actigráfico tridimensional, objeto del presente capítulo.

5.1. Telemonitoreo de variables fisiológicas y biomarcadores digitales en tiempo real

El despliegue de ecosistemas del internet de las cosas en medicina veterinaria, especialmente en el ámbito hospitalario y residencial se fundamenta en la arquitectura de sensores periféricos inteligentes capaces de capturar, digitalizar y transmitir señales biológicas sin interferir con el comportamiento o el confort del paciente (Gasser et al., 2021). El objetivo último del telemonitoreo es identificar desviaciones de los rangos basales específicos del individuo antes de que se manifiesten signos macroscópicos de descompensación orgánica o dolor agudo (Michaux & Tainsky, 2020).

El monitoreo digital permite establecer control permanente sobre las variables biomédicas más importantes, sobre todo en pacientes crónicos y oncológicos, que pueden sufrir complicaciones derivadas de la observación y el traslado continuos. Mantiene una conexión constante entre el personal médico veterinario y el paciente, de forma que todos los factores fisiológicos de este último pueden ser controlados a tiempo.

5.1.1. Sensores fotoplétismográficos (PPG) aplicados a la anatomía veterinaria

La fotoplétismografía (PPG) es una técnica electroóptica no invasiva de alta eficiencia para la determinación continua del pulso arterial y la saturación de oxígeno (Gasser et al., 2021). La base biofísica de la PPG radica en la ley de Beer-Lambert, que describe la atenuación de la luz a medida que atraviesa una matriz de tejido biológico con un volumen vascular dinámico.

Los componentes de un sensor PPG integrado en un collar o arnés veterinario de grado médico, permiten la medición del volumen sanguíneo periférico, de manera que se pueden identificar diferentes variables. Estos collares incluyen:

- **Emisores LED duales:** Emiten haces de luz en longitudes de onda específicas, típicamente luz verde (aprox. 530 nm) para la detección de la onda de pulso superficial debido a su alta absorción por la hemoglobina, o luz roja/infrarroja cercana (660 nm / 880 nm) para aplicaciones de oximetría de pulso profunda.
- **Fotodiodos receptores:** Miden la intensidad de la luz reflejada o transmitida a través de los lechos capilares dérmicos superficiales de regiones anatómicas idóneas como la cara ventral del cuello, la base de la cola o la región axilar desprovista de pelo espeso.
- **Procesadores de señal analógica (AFE):** Amplifican la señal eléctrica generada por el fotodiodo y filtran el ruido electrónico basal.

Cuando el corazón del paciente eyecta sangre hacia la aorta durante la sístole, una onda de presión hidrostática viaja a través de las arterias, expandiendo transitoriamente las arteriolas dérmicas. Este aumento en el volumen de eritrocitos circulantes incrementa de forma estocástica la absorción de fotones de luz, disminuyendo la cantidad de luz reflejada que llega al fotodiodo. Igualmente, durante la diástole, el volumen vascular disminuye y la reflectancia lumínica se eleva.

La señal PPG resultante se compone de una fracción estática (DC), modulada por la absorción del tejido conectivo, óseo y la sangre venosa constante, y una fracción dinámica pulsátil (AC), que mapea de forma exacta el ciclo cardíaco (Gasser et al., 2021). El procesamiento computacional de la fase AC permite calcular de forma continua e ininterrumpida la frecuencia cardíaca periférica sin necesidad de electrodos de contacto galvánico tradicionales.

5.1.2. Fisiología matemática de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (HRV)

El intervalo de tiempo transcurrido entre dos contracciones ventriculares sucesivas, conocido como intervalo R-R o intervalo interlatido (IBI), no es un parámetro matemático constante.

Este fenómeno fisiológico se denomina Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (HRV). Incluso en condiciones de aparente reposo clínico, la duración de estos intervalos experimenta variaciones milisegundo a milisegundo reguladas por la influencia dinámica y oscilatoria del sistema nervioso autónomo (SNA) sobre el nodo sinoauricular. Este fenómeno fisiológico se denomina Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (HRV).

En los caninos y felinos domésticos, la HRV es modulada por la arritmia sinusal respiratoria (ASR). Durante la inspiración, la inhibición central transitoria del núcleo ambiguo del nervio vago provoca un predominio simpático que acelera la frecuencia cardíaca. Durante la espiración, se reestablece la eferencia vagal, eferente hiperpolarizante, enlenteciendo el ritmo.

Una HRV elevada denota un sistema autónomo flexible, resiliente y con un fuerte tono parasimpático protector. Por el contrario, un aplanamiento o reducción severa de la HRV es un indicador inequívoco de estrés fisiológico, dolor persistente o fallo miocárdico inminente, donde el organismo opera bajo una estimulación simpática fija no oscilatoria.

5.1.3. Métricas del dominio del tiempo para el control analgésico

Para transformar los intervalos interlatidos crudos en biomarcadores analgésicos interpretables por la plataforma VET-TECH, se aplican análisis estadísticos en el dominio del tiempo sobre ventanas temporales estandarizadas de 5 minutos, a saber:

- 1. Desviación estándar de los intervalos NN normales (SDNN):** Refleja la variabilidad total acumulada inducida por ambos componentes del sistema nervioso (simpático y parasimpático) a lo largo del período de registro.
- 2. Raíz cuadrada de la media de las diferencias al cuadrado de intervalos sucesivos (RMSSD):** Esta métrica calcula de forma matemática la varianza a corto plazo entre latidos contiguos. Debido a que las fluctuaciones rápidas de milisegundo a milisegundo están mediadas exclusivamente por la liberación de acetilcolina por parte del nervio vago, la RMSSD es el biomarcador digital directo más fiable para cuantificar el tono parasimpático y evaluar objetivamente la percepción de dolor en el paciente postquirúrgico.

5.1.4. Métricas del dominio de la frecuencia mediante Transformada Rápida de Fourier (FFT)

El análisis espectral desglosa la señal compleja de la HRV en sus frecuencias sinusoidales componentes, mapeando la potencia de distribución de la varianza en bandas de frecuencia específicas:

- **Baja Frecuencia (LF: 0.04 - 0.15 Hz en caninos):** Modulada tanto por barorreceptores como por la acción conjunta simpática y parasimpática.
- **Alta Frecuencia (HF: 0.15 - 0.50 Hz en caninos):** Sincronizada directamente con la frecuencia respiratoria y regulada de manera exclusiva por la eferencia vagal.
- **Relación LF/HF:** Empleada tradicionalmente como un índice del balance simpatovagal. Un incremento sostenido de la razón LF/HF en la consola de telemetría hospitalaria indica una desviación hacia el predominio simpático destructivo, sirviendo como una alarma automatizada para la intervención analgésica preventiva antes de que se presenten signos clínicos groseros como temblores o midriasis.

5.1.5. Monitoreo Continuo de Glucosa Intersticial (iCGM) y sus métricas bioestadísticas

Tradicionalmente, el manejo clásico del paciente metabólico crítico o con endocrinopatías descompensadas como la diabetes mellitus felina e hiperadrenocorticismismo concomitante se ha basado en la obtención de perfiles glucémicos mediante punciones capilares intermitentes. Este método analógico adolece de vacíos de información críticos, particularmente durante las horas nocturnas cuando el paciente no es revisado por sus cuidadores de forma constante, y expone al felino a picos de hiperglucemia reactiva inducida por el dolor de la punción y el miedo a la contención física (Corradini et al., 2016).

La implementación de sistemas de Monitoreo Continuo de Glucosa Intersticial (iCGM) soluciona este sesgo metodológico al proveer lecturas dinámicas cada 1 a 5 minutos (Corradini et al., 2016). Además, permite que tanto los pacientes como los cuidadores participen en

dicho monitoreo sin sufrir molestias secundarias, propias de la movilización y la revisión constantes.

El dispositivo iCGM consta de un sensor miniaturizado provisto de un filamento polimérico flexible que se inserta de manera subcutánea en el tejido intersticial mediante un aplicador automático de aguja guía. La superficie del filamento está impregnada con la enzima glucosa oxidasa, la cual cataliza de forma electroquímica la oxidación de la glucosa presente en el líquido intersticial.

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) generado es oxidado consecutivamente en un electrodo de platino interno, liberando electrones que generan una corriente eléctrica de rango nanoamperométrico. La intensidad de esta corriente es directamente proporcional a la concentración de glucosa intersticial. Un transmisor inteligente acoplado a la piel procesa esta microcorriente y transmite los valores mediante Bluetooth de Baja Energía (BLE) a un concentrador hospitalario IoMT (Gasser et al., 2021)4).

5.1.6. Retraso fisiológico intersticial

El médico veterinario intensivista debe comprender que existe un retraso hemodinámico intrínseco de aproximadamente 5 a 15 minutos entre la concentración de glucosa medida en el plasma sanguíneo y la detectada en el fluido intersticial (Corradini et al., 2016). Este retraso se debe al tiempo requerido para que la glucosa difunda pasivamente a través del endotelio capilar hacia el espacio intercelular de la dermis.

Durante fases de estabilidad metabólica, la correlación es lineal; sin embargo, en caídas abruptas de la glucemia (como las inducidas por una sobredosis de insulina regular en infusión continua), el valor del iCGM reflejará una concentración superior a la plasmática real. Las plataformas de software VET-TECH de última generación mitigan este desfase aplicando filtros matemáticos predictivos basados en derivadas temporales de primer y segundo orden.

5.1.7. Métricas avanzadas de análisis glucémico

El flujo continuo de lecturas iCGM permite calcular biomarcadores de calidad metabólica sistémica que reemplazan a la determinación aislada de fructosamina sérica (Hafner & Dietert, 2021):

- **Tiempo en Rango (TIR / Time-in-Range):** Expresa el porcentaje de horas al día en que el paciente se mantiene dentro de los límites euglucémicos óptimos específicos para su especie (ej. 80-180 mg/dL en felinos). Mantener un TIR superior al 70% correlaciona directamente con una reducción significativa en las complicaciones microvasculares y retrasos en la cicatrización postquirúrgica (Hafner & Dietert, 2021).
- **Indicador de Gestión de la Glucosa (GMI):** Estimación matemática de la hemoglobina glicosilada basada en el promedio de las lecturas intersticiales continuas de un período de 14 días, proporcionando una métrica de control a largo plazo sin necesidad de muestreos sanguíneos recurrentes (Hafner & Dietert, 2021).
- **Coeficiente de Variación Glucémica (%CV):** Cuantifica la amplitud de las oscilaciones glucémicas del paciente. Un %CV superior al 36% define una diabetes inestable con alta propensión al desarrollo de hipoglucemias severas imprevistas, exigiendo la reestructuración del quimiotipo de la insulina o de la carga de carbohidratos de la bionutrición administrada (Hafner & Dietert, 2021).

5.1.8. Termometría subcutánea continua y perfiles térmicos circadianos

El control de la temperatura corporal central en el paciente en estado de choque o sometido a intervenciones quirúrgicas prolongadas constituye una variable crítica de supervivencia. En estados crónicos y posoperatorios la temperatura corporal es un indicativo fundamental del bienestar del paciente, pues determina cualquier alteración en el sistema nervioso y en cuanto a la aparición de cualquier síndrome. Mientras que la hipotermia posoperatoria, que deprime el sistema inmune, altera la cascada de coagulación e incrementa la tasa de infecciones de la herida quirúrgica. Por su parte, la hipertermia es el signo cardinal del Síndrome de Respuesta Inflamatoria Sistémica (SIRS) o de procesos de sepsis central.

Los biosensores inyectables y microchips térmicos avanzados integran termistores encapsulados de óxido metálico de coeficiente de temperatura negativo (NTC) (Giannetto & Piccione, 2018). Estos dispositivos reducen su resistencia eléctrica interna de forma predecible ante aumentos microscópicos de la temperatura circundante.

La recopilación ininterrumpida de datos térmicos subcutáneos profundos revela la existencia del ritmo circadiano térmico (Giannetto & Piccione, 2018). En animales sanos, la temperatura experimenta oscilaciones cíclicas de aproximadamente 0.5 °C a 1.0 °C a lo largo de un ciclo de 24 horas, alcanzando su nadir durante las fases de descanso profundo y su zenit en periodos de vigilia y actividad metabólica.

La analítica digital basada en algoritmos cosinor procesa los datos térmicos para caracterizar tres variables: el valor medio del ritmo o mesor, la mitad de la distancia entre el pico y el nadir o amplitud y el momento del día en que se alcanza el valor máximo, conocido como acrofase (Giannetto & Piccione, 2018). En pacientes con dolor oncológico no controlado, sepsis latente o dehiscencia oculta de suturas gastrointestinales, se observa un aplanamiento temprano de la amplitud del ritmo circadiano térmico junto con un desplazamiento errático de la acrofase.

Este biomarcador digital precede por horas a la aparición de fiebre macroscópica detectable mediante termometría rectal convencional, operando como un sistema automatizado de alerta temprana intrahospitalaria (Michaux & Tainsky, 2020) 6).

5.2. Evaluación tecnológica del bienestar y la movilidad: Actigrafía y análisis de marcha digital

La evaluación de la movilidad, el comportamiento cinemático y los patrones de descanso constituye un eje fundamental para medir de manera objetiva el bienestar animal y validar la tasa de éxito de procedimientos ortopédicos o neuroquirúrgicos (Hansen & Lascelles, 2013). El examen clínico visual tradicional adolece de subjetividad inherente y es incapaz de capturar la sutil claudicación compensatoria que ocurre de forma continua durante la rutina diaria del animal en su hogar.

Para mejorar esta evaluación, la VET-TECH incorpora hardware microelectromecánico y sistemas ópticos automatizados que solucionan esta brecha diagnóstica proporcionando variables cuantitativas continuas. Al igual que en la observación de las variables fisiológicas, en este caso se la tecnología permite la cercanía y la evaluación permanente y efectiva.

5.2.1. Actigrafía tridimensional mediante acelerometría triaxial MEMS

Los sensores actigráficos integrados en collares y arneses de grado médico veterinario emplean acelerómetros tridimensionales de sistemas microelectromecánicos (MEMS) (Dow Gray et al., 2017). El principio operativo de un acelerómetro MEMS se basa en una estructura interna micro-mecanizada de silicio compuesta por una masa suspendida por resortes elásticos entre placas de condensación fijas. Cuando el animal se desplaza o cambia de postura, las fuerzas de inercia provocan el desplazamiento microscópico de la masa suspendida, alterando la capacitancia eléctrica entre las placas de forma proporcional a la aceleración lineal experimentada a lo largo de tres ejes ortogonales interconectados

($A = a_x, a_y, a_z$)

- **Eje X (Plano mediolateral):** Mide movimientos de balanceo lateral y giros.
- **Eje Y (Plano craneocaudal):** Registra la aceleración del avance lineal y frenado.
- **Eje Z (Plano dorsoventral):** Captura el impacto vertical del paso y los saltos.

Figura 2. Diagrama de movimiento cinemático del animal

EJE X	EJE Y	EJE Z
Mediolateral	Craneocaudal	Dorsoventral

Nota. Adaptado de (Giannetto & Piccione, 2018)

La señal analógica de voltaje es digitalizada por un convertidor A/D interno a frecuencias de muestreo estandarizadas de entre 10 y 100 Hz (Dow Gray et al., 2017). Los datos de aceleración cruda son procesados inicialmente mediante filtros de paso alto digitales para eliminar la aceleración de la gravedad estática ($1g$), aislando de forma exclusiva la aceleración dinámica voluntaria generada por el aparato locomotor del animal.

Posteriormente, las aceleraciones se integran en ventanas de tiempo preestablecidas (frecuentemente de 15 a 60 segundos) mediante la sumatoria de las magnitudes vectoriales, generando la métrica estandarizada conocida como Activity Counts (Cuentas de Actividad) (Dow Gray et al., 2017).

5.2.2. Algoritmos de clasificación conductual automática

Los flujos continuos de *Activity Counts* son analizados en servidores de nube centralizados mediante arquitecturas de redes neuronales convolucionales (CNN) o clasificadores de vectores de soporte (SVM) entrenados específicamente para la firma cinética de cada especie y conformación racial (Dow Gray et al., 2017). Estos modelos de inteligencia artificial segregan de forma matemática el presupuesto del tiempo diario del paciente en categorías conductuales mutuamente excluyentes: descanso profundo, sueño fragmentado, deambulación pasiva, acicalamiento, alimentación y carrera activa.

5.2.3. Índice de fragmentación del sueño nocturno como biomarcador de dolor articular

Una de las aplicaciones más potentes de la actigrafía de alta resolución en la ortopedia integrativa es la cuantificación objetiva del patrón de sueño nocturno en pacientes aquejados de osteoartritis crónica o inestabilidad lumbosacra (Hansen & Lascelles, 2013). Los perros con dolor articular persistente experimentan serias dificultades biomecánicas para mantener una posición decúbito estático prolongado; la compresión de las carillas articulares inflamadas o la isquemia posicional de las raíces nerviosas los obliga a cambiar de postura recurrentemente durante la noche (Hansen & Lascelles, 2013).

El acelerómetro MEMS registra estos eventos como ráfagas cortas de alta aceleración en los ejes X y Z durante las horas de oscuridad periférica. El algoritmo VET-TECH calcula el Índice de Fragmentación del Sueño (SFI), definido matemáticamente como el cociente entre el número de transiciones del estado de descanso al estado de movimiento activo dividido por el tiempo total de descanso asignado. Un SFI elevado correlaciona de forma lineal y robusta con puntuaciones altas en escalas subjetivas de dolor musculoesquelético como el *Canine Brief Pain Inventory* (CBPI) (Hansen & Lascelles, 2013).

La monitorización remota de la normalización del SFI y la disminución de los picos de actividad balística nocturna actúan como el estándar de validación científica para confirmar el restab-

lecimiento de la calidad de vida y el éxito terapéutico de los planes analgésicos multimodales modernos sin depender de la percepción sesgada del propietario (Dow Gray et al., 2017).

5.2.4. Análisis cinemático de marcha digital: Pasarelas baropodométricas y plataformas de fuerza

La evaluación de la biomecánica de la marcha mediante herramientas digitales representa la cúspide de la objetividad en la ortopedia y la rehabilitación veterinaria moderna (Budsberg & Torres, 2015). Los sistemas cinéticos y cinemáticos capturan las fuerzas de reacción del suelo y los rangos de movimiento articular de forma cuantitativa, eliminando por completo el error de apreciación del clínico, quien es incapaz de discriminar visualmente asimetrías de carga o claudicaciones leves que comprometan menos del 15% de la transferencia de peso corporal total (Budsberg & Torres, 2015).

Así, también se encuentran las pasarelas baropodométricas de presión, sistemas constan de plataformas planas longitudinales provistas de matrices de alta densidad que integran miles de sensores de presión resistivos o capacitivos miniaturizados.

Al desplazarse el animal a un trote o paso constante sobre la pasarela, los sensores registran la deformación mecánica y la convierten en una señal eléctrica digitalizada a frecuencias de muestreo elevadas, comúnmente entre 100 y 500 Hz (Møller et al., 2020).

El software asociado aísla de forma automática la huella digitalizada de cada una de las cuatro extremidades (izquierdas, derechas, anteriores y posteriores) mediante algoritmos de reconocimiento de patrones espaciales y temporales (Møller et al., 2020). Las métricas cinéticas clave extraídas incluyen:

- 1. Fuerza Vertical Máxima (PVF / Peak Vertical Force):** Es la magnitud máxima de la fuerza perpendicular ejercida por una extremidad específica contra la superficie de la plataforma durante la fase de apoyo completo de la marcha, expresada de forma estandarizada como un porcentaje del peso corporal total del paciente (%BW) para permitir comparaciones interespecíficas e interraciales válidas (Møller et al., 2020).

2. **Una extremidad con patología articular dolorosa** (como una rotura del ligamento cruzado craneal o una artrosis de codo) mostrará una reducción significativa de la PVF debido al intento del sistema propioceptivo de mitigar la carga nociceptiva.
3. **Impulso Vertical (VI / Vertical Impulse):** Representa la integral de la fuerza vertical en función del tiempo a lo largo de toda la fase de apoyo de la huella (Møller et al., 2020).
4. **El VI cuantifica la cantidad total de energía cinética transferida al suelo por la extremidad.** Un paciente puede compensar una lesión modificando el tiempo de apoyo para mantener una PVF falsamente aceptable; sin embargo, el análisis del VI desvela la disfunción real al reflejar la reducción del área bajo la curva de fuerza debido al acortamiento defensivo de la fase de apoyo del paso claudicante (9).
5. **Variables espaciotemporales de precisión micro-métrica:** El sistema calcula de forma simultánea el tiempo de apoyo (stance time), el tiempo de suspensión (swing time), la longitud exacta del paso, el ancho de la base de sustentación y el Índice de Simetría de la Marcha (SI) (Budsberg & Torres, 2015).

El SI es un indicador matemático puro donde un valor de 1.0 representa una simetría bilateral perfecta entre extremidades homólogas; desviaciones superiores al 5% alertan al especialista en rehabilitación sobre la existencia de fenómenos de sobrecarga mecánica compensatoria en la extremidad contralateral sana, guiando de forma precisa la dosificación del ejercicio terapéutico y la aplicación de modalidades analgésicas biofísicas locales (Møller et al., 2020).

5.2.5. Análisis cinemático por visión de computadora en el entorno doméstico

La digitalización de la marcha ha trascendido los límites físicos del laboratorio hospitalario mediante la aplicación de algoritmos de visión por computadora y estimación de pose humana y animal (*DeepLabCut* / redes de estimación de esqueletos virtuales) aplicados a secuencias de video de alta velocidad (60-240 fps) capturadas de forma periférica por los teléfonos inteligentes de los propietarios en el hogar (Budsberg & Torres, 2015).

Este software de inteligencia artificial reconoce y rastrea de manera automática y sin necesidad de marcadores físicos retroreflectivos tradicionales los centros anatómicos articulares correspondientes al hombro, codo, carpo, cadera, rodilla y tarso a lo largo de los sucesivos fotogramas del video (Budsberg & Torres, 2015). Mapeando las trayectorias vectoriales espaciales de estos puntos de interés, el sistema calcula de forma matemática las curvas de excursión angular dinámica, determinando los rangos máximos de flexión y extensión de cada articulación en tiempo real durante la fase de locomoción activa.

La combinación sinérgica de la actigrafía continua, la baropodometría hospitalaria y la cinemática virtual domiciliaria consolida el ecosistema VET-TECH de monitorización avanzada. Este enfoque devuelve la autonomía médica basada en datos duros e incuestionables, elevando los estándares mundiales del bienestar y la recuperación del paciente veterinario oncológico, geriátrico y crónico complejo (Gasser et al., 2021; Michaux & Tainsky, 2020; Budsberg & Torres, 2015).

De allí, surge la matriz de síntesis de biomarcadores digitales, que integra las variables tecnológicas, fisiológicas y bioestadísticas analizadas en este capítulo para su aplicación en el diseño de protocolos de telemonitoreo avanzados. Estos, no pudieran funcionar cada uno de manera aislada, ya que forman parte de un sistema global, que se integra de todos los métodos analógicos ya conocidos, con los beneficios de la digitalización y el internet de las cosas, que con el avanzar del tiempo trasciende en cada ámbito de la vida humana, entre las que cuenta la medicina veterinaria.

Tabla 5. *Síntesis de biomarcadores digitales y monitoreo IoMT*

Biomarcador Digital	Sensor / Hardware Utilizado	Métrica / Algoritmo Aplicado	Indicador Fisiopatológico Clínico	Rango de Alerta Temprana
Tono Parasimpático Analgésico	Sensor Fotoplétismográfico (PPG) de grado médico en collar/arnés.	RMSSD (ms) del dominio del tiempo; análisis espectral por FFT (Banda HF).	Cuantificación objetiva del dolor agudo postquirúrgico y estrés autonómico.	Caída sostenida >30% del valor basal de RMSSD en reposo.

Estabilidad y Gestión Metabólica	Filamento subcutáneo flexible recubierto con Glucosa Oxidasa.	Tiempo en Rango (TIR), %CV (Coeficiente de Variación), GMI.	Control continuo de insulino-terapia y prevención de cetoacidosis o sepsis.	TIR <70% o %CV >36% (Inestabilidad glucémica severa).
Resiliencia Térmica Circadiana	Termistor NTC de óxido metálico encapsulado e inyectable.	Modelos Cosinor (Mesor, Amplitud, Acrofase).	Detección precoz de procesos infecciosos, SIRS y dehiscencia de suturas.	Aplanamiento de la amplitud circadiana térmica <0.3 °C.
Calidad de Descanso y Confort	Acelerómetro triaxial MEMS de silicio de tres ejes (X, Y, Z).	Activity Counts integrados mediante Redes Neuronales Convolucionales (CNN).	Evaluación del dolor crónico osteoarticular y radiculopatías neuropáticas.	Elevación del Índice de Fragmentación del Sueño (SFI) >25%.
Eficiencia Biomecánica de Marcha	Pasarela baropodométrica digital con matriz capacitiva/resistiva.	Fuerza Vertical Máxima (PVF %BW) e Integral del Impulso Vertical (VI).	Diagnóstico de claudicaciones sutiles y sobrecarga compensatoria articular.	Asimetría bilateral o desviación del Índice de Simetría (SI) >5%.

Nota. Adaptado de (Gasser et al., 2021; Michaux & Tainsky, 2020; Giannetto & Piccione, 2018; Dow Gray et al., 2017; Budsberg & Torres, 2015).

VI



Bioética y sostenibilidad de la práctica veterinaria

CAPÍTULO VI.

BIOÉTICA Y SOSTENIBILIDAD DE LA PRÁCTICA VETERINARIA

Oscar Darwin Criollo Salinas

6.1. Bioética en la era de la inteligencia artificial veterinaria y la salud digital

6.1.1. Introducción y justificación epistemológica

El rápido desarrollo de las tecnologías de la información, el procesamiento masivo de datos (Big Data) y la convergencia de algoritmos de aprendizaje profundo (Deep Learning) han dado inicio a una reconfiguración estructural en el ámbito de las ciencias veterinarias. Históricamente, la práctica de la medicina veterinaria se ha basado en un modelo empírico-deductivo que se centra en la observación clínica directa, la semiología táctil y la experiencia acumulada por el profesional. No obstante, la salud digital actual ha incorporado entidades no humanas en el proceso de toma de decisiones clínicas, lo que ha modificado la organización intelectual y deontológica del acto médico.

Esta transición no constituye simplemente una optimización de carácter instrumental. La implementación de sistemas predictivos, herramientas de visión por computadora para el diagnóstico por imagen y plataformas de telemedicina reconfigura los roles en la tríada veterinario-paciente-tutor. En este contexto, la bioética veterinaria debe avanzar más allá de los enfoques tradicionalmente antropocéntricos o meramente asistenciales, reconociendo la complejidad de la mediación algorítmica.

El análisis de la bioética en el ámbito de la salud digital veterinaria requiere un enfoque normativo riguroso que considere cuatro ejes fundamentales:

1. La redefinición del marco deontológico y la autodeterminación profesional frente a la opacidad algorítmica.
2. Los sesgos sistemáticos en los datos de entrenamiento y las inequidades asistenciales resultantes.

3. El estatuto jurídico-moral de la responsabilidad por praxis cuando la decisión está mediada por modelos generativos o de red neuronal.
4. La reconfiguración del consentimiento informado y la soberanía de los datos biométricos del paciente y su tutor.

1. Transformación del paradigma diagnóstico: Deontología y la opacidad de la "caja negra"

La práctica deontológica tradicional de la veterinaria se fundamenta en la autonomía técnica y en el juicio prudencial del profesional. Este fundamento establece que cada acto diagnóstico o terapéutico debe basarse en un razonamiento causal claro, sustentado en la evidencia científica y en la evaluación presencial del animal. La introducción de modelos de inteligencia artificial en el diagnóstico médico, particularmente en las áreas de radiología, histopatología digital y electrocardiografía automatizada, desafía de manera directa este modelo.

Numerosos algoritmos de formación detallado funcionan a través de arquitecturas multicapa, cuyas transformaciones matemáticas internas resultan inobservables para el ser humano y solo pueden ser interpretadas en términos de distribuciones de probabilidad. Este fenómeno, conocido como el "problema de la caja negra", presenta un dilema ético conceptual: la delegación de la interpretación clínica en un sistema cuyo proceso interno no es susceptible de auditoría.

Según lo señalado por Casado y de Lora (2020), la integración de nuevas tecnologías en el trato con los animales demanda una normativa deontológica consolidada que prevenga la cosificación del paciente y que impida que las herramientas instrumentales desplacen el deber moral del ser humano. Cuando un profesional acepta un diagnóstico producido por un sistema automatizado sin cuestionarlo, incurre en una manifestación de dominio tecnológico o en obediencia algorítmica.

La deontología de la medicina veterinaria establece que la utilización de cualquier herramienta de inteligencia artificial debe ser entendida exclusivamente como un sistema de apoyo a la

decisión clínica (Clinical Decision Support System, CDSS), preservando la capacidad del profesional para validar, refutar o matizar los resultados generados por el algoritmo. La asignación innecesaria debilita el deber de cuidado y vulnera el principio de no maleficencia al exponer al paciente a fallos sistemáticos que no han sido previstos por el software.

2. Sesgos algorítmicos, representatividad y equidad en la salud animal

Los algoritmos de aprendizaje automático no son entidades neutrales; representan traducciones matemáticas de los datos con los cuales fueron entrenados. Si los datos de entrenamiento contienen sesgos de origen, el modelo obtenido no solo repetirá dichas anomalías, sino que las incrementará de manera sistemática.

En el ámbito de la medicina veterinaria, este problema adquiere una dimensión ética específica debido a la diversidad de especies, razas y condiciones zootécnicas. Mendoza y Rodríguez (2021) han llevado a cabo un estudio exhaustivo sobre el impacto del sesgo de datos y la equidad en el desarrollo de modelos predictivos en el campo de la salud animal. Los autores evidencian que la mayor parte de las bases de datos biométricas empleadas para el entrenamiento de algoritmos se originan en centros de referencia universitarios o en hospitales privados de elevado nivel socioeconómico.

Esta concentración genera múltiples sesgos de representatividad:

- **Sesgo de raza y fenotipo:** Un software diseñado con el fin de detectar cardiopatías, que ha sido entrenado principalmente con electrocardiogramas de razas caninas puras o de tamaño mediano a grande, presentará tasas de error considerablemente más elevadas al evaluar especies felinas, exóticas o híbridos de felinos y caninos.
- **Sesgo geográfico y epidemiológico:** Los modelos desarrollados en el hemisferio norte para la predicción de dermatopatías o enfermedades transmitidas por agentes pierden su validez al ser aplicados en regiones tropicales o neotropicales, donde la incidencia de patógenos presenta diferencias significativas.

- **Sesgo económico:** La optimización de modelos orientados a protocolos diagnósticos de alto costo genera un sesgo que afecta negativamente a las clínicas con recursos limitados, así como al sector de la veterinaria comunitaria y a los albergues.

Desde la perspectiva de la bioética de la equidad, Mendoza y Rodríguez (2021) argumentan que la insuficiente diversidad en los datos de entrenamiento da lugar a una discriminación algorítmica que compromete la justicia distributiva en el ámbito de la atención veterinaria. La garantía de la equidad en la salud digital requiere la implementación de protocolos de gobernanza de datos. Esto implica que las empresas desarrolladoras deben declarar la composición, el origen y las limitaciones de las poblaciones empleadas en la fase de entrenamiento de sus modelos.

3. Responsabilidad legal y atribución de la mala praxis en entornos algorítmicos

Uno de los aspectos más debatidos en el ámbito ético y jurídico se centra en la identificación de la responsabilidad civil y penal en aquellos casos en los que una decisión mediada por inteligencia artificial resulta en un desenlace perjudicial para la salud o la vida de un animal. La estructura jurídica tradicional establece la responsabilidad profesional fundamentada en el marco legal particular, atribuyendo la culpa o negligencia al individuo que lleva a cabo el acto médico.

González y Pérez (2022) realizan un análisis exhaustivo de las implicaciones legales y deontológicas de la inteligencia artificial en el ámbito de la práctica veterinaria. Su investigación concluye que la aparición de la inteligencia artificial no exime al profesional de su responsabilidad legal en relación con el bienestar y la salud del paciente. Si un algoritmo de inteligencia artificial no detecta la presencia de una torsión gástrica en una radiografía abdominal o indica una dosis incorrecta de un fármaco anestésico, el médico veterinario no podrá justificar la falla del software como una exención de responsabilidad.

No obstante, González y Pérez (2022) sostienen que estamos en una etapa de transición hacia un modelo de responsabilidad compartida o distribuida. Este esquema comprende tres esferas:

Tabla 6. *Esferas del modelo de responsabilidad compartida*

Esfera de Responsabilidad	Agente Involucrado	Naturaleza de la Obligación Legal y Ética
Directa / Asistencial	Médico Veterinario	Deber de supervisión, validación clínica y aplicación prudente de la recomendación del software.
Corporativa / Técnica	Desarrolladores y Proveedores de Software	Garantizar la trazabilidad, seguridad del algoritmo, actualización continua y marcado de certificaciones sanitarias.
Institucional / Hospitalaria	Centros y Hospitales Veterinarios	Proporcionar infraestructura tecnológica idónea, capacitación al personal y protocolos de ciberseguridad.

Nota. Adaptado de (González & Pérez, 2022)

En un análisis más detallado de este enfoque, Sánchez-López y Fernández (2023) llevan a cabo una revisión ética y jurídica sobre la toma de resoluciones clínicas que son asistidas por algoritmos. Se señala que la falta de un marco legal específico para los dispositivos médicos veterinarios basados en inteligencia artificial da lugar a una situación de incertidumbre jurídica.

A diferencia de la medicina humana, en la cual organismos como la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) y la Agencia Europea de Medicamentos (EMA) establecen rigurosas fases de ensayos clínicos antes de la comercialización de algoritmos diagnósticos, en el ámbito veterinario la introducción de software en el mercado se lleva a cabo con una supervisión gubernamental limitada.

Sánchez-López y Fernández (2023) argumentan que la ética profesional requiere la adopción del principio de precaución. En este sentido, el veterinario tiene la obligación de conocer las limitaciones técnicas de las plataformas digitales que utiliza y de rechazar aquellas que no

presenten evidencia científica publicada respecto a su sensibilidad, particularidad y márgenes de error en situaciones reales de campo.

4. Consentimiento informado digital, autonomía del tutor y gobernanza de datos biométricos

El proceso de digitalización de las historias clínicas, la ampliación de los documentos digitales centralizados y la recolección continua de datos biométricos mediante dispositivos portátiles han transformado el manejo de los datos en las clínicas de animales pequeños y grandes. Este conjunto de datos constituye la materia prima esencial para el desarrollo de modernos modelos de predicción.

En este contexto, Vásquez y Silva (2021) han llevado a cabo un análisis de las transformaciones relacionadas con el consentimiento informado digital y la privacidad de los datos biométricos en el ámbito de la clínica veterinaria. El consentimiento informado ha evolucionado de ser un simple procedimiento administrativo para convertirse en una manifestación formal del respeto por la autonomía del administrador y de la protección del paciente animal.

El análisis de Vásquez y Silva (2021) identifica tres retos éticos mayores en la gestión de datos digitales:

- 1. Comprensión real de la intervención algorítmica:** El cuidador debe ser informado explícitamente si el diagnóstico o la planificación quirúrgica de su animal dependerá del análisis automatizado de un algoritmo de IA.
- 2. Propiedad y destino de los datos biométricos:** Existe una ambigüedad ética sobre a quién pertenecen los datos generados por tomografías, radiografías o monitores de frecuencia cardíaca. Las empresas de software suelen incluir cláusulas de cesión de datos en los contratos de licencia, permitiendo el uso secundario de la información del paciente sin el consentimiento explícito del cuidador.
- 3. Privacidad cruzada y datos sensibles:** Los datos biométricos de los animales de compañía están asociados de forma unívoca a la identidad, dirección, rutinas y capacidad

económica de sus cuidadores. Una brecha de seguridad en los servidores de una plataforma de telemedicina no solo compromete el historial clínico del paciente, sino que expone información personal sensible de los seres humanos a su cargo.

Vásquez y Silva (2021) sugieren que los centros veterinarios deben implementar esquemas de consentimiento informado que sean dinámicos y granulares. Bajo este modelo, el cuidador mantiene el derecho de autorizar el uso de los datos de su mascota exclusivamente para fines médicos. Asimismo, tiene la facultad de rechazar de manera independiente la cesión de dichos datos para el entrenamiento de software comercial o la mejora de algoritmos de terceros.

4. Hacia una Bioética Digital Algorítmica en Medicina Veterinaria

La unificación de las investigaciones examinadas permite afirmar que la bioética en la era de la inteligencia artificial en el ámbito veterinario no puede limitarse a una simple implementación de las ideas principistas, tales como la beneficencia, la no maleficencia, la autonomía y la justicia. Es necesario desarrollar una Bioética Digital Algorítmica que se ajuste a las especificidades de la medicina veterinaria.

Esta nueva disciplina debe construirse sobre los siguientes cimientos epistémicos y morales:

- **Inseparabilidad de la tríada bioética:** La evaluación del efecto algorítmico debe contemplar de manera simultánea el bienestar físico y emocional del paciente animal, el respeto a los derechos y la intimidad del cuidador humano, así como la protección de la autonomía profesional del médico veterinario.
- **Auditoría e inteligibilidad requerida:** No se debe permitir la implementación de herramientas automatizadas en entornos clínicos que no cumplan con los estándares mínimos de "IA explicable" (Explainable AI, XAI). El profesional debe contar con mapas de atención o indicadores relevantes que le permitan comprender los elementos específicos de la imagen o del dato biológico en los cuales se fundamenta la recomendación del dispositivo.

- **Integración del enfoque "Una Sola Salud" (*One Health*):** Los sistemas de salud digital deben ser revisados en función de su efectividad médica, su impacto ambiental, específicamente en relación con el consumo energético de los centros de procesamiento, y su contribución a la salud pública. Es fundamental evitar que la tecnología intensiva en soporte digital genere fallos en la disponibilidad global de los servicios sanitarios.

La salud digital veterinaria constituye un avance significativo en el ámbito de la medicina animal. Sin embargo, como han señalado de manera sistemática la doctrina deontológica y la filosofía del derecho modernas, el avance tecnológico solo se convierte en un verdadero progreso cuando se encuentra orientado por un marco bioético sólido, transparente y profundamente humano.

El médico veterinario del siglo XXI no debe temer a la tecnología, sin embargo, tampoco debe permitir que su juicio clínico se vea condicionado a la objetividad del algoritmo. Su deber deontológico ineludible consiste en desempeñar el papel de salvaguarda ética que asegura que la tecnología se mantenga siempre al servicio de la vida, la salud y la dignidad del paciente animal.

BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Seida, A. (2024). Veterinary telemedicine: A new era for animal welfare. *Veterinary World*, 457–463.
- Academia Colombiana de Ciencias Veterinarias (ACCV). (2026). *Órgano de divulgación de la Academia Colombiana de Ciencias Veterinarias*. ACCV.
- Aeffner et al. (2019). Introduction to digital image analysis in whole-slide imaging: A guide for veterinary pathologists. *Veterinary Pathology*, 9–25.
- Aeffner et al. (2019). Introduction to Digital Pathology in Veterinary Medicine. *Veterinary Pathology*, 1040-1054.
- Álvarez, F., & Benítez, K. (2022). Análisis cinemático y dinámico de la marcha mediante plataformas de presión y visión artificial en perros. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú (RIVEP)*, e21890.
- Alvarez, H. (2023). Mecanismos celulares de la fotobiomodulación sobre la regeneración tisular y analgesia en pequeñas especies. *Revista de Neurología y Ortopedia Veterinaria*, 30-44.
- American Veterinary Medical Association. (2021). *Veterinary telehealth: The basics*. AVMA.
- Arciniegas, L., & Orozco, H. (2024). Propuesta para la gestión eficiente de inventarios para el abastecimiento de medicamentos aplicando herramientas tecnológicas y Lean Healthcare en una clínica de alta complejidad en la ciudad de Popayán. *Publicaciones e Investigación*.
- Argilés et al. (2006). Fisiopatología de la caquexia neoplásica. *Nutrición Hospitalaria*, 4-9.
- Argyle et al. (2020). 2 - Tumor Biology and Metastasis. In W. Saunders, *Withrow and MacEwen's Small Animal Clinical Oncology (Sixth Edition)* (pp. 36-60). Doody's Core Titles.

- Aswad et al. (2025). High CBD extract (CBD-X) modulates inflammation and immune cell activity in rheumatoid arthritis. *Front Immunol*, 1599109.
- Atlas de Citología Clínica del Perro y del Gato. (2020). *Guía práctica de diagnóstico morfológico microscópico*. Editorial Berri. Retrieved from <https://www.berri.es/pdf/ATLAS%20DE%20CITOLOGIA%20CLINICA%20DEL%20PERRO%20Y%20DEL%20GATO/9788418706684> (<https://www.berri.es/pdf/ATLAS%20DE%20CITOLOGIA%20CLINICA%20DEL%20PERRO%20Y%20DEL%20GATO/9788418706684>)
- Avilés, R., & Soria, L. (2025). Avances tecnológicos en la medicina veterinaria: Un análisis bibliométrico. *Revista Ecuatoriana de Ciencia Animal*, 112–128.
- Balsa, M., & Smith, J. (2024). Machine learning applications in small animal internal medicine: A systematic review of predictive diagnostic models. *Journal of Veterinary Internal Medicine*, 812–825.
- Banzato et al. (2021). Automatic classification of canine thoracic radiographs using deep convolutional neural networks. *Veterinary Radiology & Ultrasound*, 308–316.
- Bertram et al. (2020). Computerized mitigation of intra- and interobserver variability in mitotic count in canine mast cell tumors. *Veterinary Pathology*, 765–773.
- Blanco, J. (2021). *Fisiología celular y regulación biológica en pequeños animales*. Editorial Grassi.
- Bragg et al. (2015). White coat effect and sympathetic neurovegetative reactivity during routine physical examination in dogs and cats. *J Am Vet Med Assoc*, 612-619.
- Budsberg, S., & Torres, B. (2015). Quantitative gait analysis in canine orthopedics: cinematic and kinetic principles for objective clinical trials. *Vet Clin North Am Small Anim Pract*, 97-112.
- Buitrago, C. (2025). El impacto de la transformación digital en una clínica veterinaria. *Revista Balto*, 18–29.

- Burti et al. (2020). Use of deep learning in veterinary imaging: A review. *Veterinary Sciences*, 135.
- Cabezas, A. (2021). Metodología para la integración de registros clínicos e interoperabilidad en sistemas de información veterinarios. *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias - UNR*, 101–114.
- Carbajal, A. (2020). *Fitoterapia veterinaria basada en la evidencia: Principios activos y aplicaciones en oncología*. Editorial Inter-Médica.
- Carvajal, A. (2026). *Publicación: Manual integral orientado al manejo de la hospitalización y los cuidados básicos del paciente, como estrategia para el fortalecimiento y mejora continua de la atención en la Clínica Veterinaria Novavet en Cajicá*. Tesis de pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia.
- Casado, M., & de Lora, P. (2020). Bioética, derecho y animales: la necesidad de un marco deontológico unificado frente a los avances tecnológicos. *Revista de Bioética y Derecho*, 15-32.
- Castro, H., & Ortiz, S. (2023). Telemonitoreo de pacientes críticos y postquirúrgicos mediante biomarcadores digitales. *Cuidados Intensivos Veterinarios*, 18-31.
- Ceballos, F. (2020). *Modulación endocannabinoide en la osteoartritis y epilepsia refractaria en pequeños animales*. Editorial Inter-Médica.
- Chu et al. (2024). ChatGPT in veterinary medicine: A practical guidance of applications and precautions. *Frontiers in Veterinary Science*, 11.
- Corradini et al. (2016). Accuracy of a continuous glucose monitoring system in dogs and cats with diabetic ketoacidosis and critical illness. *J Vet Intern Med*, 981-988.
- Del Portal, J. (2021). *Desarrollo e implementación de un modelo de historia clínica electrónica interoperable bajo estándares HL7 en medicina veterinaria*. Tesis doctoral, Universidad de La Rioja.
- Delgado, D. (2020). *Fitoterapia en la acuicultura, una mirada global desde la zootecnia*. Boyacá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD .

- Dismed. (2026, Enero 1). *Señalización NF-κB en procesos inflamatorios y cáncer: vías clave y moléculas moduladoras*. Retrieved from <https://dismed.es/blog/senalizacion-nf-%CE%BAb-en-procesos-inflamatorios-y-cancer-vias-clave-y-moleculas-moduladoras/>
- Dow Gray et al. (2017). Validation of a collar-mounted triaxial accelerometer (Actigraph) for characterization of behavior and activity counts in canines. *Am J Vet Res*, 284-292.
- Falcón, B., & Falcón, R. (2024). Fitoquímica de la *Camellia sinensis* o té verde: una actualidad. *Kiru*, 71-76.
- Farahani et al. (2015). Whole slide imaging in pathology: Advantages, limitations, and emerging applications. *Pathology and Laboratory Medicine International*, 23–33.
- Fascetti, A., & Delaney, S. (2021). *Nutrición clínica en perros y gatos*. Editorial Servet.
- Flatland, B., & Freeman, K. (2020). ASVCP guidelines for quality assurance in veterinary clinical pathology laboratories. *Veterinary Clinical Pathology*, 12-28.
- García et al. (2012). *Fisiología veterinaria*. Editorial Médica Panamericana.
- García, M. (2023). Efecto sinérgico de extractos botánicos estandarizados junto a quimioterapéuticos convencionales en pacientes caninos. *Revista de Oncología Veterinaria*, 15-30.
- García, M., & Soler, F. (2021). Sistema endocannabinoide y cannabidiol en el manejo del dolor en perros: revisión narrativa. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 791-804.
- Gasser et al. (2021). The internet of medical veterinary things (IoMT): how wearable sensors are transforming post-operative care and monitoring. *J Vet Clin Sci*, 104-115.
- Giannetto, C., & Piccione, G. (2018). Circadian rhythms of subcutaneous and core body temperature in dogs and cats: monitoring homeostatic alterations via implantable bio-sensors. *J Thermal Biol*, 231-238.

- Giménez, M. (2021). Uso de la actigrafía acelerométrica en la evaluación cuantitativa del bienestar y dolor osteoarticular. *Archivos de Zootecnia*, 45-56.
- Girod, M., & Vap, L. (2022). Advances in Automated Hematology Analyzers for Domestic Animals. *Clinics in Laboratory Medicine*, 415-430.
- Gómez, D., & Mazuera, M. (2024). Sensores inteligentes y técnicas de machine learning para la detección del estrés en ganado bovino: Revisión sistemática. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, e294177802.
- Gomez, J., & Torres, L. (2023). Eficacia del ozono médico como coadyuvante en cicatrización y manejo de heridas complejos en caninos. *Cirugía Veterinaria*, 95-108.
- Gómez, R., & Pérez, M. (2021). Sistemas de información e historia clínica digital en la gestión ganadera y veterinaria: Un enfoque analítico. *Revista Científica, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad del Zulia*, 88–96.
- González, J., & Pérez, J. (2022). Inteligencia artificial y responsabilidad profesional en la medicina veterinaria: implicaciones legales y deontológicas. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Veterinarias*, 45-56.
- Goyal et al. (2019). Rapid on-site evaluation (ROSE) in the era of digital pathology and telepathology. *Journal of the American Society of Cytopathology*, 277–286.
- Hafner, M., & Dietert, K. (2021). Time in range (TIR) and glycemic variability quantified via continuous interstitial glucose monitoring in feline diabetes mellitus. *J Feline Med Surg*, 712-722.
- Halachmi et al. (2025). Precision livestock farming technology and Internet of Veterinary Things. In A. Chandra, *Progress in Molecular Biology and Translational Science* (pp. 145–182). Academic Press.
- Hand et al. (2010). *Small animal clinical nutrition (5th ed.)*. Mark Morris Institute.

- Hansen, B., & Lascelles, B. (2013). Quantitative assessment of activity and sleep fragmentation using three-dimensional accelerometry in dogs with osteoarthritis pain. *Vet J*, 155-161.
- Hernández, M., & Ramírez, P. (2025). Inteligencia artificial explicable (XAI) en el diagnóstico de enfermedades crónicas en felinos: Un enfoque de soporte a la decisión médica. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, e31024.
- Karsch, C., & University of Veterinary Medicine Hannover Research Group. (2026). SWOT analysis on veterinary telemedicine from pet owner and expert perspectives: A mixed-methods survey and interview study in Germany. *Frontiers in Veterinary Science*.
- Klein, B. (2020). *Cunningham. Fisiología veterinaria (6.ª ed.)*. Elsevier Health Sciences.
- Lafuente, M. (2025). IA en la Veterinaria de Pequeños Animales: del presente al futuro. *Clin Vet Peq Anim*, 45(2).
- Landa, A., & Guzmán, P. (2021). *El sistema endocannabinoide en animales de compañía: Fisiología y uso clínico del cannabidiol (CBD)*. Editorial Servet.
- Lippolis et al. (2022). Artificial intelligence applications for the automated detection of blood and tissue parasites in veterinary clinical pathology: A review. *Veterinary Clinical Pathology*, 312–324.
- López, C., & Fernández, R. (2021). *Laserterapia de alta potencia (Clase IV) en fisioterapia y rehabilitación veterinaria*. Editorial Servet.
- López, P., & Benítez, E. (2023). Biomarcadores digitales de variabilidad del ritmo cardíaco en el seguimiento del dolor agudo. *Revista de Cuidados Críticos Animales*, 75-88.
- Martín et al. (2016). Matriz extracelular y sistema de gran regulación: Su papel en la respuesta inflamatoria e inmunológica. *Revista Médica de la Universidad Nacional de Cuyo*, 45-58.
- Martínez, E., & Vargas, F. (2023). Aplicación de tecnologías IoT en la ganadería de precisión y su impacto en la productividad. *Ciencia y Agricultura*, 45–61.

- Martínez, L. (2020). *Biomecánica veterinaria y análisis biomecánico asistido por computador*. Editorial Universidad de Córdoba.
- Martínez, L., & Silva, E. (2022). Gobernanza de datos, ciberseguridad e interoperabilidad en el sector de la salud animal. *Gaceta Médica de Caracas*, S340–S352.
- Martínez, M., & Torres, L. (2024). Regulación del dolor oncológico crónico mediante estimulación por campos electromagnéticos pulsados (magnetoterapia) en perros. *Archivos de Medicina Veterinaria*, 89-98.
- Massoco et al. (2020). Telepathology in veterinary medicine: Current status and future perspectives. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 501–509.
- McEvoy, F., & Amberger, C. (2021). Artificial intelligence in veterinary diagnostic imaging: Current status and future perspectives. *Veterinary Radiology & Ultrasound*, 834–842.
- Mendoza, E., & Ramírez, G. (2022). Fitoterapéuticos en la modulación del microambiente tumoral en pequeños animales. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 210-225.
- Mendoza, L., & Rodríguez, M. (2021). Sesgo de datos y equidad en el desarrollo de modelos predictivos aplicados a la salud animal. *Isegoría: Revista de Filosofía Moral y Política*, e18.
- Menéndez, S. (2021). *Propiedades biológicas y aplicaciones médicas del ozono en la patología inflamatoria e infecciosa*. Editorial Científico-Técnica.
- Meyer, D., & Harvey, J. (2004). *Veterinary laboratory medicine: Interpretation and diagnosis* (3rd ed.). Saunders.
- Michaux, J., & Tainsky, M. (2020). Digital biomarkers in veterinary medicine: objective quantification of pain, stress, and physiological status through wearable technology. *Front Vet Sci*, 582.
- Millis, D., & Levine, D. (2020). *Rehabilitación física y fisioterapia en perros* (2.ª ed.). Editorial Inter-Médica.

- Møller et al. (2020). Kinetic gait analysis in healthy dogs and dogs with osteoarthritis: An evaluation of precision and overlap performance of a pressure-sensitive walkway and the use of symmetry indices. *PLoS One*, e0243819.
- Mora, A. (2023). Homeostasis, matriz extracelular y sistemas de regulación biológica en la inflamación crónica. *Archivos de Medicina Veterinaria*, 200-215.
- National Center for Biotechnology Information (NCBI). (2000). Complementary and alternative veterinary medicine / Integrative approaches. *PubMed*, 10844963.
- Neal et al. (2025). Artificial Intelligence in Veterinary Clinical Pathology-An Introduction and Review. 2025, S13-S29.
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2021). *El enfoque «Una sola salud» (One Health): Intersección entre la salud humana, animal y ambiental*. Organización Mundial de la Salud.
- Pantanowitz et al. (2011). Review of the current state of whole slide imaging in pathology. *Journal of Pathology Informatics*, 36.
- Pavlov, V., & Tracey, K. (2005). The cholinergic anti-inflammatory pathway: An update. *Journal of Internal Medicine*, 433–442.
- Pérez, L., & Silva, H. (2022). Bionutrición clínica y moduladores inmunometabólicos en patologías crónicas veterinarias. *Nutrición Clínica Animal*, 77-91.
- Pérez, O., & Cordero, M. (2022). Ozonoterapia por insuflación rectal e intraperitoneal: Evaluación de la seguridad y el estrés oxidativo en un modelo animal. *Revista de Salud Animal*, 1-11.
- Pérez, R. (2022). Farmacocinética y seguridad del uso de cannabinoides en la especie canina y felina. *Revista de Farmacología Veterinaria*, 85-98.
- Pischinger, A. (2007). *The extracellular matrix and ground regulation: Basis for a holistic biological medicine*. North Atlantic Books.

- Plaza, J., & Villalba, L. (2023). Aplicación de la fotobiomodulación (Láser de Clase IV) en el control del dolor crónico osteoarticular y neuropático en caninos. *Revista de Medicina Veterinaria (Bogotá)*, 45-59.
- Portal Animal's Health. (2026). *¿En qué punto está el uso de la IA en la medicina veterinaria?* Retrieved from <https://www.animalshealth.es/empresas/en-que-punto-esta-uso-ia-inteligencia-artificial-medicina-veterinaria>
- Raskin, R., & Meyer, D. (2016). *Canine and feline cytology: A color atlas and interpretation guide (3rd ed.)*. Elsevier Health Sciences.
- Raskin, R., & Meyer, D. (2023). *Canine and Feline Cytopathology: A Color Atlas and Interpretation Guide (4th ed.)*. Elsevier Health Sciences.
- Ríos, D. (2022). Ozonoterapia y estrés oxidativo en la medicina veterinaria integrativa. *Revista de Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 301-315.
- Ríos, T. (2022). Integración de paradigmas médicos en la práctica clínica veterinaria contemporánea. *Revista de Bioética y Salud Animal*, 140-155.
- Rivas, J., & Osorio, H. (2023). Aplicación de arquitecturas Big Data en la vigilancia epidemiológica veterinaria y salud pública. *eSprint Investigación*, 45-58.
- Romero, C., & Suárez, V. (2023). Acelerometría triaxial para la cuantificación objetiva del ejercicio y patrones de descanso en perros seniles. *Revista de Etología y Bienestar Animal*, 120-134.
- Royal College of Veterinary Surgeons. (2023). *RCVS Council approves new guidance on "under care" and 24/7 cover*. RCVS.
- Sánchez et al. (2021). *Principios básicos del bienestar, sanidad y etología animal*. Ediciones Universidad.
- Sánchez et al. (2023). Uso de fitocannabinoides en el manejo del dolor crónico y sintomatología oncológica en perros y gatos. *Archivos de Medicina Veterinaria*, 112-126.

- Sánchez, A. (2021). *Principios básicos del bienestar, sanidad y etología animal*. Ediciones Universidad.
- Sánchez, A., & Fernández, R. (2023). La toma de decisiones clínicas asistida por algoritmos en veterinaria: una revisión ético-jurídica. *Dilemata: Revista Internacional de Éticas Aplicadas*, 89-104.
- Santamaría, R. (2021). *Monitorización continua de constantes vitales mediante biotelemedicina en la UCI veterinaria*. Editorial Médica Panamericana.
- Schoen, A. (2020). *Medicina veterinaria complementaria e alternativa: Una guía basada en la evidencia*. Elsevier Health Sciences.
- Schwartz, A., & Martínez, G. (2020). *Manual de ozonoterapia clínica veterinaria*. Editorial AEPROMO.
- Siqueira, R. (2021). Efecto clínico de la ozonoterapia como tratamiento complementario en patologías inflamatorias y crónicas. *Revista Española de Ozonoterapia*, 125-138.
- Solano et al. (2011). LeishVet guidelines for the practical management of canine leishmaniasis. *Parasites & Vectors*, 1–16.
- Stockham, S., & Scott, M. (2008). *Fundamentals of veterinary clinical pathology (2nd ed.)*. Blackwell Publishing.
- Stone, E. (2018). Práctica basada en la evidencia y fundamentos bioéticos. *Revista Uruguaya de Enfermería*, 18-30.
- Thrall et al. (2012). *Veterinary hematology and clinical chemistry (2nd ed.)*. Wiley-Blackwell.
- Tizhoosh, H., & Pantanowitz, L. (2018). Artificial intelligence and digital pathology: Challenges and opportunities. *Journal of Pathology Informatics*, 38.
- Torres, M. (2022). Agentes físicos en el control del dolor ortopédico y neurológico: Fotobiomodulación y campos electromagnéticos pulsados. *Revista de Rehabilitación Veterinaria*, 40-55.

- Valenzuela et al. (2022). Transmisión de datos fisiológicos en tiempo real y alertas tempranas en la hospitalización veterinaria. *Veterinaria México OA*, 1-14.
- Vargas, M., & Morales, G. (2020). Bases epistemológicas y evidencia científica en la medicina veterinaria complementaria e integrativa. *Revista de Medicina Veterinaria e Zootecnia*, 88-102.
- Vásquez, E., & Silva, C. (2021). Consentimiento informado digital y privacidad de datos biométricos en la clínica de pequeños animales. *Revista MVZ Córdoba*, e2245.
- Villalobos et al. (2025). *Manual de hematología y química clínica en medicina veterinaria*. Costa Rica: EUNA. Retrieved from <https://euna.una.ac.cr/index.php/EUNA/catalog/book/458>
- Villiers, E., & Blackwood, L. (2005). *BSAVA manual of canine and feline clinical pathology (2nd ed.)*. British Small Animal Veterinary Association.
- Weiser, G. (2012). Laboratory technology for veterinary medicine. In T. e. al., *Veterinary hematology and clinical chemistry (2nd ed.)* (pp. 3–24). Wiley-Blackwell.
- World Organization for Animal Health. (2021). *Leveraging technology to support Veterinary Services (Annual Report 2021)*. WOAHA.
- Wu et al. (2024). The Tricarboxylic Acid Cycle Metabolites for Cancer: Friend or Enemy. *Research*. <https://doi.org/10.34133/research.0351>
- Wynn, S., & Fougère, B. (2021). *Medicina herbal veterinaria: Principios y práctica clínica*. Editorial Elsevier España.
- Zarella et al. (2019). A practical guide to whole slide imaging for pathology. *Archives of Pathology & Laboratory Medicine*, 222–234.



ISBN: 978-9942-609-82-3



9 789942 609823