

ISBN: 978-9942-609-71-7

VET-TECH:

La Revolución de la Medicina Veterinaria
INTEGRATIVA y DIGITAL


BNARIO
Editorial



AUTORES

Gabriela Mercedes Ordóñez Andrade, Byron Enrique Borja Caicedo,
Julio César Bravo Brito y Edison Macgyver Barragán Taco.

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:

978-9942-609-71-7

1era. Edición mayo 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>





AUTORES

Gabriela Mercedes Ordóñez Andrade

Byron Enrique Borja Caicedo

Julio César Bravo Brito

Edison Macgyver Barragán Taco

La medicina veterinaria, como prácticamente todos los ámbitos de actividad humana y, sobre todo profesional, hoy se encuentra en un punto de inflexión al converger con la innovación digital. Esta ya no es una promesa futurista. Ya es una realidad ineludible, ante la cual cabe aprender, integrarse y desarrollar la creatividad y las competencias digitales indispensables para aprovechar los beneficios de la revolución tecnológica en curso vertiginoso, en todo el mundo.

Este libro que lleva por título “**VET-TECH: La Revolución de la Medicina Veterinaria Integrativa y Digital**”, aparece como un valioso recurso, tanto para los estudiantes, como para los profesionales que buscan actualizarse para poder comprender el presente del sector, e incluso asumir el liderazgo de la transformación. En estas páginas se aborda una transformación profunda determinada por las innovaciones tecnológicas que, en forma vertiginosa, han cambiado los protocolos de diagnóstico y tratamiento, al tiempo que se elevan la precisión y la eficiencia de una manera inédita en la práctica veterinaria.

Además, se desarrolla un conjunto de asuntos decisivos como los cambios producidos por la introducción en la práctica veterinaria, de la Inteligencia Artificial (IA) y los dispositivos de Internet de las Cosas, el diagnóstico predictivo, la forma de aprovechar los algoritmos de *deep learning* que son prácticamente la ampliación de las capacidades humanas. Todas estas herramientas, al optimizar el análisis de imágenes radiológicas y patológicas, e incluso las genéticas, permiten, entre otras cosas, una detección temprana de enfermedades que, hasta hace poco, pasaban inadvertidas en sus estadios iniciales. Ello se viabiliza también con las posibilidades del auge de la telemedicina y la monitorización remota, donde el uso de dispositivos *wearables* y la conectividad global garantizan un seguimiento constante del paciente crónico o post-quirúrgico, optimizando simultáneamente los recursos operativos de los centros veterinarios.

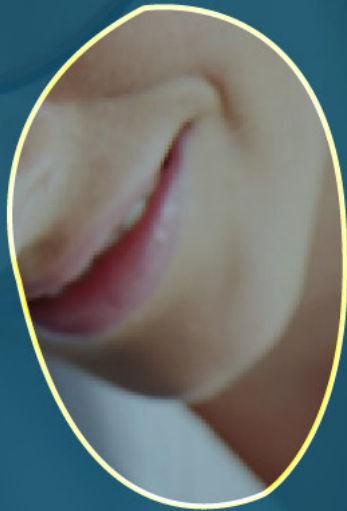
En este libro se expone no solo los aspectos técnicos, sino que va más allá, al profundizar los espacios de conocimientos entre la biotecnología y la medicina personalizada. Se puede leer aquí algunos aspectos del nuevo mundo de posibilidades que abren campos novedosos como la edición genética y la bioimpresión 3D de tejidos, operaciones con las cuales se puede

diseñar los tratamientos de acuerdo a las peculiaridades de cada paciente individual. Al lado de la presentación del adelanto técnico, se explica también las consecuencias e implicaciones éticas de estas innovaciones.

La obra invita a cuestionar el impacto de la automatización en el bienestar animal y a establecer límites claros en la manipulación biotecnológica, bajo la firme convicción de que la tecnología es un medio, y nunca un fin, para el alivio del sufrimiento animal.

Por eso invitamos al estudiante en formación, este volumen representa una ventaja competitiva esencial en un mercado laboral digitalizado; al profesional activo, para quien esta lectura puede convertirse una guía estratégica para mejorar la rentabilidad clínica y la fidelización del cliente mediante la excelencia diagnóstica.

En resumen, **Veterinaria 4.0** es una invitación a trascender los métodos convencionales y abrazar una ciencia más humana, rápida y exacta. Es, en esencia, la lectura obligatoria para quienes están listos para dar el salto hacia la medicina del mañana con responsabilidad y visión de vanguardia.



AUTORES



GABRIELA MERCEDES ORDÓÑEZ ANDRADE

Doctor en Medicina Veterinaria y Zootecnia

gordonez7546@upse.edu.ec

Universidad Estatal Península de Santa Elena

Docente con grado de Doctor Médico Veterinario Zootecnista con formación avanzada en Agroecología, Ambiente y Reproducción Animal. Cuenta con experiencia académica, investigativa y técnica en salud, manejo y bienestar animal. Actualmente desarrolla su formación doctoral en Ciencias Agropecuarias. Su línea de investigación se orienta al estudio de sistemas productivos caprinos, sanidad animal y epidemiología. Su perfil integra compromiso profesional, enfoque científico y vocación por aprender, enseñar y aportar al desarrollo agropecuario.



BYRON ENRIQUE BORJA CAICEDO

Médico Veterinario Zootecnista

enrique.borja@esPOCH.edu.ec / basseteandokennel@hotmail.com

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)

Médico Veterinario Zootecnista con sólida formación académica y experiencia en salud animal, salud pública y docencia universitaria. Posee una Maestría en Zoonosis y One Health (Una Sola Salud) obtenida en la Universitat Autònoma de Barcelona, con enfoque en la interacción entre la salud animal, humana y ambiental. Ha desarrollado experiencia profesional en centros de faenamiento en áreas de inspección sanitaria, inocuidad alimentaria y control epidemiológico, además de una destacada trayectoria docente en institutos tecnológicos y universidades, impartiendo asignaturas como Zoonosis, Epidemiología, Parasitología, Enfermedades Parasitarias, Fisiología y Anatomía Patológica. Actualmente se desempeña como docente en la carrera de Medicina Veterinaria de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, contribuyendo a la formación de profesionales con enfoque en investigación, salud pública y bienestar animal.



JULIO CÉSAR BRAVO BRITO

Médico Veterinario Zootecnista

cesar.bravo@esPOCH.edu.ec / juliobravobrito@outlook.com

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)

Formación académica como Médico Veterinario Zootecnista, Magíster en Ciencias Veterinarias, su trayectoria incluye experiencia en Agrocalidad, control sanitario en centros de faenamiento de especies mayores y aves, centros de rescate y esterilización de animales de compañía y atención clínica en consultorio veterinario privado. Además, ejerce como director del Centro Médico El Labrador. Su desempeño profesional abarca tanto la clínica de especies domésticas como el trabajo de campo con especies de producción, transmitiendo siempre respeto por la naturaleza y priorizando el bienestar animal mediante la aplicación de buenas prácticas veterinarias. Actualmente se desempeña como docente impartiendo asignaturas de odontología veterinaria, patología y cirugía de la reproducción y anatomía patológica.



EDISON MACGYVER BARRAGÁN TACO

Médico Veterinario Zootecnista

edisonmacbt19@hotmail.com

Universidad Estatal Península de Santa Elena

Médico Veterinario Zootecnista con formación de cuarto nivel en Sanidad Animal y docente de la carrera de Medicina Veterinaria en la Universidad Estatal Península de Santa Elena, donde imparte las asignaturas de Fisiología Animal, Propedéutica y Semiología, Reproducción Animal y Farmacología y Toxicología. Su experiencia profesional se ha desarrollado en el área de animales de producción, desempeñándose como médico veterinario en empresas ganaderas dedicadas a la producción lechera, brindando asistencia técnica, sanitaria y reproductiva. Además, formó parte del Ministerio de Agricultura y Ganadería en el Proyecto Nacional de Ganadería Sostenible, integrando la Unidad Móvil Veterinaria en la provincia de Chimborazo. Su trayectoria se caracteriza por el compromiso con el bienestar animal, las buenas prácticas veterinarias y el fortalecimiento sostenible del sector pecuario.

ÍNDICE

PRÓLOGO	4
AUTORES	6
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	12
INTRODUCCIÓN	14
Capítulo 1. El Paciente veterinario Conectado: Telemetría e IoT en Tiempo Real	17
1.1. Dispositivos wearables, más allá del rastreo GPS en veterinaria	17
1.2. Biosensores cutáneos y monitorización de constantes vitales 24/7.	23
1.3. Gestión de Big Data en veterinaria	31
1.4. El impacto en el bienestar animal y la detección temprana de dolor.....	39
Capítulo 2. Inteligencia Artificial en veterinaria: El Copiloto del Diagnóstico	45
2.1. Algoritmos de <i>Deep Learning</i> en diagnóstico por imagen (Rayos X, Eco, TAC) en veterinaria	45
2.2. Sistemas de Soporte a la Decisión Clínica (CDSS)	52
2.3. Modelos predictivos en epidemiología y medicina poblacional	60
2.4. IA en la patología clínica: Automatización del análisis citológico.....	68
Capítulo 3. Cirugía 4.0: Precisión Robótica y Visualización Avanzada	73
3.1. Planificación quirúrgica: Del monitor a la impresión 3D personalizada.....	73
3.2. Realidad Aumentada (AR) y Mixta en el quirófano: Anatomía holográfica.	76
3.3. Telecirugía y asistencia robótica de mínima invasión.....	81
3.4. Bioimpresión de tejidos: El futuro de la reconstrucción en veterinaria.	88
Capítulo 4. Medicina de Precisión: Genómica y Terapias Personalizadas	106

4.1. Farmacogenómica	106
4.2. Edición genética (CRISPR) y el debate ético en animales de compañía.....	117
4.3. Oncología de precisión: Biomarcadores para la detección precoz del cáncer.....	125
4.4. Inmunoterapia y terapias celulares	133
Capítulo 5. El Ecosistema Digital: Telemedicina, Cloud y Ética.....	138
5.1. Teleconsulta y Telerriaje	138
5.2. Blockchain en veterinaria: Seguridad, trazabilidad y pasaportes sanitarios dig- itales.....	143
5.3. Ciberseguridad: Protegiendo la privacidad de los datos del paciente y el cliente.	148
5.4. Desafíos éticos de la deshumanización tecnológica en la medicina animal.	153
BIBLIOGRAFÍA.....	163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Impacto de las tecnologías digitales en la veterinaria.....	22
Tabla 2. Potencialidades de las tecnologías digitales en veterinaria.....	30
Tabla 3. Estructura de la Toma de Decisiones Basada en Datos	37
Tabla 4. El paso de la veterinaria tradicional a la digital	43
Tabla 5. Comparación de Aplicación del Deep Learning en veterinaria por Modalidad.....	48
Tabla 6. El Ciclo de Decisión con CDSS	55
Tabla 7. Matriz de Evaluación para un Hospital Veterinario.....	59
Tabla 8. Ventajas de la Medicina Poblacional Predictiva en Veterinaria	63
Tabla 9. Ejemplo de Modelo de Riesgo	67
Tabla 10. Ventajas de la Automatización citológica	70
Tabla 11. Comparación de la Planificación Tradicional de <i>la cirugía vs. Cirugía 4.0</i>	75
Tabla 12. Ventajas Críticas de estas Tecnologías	79
Tabla 13. Ventajas de la Cirugía Robótica en contraste con Laparoscopia Tradicional.....	83
Tabla 14. Resumen de la Seguridad Quirúrgica	88
Tabla 15. Ventajas de la Bioimpresión en el Paciente Animal	91
Tabla 16. Ventajas de la Bioimpresión sobre el Modelo Animal	97
Tabla 17. Puntos Clave del Gemelo Digital en Bioimpresión.....	100
Tabla 18. Comparativa de Eficiencia en Investigación.....	103
Tabla 19. Beneficios de la Farmacogenómica	108
Tabla 20. Paneles Específicos por Especialidad.....	112
Tabla 21. Resumen de las principales posturas éticas en relación al diseño genético.....	120
Tabla 22. Balance Ético de la Edición Genética.....	122

Tabla 23. Biomarcadores	128
Tabla 24. Semáforo clínico	131
Tabla 25. Ecosistema de herramientas tecnológicas de la telemedicina	141
Tabla 26. Beneficios del blockchain en veterinaria	146
Tabla 27. Principales Amenazas relativas a la tecnología aplicada en veterinaria	150
Tabla 28. Tabla de Riesgos Éticos.....	157
Tabla 29. El Modelo de “Alta Tecnología y Alto Contacto” (High Tech, High Touch)	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Clasificación general de los biosensores	23
--	----



INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Ya es un hecho que la evolución de la ciencia detrás de la medicina veterinaria ha incorporado la revolución tecnológica, haciéndose una nueva realidad ineludible para el profesional, en la academia y en la práctica profesional. Bajo el título Veterinaria 4.0: La Revolución Tecnológica en el Cuidado Animal, esta obra ofrece un recurso indispensable tanto para investigadores, clínicos en activo, como para los estudiantes de pre y postgrado que buscan no solo comprender el presente del sector, sino liderar activamente su transformación con el horizonte de una praxis de alta precisión.

El presente texto presenta el impacto causado por la constante innovación tecnológica la cual se plasma en nuevos protocolos de diagnóstico y tratamiento, capaces de garantizar un mayor nivel de bienestar a los pacientes veterinarios. Desde el inicio, se presenta un cuadro comprensivo de la revolución tecnológica significada en conceptos como el "Paciente Conectado", la telemetría y el Internet de las Cosas (IoT), la monitorización 24/7 mediante biosensores y *wearables*, lo cual consigue un seguimiento post-quirúrgico óptimo, además de convertir el *Big Data* en decisiones clínicas fundamentadas, con lo cual se consigue, por primera vez, la detección objetiva y temprana del dolor y el estrés animal.

La integración de la Inteligencia Artificial (IA) en la veterinaria, aparece en el libro, como un apoyo fundamental del profesional, que ahora dispone, en esta nueva era, de instrumentos como el análisis de algoritmos de *Deep Learning* aplicados a la imagenología y la automatización de la patología clínica. Otro tema que aparece es de los Sistemas de Soporte a la Decisión Clínica (CDSS) que posibilitan la drástica reducción de los errores humanos en la actividad clínica. Igualmente, la sofisticación técnica llega al área quirúrgica, donde nos encontramos con que la planificación dispone de impresión 3D personalizada, la realidad aumentada y la cirugía robótica de mínima invasión. Otro avance significativo abordado en el texto, es el de la bioimpresión de tejidos para procesos reconstructivos complejos. Temas destacados también en esta obra es la medicina veterinaria de precisión, los aportes de la farmacogenómica, que pasa por el uso de CRISPR y los biomarcadores oncológicos.

Por otra parte, en el libro se expresa la preocupación de darle una fundamentación ética, que garantiza el marco humano de estas innovaciones, los desafíos éticos que plantea la deshumanización tecnológica, incluyendo un análisis crítico del ecosistema digital, donde temas como la ciberseguridad y el *blockchain* para la trazabilidad sanitaria. En esencia, este volumen es una invitación a trascender los métodos convencionales y abrazar una ciencia más exacta y personalizada, constituyendo una lectura obligatoria para quienes desean liderar la vanguardia de la salud animal con responsabilidad, ética y excelencia científica.

El libro se estructura en cinco grandes capítulos en los cuales se abordan estos temas. Así, en el **Capítulo 1**, titulado el Paciente Conectado: Telemetría e IoT en Tiempo Real, expone los elementos claves acerca de los dispositivos wearables, los biosensores cutáneos para lograr la monitorización de constantes vitales. También la gestión de Big Data para convertir los datos masivos en decisiones clínicas, y el impacto en el bienestar animal y la detección temprana de dolor.

Seguidamente, el **Capítulo 2** aborda la Inteligencia Artificial como el Copiloto del Diagnóstico, profundizando en los algoritmos de *Deep Learning* en diagnóstico por imagen (Rayos X, Eco, TAC). 2.2. Sistemas de Soporte a la Decisión Clínica (CDSS), los modelos predictivos en epidemiología y medicina poblacional y la automatización del análisis citológico.

A continuación, el **Capítulo 3** trata acerca de la Cirugía 4.0, relacionada con el logro de la precisión robótica y visualización avanzada, apoyando la planificación quirúrgica, la Realidad Aumentada (AR) y Mixta en el quirófano: Anatomía holográfica, el desarrollo de la Telecirugía y asistencia robótica de mínima invasión, las innovaciones de vanguardia en la Bioimpresión de tejidos que apuntan hacia el futuro de la reconstrucción en veterinaria.

El **Capítulo 4** se concentra en la medicina de precisión, acerca de la Genómica y Terapias Personalizadas, la Farmacogenómica, la edición genética (CRISPR) y el debate ético en animales de compañía. También, los avances en la oncología de precisión, con los biomarcadores para la detección precoz del cáncer, la inmunoterapia y las terapias celulares.

Por último, el **quinto Capítulo** desarrolla los elementos del ecosistema digital: Telemedicina, Cloud y Ética 5.1., la teleconsulta y teletriage, el uso del Blockchain en veterinaria para mejorar infinitamente la seguridad, la trazabilidad y la realización de los pasaportes sanitarios digitales. También los temas de la ciberseguridad: y, por último, los desafíos éticos de la deshumanización tecnológica en la medicina animal.



El Paciente veterinario Conectado: Telemetría e IoT en Tiempo Real



CAPÍTULO 1.

EL PACIENTE VETERINARIO CONECTADO: TELEMETRÍA E IOT EN TIEMPO REAL

Gabriela Mercedes Ordóñez Andrade, Byron Enrique Borja Caicedo,
Julio César Bravo Brito y Edison Macgyver Barragán Taco.

1.1. Dispositivos wearables, más allá del rastreo GPS en veterinaria

Es indudable que el progreso de las TIC ha cambiado la medicina veterinaria, puesto que ha permitido diagnósticos más veloces y tratamientos más exactos, así como una mejora en la administración de entidades veterinarias y un aumento en la calidad de vida de los animales.

La medicina veterinaria es una disciplina fundamental y en permanente cambio que trasciende el cuidado de los animales de casa, ya que incluye la seguridad alimentaria, la salud pública, el bienestar social y la preservación de la biodiversidad. Históricamente asociada con el progreso de la civilización, ha sido fundamental para el desarrollo de las estructuras sociales. En estas circunstancias, las tecnologías actuales incrementan en gran medida su capacidad para diagnosticar, prevenir y tratar. Analizar el futuro de la profesión requiere reconocer su rol estratégico en términos sociales y su potencial tecnológico para continuar favoreciendo el progreso y bienestar de la humanidad (Iglesias & Beker, 2018).

En varios países ya se está empleando tecnología de vanguardia para la detección temprana de enfermedades en animales, haciendo uso de minería de datos para gestionar información incompleta y ambigua. La prevención y el tratamiento de enfermedades son los objetivos principales de Alemania, Rusia y Estados Unidos. Para ello, utilizan modelos matemáticos fundamentados en datos experimentales (Muhamediyeva, et al, 2023). Entre otras indagaciones científicas, pueden mencionarse aquellas sobre el uso de la IA en medicina poblacional, el cuidado de animales domésticos, la agricultura, la educación, la industria y el diagnóstico. Es notable la relevancia que en este contexto, ha adquirido el diagnóstico por imagen dirigida a identificar, segmentar y clasificar las anomalías gracias a las imágenes obtenidas de daños tales como los nódulos pulmonares o las metástasis (Appleby & Basran, 2022).

Otro ejemplo de la aplicación de las nuevas tecnologías en veterinaria es la teledetección vital. Con esta tecnología, que une los sensores portátiles, las imágenes obtenidas con rayos infrarrojos, radar y visión artificial, se pueden obtener datos importantes para determinar la salud de los pacientes animales, incluso prescindiendo del contacto directo. De esta manera, se facilita la identificación de las enfermedades desde sus inicios, así como se puede monitorear la evolución de las enfermedades crónicas y desarrollar investigaciones (Zhao, et al, 2025).

Al mismo tiempo, la nanotecnología hace posible dar respuestas eficaces y de vanguardia en relación a terapias, diagnósticos, ingeniería de tejidos y producción de vacunas (Rueda et al., 2024). Es posible su aplicación en la producción, salud, nutrición y crianza animal, ya que posibilita que se administren medicamentos de manera exacta y a dosis bajas. Esto disminuye los residuos y el periodo de retirada en animales de granja. Asimismo, se ha investigado para tratar enfermedades serias y guiar agentes terapéuticos hacia zonas afectadas (El-Sayed & Kamel, 2020).

Además, los métodos avanzados de imagenología anatómica como la PET, SPECT, TC y RM, así como sus combinaciones (PET/TC, PET/RM o SPECT/TC), han incrementado notablemente la calidad diagnóstica en veterinaria. Estas tecnologías posibilitan la creación de representaciones en 3D que son útiles para el estudio de la anatomía y el diagnóstico clínico. No obstante, tienen retos en términos de seguridad, y con su disponibilidad en aumento, las expectativas de los veterinarios como clientes han crecido (Yitbarek & Dagnaw, 2022).

De igual modo, la impresión tridimensional en el campo de la medicina veterinaria genera soluciones personalizadas, como guías quirúrgicas, implantes y aparatos para diagnósticos, lo que incrementa la exactitud de los tratamientos. Los ejemplos incluyen sistemas de fundoscopia asequibles, cráneos a la medida para tumores cerebrales y terapias para fracturas o heridas. Se prevé que en el futuro múltiples clínicas veterinarias tengan impresoras 3D para ofrecer un mejor servicio a los animales (Gyles, 2019).

La integración de la telemetría y el Internet de las Cosas (IoT) en la medicina veterinaria contemporánea representa un cambio de paradigma fundamental, permitiendo la transición de una praxis médica reactiva —basada en la intervención tras la aparición de síntomas— hacia una gestión proactiva, predictiva y estrictamente sustentada en datos objetivos. Las innovaciones se conectan estructurando un ecosistema tecnológico, de tres niveles: la captura de datos, su

transmisión inalámbrica y el análisis inteligente de la información, optimizando así el bienestar animal tanto en entornos clínicos como productivos (Blog veterinaria el buen pastor, 2026).

El proceso comienza en la capa de captura, donde el hardware especializado cambia la manera de interactuar con el paciente. Se utilizan sensores no invasivos, como los dispositivos implantables o wearables, en lugar de los métodos tradicionales que pueden provocar estrés debido a la manipulación o el cableado. Entre estos destacan los collares inteligentes, capaces de monitorizar niveles de actividad, ciclos de sueño y patrones de rumia en el ganado; los arneses biométricos, que registran electrocardiogramas (ECG), frecuencia respiratoria y temperatura superficial; y los sensores subcutáneos o bolos ruminales, que permiten una medición interna continua de parámetros críticos como el pH y la temperatura térmica profunda (Lustgarden, et al, 2020).

Posteriormente, la capa de conectividad garantiza que este flujo de información se convierta en una herramienta útil mediante la transmisión en tiempo real. El sistema garantiza que los datos biométricos se transmitan ininterrumpidamente desde el animal a los centros de control mediante protocolos de comunicación adaptados a las necesidades del entorno, incluyendo Bluetooth y Wi-Fi para clínicas urbanas, así como redes de largo alcance y bajo consumo, como NB-IoT o LoRaWAN, en extensos espacios rurales.

El proceso finaliza con la gestión de la situación, dirigida por el software que actúa como el cerebro del sistema. La información masiva es alojada en la nube, donde algoritmos de Inteligencia Artificial procesan las tendencias y detectan anomalías que podrían pasar desapercibidas para el ojo humano. Este procesamiento culmina en una interfaz de usuario que permite al veterinario recibir alertas inmediatas en dispositivos móviles cuando un parámetro vital se desvía del rango fisiológico normal. De este modo, la telemetría aplicada a la veterinaria no solo mejora la precisión diagnóstica, sino que maximiza la eficiencia operativa y garantiza una respuesta médica inmediata ante cualquier compromiso de la salud animal (Lustgarden, et al, 2020).

La atención a las mascotas requiere de instrumentos que aseguren la salud, la seguridad y la trazabilidad clínica. La posibilidad de documentar señales de comportamiento y fisiológicas en contextos reales mediante sensores vestibles y rastreadores, con acelerometría y aprendizaje automático, se ha hecho más accesible. Esto, a su vez, permite combinar esos datos con registros clínicos estructurados para respaldar decisiones informadas (Redmont, et al, 2024).

La literatura de los últimos años sugiere soluciones económicas para el seguimiento y la salud de las mascotas. Un ejemplo es el sistema que Zahari y Baharuddin describen (2023), con ESP32 como microcontrolador, MPU6050 para detección de movimiento, Neo6M para posicionamiento GNSS y DHT11 para temperatura y humedad. También los siguientes equipos:

- **ESP32 (microcontrolador):** conectividad WiFi/BLE y bajo consumo, adecuado para IoT de campo.
- **MPU6050 (acelerómetro + giroscopio):** detección de postura y actividad física.
- **Neo6M (GPS):** geolocalización en exteriores, registro de trayectorias y eventos.
- **DHT11 (temperatura/humedad):** contexto ambiental mínimo para interpretación de actividad.

Un sistema veterinario centraliza la recolección, almacenamiento, procesamiento y distribución de datos clínicos y de bienestar; estos son útiles para dar respuesta a enfermedades, analizar tendencias y brindar soporte a decisiones. La bibliografía de la informática veterinaria insiste: es esencial tener historias clínicas organizadas y que sean susceptibles de ser compartidas (Lustgarden, et al, 2020).

El acceso a expedientes electrónicos y recordatorios sobre cuidados preventivos contribuye a que los pacientes reciban atención de manera continua, se controlen las enfermedades crónicas y se planifiquen recursos. Marcos de gestión como RIVIMS subrayan la analítica predictiva con el objetivo de dar prioridad a las citas y utilizar los recursos de manera efectiva (Iqbal et al., 2021).

La geolocalización posibilita el monitoreo constante y la delimitación de geocercas con alertas; su combinación con acelerometría facilita que se entiendan los comportamientos y se identifiquen anomalías (Redmont, et al, 2024). Para despliegues de bajo consumo, las redes LPWAN (p. ej., Sigfox/LoRaWAN) han mostrado viabilidad en entornos extensos y multiespecie (Wild et al., 2023).

En el estudio de Hernández et al (2026) se explica la idea de un sistema de información integral para el cuidado de las mascotas que incorpora dispositivos del Internet de las Cosas (IoT), geolocalización e historia clínica veterinaria electrónica a nivel nacional. La fragmentación de datos clínicos y de rastreo en contextos domésticos y médicos es el problema que se analiza.

Algunos de los resultados que se anticipan incluyen el fortalecimiento de las políticas públicas (como la vigilancia y las campañas), la reducción de pérdidas por extravío mediante el uso de geocercas y análisis de actividad, el monitoreo del cuidado a través de registros electrónicos y la mejora en la detección temprana de eventos relacionados con la salud. Se concluye que la propuesta puede ejecutarse con las tecnologías actuales, no obstante, se requieren estándares de interoperabilidad, directrices para la gobernanza de datos y medidas de privacidad firmes para su implementación.

En la medicina veterinaria moderna, el uso de sistemas de monitoreo a distancia y tecnologías digitales ha pasado de ser una innovación prospectiva a convertirse en un componente fundamental para la eficiencia en la producción y el bienestar animal. La implementación de estos recursos brinda beneficios fundamentales que van desde la clínica de animales pequeños hasta la administración de la industria ganadera a gran escala, lo cual posibilita una intervención médica más fundamentada y precisa (Rosado et al., 2025).

La vigilancia clínica y postquirúrgica es uno de los beneficios más importantes. La posibilidad de monitorear pacientes en condiciones críticas o recuperándose a través de sensores sin cable, quita la necesidad de una intervención humana continua, lo que reduce el llamado "efecto de la bata blanca", que tiende a modificar las constantes vitales debido al estrés del manejo. Es factible identificar arritmias, picos de fiebre o cambios hemodinámicos en el momento preciso en que surgen cuando el animal se mantiene más tranquilo, lo que mejora significativamente las perspectivas de recuperación (Yitbarek & Dagnaw, 2022).

En el sector de la producción animal, identificar enfermedades a tiempo es una ventaja ética y competitiva que no se puede negar. Los sistemas digitales posibilitan la detección de alteraciones sutiles en los patrones de movilidad o en las variaciones térmicas que ocurren días antes de que aparezcan los síntomas clínicos visibles. Un caso ejemplar es el empleo de sensores de rumia en vacas lecheras, que tienen la capacidad de prever trastornos metabólicos antes de que ocurra una disminución en la curva productiva. Esto hace posible poner en práctica tratamientos preventivos que reducen el consumo de medicamentos y las pérdidas financieras (Agronews, 2026).

La telemetría también aporta beneficios a la administración reproductiva al ser técnicamente precisa. Los criadores pueden identificar con exactitud cuándo es el momento óptimo para realizar la inseminación artificial al observar el incremento de actividad física que caracteriza al estro o celo. Esta optimización, aparte de incrementar los índices de éxito en la concepción, reduce significativamente los "días abiertos" en las granjas, lo que contribuye a mejorar la sostenibilidad del ciclo productivo (Durán, 2025).

Desde una perspectiva etológica, estas herramientas posibilitan el estudio del comportamiento natural sin que la presencia del observador lo distorsione. La investigación automatizada de la movilidad y los períodos de reposo permite identificar conductas estereotipadas o niveles de estrés térmico, lo cual brinda información objetiva para realizar ajustes inmediatos en el enriquecimiento del ambiente y la administración del entorno, garantizando así un nivel más alto de bienestar animal.

El vínculo entre el médico y los dueños de animales de compañía ha cambiado debido al crecimiento de la telemedicina y a la supervisión a distancia. En situaciones de enfermedades crónicas, por ejemplo, las cardiopatías degenerativas, las herramientas IoT posibilitan la creación automática de reportes semanales. Esta continua circulación de información posibilita que el veterinario modifique los protocolos terapéuticos desde el centro clínico, de forma personalizada y dinámica, lo cual disminuye la necesidad de traslados frecuentes y asegura una óptima calidad de vida para el paciente en su hogar (Dyndyn, 2024).

Tabla 1. *Impacto de las tecnologías digitales en la veterinaria*

Característica	Medicina veterinaria Tradicional	Medicina veterinaria con IoT/ Telemetría
Recolección de datos	Puntual y presencial	Continua (24/7) y remota
Detección de problemas	Cuando hay síntomas visibles	Etapa subclínica (antes del síntoma)
Nivel de estrés	Alto (manipulación)	Mínimo (monitoreo pasivo)
Análisis	Manual / Basado en observación	Automatizado / Basado en <i>Big Data</i>

Adaptado de (Durán, 2025)

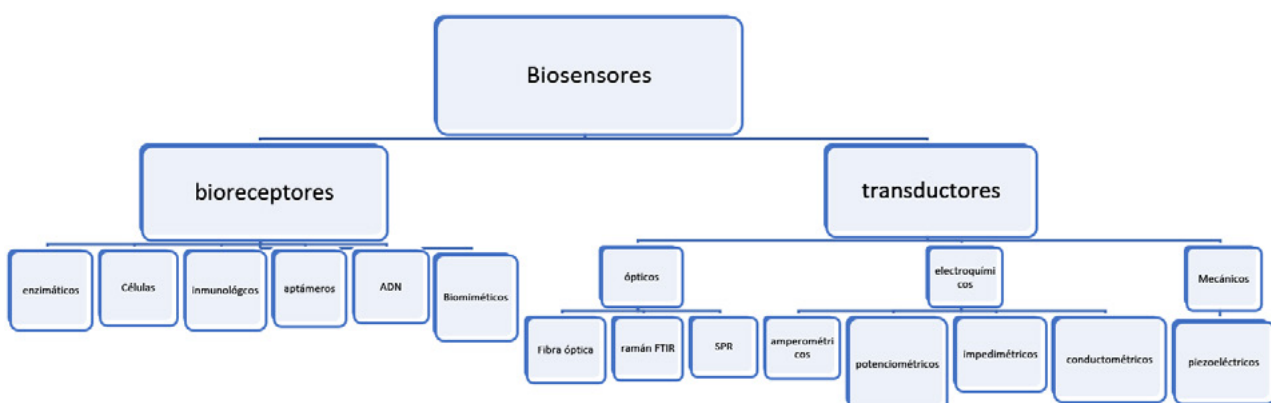
La combinación de estas herramientas no solo mejora la tasa de supervivencia y la salud de los animales, sino que también optimiza los costos operativos para las clínicas y la rentabilidad para los productores agropecuarios.

1.2. Biosensores cutáneos y monitorización de constantes vitales 24/7.

Según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), un biosensor es un aparato que permite identificar compuestos mediante las reacciones específicas de células enteras, tejidos, sistemas inmunes, organelos o enzimas aisladas (McNaught, A.; Wilkinson, A. , 1997). No obstante, se han caracterizado los biosensores recientemente como dispositivos analíticos que incluyen biomoléculas y/o material biológico (como enzimas, anticuerpos, polímeros impresos, ácidos nucleicos, organelos celulares, tejidos, proteínas, aptámeros o antígenos) y que están vinculados e incorporados a un microsistema de transducción o a un transductor fisicoquímico (que puede ser electroquímico, mecánico u óptico) (Lascka et al., 2007).

Un biosensor tiene un bioreceptor que identifica un analito y, a través de un transductor, transforma su reacción biológica en señales eléctricas, ópticas o mecánicas equivalentes. Los biosensores se han empleado, sobre todo, en tres campos: el alimentario, el ambiental y el biomédico (Su, et al, 2011). Por lo tanto, un biosensor es un transductor de naturaleza química y física que opera sobre una capa selectiva, la cual genera señales eléctricas que pueden ser medidas cuando se presentan estímulos químicos. En la producción de biosensores, se utilizan algunos componentes para el reconocimiento biológico, como por ejemplo: anticuerpos, cofactores, tejidos, células, enzimas o microorganismos (Johnson & Mutharasan, 2012).

Ilustración 1. Clasificación general de los biosensores



Adaptado de (Mendoza et al., 2013)

Los biosensores tienen la posibilidad de clasificarse según su tipo en transductores y bioreceptores. Asimismo, pueden usar métodos de detección con marcaje o sin él, dependiendo del diseño particular del biosensor. Los biosensores, además, se categorizan según la clase de bioreceptor que utilizan, lo cual es fundamental para su especificidad. Un bioreceptor es un elemento que utiliza un proceso químico o bioquímico para identificar y unir el analito de interés. Seis categorías fundamentales de bioreceptores son las siguientes: ADN, compuestos biomiméticos, compuestos inmunológicos, células, aptámeros y enzimáticos (Veluzamy et al., 2010).

Las enzimas constituyeron los primeros componentes de detección de los biosensores. Estos determinan la inhibición o catálisis mediante un analito específico, y se emplean para detectar contaminantes en los alimentos y en el medio ambiente (Van Dorst, et al, 2010). Hongos, bacterias, levaduras y células procariotas son otros componentes de identificación. Aunque los metabolismos de los microorganismos no son selectivos, es posible hacer que los biosensores microbianos sí lo sean, ya sea bloqueando interacciones no deseadas o induciendo la ruta metabólica deseada, o adaptando a los microorganismos a un sustrato particular por medio de condiciones selectivas de cultivo. Las células son sensibles a una gran variedad de estímulos bioquímicos, porque contienen vías bioquímicas específicas. Además, las células se utilizan para pruebas funcionales de agentes bioquímicos, como los antibióticos.

Existen muchos ejemplos vinculados con la creación de biosensores. Gracias a su gran capacidad de selección y sensibilidad, los anticuerpos son otro de los componentes de reconocimiento más utilizados. De acuerdo con sus propiedades de síntesis y selectivas, es posible utilizar anticuerpos monoclonales, policlonales o recombinantes. Por lo general, se inmovilizan en un sustrato que puede ser la superficie del portador, localizador o detector. El antígeno par del anticuerpo se adapta de forma específica, ya que las estructuras moleculares tridimensionales de ambos son muy similares (Veluzamy et al., 2010).

Se ha optado por usar anticuerpos monoclonales en los sensores inmunológicos en lugar de los policlonales, gracias a su gran especificidad y la diversidad de anticuerpos que existen en el mercado, así como al avance de las técnicas de hibridación, las cuales han hecho que sean más accesibles y menos costosos (Veluzamy et al., 2010).

Por otro lado, los aptámeros son moléculas funcionales que se obtienen de ácidos nucleicos seleccionados in vitro, y que han despertado en tiempos recientes el interés para la creación de biosensores. La palabra "aptámero" proviene del latín "aptus", que se traduce como "adaptarse". Los aptámeros también son conocidos como "anticuerpos químicos" porque su proceso de producción artificial in vitro se fundamenta en el método SELEX (systematic evolution of ligands by exponential enrichment, por sus siglas en inglés).

Los aptámeros son secuencias de ADN y/o ARN, que tienen la capacidad de unirse con firmeza y especificidad a varias moléculas diana o blanco. Los aptámeros, en comparación con los anticuerpos tradicionales, ofrecen más beneficios como componentes de detección para los biosensores, porque son más pequeños, estables desde el punto de vista químico y menos costosos. La combinación de aptámeros con nanotubos y nanoalambres, nanomateriales nuevos, ha mejorado considerablemente la eficacia y sensibilidad de los sensores que se basan en este tipo de bioreceptores.

Estos biosensores, en particular, son más ventajosos que aquellos que emplean receptores naturales como anticuerpos y enzimas. Por ejemplo, los aptámeros con gran afinidad y especificidad pueden seleccionar in vitro cualquier tipo de molécula blanco, desde péptidos pequeños y aminoácidos hasta iones metálicos y proteínas grandes, incluso células completas. Esto posibilita el desarrollo de una amplia variedad de biosensores y su utilización para la detección en tiempo real de microorganismos patógenos.

Además, pueden ser sintetizados con una pureza y reproducibilidad altas a partir de fuentes comerciales, lo que reduce su costo en comparación con los anticuerpos empleados tradicionalmente. Además, los aptámeros de ADN tienden a ser químicamente muy estables, a diferencia de los anticuerpos que se basan en enzimas o proteínas.

Finalmente, los aptámeros tienen la capacidad de experimentar cambios conformacionales significativos que les permiten ajustarse al destino de enlace o a la molécula objetivo. Además, los aptámeros tienen la capacidad de emplearse con distintos géneros de transductores, como los ópticos, electroquímicos, mecánicos o que dependen de variaciones de masa. Estas ventajas permiten un diseño de biosensores nuevos con alta capacidad de detección y selectividad, brindando así una flexibilidad considerable. Por lo tanto, hoy en día los biosensores funda-

mentados en aptámeros tienen un extenso uso en el diagnóstico biomédico, la bioseguridad, el control del entorno y la inocuidad de los alimentos (Van Dorst, et al, 2010).

Los ácidos nucleicos y los fagos, por su parte, son los componentes de reconocimiento más recientes y relevantes en el campo de los biosensores, ya que tienen una alta especificidad y afinidad para identificar analitos de manera rápida, económica, estable y fácil de modificar. Los biosensores que se basan en ácidos nucleicos han sido utilizados para detectar patógenos alimentarios, como *Salmonella* spp y *E. coli* O157: H7, gracias a su extenso espectro de actividades biológicas y fisicoquímicas (Van Dorst, et al, 2010).

Se ha propuesto que los microarreglos de hibridación basados en ADN sirvan como una plataforma para identificar varios microorganismos patógenos en periodos breves. Los bacteriófagos también se han utilizado como herramientas de reconocimiento para identificar microorganismos patógenos. Los bacteriófagos son virus que se acoplan a receptores particulares en la superficie de las bacterias para inyectar su material genético, el cual identifica los receptores bacterianos por medio de las proteínas localizadas en sus extremos.

El reconocimiento es muy específico, por lo que se emplea frecuentemente para clasificar bacterias y ha permitido el desarrollo de tecnologías para detectar patógenos. Se ha informado, por ejemplo, que se están utilizando bacteriófagos como agentes de detección para identificar patógenos como la *E. coli*. La fabricación y diseño de los receptores biomiméticos tienen como objetivo emular la estructura conformacional de células, anticuerpos, enzimas o ácidos nucleicos. Entre los diferentes métodos de fabricación, se encuentran la impresión molecular, que ha llegado a ser una de las técnicas más atractivas y aceptadas para crear agentes de reconocimiento artificial; el empleo de ingeniería genética para producir biomoléculas; y la elaboración de membranas artificiales.

La impresión molecular es un procedimiento para crear lugares artificiales de reconocimiento, que se fundamenta en la creación de una estructura polimérica alrededor de una molécula que puede servir como plantilla. Para esto, se tienen la opción de usar polímeros de impresión molecular, que en un principio pueden reproducir la estructura de cualquier molécula analito o blanco con una afinidad y especificidad parecidas a las de los componentes biológicos de reconocimiento.

No obstante, la utilización de polímeros de impresión molecular presenta ciertas desventajas, como el hecho de que es necesario eliminar totalmente la plantilla porque en ocasiones el polímero impreso no se disuelve; a pesar de que el molde incluye numerosas cavidades impresas, solo algunas pueden ser efectivamente útiles y coincidir apropiadamente con las moléculas blanco (Van Dorst, et al, 2010).

Los sensores que emplean polímeros biomiméticos representan una alternativa más para identificar bacterias de interés biológico y alimentario, por medios visuales y espectroscópicos. Esto es porque en esta estrategia se pueden usar polímeros cromáticos, como el polidiacetileno con nanopartículas y los fosfolípidos funcionalizados. En este caso, el polímero experimenta alteraciones en su color (de azul a rojo) y emite fluorescencia de manera intensa cuando las bacterias como *E. coli*, *Bacillus cereus* o *Salmonella* entérica crecen. Estas secretan compuestos activos desde sus membranas, que son visibles a simple vista por medio del cambio de color del polímero biomimético.

Esta clase de sensor se puede utilizar para determinar la frescura de los alimentos y para emplear polímeros conjugados biocrómicos. Estos últimos son creados con propiedades ópticas apropiadas para la biodetección, lo que implica incorporar al polímero elementos de las membranas celulares activas biológicamente. Este tipo de materiales simulan la membrana celular y permiten identificar la existencia de microorganismos patógenos a través de métodos colorimétricos. Asimismo, se ha empleado para identificar el virus de la gripe y las toxinas bacterianas. A pesar de que en años recientes se han registrado varios estudios sobre biosensores basados en compuestos biomiméticos, la mayoría de ellos se ha centrado en detectar microorganismos patógenos directamente y solo unos pocos se han utilizado para controlar microbiológicamente muestras de alimentos (Veluzamy et al., 2010).

La puesta en práctica de biosensores cutáneos y la supervisión continua de las constantes vitales a través del sistema 24/7 han generado un cambio tecnológico en el campo veterinario, instaurando un estándar de atención que se fundamenta en una vigilancia fisiológica permanente. Estos aparatos permiten recoger datos en un estado basal y en el entorno natural del animal, garantizando una fidelidad analítica sin igual. Esto, en contraposición a las mediciones

puntuales y esporádicas que se realizan durante la consulta física, las cuales suelen ser alteradas por el estrés del paciente (Blog veterinaria el buen pastor, 2026).

La habilidad de convertir señales biológicas complejas en flujos de datos comprensibles en tiempo real es el principal impacto clínico de estos sensores. A través de la utilización o la adhesión de parches cutáneos inteligentes, el médico tiene la posibilidad de supervisar continuamente valores como la frecuencia respiratoria, la frecuencia cardíaca, la saturación de oxígeno y la variabilidad del intervalo R-R. Esta vigilancia continua posibilita detectar biomarcadores digitales de dolor o malestar que, en un gran número de especies, tienden a ser ocultados por el instinto de supervivencia. De este modo, se puede llevar a cabo una intervención terapéutica o analgésica mucho antes de que la situación clínica empeore (Durán, 2025).

La monitorización 24/7 funciona como un sistema de alerta precoz muy sensible en el campo de la medicina preventiva y el control de enfermedades crónicas. Los algoritmos vinculados a estos biosensores pueden identificar mínimas desviaciones que indiquen el comienzo de procesos inflamatorios, desequilibrios hemodinámicos o episodios de descompensación cardíaca al fijar una línea base personalizada para cada paciente. Esta perspectiva individualiza la medicina veterinaria, apartándola de los márgenes poblacionales generales y orientándola hacia la tendencia particular del ser (Dyndyn, 2024).

Asimismo, el empleo de biosensores cutáneos mejora la administración de recursos en hospitales y en unidades de cuidados intensivos. La automatización de la medición de constantes vitales disminuye el trabajo del personal técnico y reduce al mínimo el contacto físico con los pacientes, lo cual es crucial para la recuperación de pacientes geriátricos o politraumatizados. Finalmente, la incorporación de estos dispositivos no solo mejora la seguridad del paciente y la exactitud del diagnóstico, sino que además estrecha el vínculo con el dueño, quien nota un cuidado superior y una comunicación fundamentada en evidencias objetivas y cuantitativas sobre el estado de salud de su animal (Hernández, et al, 2026).

La implementación de sistemas de monitorización ininterrumpida ha inaugurado una era de medicina personalizada en la veterinaria, fundamentada en la capacidad de establecer una "línea base" individualizada. Este concepto es crucial en términos técnicos, ya que los rangos fisiológicos tienen una variabilidad importante no solo entre especies, sino también

entre razas y fases de desarrollo. El médico, al capturar datos de manera constante, deja de depender de promedios poblacionales generales para enfocarse en las tendencias particulares del paciente. Esto posibilita detectar desviaciones patológicas con una mayor sensibilidad diagnóstica (Dyndyn, 2024).

La identificación del dolor silencioso es una de las áreas más importantes. Los animales, por instinto de supervivencia, suelen ocultar señales de malestar, lo cual ha hecho históricamente más difícil el tratamiento de enfermedades crónicas. No obstante, el monitoreo continuo permite detectar modificaciones leves en la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) y transformaciones en los patrones de sueño. Estos biomarcadores digitales sirven como indicadores objetivos de enfermedades como la osteoartritis, lo que posibilita que el veterinario modifique los protocolos analgésicos antes de que el deterioro funcional sea notorio (El-Sayed & Kamel, 2020).

En las Unidades de Cuidados Intensivos (UCI), la vigilancia del paciente crítico se redefine gracias a la monitorización continua. La automatización de la toma de constantes vitales asegura una vigilancia continua sin requerir que el animal esté despierto o manipulado, lo cual evita un estrés innecesario que podría poner en riesgo su estabilidad. La programación de alarmas inteligentes cuando se presenta un incremento en la frecuencia respiratoria o cambios en la temperatura permite actuar rápidamente ante situaciones de emergencia como el distrés respiratorio o el edema pulmonar, lo que mejora la capacidad de respuesta del equipo médico durante las horas con menor supervisión presencial (El-Sayed & Kamel, 2020).

Esta tecnología ha cambiado la manera de manejar el posoperatorio en casa. El paciente puede ser dado de alta antes cuando se emplean parches sensores, lo que propicia la recuperación en un ambiente familiar más relajado. El veterinario supervisa a distancia ciertos parámetros, por ejemplo, la temperatura y el ritmo del corazón, para garantizar que la convalecencia y la cicatrización avancen sin problemas de hemorragias o infecciones. Este modelo de seguimiento no solo mejora la seguridad del paciente, sino que también ofrece una mayor tranquilidad y compromiso por parte del dueño en el cuidado de la salud de los animales (Johnson & Mutharasan, 2012).

Tabla 2. *Potencialidades de las tecnologías digitales en veterinaria*

Potencialidad	Descripción
Big Data Clínico	La acumulación de datos 24/7 permite usar algoritmos para predecir crisis epilépticas o fallos cardíacos antes de que ocurran.
Medicina de Precisión	Ajuste de dosis de fármacos basándose en la respuesta fisiológica exacta del individuo, no solo en su peso.
Reducción del Error Humano	Elimina la subjetividad de la toma de datos manual y el estrés que esta causa en el paciente (estrés por manipulación).

Adaptado de (Durán, 2025)

La barrera del pelaje y la densidad dérmica, que han presentado históricamente dificultades para lograr señales claras en biosensores cutáneos, son un impedimento inherente biológico al desarrollo de la telemetría veterinaria. Este reto, que se llama técnicamente "el desafío del pelo y la piel", ha favorecido el progreso de soluciones en ingeniería biomédica que tienen como objetivo asegurar una monitorización efectiva las 24 horas del día, los 7 días de la semana, sin poner en riesgo la integridad fisiológica o estética del animal.

El estudio presente se concentra en dos enfoques tecnológicos primordiales para eludir la interferencia del pelaje. Primero, el uso de microneedles o microagujas es un avance innovador; estos parches tienen estructuras microscópicas que pueden penetrar la epidermis y la capa de pelo sin provocar dolor. Estos aparatos permiten el acceso directo al líquido intersticial, lo cual facilita la medición de las constantes vitales y los metabolitos con una precisión parecida a la ofrecida por los métodos invasivos convencionales.

Por otro lado, los sensores de bioimpedancia surgen como una opción no invasiva con un gran potencial, pues tienen la habilidad de capturar datos por medio de la densidad del pelaje a través del estudio de la resistencia eléctrica de los tejidos. Esto hace que no sea necesario realizar rasurados amplios, los cuales pueden causar estrés al animal o alterar su termorregulación natural (Appleby & Basran, 2022).

Las repercusiones de estas tecnologías van más allá de la práctica clínica tradicional y se establecen como una herramienta esencial en la investigación farmacológica. Estas soluciones, al

posibilitar la recolección de datos en condiciones de vida real, hacen más sencillo el análisis de la seguridad y efectividad de nuevos ingredientes activos fuera del ambiente controlado y, con frecuencia, estresante del laboratorio. Así, la supervisión constante a través de biosensores sofisticados no solo soluciona restricciones técnicas relacionadas con la conectividad tisular, sino que también brinda una perspectiva objetiva sobre el comportamiento fisiológico real del animal y eleva los estándares de rigor científico en la medicina veterinaria contemporánea (Muhamediyeva, et al, 2023).

1.3. Gestión de Big Data en veterinaria

La transición de los sistemas de información en salud (SIS) desde una perspectiva enfocada en la enfermedad a otra centrada en el paciente produce un gran volumen de datos. Las fuentes de datos tradicionales, como la historia clínica electrónica (HCE), entre otras, se complementan con fuentes no convencionales debido a la incorporación de nuevas TIC. Entre los nuevos avances tecnológicos que tienen un alto potencial en cuanto a la provisión de datos se encuentran las ciencias ómicas, la telesalud, los biosensores y los dispositivos para el rastreo de actividad física, entre otros. En realidad, se utiliza el concepto "informática y analítica en salud" para aludir a las TIC y al análisis de datos requeridos para usar esta información en la atención sanitaria (Pramanik, et al, 2020).

La ciencia de datos (CD) empieza a adquirir una importancia creciente cuando se trata de procesar y hacer comprensible este vasto y complicado conjunto de información. A gran escala y de manera sencilla, se podría describir a la CD como el análisis de los datos. Desde el punto de vista disciplinario, la CD es un campo emergente interdisciplinario que se fundamenta en las ciencias sociales, la gestión, la comunicación, la informática, la computación y la estadística para examinar los datos y su entorno. Si se analizan esos datos, eventualmente se podrán convertir en decisiones, conocimientos y acciones según un método y un pensamiento específicos (Cao, 2018).

Para entender los riesgos y mitigar el efecto de problemas adversos en la salud animal, se emplea el análisis de Big Data. Esto se logra mediante el reconocimiento de poblaciones con alto riesgo, la combinación de datos o procedimientos que operan en diversas escalas utilizando

métodos epidemiológicos, y el aprovechamiento de datos a alta velocidad para observar las tendencias sanitarias animales y descubrir nuevos desafíos y amenazas (Durán, 2025).

La aparición del Big Data exige la inclusión de nuevos saberes y destrezas en epidemiología veterinaria, como el aprendizaje automático y la codificación, para formar a una nueva generación de expertos y científicos enfocados en ello. La creación de canales para examinar Big Data casi en tiempo real es el siguiente paso hacia la producción de Smart Data, con el propósito de optimizar la comprensión de los riesgos sanitarios, la efectividad de la gestión y las decisiones políticas. Finalmente, se busca prevenir o atenuar en lo posible el impacto negativo que tienen los problemas sobre la salud animal (Imveterinaria, 2026).

Dado que nuestra habilidad para recolectar y almacenar datos sigue creciendo rápidamente, los retos en la epidemiología veterinaria están evolucionando desde la obtención de datos hasta su conversión en información valiosa sobre la salud de los animales. A diferencia de la medicina humana y la salud pública, que han empleado el Big Data para mejorar los cuidados de precisión y monitorear las tendencias de las enfermedades en humanos, en el sector veterinario se ha puesto principalmente el enfoque en análisis espaciales y bioinformática.

No obstante, el empleo de Big Data en la supervisión de enfermedades en animales es un ámbito que se expande con rapidez. Como se ha demostrado en áreas que van desde el marketing y los negocios hasta la salud, el Big Data ofrece la posibilidad de concentrarse en poblaciones específicas y monitorearlas, o incluso anticipar las tendencias. Si el análisis y la recolección de datos se realiza más en tiempo real que retrospectivamente, el desarrollo y perfeccionamiento de estas habilidades en epidemiología veterinaria tienen el potencial de mejorar nuestra habilidad para detectar y reaccionar ante los problemas emergentes de salud animal.

El Big Data generalmente presenta algunas cualidades, denominadas las cuatro "V": El volumen hace alusión a la dimensión del conjunto de datos, que suele ser un orden de magnitud más o menos que lo que anteriormente se encontraba disponible en un área específica; la variedad hace referencia a distintas formas de datos que se han creado con diversos fines o se han obtenido a escalas variadas.

La veracidad trata las dudas en los datos, y la velocidad es la rapidez con que se generan los datos. Los datos de alta velocidad son más bien como un flujo. Al aplicar el análisis a la

variedad, veracidad, volumen y velocidad, se produce una quinta V: el valor del Big Data para generar nuevos conocimientos e informar la toma de decisiones. Generando valor El principal reto para la epidemiología Big Data en las próximas décadas será avanzar hacia la generación de valor (Kimberly, et al, 2017).

Para poner en funcionamiento el Big Data, es necesario expandir nuestra definición de las V añadiendo tres variables adicionales: la accesibilidad, la precisión y la automatización. Aunque hay quienes sostienen que la gran cantidad de Big Data hace que las imprecisiones en los datos se diluyan, esto no puede ser cierto si los problemas de confusión o errores en la selección y medición tienden a favorecer el tamaño de la muestra. El análisis de datos, como el que se hace en Twitter o Google, podría distorsionar la población en riesgo y generar un margen de error en cuanto al uso de internet.

Asimismo, la calidad de los datos de entrada y el mantenimiento del registro determinan el valor de extraer información de bases de datos diagnósticas de laboratorio o expedientes clínicos. Por ende, para garantizar la fiabilidad, la revisión de errores y el control de calidad deben integrarse en el procesamiento de Big Data (Cao, 2018).

La accesibilidad es un reto importante también, que agrupa inquietudes esenciales acerca de la privacidad de los datos y la propiedad. Los desafíos de ingeniería de datos están relacionados con la conectividad, la estructura y el escaso personal calificado y formado para extraer información de las bases de datos (Rosa et al., 2022).

Finalmente, los datos de alta velocidad hacen que sea necesario automatizar los canales de datos debido a su uso repetido y rutinario. La automatización es fundamental para sacar el máximo provecho del Big Data en las actividades de vigilancia y monitoreo. Desafíos y oportunidades. La aparición de Big Data supone implicaciones para la educación de epidemiólogos veterinarios, entre las que se encuentran capacidades técnicas como la programación, que no puede constituir un elemento habitual en la formación epidemiológica.

Aunque los epidemiólogos no tienen la responsabilidad de desarrollar aplicaciones de software, es crucial que tengan la habilidad para manejar bases de datos relacionales o redacción sencilla en un lenguaje de programación con el objetivo de simplificar la preparación de datos

para su análisis cuando se transforman en conjuntos demasiado grandes para procesarlos a mano (Dyndyn, 2024).

El análisis de Big Data, por otro lado, frecuentemente requiere el empleo de recursos de supercomputación, que normalmente demandan un cierto conocimiento sobre procesamiento paralelo y sistemas tecnológicos de información. Para capacitar a la fuerza laboral actual, se requieren talleres prácticos de computación. Los programas de posgrado actuales deben ser ampliados para incorporar conocimientos básicos de epidemiología, así como habilidades en codificación, estadística tradicional y computadoras.

Para sacar provecho del potencial del Big Data, es necesario que posicionemos nuestra fuerza laboral y sistemas con miras al futuro. En realidad, el Big Data no debe ser caracterizado como una entidad existente, sino más bien como un potencial. El verdadero potencial del Big Data es generar valor a partir de elementos diversos y caóticos, además de obtener ideas en tiempo real a partir de flujos de datos. Esto da lugar a una posibilidad que podría ser revolucionaria para la epidemiología veterinaria.

El empleo de Big Data en veterinaria convierte la información masiva que se obtiene a través de registros clínicos electrónicos (EMR), sensores y laboratorios en inteligencia que puede ser utilizada. A diferencia de la telemetría, que analiza al individuo, el Big Data se enfoca en estudiar patrones históricos y poblaciones con el propósito de perfeccionar el proceso de tomar decisiones a nivel individual (Durán, 2025).

El uso de Big Data en la medicina veterinaria moderna es un avance importante en el desarrollo de esta disciplina clínica, ya que posibilita el paso definitivo desde un diagnóstico que se basa en la sospecha y la observación empírica hacia otro que se apoya en el análisis predictivo masivo y la probabilidad estadística. El poder procesar cantidades enormes de información diversa, como son los perfiles genómicos, los datos de sensores IoT, los registros clínicos electrónicos y los resultados obtenidos en laboratorio, le brinda al profesional una herramienta diagnóstica y epidemiológica sin igual (Andreu et al., 2015).

Uno de los pilares más importantes en términos sociales y económicos es la identificación temprana de focos infectocontagiosos. Los algoritmos tienen la capacidad de detectar patrones inusuales, como un aumento anormal en los síntomas digestivos o respiratorios en una

zona geográfica específica, al examinar miles de registros clínicos con sistemas de vigilancia sindrómica en tiempo real. Esta habilidad para alertar con anticipación posibilita que los clínicos veterinarios y las autoridades de salud pongan en marcha protocolos de contención y medidas de bioseguridad antes de que un foco aislado se convierta en una epidemia local, resguardando así la salud pública y la salud animal desde el punto de vista del enfoque "Una Sola Salud" (One Health) (FAO UNO, 2026).

Además, la medicina preventiva es reconfigurada por el Big Data a través de modelos de aprendizaje automático que identifican a los "pacientes de riesgo". Los algoritmos que han sido entrenados con millones de casos históricos hacen posible determinar correlaciones complejas entre variables que, de otro modo, quedarían sin ser advertidas. Por ejemplo, se puede calcular que un perro de raza concreta, con un perfil bioquímico específico y una edad determinada, tiene un 85% de posibilidades de padecer insuficiencia renal crónica en el transcurso de dos años (Durán, 2025).

Esta habilidad predictiva permite al médico poner en marcha intervenciones terapéuticas tempranas, como dietas renales preventivas o protocolos de monitorización específicos, lo que cambia de manera importante el curso natural de la enfermedad y mejora la calidad de vida del paciente, así como su longevidad. En definitiva, el Big Data no solo mejora la administración clínica individual, sino que también refuerza la capacidad de recuperación del sistema sanitario veterinario ante complejos retos globales.

La analítica de datos masivos ha establecido una infraestructura para respaldar las decisiones clínicas, la cual posibilita elegir tratamientos con una tasa de éxito mejorada que se adapta estrictamente al perfil individualizado de cada paciente. Esta técnica va más allá de la medicina general y establece una veterinaria de precisión, que permite generar mapas de resistencia bacteriana a través del procesamiento masivo de antibiogramas en áreas geográficas concretas. Gracias a estos recursos, el doctor puede prescribir un antibiótico con menor riesgo de resistencia para una infección específica (una uropatía, por ejemplo) antes de que se obtengan los resultados del cultivo microbiológico. Así, se enfrenta de forma estratégica a la resistencia antimicrobiana (Andreu et al., 2015).

Esta habilidad analítica se aplica también en la farmacovigilancia avanzada, donde el Big Data detecta efectos secundarios de baja frecuencia o idiosincrásicos que a menudo son ignorados en ensayos clínicos más pequeños y tradicionales. Al cruzar información de miles de recetas médicas y progresiones clínicas en tiempo real, se crean perfiles farmacológicos más sólidos, lo que asegura una terapia más confiable para múltiples razas y especies (Dyndyn, 2024).

El Big Data es como un consejero especializado que colabora con el veterinario en casos difíciles, a través del análisis de imágenes con ayuda de inteligencia artificial. Es posible detectar microfRACTURAS o nódulos incipientes que podrían no ser visibles para el ojo humano al comparar las imágenes presentadas con bases de datos globales de enfermedades confirmadas, mediante el procesamiento algorítmico de miles de tomografías, radiografías y ecografías. Este grado de precisión se ve reforzado por la integración genómica, que permite compaginar los datos del bioma y el genoma animal con su historial clínico. Este entrecruzamiento de datos es fundamental en oncología, ya que permite prever la respuesta individual a protocolos determinados de quimioterapia. Esto posibilita que el tratamiento se ajuste con el fin de maximizar su eficacia y reducir la toxicidad sistémica.

La implementación de estas tecnologías en la industria ganadera y productiva mejora tanto los niveles de bienestar animal como el rendimiento financiero. Comparar los datos de crecimiento con variables ambientales importantes, como la temperatura y la humedad, posibilita el reconocimiento de grupos animales que manifiestan respuestas fisiológicas al alimento que no son idóneas. Esta supervisión permite que se realicen cambios nutricionales flexibles que mejoran la sostenibilidad del sistema de producción (Veterinaria el Buen Pastor, 2026).

Los algoritmos que pronostican el parto influyen de manera significativa en la salud del neonato. Estos sistemas pueden predecir el momento exacto del parto con horas de anticipación si se revisan al mismo tiempo la temperatura ruminal, los patrones de movimiento y las oscilaciones en la frecuencia cardíaca. Esta capacidad de anticipar hace posible una asistencia técnica oportuna, que reduce considerablemente la mortalidad neonatal y asegura un inicio saludable para las crías. Esto refuerza el compromiso de la medicina veterinaria con la vida y con su rendimiento operativo (Appleby & Basran, 2022).

Para implementar esto en una clínica o sistema de salud animal, se puede seguir el siguiente esquema:

Tabla 3. Estructura de la Toma de Decisiones Basada en Datos

Etapa	Acción del Sistema	Decisión Clínica Resultante
Ingesta	Recopila datos de IoT, sensores y laboratorio.	Consolidación del historial médico completo.
Procesamiento	Limpieza y normalización de datos.	Identificación de valores atípicos (<i>outliers</i>).
Análisis	Aplicación de <i>Machine Learning</i> y estadística.	Generación de una lista de diagnósticos probables.
Visualización	<i>Dashboards</i> y alertas automáticas.	Acción inmediata: Cambio de medicación o cirugía.

Adaptado de (Dyndyn, 2024)

El profesional tiene que afrontar retos en términos de estructura, ética y operación para poder transitar hacia una medicina veterinaria digitalizada y basada en la evidencia algorítmica. La comunidad veterinaria debe afrontar el requerimiento de una infraestructura de datos sólida, en la que la estandarización es el primer pilar fundamental, para que el potencial del Big Data se convierta en un avance significativo de la salud animal. Para que los sistemas predictivos sean eficaces, es necesario que hospitales y centros clínicos utilicen lenguajes y códigos clínicos universales, como el SNOMED CT. Si no existe esta homogeneidad terminológica, la información obtenida de diferentes fuentes no puede ser comparada, lo cual fragmenta el conocimiento y reduce la habilidad de los algoritmos para detectar patrones epidemiológicos a nivel mundial (National Library of Medicine, 2026).

La calidad de los datos recopilados en el punto de atención es otro reto esencial. La precisión y veracidad del registro clínico electrónico se vuelven el insumo esencial del sistema, de acuerdo con el principio técnico de "*garbage in, garbage out*" (basura entra, basura sale). El veterinario actual tiene la obligación de registrar con un estricto rigor metodológico cada consulta, sabiendo que una falta o un dato impreciso no solo perjudica al paciente en particular, sino

que también deteriora la base de datos colectiva. Esto pone en peligro la confiabilidad de las alertas tempranas y los diagnósticos emitidos por la Inteligencia Artificial (Imveterinaria, 2026).

El análisis bioinformático y las nuevas tecnologías de secuenciación masiva (ómicas) están agilizando la identificación de biomarcadores y otros factores de riesgo vinculados con el surgimiento de enfermedades, lo que está simplificando el estudio de los procesos biológicos más complejos. Se ha sugerido recientemente que, si se incorporan estas técnicas de nueva generación en entornos clínicos con múltiples disciplinas, podrían surgir estrategias de diagnóstico y tratamiento más exactas que las convencionales. Esta nueva modalidad de medicina, también llamada medicina de precisión, se fundamenta en el análisis masivo de los datos individuales de cada paciente y su comparación con bases de datos extensas (Big Data).

Este nuevo campo de estudio, que ha sido posible gracias a las nuevas tecnologías, ha permitido identificar y describir nuevos mecanismos fisiopatológicos a nivel molecular en muestras obtenidas de pacientes con estas enfermedades bajo condiciones clínicas naturales. Los hallazgos obtenidos en relación con la diabetes insulino dependiente señalan que las mutaciones genómicas situadas en el grupo encargado de sintetizar la cadena pesada de las inmunoglobulinas influyen en la predisposición genética a esta enfermedad, ya que pueden interferir en la producción de anticuerpos autorreactivos y favorecer, bien el surgimiento de un fenotipo resistente (como ocurre con la variante rs851728071), o bien el surgimiento de un fenotipo susceptible (como sucede con la variante rs852072969).

En relación a la leishmaniosis canina, los análisis bioestadísticos de las historias clínicas de más de mil pacientes con dicha enfermedad que fueron atendidos en la Consulta de Patología Infecciosa y Parasitaria del Hospital Clínico Veterinario Complutense durante los últimos veinte años han permitido el reconocimiento de parámetros clínicos y epidemiológicos (por ejemplo, raza, tamaño corporal, tipo de hábitat, vacunación contra *L. infantum*, enfermedades concomitantes y uso frecuente de antihelmínticos) que afectan no solo al riesgo de infección sino también a la probabilidad de padecer formas clínicas severas de leishmaniosis.

Asimismo, se ha conseguido crear un modelo predictivo que permite establecer el estadio clínico de la leishmaniosis en cada paciente a partir de los datos recabados durante la anamnesis y el examen físico completo, incluso cuando aún no se cuenta con información del

laboratorio. Esto evidencia las amplias posibilidades que ofrecen las metodologías de Big Data para diagnosticar y hacer seguimiento a esta enfermedad.

Las investigaciones genómicas también señalan que la genética individual de cada paciente es fundamental para establecer el nivel de vulnerabilidad clínica a la leishmaniosis. Hay varias áreas genómicas bajo selección vinculadas con la aparición de formas severas de esta enfermedad, las cuales contienen numerosos genes candidatos que podrían estar involucrados en la regulación de la respuesta inmunitaria durante la infección; entre estos se encuentran los relacionados con la rama IRE1 de la reacción a proteínas mal plegadas (Rodríguez, 2023).

La digitalización plantea el desafío de interpretar los resultados desde una perspectiva ética. Sucede lo mismo cuando se aplica a la veterinaria. A pesar de que el Big Data brinda proyecciones con base en probabilidades estadísticas muy precisas, estas no deben reemplazar el juicio clínico ni la ética profesional. El médico veterinario, teniendo en cuenta la relación con el tutor del animal y las circunstancias bioéticas específicas de cada caso, es quien filtra y contextualiza la información algorítmica. La resolución final ha de equilibrar la eficacia tecnológica con la empatía y los preceptos del bienestar animal, garantizando que la tecnología sea una herramienta de apoyo y no un factor mecánico que pase por alto lo complejo de la relación entre humanos y animales (Pramanik, et al, 2020).

1.4. El impacto en el bienestar animal y la detección temprana de dolor.

La inclusión de la tecnología digital en la veterinaria ha generado un impacto revolucionario en el manejo del bienestar de los animales, logrando finalmente superar la barrera del "silencio" biológico de los pacientes. Una gran cantidad de especies, especialmente los équidos, los animales de producción y los felinos, tienen la tendencia a esconder el dolor para no parecer vulnerables frente a potenciales depredadores. Este fenómeno clínico complicado se conoce como *masking*. En vista de esta restricción diagnóstica, las herramientas digitales surgen como un recurso fundamental para identificar lo que el ojo humano no es capaz de ver, convirtiendo la evaluación subjetiva en una ciencia exacta biométrica (BM Editores, 2026).

Por ejemplo, la incorporación de sistemas inteligentes en el monitoreo de salud de los establos porcinos ha producido una transformación fundamental en cómo se maneja el bienestar de los animales. Las herramientas asistidas por inteligencia artificial, en vez de constituir una

amenaza para el juicio profesional, se están convirtiendo en un apoyo técnico muy valioso para los equipos veterinarios. Es esencial poder anticipar cambios en la salud de los animales o en su entorno en circunstancias de producción intensiva, donde la escala enfrenta desafíos constantes. En estas condiciones, la tecnología permite transformar los datos en valiosos conocimientos clínicos, lo que fortalece el enfoque de prevención y mejora la eficacia de las decisiones dentro de las unidades productivas.

Las plataformas inteligentes, además de optimizar la vigilancia cotidiana, están contribuyendo a robustecer el acatamiento de protocolos sanitarios, de trazabilidad y bioseguridad. Cada registro, ya sea de datos ambientales, sensores de actividad o eventos clínicos, se documenta y se incorpora a una base histórica que puede ser utilizada para hacer revisiones de procesos, para el cumplimiento normativo o para análisis epidemiológicos. Esta trazabilidad digital no solo acelera las auditorías, internas y externas, sino que además posibilita la creación de pruebas científicas sobre el efecto de las decisiones que se toman (BM Editores, 2026).

En las granjas que han aplicado este tipo de soluciones, se ha podido medir el beneficio. Las tasas de morbilidad por afecciones respiratorias han disminuido, los índices de conversión alimenticia han mejorado y las pérdidas debidas a causas evitables se han reducido. Además, se ha documentado un cumplimiento más adecuado de los criterios solicitados por las cadenas de valor que requieren una mayor responsabilidad en términos sanitarios y de transparencia. Estos sistemas no desplazan al profesional, sino que fortalecen su habilidad de responder con más estrategia e información.

La valoración del dolor, de manera tradicional, se ha basado en escalas descriptivas y visuales, como la Escala de Glasgow. A pesar de ser útiles, estas escalas tienen un componente subjetivo que depende del observador. La biometría objetiva, que se basa en el análisis de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC), es introducida por la tecnología moderna como un biomarcador de referencia. Los biosensores de alta fidelidad pueden identificar alteraciones milimétricas en los espacios entre latidos porque el dolor activa inmediatamente el sistema nervioso simpático. Esta oscilación rítmica está relacionada directamente con el efecto hemodinámico del dolor y el nivel de estrés, tanto en cuadros agudos como en procesos crónicos degenerativos (Universo de la salud animal, 2026).

Por otra parte, la convergencia entre la etología digital y la inteligencia artificial ha hecho posible que el reconocimiento de signos sutiles se automatice por medio de la visión artificial. Los algoritmos avanzados detectan mínimas variaciones en la posición de las orejas, la tensión del hocico o la apertura de los párpados en animales como vacas, gatos y ratones a través del análisis de "unidades de acción facial", que se fundamentan en las Grimace Scales. Estos sistemas de inteligencia artificial tienen la capacidad de emitir alertas sobre dolor clínico mucho antes de que el animal presente síntomas claros de anhedonia o depresión, como dejar de comer o postrarse (Rosado et al., 2025).

Al monitorear la acelerometría y los patrones del sueño, se obtiene una visión objetiva de cómo el paciente actúa en el hogar o en su lugar de trabajo. Los sensores de actividad permiten medir la frecuencia con que cambian las posiciones, la fragmentación del sueño y el nivel general de movilidad. Estos datos son fundamentales para el diagnóstico y el seguimiento del dolor osteoarticular, especialmente en pacientes de edad avanzada. Esto garantiza que el tratamiento analgésico se ajuste a la realidad fisiológica del animal y no solamente a lo que su cuidador o tutor observa desde fuera (Veterinaria el Buen Pastor, 2026).

El progreso de la tecnología digital en la medicina veterinaria no solo se ha enfocado en el tratamiento de enfermedades físicas, sino que también ha ampliado su alcance hasta incluir la vigilancia del bienestar ambiental y emocional. Partiendo del supuesto de que el bienestar animal va más allá de la simple falta de enfermedad para convertirse en un estado emocional positivo y equilibrado, la incorporación de sistemas inteligentes posibilita una gestión holística del ambiente y de la reacción afectiva del paciente.

El control de las variables externas se ha automatizado mediante la utilización de sensores ambientales IoT, que monitorean en tiempo real factores esenciales como la concentración de amoníaco, la humedad relativa o la temperatura térmica en refugios o instalaciones productivas. Esta habilidad de monitoreo permite que el estrés térmico o respiratorio sea detectado y corregido de manera automática a través de sistemas inteligentes de ventilación, garantizando un microclima óptimo que previene el malestar físico (Dyndyn, 2024).

Además, el estudio de las vocalizaciones y la bioacústica es un límite innovador en la etología digital. Es factible descifrar el espectro de sonido emitido por especies como aves o cerdos a

través de la utilización de micrófonos muy sensibles que estén conectados a algoritmos de inteligencia artificial. Estas herramientas diferencian con exactitud diagnóstica entre vocalizaciones que corresponden al hambre, al juego o a situaciones de dolor agudo y distrés respiratorio. Esta interpretación automatizada del lenguaje animal permite realizar intervenciones de manera inmediata, garantizando que las necesidades físicas y emocionales del grupo sean cubiertas antes de que se conviertan en crisis a nivel sistémico (Appleby & Basran, 2022).

En su habilidad de impedir que el paciente llegue a situaciones críticas de vulnerabilidad, se encuentra la repercusión más significativa que estas tecnologías tienen en el bienestar de los animales. Detectar cojeras subclínicas en ganado bovino y équidos es un ejemplo representativo. Se pueden detectar cambios sutiles en la biomecánica de la pisada semanas antes de que sean visibles para el ojo humano a través del empleo de sistemas de análisis de marcha por video y placas digitales de presión. Este tipo de detección temprana evita el surgimiento de dolor crónico que proviene de heridas mal tratadas y mejora la duración funcional del animal.

La experiencia de convalecencia se ha transformado gracias al telemonitoreo postquirúrgico. Permitiendo que el animal termine de recuperarse en casa, su ambiente seguro y conocido, se disminuye significativamente el "estrés por hospitalización", un elemento que generalmente afecta el sistema inmunológico del animal y retrasa la curación. El médico veterinario controla las constantes vitales de forma remota mientras el paciente reposa en su entorno natural, asegurando una transición segura y con un enfoque humanizado hacia la salud integral, en la que el equilibrio hemodinámico y el bienestar psicológico tienen igual importancia (Lustgarden, et al, 2020).

La atención crítica, que tiene como elemento fundamental un enfoque humanista, se centra en la dignidad y el bienestar integral de los pacientes; por lo tanto, trasciende el ámbito tecnológico. La humanización impacta no solo en la atención de los animales, sino también en la experiencia de las personas y del personal que se encuentran en zonas críticas. Los estudios han evidenciado que es imprescindible un equilibrio entre la interacción humana y el empleo de tecnologías avanzadas para humanizar los sectores críticos. Para optimizar la experiencia de los profesionales y los pacientes en cuidados intensivos, así como para robustecer la comuni-

cación terapéutica, fue esencial promover la formación en habilidades blandas y en atención humanizada (Guachi, et al, 2025).

Cuando digitalizamos las constantes vitales y el comportamiento, estamos brindándole una "voz" al animal. Esto no solo aumenta la calidad de vida y la longevidad, sino que también disminuye el peso emocional y ético del veterinario y del tutor, ya que tienen la certeza científica de que el animal no está padeciendo en silencio.

A continuación, se presenta un cuadro general del paso de la veterinaria, antes de la tecnología digital, a su transformación con ella.

Tabla 4. *El paso de la veterinaria tradicional a la digital*

Antes de la Tecnología Digital	Con Tecnología Digital (IA/IoT/Big Data)
El animal debe mostrar síntomas para ser tratado.	El sistema alerta sobre cambios fisiológicos invisibles.
Evaluación del dolor cada 4-8 horas (subjetiva).	Monitorización 24/7 (objetiva y basada en datos).
El bienestar se asume si el animal produce/come.	El bienestar se mide mediante biomarcadores y conducta.
Intervención reactiva (se trata la enfermedad).	Intervención proactiva (se mantiene el bienestar).

Adaptado de (Lustgarden, et al, 2020)



Inteligencia Artificial en veterinaria: El Copiloto del Diagnóstico

2

CAPÍTULO 2.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN VETERINARIA: EL COPILOTO DEL DIAGNÓSTICO

Edison Macgyver Barragán Taco, Gabriela Mercedes Ordóñez Andrade,
Byron Enrique Borja Caicedo y Julio César Bravo Brito.

2.1. Algoritmos de *Deep Learning* en diagnóstico por imagen (Rayos X, Eco, TAC) en veterinaria

La integración de la Inteligencia Artificial (IA) en la actual medicina veterinaria ha hallado uno de sus cimientos más sólidos en el aprendizaje profundo (DL), un campo avanzado basado en redes neuronales profundas que está revolucionando el diagnóstico por imagen en la industria veterinaria. Los sistemas de aprendizaje profundo (DL, por sus siglas en inglés) tienen la habilidad inherente de aprender de manera independiente, a diferencia de los métodos computacionales tradicionales que se basan en una programación estricta y en la definición manual de variables por un operador humano. El sistema, a través del análisis de una gran cantidad de investigaciones anteriores, puede detectar patrones patológicos complejos que a veces son sutiles para el ojo humano, lo cual mejora la exactitud diagnóstica en técnicas como la ecografía, los Rayos X y la tomografía computarizada (TAC) (Aranda, 2026).

La creación de tecnologías fundamentadas en la inteligencia artificial ha demostrado ser una opción destacable, particularmente relevante para el diagnóstico parasitológico, como es el caso de la crianza de ganado equino. El objetivo de los sistemas automatizados de conteo de huevos es disminuir la subjetividad vinculada al observador humano, uniformizar los procedimientos analíticos y mejorar la duración del procesamiento, sin dejar de lado niveles apropiados de precisión diagnóstica (Grandi et al., 2025).

Investigaciones recientes han analizado el rendimiento de plataformas automatizadas en una variedad de especies y escenarios, reportando resultados semejantes a los de las técnicas tradicionales, aunque con diferencias que dependen del diseño del sistema, la carga parasitaria y la especie parasitaria.

La detección y cuantificación de huevos parasitarios es posible a través del sistema Parasight Inc., el cual combina la toma automatizada de muestras, el procesamiento de imágenes fluorescentes y algoritmos de aprendizaje automático. A pesar de que esta clase de tecnologías ha demostrado resultados alentadores en investigaciones anteriores, su rendimiento puede cambiar dependiendo de la especie hospedadora, la variabilidad en los conteos y las condiciones reales de un laboratorio diagnóstico (Grandi et al., 2025).

El procedimiento técnico para introducir estas herramientas en el ámbito clínico se inicia con la definición de la arquitectura y el entrenamiento, en los que las redes neuronales convolucionales (CNN) son predominantes. Estas redes están creadas concretamente para procesar datos organizados en cuadrículas de píxeles, lo que las convierte en perfectas para la interpretación visual. En la etapa de entrenamiento, el algoritmo es entrenado con grandes bases de datos correctamente etiquetadas (como distinguir entre "Tórax sano" y "Edema cardiogénico"). La red, mediante un proceso de aprendizaje jerárquico, empieza detectando elementos simples como texturas y bordes, para terminar reconociendo estructuras anatómicas complejas y signos radiológicos fundamentales (Villanueva et al., 2024).

La Segmentación y la Detección de Objetos muestran la capacidad operativa del modelo después de haber sido entrenado. En esta fase, el software va más allá de la mera clasificación de imágenes para llevar a cabo tareas de alta precisión: la segmentación permite determinar el contorno exacto de órganos o tumores, posibilitando cálculos volumétricos exactos (como el tamaño del contorno cardíaco en una radiografía), y la detección usa cuadros delimitadores o mapas térmicos (*heatmaps*) para marcar áreas sospechosas, guiando así al veterinario hacia descubrimientos que podrían ser patológicos (Chu, 2026).

La efectividad de esta tecnología se encuentra en su integración en el flujo de trabajo clínico a través de los sistemas PACS/DICOM. El algoritmo no funciona de manera independiente; en realidad, se enlaza directamente con el sistema que la clínica tiene para almacenar y transmitir imágenes. Después de realizar un TAC o una radiografía, la imagen se transmite automáticamente a la nube para ser procesada. En cuestión de segundos, el sistema proporciona un informe preliminar o asistencia visual en el monitor del especialista. Esta sinergia no solo dis-

minuye el tiempo de respuesta, sino que también funciona como un segundo punto de vista especializado, mejorando la norma de atención y exactitud en la práctica veterinaria moderna.

La inclusión del aprendizaje profundo (DL) en la práctica veterinaria actual no solo es un progreso técnico, sino una transformación de paradigma que mejora la exactitud, la eficacia y el rango de los servicios clínicos. Una de las ventajas más críticas es la reducción del error humano derivado de la fatiga. En entornos de alta demanda, el agotamiento visual tras interpretar decenas de estudios radiográficos puede comprometer la detección de hallazgos sutiles. El algoritmo, al actuar como un "segundo lector" incansable, garantiza una homogeneidad diagnóstica absoluta; mantiene la misma agudeza analítica en el primer estudio de la jornada que en el último, funcionando como un filtro de seguridad esencial para el clínico (Basak et al., 2018).

Este procesamiento constante se traduce en una velocidad significativa para el triaje de emergencias. En hospitales con un alto número de pacientes, la IA puede llevar a cabo una prelectura inmediata de las imágenes para dar prioridad automáticamente a aquellos casos que muestran hallazgos críticos, como por ejemplo una torsión gástrica (GDV) o un neumotórax. El sistema mejora los tiempos de respuesta terapéutica al poner estas urgencias al principio de la lista de revisión del radiólogo, lo que es crucial para que el paciente en estado crítico sobreviva.

Además, el *Deep Learning* proporciona una cuantificación objetiva que supera la variabilidad interobservador típica de la medicina convencional. En la radiología, posibilita que se calcule de manera automática y exacta el Índice de Buchanan (VHS) con el fin de estudiar cardiomegalias. En lo que concierne a la ecografía, permite el cálculo inmediato de la fracción de eyección o del flujo Doppler; en cambio, en los cortes, como el TAC o la Resonancia Magnética (RM), hace posible obtener cálculos volumétricos precisos de las masas tumorales. Esta precisión es fundamental para monitorear objetivamente la respuesta a tratamientos de quimioterapia, sustituyendo estimaciones subjetivas por datos métricos rigurosos (Dantas-Torres, 2023).

La implementación de estos algoritmos democratiza el **acceso a la especialidad en zonas geográficas remotas**. En clínicas que no cuentan con un radiólogo diplomado de planta, las herramientas de IA ofrecen un cribado inicial de alta calidad. Esto proporciona al médico general una base sólida para la toma de decisiones urgentes o para determinar, con mayor criterio, qué casos requieren ser derivados a servicios de telemedicina especializada. De este

modo, la IA actúa como un puente tecnológico que eleva el estándar de la medicina veterinaria global, independientemente de la infraestructura local disponible (Rivera, et al, 2019).

Tabla 5. Comparación de Aplicación del Deep Learning en veterinaria por Modalidad

Modalidad	Aplicación del Deep Learning	Ejemplo Clínico
Rayos X	Clasificación de patrones pulmonares y óseos.	Detección de metástasis pulmonares milimétricas.
Ecografía	Identificación de órganos y guía de punción.	Reconocimiento automático de nódulos esplénicos.
TAC / RM	Reconstrucción 3D y segmentación de tejidos.	Planificación quirúrgica de tumores complejos.

Adaptación de (Sánchez, et al, 2024)

A pesar de las ventajas disruptivas que ofrece la Inteligencia Artificial en el ámbito clínico, su implementación plena enfrenta **desafíos técnicos y consideraciones éticas** fundamentales que deben abordarse para garantizar la seguridad del paciente. El obstáculo técnico más significativo es la **variabilidad de especies y razas**. A diferencia de la medicina humana, donde la anatomía es relativamente uniforme, la veterinaria exige algoritmos con una capacidad de "generalización" excepcional. Un modelo entrenado predominantemente con caninos de raza Labrador podría presentar sesgos o fallos diagnósticos al ser aplicado en un Bulldog, debido a las diferencias conformacionales, o en especies distintas como los felinos. La creación de bases de datos robustas y multiespecie es, por tanto, el mayor reto actual para asegurar que la herramienta sea fiable en la diversidad de la práctica diaria (Rosado et al., 2025).

A esta complejidad técnica se suma el fenómeno de la "Caja Negra" (**Black Box**), un problema intrínseco de las redes neuronales profundas donde los procesos internos para llegar a una conclusión resultan opacos para el usuario. Para reducir la desconfianza que esto crea en el campo médico, se están incorporando métodos de IA explicable (XAI). Estas herramientas posibilitan "desbloquear" la caja negra, creando mapas de calor que destacan los píxeles particulares que definieron el diagnóstico. Así, el médico puede comprobar si el algoritmo está detectando correctamente una lesión o si se está distrayendo con estructuras sin importancia o artefactos técnicos (Chu, 2026).

La implementación de estas tecnologías implica una reflexión intensa sobre la responsabilidad profesional y legal. Es fundamental entender que, desde un punto de vista ético y legal, el algoritmo es esencialmente una herramienta auxiliar y no un reemplazo del juicio clínico. El veterinario colegiado es el que tiene la responsabilidad última de cualquier diagnóstico hecho y de la receta de los tratamientos que resulten de este. La IA funciona como un consultor digital de gran precisión; sin embargo, la validación humana sigue siendo el último y más relevante filtro en la cadena de atención médica para animales (Villanueva et al., 2024).

Hoy en día, para crear herramientas digitales para la medicina veterinaria es imprescindible diferenciar con claridad entre las soluciones comerciales que mejoran el ejercicio clínico diario y la rigurosidad metodológica indispensable para validar estas tecnologías en la investigación científica. En la medida en que progresamos, el estado del arte en software de inteligencia artificial para radiología se caracteriza por plataformas que no solo brindan análisis automatizados, sino que también se incorporan sin problemas al ecosistema digital del centro veterinario (Durán, 2025).

SignalPET es una de las herramientas más penetrantes en el mercado, y su fortaleza se basa en una base de datos compuesta por millones de estudios de rayos X. Este sistema es sobresaliente por su habilidad de identificar más de 50 hallazgos clínicos habituales en tiempo real. Su interfaz de funcionamiento emplea un sencillo sistema de "semáforos" (positivo, negativo o sospechoso), que se integra directamente en la pantalla clínica. Esto facilita una rápida toma de decisiones durante la consulta (Signal Pet, 2026).

La especialización, por otro lado, ha llegado a campos críticos como la odontología. Con la presentación de RapidRead para odontología felina, Antech afianzó su posición de liderazgo. Este programa informático se ocupa de uno de los retos más grandes en la diagnosis de gatos: el reconocimiento de enfermedades periodontales y reabsorciones radiculares. El sistema tiene la capacidad de procesar y examinar radiografías dentales en menos de 10 minutos, lo que permite un diagnóstico preciso mientras el paciente está todavía bajo anestesia (Antech diagnostic, 2026).

La versatilidad es otra característica de las plataformas líderes, como es el caso de **VETSCAN ImagySt (Zoetis)**. Aunque su origen se centró en la citología y coprología, ha evolucionado

mediante algoritmos de *Deep Learning* hacia el análisis avanzado de frotis sanguíneos y radiología torácica. Esta multifuncionalidad hace posible que se concentren en una única plataforma varios diagnósticos, lo cual mejora la utilización de los recursos del laboratorio interno (Animal Health, 2026).

El modelo híbrido de asistencia se ilustra con ejemplos como Vetology AI. Esta herramienta sobresale por producir informes virtuales automáticos en pocos minutos, pero conserva un elemento de seguridad fundamental al habilitar la posibilidad de escalar el caso a un radiólogo diplomado humano si el algoritmo detecta una "alta ambigüedad". Este enfoque asegura que, incluso ante casos complejos o atípicos, la tecnología actúe como un facilitador que siempre cuenta con el respaldo del criterio experto (Animals Health, 2026).

Para garantizar que la integración del **Deep Learning (DL)** en la medicina veterinaria no sea solo una innovación tecnológica, sino un avance médico seguro, es imperativo seguir protocolos de validación científica de alta rigurosidad. El pilar fundamental de cualquier investigación en este campo es el establecimiento del "**Gold Standard**" o **Verdad de Terreno (Ground Truth)**. La validación requiere una referencia infalible porque un algoritmo es tan preciso como los datos con los que se compara. En el ámbito veterinario, esto se consigue con la aprobación de expertos —en la que al menos tres radiólogos diplomados (DACVR o DECVDI) etiquetan las imágenes de manera independiente— o, mejor aún, por medio de hallazgos quirúrgicos, necropsias o biopsias definitivas que verifiquen de manera contundente la enfermedad indicada por la imagen (Durán, 2025).

La evaluación de la confiabilidad de un software no solo necesita el cálculo de la tasa de aciertos, sino también que se informen detalladamente las métricas estandarizadas de rendimiento. El cálculo de la sensibilidad (la habilidad para identificar una enfermedad) y la especificidad (la capacidad para excluir a los pacientes sanos) es un requisito en el diseño de proyectos de investigación. En una Curva ROC, el Área Bajo la Curva (AUC) es un parámetro crucial; si está entre 0.90 y 0.95, significa que se tiene una excelente capacidad de diagnóstico. Igualmente, el Valor Predictivo Positivo (VPP) tiene una importancia ética y clínica esencial, puesto que un indicador deficiente en este aspecto podría resultar en falsos positivos y llevar a intervenciones invasivas o cirugías innecesarias en animales sanos (Castaño, 2021).

Para prevenir el fenómeno del *overfitting* o sobreajuste, la rigurosidad metodológica requiere un control minucioso del protocolo de prueba (Test Set). Es crucial validar el algoritmo únicamente con un *Hold-out Test Set*, que consiste en un banco de imágenes que el sistema no haya "conocido" en su fase de entrenamiento. Si se validara con los mismos datos que se usaron para el aprendizaje, la precisión de los resultados sería artificialmente alta y no tendría validez científica. La separación de datos de manera ciega es el único modo de garantizar que la Inteligencia Artificial tiene una auténtica habilidad para generalizar, lo cual facilita su paso seguro desde el ambiente del laboratorio a la práctica clínica real.

La validación estricta de los algoritmos de *Deep Learning* es más que un requisito administrativo; es una protección clínica y ética que asegura la precisión y equidad en la medicina veterinaria. Uno de los beneficios más importantes de este procedimiento es la identificación y reducción de prejuicios raciales. Un algoritmo mal validado podría confundir la estructura anatómica normal de razas braquicefálicas, como el Bulldog, con enfermedades respiratorias o cardíacas, ya que hay una amplia diversidad fenotípica entre los pacientes. Una validación completa posibilita detectar estas desviaciones técnicas, garantizando que el software sea capaz de diferenciar entre las particularidades fisiológicas de cada raza y los síntomas reales de enfermedad (Castaño, 2021).

La investigación contemporánea se ha enfocado en la IA explicable (XAI) para obtener una comprensión más profunda de la confiabilidad de estos sistemas. En esta fase, es crucial utilizar métodos como Grad-CAM (*Gradient-weighted Class Activation Mapping*) porque producen mapas de calor que indican de manera visual las áreas de la imagen que tuvieron un impacto en la decisión del algoritmo. Es esencial esta validación visual para corroborar que la inteligencia artificial no está "adivinando" el resultado con base en artefactos de la imagen, marcas de posición o el fondo del estudio radiográfico, sino que está analizando la lesión real, como una fractura o un nódulo pulmonar (García, 2026).

Es necesario que los investigadores sigan marcos de trabajo estandarizados cuando hagan públicas sus conclusiones, con el fin de que estos resultados tengan validez en la comunidad científica global. Es fundamental seguir las guías STARD (*Standards for Reporting Diagnostic Accuracy*) o, más concretamente para el ámbito digital, las guías CLAIM (*Clinical AI Modeling*).

Estos protocolos garantizan que la metodología sea transparente y reproducible, así como que los datos de rendimiento presentados sean un fiel reflejo de la capacidad clínica del instrumento. La única manera de generar la confianza indispensable para que la Inteligencia Artificial se establezca como un aliado infalible en los centros de diagnóstico veterinario es a través de esta rigurosidad metodológica (García, 2026).

2.2. Sistemas de Soporte a la Decisión Clínica (CDSS)

Los Sistemas de Soporte a la Decisión Clínica (CDSS) en medicina veterinaria representan una evolución tecnológica fundamental, consolidándose como herramientas de software diseñadas para asistir a los profesionales en la toma de decisiones clínicas fundamentadas en datos. A diferencia de las bases de datos estáticas o las enciclopedias en línea, un CDSS funciona interactivamente, fusionando la información individual del paciente —como su edad, especie, constantes fisiológicas y hallazgos laboratoriales— con una base de datos científica que se actualiza continuamente para ofrecer recomendaciones individuales y situacionales para cada caso clínico (Bonis, et al, 2004).

La taxonomía de estos sistemas posibilita su clasificación en función de su funcionamiento y del momento de la consulta en el que participan. Los CDSS basados en reglas, que se conocen también como sistemas expertos, son la primera categoría. Estos funcionan con un pensamiento determinista de "Si [Condición], entonces [Acción]". Su uso es esencial en la seguridad del paciente, lo cual se refleja en alertas automáticas sobre interacciones de medicamentos o recordatorios de protocolos de vacunación que dependen del modo de vida del animal. Un caso crítico se presenta cuando el software identifica que un corticoide y un antiinflamatorio no esteroideo (AINE) se prescriben al mismo tiempo; en esta situación, el sistema emite de inmediato una alerta roja para evitar problemas serios como la úlcera gástrica (CSUSES, 2026)

Por otro lado, los CDSS Basados en Datos, que emplean técnicas de *Machine Learning* e IA, han abierto la puerta al análisis de patrones complejos que pueden pasar inadvertidos para el ojo humano en analíticas sanguíneas o trazados electrocardiográficos. Estos sistemas son capaces de realizar predicciones de insuficiencia renal incipiente o clasificar arritmias en tiempo real. Un caso de uso destacado es el análisis automatizado del hemograma, donde el software sugiere la probabilidad de enfermedades vectoriales —como la *Ehrlichia*— basándose

en tendencias sutiles en los niveles de plaquetas y glóbulos blancos que no siempre alcanzan los rangos de alarma tradicionales (ElHadad, et al, 2024).

Los CDSS de Diagnóstico Diferencial funcionan como asistentes eficaces durante las etapas diagnóstica y exploratoria. En estos sistemas, el veterinario ingresa los signos clínicos detectados y el programa produce una lista de patologías potenciales que se ordenan por su probabilidad estadística y evidencia científica. Ejemplos destacados como IDEXX *WebCheck* (integraciones en sistemas de diagnóstico), EBMA (Asistente de Medicina Basada en Evidencias) y VET-REC, evidencian el modo en que la tecnología es capaz de disminuir el sesgo cognitivo del clínico, garantizando que no se omita ninguna opción diagnóstica importante y elevando, por lo tanto, el estándar de la medicina basada en evidencias dentro de la práctica veterinaria actual.

Para que la aplicación de los Sistemas de Soporte a la Decisión Clínica (CDSS) en el ámbito hospitalario sea realmente eficaz, su operación debe incorporarse con fluidez al flujo diario del trabajo mediante un diseño *seamless* o sin interrupciones. El procedimiento se inicia con la introducción de datos, en la que se sincronizan automáticamente con el Software de Gestión de Práctica Veterinaria (PIMS) los datos fundamentales del paciente: raza, edad, peso, constantes vitales registradas a través de dispositivos IoT y resultados obtenidos en el laboratorio. Esta estructura previene la redundancia de tareas y garantiza que el sistema use los datos más recientes y exactos disponibles (ElHadad, et al, 2024).

Una vez que los datos están centralizados, el sistema realiza un **Procesamiento Silencioso** en segundo plano. Durante esta fase, el algoritmo compara de forma constante los parámetros del paciente con las guías de práctica clínica internacionales más rigurosas, como las establecidas por la *WSAVA (World Small Animal Veterinary Association)* o la *AAHA (American Animal Hospital Association)*. Este monitoreo pasivo garantiza que el clínico cuente con un respaldo científico permanente sin que ello suponga una carga cognitiva adicional durante la consulta.

La culminación de este proceso es la **Generación de Recomendaciones** probabilísticas y accionables. El CDSS no emite diagnósticos cerrados, sino que presenta opciones basadas en evidencia; por ejemplo, el sistema puede alertar que un paciente presenta un **70% de probabilidad de padecer hipoadrenocorticismio (Addison)** tras analizar un desequilibrio específico

de electrolitos, sugiriendo inmediatamente la realización de una prueba de estimulación con ACTH antes de proceder con cualquier protocolo terapéutico (ElHadad, et al, 2024).

La Validación Veterinaria es el último paso del ciclo. El médico aplica su criterio profesional para juzgar, aceptar o descartar la recomendación del software en esta etapa crucial. Esta interacción es esencial no solo para la seguridad del paciente en el momento, sino también para mejorar la herramienta: al documentar la resolución final, se alimenta el aprendizaje del sistema —en particular de aquellos que se apoyan en inteligencia artificial—, lo que hace posible que el algoritmo mejore su exactitud diagnóstica y ajuste cada vez mejor a los hechos clínicos del centro veterinario (CEGID, 2026).

La puesta en marcha de los Sistemas de Soporte a la Decisión Clínica (CDSS) en la veterinaria contemporánea proporciona un conjunto de beneficios estratégicos que van más allá de simplemente digitalizar documentos, y afectan directamente tanto la calidad del procedimiento médico como la seguridad del paciente. Una de las aportaciones más importantes es la disminución del error médico, ya que actúa como una red de seguridad proactiva. El CDSS funciona como un filtro de supervisión permanente en entornos clínicos de alta presión, en los que la fatiga cognitiva o el exceso de información pueden dar lugar a omisiones críticas. El sistema reduce el riesgo de cometer errores en la prescripción o en la interpretación de pruebas diagnósticas al comparar en tiempo real los datos del paciente con protocolos actualizados (CEGID, 2026).

Esta capacidad operativa se fundamenta en la promoción de una Medicina Basada en Evidencia (MBE) accesible y dinámica. Ante la imposibilidad material de que un clínico procese la totalidad de los artículos científicos publicados semanalmente, el CDSS actúa como un mediador del conocimiento. Permite que el veterinario implemente los hallazgos más recientes y las recomendaciones internacionales sin tener que realizar una búsqueda exhaustiva de información bibliográfica para cada caso, incorporando automáticamente en el proceso de la consulta la evidencia científica más actual.

Estos sistemas también son cruciales para homogeneizar la atención en las instituciones de salud animal. La diversidad clínica entre los profesionales de una misma clínica puede causar incongruencias en los tratamientos; no obstante, la implementación de un CDSS garantiza que todos los pacientes sean atendidos con un nivel de atención constante y de elevada calidad,

sin importar qué médico se encargue. Esta uniformidad no solo mejora los resultados médicos, sino que también refuerza la reputación técnica del centro veterinario al asegurar protocolos de alta calidad para todo el equipo médico.

El aporte de estas herramientas se expande a la formación del dueño y a la comunicación eficaz con el tutor del animal. Numerosos sistemas de soporte producen informes gráficos y visuales que convierten datos técnicos intrincados en información fácil de entender. Al mostrar de manera clara y visual por qué se recomienda una prueba específica o un tratamiento determinado, se incrementa notablemente la confianza del cliente y la aceptación de los planes de salud propuestos. De este modo, el CDSS no solo optimiza la decisión médica, sino que fomenta una mayor adherencia al tratamiento por parte del propietario, cerrando el círculo del bienestar animal (CEGID, 2026).

Tabla 6. *El Ciclo de Decisión con CDSS*

Etapa	Rol del CDSS	Rol del Veterinario
Anamnesis	Filtra antecedentes relevantes del EMR.	Entrevista al tutor y observa al animal.
Exploración	Sugiere áreas de enfoque según la raza.	Realiza el examen físico.
Diagnóstico	Genera diferenciales ponderados.	Elige la ruta diagnóstica final.
Tratamiento	Calcula dosis exactas y avisa de contraindicaciones.	Prescribe y supervisa la evolución.

Adaptado de (CEGID, 2026)

A pesar del potencial transformador de los **Sistemas de Soporte a la Decisión Clínica (CDSS)**, su consolidación definitiva en la medicina veterinaria enfrenta desafíos estructurales de gran calado. El obstáculo más crítico en la actualidad es la interoperabilidad, entendida como la capacidad de diversos sistemas y organizaciones para trabajar juntos. Históricamente, el ecosistema tecnológico veterinario ha operado de forma fragmentada: los sistemas de gestión de clínicas (PIMS) a menudo no logran una comunicación fluida con los equipos de laboratorio o los dispositivos de telemetría y monitoreo remoto. Esta desconexión impide que el CDSS

acceda a una visión integral del paciente, limitando su capacidad de análisis. No obstante, la tendencia predominante, marca una migración acelerada hacia ecosistemas basados en la nube, diseñados para unificar flujos de datos heterogéneos y permitir que el soporte a la decisión sea realmente holístico y basado en información en tiempo real (CEGID, 2026).

Más allá de la infraestructura técnica, la confianza en estas herramientas depende de dos pilares fundamentales: la mitigación de sesgos y la evaluación rigurosa de la utilidad clínica. Un algoritmo que no ha sido entrenado con información variada o que no tiene una validación externa sólida tiene el peligro de transformarse en un "juguete tecnológico" sin rigor médico. Los prejuicios, ya sean por raza, especie o incluso por la procedencia geográfica de los datos, pueden llevar a hacer recomendaciones equivocadas que pongan en riesgo la seguridad del paciente.

Como respuesta a esto, la elaboración de algoritmos ha progresado hacia el modelo de IA responsable. Esta perspectiva no únicamente pone énfasis en la exactitud técnica, sino que también incorpora principios de claridad, justicia y explicabilidad desde las etapas tempranas del desarrollo. La valoración de la utilidad clínica no se restringe más a las métricas matemáticas de laboratorio, sino que se determina por el efecto real en el mejoramiento de los resultados sanitarios y la eficacia operacional del veterinario. Los CDSS solamente podrán ir más allá de su función como asistentes digitales y llegar a ser elementos orgánicos e imprescindibles en la práctica veterinaria de calidad si se comprometen con la ética de los datos y la integración sistémica (Villanueva et al., 2024).

Para determinar y reducir sesgos, el desarrollo de algoritmos dirigidos a la excelencia clínica en veterinaria requiere una estrategia proactiva. El sesgo en la inteligencia artificial veterinaria se evidencia cuando un modelo tiene un desempeño desigual, es decir, trabaja con más exactitud en ciertas razas, especies o grupos de laboratorio que en otros. La ingeniería de datos moderna se basa en tres tácticas de diseño esenciales para superar estas restricciones éticas y técnicas, las cuales aseguran la confiabilidad y la equidad del diagnóstico automatizado (Durán, 2025).

La primera línea de defensa radica en la diversidad y representatividad del conjunto de datos de entrenamiento. Tener volúmenes masivos de datos no es suficiente; estos tienen que representar la diversidad biológica y técnica de la realidad. Esto conlleva un equilibrado riguroso de

razas, garantizando que el algoritmo se entrene con la proporción apropiada de conformaciones dolicocefalas, mesocefalas y braquicefalas. Un sistema, si no se toma esta precaución, podría erróneamente determinar que un *Greyhound* tiene cardiomegalia solo porque no identifica las características anatómicas normales de la raza. Además, es esencial el enfoque multicéntrico: los datos deben obtenerse de varios hospitales que cuenten con diferentes marcas de analizadores bioquímicos y equipos de Rayos X, para impedir que la inteligencia artificial se confunda con el "ruido técnico" o las calibraciones particulares de un único productor.

En segundo lugar, se implementan Técnicas de Regularización y Equidad (*Fairness*) para supervisar el comportamiento del modelo de forma continua. Esto incluye el uso de herramientas de monitoreo diseñadas para la detección de sesgos latentes, las cuales emiten alertas si la tasa de error del algoritmo es significativamente superior en gatos respecto a perros, o en pacientes geriátricos frente a jóvenes. En este punto, la IA Explicable (XAI) desempeña un rol de auditoría técnica; mediante el uso de mapas de calor como Grad-CAM, los desarrolladores pueden verificar si la red neuronal identificó una neumonía debido a la presencia de infiltrados alveolares reales o si, por el contrario, basó su predicción en la detección de electrodos de monitorización, los cuales suelen estar presentes de forma recurrente en pacientes graves, actuando como una variable distractora.

En tercer lugar, el procedimiento de optimización exige que las variables confundidoras se desacoplen. Esta táctica implica que el algoritmo sea entrenado para desestimar artefactos o metadatos que, a pesar de estar en la imagen, no tienen un valor diagnóstico principal. Si el sistema aprende a relacionar elementos como la marca del chasis radiográfico o las marcas de posición particulares de un hospital con determinadas enfermedades de manera espuria, podrían sesgar la predicción. Cuando estas variables son controladas en la etapa de arquitectura, se consigue un modelo sólido e "invisible" a factores externos, que enfoca su capacidad de análisis únicamente en los marcadores biológicos y patológicos que determinan la salud del paciente veterinario (Sánchez, et al, 2024).

Evaluar la utilidad clínica de los Sistemas de Soporte a la Decisión Clínica (CDSS) en un hospital es un procedimiento fundamental que posibilita diferenciar entre una herramienta médica que verdaderamente mejora la salud animal y una innovación tecnológica superficial. Es

necesario establecer protocolos de validación que vayan más allá de la exactitud teórica y se enfoquen en el efecto práctico para decidir si un CDSS funciona como una carga operativa extra o como un facilitador.

El primer componente de esta evaluación son las Pruebas de Impacto en el Flujo de Trabajo, también conocidas como Usabilidad. Es fundamental, en esta etapa, evaluar el tiempo de decisión, examinando si el médico logra un diagnóstico preciso más rápidamente con la ayuda del software. La fatiga de alertas es un elemento crucial en este momento; si un sistema produce una cantidad excesiva de notificaciones irrelevantes, puede provocar que el veterinario se desensibilice y que el 90% de las alertas sean pasadas por alto, lo que anula la eficacia clínica del aparato (Bonis, et al, 2004).

Para medir el valor agregado del sistema, se utiliza la evaluación de la "Precisión Aumentada", un protocolo que analiza la eficacia diagnóstica en tres contextos distintos: el veterinario que trabaja solo, la IA que procesa los datos por su cuenta y el equipo veterinario + IA (humano en el bucle).

La utilidad clínica real se demuestra únicamente cuando esta sinergia supera los resultados obtenidos por ambos agentes por separado. Este modelo de colaboración es especialmente valioso para la reducción de los falsos negativos, asegurando que patologías sutiles que podrían pasar desapercibidas para el ojo humano sean detectadas gracias al procesamiento algorítmico, mientras que el juicio clínico humano filtra posibles errores técnicos de la máquina (Bonis, et al, 2004).

Hay que considerar que el estándar de oro en la validación de un CDSS reside en las Métricas de Resultado en el Paciente (*Outcomes*). El éxito de la integración tecnológica debe reflejarse en indicadores tangibles de bienestar y eficiencia hospitalaria. Esto incluye la monitorización de la reducción de los días de hospitalización y una menor tasa de reingresos debidos a diagnósticos incompletos o erróneos. Asimismo, se evalúa la capacidad del sistema para lograr una detección más temprana de patologías, comparando estadísticamente los estadios de enfermedad al momento del diagnóstico antes y después de la implementación del CDSS. Solo cuando la tecnología se traduce en una intervención más precoz y efectiva, se puede

afirmar que el sistema ha cumplido su propósito fundamental dentro del ecosistema de salud veterinaria (Animals Health, 2026).

Al implementar un CDSS, se debiera seguir unos criterios como los que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7. Matriz de Evaluación para un Hospital Veterinario

Criterio	Pregunta de Evaluación	Método de Medición
Fiabilidad	¿El sistema da el mismo resultado ante el mismo caso dos veces?	Test de repetibilidad.
Aceptabilidad	¿Los veterinarios confían en las sugerencias del sistema?	Encuestas de escala Likert y tasas de adopción.
Seguridad	¿El sistema sugirió algo que podría haber dañado al paciente?	Auditoría de eventos adversos.
Interoperabilidad	¿Se comunica automáticamente con mi software de gestión (PIMS)?	Pruebas de integración de datos (API).

Adaptado de (Bonis, et al, 2004)

El concepto de Validación Clínica Continua representa el estándar de excelencia técnica y ética en la medicina veterinaria, estableciendo que la evaluación de un sistema de Inteligencia Artificial no concluye con la adquisición o instalación del software. Dado que los entornos clínicos son dinámicos, los hospitales veterinarios líderes han implementado protocolos de vigilancia post-comercialización que garantizan la fiabilidad de las herramientas digitales a lo largo de toda su vida útil. Este procedimiento se basa en realizar auditorías mensuales aleatorias, las cuales son examinadas a ciegas por un equipo de expertos humanos —por lo regular internistas o radiólogos diplomados— que revisan una muestra representativa de los diagnósticos y decisiones respaldados por la IA.

Este proceso de validación constante tiene como principal propósito identificar tempranamente lo que se conoce como "degradación del modelo" (*model drift*). Cuando el desempeño de un algoritmo empieza a disminuir a causa de modificaciones en el entorno operativo que no existían durante su entrenamiento inicial, se produce este fenómeno técnico. La modificación

de los reactivos del laboratorio, la actualización de los dispositivos para adquirir imágenes o las fluctuaciones en la demografía de los pacientes que visitan el centro, por ejemplo, pueden cambiar la distribución de datos y hacer que la inteligencia artificial se vuelva menos precisa. Si no se realiza una validación constante, estas pequeñas desviaciones podrían pasar desapercibidas y poner en riesgo la seguridad del paciente a largo plazo.

Por ende, la Validación Clínica Continua cambia el vínculo entre el clínico y la tecnología, pasando de una aceptación pasiva a un control activo y crítico. Este ciclo de retroalimentación no solo asegura que el algoritmo mantenga sus niveles de sensibilidad y especificidad iniciales, sino que permite identificar áreas de mejora y personalización del software para las necesidades específicas de la institución. En última instancia, este rigor metodológico es lo que consolida a la Inteligencia Artificial no como una caja negra infalible, sino como un componente orgánico y verificable de un sistema de salud animal robusto, transparente y responsable (IA Veterinaria, 2026).

2.3. Modelos predictivos en epidemiología y medicina poblacional

Los Modelos Predictivos en medicina veterinaria representan el eje de la transición hacia la Veterinaria 4.0, consolidándose como herramientas matemáticas y computacionales de alta precisión. Estos sistemas utilizan la integración de datos históricos y flujos de información en tiempo real para anticipar eventos críticos, tales como el surgimiento de brotes infecciosos, la velocidad de propagación de una epidemia o la estratificación del riesgo individual de un animal dentro de una población determinada. Hoy en día, estos modelos han evolucionado de ser meras proyecciones estadísticas estáticas a sistemas dinámicos y flexibles, mejorados por la inteligencia artificial, lo cual posibilita una gestión de la salud basada en la evidencia y proactiva (Gálves, 2012).

Dentro de la medicina poblacional, estos modelos se dividen principalmente en dos enfoques metodológicos según su arquitectura y objetivo. En primer lugar, los Modelos Mecanicistas o Epidemiológicos se fundamentan directamente en la biología y la dinámica de transmisión de la enfermedad. El modelo SIR (Susceptibles, Infectados, Recuperados) es el más destacado, que emplea ecuaciones diferenciales para imitar cómo un patógeno se propaga en una población. Para determinar el número reproductivo básico (R_0), un indicador clave para

tomar decisiones estratégicas, como la clausura preventiva de una explotación ganadera o la puesta en marcha de campañas de vacunación masiva antes de que la propagación no pueda controlarse, es esencial su eficacia clínica y zootécnica (Carrión, et al, 2018).

Por otra parte, los Modelos de Aprendizaje Automático (*Machine Learning*), que funcionan con un enfoque estadístico avanzado, han adquirido una importancia particular. Estos sistemas examinan patrones complejos en cantidades enormes de datos, incluyendo variables disímiles como la densidad de población, la humedad ambiental, los movimientos del transporte y los datos que provienen de sensores biométricos. Un ejemplo notable de su uso es la habilidad para pronosticar qué granjas tienen un riesgo más alto de introducir enfermedades transfronterizas, como la Peste Porcina Africana, solo a partir del estudio de sus flujos logísticos y rutas comerciales. Cuando se combina la profundidad biológica de los modelos mecanicistas con la capacidad de procesamiento de la inteligencia artificial, la veterinaria moderna adquiere una habilidad sin igual para reaccionar ante las amenazas sanitarias a nivel mundial (Pereda, 2010).

La incorporación del aprendizaje automático (ML) en la ciencia veterinaria moderna ha superado el plano teórico y se ha establecido como un impulsor de eficacia operacional y seguridad sanitaria a gran escala. La posibilidad de procesar flujos masivos de información en tiempo real a través de dispositivos IoT ha posibilitado la creación de sistemas de Alerta Temprana de Enfermedades en Medicina Veterinaria (porcinos, avicultura y ganadería).

Estos modelos analizan variables críticas, como el consumo de agua y alimento, detectando desviaciones sutiles imperceptibles para el operario humano; una caída de apenas el 5% en el consumo, identificada algorítmicamente, puede predecir un brote de influenza aviar hasta 48 horas antes de la manifestación de signos clínicos evidentes, permitiendo intervenciones precoces que salvan miles de ejemplares (Wild et al., 2023).

Complementando esta vigilancia interna, los Modelos de Dispersión Atmosférica aportan una capa de bioseguridad externa fundamental. Estos sistemas, al simular la aerobiología de patógenos con una contagiosidad muy alta como el virus de la Glosopeda (fiebre aftosa), calculan la difusión del virus por medio de las corrientes eólicas desde un establecimiento ganadero afectado hasta las granjas vecinas. Para que las autoridades sanitarias fijen radios de cuarentena exactos y dinámicos, esta habilidad predictiva es crucial, ya que permite op-

timizar la utilización de recursos y contener la propagación epidémica de forma quirúrgica (Moreno, 2021).

El aprendizaje automático se desempeña como un centinela epidemiológico mundial en el campo de la salud pública y las zoonosis. El Modelado de Vectores recurre a variables climáticas, como cambios en la temperatura y grados de lluvia, con el objetivo de hacer mapas de áreas propensas a padecer enfermedades como el Virus del Nilo Occidental o la Leishmaniosis. Las instituciones tienen la capacidad de prever brotes y organizar campañas de control ambiental con varios meses de anticipación al pronosticar las condiciones ideales para la cría de mosquitos y otros vectores. Además, en el ámbito de la Seguridad Alimentaria, los modelos predictivos de crecimiento microbiológico estudian la estabilidad de la cadena de frío con el fin de evitar que patógenos como *Listeria* o *Salmonella* se multipliquen antes de que las mercancías sean consumidas (Cardona, 2018).

La utilización de algoritmos predictivos y Big Data ha hecho posible la elaboración de Mapas de Riesgo Regional en el campo de la Medicina de Pequeños Animales. Durante períodos concretos, estas herramientas brindan a los médicos clínicos información geoespacial minuciosa acerca de la prevalencia esperada de parásitos, como el gusano del corazón (*Dirofilaria*). Si el veterinario tiene conocimiento de la presión infectiva de una región en los próximos tres meses, puede adaptar los protocolos de medicina preventiva para cada paciente, garantizando una protección sólida fundamentada en datos estacionales y locales. De este modo, mejora el estándar de atención en la clínica diaria (Rodríguez, 2023).

La implementación de modelos predictivos en el contexto epidemiológico veterinario es un procedimiento sistemático que convierte datos en bruto en inteligencia operativa estratégica. La fase de Recolección de Datos (Input), donde se incorporan fuentes de información diversas, es el primer paso en este proceso laboral. Es necesario que el modelo se nutra de censos poblacionales exactos, registros de movimientos animales (por ejemplo, guías de movilización), datos sobre el clima en tiempo real y antecedentes de informes clínicos para que sea sólido. La complejidad de los ecosistemas en los que interactúan los patógenos, los hospedadores y el medio ambiente puede ser capturada gracias a la multidimensionalidad de la información (Gálves, 2012).

Después de que la base de datos esté establecida, se utiliza el lenguaje de programación científica R o Python, o plataformas especializadas como SpatialEpi, para entrenar el modelo. En esta fase, el algoritmo examina las correlaciones entre las variables recopiladas para entender los patrones de propagación de una enfermedad. La sofisticación de estas herramientas posibilita la detección de factores de riesgo no evidentes, lo que genera una base matemática sólida que respalda la fiabilidad de las proyecciones a futuro (Bonis, et al, 2004).

La simulación de escenarios es una etapa prospectiva en la que se incorporan variables hipotéticas con el fin de analizar el impacto de potenciales intervenciones, y es en ella donde se evidencia la auténtica capacidad de estos sistemas. El modelo posibilita la respuesta a interrogantes fundamentales de bioseguridad: "¿Qué pasaría con la curva de la epidemia si durante dos semanas no se permitiera el movimiento de animales?" o "¿Qué tan lejos podría llegar el brote si vacunamos al 60% de las personas que son susceptibles?". Estas simulaciones ofrecen un entorno seguro para "experimentar" con diferentes estrategias de control sin los costos ni los riesgos asociados a una implementación real prematura.

El proceso culmina en la Toma de Decisiones basada en evidencia. Los resultados derivados de las simulaciones proporcionan una hoja de ruta clara para las autoridades sanitarias y los gerentes de producción, permitiéndoles asignar recursos de manera eficiente. Ya sea priorizando la distribución de vacunas en zonas de alto riesgo, movilizando personal técnico a puntos críticos o coordinando la desinfección de rutas comerciales específicas, el modelado predictivo asegura que cada acción ejecutada esté orientada a maximizar el impacto sanitario y minimizar las pérdidas económicas en el sector agropecuario (Carrión, et al, 2018).

Tabla 8. *Ventajas de la Medicina Poblacional Predictiva en Veterinaria*

Ventaja	Descripción
Optimización de Recursos	No se vacuna a ciegas; se priorizan las zonas o individuos de alto riesgo.
Reducción de Pérdidas	Detectar un brote 2 días antes puede ahorrar millones de dólares en despoblación innecesaria.
Bienestar Colectivo	Permite intervenciones menos invasivas y más localizadas, evitando cuarentenas masivas ineficientes.

Enfoque "One Health"

Ayuda a prevenir pandemias humanas al monitorear y predecir la circulación viral en reservorios animales.

Adaptado de (Carrión, et al, 2018)

El desarrollo de la medicina predictiva en veterinaria, aunque representa un hito en la gestión sanitaria, se enfrenta a desafíos estructurales que condicionan su fiabilidad y alcance. El obstáculo más crítico reside en la calidad y consistencia de los datos de entrada (*Input*). Un modelo predictivo es, por definición, dependiente de la fidelidad de la información que recibe; por tanto, si existe un subreporte de casos por parte de los clínicos de campo o si los sensores de monitoreo biométrico en las explotaciones ganaderas presentan fallos técnicos, el sistema generará predicciones erróneas. Esta vulnerabilidad subraya la necesidad de protocolos de recolección de datos estandarizados y sistemas de mantenimiento preventivo para la infraestructura tecnológica de la Veterinaria 4.0 (Kirsal et al., 2019).

Más allá de los errores técnicos, estos modelos luchan constantemente contra el fenómeno del "Cisne Negro": eventos altamente improbables, imprevistos y de gran impacto que no se encuentran reflejados en los registros históricos. En epidemiología veterinaria, esto se manifiesta a través de mutaciones virales súbitas, cambios climáticos extremos o alteraciones drásticas en las rutas de migración de aves silvestres. Dado que los algoritmos de aprendizaje automático se basan en patrones pasados para proyectar el futuro, la aparición de una variable biológica o ambiental inédita puede invalidar las proyecciones en cuestión de horas, exigiendo modelos con una capacidad de adaptación y reentrenamiento casi instantánea (Durán, 2025).

Con el objetivo de reducir estas incertidumbres y estructurar los riesgos de un modo más sólido, la disciplina ha progresado hacia Modelado de Nicho Ecológico y Geointeligencia Veterinaria. Estas herramientas son el eje de la vigilancia epidemiológica actual, ya que hacen posible la interrelación entre información biológica y complejas variables ambientales y geoespaciales. Por ejemplo, el Modelado de Nicho Ecológico posibilita prever la expansión potencial de una enfermedad con base en las condiciones ambientales que benefician al vector o al patógeno, y a pesar de que no se haya encontrado el primer caso clínico, se pueden determinar zonas de riesgo. La posibilidad de que las autoridades sanitarias pasen de una respuesta reactiva a

un enfoque preventivo proactivo y territorialmente orientado se debe a la combinación de la inteligencia geográfica con el análisis predictivo (Townsend et al., 2019).

El uso de Sistemas de Información Geográfica (GIS) ha revolucionado la vigilancia epidemiológica moderna al permitir la convergencia de datos biológicos con variables territoriales críticas. Estas plataformas operan superponiendo capas de información, como la densidad poblacional animal, las redes hídricas, las rutas de transporte y los factores climáticos. Esto hace más fácil detectar "puntos calientes" (*hotspots*) donde el peligro de brotes es considerablemente más alto. Esta aptitud de visualización geoespacial convierte bases de datos abstractas en mapas que pueden ser utilizados, lo que posibilita a los veterinarios y las autoridades sanitarias entender no solo qué está sucediendo, sino también dónde y por qué una determinada patología se concentra.

QGIS y ArcGIS continúan siendo el estándar del sector en la esfera técnica, particularmente cuando se mejoran con extensiones especializadas de tipo epidemiológico. Estas herramientas posibilitan la ejecución de análisis de densidad de kernel para observar la concentración de casos en una zona específica, además de estudios sobre la autocorrelación espacial. Este último estudio es crucial para la medicina poblacional, porque posibilita determinar de forma matemática si un conjunto de casos clínicos está unido a través de un proceso de contagio activo o si su cercanía se debe únicamente al azar o a factores ambientales comunes (Martínez et al., 2023).

Plataformas como HealthMap han incorporado el procesamiento de lenguaje natural (NLP) para la búsqueda de brotes en tiempo real en el mundo entero. Este sistema, al seguir fuentes de información no oficiales y reportes oficiales, permite observar enfermedades zoonóticas en mapas interactivos y proporciona una alerta anticipada frente a amenazas que surgen. A nivel institucional, el sistema EMPRES-i de la FAO funciona como el eje central de la inteligencia sanitaria transfronteriza.

Esta plataforma es esencial para monitorizar la progresión de enfermedades de alto impacto económico, como la Influenza Aviar o la Peste Porcina Africana, proporcionando los datos necesarios para que los países vecinos ajusten sus modelos de predicción y refuercen sus fronteras sanitarias (Animals Health, 2026).

La integración de la geointeligencia ha permeado la medicina productiva privada a través de herramientas de *Business Intelligence* como Tableau o Power BI. Estas plataformas de visualización de datos se usan para cruzar información sobre índices de mortalidad y parámetros de producción con la localización precisa de las naves en las grandes integraciones avícolas y porcinas. Los gerentes de producción pueden identificar en tiempo real las fallas en bioseguridad gracias a esta integración geográfica, observando los patrones de propagación interna y haciendo que la logística de intervención sanitaria sea más precisa. La unión de estas plataformas asegura que la administración de la salud animal sea una práctica basada en datos, con un enfoque territorial profundo y visualmente intuitiva (Gaceta Médica, 2026).

La estructuración de un Modelo de Riesgo para enfermedades animales —ya sea para la introducción de Leptospirosis en una región específica o de Fiebre Aftosa en un área fronteriza— constituye un proceso metodológico riguroso dividido en cuatro fases lógicas. Este enfoque permite transformar datos ambientales, biológicos y logísticos en herramientas de predicción espacial de alta precisión, fundamentales para la medicina veterinaria preventiva (Vignaud, et al, 2005).

La Fase I es la Identificación de Determinantes, se centra en la selección exhaustiva de las variables que influyen en la ecología de la enfermedad. Estas se categorizan en tres grupos principales: las Variables Ambientales, como la altitud, la precipitación y la temperatura superficial (obtenidas mediante sensores satelitales como MODIS); las Variables de Hospedador, que contemplan la densidad de la población animal, la estructura etaria y el estado inmunitario; y las Variables de Movimiento, que analizan la conectividad a través de la cercanía a carreteras, ferias comerciales, puertos o rutas migratorias. Esta etapa inicial define el marco de datos sobre el cual operará el algoritmo.

Luego, en la segunda fase: Ponderación de riesgos: se determina que no todos los factores tienen el mismo grado de impacto en el riesgo final. Se utilizan técnicas como la regresión logística y el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para clasificar estas variables, las cuales integran la experiencia de los expertos con un análisis estadístico de datos del pasado. Por ejemplo, en el caso de una enfermedad transmitida por garrapatas, se puede determinar matemáticamente que la humedad ambiental posee un peso del 60% en el modelo, mientras que la densidad

de animales contribuye con un 40%, permitiendo una modelización mucho más ajustada a la realidad biológica.

La Fase III: Generación del Mapa de Riesgo, representa el núcleo del modelado computacional. En esta etapa se utilizan algoritmos avanzados para procesar las capas de datos ponderadas. MaxEnt (*Maximum Entropy*) es uno de los más difundidos en veterinaria y es perfecto para modelar la distribución de vectores cuando se estima la probabilidad de que exista una enfermedad, tomando como base las condiciones de los nichos donde ya ha sido detectada. Además, el algoritmo de *Random Forest* examina diversos "árboles de decisión" para categorizar el territorio en zonas de riesgo "Alto", "Medio" o "Bajo", lo que brinda una visualización precisa para la gestión sanitaria.

La Fase IV es la etapa final del proceso: Validación, en la que se evalúa la robustez y sensibilidad del modelo. En esta etapa, las predicciones teóricas se comparan con la aparición de nuevos casos reales. Si el sistema detectó apropiadamente una zona de riesgo alto y, efectivamente, se notifica un brote en esa área, se considera que el sistema está validado para ser utilizado en la toma de decisiones oficiales. Esta validación cíclica garantiza que los modelos de riesgo progresen en consonancia con la dinámica epidemiológica, posibilitando que las autoridades sanitarias distribuyan recursos de forma proactiva y eficaz ante amenazas emergentes (Vignaud, et al, 2005).

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de estructura de un modelo de riesgo, en este caso, para una enfermedad como la Leishmaniosis.

Tabla 9. Ejemplo de Modelo de Riesgo

Capa de Datos	Fuente	Función en el Modelo
Presencia del Vector	Trampeos de campo	Define el área biológica posible.
Temperatura Promedio	Sensores remotos (NASA)	Define la tasa de replicación del parásito.
Densidad de Caninos	Censos municipales	Define la disponibilidad de reservorios.

Uso del Suelo

Mapas forestales/urbanos

Identifica áreas periurbanas de mayor contacto.

Elaboración propia

El uso de Modelos Bayesianos es la tendencia actual en los diseños de protocolos de investigación. Su ventaja es que permiten incluir la "incertidumbre" (datos faltantes o errores de reporte), lo cual es muy común en los sistemas de vigilancia veterinaria de países en desarrollo.

2.4. IA en la patología clínica: Automatización del análisis citológico

El análisis citológico automatizado a través de la inteligencia artificial (IA) se ha convertido en una de las aplicaciones más innovadoras en la medicina veterinaria moderna. Históricamente, la citopatología ha requerido de un patólogo clínico que esté disponible físicamente y de la logística de envío de muestras, un procedimiento que generalmente toma varios días. La incorporación de algoritmos de *Deep Learning* posibilita una modificación en este flujo de trabajo, disminuyendo los periodos de respuesta desde días hasta unos pocos minutos; esto es crucial para la toma inmediata de decisiones quirúrgicas o terapéuticas (Alfaro, 2025).

La microscopía convencional no se busca reemplazar con el procedimiento de análisis automatizado, sino digitalizarla y proporcionarle una habilidad analítica más avanzada mediante un flujo técnico estandarizado. La fase inicial es el escaneo de alta resolución (*WSI, Whole Slide Imaging*). En esta fase, la muestra —ya sea un sedimento urinario, una punción de masa con aguja fina o un frotis sanguíneo— se coloca en escáneres especializados, como el Heska Element AIM o el VETSCAN Imagyst. Estos aparatos toman miles de imágenes en resolución ultra alta a diversos aumentos (de \$40x\$ y \$100x\$), generando una réplica digital exacta de la preparación citológica.

Una vez digitalizada la muestra, interviene la fase de Segmentación y Clasificación mediante Redes Neuronales Convolucionales (CNN). El algoritmo ejecuta una segmentación precisa para separar cada unidad celular del fondo y de los detritos proteicos o restos celulares. El sistema, después, lleva a cabo una extracción minuciosa de las características morfométricas, en la que se miden variables como el tamaño del núcleo, la relación entre el núcleo y el citoplasma, la granulación del citoplasma y el patrón cromatínico. Estas características se comparan de

inmediato con enormes bases de datos que poseen millones de células ya etiquetadas por patólogos diplomados, lo que posibilita una categorización taxonómica muy precisa.

La generación del informe y el triaje son las etapas finales del proceso. La IA genera un informe inicial detallado; si las células estudiadas muestran patrones de malignidad conocidos (como en el caso de un mastocitoma) o características claras de benignidad, el diagnóstico se verifica casi instantáneamente en la pantalla del centro médico. No obstante, cuando el algoritmo identifica una "atipia desconocida" o pleomorfismos complejos que no se ajustan a los patrones convencionales, el sistema señala automáticamente estas células para que un patólogo humano las examine por medio de redes de telecitología. La combinación de la velocidad algorítmica con el juicio experto de los seres humanos garantiza un diagnóstico más preciso, lo que mejora el tratamiento del paciente oncológico y crítico en la práctica cotidiana (Alfaro, 2025).

El diagnóstico en el punto de atención (*point-of-care*) ha cambiado gracias a la implementación de la citología automatizada en la medicina veterinaria del año 2026, lo que ha posibilitado una precisión analítica nunca antes vista en varias matrices biológicas. Esta tecnología, basada en algoritmos de visión computacional, se aplica con particular eficiencia en cuatro sectores importantes de la práctica clínica: parasitología, urianálisis, hematología y oncología de tejidos blandos (Aranda, 2026).

En el ámbito de la Citología Hemática, la IA ha superado las limitaciones de los contadores por impedancia convencionales al realizar un recuento diferencial de leucocitos basado en morfología directa sobre el frotis de sangre. Esta capacidad es disruptiva para la identificación de parásitos hemáticos de pequeño tamaño, como *Babesia* o *Ehrlichia*, que a menudo requieren una observación minuciosa y experta. Asimismo, el sistema es altamente sensible en la detección de precursores inmaduros o células neoplásicas circulantes, elementos que podrían pasar inadvertidos en recuentos automatizados tradicionales, permitiendo un diagnóstico temprano de procesos leucémicos o respuestas inflamatorias severas (Coello et al., 2024).

Es muy probable que la citología de masas cutáneas y ganglios sea el procedimiento más utilizado y apreciado en la práctica clínica diaria. Los algoritmos de *Deep Learning* han sido preparados para detectar malignidad a través de la identificación de criterios citológicos ob-

jetivos, como el reconocimiento de macrocariosis, la presencia de nucleolos prominentes y la detección de mitosis atípicas. La clasificación de tumores muestra una alta eficacia en cuanto a la tecnología, sobre todo para los tumores de células redondas; esto permite diferenciar rápidamente entre mastocitomas, linfomas e histiocitomas. Esta inmediatez posibilita que el médico hable con el dueño sobre alternativas quirúrgicas o terapéuticas en la misma consulta inicial (Coello et al., 2024).

La integración de la IA en la Coprología y el Urianálisis ha permitido estandarizar procesos que históricamente han dependido en exceso de la pericia y el tiempo del técnico de laboratorio. En el análisis del Sedimento Urinario, el software identifica y cuantifica automáticamente cristales, bacterias, cilindros y células epiteliales con una repetibilidad superior a la observación manual. En el área de la Parasitología, los algoritmos de reconocimiento de formas localizan y cuentan huevos de endoparásitos en muestras de heces. Esta automatización no solo optimiza el flujo de trabajo, sino que elimina la variabilidad interobservador, asegurando que el monitoreo de la carga parasitaria y la salud urinaria del paciente se realicen bajo los más estrictos estándares de precisión diagnóstica (García, et al, 2024).

Tabla 10. *Ventajas de la Automatización citológica*

Ventaja	Impacto Clínico
Velocidad	Resultados en menos de 10-15 minutos mientras el paciente sigue en la clínica.
Estandarización	Elimina la variabilidad subjetiva entre diferentes observadores.
Acceso a Expertos	Facilita la telepatología; si la IA duda, el archivo digital se envía al patólogo en segundos.
Educación del Cliente	Permite mostrar imágenes claras de las células al tutor del animal en una pantalla, mejorando la confianza.

Adaptado de (García, et al, 2024)

A pesar de la innegable potencia analítica de la Inteligencia Artificial en el campo de la citopatología, su implementación exitosa en la clínica veterinaria, esta enfrenta desafíos estructurales y biológicos que delimitan su alcance actual. El primer y más crítico obstáculo es la Calidad de la Muestra, bajo el principio informático de *"Garbage In, Garbage Out"* (entrada de basura,

salida de basura). La eficacia de cualquier red neuronal convolucional depende estrictamente de la preparación técnica de la laminilla; si la muestra presenta una excesiva celularidad (frotis demasiado grueso), una tinción deficiente o artefactos de técnica como precipitados de colorante o rotura celular por presión excesiva, el algoritmo no podrá segmentar ni clasificar las estructuras de manera fidedigna, lo que puede derivar en resultados erróneos o muestras catalogadas como "no diagnósticas" (García, et al, 2024).

La falta de contexto clínico intrínseco en los modelos de visión computacional puros es otro reto importante. La IA convencional examina la imagen de manera independiente, mientras que un patólogo clínico humano combina los resultados microscópicos con la anamnesis del paciente. El algoritmo tiene la capacidad de detectar los criterios de malignidad en una masa, pero no sabe si el paciente tiene fiebre, si la lesión creció agudamente en un período de 48 horas o si hay una linfadenopatía regional relacionada. Por lo tanto, es necesario que el veterinario realice una correlación clínica en cualquier informe generado por IA, ya que el médico tiene la responsabilidad de corroborar los resultados algorítmicos dentro del contexto patológico general del animal.

Para mitigar estas limitaciones, la tendencia científica actual se ha desplazado hacia el desarrollo de algoritmos de IA Multimodal. Estos sistemas de última generación no limitan su análisis a la morfología de la imagen citológica, sino que son capaces de integrar y procesar simultáneamente variables heterogéneas, como los valores numéricos del hemograma, la edad del animal, la especie y la localización anatómica de la muestra. Al cruzar la información visual con los datos clínicos y de laboratorio, estos modelos multimodales logran ofrecer un diagnóstico de probabilidad significativamente más preciso y contextualizado, reduciendo la incertidumbre y acercando la patología digital a un modelo de medicina de precisión verdaderamente integral (García, et al, 2024).



Cirugía 4.0: Precisión Robótica y Visualización Avanzada

3

CAPÍTULO 3.

CIRUGÍA 4.0: PRECISIÓN ROBÓTICA Y VISUALIZACIÓN AVANZADA

Julio César Bravo Brito, Edison Macgyver Barragán Taco,
Gabriela Mercedes Ordóñez Andrade y Byron Enrique Borja Caicedo.

3.1. Planificación quirúrgica: Del monitor a la impresión 3D personalizada.

La Cirugía 4.0 en el ámbito veterinario implica, no solo una actualización tecnológica, sino también una transformación profunda de la práctica quirúrgica, por la cual se da la convergencia sinérgica de la digitalización masiva, la fabricación aditiva y la realidad extendida, desplazando el eje central de la intervención desde la exclusiva destreza manual del cirujano hacia un ecosistema computacional avanzado (Crespo, et al, 2023).

En este entorno, la intervención se "ejecuta" y perfecciona digitalmente en múltiples iteraciones antes de realizar la primera incisión, garantizando una seguridad y predictibilidad sin precedentes en la medicina animal. Este enfoque holístico de la planificación quirúrgica se sustenta en pilares tecnológicos fundamentales que redefinen la relación entre el diagnóstico y la ejecución (Chen, et al, 2020).

El primer estadio es la reconstrucción 3D y la creación de gemelos digitales, un proceso que trasciende la interpretación de imágenes planas en formato DICOM provenientes de tomografías computarizadas (TAC) o resonancias magnéticas (RM). Con la puesta en marcha de algoritmos de inteligencia artificial, se consigue una segmentación automatizada que puede marcar con exactitud milimétrica masas tumorales, redes vasculares y órganos.

El resultado es un "Gemelo Digital": un modelo virtual interactivo del paciente que posibilita al médico simular, diseccionar y rotar procedimientos complejos. Esta herramienta es esencial para tratar enfermedades estructurales serias, como las fracturas de pelvis conminutas o las deformidades angulares complicadas que son propias de razas condroditróficas, por ejemplo, el Bulldog o el Dachshund, en las que la anatomía convencional sufre alteraciones graves.

La Bioimpresión y el Prototipado, que también se llaman modelos hápticos, son los métodos por los cuales se lleva a cabo la transición del ambiente virtual al físico. La planificación quirúr-

gica deja de ser bidimensional y pasa a estar en manos del cirujano, gracias a la impresión 3D. Los modelos prequirúrgicos posibilitan una interacción con la enfermedad a través del tacto, lo que permite probar osteotomías y medir con precisión los implantes.

El diseño de Guías Quirúrgicas Personalizadas (*Patient-Specific Guides*) es un progreso que ha surgido a partir de esta tecnología. Estos dispositivos, diseñados a medida de la superficie anatómica del animal, actúan como bloques de corte y perforación que encajan de forma unívoca, reduciendo drásticamente el error humano y, por consiguiente, los tiempos de anestesia, un factor vital en pacientes críticos o geriátricos (Nguyen et al., 2023).

Tanto la navegación quirúrgica como la realidad aumentada (AR) funcionan como sentidos ampliados para el cirujano dentro del quirófano. La posibilidad de "mirar" a través de los tejidos planos se le brinda al cirujano mediante el uso de dispositivos como gafas inteligentes, que posibilitan la superposición de estructuras digitales sobre el campo quirúrgico real. Esta representación de trayectorias arteriales críticas o límites tumores ocultos, fundamentada en información imagenológica anterior, reduce al mínimo el daño secundario (Wang et al., 2021).

Además, los sistemas de navegación por infrarrojos operan como un GPS intraoperatorio. Esto posibilita el seguimiento en tiempo real de la ubicación precisa de los instrumentos dentro de las cavidades corporales del animal. La Cirugía 4.0 integra la Simulación Biomecánica Virtual como garante de la durabilidad del tratamiento. A través del Análisis de Elementos Finitos (FEA), es posible someter los diseños de prótesis o placas a pruebas de estrés digital que emulan las fuerzas de carga reales —como saltar o caminar— según el peso y la actividad del paciente (González et al., 2023).

Este análisis predictivo es fundamental para la selección de materiales, permitiendo discernir entre opciones como el titanio o el acero, y optimizar el diseño del implante para prevenir fallos mecánicos a largo plazo. En conjunto, estos pilares elevan la cirugía veterinaria a un nivel de ingeniería biológica, donde la tecnología y la medicina se fusionan para ofrecer resultados de máxima precisión.

Tabla 11. Comparación de la Planificación Tradicional de la cirugía vs. Cirugía 4.0

Característica	Planificación Tradicional	Planificación Cirugía 4.0
Visualización	Radiografías 2D (subjetivo)	Modelos 3D y Realidad Virtual
Ensayos	Durante la cirugía real	Entrenamiento previo en modelos 3D
Precisión	Depende del ojo del cirujano	Guías impresas personalizadas
Tiempo de Quirófano	Mayor (ajuste de implantes <i>in situ</i>)	Menor (implantes pre-contorneados)
Complicaciones	Reactivas (se resuelven al surgir)	Proactivas (se predicen y evitan)

Adaptado de (Chen, et al, 2020)

La Cirugía 4.0 no tiene la intención de sustituir el juicio clínico o la habilidad manual del cirujano, sino de dotar al profesional con capacidades visuales y predictivas ampliadas que le permitan superar las limitaciones humanas convencionales. Mediante instrumentos como la navegación quirúrgica asistida, la impresión en tres dimensiones y la realidad aumentada, el profesional obtiene una especie de "superpoderes" informáticos que eliminan gran parte de la incertidumbre propia de la amplia diversidad anatómica entre especies y aseguran una exactitud que antes no era posible (Chen et al., 2023).

La mejora en el bienestar de los animales y los resultados clínicos son las consecuencias más palpables de este desarrollo. La mejora de la cirugía mínimamente invasiva es uno de los cimientos esenciales. El cirujano, debido al mapeo preoperatorio y a la planificación digital avanzada, conoce detalladamente el sitio de la lesión antes de llevar a cabo el primer contacto. Esto posibilita realizar incisiones mucho más pequeñas, lo que se traduce en un descenso considerable del dolor después de la operación, una disminución de la probabilidad de infecciones y una recuperación biológica más rápida.

Además, al optimizar los procesos a través de la planificación 4.0, se reduce significativamente el tiempo anestésico. Las investigaciones indican que una intervención bien diseñada en am-

bientes virtuales puede reducir de manera significativa el tiempo que se pasa en quirófano. La eficacia temporal es un elemento clave para el éxito clínico, en particular con pacientes geriátricos o con aquellos que tienen enfermedades cardíacas subyacentes, ya que cada minuto bajo anestesia eleva la probabilidad de complicaciones sistémicas (Chen, et al, 2020).

La cirugía 4.0 garantiza resultados de calidad superior, tanto funcionales como estéticos, especialmente en áreas complicadas como la reconstructiva y la maxilofacial. En estos casos, la simetría no se trata únicamente de un asunto estético; es crucial para asegurar funciones básicas como tragar y masticar. Se asegura que el paciente recupere su calidad de vida con una funcionalidad anatómica completa, reduciendo las secuelas de intervenciones traumáticas o congénitas, a través del empleo de guías quirúrgicas personalizadas e implantes hechos a medida.

3.2. Realidad Aumentada (AR) y Mixta en el quirófano: Anatomía holográfica.

En el ámbito de la medicina veterinaria, se está modificando la exactitud de las operaciones quirúrgicas y la capacitación médica con el uso de Realidad Aumentada (AR) y Realidad Mixta (MR). Esto posibilita que los cirujanos vayan más allá de simplemente analizar imágenes en dos dimensiones en una pantalla, para poder interactuar directamente sobre los pacientes con anatomía holográfica tridimensional (Muñoz et al., 2020).

La implementación de la anatomía holográfica representa uno de los hitos más disruptivos en la medicina veterinaria contemporánea, al consolidar el concepto del "Paciente Transparente". Esta tecnología trasciende la interpretación tradicional de imágenes bidimensionales, utilizando modelos tridimensionales de alta fidelidad generados a partir de tomografías computarizadas (TAC) o resonancias magnéticas (RM) del paciente real. Al transformar estos datos en hologramas que se proyectan y manipulan en el espacio físico, se elimina la brecha cognitiva entre la imagen diagnóstica y el cuerpo físico del animal, permitiendo una comprensión volumétrica total de la patología (Durán, 2025).

En la fase del estudio prequirúrgico, la anatomía holográfica permite al equipo médico realizar una inmersión profunda en la anatomía específica del individuo antes de efectuar la primera incisión. Los cirujanos tienen la capacidad de observar, utilizando dispositivos de realidad mixta, la compleja red vascular, la estructura ósea y la posición precisa de las masas tumorales en un modelo con una escala 1:1 que parece "flotar" dentro del ambiente quirúrgico. Esta habilidad

de visualizar anticipadamente es esencial para detectar alteraciones en la anatomía o irregularidades en la estructura que, de otra manera, solo se podrían reconocer durante la disección. Esto disminuye los imprevistos y mejora la seguridad del procedimiento (Chen et al., 2023).

Esta herramienta posibilita que el veterinario gestione los datos clínicos de un modo aséptico e intuitivo. El experto tiene la capacidad de incrementar las áreas críticas para llevar a cabo un análisis más detallado, rotar el órgano afectado o ejecutar un control selectivo de capas, empleando comandos de voz o gestos manuales en el aire. La función de "encender y apagar" sistemas específicos, como el sistema nervioso en términos de un enfoque espinal o el esqueleto para examinar una fractura, es esencial para comprender la relación espacial entre los tejidos adyacentes y la enfermedad. Al final, el paciente transparente no solo mejora la precisión técnica, sino que también convierte la planificación quirúrgica en un proceso interactivo, dinámico y sumamente personalizado para cada especie y necesidad clínica (Muñoz et al., 2020).

La introducción de la Realidad Mixta (RM) en el ambiente quirúrgico veterinario supone un avance significativo con respecto a las tecnologías de inmersión total, tal como lo es la realidad virtual. En contraste con la última, que aísla al usuario de su entorno, la RM permite que el cirujano mantenga el contacto visual con el mundo real y, simultáneamente, superponga componentes digitales en movimiento sobre objetos materiales empleando dispositivos sofisticados como Microsoft HoloLens 2 o Magic Leap. Esta capacidad de unir la información diagnóstica con la anatomía específica del paciente transforma el quirófano en un entorno de trabajo avanzado e inteligente.

Uno de los mayores beneficios que ofrece esta tecnología es la navegación quirúrgica en tiempo real. El cirujano puede ver hologramas de fracturas complejas, tumores o redes vasculares directamente sobre el cuerpo del animal gracias a las gafas de RM. Este sistema opera como un "GPS quirúrgico" con una elevada exactitud que orienta el movimiento del taladro o del bisturí, lo que permite al profesional evitar estructuras vitales escondidas bajo los tejidos blandos que no se podrían identificar por medio de procedimientos convencionales. Esta referencia espacial constante reduce la carga cognitiva del cirujano, quien ya no tiene que desviar su mirada entre un monitor externo y el paciente, manteniendo de este modo una atención completa en el área quirúrgica.

De igual forma, la Realidad Mixta funciona como una guía de abordaje esencial en intervenciones de gran complejidad, tales como la traumatología y la ortopedia. El sistema posibilita la proyección de trayectorias precisas para insertar tornillos y clavos, así como de líneas óptimas de incisión con precisión milimétrica. Al alinear el modelo digital con la estructura ósea real, se reduce de forma significativa el margen de error humano que proviene de la interpretación visual subjetiva, garantizando que la ejecución técnica siga rigurosamente lo planeado antes de la operación (Wang et al., 2021).

Esta tecnología supera las barreras geográficas a través de la teleasistencia especializada. Un cirujano experto puede "entrar" al quirófano de manera virtual gracias a la habilidad de transmitir datos en tiempo real, independientemente de su ubicación en el mundo. El consultor externo tiene la misma perspectiva que el cirujano de campo y es capaz de hacer observaciones holográficas o ilustraciones técnicas que se muestran al instante en el campo visual del operario. Esta colaboración a distancia no solo perfecciona la resolución de pasos complicados en un procedimiento, sino que también brinda acceso al conocimiento especializado de manera universal, lo cual mejora la seguridad y el éxito clínico en la medicina veterinaria global.

La incorporación de la Realidad Aumentada (RA) y la Realidad Mixta (RM) en los planes educativos y de capacitación técnica veterinaria está constituyendo una etapa trascendental para avanzar hacia modelos pedagógicos más éticos y eficaces. Actualmente, estas tecnologías están sustituyendo o complementando el uso tradicional de cadáveres en la enseñanza de la anatomía y la técnica quirúrgica, permitiendo una transición más fluida desde el conocimiento teórico hasta la práctica clínica real. Al digitalizar la complejidad biológica, se crea un entorno de aprendizaje dinámico donde el error no tiene consecuencias fatales, sino un alto valor educativo (Durán, 2025).

Los laboratorios virtuales de disección son representativos de esta gran transformación. En estos lugares, los alumnos tienen la oportunidad de practicar enfoques quirúrgicos repetidamente en modelos holográficos con gran fidelidad. Esta metodología posibilita mejorar la comprensión espacial de la anatomía y la habilidad manual sin las preocupaciones éticas relacionadas con el empleo de animales, ni los altos costos logísticos y de bioseguridad que implica conservar ejemplares biológicos. La posibilidad de "deshacer" una maniobra o repetir

un procedimiento complicado hasta que se logre la maestría técnica asegura que los cirujanos del futuro ingresen al quirófano con una mayor confianza y competencia técnica (Durán, 2025).

Asimismo, la digitalización de la experiencia clínica ha dado lugar a la creación de bibliotecas de patologías raras. Esta herramienta permite que los residentes e investigadores interactúen con casos clínicos inusuales o de baja frecuencia que han sido capturados mediante escaneo 3D y técnicas de diagnóstico por imagen avanzadas.

Al tener acceso a este repositorio de "casos virtuales", el estudiante se prepara para enfrentar situaciones críticas y anomalías anatómicas que, de otra forma, podrían no presentarse en su práctica diaria durante años. De este modo, la educación 4.0 no solo democratiza el acceso a casos complejos, sino que estandariza un nivel de preparación de excelencia, garantizando que la próxima generación de médicos veterinarios esté capacitada para intervenir con precisión ante cualquier desafío patológico (Beltrán, et al, 2024).

Tabla 12. *Ventajas Críticas de estas Tecnologías*

Ventaja	Descripción
Precisión Extrema	Permite intervenciones de mínima invasión al conocer la ubicación exacta de la lesión antes de abrir.
Seguridad del Paciente	Menor tiempo quirúrgico significa menos tiempo bajo anestesia y menores riesgos de infección.
Curva de Aprendizaje	Acelera la formación de cirujanos jóvenes al permitirles visualizar estructuras complejas en 3D.
Ergonomía	El cirujano no tiene que girar la cabeza para mirar un monitor; toda la información necesaria (constantes vitales e imágenes) está en su línea de visión.

Adaptado de (Chen, et al, 2020)

La Realidad Aumentada (AR) y la Realidad Mixta (MR) tienen un gran potencial transformador, pero su establecimiento final en el quirófano veterinario se encuentra con problemas técnicos actuales que son el límite de la investigación en ingeniería biomédica. La efectividad de estas

herramientas se fundamenta en la capacidad del sistema para mantener una consistencia espacial absoluta entre lo digital y lo biológico, un reto que es particularmente complejo debido a la naturaleza dinámica de los tejidos vivos.

La alineación y el registro (Registration) representan el primer gran obstáculo. El propósito de este método es que el holograma se mantenga "anclado" en el cuerpo del animal con una exactitud milimétrica, a fin de que la información visual sea perfectamente acorde con la anatomía subyacente. El desafío es que el paciente no es un objeto estático; la respiración, los movimientos menores durante la manipulación o incluso la distorsión de los tejidos blandos tras la incisión pueden generar una discrepancia entre lo que sucede físicamente y el modelo tridimensional (Rosado et al., 2025).

Se están creando algoritmos de seguimiento en tiempo real y sensores de profundidad para reducir esto, reajustando la ubicación del holograma al instante y garantizando que la guía visual mantenga su utilidad diagnóstica a lo largo del procedimiento.

La oclusión es otro reto crucial. En un ambiente de realidad mixta tradicional, los componentes digitales suelen mostrarse siempre en primer plano. Esto puede dar lugar a que el holograma "cubra" las manos del cirujano o los instrumentos quirúrgicos, lo que anula la percepción de profundidad necesaria para operar con seguridad. Para resolver este conflicto, es necesario contar con sistemas de visión por computadora sofisticados que tengan la capacidad de segmentar en tiempo real los instrumentos y las manos del operario, lo cual posibilita que se vean sobre las proyecciones digitales. La única manera de asegurar que el profesional conserve una referencia visual ergonómica y natural es a través de una gestión eficiente de la oclusión.

La cirugía holográfica ha dejado de ser una promesa de la ciencia ficción para volverse una realidad concreta en el campo de la medicina de precisión. Al vencer estos obstáculos técnicos, la incorporación de la industria 4.0 se establece como un instrumento esencial que asegura que cada operación quirúrgica sea tan exacta y singular como la anatomía del animal en cuestión, lo cual eleva el nivel de atención a una veterinaria personalizada y con escasa incertidumbre (Chen, et al, 2020).

3.3. Telecirugía y asistencia robótica de mínima invasión.

La asistencia robótica y la telecirugía son el máximo nivel de precisión en la veterinaria contemporánea. A pesar de que estas tecnologías se originaron en la medicina humana (con el sistema Da Vinci), su implementación en el campo veterinario ha posibilitado la realización de procedimientos complejos en pacientes de variado tamaño con una invasión mínima.

La precisión tecnológica en el quirófano actual alcanza su límite con la asistencia robótica de mínima invasión, que redefine la relación entre el cirujano y el campo operatorio. En este modelo, el médico no tiene los instrumentos en la mano directamente; en cambio, están conectados a brazos robóticos articulados que son controlados por él desde una consola de mando. Esta interfaz opera como un filtro tecnológico que mejora las habilidades humanas, lo que posibilita que la intervención se lleve a cabo con una habilidad más allá de los límites biológicos tradicionales (Chen, et al, 2020).

El uso de esta tecnología posibilita que el sistema convierta un movimiento de diez centímetros de la mano del cirujano en un desplazamiento micrométrico dentro del paciente de solo un centímetro. Esta desmultiplicación del movimiento es vital en la medicina veterinaria, especialmente cuando se trata de animales de especies pequeñas o estructuras anatómicas extremadamente sensibles, como el ojo o el sistema nervioso central, en los que no existe margen para maniobrar.

El sistema también garantiza la eliminación del temblor fisiológico. El robot anula las oscilaciones naturales e involuntarias de la mano humana, al utilizar algoritmos que procesan señales en tiempo real, lo que permite una estabilidad completa durante la realización de maniobras. Esta pureza en el movimiento permite realizar suturas microscópicas perfectas y anastomosis vasculares muy complejas, lo cual reduce significativamente las complicaciones que ocurren dentro de la operación y el daño tisular (Pimbosa et al., 2021).

Una visión 3D de alta calidad y con inmersión completa complementa la experiencia quirúrgica. Mediante un visor especializado, el médico obtiene una imagen tridimensional que presenta una nitidez y una profundidad de campo que no puede alcanzar la laparoscopia convencional. Esta visión volumétrica facilita una mejor valoración de los planos anatómicos y la separación entre estructuras relevantes; esto, junto con la capacidad de maniobra de los

brazos robóticos, posibilita que las operaciones mínimamente invasivas lleguen a niveles de exactitud característicos de la microcirugía, aunque con el beneficio de un enfoque con escaso trauma para el paciente.

La telecirugía, o cirugía a distancia, constituye uno de los avances más disruptivos de la medicina veterinaria 4.0, al desvincular la presencia física del especialista de la ubicación del paciente. Ella integra los sistemas robóticos con redes de conectividad de ultra alta velocidad y baja latencia, como el 5G o la fibra óptica de última generación. Esta infraestructura permite la transmisión de datos biométricos y comandos quirúrgicos en tiempo real, eliminando el retardo en la respuesta táctil y visual, lo que resulta indispensable para garantizar la seguridad operativa en procedimientos de alta complejidad (Chen, et al, 2020).

La consultoría quirúrgica a distancia es un modelo de cooperación interdisciplinaria sin igual que resalta entre las aplicaciones prácticas en el área veterinaria. En este modelo, un cirujano general que se encuentra en una región rural o de difícil acceso puede comenzar el procedimiento y hacer la apertura del paciente; luego, un experto ubicado en un centro de referencia lejano asume el control de los brazos robóticos para llevar a cabo la etapa más delicada de la intervención, como podría ser la disección detallada de un tumor próximo a una gran vena. Esta sinergia mejora la utilización de recursos humanos y técnicos, garantizando que el paciente acceda al mejor nivel de atención sin tener que realizar traslados estresantes o costosos (Durán, 2025).

La telementoría activa redefine, además, el entrenamiento y la asistencia en la operación a través de la realidad mixta. En estas circunstancias, el experto remoto no se limita a observar de manera pasiva, sino que también mantiene una interacción directa con la zona quirúrgica del cirujano local. A través de interfaces digitales, puede emitir guías láser o realizar anotaciones holográficas que el cirujano en campo tiene la posibilidad de observar en su propio campo visual, indicando con precisión milimétrica el punto exacto donde debe realizarse una incisión o la dirección precisa de una sutura. Esta ayuda técnica en tiempo real reduce significativamente la curva de aprendizaje y disminuye el riesgo de errores derivados de interpretaciones subjetivas.

La telecirugía, además, tiene como objetivo la creación de centros especializados que sean móviles. Estas son unidades quirúrgicas equipadas con tecnología robótica de vanguardia que tienen la capacidad de trasladarse a áreas remotas, zonas afectadas por desastres o regiones donde las infraestructuras sanitarias son insuficientes. Estas clínicas móviles, al ser gestionadas de manera remota desde centros de referencia a nivel nacional o internacional, posibilitan que se realicen intervenciones de vanguardia en contextos donde, por lo general, no existía otra alternativa más que la eutanasia o el tratamiento conservador debido a la falta de recursos técnicos especializados (Vanguardia Veterinaria, 2026).

Tabla 13. *Ventajas de la Cirugía Robótica en contraste con Laparoscopia Tradicional*

Característica	Laparoscopia Manual	Cirugía Robótica
Grados de Libertad	Instrumentos rígidos (movimiento limitado).	Instrumentos "EndoWrist" (rotación mayor que la mano humana).
Ergonomía	Cirujano de pie en posiciones incómodas.	Cirujano sentado en una consola ergonómica.
Curva de Aprendizaje	Lenta y compleja.	Más intuitiva (movimientos naturales de la mano).
Precisión	Limitada por la escala humana.	Sub-milimétrica.

Adaptado de (Rosado et al., 2025)

La cirugía 4.0 se ha afianzado en la medicina veterinaria y ha hecho posible que operaciones que antes se consideraban de alto riesgo sean ahora procedimientos muy seguros y predecibles. En campos donde la fragilidad de los tejidos y el espacio reducido representan los principales retos técnicos, la navegación digital y la robótica han tenido un impacto transformador al permitir una transición hacia una medicina de precisión que se enfoca en la recuperación funcional inmediata.

La cirugía cardiotorácica es uno de los campos con más ventajas. Hoy en día, con la ayuda de brazos robóticos y de incisiones mínimas visualizadas a través de una visión de alta definición, es posible realizar procedimientos complejos como la reparación de válvulas cardíacas o la corrección de la persistencia del conducto arterioso. Esta técnica, al eliminar la necesidad de

llevar a cabo toracotomías o esternotomías invasivas, disminuye considerablemente el dolor después de la operación y las dificultades respiratorias relacionadas, lo que permite que el paciente recupere su estabilidad hemodinámica en un periodo de tiempo mucho más corto que el del procedimiento quirúrgico tradicional (García et al., 2021).

De igual manera, la urología ha progresado significativamente, en particular en lo que respecta al tratamiento de gatos y perros de razas pequeñas. La extracción de cálculos ureterales o la nefrectomía en estos pacientes, donde el espacio de maniobra es muy limitado, requiere una precisión que va más allá de las habilidades manuales humanas. Gracias a la asistencia robótica y al escalado de movimientos, el cirujano puede trabajar en estas pequeñas estructuras con una precisión exquisita, manteniendo la funcionalidad renal y reduciendo al mínimo el trauma en el tracto urinario, lo que resulta crucial para que el animal sobreviva a largo plazo.

Es importante señalar que la oncología de precisión se beneficia directamente de la incorporación de guías inteligentes para cirugías y modelos holográficos. Ahora se lleva a cabo la resección de tumores situados en zonas de acceso complicado, como el mediastino o la base del cráneo, con márgenes de seguridad mucho más precisos. El cirujano tiene la capacidad de distinguir claramente los bordes entre el tejido neoplásico y las estructuras vitales aledañas al sobreponer la información de la tomografía en tiempo real con el campo quirúrgico. Esto no solo asegura una exéresis de la masa tumoral más exhaustiva, sino que también salvaguarda vasos y órganos fundamentales, lo cual incrementa las tasas de éxito y mejora significativamente el pronóstico vital de los pacientes con cáncer (Chamorro, et al, 2022).

La viabilidad técnica y la seguridad operativa de la telecirugía veterinaria dependen críticamente de la gestión de la latencia y la conectividad. Para que un procedimiento a distancia sea clínicamente seguro, el retraso entre el movimiento físico de la mano del cirujano y la respuesta mecánica del brazo robótico —conocido como latencia— debe mantenerse estrictamente por debajo del umbral de los 100 a 150 milisegundos. Superar este límite introduciría un "lag" perceptual que podría comprometer maniobras críticas, como la sutura de un vaso sanguíneo o la disección de tejidos friables. La expansión de las redes de 5G industrial y la consolidación de constelaciones de satélites de órbita baja (LEO) han proporcionado el ancho de banda y la

estabilidad necesarios para minimizar estos riesgos, transformando la telecirugía de un concepto experimental en una realidad clínica funcional en diversas latitudes (Rosado et al., 2025).

Sin embargo, la democratización de estas tecnologías se enfrenta a importantes retos económicos. Hoy en día, la principal barrera para la implementación a gran escala de la Cirugía 4.0 no es la madurez tecnológica, sino los altos costos relacionados. Para la adquisición de sistemas robóticos de vanguardia, se requiere una inversión inicial importante, además de costos recurrentes por consumibles de alta precisión y mantenimiento especializado. Por lo tanto, estas herramientas suelen estar disponibles solamente en hospitales universitarios de referencia o en centros de oncología veterinaria altamente complejos. Esto genera una brecha tecnológica que solo podrá ser cerrada si se optimizan los modelos de negocio y se mejora la escalabilidad de la producción de hardware médico.

Puede afirmarse que la transición hacia una práctica clínica estándar y segura descansa sobre dos pilares fundamentales: el entrenamiento especializado y la gestión de fallos. La formación de cirujanos robóticos requiere un aprendizaje técnico diferenciado que incluye el dominio de la ergonomía de la consola y la interpretación de la visión tridimensional.

Paralelamente, el desarrollo de protocolos robustos para la gestión de contingencias en telecirugía —como la pérdida súbita de conexión o fallos en el suministro eléctrico— es lo que garantiza la integridad del paciente. Solo mediante una capacitación rigurosa y sistemas de respaldo redundantes, estas tecnologías podrán consolidarse como el estándar de oro en la medicina veterinaria contemporánea, asegurando que la innovación técnica se traduzca siempre en un beneficio clínico tangible y seguro (Durán, 2025).

El proceso de formación del cirujano veterinario en el contexto de la industria 4.0 ha sufrido un cambio estructural, que ha movido el comienzo del aprendizaje desde el quirófano con pacientes reales a ambientes digitales y sintéticos muy precisos. Este nuevo paradigma de la educación tiene como objetivo asegurar la seguridad del paciente a través de una curva de aprendizaje controlada, que se divide en cuatro fases sucesivas e incluye tecnologías de punta y métodos pedagógicos avanzados.

La Simulación Virtual (VR) y los *Serious Games* constituyen la base de la etapa inicial. El experto emplea simuladores de consola, creados para mejorar capacidades psicomotoras específicas,

antes de interactuar con el sistema robótico físico. El cirujano entrena su cerebro para adaptarse a una visión tridimensional y contrarrestar la falta de retroalimentación háptica convencional mediante ejercicios de habilidad, como mover anillos por alambres virtuales o hacer suturas en tejidos digitales. El avance en esta fase está condicionado por métricas estrictas de rendimiento: el software audita la economía de movimientos, el tiempo de ejecución y el daño causado al tejido virtual en tiempo real. Solo se permite progresar a un nivel superior cuando se cumple un estándar preestablecido de excelencia (Chen, et al, 2020).

El aprendizaje pasa a la utilización de modelos sintéticos y bioimpresión después de dominar la interfaz digital. En esta fase, se utilizan biomodelos impresos en 3D con siliconas e hidrogeles que replican de manera exacta la elasticidad, resistencia y textura de los tejidos biológicos. Estos aparatos posibilitan la realización de procedimientos complicados, como anastomosis vasculares o colecistectomías, en contextos que cuentan con sistemas circulatorios artificiales. Estos vasos "sangran" cuando se realiza una acción equivocada, lo que ofrece un resultado verosímil y fortalece el aprendizaje técnico sin poner en peligro la vida de un animal (Durán, 2025).

La tercera fase se lleva a cabo en laboratorios de tejidos, empleando cadáveres donados bajo protocolos éticos rigurosos o modelos *ex vivo*. Este entorno es crucial para comprender la anatomía real bajo la óptica robótica y para perfeccionar el **docking** o posicionamiento de los brazos mecánicos. En pacientes de dimensiones reducidas, como gatos o perros miniatura, el espacio de maniobra es crítico; por ello, el cirujano debe aprender a configurar el equipo de forma que se eviten colisiones entre los brazos robóticos, un desafío técnico que requiere una planificación espacial meticulosa antes de la intervención en vivo (Iqbal et al., 2021).

El proceso culmina con la cirugía supervisada o **proctoring**. Las primeras intervenciones sobre pacientes reales se llevan a cabo bajo la tutoría de un cirujano experto (proctor). Gracias a la conectividad avanzada, este acompañamiento puede realizarse mediante telementoría, donde el experto supervisa cada movimiento de forma remota y tiene la capacidad de intervenir o tomar el control del sistema si la situación clínica lo requiere. Este modelo de formación garantiza que la integración de la robótica en la clínica veterinaria no sea un experimento, sino una práctica estandarizada que prioriza, por encima de todo, la integridad del paciente (Rosado et al., 2025).

El escenario con mayor riesgo es el que ocurre cuando se pierde la señal durante una telecirugía. Por eso, se ponen en marcha protocolos redundantes, tanto automáticos como manuales. La seguridad en la telecirugía veterinaria no solo se basa en la habilidad del profesional remoto, sino también en un sólido diseño de protocolos redundantes y de contingencia tecnológica que tienen como objetivo reducir los peligros propios de la conectividad digital. Estos procedimientos de defensa garantizan que la integridad del paciente prevalezca sobre el procedimiento robótico en caso de cualquier inestabilidad técnica, convirtiendo así un posible problema en una situación controlada (García et al., 2021).

El primer nivel de protección se establece mediante el Protocolo 1: Monitoreo de Latencia y *Jitter*. El sistema de telepresencia realiza una auditoría de la conexión milisegundo a milisegundo, evaluando la velocidad de respuesta y la variabilidad en la llegada de los paquetes de datos. Si la latencia excede el límite crítico de 200 ms, el software emite alertas auditivas y visuales al instante para notificar al cirujano. Cuando el retardo llega a ser de 300-500 ms, el sistema realiza una detención preventiva, manteniendo los brazos robóticos en una posición neutral para prevenir movimientos desfasados o erráticos que podrían causar daño a tejidos frágiles (MPM software, 2025).

Como salvaguarda ante una desconexión total, se implementa el Protocolo 2: Bloqueo de Seguridad Automático (*Fail-Safe*). En el instante en que se detecta la pérdida de señal, los frenos electromagnéticos del robot se activan, inmovilizando los brazos en su ubicación actual. De forma simultánea, dispositivos de energía como el bisturí eléctrico o las pinzas de sellado bipolar se desactivan automáticamente para prevenir quemaduras o cortes accidentales.

En la frontera de la innovación, algunos sistemas experimentales de Autonomía de Emergencia basados en Inteligencia Artificial pueden asumir tareas básicas de mantenimiento, como ejercer presión constante sobre un vaso sanguíneo, durante los segundos críticos que tarda en restablecerse la comunicación (Chen, et al, 2020).

Para minimizar la probabilidad de estas interrupciones, los centros de alta complejidad operan bajo el Protocolo 3: Redundancia de Conectividad. Estos hospitales no dependen de un único proveedor de servicios, sino que emplean un sistema de doble canal. Generalmente, se utiliza una red de fibra óptica de alta capacidad como vía principal, respaldada de manera

inmediata por conexiones satelitales de baja órbita o redes 5G privadas. La transición entre ambos canales es transparente para el operario y ocurre en microsegundos, garantizando un flujo de datos ininterrumpido incluso ante fallos masivos de la infraestructura terrestre (Cagigas, C.; Gómez, M., 2024).

El Protocolo 4: El Equipo Local de Rescate es el principal soporte de la seguridad quirúrgica, lo cual debe tenerse en cuenta. La normativa ética y técnica requiere que un cirujano veterinario con formación esté presente físicamente en el lugar donde se ubica el animal, sin importar la cantidad de automatización. Este profesional tiene la obligación de convertir, en cuestión de segundos, una cirugía robótica a una convencional (ya sea laparoscópica manual o abierta) si se presenta un problema hemorrágico que no pueda ser manejado a distancia o si el sistema presenta algún tipo de falla. Este equipo local tiene un carro de instrumentos estériles y listos para usar, garantizando que el soporte vital y la solución quirúrgica nunca dependan solamente de la tecnología (Cagigas, C.; Gómez, M., 2024).

Este enfoque integral asegura que, aunque la tecnología falle, la vida del paciente animal nunca quede desprotegida.

Tabla 14. *Resumen de la Seguridad Quirúrgica*

Componente	Medida de Seguridad
Humano	Equipo local listo para cirugía abierta (conversión).
Software	Bloqueo de movimientos ante latencia alta.
Hardware	UPS (Sistemas de energía ininterrumpida) para evitar apagones.
Red	Canales de comunicación duplicados y encriptados.

Adaptado de (Nguyen et al., 2023)

3.4. Bioimpresión de tejidos: El futuro de la reconstrucción en veterinaria.

La bioimpresión en tres dimensiones en la medicina veterinaria es uno de los avances más revolucionarios de los últimos diez años, y se ha establecido como el componente central de la medicina regenerativa personalizada. Al incorporar el uso de biotintas, este procedimiento supera las posibilidades de la impresión 3D tradicional, que está restringida al empleo de plásti-

cos, metales o polímeros para usos protésicos. Estas sustancias son formulaciones complejas que combinan células vivas del propio paciente con materiales biomiméticos, normalmente hidrogeles, los cuales funcionan como matrices extracelulares temporales o andamios. Esta arquitectura dual posibilita que las células se organicen, se multipliquen y maduren de forma controlada en el espacio tridimensional (Kamm et al., 2014).

Esta tecnología posibilita la elaboración de tejidos funcionales que el cuerpo animal no podría regenerar, en circunstancias normales, después de padecer traumas severos, resecciones oncológicas amplias o la progresión de enfermedades degenerativas. La bioimpresión, al emplear células autólogas (del propio paciente), reduce significativamente el peligro de rechazo inmunológico y asegura una integración biológica de alta calidad. Actualmente, esta herramienta se emplea para crear desde parches de piel y colgajos óseos a la medida para pacientes con quemaduras severas hasta estructuras de cartílago que ayudan a las personas con displasias graves a recuperar su movilidad. De este modo, se ofrece una solución definitiva en situaciones en las que antes solo existían tratamientos paliativos.

La producción de tejidos funcionales a través de la bioimpresión 3D es un proceso de ingeniería de tejidos muy avanzado que se lleva a cabo en cuatro fases fundamentales, las cuales combinan el diseño computacional, la biología celular y la manufactura aditiva.

Los primeros pasos son recolectar células y crear biotinta. En esta etapa, se adquieren células madre mesenquimatosas o células particulares del paciente, como los condrocitos si se trata de cartílago y los osteoblastos si se refiere a tejido óseo. Estas células se reproducen en un laboratorio bajo condiciones controladas hasta alcanzar la densidad necesaria, y después se combinan con un hidrogel biomimético, el cual está compuesto generalmente por colágeno, fibrina o alginato. El hidrogel tiene dos funciones: primero, actúa como un andamiaje estructural que mantiene la forma del tejido; segundo, funciona como matriz de nutrición y señalización para las células (Lee, et al, 2009).

Posteriormente, se procede al diseño digital y modelado. A partir de imágenes médicas de alta resolución del animal, obtenidas mediante TAC o Resonancia Magnética, se realiza una reconstrucción tridimensional del defecto anatómico exacto que se pretende reparar. El software de bioimpresión traduce este modelo en una ruta de deposición capa por capa, incorporando

de manera estratégica canales de microcirculación. Estos canales son fundamentales para permitir el flujo de nutrientes y el intercambio de gases, asegurando que el tejido "respire" y se mantenga viable durante y después del proceso de impresión (Zhang & Zhang, 2015).

La bioimpresora, en la fase de ejecución, utiliza primordialmente tres tecnologías según el tejido que se quiere obtener. La extrusión es el proceso preferido para tejidos densos como el hueso, ya que emplea presión neumática o mecánica para impulsar la biotinta por medio de una jeringuilla. Por su parte, la tecnología de inyección de tinta (*Inkjet*) deposita pequeñas gotas de células con una exactitud extraordinaria, lo cual es perfecto para estratificar tejidos delgados como la piel. Por último, la bioimpresión asistida por láser emplea pulsos de luz para situar las células sin contacto físico, lo que reduce al mínimo el estrés mecánico y asegura la viabilidad celular más alta en estructuras complejas.

La maduración en un biorreactor es la etapa final del proceso. El constructo biológico no se implanta inmediatamente después de la impresión porque no tiene la integridad funcional y mecánica requerida. Por esta razón, se sitúa en un biorreactor, un aparato sofisticado que reproduce con precisión las condiciones fisiológicas del organismo animal, como la temperatura continua, el flujo constante de nutrientes y estímulos mecánicos particulares (como pulsaciones o compresión). Este ambiente dinámico propicia que las células se comuniquen, secreten su propia matriz extracelular y se agrupen en un tejido funcional sólido, preparado para ser implantado en el paciente (Kamm et al., 2014).

La bioimpresión 3D ha trascendido el ámbito de la investigación teórica para consolidarse como una herramienta de vanguardia en la medicina veterinaria, ofreciendo soluciones personalizadas en áreas donde los tratamientos convencionales resultan insuficientes. Esta tecnología posibilita tratar enfermedades complejas a través de la elaboración de tejidos vivos que se incorporan biológicamente en el paciente, lo cual marca el comienzo de una época de medicina regenerativa con mucha precisión.

La reconstrucción ósea personalizada es una de las aplicaciones más firmes. La bioimpresión, en situaciones de fracturas con una pérdida crítica de masa ósea o después de la resección quirúrgica de tumores agresivos (por ejemplo, el osteosarcoma), posibilita la creación de andamios compuestos por hidroxapatita y células madre mesenquimatosas.

Estos dispositivos se diseñan para replicar exactamente la geometría de la zona afectada, sirviendo como una estructura temporal que el organismo del perro o gato utiliza para guiar el crecimiento de tejido óseo autólogo. A medida que el hueso nuevo se mineraliza, el andamio se reabsorbe de manera gradual, eliminando la necesidad de implantes metálicos permanentes que podrían causar complicaciones a largo plazo (Zhang & Zhang, 2015).

La fabricación de parches de piel para quemaduras extensas y heridas muy graves, como las que resultan de accidentes de tránsito, es un progreso significativo en la cirugía reconstructiva y dermatológica. La bioimpresión permite la creación de capas de piel con una estructura estratificada que simula a la perfección tanto la dermis como la epidermis. Cuando se usa la biotinta que contiene células del paciente, se acelera la cicatrización y se reduce el peligro de rechazo inmunológico. Estos parches se comportan como una barrera protectora inmediata, además de fomentar una reepitelización estética y funcional que supera la de los injertos tradicionales (Kamm et al., 2014).

Se piensa que la ingeniería de cartílago y articulaciones es una de las áreas con más potencial para tener un impacto clínico en el futuro, en particular para tratar problemas crónicos como la displasia del codo o de la cadera en razas grandes. La habilidad de bioimprimir meniscos o superficies articulares completas permite la posibilidad de recuperar la movilidad sin usar prótesis metálicas permanentes, que frecuentemente tienen restricciones en términos de durabilidad y compatibilidad mecánica. La meta de implantar cartílago bioimpreso es conseguir una restauración biológica que, de forma natural, soporte las cargas fisiológicas y cambie radicalmente el pronóstico de calidad de vida en pacientes con enfermedades degenerativas articulares (Bolgianni et al., 2020).

Tabla 15. *Ventajas de la Bioimpresión en el Paciente Animal*

Ventaja	Impacto en Bienestar
Personalización Total	El implante encaja perfectamente en la anatomía del animal, sin importar su tamaño o especie.
Cero Rechazo Inmune	Al usar células del propio paciente (autólogas), el cuerpo reconoce el tejido como propio.

Funcionalidad Real	A diferencia de un implante inerte, el tejido bioimpreso se integra, crece y se remodela con el animal.
Reducción de Autoinjertos	Ya no es necesario quitar hueso de una parte del cuerpo del animal para arreglar otra.

Adaptado de (Kamm et al., 2014)

La bioimpresión 3D se va estableciendo como líder en la medicina veterinaria, pero su aplicación afronta varios retos de tipo ético y médico que marcan el límite presente de la investigación en biotecnología. Aunque es posible crear tejidos personalizados, para que estos sean aplicados a gran escala en la clínica es necesario superar barreras regulatorias y técnicas esenciales que aseguran su viabilidad y seguridad.

La vascularización de tejidos complejos continúa siendo el mayor impedimento biológico. El desafío más grande de la ingeniería de tejidos consiste en poder imprimir redes vasculares y capilares que sean lo suficientemente pequeñas y funcionales para posibilitar la perfusión de oxígeno y nutrientes hacia el centro del tejido impreso. La bioimpresión en la actualidad se limita a tejidos finos o de escasa demanda metabólica, como el cartílago o la piel, ya que, si no hay una microvasculatura integrada, las células del centro de estructuras voluminosas mueren por falta de oxígeno antes de que el cuerpo del animal tenga posibilidad de integrarlas (Zhang & Zhang, 2015).

Desde un punto de vista operativo, el tiempo y el costo constituyen obstáculos económicos importantes. Hoy en día, la bioimpresión es un proceso muy costoso y lento que necesita una infraestructura de sala blanca, biorreactores sofisticados y trabajadores con un alto nivel de especialización. Esta circunstancia restringe su acceso a hospitales universitarios de alto nivel y centros de investigación de primera categoría, lo que plantea un dilema moral acerca de la igualdad en el acceso a terapias tecnológicas avanzadas para la población animal en general.

Hay que considerar que regular estas intervenciones amerita una complicación extrema en su elaboración. Ya que es un dispositivo médico implantable y, al mismo tiempo, una terapia celular, los procedimientos de aprobación son extremadamente rigurosos. Es fundamental asegurar que los tejidos bioimpresos no tengan inestabilidad en el genoma que pueda dar lugar a tumores o reacciones inmunológicas imprevistas después de la operación de trasplante. Para

transformar la bioimpresión en un procedimiento clínico seguro y reproducible, es esencial estandarizar estos procesos.

El futuro se orienta hacia la investigación de la Bioimpresión *In Situ*. Este avance propone el uso de brazos robóticos de alta precisión capaces de "imprimir" el tejido reparador directamente sobre la herida del animal mientras este se encuentra en el quirófano. Esta técnica eliminaría la necesidad de fases de maduración externa en biorreactores, reduciendo el tiempo de intervención y permitiendo que el propio microentorno fisiológico del paciente actúe como el sustrato de maduración natural, llevando la medicina de precisión a su máxima expresión operativa (Zhang & Zhang, 2015).

La incorporación de tejidos bioimpresos como reemplazo de animales vivos en la biotecnología y la industria farmacéutica es uno de los progresos científicos y éticos más importantes de la biomedicina actual y la veterinaria 4.0. Esta transformación de paradigma no solo surge como respuesta a una demanda social en aumento por el bienestar animal, sino que también atiende la necesidad técnica de disponer de modelos biológicos más exactos y predecibles para desarrollar terapias avanzadas y medicamentos.

Este enfoque, que se sitúa dentro de los métodos alternativos, promueve un cambio definitivo hacia una "toxicología *in vitro* de alta fidelidad". Esta consiste en trasladar la experimentación biológica desde organismos complejos a sistemas celulares tridimensionales creados por humanos o veterinarios.

La capacidad de emular, con una precisión molecular sin igual, la fisiología específica de una especie es lo que hace que los tejidos bioimpresos sean superiores a los modelos animales convencionales. Mientras que los modelos animales a menudo fallan en predecir reacciones humanas o incluso variaciones interespecíficas debido a diferencias metabólicas y genéticas, la bioimpresión permite crear órganos en un chip (*Organs-on-a-Chip*) que replican la arquitectura y función de órganos críticos como el hígado, el riñón o el corazón. Al utilizar biotintas derivadas de células madre de la especie objetivo, los investigadores pueden evaluar la toxicidad de un compuesto, su absorción y su eficacia terapéutica en un entorno controlado que elimina las variables externas y los sesgos biológicos del modelo vivo (Macías, 2016).

La adopción de estas tecnologías, desde un punto de vista ético, posibilita que el número de animales sacrificados en etapas de prueba preclínica se reduzca significativamente, lo cual es coherente con la regla de las 3R (reemplazo, reducción y refinamiento). La toxicología in vitro de alta fidelidad también acelera los tiempos de investigación y desarrollo, lo que reduce el costo del mantenimiento de bioterios y la posibilidad de que ocurran efectos negativos inesperados en pruebas clínicas futuras, además de evitar el sufrimiento animal. Por último, sustituir animales por tejidos bioimpresos no es solamente un imperativo ético; además, es una manera de reforzar un método científico más fuerte, eficiente y que se adecúa a los retos sanitarios presentes y venideros.

El mayor beneficio de esta tecnología es su capacidad para replicar una fisiología genuina. Por ejemplo, un "hígado en un chip" bioimpreso no es meramente una colección aleatoria de células; este modelo contiene capas precisas de células endoteliales y hepatocitos, además de canales de perfusión que simulan el flujo sanguíneo ininterrumpido. Esta configuración posibilita que los científicos analicen la metabolización de un fármaco, al identificar metabolitos tóxicos o procesos de aclaramiento hepático con una exactitud mucho mayor que la proporcionada por las técnicas convencionales. El dispositivo permite observar en tiempo real las respuestas biológicas a diversos compuestos químicos, mediante la inclusión de sensores de oxígeno y gradientes de nutrientes.

La bioimpresión posibilita la investigación de la interacción entre múltiples órganos, además de simular a cada uno de ellos. Al crear sistemas de "cuerpo en un chip", se puede enlazar diferentes módulos —como riñón, corazón y pulmón— mediante una red microfluídica que simula el sistema circulatorio. La farmacología veterinaria y humana depende de esta interconectividad, pues posibilita la monitorización de efectos sistémicos complejos. Por ejemplo, es posible analizar cómo un fármaco suministrado por vía inhalatoria en el "chip de pulmón" tiene incidencia sobre el ritmo cardíaco en el módulo adyacente, o establecer si los metabolitos que surgen a partir de esa interacción ocasionan deterioros secundarios en los tejidos renales (Paguirigan, A.; Beebe, D., 2009).

En última instancia, estos modelos no solo optimizan la seguridad y eficacia en el desarrollo de nuevos tratamientos, sino que consolidan un estándar científico más ético y eficiente. Al

reducir la dependencia de modelos animales y proporcionar datos específicos de cada especie mediante el uso de células autólogas, los órganos en un chip se posicionan como la piedra angular de la toxicología y la medicina personalizada actual (Polacheck, et al. , 2013).

La evolución de las pruebas de toxicidad y el cribado de fármacos (*screening*) mediante bioimpresión 3D marca el fin de una era dependiente de la experimentación animal masiva y el inicio de una metodología científica de alta precisión. Tradicionalmente, la identificación de moléculas tóxicas o candidatos a fármacos requería protocolos extensos que involucraban a cientos de especímenes, como ratones o perros de raza Beagle. Hoy en día, la posibilidad de imprimir constructos tisulares particulares no solo acelera los ciclos de investigación y desarrollo, sino que también brinda datos farmacológicos con una significación biológica que los modelos animales convencionales, frecuentemente limitados por diferencias entre especies, no son capaces de obtener.

Se puede apreciar uno de los progresos más destacados en las pruebas de irritación cutánea. La bioimpresión posibilita la producción de modelos de piel, ya sea humana o animal, con una complicada estructura estratificada que incluye fibroblastos y queratinocitos dentro de matrices de hidrogel. Estos modelos de piel sintética funcional se emplean para comprobar la seguridad de los cosméticos, productos de higiene y medicamentos tópicos, suprimiendo totalmente la obligación de utilizar protocolos que han sido históricamente polémicos, como el Test de Draize en conejos. Los investigadores pueden medir la citotoxicidad y las respuestas inflamatorias al someter estos tejidos bioimpresos a diferentes sustancias, lo que asegura resultados reproducibles y éticamente irreprochables gracias a un control absoluto de variables (Hamon, M.; Hong, J., 2013).

Asimismo, la evaluación de la cardiotoxicidad ha experimentado una transformación radical gracias a la impresión de parches de tejido cardíaco funcional. Estos parches, compuestos por cardiomiocitos derivados de células madre, poseen la capacidad de latir de forma sincrónica y responder a estímulos eléctricos y químicos. En las fases de cribado, si una nueva molécula altera la frecuencia, el ritmo o la fuerza de contracción del parche bioimpreso, el compuesto es descartado de inmediato por su perfil de riesgo cardiovascular. Esta habilidad de detección anticipada en un ambiente in vitro altamente fiable garantiza que solamente las moléculas

con un perfil de seguridad verificado progresen hacia fases ulteriores, salvaguardando la integridad de todo ser vivo y mejorando los recursos de la industria biotecnológica para terapias con más posibilidades de éxito clínico.

La bioimpresión en 3D de modelos de enfermedad específicos para cada especie enfrenta una de las restricciones más importantes que ha existido históricamente en la experimentación biomédica convencional: la brecha de trasladabilidad entre especies. Históricamente, el uso de modelos murinos para predecir respuestas en cánidos o félidos ha derivado en fallos terapéuticos debido a divergencias metabólicas, genómicas y fisiológicas. La Veterinaria 4.0 supera este obstáculo al permitir la fabricación de constructos biológicos que emplean biotintas específicas, formuladas con células madre o células diferenciadas de la especie objetivo (César- Juárez, et al, 2018).

Este enfoque permite, por ejemplo, la impresión de "mini-riñones" felinos para el estudio de la enfermedad renal crónica, una de las patologías con mayor incidencia en la clínica de pequeños animales. Los científicos tienen la capacidad de valorar la nefrotoxicidad y la efectividad de medicinas nuevas en un ambiente que reproduce con precisión el microentorno renal felino cuando emplean líneas celulares autólogas o de la especie *Felis catus*. Este método asegura que los resultados conseguidos sean válidos de manera intrínseca para la especie objetivo, suprimiendo el requerimiento ético y técnico de inducir enfermedades experimentales en gatos vivos (César- Juárez, et al, 2018).

De igual manera, la oncología veterinaria de precisión ha experimentado una revolución gracias a la creación de modelos de tumores o cáncer. La bioimpresión permite la creación de reproducciones en tres dimensiones de tumores específicos obtenidos de un paciente animal vivo, manteniendo la diversidad celular y la estructura del estroma tumoral. Estos modelos impresos operan como un "banco de pruebas" individualizado en el que los oncólogos tienen la posibilidad de examinar varias combinaciones de quimioterapia o protocolos de inmunoterapia al mismo tiempo. El médico puede elegir la terapia más eficaz para un paciente concreto, al observar cuál tratamiento tiene una tasa de citotoxicidad más alta en el tumor bioimpreso. Así, se reducen los efectos secundarios sistémicos y se maximizan las posibilidades de remisión antes de suministrar cualquier medicamento al animal (Universidad de Granada, 2026).

Tabla 16. *Ventajas de la Bioimpresión sobre el Modelo Animal*

Factor	Experimentación Animal	Tejidos Bioimpresos (In Vitro)
Ética	Dilemas éticos y bienestar comprometido.	Cumplimiento del principio de las 3R (Reemplazo).
Precisión	Variabilidad entre especies (falsos resultados).	Alta fidelidad a la biología del "objetivo" (especie-específico).
Costo	Alto (mantenimiento de bioterios, personal).	Reducción de costos a largo plazo mediante automatización.
Velocidad	Meses o años para obtener resultados.	Semanas para el cribado masivo de miles de moléculas.

Elaboración propia a partir de (Bolgianni et al., 2020)

La transición hacia una ciencia post-animal constituye el objetivo más ambicioso y transformador de la investigación biomédica contemporánea. La meta final de la comunidad científica global no se limita simplemente a la reducción del número de especímenes utilizados, sino que aspira al reemplazo total del uso de animales en las fases tempranas y críticas de la investigación. Este avance representa un hito ético y técnico que redefine los estándares de validación científica, permitiendo que la biotecnología 4.0 asuma el papel protagonista en la determinación de la seguridad y eficacia de nuevas intervenciones terapéuticas (Escartín, 2017).

Este cambio de paradigma ha alcanzado su madurez institucional. Las principales agencias reguladoras de referencia global, como la FDA en Estados Unidos y la EMA en Europa, han integrado formalmente en sus marcos normativos la aceptación de datos derivados de tejidos bioimpresos y chips de órganos (Organ-on-a-Chip). Estos modelos de gran fidelidad son actualmente considerados como pruebas científicas válidas para autorizar el avance a fases clínicas en seres humanos y pacientes veterinarios, lo que anula la necesidad histórica de efectuar estas pruebas solo en animales de laboratorio. Esta evolución de la regulación se debe a las pruebas acumuladas que demuestran que los sistemas bioimpresos tienen una mayor capacidad predictiva que los modelos tradicionales con animales (Macías, 2016).

El cambio de metodología constituye un avance claro para el bienestar animal, pues determina un incremento exponencial de la seguridad de la medicina moderna. Con el empleo de mod-

elos que replican la complejidad estructural y metabólica de tejidos reales mediante células concretas de la especie objetivo, es posible detectar beneficios y riesgos con una exactitud que un animal de laboratorio de otra especie no podría alcanzar. La ciencia contemporánea asegura que los medicamentos y tratamientos alcancen la fase clínica con un perfil de seguridad mucho más sólido al eliminar las variables de confusión que provienen de la incompatibilidad biológica entre especies. Esto permite establecer una medicina más ética, eficaz y profundamente vinculada a la realidad biológica del paciente.

La convergencia de la Inteligencia Artificial (IA) con la bioimpresión y los sistemas de *Organ-on-a-Chip* ha dado origen a una disciplina de vanguardia: la Bioinformática Predictiva. Este campo, además de perfeccionar los procesos de manufactura aditiva biológica, redefine la metodología de investigación al realizar "experimentos in silico". Estas simulaciones por computadora de gran fidelidad posibilitan la validación de hipótesis científicas y la predicción del comportamiento celular en entornos virtuales antes de invertir recursos esenciales, como líneas celulares escasas, bióticas personalizadas o largos periodos de maduración e impresión en biorreactores (Macías, 2016).

Esta sinergia operativa se articula a través de tres niveles de integración que transforman el dato biológico en conocimiento ejecutable:

En el primer nivel, la IA actúa como un motor de optimización de biotintas y parámetros de impresión. Mediante algoritmos de aprendizaje profundo (*Deep Learning*), el sistema analiza miles de combinaciones de hidrogeles, densidades celulares y factores de crecimiento para identificar la formulación con la viscosidad y biocompatibilidad óptimas para un tejido específico. Esto asegura una viabilidad celular óptima desde la primera capa y pronostica con precisión la reacción de la biotinta ante las fuerzas de cizallamiento durante el proceso de extrusión, lo cual elimina el uso del método tradicional de ensayo y error (Bolgianni et al., 2020).

El modelado de la hemodinámica y el metabolismo en chips es el enfoque del segundo nivel. La inteligencia artificial procesa flujos de datos masivos en tiempo real sobre el consumo de oxígeno, la producción de lactato y la respuesta a medicamentos cuando los dispositivos *Organ-on-a-Chip* incorporan sensores. Los modelos predictivos pueden simular cómo una variación en el flujo microfluídico afectará la maduración del tejido o cómo un metabolito

específico se distribuirá entre diferentes órganos interconectados. Esta capacidad de "gemelo digital" (*Digital Twin*) permite anticipar fallos sistémicos o toxicidades crónicas que podrían tardar semanas en manifestarse en un cultivo físico (Zhang & Zhang, 2015).

El tercer nivel abarca la predicción de la integración tisular *post-implante*. La bioinformática predictiva, mediante el uso de redes neuronales convolucionales, examina imágenes diagnósticas pasadas y datos biomecánicos del paciente para predecir la manera en que el tejido bioimpreso se integrará con el tejido endógeno. El sistema tiene la capacidad de pronosticar el ritmo al que se degrada el andamio biomimético en función de la rapidez con la que crece el nuevo tejido orgánico, garantizando así que el cambio estructural sea estable desde un punto de vista fisiológico. En resumen, esta tríada tecnológica no solo impulsará la innovación en medicina regenerativa, sino que también establecerá un estándar de exactitud donde se unen la computación y la biología para asegurar el éxito clínico (Zhang & Zhang, 2015).

La implementación de Gemelos Digitales (*Digital Twins*) de Tejidos constituye uno de los pilares más avanzados de la Bioinformática Predictiva, permitiendo que la planificación quirúrgica y la ingeniería de tejidos alcancen niveles de precisión matemática. Antes de iniciar la fase de impresión física, la Inteligencia Artificial genera un modelo virtual ultrapreciso que replica tanto la geometría como el comportamiento dinámico del tejido que se pretende construir. Este "espejo digital" actúa como un laboratorio de pruebas virtual donde se someten a estrés todas las variables biológicas y mecánicas, garantizando que el diseño final sea viable antes de procesar una sola célula real (Zhang & Zhang, 2015).

La simulación de difusión es un elemento fundamental de este modelado. Garantizar que las células localizadas en el núcleo de estructuras tridimensionales voluminosas obtengan el apoyo vital requerido es uno de los desafíos históricos más grandes en la bioimpresión. Mediante el uso de algoritmos de inteligencia artificial, el Gemelo Digital prevé con exactitud en milímetros cómo los nutrientes y el oxígeno se moverán a través de la porosidad del hidrogel. Si la simulación detecta zonas críticas donde el flujo es bajo y las células corren peligro de morir a causa de hipoxia, el sistema remodela automáticamente la estructura de los microcanales vasculares. Esta mejora estructural garantiza que el tejido impreso cuente con una red interna de irrigación que opere y se adapte a las exigencias metabólicas del paciente.

Adicionalmente, el Gemelo Digital posibilita que se haga una predicción de la degradación del andamio (*scaffold*) en términos de regeneración biológica. La IA estudia la compleja relación química entre las células en fase de proliferación y los materiales sintéticos, como el ácido poliláctico o ciertos hidrogeles. Con este análisis, se puede determinar si la velocidad de crecimiento del nuevo tejido orgánico es adecuada para preservar la integridad estructural del órgano y el tiempo exacto que tomará al organismo absorber el material de soporte. La transición del implante de ser una estructura artificial a un tejido vivo que tiene funcionalidad total y es capaz de sostenerse por sí mismo se debe a esta sincronización perfecta entre la degradación del soporte y la consolidación biológica (Revista Médica, 2026).

Tabla 17. *Puntos Clave del Gemelo Digital en Bioimpresión*

Función	Beneficio Técnico	Impacto Clínico
Simulación de Difusión	Optimización de microcanales de nutrientes.	Prevención de necrosis central en tejidos grandes.
Modelado Biomecánico	Ajuste de la rigidez y elasticidad del hidrogel.	Integración mecánica perfecta con el tejido receptor.
Predicción Químico-Cinética	Cálculo de la tasa de reabsorción del andamio.	Asegura que el nuevo tejido soporte las cargas fisiológicas.

Adaptada de (Revista Médica, 2026)

El Gemelo Digital no es únicamente una representación visual; también es un motor de cálculo que garantiza que la innovación en medicina regenerativa sea predecible, confiable y adaptada a las particularidades de cada paciente veterinario.

El cribado virtual de medicamentos (*Virtual Drug Screening*) respaldado por inteligencia artificial es la etapa más eficaz de la farmacología moderna, funcionando como un filtro inteligente que mejora de manera significativa la investigación preclínica. En esta fase, la disminución de pruebas en animales y el ahorro de tiempo llegan a su punto más alto porque la validación de moléculas nuevas se hace en el medio computacional, no en los laboratorios físicos. Este procedimiento posibilita examinar un amplio universo químico con una rapidez y exactitud que sobrepasan las habilidades humanas convencionales, garantizando que

solamente los compuestos más prometedores se muevan hacia las etapas de validación biológica (Medina et al., 2015).

El acoplamiento molecular a través de inteligencia artificial (IA) constituye la base técnica de este avance. El sistema emplea algoritmos de dinámica molecular y redes neuronales profundas para examinar la composición química de miles de fármacos en desarrollo. La IA realiza "pruebas de acoplamiento" digitales que reproducen, con precisión nanométrica, cómo estas moléculas se enlazarían con los receptores específicos de las células del tejido bioimpreso o del patógeno objetivo. Este estudio no solamente pronostica la capacidad de la unión, sino también la estabilidad del complejo receptor-fármaco y el riesgo de provocar reacciones biológicas favorables o efectos secundarios negativos.

Los resultados de este cribado virtual transforman la economía de la investigación. De una base inicial de, por ejemplo, 10,000 moléculas candidatas, la IA es capaz de identificar con alta fidelidad las cinco que presentan la mayor probabilidad de éxito clínico. Al reducir el embudo de investigación de miles a apenas un puñado de opciones, la necesidad de realizar experimentos físicos se minimiza drásticamente. Solo esas cinco moléculas seleccionadas se someten a pruebas de toxicidad y eficacia en tejidos bioimpresos reales o sistemas de *Organ-on-a-Chip*, eliminando la necesidad de administrar miles de sustancias experimentales a animales de laboratorio y garantizando un desarrollo farmacéutico más ético, rápido y seguro (Medina et al., 2015).

La optimización de la biotinta a través del aprendizaje automático constituye la solución tecnológica para uno de los retos más acuciantes de la bioingeniería: mantener un balance entre las propiedades reológicas y la viabilidad biológica. Crear una biotinta efectiva es un procedimiento de gran complejidad técnica, porque el material tiene que tener una viscosidad bastante baja para fluir sin bloqueos a través de la boquilla de impresión; al mismo tiempo, debe mostrar una fidelidad estructural adecuada para conservar su forma tridimensional y soportar el peso de las capas superiores después de ser depositado (Walas, 2023).

Se utilizan algoritmos avanzados de optimización para solucionar esta dicotomía, los cuales convierten la formulación de materiales de un proceso empírico a uno predictivo. La inteligencia artificial examina bases de datos extensas que incluyen centenares de combinaciones

experimentales de polímeros naturales, como por ejemplo el alginato y el colágeno, así como diferentes densidades celulares y concentraciones de factores de crecimiento. La IA, a través de modelos de regresión y redes neuronales, tiene la capacidad de pronosticar con precisión la «imprimibilidad» de cada mezcla, analizando factores como el comportamiento del adelgazamiento por cizallamiento y el esfuerzo de fluencia (Walas, 2023).

Además, este punto de vista basado en datos permite anticipar la viabilidad celular después de que se lleva a cabo la impresión. La inteligencia artificial identifica el "punto dulce" donde se cruzan la protección celular y la precisión arquitectónica, lo que permite determinar el estrés mecánico al que las células estarán sometidas cuando sean extruidas a través de microagujas. Al predecir el comportamiento de la biotinta en un entorno virtual, se evita el método clásico de "ensayo y error" en laboratorio, que es caro y consume mucho tiempo. Esto no solo acelera el desarrollo de nuevos protocolos para la medicina regenerativa, sino también garantiza que cada impresión esté perfeccionada para las exigencias biológicas específicas del tejido que se intenta reconstruir, lo que asegura una mejor función orgánica desde el prototipo inicial.

El modelado de toxicidad sistémica mediante ADME predictivo asistido por Inteligencia Artificial constituye el nivel más avanzado de la farmacología computacional, permitiendo una comprensión integral de la farmacocinética sin recurrir a organismos vivos. El acrónimo ADME hace referencia a los procesos de Absorción, Distribución, Metabolismo y Excreción, los cuales determinan la eficacia y seguridad de cualquier compuesto terapéutico. Mediante la integración de la IA, es posible conectar digitalmente diferentes tejidos bioimpresos para simular el comportamiento sistémico de un fármaco, transformando datos celulares aislados en un modelo dinámico de interconectividad orgánica (INESEM, 2026).

La capacidad de simulación multiorgánica es la que otorga el poder a esta tecnología. La inteligencia artificial funciona como un motor de cálculo que determina la cinética del compuesto mediante barreras biológicas virtuales. Por ejemplo, puede calcular con exactitud matemática qué proporción de la dosis, si se aplica un medicamento por medio de un parche bioimpreso en la piel, logra atravesar el tejido dérmico y qué concentración precisa tendrá el "mini hígado" en el chip después de la distribución por todo el sistema. Este modelado hace posible prever

fenómenos como la saturación metabólica o el efecto de primer paso, lo que ayuda a perfeccionar el diseño de las dosis terapéuticas antes de cualquier procedimiento físico.

El algoritmo se amplía para incluir la predicción de daño colateral en los tejidos. La IA no solo supervisa la molécula original, sino que también anticipa las características químicas de los metabolitos que se generan tras la biotransformación hepática. El sistema tiene la capacidad de determinar si estos subproductos serán nocivos para el tejido renal o cardiaco, incluso antes de que los chips de órganos se encuentren conectados físicamente en el laboratorio. Esta capacidad de previsión posibilita interrumpir la evolución de moléculas que podrían ser peligrosas en una fase muy temprana, asegurando que el paso de la simulación *in silico* a la validación *in vitro* sea un proceso altamente filtrado, seguro y eficaz (Walas, 2023).

Tabla 18. Comparativa de Eficiencia en Investigación

Fase de Investigación	Método Tradicional (Animales)	Bioimpresión + IA
Selección de Candidatos	Basado en literatura previa y pruebas en ratones.	Simulación virtual de millones de moléculas (horas).
Validación de Estructura	Pruebas de implantes en modelos vivos.	Simulación de estrés mecánico y biológico (minutos).
Pruebas de Toxicidad	Observación de síntomas clínicos en animales.	Análisis de biomarcadores digitales en tejidos específicos.
Tiempo Total	3-5 años.	6-12 meses.

Adaptado de (Walas, 2023)

La bioimpresión de "lazo cerrado" (*closed-loop*) es la culminación de esta evolución tecnológica y señala el comienzo de la época de la producción autónoma basada en biología. En este sistema, la bioimpresora se vuelve un instrumento inteligente que tiene la capacidad de supervisar y ajustar su propio proceso de creación, en vez de ser simplemente un ejecutor pasivo de instrucciones preprogramadas. Esta habilidad de autorregulación se logra al incorporar sensores de alta precisión que, en paralelo con el depósito de cada capa de biotinta, transfieren un flujo constante de datos a una unidad de Inteligencia Artificial en tiempo real (César- Juarez, et al, 2018).

La habilidad de corrección inmediata es la que otorga al lazo cerrado su valor disruptivo. Cuando la IA descubre desviaciones críticas —por ejemplo, una densidad celular inapropiada, fluctuaciones en la viscosidad del hidrogel o un compromiso con la fidelidad geométrica— durante el procedimiento de impresión, el sistema modifica los parámetros operativos de la máquina por sí mismo. En microsegundos, la IA modifica variables como la presión de extrusión, la velocidad de desplazamiento del cabezal o la temperatura de la boquilla para compensar las anomalías. Esta retroalimentación continua garantiza que el tejido resultante posea la funcionalidad biológica y la integridad estructural necesarias para su éxito clínico, minimizando el margen de error humano y técnico.

Esta sinergia definitiva entre la bioimpresión y la inteligencia artificial no solo implica el término de experimentos animales superfluos durante las etapas de desarrollo, sino que también marca el inicio de un nuevo modelo en la medicina veterinaria de precisión. Nos enfrentamos a una situación en la que el tratamiento ya no se basa en protocolos estandarizados para una especie, sino que es diseñado digitalmente, sometido a estrictas pruebas de validación en entornos virtuales y producido físicamente a partir del ADN y las exigencias concretas de un único paciente. Finalmente, la bioimpresión de circuito cerrado establece una medicina en la que la biotecnología se utiliza para mejorar la vida de manera ética, eficaz y completamente adaptada a cada individuo (Walas, 2023).



Medicina de Precisión: Genómica y Terapias Personalizadas

4

CAPÍTULO 4.

MEDICINA DE PRECISIÓN: GENÓMICA Y TERAPIAS PERSONALIZADAS

Byron Enrique Borja Caicedo, Julio César Bravo Brito,
Edison Macgyver Barragán Taco y Gabriela Mercedes Ordóñez Andrade.

4.1. Farmacogenómica

La farmacogenómica veterinaria es la disciplina científica que estudia cómo el perfil genético particular de un animal, su ADN exclusivo, afecta y define cómo reacciona metabólicamente frente a los medicamentos. Esta área es el soporte esencial de la medicina de precisión, fomentando un cambio necesario que va desde la prescripción de dosis "estándar", que se calculaban únicamente en función del peso vivo del paciente, hasta la creación de planes terapéuticos personalizados con base en la constitución biológica propia del sujeto. La farmacogenómica, al incorporar la genética en el proceso de tomar decisiones clínicas, facilita que los tratamientos sean más efectivos y reduce el peligro de reacciones adversas que podrían poner en riesgo la vida del animal (Alfaro, 2023).

El principio básico de esta ciencia radica en la comprensión de que no todos los organismos metabolizan las sustancias químicas con la misma eficiencia o velocidad. Esta variabilidad interindividual, mediada por polimorfismos genéticos, explica los tres escenarios clínicos más comunes en la práctica veterinaria: una molécula puede resultar altamente curativa para un paciente, ser completamente ineficaz para otro o, en el caso de metabolizadores lentos, transformarse en un compuesto letal para un tercero. En lugar de abordar la farmacología desde una perspectiva probabilística, la farmacogenómica proporciona al clínico las herramientas para identificar "quien es quien" antes de administrar la primera dosis, asegurando que la elección del fármaco sea tan única como el paciente que lo recibe (Hunter, R.; Isaza R., 2017).

El avance hacia una medicina veterinaria de alta precisión requiere la distinción fundamental entre el genotipo y el fenotipo farmacológico. Mientras que el genotipo se refiere a la constitución genética exacta de un individuo, el fenotipo farmacológico es la manifestación clínica de esa genética, es decir, cómo el animal realmente reacciona ante un medicamento. Esta

variabilidad está determinada por polimorfismos en genes críticos que codifican tres componentes esenciales: las enzimas metabolizadoras (como el Citocromo P450), que dictan la velocidad de degradación química; los transportadores de fármacos (como la Glicoproteína-P), responsables de movilizar las moléculas a través de las membranas celulares; y los receptores diana, que actúan como el anclaje específico donde el fármaco ejerce su acción biológica (Hawley, et al, 2010).

Una de las aplicaciones más relevantes de esta información es identificar las toxicidades hereditarias, como el caso del gen MDR1 (ahora llamado ABCB1), que se utiliza en la clínica veterinaria para animales pequeños. Existen razas que, especialmente los pastores de la variedad Collie y el Pastor Australiano, poseen una mutación en este gen que influye en la producción de una proteína encargada de eliminar las toxinas del sistema nervioso central.

Cuando esta barrera funcional no existe, fármacos habituales como la ivermectina, la loperamida o diversos agentes de quimioterapia tienen la capacidad de cruzar la barrera hematoencefálica y concentrarse en el cerebro, lo que puede provocar casos graves de neurotoxicidad que pueden llegar a ser mortales. La utilización de una prueba genética previa se ha convertido en un protocolo de seguridad fundamental que permite al médico cambiar estas moléculas por otras opciones seguras o ajustar la dosificación con exactitud.

Además, la farmacogenómica juega un rol fundamental en la oncología de precisión. La respuesta a la quimioterapia varía mucho entre los pacientes que tienen el mismo diagnóstico histológico, ya que cada neoplasia tiene un perfil genético único. Los oncólogos veterinarios son capaces de predecir, a través del estudio del ADN tumoral, si una enfermedad cancerosa será sensible a un medicamento particular o si, en cambio, tiene mutaciones que le otorgan una resistencia innata. Esta perspectiva evita que el animal sea expuesto a protocolos muy tóxicos que no aportarán beneficios clínicos, lo cual posibilita escoger desde el comienzo la terapia más eficaz y mejora notablemente el pronóstico y la calidad de vida del paciente con cáncer (Cartagena, 2019).

El manejo analgésico y el control anestésico en la medicina veterinaria contemporánea han dejado de ser procesos puramente procedimentales para transformarse en intervenciones farmacogenómicas de alta precisión. El protocolo anestésico es eficaz y seguro no solo por la

combinación de medicamentos elegida, sino también por la capacidad metabólica intrínseca del paciente, que viene determinada por variaciones específicas en los genes. Estas fluctuaciones establecen el perfil metabólico de la persona, lo que permite clasificarlo en grupos que definen si la intervención quirúrgica será exitosa o tendrá un riesgo.

En este contexto, identificar a los metabolizadores ultra-rápidos es fundamental para evitar el fracaso en la terapia. Las enzimas que llevan a cabo la biotransformación en estas especies, en particular las del complejo Citocromo P450, presentan una actividad extraordinariamente elevada. Como consecuencia, el fármaco es metabolizado y eliminado de inmediato de la circulación sistémica, lo que impide que alcance las concentraciones plasmáticas necesarias para generar un efecto analgésico o sedante. Esto puede llevar a una anestesia insuficiente o a un manejo del dolor inadecuado en el entorno quirúrgico, lo que pone en riesgo la salud del paciente y la viabilidad de la intervención.

Desde el punto de vista de la seguridad, los metabolizadores lentos constituyen un desafío clínico significativo. En estos individuos, la insuficiencia funcional de las vías metabólicas provoca que una dosis "estándar" persista en el organismo durante un lapso extenso. Por esta prolongada acumulación, el riesgo de toxicidad sistémica, depresión cardiorrespiratoria grave y largos plazos de recuperación tras la anestesia se eleva considerablemente.

La incorporación de perfiles farmacogenómicos posibilita que el anestesista veterinario prevenga estas reacciones extremas. Si se conoce de antemano el genotipo del animal, es posible adaptar la dosis o seleccionar agentes anestésicos que utilicen rutas metabólicas diferentes de forma predictiva. No solo mejora la administración del dolor perioperatorio, sino que también disminuye de manera importante la morbilidad relacionada con la anestesia, asegurando que cada protocolo sea tan seguro y eficiente como lo permita la singular constitución biológica del paciente (Álvarez, et al, 2019).

Tabla 19. *Beneficios de la Farmacogenómica*

Beneficio	Descripción
Seguridad Máxima	Identificación de pacientes con alto riesgo de reacciones adversas graves.

Eficacia Optimizada	Selección del fármaco correcto desde el primer día (evita el "ensayo y error").
Dosis Exacta	Personalización de la cantidad de fármaco según la capacidad metabólica real.
Reducción de Costos	Se evitan gastos en medicamentos ineficaces o en tratamientos de emergencia por toxicidad.

Adaptado de (Álvarez, et al, 2019)

La puesta en marcha de la farmacogenómica en la práctica clínica veterinaria significa un cambio operativo, pasando de una medicina reactiva a una prescripción inteligente. Este procedimiento, que combina la biotecnología de punta con la toma cotidiana de decisiones, se organiza mediante un flujo de trabajo estandarizado que asegura la adquisición de datos genéticos exactos y su conversión en acciones clínicas directas para el beneficio del paciente.

El proceso comienza con la recolección de una muestra, que es un procedimiento levemente invasivo y que tiene como prioridad el bienestar del animal. Normalmente, se utiliza un hisopo bucal para obtener células de la mucosa mediante un frotis de saliva; sin embargo, hay situaciones clínicas en las que se prefiere una muestra pequeña de sangre periférica. Estas muestras incluyen el material genético requerido para llevar a cabo el análisis, lo que posibilita la realización del perfilado incluso en pacientes geriátricos o críticos sin causarles más tensión.

Una vez obtenida la muestra, se procede a la fase de secuenciación y genotipado. Los datos son procesados en laboratorios especializados de biología molecular, donde se utilizan técnicas de PCR en tiempo real o microarrays para identificar polimorfismos de nucleótido sencillo (SNPs). El objetivo es localizar variantes genéticas específicas que la literatura científica ha vinculado directamente con la farmacocinética (cómo el cuerpo afecta al fármaco) y la farmacodinámica (cómo el fármaco afecta al cuerpo) de una amplia gama de moléculas de uso común en veterinaria (Klein, et al, 2017).

El resultado de este estudio se resume en un informe farmacogenético, que es un documento técnico creado para ser una herramienta de consulta rápida para el médico. Los medicamentos se clasifican visualmente en tres categorías, por lo general utilizando un sistema de código de colores, en este informe: "Seguros", donde se indica una respuesta estándar según el

perfil genético; "Usar con precaución o ajustar la dosis", que previene sobre un metabolismo modificado que necesita supervisión; y "Contraindicados", donde la posibilidad de toxicidad o ineffectividad es intolerable para la persona.

La prescripción inteligente es la conclusión del flujo. En esta fase, el veterinario no solo se dedica a seguir el informe de manera independiente, sino que incorpora los datos genéticos con la condición física del animal en este momento, su edad, su función renal y hepática y otras comorbilidades. Esta síntesis de datos posibilita escoger el tratamiento con la más alta probabilidad de éxito terapéutico desde la primera aplicación, suprimiendo así la incertidumbre y fijando un nuevo patrón de seguridad en la medicina veterinaria actual (Alfaro, 2023).

La medicina veterinaria avanza hacia la mayor seguridad biológica mediante la utilización de paneles farmacogenómicos integrados, una herramienta que tiene el potencial de cambiar la administración sanitaria desde los primeros momentos de vida del animal. La tendencia nueva indica que, en su primera cita con el pediatra, cada cachorro o gatito obtendrá un "pasaporte genético". Este archivo digital no será estático, sino que se convertirá en un conjunto de datos dinámicos relacionados de manera constante con su historial clínico electrónico. Este enfoque proactivo posibilita que la información genómica esté accesible con antelación a la aparición de una necesidad de tratamiento complejo, lo cual convierte a la prevención en un estándar de atención desde el nacimiento (Cobos, 2021).

La utilidad operativa de este pasaporte se debe a su integración con los Sistemas de Soporte a la Decisión Clínica (CDSS). El software de gestión veterinaria funcionará como un filtro de seguridad automatizado en un futuro próximo: cuando el clínico procure prescribir un fármaco, este sistema cotejará de inmediato la orden con el perfil genético del paciente.

Si se detecta una incompatibilidad, como un riesgo de toxicidad por el gen ABCB1 o una ineficacia metabólica por variantes en el citocromo P450, el CDSS emitirá una alerta inmediata. Esto garantiza que la seguridad del paciente no dependa únicamente de la memoria o la investigación manual del veterinario, sino de una red de seguridad tecnológica infalible basada en la propia biología del individuo (CEGID, 2026).

Se evidencia así una transformación filosófica y metodológica radical: el paso de una ciencia centrada en los promedios, que se fundamenta en lo que es efectivo para la mayor parte de

la población, a una ciencia enfocada en los individuos. La medicina veterinaria asegura que cada procedimiento terapéutico, ya sea una anestesia rutinaria, un tratamiento crónico o un protocolo oncológico, se adapte de manera tan específica e individual al animal que lo recibe, debido a la identificación y actuación sobre la singularidad del ADN. Este modelo no solo optimiza la calidad de vida de los pacientes, sino que además establece una práctica clínica con una ética más sólida, más efectiva y muy personalizada para afrontar los desafíos sanitarios de animales tanto en el presente como en el futuro (Alfaro, 2023).

La farmacogenómica veterinaria contemporánea ha dejado atrás el análisis aislado del gen MDR1 (ABCB1) y se ha integrado a una práctica clínica con múltiples dimensiones. Los laboratorios de referencia y los hospitales especializados emplean en la actualidad paneles multigenéticos para trazar el paisaje biológico del paciente antes de llevar a cabo intervenciones críticas. La sensibilidad celular a la anestesia, la cinética de las enzimas y la integridad de la cascada de coagulación son los tres fundamentos principales de este método preventivo. Así, se garantiza que el tratamiento médico sea personalizado y seguro por sí mismo.

El estudio de los genes que metabolizan medicamentos se enfoca en las enzimas del complejo P450, que son responsables de descomponer químicamente el cuerpo. El CYP2D15 es un gen que corresponde al CYP2D6 de los humanos, y las alteraciones en este locus influyen en la eficacia de los analgésicos y la seguridad de algunos betabloqueantes. El gen CYP2B11, al mismo tiempo, cumple un papel fundamental en el metabolismo de agentes anestésicos que se utilizan a diario, como el midazolam y el propofol. Esta versión es particularmente importante en razas como el Galgo (*Greyhound*), en las que una falta de enzimas explica la toxicidad y las recuperaciones prolongadas después de la anestesia. Además, el gen SULT1A1 (sulfotransferasa) es crucial para la detoxificación de compuestos fenólicos, lo cual explica la alta sensibilidad de los félidos a medicamentos como el paracetamol (Hunter, R.; Isaza R., 2017).

En lo que respecta a los genes de sensibilidad a analgesia y anestesia, el enfoque cambia del metabolismo a la respuesta directa de las células. Es crucial detectar alteraciones en el gen RYR1 (Receptor de Ryanodina 1) para evitar la hipertermia maligna, una condición farmacogenética que se produce cuando, al entrar en contacto con ciertos gases anestésicos, se genera un incremento térmico significativo y rigidez muscular que puede ser mortal en cuestión de

minutos. Por otra parte, el análisis de las variaciones del gen ORL1 posibilita la adaptación de los protocolos para tratar el dolor, determinando personas con resistencia o hipersensibilidad a los opioides. Esto garantiza que la aplicación de fentanilo o morfina sea exacta y humanitaria (Alcántara, 2021).

Se ha convertido en un procedimiento estándar la evaluación de los genes relacionados con la hemostasia antes de una cirugía. El diagnóstico de la enfermedad de Von Willebrand se puede realizar al valorar el gen VWF, especialmente en razas con predisposición, como el Corgi y el Doberman. Esto permite programar transfusiones de crioprecipitados antes de realizar cualquier incisión. Asimismo, es fundamental analizar el gen SERPINE1 para detectar alteraciones fibrinolíticas, como la hiperfibrinólisis postoperatoria en el galgo (cuando el coágulo se disuelve antes de lo previsto). La introducción de estos paneles genéticos no solamente optimiza la recuperación del paciente, sino que además transforma la seguridad quirúrgica en un contexto de precisión absoluta (Richeimer S.; Lee, J., 2016).

Tabla 20. *Paneles Específicos por Especialidad*

Especialidad	Gene(s) Adicionales	Aplicación
Oncología	KIT / BRAF	Predice la respuesta a inhibidores de tirosina quinasa (como Toceranib).
Cardiología	MYBPC3 / TPM1	Aunque son diagnósticos (Miocardiopatía Hipertrófica), ayudan a elegir fármacos inotrópicos seguros.
Neurología	GADL1	Relacionado con la respuesta a fármacos antiepilépticos y riesgo de efectos adversos.

Adaptado de (Richeimer S.; Lee, J., 2016)

La implementación de los "Paneles de Salud Proactivos" ha consolidado un cambio radical en la medicina veterinaria, desplazando el enfoque reactivo tradicional hacia una gestión preventiva basada en la genómica. Actualmente, la mayoría de los marcadores genéticos críticos se analizan de manera simultánea mediante un único test de cribado inicial, integrándose en plataformas profesionales de referencia. Los resultados derivados de estas

pruebas se cargan de forma automatizada en el **Expediente Clínico Electrónico (ECE)** del paciente, creando un repositorio de datos biológicos que acompaña al animal durante toda su vida (García et al., 2021).

Por medio de la interacción en tiempo real entre los datos genómicos y las prescripciones médicas, se hace evidente la utilidad clínica de estos paneles. En el ejercicio cotidiano, los veterinarios tienen el apoyo de sistemas inteligentes que funcionan como una red biológica de seguridad. Por ejemplo, si un médico intenta recetar azatioprina (un inmunosupresor de uso frecuente) y el sistema identifica que el paciente tiene una deficiencia en el gen TPMT (Tiopurina metiltransferasa), el programa de gestión enviará inmediatamente una alerta. Esta notificación alerta sobre el peligro inmediato de una eliminación grave de la médula ósea, indicando con exactitud que se reduzca la dosis en un 90% o que se reemplace por un medicamento alternativo (Richeimer S.; Lee, J. , 2016).

La eficiencia del sistema sanitario animal y la percepción del dueño se ven directamente afectadas por este modelo de medicina de precisión. Al prevenir las RAM (reacciones adversas a medicamentos) con ajustes predictivos, se disminuyen considerablemente los costos relacionados con las complicaciones iatrogénicas y la duración de las estancias hospitalarias de urgencia. Asimismo, la capacidad de ofrecer un tratamiento diseñado específicamente para la constitución genética del animal aumenta significativamente la confianza de los propietarios en los protocolos propuestos. En última instancia, los paneles de salud proactivos garantizan que la innovación biotecnológica se traduzca en una práctica clínica más segura, humana y científicamente rigurosa (Chamorro, et al, 2022).

La incorporación de pruebas genéticas en los planes de cría responsable está estableciendo un cambio sin precedentes en el campo veterinario y la cinofilia. Hemos transitado de una selección basada exclusivamente en la apariencia física y el estándar racial (fenotipo) a una cría fundamentada en la salud celular y la integridad metabólica (genotipo). En el ámbito de las sensibilidades farmacológicas, el objetivo ha evolucionado: ya no se busca únicamente tratar al individuo afectado, sino implementar estrategias de selección que permitan limpiar el acervo genético de las razas a largo plazo, garantizando la viabilidad biológica de las futuras generaciones (Richeimer S.; Lee, J., 2016).

El mayor desafío técnico reside en la identificación de portadores silenciosos. Muchas sensibilidades farmacológicas, como la mutación del gen *MDR1* (*ABCB1*), se manifiestan como rasgos recesivos o de dominancia incompleta. Un ejemplar puede presentar un estado de salud óptimo y, sin embargo, portar una copia del gen defectuoso. El riesgo inherente al "portador" es que el cruce de dos individuos aparentemente sanos, pero heterocigotos resulta en una camada donde, estadísticamente, la cuarta parte de las crías nacerá con una sensibilidad farmacológica severa (homocigotos afectados) y cerca de la mitad actuará como nuevos portadores.

El método actual es la prueba universal de los animales reproductores, lo que permite realizar cruces estratégicos: si un portador se empareja únicamente con un ejemplar libre (clear), se asegura que ninguna cría padezca la enfermedad clínica, aunque algunas sigan siendo portadoras.

Hay que equilibrar con mucho cuidado este procedimiento de selección negativa con la conservación de la diversidad genética. La cría responsable contemporánea no suprime de manera abrupta y masiva a todos los portadores, porque una disminución drástica de la población reproductora podría poner en riesgo la variabilidad racial y propiciar que surjan otras enfermedades genéticas latentes. En vez de eso, se elige una eliminación paulatina: únicamente los individuos afectados (homocigotos) son excluidos de la reproducción y la cantidad de portadores se disminuye poco a poco a través de varias generaciones (Alfaro, 2023).

Hoy en día, estas prácticas se han convertido en instituciones: las federaciones caninas internacionales y los clubes de raza de élite requieren Certificaciones de Salud de ADN para inscribir camadas. Un cachorro con estatus "MDR1 Clear" no solamente tiene un valor zootécnico más alto, sino que también le proporciona al dueño la seguridad de que podrá recibir tratamientos convencionales sin el peligro de neurotoxicidad.

La farmacogenómica, si se aplica a la cría, tiene el potencial de impedir que en poblaciones cerradas o pequeñas se "fijen" las imperfecciones. Un defecto metabólico puede convertirse en una característica universal de todos los miembros de una raza por deriva genética, si no se lleva a cabo un control genético estricto. Un caso ejemplar se da en el galgo (Greyhound), donde la utilización de pruebas para el gen *CYP2B11* posibilita determinar líneas de sangre con una función normal de la enzima para anestesia. Cuando se vuelve a introducir a estos

individuos en los programas de reproducción, se previene que la hipersensibilidad al propofol se establezca como una característica inherente a toda la raza (Alfaro, 2023).

Asimismo, la realización de pruebas sistemáticas del gen VWF en razas como el Doberman y el Corgi ha posibilitado que la cantidad de muertes por hemorragias postoperatorias se haya reducido significativamente en las líneas controladas durante los últimos diez años. Esto evidencia que la ciencia genómica es el instrumento más eficaz para garantizar un futuro saludable y funcional a las mascotas.

La incorporación de la bioinformática a la cría responsable ha convertido el proceso de selección animal, anteriormente empírico, en un método de ingeniería genómica con gran exactitud. Los criadores de la actualidad no se basan únicamente en los registros de pedigrí impresos, que frecuentemente son imprecisos o incompletos, sino que emplean plataformas para analizar el parentesco genómico. Estas herramientas incorporan automáticamente los resultados de las pruebas farmacogenómicas, lo cual posibilita que el acervo genético sea administrado priorizando la resistencia a las toxicidades de los medicamentos y la funcionalidad metabólica como fundamentos de la salud racial (Alcántara, 2021).

Uno de los aportes más críticos de la bioinformática es el cálculo del Coeficiente de Consanguinidad (COI) basado en ADN real. En contraste con el COI tradicional, que se calcula a través de ancestros comunes en papel, la Inteligencia Artificial examina el genoma completo de dos progenitores potenciales para prever con precisión la posibilidad de que los descendientes hereden alelos recesivos perjudiciales. En el contexto de las sensibilidades farmacológicas, el sistema puede determinar el riesgo de que una camada presente deficiencias en genes como el *ABCB1* o el *CYP2B11*. Al identificar regiones de homocigosis (segmentos de ADN idénticos provenientes de ambos padres), la bioinformática alerta sobre la posible "fijación" de defectos metabólicos antes de que se produzca el cruce, evitando el nacimiento de ejemplares hipersensibles (Diatchenko et al., 2005).

Estas plataformas también ofrecen capacidades avanzadas de sugerencia de parejas mediante algoritmos de emparejamiento genético. El sistema opera como un asesor en biotecnología que proporciona "*matches*" diseñados para solucionar las debilidades genéticas de un individuo específico. La inteligencia artificial intentará encontrar individuos con genes de metabolismo

"normal" o "rápido" en los mismos loci si una hembra presenta una variante de metabolismo lento, para asegurar que la descendencia recupere la eficacia farmacológica. Esta sinergia entre bioinformática y cría garantiza que cada tratamiento médico sea seguro para los descendientes y además mejora la fortaleza biológica de las razas, equilibrando la integridad genómica con la calidad estética (Cai et al., 2006).

En la actualidad, la culminación de un programa de cría responsable no se limita a la entrega de un certificado de pureza racial, sino que se formaliza mediante la provisión de un "Pasaporte Genético" del cachorro. Este avance tecnológico suele presentarse en forma de un código QR impreso junto al pedigrí oficial, el cual funciona como una llave de acceso a un mapa detallado de la sensibilidad farmacológica del individuo. Este documento digital representa la biografía metabólica del animal, permitiendo que, desde el momento en que el cachorro se integra a su nuevo hogar, su veterinario de cabecera disponga de información crítica sobre su capacidad para procesar diversas sustancias químicas (Durán, 2025).

Este pasaporte tiene una utilidad clínica preventiva e inmediata. El profesional de la salud determina con exactitud qué antibióticos, analgésicos o agentes anestésicos tiene que modificar o evitar al escanear el código en la primera consulta pediátrica. Esta transmisión de datos elimina la incertidumbre en circunstancias urgentes, cuando el tiempo de respuesta es crucial. Por ejemplo, si se necesita una operación temprana o un tratamiento contra parásitos para un cachorro, el veterinario tiene la capacidad de elegir el protocolo más seguro teniendo en cuenta el perfil de enzimas y transportadores del paciente. Esto asegura que desde su primer día de vida el procedimiento médico no cause reacciones adversas iatrogénicas.

La cría responsable ha sufrido una transformación significativa: ya no se basa en "la producción de ejemplares con una estética superior", sino en el ejercicio de una responsabilidad biológica completa. El objetivo principal de los criadores de élite en la actualidad es mantener la salud a nivel molecular. Los criadores, al esforzarse activamente por eliminar las sensibilidades farmacológicas hereditarias, no solo protegen a los animales individuales, sino que garantizan que las generaciones futuras de mascotas puedan acceder a cuidados médicos estándar de manera predecible y segura (Rosado et al., 2025).

Este compromiso ético disminuye de manera importante el sufrimiento animal innecesario y disminuye la carga emocional y económica que para los dueños suponen las emergencias toxicológicas, estableciendo un futuro en el que el bienestar animal surge desde la propia genética.

4.2. Edición genética (CRISPR) y el debate ético en animales de compañía.

La edición genética, encabezada por la tecnología CRISPR-Cas9, constituye una revolución en la biología moderna. En el campo de la medicina veterinaria, esta herramienta ha superado su etapa de experimentación en laboratorios de investigación para establecerse como una opción clínica concreta destinada a "corregir" la herencia biológica. Por primera vez en la historia, este progreso posibilita que se actúe directamente sobre el código genético de los animales de compañía para eliminar o disminuir enfermedades que han tenido un impacto en varias razas a lo largo de décadas (Seraquive et al., 2025).

El sistema CRISPR (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*) funciona como unas "tijeras moleculares" de alta exactitud. Su efectividad se basa en la sinergia de dos elementos esenciales: el ARN guía, que opera como un sistema de posicionamiento global (GPS) diseñado para identificar una secuencia específica de nucleótidos en el genoma, y la enzima Cas9, que funciona como el componente efector responsable de hacer un corte físico en la doble hélice del ADN justo donde lo señala el guía.

Cuando la maquinaria molecular ha hecho el corte, los procesos naturales de reparación celular comienzan a funcionar. Con tres metas principales, la ingeniería genética puede intervenir en esta ventana de oportunidad: primero, silenciar un gen al desactivar las secuencias defectuosas que codifican enfermedades; segundo, corregir un gen al sustituir una secuencia mutada por otra sana y funcional; y para terminar, insertar un gen para añadir nuevas características biológicas que mejoren la salud o la resiliencia del sujeto. Esta capacidad de edición exacta no solamente cambia la forma en que se abordan las enfermedades hereditarias, sino que además establece las bases para una nueva era de medicina regenerativa y preventiva en el área de la salud animal (Rossi et al., 2021).

El uso de la tecnología CRISPR-Cas9 en la medicina veterinaria de animales domésticos supone un avance cualitativo con respecto a la cría selectiva tradicional. La edición génica, a diferencia

de la selección tradicional, que necesita de décadas y varias generaciones para establecer o eliminar un rasgo, posibilita que el genoma sea modificado exactamente en una sola intervención. Esta rapidez en la operación presenta una serie de posibles aplicaciones que tienen el potencial de transformar la salud animal, enfocándose sobre todo en eliminar enfermedades congénitas, optimizar la coexistencia entre especies y robustecer el sistema inmunológico frente a agentes infecciosos (Sharma, R.; McKenna, D., 2019).

El objetivo clínico más urgente es la erradicación de enfermedades hereditarias. Mediante la edición de embriones o células germinales, es técnicamente viable eliminar la predisposición a enfermedades devastadoras como la distrofia muscular en el *Golden Retriever* o la miocardiopatía hipertrófica en los gatos *Maine Coon* antes de su nacimiento. Al corregir la mutación causal en la línea germinal, no solo se protege al individuo, sino que se garantiza que su descendencia nazca libre de la carga genética patológica, saneando de forma definitiva líneas de sangre que históricamente han presentado una alta incidencia de estas condiciones (Diatchenko et al., 2005).

Otra vertiente innovadora se centra en la hipoalergenicidad inducida biotecnológicamente. Se han desarrollado protocolos experimentales orientados a "silenciar" o apagar el gen responsable de la síntesis de la proteína Fel d 1 en felinos. Dado que esta glucoproteína, presente en la saliva y glándulas sebáceas del gato, es el principal alérgeno responsable de las reacciones de hipersensibilidad en humanos, su eliminación mediante CRISPR permitiría una convivencia armoniosa en hogares con personas alérgicas, reduciendo significativamente las tasas de abandono por motivos de salud pública (Chandler & Wilkinson, 2020).

Hay que decir que la edición genética promete elevar los estándares de resistencia a enfermedades infectocontagiosas. Es posible crear organismos que son inherentemente resistentes al alterar de manera específica los receptores celulares que funcionan como "puertas de entrada" para los patógenos virales. Por ejemplo, modificar receptores específicos podría evitar que virus con alta mortalidad, como el parvovirus canino o el de la leucemia felina (FeLV), consigan infectar y multiplicarse en las células del huésped. Esta estrategia de biodefensa celular no solo resguardaría al animal individual, sino que también funcionaría como un cortafuegos epidemiológico, convirtiendo la prevención inmunológica de una dependencia a vacunas

externas en una resistencia biológica que estaría codificada en el ADN del mismo organismo (Chandler & Wilkinson, 2020).

La posibilidad de actuar en el "libro de la vida" de las mascotas a través de la modificación genética coloca a la medicina veterinaria frente a un dilema ético profundo que va más allá de lo meramente técnico. Esta transformación de una ciencia curativa a una ingeniería de diseño biológico ha generado divisiones tanto en la sociedad como en el ámbito científico, ya que plantea interrogantes acerca de qué tan lejos puede llegar nuestra autoridad sobre otras especies. El debate se centra en la tensión entre el verdadero beneficio clínico y la venta de animales, cuestionando si el propósito de la tecnología es aliviar el sufrimiento o satisfacer los gustos caprichosos de las personas (Boch et al., 2009).

La oposición entre el bienestar de los animales y el interés humano es el primer punto de fricción. Desde un punto de vista ético, hay un acuerdo firme en la legitimidad de corregir alteraciones que producen discapacidades degenerativas o dolor crónico, como las cardiopatías congénitas o la displasia de cadera. Sin embargo, la frontera se vuelve difusa y cuestionable cuando la edición genética se utiliza para crear "animales a la carta". Intervenciones orientadas exclusivamente a la estética, como modificar el color del pelaje, la pigmentación ocular o eliminar la muda de pelo para conveniencia del propietario, corren el riesgo de reducir a los seres vivos a objetos de consumo personalizados, despojándolos de su valor intrínseco (Reason Why, 2026).

El dilema ético se complica con el problema de la discriminación por especies y el consentimiento. Los animales, a diferencia de los humanos, no tienen la capacidad de dar su consentimiento para modificaciones en su línea germinal que sean permanentes y que afecten a las generaciones futuras de manera irreversible. Este argumento defiende que la modificación genética a gran escala podría ser una forma radical de especismo, en la cual manejamos la composición biológica de otras especies como si fuese un software al que se le puede actualizar, sin tener en cuenta la independencia biológica del individuo por encima de una funcionalidad técnica o estética establecida por el hombre.

Asimismo, la seguridad técnica representa una preocupación crítica debido a los efectos *off-target* (fuera de objetivo). A pesar de su alta precisión, la tecnología CRISPR no es infalible; las

"tijeras moleculares" pueden realizar cortes en regiones no deseadas del genoma, provocando mutaciones imprevistas. Estas alteraciones accidentales podrían desencadenar oncogénesis (cáncer) o nuevas enfermedades genéticas años después de la intervención, condenando al animal a sufrir patologías imprevistas que no habría padecido de forma natural y que no eligió afrontar (Boch et al., 2009).

Además, el debate ético llega a abordar la desigualdad y a incluir una dimensión de justicia social. El alto costo inicial de estas biotecnologías podría provocar un desajuste biológico entre los animales ordinarios y las "mascotas de élite", o sea, aquellos ejemplares mejorados y sin enfermedades. No solo esta disparidad podría fomentar el abandono de animales "naturales" por los "editados", sino que también podría dar lugar a un mercado negro de genética sin regulación, en el que la ausencia de control bioético amenace la biodiversidad y el bienestar animal globalmente. El reto para el futuro inmediato, no es únicamente mejorar la técnica, sino también establecer un sólido marco ético que garantice que la edición genética sea una herramienta de compasión y no de poder (Chandler & Wilkinson, 2020).

Actualmente, la mayoría de los países prohíben la edición genética de animales con fines puramente estéticos. Sin embargo, se permiten investigaciones bajo estrictos comités de bioética cuando el objetivo es terapéutico, en función de salvar la vida del animal.

Tabla 21. Resumen de las principales posturas éticas en relación al diseño genético

Postura Ética	Argumento Principal
Utilitarista	Si podemos evitar que un animal nazca con una enfermedad dolorosa, es imperativo hacerlo.
Deontológica	No debemos alterar la naturaleza esencial de una especie por capricho o beneficio humano.
Prudencial	Los riesgos de efectos secundarios a largo plazo son demasiado altos para permitirse fuera de laboratorios.

Elaboración propia a partir de (Chandler & Wilkinson, 2020)

La discusión ética moderna acerca de la modificación genética en animales de compañía plantea ante nosotros una cuestión ontológica esencial: ¿la posibilidad técnica de influir sobre

el genoma exige su aplicación clínica? La frontera entre la ingeniería de diseño, que se centra en satisfacer las preferencias antropocéntricas, y la compasión médica, que busca aliviar el sufrimiento biológico, se ha vuelto muy delgada y porosa en la relación milenaria entre los seres humanos y sus compañeros más fieles. Esta ambigüedad establece la frontera de la bioética contemporánea, en la que se lleva a cabo un examen sobre la legitimidad de las "tijeras moleculares" que va más allá de los resultados obtenidos en el laboratorio (Jonas, 1995).

La pregunta central de la bioética aplicada es: ¿cuál es la discrepancia entre el deber moral y el poder de la tecnología? La solución está sujeta al marco ético que se dé prioridad, por lo que no existe una sola respuesta. Si tomamos en cuenta la visión centrada en el bienestar del animal, la edición genética para corregir una ceguera hereditaria o una displasia de cadera se presenta como un deber ético para mitigar el sufrimiento. Sin embargo, si la integridad genética de la especie es el marco de referencia, cualquier cambio permanente en la línea germinal podría considerarse como una intervención irreversible que amenaza la autonomía evolutiva de la especie al tratar los bienes biológicos animales como un código susceptible a modificaciones y a los intereses humanos (Jonas, 1995).

El reto para la sociedad global y la medicina veterinaria no es solamente lograr que la enzima Cas9 sea más precisa, sino también llegar a acuerdos bioéticos que salvaguarden la dignidad inherente de los animales de compañía. Para que se produzca la transición hacia una era de biología sintética aplicada, es necesario contar con una regulación que haga una clara distinción entre restaurar la salud y mejorar lo estético o funcional. Para que la edición genética se convierta en un instrumento de justicia interespecies, debemos establecer un marco de responsabilidad biológica. De esta manera, nos aseguraremos de que el futuro de nuestros animales no dependa de una mera cuestión estética, sino del compromiso auténtico con vivir sin enfermedades hereditarias evitables (Chandler & Wilkinson, 2020).

Los argumentos a favor y en contra de la edición genética (CRISPR) con fines terapéuticos pueden ser desglosados para analizar el dilema ético que rodea esta práctica. El examen ético de la edición genética en medicina veterinaria se basa en una tensión clave entre la responsabilidad ética y la eficacia biotecnológica. Este debate no solo pone en tela de juicio la técnica en sí, sino también las bases mismas de nuestra relación con otras especies.

Por un lado, el argumento de la compasión se basa en una visión utilitarista que establece que el triunfo médico radica en reducir al mínimo el sufrimiento. Por lo tanto, si la ciencia tiene la capacidad de detectar y eliminar secuencias genéticas que condenan a un animal a sufrir crónicamente, como es el caso de la distrofia muscular en el Golden Retriever, no intervenir sería considerado una forma de crueldad pasiva. La edición de la línea germinal brinda un beneficio cualitativo en comparación con la medicina tradicional: la prevención definitiva. Cuando se rectifica el defecto en el embrión, la afección desaparece no solo para la persona, sino también para su descendencia entera, y lo hace de manera más rápida y certera que la cría selectiva, que frecuentemente acarrea dificultades de consanguinidad (Chandler & Wilkinson, 2020).

La "pendiente resbaladiza" es una advertencia bioética sobre el deterioro gradual de las fronteras morales, a la que se refiere la búsqueda de la eficiencia biológica. Si hoy se permite la edición para prevenir una parálisis motora, la línea que distingue entre la terapia y el mejoramiento funcional (*enhancement*) se vuelve peligrosamente difusa. ¿En qué momento una cualidad física o conductual deja de ser un rasgo individual y se convierte en una "enfermedad" que necesita ser modificada? Si aceptamos la modificación con el fin de prevenir la ceguera, dejamos la puerta abierta para que se realicen intervenciones destinadas a disminuir la ansiedad o modificar el tamaño por mera conveniencia humana, lo que convierte al animal en un producto de ingeniería (Jonas, 1995).

Tabla 22. Balance Ético de la Edición Genética

Dimensión	Argumentos a Favor (Compasión)	Argumentos en Contra (Riesgos)
Bienestar	Minimización del dolor: Erradicación de patologías hereditarias graves y mortales.	Efectos <i>Off-target</i>: Riesgo de mutaciones imprevistas que causen cáncer o inmunodeficiencia.
Evolución	Eficiencia biológica: Saneamiento rápido del acervo genético sin consanguinidad.	Pérdida de límites: Transición de la cura necesaria al diseño estético o funcional arbitrario.
Responsabilidad	Deber de cuidado: Utilizar la tecnología disponible para garantizar una vida digna.	Especismo: Tratamiento del animal como « <i>software</i> » actualizable sin valor intrínseco.

Adaptado de (Chandler & Wilkinson, 2020)

Hay que considerar que la complejidad del genoma, entendido como un ecosistema interconectado, introduce el problema de las consecuencias imprevistas. La técnica CRISPR, a pesar de su precisión, puede generar cortes accidentales en regiones no deseadas del ADN, provocando efectos secundarios que podrían manifestarse años después. Dado que los animales no poseen la capacidad de otorgar un consentimiento informado para asumir estos riesgos experimentales, la comunidad científica se enfrenta a la obligación de actuar con una prudencia extrema. La edición genética nos obliga a decidir si nuestra prioridad es la restauración de la salud biológica o la creación de organismos adaptados a nuestras expectativas, una decisión que marcará el estatus ético de la veterinaria en las próximas décadas (Rossi et al., 2021).

Una de las críticas más profundas a la biotecnología moderna es el debate acerca del especismo en la edición genética, que propone imponer criterios humanos sobre los animales. Desde este punto de vista, clasificar determinadas características como "defectos" no es un hecho neutral desde el punto de vista biológico, sino que es una construcción subjetiva y cultural. Por ejemplo, hay una parte de la población y de la comunidad científica que cree que la sordera congénita es una discapacidad que se puede "corregir" a través de la ingeniería genética. Sin embargo, otros grupos sostienen que un animal sordo tiene el potencial de vivir una vida completa y funcional, lo cual pone en duda si nuestro deseo por editar ese gen se debe a una necesidad auténtica del animal o a nuestra incomodidad propia frente a la diversidad funcional (Marfanny, 2019).

El peligro de cambiar nuestra percepción sobre los animales de compañía se deriva de esta tendencia hacia la normalización genética. Cuando tratamos de eliminar de manera sistemática todos los rasgos que no cumplen con un estándar de "perfección" o eficiencia, corremos el riesgo de reducir a los seres sintientes a simples productos biológicos optimizados. En este contexto, el animal ya no es valorado por su diversidad natural y su existencia intrínseca, sino que es evaluado en función de cuán bien se ajusta a un diseño preestablecido.

La edición genética, si se aplica sin una reflexión ética sobre el especismo, podría convertirse en una herramienta de homogeneización que ignore que la riqueza de la vida reside, precisamente, en aquellas variaciones que la medicina convencional se apresura a etiquetar como anomalías (Marfanny, 2019).

En última instancia, el desafío ético consiste en distinguir entre la intervención que busca aliviar un sufrimiento genuino y aquella que busca satisfacer una visión antropocéntrica de la normalidad. Si la veterinaria se encamina hacia la edición masiva del genoma, debe hacerlo bajo la premisa de que la diversidad natural posee un valor ético que no debe ser sacrificado en el altar de la optimización funcional. La responsabilidad biológica supone entender que los animales no son "software" que necesita actualizaciones frecuentes para cumplir con nuestras expectativas, sino seres individuales cuya dignidad se encuentra en su compleja y propia realidad biológica (Rosembaum, 2019).

El enfoque contemporáneo en los comités de bioética veterinaria se dirige hacia la creación de un camino intermedio, una perspectiva pragmática que intenta balancear el potencial terapéutico que ofrece la edición genética con la protección de la integridad ontológica del animal. Con el propósito de asegurar que cualquier intervención en el genoma sea una respuesta a una necesidad biológica apremiante y no a un capricho antropocéntrico, este marco regulatorio se articula en torno a tres condiciones sine qua non.

Se establece el criterio de alta gravedad como un filtro esencial de acción en primer lugar. Siguiendo esta premisa, la edición genética se limita únicamente a aquellas enfermedades que afecten gravemente la calidad de vida, como son las que resultan en parálisis degenerativas, muerte temprana o dolor crónico. Esta disposición impide de manera explícita la utilización de biotecnología para modificar características estéticas (como el color del pelaje o la morfología ocular) o de comportamiento (como disminuir la reactividad o incrementar la docilidad), resguardando así la identidad fenotípica y psicológica de la especie frente a las tendencias o gustos comerciales (Lander et al., 2019).

Además, la Precisión Demostrada actúa como un estándar de seguridad técnica que no se puede negociar. La bioética contemporánea sostiene que no es ético realizar experimentos en animales de compañía sin una base sólida. En consecuencia, solo se permiten intervenciones cuando la tecnología —especialmente en sus versiones más avanzadas de edición de bases o *prime editing*— haya demostrado un riesgo de error o efectos fuera del objetivo cercanos a cero en modelos previos de laboratorio. Esta demanda supone que el ser humano tiene toda

la responsabilidad de asegurar que el tratamiento no genere nuevas enfermedades a largo plazo, puesto que los animales no pueden dar su consentimiento informado.

El marco se cierra con la prohibición de la mejora (*Enhancement*); este principio impide cualquier alteración que pretenda extender las habilidades biológicas más allá del rango natural de una especie. Esta restricción impide que aparezcan animales con una fuerza física excepcional, sentidos muy desarrollados o una vida útil artificialmente extendida. La bioética veterinaria, al prohibir la "mejora", reafirma que la finalidad de la ciencia es restablecer al ser vivo a un estado de salud funcional y no convertirlo en un organismo optimizado para el asombro humano o para su utilidad. Finalmente, esta vía intermedia garantiza que la edición genética sea un instrumento de justicia biológica, manteniendo al animal como un ser con sensibilidad y valor intrínseco, y no como un producto de diseño infinitamente moldeable (Chandler & Wilkinson, 2020).

La clave para tomar una decisión ética se relaciona especialmente con la intencionalidad. Si el fin es puramente terapéutico y elimina un sufrimiento real y documentado, la ciencia se alinea con el juramento veterinario de "velar por la salud y el bienestar animal". Sin embargo, el riesgo de que el mercado comercial convierta esta herramienta en una fábrica de "mascotas perfectas" es el mayor peligro ético al que nos enfrentamos.

4.3. Oncología de precisión: Biomarcadores para la detección precoz del cáncer.

El paso hacia la Oncología de Precisión es uno de los logros más importantes en la medicina veterinaria actual, ya que pone fin al modelo terapéutico del "talla única". En el modelo tradicional, los pacientes caninos o felinos diagnosticados con una neoplasia particular, por ejemplo, el linfoma multicéntrico, eran sometidos a protocolos de quimioterapia estandarizados que se basaban solamente en datos estadísticos de la población. No obstante, la oncología actual promueve un modelo de medicina personalizada que tiene en cuenta la diversidad biológica de cada proceso de tumoración. Esta perspectiva se basa en emplear el perfil genético, molecular y celular de la neoplasia de un paciente determinado para establecer la terapia con mayor posibilidad de éxito, mejorando así la efectividad del tratamiento y reduciendo al mínimo la toxicidad sistémica (Cartagena, 2019).

El núcleo operativo de esta disciplina consiste en identificar y analizar los biomarcadores. Como indicadores biológicos que muestran la esencia del cáncer, estas moléculas, que pueden ser fragmentos de ARN o ADN o proteínas, cumplen una función. La utilización de biomarcadores posibilita una estratificación exacta de los pacientes, lo que permite al clínico distinguir entre subtipos tumorales que, a pesar de ser morfológicamente iguales bajo el microscopio, tienen respuestas farmacológicas y comportamientos biológicos completamente diferentes. Además, la oncología de precisión se enfoca en el descubrimiento precoz, utilizando estas señales moleculares para identificar células malignas mucho antes de que una radiografía o un examen físico sean capaces de detectar el tumor (Chamorro, et al, 2022).

Dentro de este marco, la medicina personalizada no solo aumenta la supervivencia, sino que también redefine las expectativas clínicas al transformar el cáncer, que es una enfermedad con diagnóstico tardío, en una condición que puede ser controlada desde sus fases moleculares. Al integrar la secuenciación de nueva generación (NGS) y la biopsia líquida en los procedimientos rutinarios, la veterinaria del siglo XXI se posiciona al frente de la salud animal, garantizando que cada acción oncológica sea tan única y específica como el código genético del paciente (Chamorro, et al, 2022).

En el contexto de la oncología veterinaria contemporánea, un biomarcador se define como una molécula biológica —proteína, ácido nucleico o metabolito— detectable en fluidos corporales como la sangre y la orina, o directamente en los tejidos. Estas señales moleculares funcionan como marcadores objetivos de procesos patogénicos, posibilitando describir el cáncer más allá de la morfología celular que se puede observar en una biopsia convencional. La medicina de precisión requiere la clasificación funcional de estos marcadores, que se distribuyen en tres categorías principales y orientan el pensamiento clínico desde la sospecha inicial hasta el monitoreo a largo plazo.

Los biomarcadores de diagnóstico son herramientas esenciales para el diagnóstico precoz, porque permiten detectar neoplasias en fases asintomáticas. Estos marcadores moleculares ofrecen una valiosa oportunidad en las especies cuyo instinto de supervivencia tiende a esconder el dolor o la incomodidad física, porque permiten que se realicen intervenciones médicas o quirúrgicas mucho antes de que el tumor pueda ser detectado por métodos de imagen conven-

cionales. Si se identifica en fases tempranas, las tasas de supervivencia son significativamente más altas y el trauma terapéutico que padece el paciente se reduce (Camacho et al., 2023).

En segundo lugar, los biomarcadores pronósticos proporcionan datos relevantes sobre la historia natural de una enfermedad en un paciente específico. Estos indicadores no determinan qué tratamiento utilizar, sino que examinan la agresividad inherente al tumor y las probabilidades de que se produzca una recaída o metástasis. Su análisis permite que el oncólogo veterinario establezca expectativas realistas para los dueños, diferenciando entre tumores de crecimiento lento y aquellos con un comportamiento biológico muy invasivo. Esto es esencial para planificar los cuidados paliativos o curativos de forma ética (Camacho et al., 2023).

Luego, los biomarcadores predictivos representan el pilar de la personalización terapéutica. A diferencia de los anteriores, estos marcadores predicen la respuesta del animal ante un fármaco específico, como los protocolos de quimioterapia convencional o los modernos inhibidores de tirosina quinasa (ITK). Al identificar la presencia de mutaciones genéticas específicas o la sobreexpresión de receptores celulares en el tumor, el clínico puede seleccionar la molécula con mayor afinidad biológica, evitando el uso de fármacos ineficaces que solo aportarían toxicidad sistémica sin beneficio terapéutico (Mayeux, 2004).

La biopsia líquida ha sido reconocida en la oncología veterinaria moderna como el método más novedoso para la detección precoz, ya que se trata de un procedimiento de diagnóstico mínimamente invasivo. Esta tecnología permite detectar las huellas moleculares del tumor a partir de una simple muestra de sangre periférica, lo que contrasta con las biopsias tisulares convencionales, que necesitan intervenciones quirúrgicas o aspiraciones con aguja fina y pueden ser estresantes para el paciente. Esta perspectiva, aparte de optimizar el bienestar del animal al eliminar prácticas crueles, ofrece una representación panorámica y dinámica de la carga tumoral en tiempo real, lo que va más allá de las limitaciones de heterogeneidad espacial presentes en las muestras de tejido sólido (Nowosh, 2019).

Uno de los pilares fundamentales de esta técnica es el análisis del ADN tumoral circulante (ctDNA). Cuando las células neoplásicas experimentan procesos de apoptosis o necrosis, liberan fragmentos de su material genético mutado directamente al torrente sanguíneo. Los oncólogos tienen la capacidad de rastrear mutaciones conductoras específicas con una sen-

sibilidad excepcional a través del empleo de secuenciación de nueva generación (NGS). La identificación de mutaciones en el gen BRAF es un ejemplo paradigmático. Su presencia en la orina o sangre es una señal muy específica del carcinoma de células transicionales de vejiga en perros. La ventaja clínica radica en la precocidad: el ctDNA hace posible la detección de procesos malignos con varios meses de antelación a que una masa física pueda ser identificada por medio de ecografía o radiografía convencional (Nowosh, 2019).

Complementariamente, la biopsia líquida permite el aislamiento de Células Tumorales Circulantes (CTCs). Estas son células enteras que se desprenden del foco tumoral primario y utilizan el torrente circulatorio como vía de diseminación hacia otros órganos. La detección y cuantificación de estas células actúan como un biomarcador pronóstico de primer orden, pues su presencia es un indicador inequívoco del potencial metastásico del tumor. Al monitorizar las CTCs, el clínico puede predecir el riesgo de metástasis y ajustar la agresividad del tratamiento adyuvante antes de que se produzca una siembra secundaria visible, transformando la gestión del cáncer en una estrategia de anticipación biológica (Chamorro, et al, 2022).

Actualmente, existen paneles comerciales que los veterinarios utilizan de forma rutinaria, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 23. *Biomarcadores*

Cáncer	Biomarcador / Test	Aplicación Clínica
Linfoma y Hemangiosarcoma	Nu.Q® Vet Cancer Test	Mide nucleosomas circulantes; ideal para el cribado de razas de alto riesgo (Golden Retriever, Boxer).
Carcinoma de Vejiga	CADET® BRAF Mutation	Detecta una mutación específica en la orina con altísima sensibilidad.
Mastocitoma	Índice Ki-67	Biomarcador de proliferación celular; indica si el tumor tiene alta probabilidad de volver a crecer tras la cirugía.
Tumores Mamarios	HER2 / Receptores de Estrógeno	Ayuda a decidir si se requiere terapia hormonal o quimioterapia dirigida.

Adaptado de (Nowosh, 2019)

La incorporación de la inteligencia artificial (IA) en la oncología veterinaria específica ha revolucionado el análisis de datos biológicos, pasando de una interpretación básica a la creación de modelos predictivos muy sofisticados. La inteligencia artificial funciona como un motor analítico que otorga sentido a los biomarcadores moleculares, posibilitando así una medicina anticipatoria, la cual se basa en el potencial de procesamiento de grandes cantidades de datos. Fundamentalmente, esta sinergia entre la computación avanzada y la oncología molecular se expresa mediante dos ejes estratégicos: el estudio traslacional y la personalización del riesgo (Mordente et al., 2015).

En primer lugar, la creación de modelos de riesgo a través de algoritmos de aprendizaje automático (*machine learning*) posibilita una estratificación muy precisa de los pacientes. Estos sistemas no examinan los biomarcadores de manera aislada; en su lugar, los combinan dinámicamente con variables importantes como la edad, el historial médico del paciente, la predisposición racial y las condiciones ambientales. La IA, en el chequeo anual, analiza esta matriz de datos para calcular una "puntuación de riesgo de cáncer", que es un indicador predictivo que advierte al médico sobre la posibilidad de que se desarrolle un neoplasma antes de que aparezcan manifestaciones clínicas claras. Esta habilidad de prever el riesgo individual mejora la frecuencia de los cribados genéticos y asegura que los recursos para diagnóstico se distribuyan eficazmente entre los pacientes con más vulnerabilidad a nivel biológico (Loaiza, 2022).

La Oncología Comparada se beneficia de la inteligencia artificial, pues puede detectar similitudes entre el cáncer en humanos y en perros. La IA tiene la capacidad de examinar bases de datos extensas de los humanos y los perros para identificar biomarcadores que sean compartidos entre las dos especies, ya que estas comparten un entorno similar y desarrollan tumores con propiedades moleculares y comportamientos biológicos similares. Este método acelera de manera importante el desarrollo de inmunoterapias y fármacos, lo que hace posible que los hallazgos médicos en humanos se implementen velozmente en protocolos veterinarios y a la inversa. La oncología comparada promovida por la inteligencia artificial, al considerar el cáncer como una enfermedad biológica global, no solo aumenta las posibilidades de supervivencia de los animales de compañía, sino que también establece al perro como un modelo natural invaluable para el progreso de la salud a nivel mundial (McKinney, et al, 2020).

En razas de alta vulnerabilidad oncológica, como el Golden Retriever (predisuesto a linfoma y hemangiosarcoma) y el Pastor Alemán (predisuesto a hemangiosarcoma y osteosarcoma), la medicina veterinaria ha evolucionado de un modelo de observación pasiva a uno de vigilancia genómica activa. Este cambio conceptual posibilita que la revisión anual pase de ser un examen físico superficial a transformarse en un procedimiento de detección molecular detallado, organizado en fases cruciales que se benefician de los avances de la biotecnología.

El Triaje de Riesgo a través de Anamnesis Digital inicia el procedimiento. El médico, antes de cualquier intervención física, emplea un software especializado que compara los datos fenotípicos del paciente con grandes bases de datos sobre oncología. Este algoritmo examina el historial familiar, priorizando los tests si hay antecedentes en padres o hermanos, y determina una edad clave para comenzar la vigilancia intensiva. Para el Golden Retriever, este seguimiento molecular a menudo se anticipa a los 4 o 5 años de edad, ya que es en este punto cuando la frecuencia de procesos neoplásicos silenciosos empieza a aumentar estadísticamente (Desai, et al, 2021).

La parte principal de este protocolo es la Biopsia Líquida de Cribado o **Screening**. En vez de esperar a que aparezca una masa perceptible, se realiza un análisis sanguíneo rutinario para descubrir signos moleculares de manera temprana. El estudio de Nucleosomas Circulantes, como el test Nu.Q®, es uno de los instrumentos más innovadores. Los nucleosomas son fragmentos de ADN que están cubiertos por histonas, unas proteínas que las células cancerosas expulsan al torrente sanguíneo en el transcurso de su rápida muerte celular y renovación. Los niveles elevados de nucleosomas en un paciente aparentemente saludable actúan como una "alerta roja" biológica, especialmente para el hemangiosarcoma. Este es un tumor con una sensibilidad de detección de alrededor del 82% a través de este método, lo que es fundamental debido a su carácter letal y repentino (Desai, et al, 2021).

Complementariamente, el Análisis de Mutaciones en ADN tumoral circulante (ctDNA) permite identificar alteraciones genéticas específicas antes de cualquier manifestación clínica. La presencia de un proceso maligno en sus primeras etapas puede ser constatada a través de la identificación de alteraciones en genes conductores como TP53 o BRAF, incluso si el animal continúa comportándose y actuando normalmente. Esta información hace que la consulta

se enfoque de inmediato en un Diagnóstico por Imagen Dirigido. En vez de hacer un examen general, el veterinario lleva a cabo estudios de gran precisión, como las ecografías abdominales avanzadas para encontrar micro-nódulos en el hígado o bazo (comunes en la raza Pastor Alemán) o las ecocardiografías para eliminar la posibilidad de que haya masas en la aurícula derecha, donde se desarrolla el hemangiosarcoma (Camacho et al., 2023).

Este enfoque de medicina de precisión no solo aumenta las probabilidades de éxito quirúrgico al abordar tumores de menor tamaño y sin metástasis, sino que redefine la ética del cuidado animal al transformar el diagnóstico de una "sentencia" en una oportunidad de intervención oportuna y eficaz.

El resultado de la consulta veterinaria, no consiste solamente en un simple "está bien", sino un informe de probabilidad. Para dar cuenta de ello, se concibe una especie de semáforo, donde cada color indica el nivel de riesgo del animal examinado, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 24. *Semáforo clínico*

Resultado	Acción Clínica
Verde (Bajo)	Continuar chequeos semestrales estándar.
Amarillo (Moderado)	Repetir biomarcadores en 3 meses + Ecografía preventiva.
Rojo (Alto)	Tomografía (TAC) completa y búsqueda activa de la masa para cirugía inmediata.

Elaboración propia

En el Pastor Alemán, detectar un hemangiosarcoma de bazo antes de que se rompa permite una cirugía programada con un pronóstico mucho mejor que una cirugía de emergencia por hemorragia interna. Estos biomarcadores se utilizan en cada consulta si el perro ya tuvo un tumor y fue operado, para identificar una recaída con meses de anticipación antes de que el tumor sea perceptible nuevamente.

Durante la consulta, el veterinario instruye al tutor acerca de cómo realizar una vigilancia pro-activa. No es cuestión de asustar, sino de comprender que la detección temprana a través de

un análisis sanguíneo es el medio más eficaz para incrementar los años de vida con calidad en razas "de riesgo".

Pese a que el uso generalizado de la biopsia líquida y de los paneles de nucleosomas (por ejemplo, el test Nu.Q®) es bastante reciente, las cifras obtenidas en los últimos dos o tres años en centros oncológicos destacados de Europa y Estados Unidos presentan una tendencia clara y prometedora. En razas de alto riesgo, como el Pastor Alemán y el Golden Retriever, no solamente se mide el impacto en términos de la supervivencia bruta, sino también en lo que denominamos "ganancia de tiempo de calidad" (Camacho et al., 2023).

La reducción notable de la morbilidad es el impacto más importante de la oncología de precisión en la medicina veterinaria, además de las métricas clásicas de mortalidad; esta transformación altera la experiencia clínica tanto para el paciente como para su entorno familiar. Este cambio de paradigma no solo extiende la vida, sino que, además, redefine su calidad al disminuir el sufrimiento físico y emocional que acompaña a los procesos neoplásicos. El cambio hacia una vigilancia genómica activa posibilita un manejo proactivo que modifica el rumbo natural de la enfermedad, reemplazando la medicina de crisis por una de anticipación estratégica (Garberis, et al. , 2021).

Uno de los avances más significativos es la drástica disminución de las urgencias traumáticas. La identificación temprana a través de biomarcadores en enfermedades que evolucionan sin síntomas y tienen un desenlace agudo, como el hemangiosarcoma esplénico, posibilita planificar operaciones quirúrgicas antes de que se produzca una ruptura orgánica. Evitar situaciones de emergencia, en las que el dueño se ve confrontado con la muerte súbita de su animal a causa de una hemorragia interna masiva, supone un avance humanitario y clínico incalculable, ya que elimina el trauma del acontecimiento y mejora considerablemente el pronóstico después de la operación (Chamorro, et al, 2022).

Asimismo, identificar neoplasias en fases moleculares o microscópicas permite que se puedan usar terapias menos agresivas. En el caso de tumores pequeños y sin señales de diseminación, la solución clínica suele alcanzarse mediante intervenciones quirúrgicas con márgenes limpios y técnicas mínimamente invasivas. Este diagnóstico temprano evita la necesidad de recurrir a protocolos de quimioterapia intensiva o radioterapia paliativa, que son necesarios en las

etapas metastásicas y representan una carga significativa para el organismo del animal. De este modo, la oncología de precisión garantiza que el paciente conserve su homeostasis, lo que conlleva a una recuperación más rápida con un escaso número de efectos secundarios iatrogénicos (Cartagena, 2019).

Se puede constatar que el uso de biomarcadores predictivos facilita la toma de decisiones informadas, optimizando la gestión de los recursos económicos y emocionales. Al analizar el perfil genético del tumor, el clínico puede determinar con antelación si el individuo responderá favorablemente a una molécula específica. Esta habilidad de predecir previene que las familias gasten cantidades grandes de dinero y esperanzas en terapias que, conforme al ADN tumoral, no serán eficaces. La medicina de precisión disminuye el desgaste emocional del dueño y garantiza que cada esfuerzo médico esté basado en la realidad biológica del paciente, lo cual crea una práctica veterinaria más ética, compasiva y clara. Esto se logra al eliminar la incertidumbre y el ensayo-error terapéutico (Camacho et al., 2023).

4.4. Inmunoterapia y terapias celulares

La inmunoterapia y las terapias celulares representan el cambio de paradigma más profundo en la medicina veterinaria de la última década, al desplazar el enfoque terapéutico desde la agresión externa hacia la modulación interna. A diferencia de los tratamientos convencionales que emplean agentes químicos para atacar directamente a patógenos o células neoplásicas —como los antibióticos o la quimioterapia—, estas tecnologías de vanguardia reprograman el sistema inmunitario del animal. La meta es transformar el propio organismo en el agente efector que puede detectar, señalar y eliminar la enfermedad con una especificidad biológica sin igual (Almeida, 2024).

Los anticuerpos monoclonales (mAbs) son el eje de esta revolución, dado que operan a nivel molecular con una precisión quirúrgica. Estas proteínas biosintéticas, denominadas anticuerpos, tienen como objetivo unirse a una diana antigénica concreta y detener procesos patológicos sin perjudicar los tejidos sanos. Un avance importante en este ámbito es la gestión de la dermatitis atópica canina a través de anticuerpos que contrarrestan la interleucina-31 (IL-31), la citoquina que se encarga de transmitir las señales de picazón dentro del sistema nervioso central.

Del mismo modo, la gestión del dolor crónico relacionado con la osteoartritis ha sido modificada mediante anticuerpos que impiden el Factor de Crecimiento Nervioso (NGF), lo que posibilita que gatos y perros recobren su movilidad funcional sin los peligros renales o digestivos asociados a los antiinflamatorios no esteroideos (AINEs). En el campo de la oncología, la investigación se enfoca en los inhibidores de puntos de control (*Checkpoint Inhibitors*) en este momento. Un ejemplo es el bloqueo de la proteína PD-L1, que las células cancerígenas emplean para escapar del seguimiento inmunológico (Sousa, 2021).

Complementariamente, las Terapias Celulares, basadas principalmente en Células Madre Mesenquimales (MSC), han evolucionado de ser simples herramientas de regeneración tisular a potentes moduladores de la respuesta inflamatoria. En medicina deportiva y ortopedia, el uso de MSC derivadas de tejido adiposo o médula ósea ha demostrado una eficacia superior en la reparación de lesiones de ligamentos y cartílagos. Sin embargo, sus aplicaciones más innovadoras se encuentran en patologías sistémicas complejas: en felinos, estas células se emplean para reducir la inflamación intersticial en la enfermedad renal crónica, logrando estabilizar la función orgánica por periodos prolongados, y en la estomatitis crónica felina, donde logran tasas de remisión notables al atenuar la respuesta inmunitaria exacerbada en la cavidad oral (Tapia, et al, 2020).

En la frontera de la oncología terapéutica, las Vacunas de Células Dendríticas y la Terapia de Células CAR-T tienen potencial particular para el desarrollo de la medicina personalizada extrema. A diferencia de las vacunas preventivas, las vacunas terapéuticas como la desarrollada para el melanoma oral canino utilizan células del propio tumor del paciente para "entrenar" al sistema inmune, permitiendo que este ataque incluso metástasis pulmonares inoperables.

Por otro lado, la tecnología de células T con receptor de antígeno quimérico (CAR-T) consiste en alterar los linfocitos T del canino a nivel genético para que estos puedan expresar receptores específicos, como el CD19 o el CD20, contra el linfoma. A pesar de que su implementación clínica continúa siendo cara y se limita a centros con alta especialidad, los resultados completos obtenidos en situaciones donde la quimioterapia convencional no ha tenido éxito posicionan a esta terapia como el instrumento definitivo en la batalla contra las neoplasias hematológicas (Alfaro, 2023).

Actualmente, en la práctica veterinaria, ya no se plantea el dilema de elegir alguna terapia, sino que más bien se tiende a combinar. Por ejemplo, operar un tumor, usar una vacuna de células dendríticas para prevenir metástasis y aplicar anticuerpos monoclonales para evitar que el tumor remanente se oculte del sistema inmune.

La administración de inmunoterapias y terapias celulares en 2026 ha pasado de ser un tratamiento experimental a uno protocolizado, aunque su logística y coste varían significativamente según la complejidad de la tecnología.

Las terapias basadas en los anticuerpos monoclonales (mAbs) son los más sencillos de administrar, similares a una vacuna convencional, lo que ha permitido su rápida adopción. Se administran mediante inyecciones subcutáneas en la consulta, cada 4 u ocho semanas, con la ventaja de que no requiere sedación. El efecto suele ser acumulativo; en casos de dolor crónico (Librela/Solensia), el pico de bienestar se observa tras la segunda dosis (Almeida, 2024).

Otra terapia efectiva es el uso de Células Madre Mesenquimales (MSC), lo cual requiere una logística más compleja, ya que las células deben estar vivas y activas al momento de la aplicación. Se puede administrar directamente en la articulación dañada (requiere sedación profunda o anestesia corta). Para enfermedades sistémicas (como la enfermedad renal felina), debe aplicarse intravenosa, con una frecuencia que depende del caso. En lesiones ortopédicas, suele ser una sola aplicación con refuerzos posibles a los 6 o 12 meses. En enfermedades crónicas, puede ser cada 3 meses.

Además, se utilizan vacunas terapéuticas (por ejemplo, Melanoma Oncept®), que primero aplican un protocolo de «carga» inicial para activar el sistema inmunitario y luego dosis de mantenimiento. Esto se realiza a través de una inyección transdérmica con un dispositivo especial llamado cánula a presión, que no emplea agujas y permite la penetración en las capas donde se encuentran las células dendríticas. Por lo general, la frecuencia es una dosis cada dos semanas (en total cuatro dosis al principio), después de las cuales se recibe un refuerzo cada seis meses durante toda la vida (Klein, et al, 2017).

La Terapia CAR-T (Células T con receptor de antígeno quimérico) es por ahora el tratamiento biotecnológico más avanzado y caro de la medicina veterinaria de alta especialidad. Su implementación está limitada a hospitales de tercer nivel con carácter universitario y a centros

oncológicos de élite, lugares que cuentan con la infraestructura requerida para manejar la genética celular y brindar un soporte vital avanzado, debido a su complejidad técnica y logística. Las células CAR-T son un tipo de medicina personalizada extrema, que tiene como objetivo convertir los linfocitos del paciente en agentes citotóxicos específicos para combatir neoplasias hematológicas (como el linfoma de células B), lo que las hace distintas a las farmacoterapias convencionales (Cuenca, et al, 2022).

La terapia tiene un protocolo de administración estricto, que requiere una hospitalización en condiciones de vigilancia intensiva. El proceso se inicia con un período de linfodepleción, que se consigue mediante un protocolo de quimioterapia con baja intensidad. El objetivo de esta etapa preliminar no es la remisión tumoral en sí, sino eliminar transitoriamente los linfocitos endógenos para "crear espacio" homeostático y biológico, lo cual posibilita que las nuevas células modificadas tengan la capacidad de sobrevivir y expandirse. Una vez que se ha preparado la médula ósea y el sistema linfático, se lleva a cabo una infusión intravenosa controlada de las células CAR-T. En esta etapa, el personal médico debe vigilar cuidadosamente al paciente para detectar y manejar posibles efectos inmunológicos adversos, como el síndrome de liberación de citoquinas (Neelapu et al., 2018).

La frecuencia con la que se aplica esta tecnología es uno de sus rasgos más disruptivos. En contraste con los ciclos cíclicos de la quimioterapia convencional, se entiende a la terapia CAR-T, como una terapia única o "*one-shot therapy*". Las células alteradas genéticamente, una vez inyectadas, funcionan como "medicamentos vivos", ya que poseen la habilidad innata para multiplicarse, diferenciarse y mantenerse en el cuerpo del animal durante un periodo de meses o hasta años. Esta persistencia inmunológica asegura un seguimiento antitumoral constante, lo que posibilita que el sistema inmune del paciente controle la enfermedad de forma autónoma. Esto disminuye notablemente la fatiga física del animal y la carga emocional del dueño relacionada con tratamientos a largo plazo (Cuenca, et al, 2022).



El Ecosistema Digital: Telemedicina, Cloud y Ética

5

CAPÍTULO 5.

EL ECOSISTEMA DIGITAL: TELEMEDICINA, CLOUD Y ÉTICA

Byron Enrique Borja Caicedo, Julio César Bravo Brito,
Edison Macgyver Barragán Taco y Gabriela Mercedes Ordóñez Andrade.

5.1. Teleconsulta y Triage

La telemedicina para mascotas y la crianza de diversas razas ganaderas se han vuelto un recurso muy útil para ofrecer información de manera eficaz y barata, que complementa los servicios de medicina veterinaria convencional para clientes con una relación veterinario-cliente-paciente (VCPR) establecida. Este recurso puede emplearse en múltiples campos, como el triaje, el diagnóstico, el seguimiento de casos, la evaluación del bienestar animal y las consultas virtuales. Todo esto posibilita una administración más efectiva del tiempo y los recursos disponibles (Homerosky & Ware, 2023).

La posesión de mascotas se ha incrementado y la consciencia sobre la salud de los animales ha mejorado, lo cual ha propiciado un gran crecimiento del sector veterinario en los últimos años. El desembolso en servicios veterinarios ha experimentado un crecimiento sostenido, lo que demuestra una creciente demanda de servicios asequibles y de alta calidad. La mayor posesión de animales domésticos ha llevado a que los propietarios tengan expectativas más altas respecto a la calidad y accesibilidad de los servicios veterinarios. Por consiguiente, la tecnología se ha transformado en un aliado esencial para el mejoramiento de la calidad del cuidado animal y de la eficiencia operativa (Rosado et al., 2025).

Aunque los propietarios de animales domésticos de perros y gatos están conscientes de las posibles ventajas de la telemedicina veterinaria, su adopción es escasa y limitada a pesar de que produce beneficios como la comunicación entre dueños de mascotas y veterinarios tradicionales, lo cual permite que estos últimos estén más informados y satisfechos (Springer, et al, 2024).

Esto pone en duda la disponibilidad de la telemedicina veterinaria hoy en día, sobre todo si se considera el enfoque en los sistemas de triaje para mascotas, puesto que la tecnología ha facilitado un mejor acceso a la atención médica para ellas. En años recientes, la telemedicina

veterinaria ha progresado de manera significativa al incluir tecnologías como software de soporte de decisiones computarizado (CDSS) con triaje telefónico, aplicaciones móviles para el cuidado de animales domésticos, plataformas para videoconferencias y sistemas IoT para monitorear la salud. Asimismo, la asesoría a distancia se ha visto mejorada con el empleo de aplicaciones de diagnóstico móvil y *chatbots* asistidos por inteligencia artificial; por su parte, la administración de datos clínicos se ha optimizado gracias a la tecnología *blockchain*.

Las plataformas han pasado de ser meras consultas telefónicas a sistemas integrados que dan prioridad a las emergencias y posibilitan un acceso más eficaz a los especialistas. No obstante, la telemedicina veterinaria tiene restricciones, como el desafío de efectuar procedimientos y exámenes físicos integrales en contacto directo, lo cual podría poner en peligro la exactitud del diagnóstico (Roca, R.; McCarthy, R. , 2019).

La adopción de la tecnología también se ve entorpecida por problemas como la ausencia de regulaciones estandarizadas, la escasa conectividad en zonas rurales, el recelo frente a las herramientas tecnológicas y la falta de tecnología apropiada para los propietarios. Las dolencias que se atienden con mayor regularidad son síntomas menores, intoxicaciones, enfermedades de larga duración y cuidados después de una operación. También se incluyen los diagnósticos iniciales y la orientación preventiva (Rosado et al., 2025).

La telemedicina veterinaria ha experimentado un cambio de paradigma, pues lo que antes era una herramienta contingente se ha transformado en un soporte esencial del sistema de salud animal contemporáneo. Esta mejora no se limita a digitalizar la consulta tradicional, sino que implica una reingeniería de la atención médica, basada en el uso estratégico de las TIC (tecnologías de información y comunicación). En este entorno digital, se organizan los servicios a distancia principalmente a través de dos funciones fundamentales y complementarias: el teletriage y la teleconsulta. A pesar de tener marcos legales y metas clínicas diferentes, estas dos funciones son esenciales (Rosado et al., 2025).

El teletriage es la primera etapa de la cadena de atención. Actúa como un filtro para casos urgentes, y su objetivo principal no es emitir un diagnóstico, sino establecer qué tan grave e inmediata es la intervención física que necesita el paciente. Este proceso de cribado se basa en la recolección sistemática de datos. En este, el tutor, bajo la dirección del clínico o de

sistemas de inteligencia artificial, informa sobre las constantes fisiológicas fundamentales, como son el color de las mucosas, la frecuencia respiratoria que se puede ver y el nivel de consciencia del paciente.

La efectividad del teletriage se fundamenta en su capacidad para hacer una clasificación de riesgo en tiempo real, lo cual implica categorizar los casos a través de un sistema de semaforización clínica. Este sistema cuenta con tres códigos: el rojo señala peligros vitales urgentes, por ejemplo, traumatismos graves o torsiones gástricas; esto posibilita que el veterinario proporcione instrucciones de primeros auxilios mientras se gestiona la derivación inmediata. El amarillo indica las situaciones que requieren atención presencial en pocas horas, como problemas gastrointestinales persistentes. Finalmente, el verde alude a circunstancias estables que se pueden gestionar mediante citas programadas (Montano, et al, 2021).

Desde un punto de vista legal, el teletriage se caracteriza por el "no-diagnóstico"; su importancia no radica en recetar medicamentos, sino en la eficaz administración del tiempo de respuesta, elemento que frecuentemente decide si el animal sobrevive o no. En contraste con el triage, la teleconsulta es una acción médica completa y avanzada. En esta situación, el médico está autorizado para hacer diagnósticos iniciales, modificar tratamientos de largo plazo y llevar a cabo controles después de la operación.

Sin embargo, la integridad de este servicio está sujeta a requisitos éticos y legales rigurosos, especialmente a la presencia de la VCPR (relación entre veterinario, paciente y cliente). Esta normativa demanda, en la mayoría de las jurisdicciones, que el paciente haya sido examinado físicamente en un lapso reciente para asegurarse de que el profesional tenga una comprensión básica de la fisiología del animal (Roca, R.; McCarthy, R. , 2019).

Durante la teleconsulta, gracias a la tecnología es posible una exploración remota guiada en la que el veterinario instruye al tutor sobre cómo ejecutar maniobras clínicas frente a la cámara. Esto incluye desde el estudio de la marcha con el fin de detectar cojeras, hasta la rigurosa inspección de heridas en la piel mediante lentes macro acopladas a dispositivos móviles.

El ciclo clínico se completa con la prescripción electrónica, en la que las recetas adquieren validez legal a través de firmas digitales, lo que posibilita una trazabilidad farmacológica total. La incorporación de estas herramientas no solamente mejora la eficiencia de los recursos de

las clínicas veterinarias, sino que también proporciona acceso equitativo a la salud animal, asegurando una respuesta técnica adecuada y experta (Islam et al., 2021).

La telemedicina actual no se limita a una videollamada de WhatsApp; utiliza un ecosistema conectado de varias herramientas tecnológicas, cada una con una función determinada, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 25. *Ecosistema de herramientas tecnológicas de la telemedicina*

Herramienta	Función en Telemedicina
Wearables (Collares Smart)	Envían ritmo cardíaco y niveles de actividad en tiempo real al veterinario durante la consulta.
Otoscopios Digitales	Permiten al dueño mostrar el interior del oído del perro con alta resolución en la pantalla del médico.
IA de Visión Computacional	Analiza la forma de caminar del animal en el video para detectar grados de osteoartritis objetivamente.

Adaptado de (Roca, R.; McCarthy, R. , 2019)

Incorporar las tecnologías de la comunicación en el ejercicio clínico veterinario no solo ha cambiado cómo se organiza la consulta, sino que también ha transformado la experiencia del paciente y el poder de diagnóstico del médico. Aunque este nuevo paradigma mejora la accesibilidad, afronta retos técnicos y sensoriales que son propios de la esencia digital del servicio.

La telemedicina presenta como beneficio más inmediato una disminución relevante del estrés en el paciente. La medicina veterinaria se enfrenta al reto de tratar las diferencias entre especies desde sus comienzos, lo que motiva al veterinario a especializarse no solo en sistemas, sino también por especie. Dado que la diversidad de especies restringe la efectividad de un enfoque único, resulta fundamental conocer en profundidad la fisiología, el temperamento y la etiología de cada animal.

Por esta razón, se han creado ideas como la de "*cat friendly*" en el entrenamiento de los alumnos de Medicina Veterinaria y Zootecnia, centrándose en la gestión cotidiana de gatos y las dificultades que esto conlleva. Las investigaciones han mostrado que programas como el "*cat*

friendly" mejoran la formación de los estudiantes, creando profesionales capaces de cuidar a los gatos, que tienen necesidades diferentes a las de los perros (Rodríguez et al., 2024).

Según los principios de la *Cat-Friendly Practice*, se entiende que el transporte y el ámbito clínico son elementos que provocan una ansiedad intensa, particularmente en gatos y animales con fobias ambientales. La consulta a distancia permite que el animal sea evaluado en su entorno natural, lo que contribuye a mantener constantes estables sus constantes fisiológicas y le da al veterinario una visión más exacta de su comportamiento natural.

Además, la digitalización mejora el seguimiento posterior a la cirugía. La observación de la cicatrización de las incisiones y el análisis de la recuperación motora se pueden llevar a cabo por medio de un video en alta definición, lo que evita traslados innecesarios que podrían poner en riesgo el reposo del animal o dañar la integridad de las suturas (Velásquez et al., 2021).

La telemedicina, además, sirve de vínculo con la especialización. Las plataformas digitales posibilitan que un tutor se comuniquen con médicos de especialidades como la neurología, la dermatología o la cardiología en centros internacionales de referencia. Esto elimina las barreras geográficas que antes obstaculizaban el diagnóstico de enfermedades complejas en áreas rurales o distantes con acceso limitado a expertos (González, 2021).

A pesar de sus ventajas, la práctica remota se enfrenta a limitaciones cruciales que obstaculizan la total sustitución de la consulta presencial. La falta de interacción sensorial directa es el principal obstáculo. La medicina veterinaria se basa en gran parte en la palpación real y el sentido del olfato; el clínico emplea su percepción para identificar los olores propios de algunas infecciones (como la cetosis o la otitis) y para medir a través del tacto, entre otros elementos, la turgencia cutánea, la temperatura o los bultos profundos. Estos estímulos, que son esenciales para un diagnóstico exacto, no se pueden reproducir mediante una pantalla (Durán, 2025).

A esto se añade la imposibilidad de aplicar pruebas complementarias de manera inmediata. La telemedicina no posibilita que se recojan muestras biológicas (orina, sangre o citologías) ni que se lleven a cabo análisis de imágenes avanzadas como ecografías o radiografías en el instante de la consulta. Esta falta técnica posiciona a la telemedicina no como un reemplazo, sino como una herramienta adicional que debe llevar a la clínica física siempre que el caso clínico necesite de una intervención diagnóstica o terapéutica concreta.

Hoy en día, la Clínica Híbrida es la tendencia más común: entre un 30 y un 40% de las visitas (incluyendo nutrición, dermatología, seguimientos y consultas de comportamiento) se hacen a través de teleconsulta; el espacio físico queda reservado para urgencias reales filtradas por teletriage, diagnósticos complejos y cirugías. Gracias a esta eficiencia, los hospitales no se saturan y los veterinarios pueden dedicar más tiempo de calidad a aquellos casos que verdaderamente necesitan su intervención en el paciente (Durán, 2025).

5.2. Blockchain en veterinaria: Seguridad, trazabilidad y pasaportes sanitarios digitales.

La aplicación de la tecnología *Blockchain* en veterinaria es la solución final a la desconfianza sobre el origen de los animales y a la fragmentación de los datos médicos. El *blockchain* actúa como un notario digital incorruptible que valida cada acontecimiento en la vida de un animal. El *blockchain*, en contraste con una base de datos convencional que puede ser editada o eliminada, establece un registro cronológico en el cual cada entrada se encuentra "encadenada" a la anterior de manera segura (Tinoco, et al, 2024).

El cambio del documento físico al Pasaporte Sanitario Digital, que se fundamenta en el paradigma de la Identidad Soberana, supone una mejora significativa en la trazabilidad y seguridad de la salud pública veterinaria. La puesta en marcha de la tecnología *blockchain* permite establecer una identidad digital única, inalterable y asociada de manera biunívoca al microchip del animal, a diferencia del pasaporte tradicional de papel, cuya debilidad frente a la pérdida, el deterioro o la falsificación pone en riesgo los controles epidemiológicos (Rosado et al., 2025).

Cada vez que un profesional certificado lleva a cabo una intervención clínica, como vacunar contra la rabia, el sistema genera un "hash" o firma digital. Esta arquitectura garantiza que los registros no se puedan modificar, lo cual asegura que ni el dueño ni terceros tengan la capacidad de alterar fechas o datos con el objetivo de facilitar la venta o el tránsito internacional de animales, eliminando de esta manera el fraude documental.

Este pasaporte digital redefine la eficiencia de los Certificados de Salud para Viajes en el ámbito del comercio y transporte transfronterizos. Las autoridades de aduanas y fronteras son capaces de comprobar la veracidad de las pruebas de anticuerpos, los procesos de desparasitaciones

y las certificaciones sanitarias al escanear un código QR, gracias a que la información se encuentra centralizada en una cadena de bloques.

Este proceso de validación automatizado reemplaza los procedimientos burocráticos documentales y la verificación manual, que son lentos, al tiempo que reduce el riesgo de errores humanos y asegura que se cumplan con rigor científico los protocolos de bioseguridad. La identidad soberana utilizada en veterinaria, al final, no solamente salvaguarda la integridad de los datos clínicos del paciente, sino que también robustece el monitoreo epidemiológico a nivel mundial al proporcionar un registro que se puede auditar, es transparente y siempre está disponible para los participantes legítimos del sistema sanitario (Rosado et al., 2025).

La aplicación de la tecnología *blockchain* en el sector veterinario y cinológico representa el método más sólido para luchar contra el tráfico ilegal de especies y las llamadas fábricas de cachorros, ya que permite establecer un sistema de trazabilidad total desde su origen hasta llegar a su hogar definitivo. Este entorno digital permite la creación de una línea certificada, en la que todos los ejemplares nacidos bajo el cuidado de un criador responsable se registran en una cadena inmutable de bloques. Esto posibilita la exploración completa del árbol genealógico y el acceso a los análisis genéticos de los progenitores, lo que garantiza científicamente la prevención de enfermedades hereditarias y previene la consanguinidad riesgosa. Cuando se centralizan estos registros, se previene la posibilidad de ocultar orígenes sospechosos o de falsificar pedigrís, lo que le brinda al futuro tutor un aval de transparencia respecto a la salud y el origen ético del animal.

La infraestructura tecnológica, junto a la información genética, cambia el historial de propiedad al implementar una gobernanza de datos descentralizada que registra de forma transparente y cronológica a cada tutor que ha tenido el animal en toda su existencia. Este "título de propiedad" digital, que se vincula de manera ininterrumpida con la identidad del ejemplar, es incuestionable frente a las autoridades, lo que facilita significativamente los procedimientos para recuperar el bien en situaciones de robo o pérdida.

La trazabilidad basada en *blockchain* no solo protege los derechos del propietario al sustituir los registros locales o analógicos por una base de datos global y auditada, sino que también se posiciona como un estándar ético que prioriza el bienestar de los animales. Esto asegura

que cada cambio en la vida del individuo esté correctamente registrado y legitimado dentro de un entorno legal seguro sin igual.

La implementación de la tecnología *blockchain* en la gestión de datos sanitarios veterinarios es un avance que altera el statu quo en términos de privacidad, seguridad e interoperabilidad clínica. Así, los registros médicos dejan de ser individuales para transformarse en una historia clínica dinámica y universal. Con este sistema, la información está almacenada en nodos que no están centralizados. Si el tutor otorga su autorización de manera explícita, cualquier nuevo médico o especialista tiene acceso inmediato a la historia médica del paciente, independientemente de si este ha cambiado de lugar de residencia o clínica.

El acceso a esta información crítica, que incluye desde cirugías previas hasta perfiles de alergias e hipersensibilidad, no solamente mejora la exactitud del diagnóstico desde el primer contacto, sino que además fomenta una eficiencia terapéutica y económica al prevenir la repetición innecesaria de pruebas diagnósticas onerosas. De esta manera se asegura que los cuidados continúen en un entorno de seguridad informática óptima.

La seguridad de la prescripción farmacológica va más allá del almacenamiento de antecedentes y llega a un estándar más alto al aplicar contratos inteligentes o *smart contracts* en las recetas digitales. Esta función es especialmente importante para el manejo de medicamentos controlados, como los psicotrópicos o los opioides, en los que existe un alto riesgo de uso indebido o fraude. El contrato inteligente posibilita que la receta se programe y, después de ser dispensada por la farmacia, se registre automáticamente como ejecutada o quede invalidada para siempre en la cadena de bloques.

Este procedimiento de "autodestrucción" lógica garantiza que la receta no se pueda volver a utilizar ni modificar, lo que brinda a los médicos y a los funcionarios sanitarios una trazabilidad total y en tiempo real acerca de la dispensación de medicamentos. Así, la convergencia entre la interoperabilidad de datos y la automatización de la seguridad documental refuerza un ecosistema de salud animal que es más transparente, seguro y centrado en el bienestar del paciente.

Tabla 26. *Beneficios del blockchain en veterinaria*

Aplicación	Beneficio del <i>Blockchain</i>
Seguros de Mascotas	Tramitación automática de reembolsos cuando el veterinario sube la factura al registro.
Alimentación (Dietas)	Trazabilidad del origen de la proteína (ej. saber exactamente de qué granja vino el salmón del pienso).
Investigación	Datos anonimizados para estudios científicos que son 100% veraces y no manipulables.

Adaptado de (Homerovsky & Ware, 2023)

La tokenización de mascotas es el límite más avanzado entre la biotecnología y la economía digital, ya que modifica la administración de la identidad animal mediante la producción de Tokens No Fungibles (NFT) vinculados a cada ser vivo. Según este enfoque, el NFT ya no es un activo especulativo, sino que se transforma en un contenedor digital de la identidad médica y legal de carácter inmutable y soberano, que permanece ligado a la existencia física del animal.

Este activo digital incluye información verificada y crucial en una única estructura de datos. Inicia con el perfil de ADN validado, lo que crea una huella biológica clara que supera las restricciones de los microchips convencionales, que pueden ser extraídos o tener fallos técnicos. Este registro asegura que la identidad del animal sea definitiva y no esté sujeta a bases de datos centralizadas, ya sean gubernamentales o privadas, las cuales son susceptibles a la manipulación o a quedar obsoletas, al estar alojado en una red descentralizada.

La arquitectura de estos ecosistemas permite que el NFT funcione como un repositorio dinámico y transparente donde se asienta el registro de vacunas y el historial completo de intervenciones quirúrgicas en tiempo real. Cada hito en la vida clínica del paciente se incorpora como un metadato autenticado por la firma digital del facultativo interviniente, generando una trazabilidad que resulta vital para la salud pública y el bienestar individual.

Esta trazabilidad asegura que las autoridades sanitarias o fronterizas tengan acceso inmediato a los datos de vacunación, y que se pueda acceder a la historia clínica con precisión para prevenir errores médicos en situaciones de emergencia. En síntesis, la tokenización de los animales mediante NFT les concede una fuerte entidad digital que protege su integridad,

asegura su procedencia y crea un estándar de cuidado basado en la transparencia total de los datos. Esto vuelve a definir la relación entre el derecho, la tecnología y la medicina veterinaria (Homerovsky & Ware, 2023).

El sector veterinario puede establecer la tecnología *blockchain* como una infraestructura de confianza, enfocándose únicamente en la gobernanza y la integridad de los datos sanitarios. En contraste con las redes públicas de criptomonedas, la infraestructura utilizada en el sector de la salud animal generalmente se fundamenta en redes privadas o híbridas; esto elimina la necesidad de procesos mineros que requieran mucha energía, lo que da como resultado un modelo eficiente desde el punto de vista energético y enfocado en la inmutabilidad de los datos. Este ecosistema de datos dispersos produce ventajas transversales que afectan de manera positiva a todos los agentes involucrados en la cadena del bienestar animal (Tinoco, et al, 2024).

Para el tutor o propietario, el principal beneficio radica en la soberanía de los datos y el equilibrio entre la privacidad y la disponibilidad. La información clínica y legal del animal reside en un entorno donde el dueño mantiene la seguridad total sobre su privacidad, pero con la capacidad de otorgar acceso instantáneo en cualquier punto geográfico o situación de emergencia. Esto garantiza que la trayectoria vital del animal sea portable y esté siempre protegida contra pérdidas físicas o manipulaciones de terceros.

El veterinario, al tratar con un paciente novel, logra una ventaja crucial para el diagnóstico: la confianza total en su historial médico. El doctor, al consultar registros inalterables y verificables por sus predecesores, elimina la incertidumbre que proviene de documentos incompletos o historias anecdóticas y posibilita que las decisiones se tomen en función de hechos comprobables. Esto reduce la probabilidad de que ocurran reacciones adversas y optimiza los procedimientos de tratamiento.

Desde un punto de vista macrosocial, la trazabilidad total que brinda la cadena de bloques se presenta como el instrumento más efectivo para combatir el comercio ilegal y el abandono de especies. Al haber un registro indeleble que conecta continuamente a cada ejemplar con su criador y sus propietarios posteriores, se crea una obligación ética y legal irrenunciable que desalienta el abandono.

Además, la incapacidad de falsificar el origen o la condición sanitaria de los animales hace que las actividades de las redes de tráfico ilegal y los criaderos clandestinos sean más difíciles. Finalmente, el *blockchain* en veterinaria no solamente actualiza la administración, sino que además refuerza el contrato social hacia los animales y fomenta una sociedad más comprometida con las normas internacionales de bioseguridad y bienestar animal (Iqbal et al., 2021).

5.3. Ciberseguridad: Protegiendo la privacidad de los datos del paciente y el cliente.

A lo que se refiere la ciberseguridad veterinaria es a un conjunto de protocolos, prácticas y tecnologías estratégicas destinadas a preservar la integridad, privacidad y disponibilidad de los sistemas digitales en las clínicas para animales. La protección de datos sensibles relacionados con la historia clínica del paciente y la salvaguarda de información financiera y privada de sus tutores son parte del alcance de este ecosistema (Wild et al., 2023).

En la actualidad, la transformación digital de la medicina veterinaria ha expandido la superficie de ataque de manera exponencial; la adopción de expedientes clínicos alojados en la nube, el uso de dispositivos médicos interconectados y la proliferación de herramientas de telemedicina han configurado un escenario donde la conectividad es total, pero también la vulnerabilidad.

Las clínicas se han vuelto un blanco muy atractivo para los ciberdelincuentes como consecuencia de la incorporación de dispositivos que están fundamentados en el Internet de las Cosas (IoT), como los collares inteligentes para monitorear biotelemedría y los sensores para evaluar el bienestar animal. Dado que estos activos digitales suelen estar menos protegidos que los sistemas de información convencionales, pueden ser utilizados como puertas de entrada para la exfiltración de datos a gran escala o los ataques de *ransomware* (Dyndyn, 2024).

En este contexto, la administración del riesgo cibernético ha pasado de ser una simple cuestión técnica o de soporte informático a convertirse en una responsabilidad ética y jurídica. La responsabilidad de los médicos y de las instituciones hospitalarias va más allá del acto médico, requiriendo la puesta en marcha de marcos de gobernanza digital que aseguren el resguardo de la privacidad y el funcionamiento continuo de los servicios esenciales, garantizando que la tecnología sea siempre un aliado del bienestar animal y no una grieta que comprometa la seguridad del sistema sanitario.

La ciberseguridad en el ámbito veterinario clínico se basa en tres ejes principales que aseguran la integridad ética del ejercicio profesional y la resiliencia operacional. La protección de los datos financieros y personales de los clientes es el primer activo esencial. Las clínicas veterinarias, al manejar depósitos que contienen direcciones, nombres, números de teléfono y credenciales de pago, actúan como custodios de datos civiles muy delicados. Una violación a este nivel no solo afecta la reputación y la estabilidad legal de la entidad, sino también pone en peligro el patrimonio e identidad de miles de individuos ante el riesgo de fraude y usurpación, amplificando así las consecuencias del ciberataque más allá del ámbito de la salud animal (Vetgirlom, 2026).

El segundo pilar se enfoca en proteger los historiales médicos y la propiedad intelectual. En hospitales universitarios y centros con alta especialización, la información clínica no es únicamente un registro de consultas; también incluye protocolos de tratamiento novedosos, resultados de estudios genéticos y bases de datos epidemiológicas que tienen un alto valor estratégico. El hurto de estos activos digitales supone una amenaza en múltiples dimensiones, dado que la exfiltración de historiales puede ser empleada para el chantaje a empresas o la venta ilegal de datos en mercados con un marketing agresivo, lo cual atenta contra el secreto profesional y el valor competitivo del estudio veterinario (Vetgirlom, 2026).

Desde la perspectiva del bienestar animal, el tercer componente más importante es la integridad de los dispositivos médicos conectados, también llamados Internet de las Cosas (IoT). Para la infraestructura moderna, se requieren componentes como los monitores de anestesia con alta precisión, las bombas de infusión inteligentes y los equipos para diagnóstico por imagen que están conectados a la red local. Un ataque cibernético a estos aparatos tiene como propósito no solo robar información, sino también alterar la operación del hardware. Por ejemplo, si se modifica la dosis de un fármaco en una bomba de infusión a distancia o si se cambia el registro de los signos vitales en un monitor quirúrgico, esto implica una amenaza inmediata para la vida (Vetgirlom, 2026).

Por lo tanto, garantizar la seguridad de estos equipos es una extensión indispensable del cuidado crítico, donde la protección digital se traduce directamente en la preservación de la vida del paciente durante los procedimientos clínicos más complejos.

Tabla 27. Principales Amenazas relativas a la tecnología aplicada en veterinaria

Amenaza	Descripción	Impacto en Veterinaria
Ransomware	Secuestro de datos mediante cifrado.	La clínica no puede acceder a las fichas médicas; las cirugías se detienen.
Phishing	Correos falsos para robar contraseñas.	Acceso no autorizado a la base de datos de clientes o al sistema de recetas.
Ataques a IoT	Hackeo de dispositivos conectados.	Alteración de la dosis de una bomba de infusión o del monitor cardíaco.
Suplantación de Identidad	Falsificación de credenciales veterinarias.	Emisión de recetas ilegales de medicamentos controlados (opioides).

Adaptado de (Animal Health, 2026)

Para mitigar las vulnerabilidades inherentes a la digitalización clínica, los hospitales veterinarios de vanguardia han adoptado una arquitectura de defensa en profundidad, basada en protocolos de seguridad esenciales que garantizan la continuidad operativa y la protección de la información. El cifrado de extremo a extremo, una medida técnica esencial en los servicios de telemedicina, constituye la primera capa de esta estructura. Este protocolo garantiza que toda comunicación, incluidas las transmisiones de video en vivo y los informes fotográficos del paciente, sea cifrada, evitando así que personas ajenas a la red intercepten o vean información clínica delicada mientras está en tránsito (Animal Health, 2026).

La verificación en dos pasos (2FA) se ha convertido en un estándar fundamental para ingresar al software de administración hospitalaria y, por lo tanto, fortalecer los canales de comunicación. El peligro de que las contraseñas tradicionales sean violadas se disminuye al exigir un segundo método de verificación, que normalmente es un código dinámico mandado al dispositivo móvil del médico. Así, se asegura que solo los empleados con autorización puedan acceder a los expedientes médicos.

De igual forma, la integridad del ambiente digital se fortalece a través de la segmentación de redes, un procedimiento que implica el aislamiento físico de la red Wi-Fi de cortesía para los clientes en el área de espera de la infraestructura crítica. Esta separación impide que un dis-

positivo que esté infectado en el área pública tenga la posibilidad de escalar privilegios o tener acceso a los servidores de datos y a los equipos médicos conectados, tales como sistemas de radiología o monitores de anestesia (Animal Health, 2026).

Es relevante mencionar que la resiliencia de una institución frente a los ataques de *ransomware* se basa en el uso de copias de seguridad inmutables. Estos *backups*, a diferencia de los tradicionales, se crean con una arquitectura que imposibilita su modificación o eliminación durante un tiempo establecido, aun cuando las credenciales del administrador estén comprometidas. Esta estrategia posibilita que, en caso de un secuestro de datos, el hospital tenga la capacidad de recuperar todos los sistemas y toda la información clínica en solo unos minutos, asegurando así que la seguridad digital se convierta finalmente en una atención médica ininterrumpida y segura para el paciente (Animal Health, 2026).

Aun con la sofisticación de las herramientas tecnológicas de defensa, el elemento humano sigue siendo el eslabón más crítico y la debilidad más común en la arquitectura de seguridad de los hospitales veterinarios. La mayor parte de las brechas de seguridad y las filtraciones de datos no son causadas por fallas inherentes al software o debilidades del hardware, según lo que se ha evidenciado en la gestión de riesgos digitales. Más bien, suelen ser el resultado de errores en el juicio, negligencias o falta de habilidades técnicas del personal. En un contexto clínico de presión intensa, en el cual la urgencia médica es lo más importante, la fatiga cognitiva y la necesidad de procesar información pueden resultar en acciones involuntarias que ponen en riesgo la integridad de toda la red institucional.

La formación continua del personal se presenta como una medida prioritaria de bioseguridad digital para contrarrestar esta vulnerabilidad. Es esencial que tanto los facultativos como los auxiliares reciban capacitación para reconocer vectores de ataque frecuentes, como el *phishing*, no abriendo archivos adjuntos dudosos ni utilizando dispositivos USB de origen incierto, ya que estos pueden contener código dañino.

Sin embargo, la educación tiene que complementarse con una administración de permisos estricta y fundamentada en el principio del mínimo privilegio. Dentro de esta estructura, el sistema para administrar hospitales tiene que dividir la posibilidad de acceder a la información según el rol particular de cada trabajador. Por ejemplo, aunque los trabajadores

de recepción necesitan entrar a las agendas y a los datos de contacto, no deberían tener permiso para ingresar al módulo en que se prescriben estupefacientes o a los protocolos de investigación avanzada.

La clínica, al coordinar la formación técnica con una política rigurosa de control de identidades, no solamente resguarda sus activos digitales, sino que también promueve una cultura de responsabilidad colectiva que protege la práctica médica ante los peligros del entorno digital.

La convergencia de la ciberseguridad y la tecnología *blockchain* en el sector veterinario no solo es un progreso técnico, sino que también se ha convertido en una necesidad ética esencial para la práctica clínica actual. La implementación de cadenas de bloques es una de las protecciones más firmes contra los peligros digitales, ya que brinda un sistema en el que la información médica es casi inalterable (García et al., 2022).

Cada intervención, diagnóstico o registro clínico se agrega a una red descentralizada que imposibilita cualquier cambio retroactivo sin dejar un rastro que pueda ser auditado, lo cual asegura la integridad total de los datos y resguarda al paciente ante la alteración de su historial. Esta estructura de confianza es la que posibilita que el vínculo entre el médico y el tutor se mantenga fuerte en un ambiente de salud cada vez más desmaterializado (García et al., 2022).

En este paradigma de salud digital, la ciberseguridad debe ser entendida como una extensión directa de los protocolos de bioseguridad tradicionales. Proteger la integridad de un servidor de datos o un nodo de *blockchain* adquiere la misma relevancia crítica que la desinfección de un bisturí en el quirófano; en ambos escenarios, el objetivo final es la prevención de una "infección" externa —ya sea biológica o informática— que pueda comprometer la vida o el bienestar del paciente (Animal Health, 2026).

Por lo tanto, la ética veterinaria actual demanda que los datos sean protegidos con el mismo esmero que se aplica a los procedimientos quirúrgicos, pues infringir la privacidad o alterar los datos clínicos representan peligros inminentes que podrían causar daños reales. La profesión veterinaria, al proteger el ecosistema digital, asegura la ejecución de las regulaciones y, además, cumple con su deber esencial de ser transparente, proteger y cuidar a fondo en el tiempo de la medicina conectada.

5.4. Desafíos éticos de la deshumanización tecnológica en la medicina animal.

La incorporación a gran escala de tecnologías innovadoras en el campo veterinario, que van desde algoritmos de inteligencia artificial para el diagnóstico por imagen hasta técnicas de telecirugía, presenta un dilema ético contradictorio en la práctica clínica actual. Aunque estas herramientas aumentan de manera exponencial la capacidad técnica para preservar la vida y la precisión diagnóstica, su aplicación excesiva comporta el peligro inherente de deteriorar el vínculo emocional y la compasión, que son lo fundamental de la medicina veterinaria (Veterinaria el Buen Pastor, 2026).

Esta "deshumanización" digital no solo implica una separación en la comunicación con el tutor, sino que tiene un efecto significativo en la ontología del acto médico. Puede cambiar la manera de percibir al paciente animal y transformarlo en una entidad biológica que puede ser cuantificada, en vez de considerarlo como un ser sensible con una diversidad natural propia.

Desde un enfoque bioético, la intervención tecnológica en exceso puede convertir la relación entre el médico y el paciente en una mera transacción tecnocrática. Cuando el médico le otorga más importancia a los datos producidos por sensores biotelemétricos o a las predicciones de modelos de aprendizaje profundo que a la observación directa y la exploración física sensorial, es posible que incurra en un reduccionismo biológico (Neto, 2024).

En este contexto, el animal empieza a ser visto como un conjunto de métricas que se pueden optimizar, lo cual podría desvirtuar el juicio clínico al no considerar la situación individual y el bienestar subjetivo del paciente. Por lo tanto, el reto ético de la digitalización no se encuentra en oponerse a la innovación, sino en que los profesionales sean capaces de incorporar estas herramientas como adiciones que mejoren, y no reemplacen, el discernimiento moral y la compasión. Esto aseguraría que la evolución tecnológica siempre signifique un respeto más elevado hacia la dignidad inherente de los seres vivos.

El cambio de la perspectiva clínica del ser biológico hacia el flujo de datos digitales supone un riesgo importante al pasar a una medicina veterinaria altamente tecnificada; este fenómeno podría amenazar la ética del cuidado y la integridad de la práctica médica. Esta dependencia cada vez más amplia de la analítica de datos y el monitoreo a distancia pone en peligro que se atrofie la exploración sensorial, que es la base histórica de la semiología animal.

Si el médico da más importancia a los reportes producidos por inteligencia artificial o a las medidas de biotelemedicina que al examen físico en persona, se priva de estímulos discretos pero cruciales para diagnosticar, como los cambios en la luminosidad del pelaje, las modificaciones en el olor del aliento o la identificación de tensiones musculares particulares que solo se pueden descubrir mediante la palpación directa. Estos signos clínicos son fundamentales para una evaluación integral de la salud del paciente y, a menudo, no se perciben con los sensores actuales.

Esta tendencia, desde un enfoque bioético, plantea el riesgo de convertir a los animales en "códigos" o en simples combinaciones de biomarcadores y algoritmos. Cuando se disminuye la complejidad de un ser sintiente a una serie de variables que pueden medirse en una pantalla, existe el peligro de perder de vista su singularidad y, sobre todo, de pasar por alto su estado emocional y el sufrimiento subjetivo durante la intervención clínica (Rochin, 2026).

Si no se equilibran con la observación empática y la presencia física, el reduccionismo tecnológico puede quitarle a la práctica veterinaria su naturaleza humanitaria, transformando la administración de la salud en una optimización biológica sin compasión. La capacidad del profesional de combinar la potencia de los datos con la sensibilidad del tacto es, en última instancia, lo que determina la calidad clínica en la era digital, garantizando que la tecnología sirva como un lente para ampliar el campo clínico, en vez de convertirse en una barrera que encubra la realidad sensible del animal.

A pesar de que la telemedicina veterinaria produce una eficiencia logística sin precedentes, plantea desafíos importantes en el aspecto emocional de la relación entre el cliente y el clínico, lo cual puede resultar en una erosión de la empatía. La distancia física que es propia de la mediación digital representa un impedimento estructural que dificulta la ayuda humanitaria cuando hay periodos de alta vulnerabilidad emocional.

Durante la transmisión de malas noticias, este fenómeno se hace notar con particular aspe-
reza; comunicar un diagnóstico terminal o discutir la eutanasia por medio de una pantalla puede quitarle al acto médico su necesaria calidez, convirtiéndolo en un proceso que parece frío y mecánico. La tecnología, aunque tiene una resolución alta, no logra reproducir la delicada complejidad del lenguaje corporal que expresa consuelo, la presencia física solidaria

o el valor terapéutico del silencio compartido que se produce en el espacio íntimo de la consulta (Rochin, 2026).

Además, la digitalización extrema presenta el peligro de un alejamiento crónico entre el médico y el tutor, pasando por alto que la medicina veterinaria incluye de manera inherente la preservación del soporte emocional del núcleo familiar. La automatización de procesos mediante *chatbots* que dan respuestas o sistemas de respuesta predefinidos puede acentuar la percepción del cliente de estar desamparado durante su angustia.

Cuando las interfaces algorítmicas reemplazan la interacción humana, se ve afectado el contrato de confianza y la percepción de apoyo a medida, que son aspectos esenciales para tomar decisiones éticas y manejar el duelo. En consecuencia, el desafío de la telemedicina no es únicamente garantizar la precisión técnica a distancia, sino también crear tácticas de comunicación digital que mantengan la compasión y la sensibilidad, garantizando que el progreso tecnológico no signifique deshumanizar el cuidado clínico (Rochin, 2026).

Cuando se integra la inteligencia artificial en los pronósticos y diagnósticos veterinarios, surge el complicado dilema de la responsabilidad algorítmica. Esto plantea cuestiones esenciales acerca de quién debe hacerse cargo de las consecuencias si la tecnología comete errores o muestra sesgos. Uno de los retos éticos más urgentes es el llamado "sesgo de automatización", una inclinación cognitiva donde el médico suele aceptar sin cuestionar las recomendaciones de un sistema informático, dejando de poner en duda diagnósticos que pueden estar fundamentados en datos incompletos o en modelos estadísticos sesgados (Toolify, 2026).

Este fenómeno llega a su cota más alta de gravedad ética cuando se trata de situaciones extremas. Por ejemplo, si un algoritmo propone la eutanasia basándose solamente en las probabilidades de sobrevivir o en las curvas de coste, surge la inevitable pregunta: ¿quién asume el peso ético de esa decisión inalterable? Puede ser el programador del sistema, el productor del software o el clínico que aprobó el resultado sin un juicio crítico independiente.

Esta circunstancia conlleva una modificación de la evaluación clínica, en la que el juicio clínico, es decir la experiencia e intuición del doctor, a menudo aludido como "ojo clínico", puede ser desestimado por no ser fácilmente codificable en un lenguaje binario. Si se tiene demasiada confianza en las herramientas para ayudar a tomar decisiones, existe el riesgo de que los futuros

profesionales pierdan la habilidad para hacer diagnósticos. Si estas personas dependen del soporte tecnológico para resolver situaciones difíciles, su capacidad de actuar en contextos inciertos o con escasez de recursos podría verse disminuida.

Por lo tanto, la responsabilidad algorítmica requiere que la tecnología esté siempre subordinada al juicio humano. Esto asegura que el veterinario actúe como un filtro técnico y ético, en condiciones de comprender las recomendaciones de la inteligencia artificial desde un enfoque integral, empático y enfocado en la unicidad emocional y biológica de cada paciente (Reason Why, 2026).

Incorporar la salud digital y la biotecnología avanzada en el ejercicio veterinario representa serios retos en lo que respecta a justicia distributiva, poniendo en riesgo una medicina animal de dos velocidades. Este fenómeno ocurre cuando la posibilidad de acceder a innovaciones críticas, incluyendo la cirugía robótica, la inmunoterapia personalizada o el monitoreo con sensores de alta gama, se limita solamente a un nivel socioeconómico que puede cubrir los altos costos (Rochin, 2026).

Desde un punto de vista ético, esta brecha digital no solo agudiza las desigualdades que ya existen, sino que también establece una jerarquía en la vida animal fundamentada en el poder adquisitivo del cuidador. Por lo tanto, estamos ante la paradoja de una época en la que tenemos el potencial técnico para revertir enfermedades que antes eran mortales, pero donde acceder a este salvamento depende de algoritmos de crédito o seguros *premium*. Esto pone en duda el principio de equidad en los cuidados médicos.

Esta desigualdad estructural genera una presión ética ineludible en la profesión: el peligro de que surjan animales de compañía de "primera" y "segunda" clase según su entorno económico. El dilema ético fundamental consiste en determinar si un animal tiene menos derecho a la salud o a la reducción del dolor, simplemente porque su propietario no dispone de los medios económicos para pagar tratamientos avanzados de biotecnología.

En este contexto, la deshumanización se presenta como una pérdida de la perspectiva universalista del cuidado, en la que el valor de vida del paciente animal podría depender de su "valor en el mercado" o de los recursos económicos de su familia humana. La ética veterinaria moderna tiene que defender modelos de justicia distributiva para asegurar que la innovación

no sea un privilegio exclusivo de unos pocos, sino un recurso destinado a proteger la vida en todas sus formas y promover el bienestar común, con el fin de impedir que la tecnología se transforme en un elemento excluyente (Toolify, 2026).

Tabla 28. *Tabla de Riesgos Éticos*

Desafío Ético	Riesgo de Deshumanización	Beneficio Tecnológico
Diagnóstico por IA	Falta de pensamiento crítico y juicio humano.	Precisión extrema y detección precoz.
Teleconsulta	Pérdida de la conexión táctil y emocional.	Accesibilidad y menor estrés para el animal.
Automatización	El animal es visto como un "sistema de datos".	Eficiencia y reducción del error humano.
Edición Genética	El animal como "producto de diseño".	Erradicación del sufrimiento hereditario.

Adaptado de (Rochin, 2026)

La medicina veterinaria ya no se determina por la resistencia a la innovación, sino por el intento consciente de encontrar una "tecnología humanizada" que funcione como un catalizador del bienestar. Para los profesionales contemporáneos, el reto principal no es optar entre el estetoscopio y el algoritmo de manera binaria, sino que consiste en emplear la automatización y la inteligencia artificial de forma estratégica para administrar las cargas burocráticas y procesar un gran volumen de datos fundamentales.

Al transferir estas tareas técnicas a sistemas digitales con alta precisión, el médico recupera su recurso más apreciado: el tiempo. Este tiempo recuperado es lo que posibilita restablecer la esencia de la práctica veterinaria, propiciando que el médico pueda sentarse en el suelo con el paciente, entender su lenguaje corporal a través del contacto físico directo y establecer conversaciones profundas y empáticas con el tutor; así se reubica la subjetividad y la afectividad en el núcleo del acto clínico (Dyndyn, 2024).

Desde el punto de vista ético, la tecnología siempre debe ser considerada como un puente que acerque al profesional a la realidad del animal y nunca como una barrera que lo separa en una burbuja de datos abstractos. Por lo tanto, la capacidad de incorporar herramientas avanzadas

sin que se vea afectada la compasión milenaria que fundamenta la relación entre especies es el criterio para medir el éxito de la veterinaria moderna. El acuerdo académico sostiene que la eficiencia no es el objetivo final, sino un medio para liberar la empatía de las limitaciones administrativas; por lo tanto, ante la pregunta de si la eficacia adquirida compensa el peligro de una relación fría entre el médico y el paciente, se concluye que sí (Reason Why, 2026).

La respuesta no es un veredicto final, sino una dedicación continua a la puesta en marcha: la tecnología solo será deshumanizante si permitimos que supla el juicio moral y el contacto físico; sin embargo, si la empleamos para aumentar nuestra presencia como seres humanos y nuestra capacidad de cuidar en un mundo cada vez más digitalizado, resultará liberadora.

La "paradoja de la automatización" en la medicina veterinaria contemporánea presenta un contexto de cambio radical, donde la eficacia tecnológica se vuelve una espada de doble filo para la integridad del trabajo profesional. La implementación de plataformas de inteligencia artificial que pueden redactar informes clínicos, desentrañar análisis de laboratorio complejos y automatizar la programación de calendarios de inmunización optimiza el tiempo como nunca antes (Toolify, 2026).

Se calcula que, al delegar las labores administrativas y de procesamiento de datos, el médico puede recuperar entre 15 y 20 minutos por consulta. Este tiempo se gastaba previamente en tareas burocráticas que no aportaban valor clínico directo al paciente. No obstante, el futuro de este tiempo recuperado es el lugar donde se juntan la mayor oportunidad humanística y el riesgo ético más grande de la profesión.

Por un lado, se expone el peligro inminente que representa la industrialización en el campo de la salud animal. Si el profesional o el gerente clínico evalúan esta ganancia de tiempo únicamente desde la perspectiva de la productividad económica, lo habitual será utilizar la agenda para ver a un par de pacientes más por jornada. Esto mantiene un ciclo de atención superficial en el que la tecnología actúa como un motor de velocidad, en lugar de como un facilitador del nivel de calidad. Esta visión reduccionista tiene la posibilidad de convertir la clínica en una línea de montaje biológico, donde el bienestar de los animales esté supeditado a las métricas de facturación y a la rotación de pacientes (Rochin, 2026).

En cambio, la auténtica posibilidad de la digitalización se encuentra en volver a concebir el acto médico como un encuentro empático y presencial. La paradoja se resuelve de manera positiva cuando esos minutos ganados son utilizados para restablecer la conexión clínica esencial: posibilitar que el veterinario se aleje de la pantalla y se siente en el suelo junto al paciente, examine con atención los matices del lenguaje corporal y escuche de forma activa y sin interrupciones las inquietudes del tutor. En esta perspectiva, la inteligencia artificial se ocupa de lo que puede ser cuantificado, permitiendo así que las personas se dediquen a lo cualitativo.

La telemedicina veterinaria presenta un punto de resolución inesperado entre la frialdad tecnológica y la calidez del cuidado presencial, desafiando la idea superficial de que la mediación de una pantalla deshumaniza el acto clínico. A pesar de que la interfaz digital puede parecer, a simple vista, un obstáculo distante, para algunos perfiles de pacientes la consulta remota se convierte en el acto más compasivo posible. En estas circunstancias, la telemedicina permite una eficacia que trasciende lo logístico y se convierte en un indicador de bienestar animal al evitar tiempos de espera y desplazamientos innecesarios que solo incrementan el sufrimiento del animal (Durán, 2025).

Al posibilitar que el médico examine al paciente en su entorno natural, la telemedicina permite una humanización del diagnóstico. La observación dentro del hogar brinda una perspectiva verdadera de su temperamento y fisiología. El veterinario tiene la capacidad de evaluar el apetito, la movilidad real y las interacciones sociales sin que interfiera el sesgo del "efecto bata blanca". En este contexto, la pantalla no es un muro de frialdad, sino una lente que transmite con transparencia la realidad cotidiana del animal, lo cual hace posible que el juicio clínico sea más respetuoso con la integridad emocional de las especies a nuestro cuidado, así como también más humano y exacto (Springer, et al, 2024).

En medicina veterinaria, la discusión sobre el vínculo entre la inteligencia artificial y el instinto clínico es profunda; esto se debe a que la capacidad algorítmica de identificar patrones en grandes volúmenes de información contrasta con la cualidad contextual y cualitativa del juicio humano.

La inteligencia artificial tiene una mejor capacidad analítica para procesar de manera sistemática, pero no tiene el contexto vital, ni la comprensión de la singularidad biológica que el veteri-

nario ha adquirido por medio de su experiencia presencial. La posibilidad de que el clínico se convierta en un "técnico de software" es el riesgo ético oculto en esta transición. Esto significa que el operador solo se encargaría de aplicar las órdenes de una máquina, traspasando la responsabilidad ética del diagnóstico a un sistema que no tiene noción de lo que sus sugerencias pueden provocar (Veterinaria el Buen Pastor, 2026).

Sin embargo, la habilidad de la tecnología para erradicar el sesgo que resulta del cansancio humano compensa esta tensión de manera fundamental. La inteligencia artificial, a diferencia de un médico que, tras una guardia de doce horas, podría tener su agudeza visual reducida y no notar detalles sutiles en un análisis bioquímico o en una radiografía, mantiene invariablemente la misma vigilancia continua. Siguiendo esta línea, la eficacia algorítmica se convierte en un seguro que previene el error por fatiga y resguarda la salud del paciente cuando el médico está vulnerable.

Finalmente, la incorporación armónica de ambos conocimientos indica que la eficacia técnica, lejos de ser fría, representa el acto más protector hacia el animal; un modelo en el que el algoritmo proporciona una precisión incesante y el veterinario un instinto empático, asegurando que el cariño hacia el paciente se transforme en una medicina infalible, compasiva y profundamente humana (Rochin, 2026).

La incorporación de la tecnología en la medicina veterinaria tiene barreras éticas y funcionales en aquellas situaciones en las que los cimientos del acto médico son una relación emocional profunda y el establecimiento de confianza entre las partes. Hay momentos en la evolución clínica de un paciente donde, lejos de ser una herramienta eficiente, la mediación digital se convierte en un elemento que enfría el proceso y quita a la práctica su naturaleza humanitaria.

El primer escenario crítico es la transmisión de diagnósticos de enfermedades terminales. La presencia física del médico es insustituible en estos momentos de crisis emocional para el tutor; la tecnología no tiene la capacidad de transmitir el calor del apoyo no verbal, ni sostener el espacio de silencio y contención que requiere una familia cuando se enfrenta a la muerte de un ser querido. Al desmaterializar este encuentro mediante una pantalla, existe la posibilidad de transformar un momento de vulnerabilidad extrema en un intercambio técnico-clínico que carece de la compasión necesaria (Dyndyn, 2024).

Del mismo modo, las consultas enfocadas en el duelo y la decisión de la eutanasia constituyen los límites definitivos de la virtualidad. Según la ética del cuidado, la despedida de un ser sintiente tiene que llevarse a cabo en un ambiente de gran sensibilidad, con el veterinario actuando como guía no solo médico, sino también emocional. La incapacidad de la tecnología para reproducir el contacto físico o para detectar con sutileza el estado de ánimo del tutor en la consulta produce una sensación de lejanía que puede llegar a ser interpretada como desinterés profesional (Yáñez, 2025).

En este marco, el respeto del sufrimiento del ser humano y la protección de la dignidad del paciente requieren que se esté presente físicamente para corroborar el vínculo que se está cerrando, garantizando así que el proceso sea lo más compasivo y humano posible. La relevancia de las reuniones presenciales se amplía a cuando comienza la relación entre el médico, el tutor y el paciente, en particular durante las primeras consultas con cachorros. Este lapso es crucial para la formación de confianza y familiarización del animal con el ambiente clínico. Es cuando se sientan las bases de una comunicación eficaz y el veterinario empieza a entender la singularidad del nuevo paciente por medio del contacto físico e interacción directa.

La confianza se construye a partir de la experiencia compartida y la seguridad física, por lo que delegar estas primeras interacciones a sistemas automatizados o a la telemedicina impide que se genere una alianza terapéutica sólida. Por lo tanto, distinguir cuándo la tecnología es un aliado del bienestar y cuándo su ausencia, irónicamente, demuestra más profesionalismo y humanidad es clave para lograr la excelencia en la veterinaria moderna (Yáñez, 2025).

Tabla 29. El Modelo de “Alta Tecnología y Alto Contacto” (High Tech, High Touch)

Dimensión	Enfoque Frío (Riesgo)	Enfoque Humano (Ideal)
Comunicación	Chatbots automáticos para todo.	IA para triaje, pero humano para noticias sensibles.
Diagnóstico	Confianza ciega en el resultado del software.	La IA sugiere, el veterinario valida con su ojo clínico.
Consulta	El veterinario mira más la tablet que al perro.	La tablet es un soporte; el foco es el contacto visual y táctil.

Adaptado de (Rochin, 2026)

La integración de la ética del cuidado en la práctica veterinaria contemporánea propone que la legitimidad de la innovación tecnológica no reside en su capacidad técnica, sino en su orientación teleológica. Bajo este prisma, la eficiencia derivada de la digitalización compensa los riesgos de deshumanización únicamente si se concibe como un medio instrumental y nunca como un fin en sí mismo (Yáñez, 2025).

La premisa ética básica defiende que la optimización de los procesos, desde el manejo de datos hasta el diagnóstico algorítmico, debe tener como objetivo final reducir la carga administrativa del médico para devolver a la relación clínica el tiempo que necesita. Si la tecnología se emplea con el fin de que el veterinario deje de ser un administrador de archivos y vuelva a asumir su papel fundamental como médico capaz de "sentir" a sus pacientes y empatizar con sus cuidadores, la profesión habrá llegado a una etapa más elevada de madurez en términos humanísticos.

No obstante, el riesgo subyacente de este proceso de transformación es que la clínica se convierta en una cadena de montaje biológica, donde el bienestar animal ceda ante las métricas de producción y rotación en masa. Si la eficiencia se persigue como un fin mercantilista, se erosiona el alma de la profesión y el acto médico se convierte en una transacción fría y carente de la compasión que vincula a los humanos con otras especies.

La ética del cuidado nos enseña que lo que determina el progreso no es la cantidad de pacientes atendidos por hora, sino la calidad de la asistencia y la profundidad con la cual el médico está presente física y emocionalmente. Por lo tanto, la veterinaria moderna tiene éxito gracias a su habilidad para establecer plataformas digitales que, en vez de provocar distanciamiento, funcionen como un soporte invisible. Este soporte le permite al veterinario volver a mirar al animal a los ojos y garantiza que el progreso tecnológico sea un aliado constante de la sensibilidad y un defensor de la dignidad de cada ser sintiente (Yáñez, 2025).

BIBLIOGRAFÍA

- Kimberly, et al. (2017). Translating Big Data into Smart Data for Veterinary Epidemiology. *Frontiers in Veterinary Science*, 56(13).
- Agronews. (2 de Abril de 2026). *Lechería: con tecnologías de precisión, es posible anticiparse al estrés térmico en vacas*. <https://agronews.ar/lecheria/lecheria-con-tecnologias-de-precision-es-posible-anticiparse-al-estres-termico-en-vacas/>
- Alcántara, A. (2021). Genética y dolor: aproximación e implicaciones en la práctica clínica. *Medicina de Familia. SEMERGEN*, 47(1), 431---433. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.semerg.2021.09.008>
- Alfaro, R. (2023). Farmacogenética, polifarmacia e interacciones medicamentosas. El panorama de la medicina individualizada en perros. *Revista de investigación veterinaria*, 34(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/rivep.v34i2.22152>
- Alfaro, R. (2025). *Patología digital en la era de la inteligencia artificial y su impacto sobre el diagnóstico y pronóstico del mastocitoma cutáneo canino*. UNAL Disponible en <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/88711>.
- Almeida, M. (2024). Avances en Terapia Celular para la Rehabilitación Neuromuscular Canina: Revisión de Ensayos Clínicos y Evidencia Científica. *Ciencia Latina*, 8(4). https://doi.org/https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.13229
- Álvarez, et al. (2019). Farmacogenómica: la medicina personalizada. *Revista del Laboratorio Clínico*, 12(3), 147-154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.labcli.2018.07.004>
- Andreu, et al. (2015). Big data for health. *IEEE J Biomed Health Inform.*, 19(4), 1193-1208. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2015.2450362>.
- Animal Health. (6 de abril de 2026). *Cómo proteger datos clínicos de un ciberataque en centro veterinario*. <https://www.animalshealth.es/empresas/como-proteger-datos-clinicos-centro-veterinario-ciberataque>
- Animal Health. (4 de abril de 2026). *Zoetis lanza VetScan Imagyst*. <https://www.animalshealth.es/empresas/vetscan-imagyst-zoetis-lanza>

- Animals Health.** (4 de abril de 2026). *FAO lanza nuevo sistema mundial de información de enfermedades de animales.* <https://www.animalshealth.es/profesionales/fao-lanza-nuevo-sistema-mundial-informacion-enfermedades-animales>
- Animals Health.** (4 de abril de 2026). *Inteligencia Artificial puede complementar interpretación radiológica veterinarios y no reemplazarlos.* <https://www.animalshealth.es/profesionales/inteligencia-artificial-puede-complementar-interpretacion-radiologica-veterinarios-no-reemplazarlos>
- Antech diagnostic.** (4 de abril de 2026). *Antech™ lanza RapidRead™ Dental, la herramienta de interpretación radiológica impulsada por IA que está revolucionando la odontología veterinaria.* <https://www.antechdiagnostics.com/2025/05/20/antech-launches-rapidread-dental-the-ai-powered-radiology-interpretation-tool-revolutionizing-veterinary-dentistry/>
- Appleby, R.; Basran, P.** (2022). Artificial intelligence in veterinary medicine. . *JAVMA*, 260(8), 819-824. <https://doi.org/https://doi.org/10.2460/javma.22.03.0093>
- Aranda, L.** (2026). *Evaluación de un sistema automatizado que usa inteligencia artificial (parasight) para el diagnóstico de parásitos de importancia veterinaria.* Universidad de los Andes.
- Basak, et al.** (2018). E-learning, M-learning and D-learning: conceptual definition and comparative analysis. . *E-learning and Digital Media* , 15(4), 191-216. . <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/2042753018785180>
- Beltrán, et al.** (2024). *Explorando el uso de la realidad virtual en educación: Desafíos y oportunidades para docentes y estudiantes.* Universidad El Bosque. Disponible en <https://repositorio.unbosque.edu.co/items/982f5d62-4eca-45b1-a3ac-cb0193a15a02/full>.
- Blog veterinaria el buen pastor.** (1 de Abril de 2026). *Avances tecnológicos en el campo veterinario.* <https://veterinariaelbuenpastor.com/avances-tecnologicos-en-el-campo-veterinario/>
- BM Editores.** (3 de abril de 2026). *Tecnología aplicada al bienestar animal, el rol del monitoreo inteligente en la supervisión veterinaria .* <https://bmeditores.mx/porcicultura/tecnologia-aplicada-al-bienestar-animal-el-rol-del-monitoreo-inteligente-en-la-supervision-veterinaria-porcina/>
- Boch, et al.** . (2009). Breaking the code of DNA binding specificity of TAL effectors. . *Science*, 326(5959), 1509-1512.

- Bolgianni, et al. (2020). Biopresión 3D de piel. *Cirugía plástica ibero-latinoamericana*, 46(1).
<https://doi.org/https://dx.doi.org/10.4321/s0376-78922020000200014>
- Bonis, et al. (2004). Sistemas informáticos de soporte a la decisión clínica. *Elsevier*, 122(1), 1-79.
[https://doi.org/Disponible en https://www.elsevier.es/es-revista-medicina-clinica-2-articulo-sistemas-informaticos-soporte-decision-clinica-13057545](https://doi.org/Disponible%20en%20https://www.elsevier.es/es-revista-medicina-clinica-2-articulo-sistemas-informaticos-soporte-decision-clinica-13057545)
- Cagigas, C.; Gómez, M. (2024). Telecirugía y telementorización. *Cirugía española*, 102(1).
[https://doi.org/Disponible en https://www.elsevier.es/es-revista-cirugia-espanola-36-pdf-S0009739X24000502](https://doi.org/Disponible%20en%20https://www.elsevier.es/es-revista-cirugia-espanola-36-pdf-S0009739X24000502)
- Cai, et al. (2006). CYP2D6 genetic variation in healthy adults and psychiatric African-American subjects: implications for clinical practice and genetic testing. . *Pharmacogenomics*, 6(1), 343-350.
- Camacho, et al. (2023). Biomarcadores en el diagnóstico temprano y tratamiento de cáncer. *Tecnología en Marcha*, 36(2). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18845/tm.v36i2.6002>
- Cao, L. (2018). Data science: A Comprehensive Overview. *ACM Computer Survey*, 1(1), 1-42.
- Cardona, J. (2018). *Influencia de variables sociales, económicas y espaciales en enfermedades transmitidas por vectores usando algoritmos y técnicas de Machine Learning*. Universidad Tecnológica de Pereira Disponible en <https://hdl.handle.net/11059/9237>.
- Carrión, et al. (2018). Evaluación del riesgo de propagación de epidemias ganaderas mediante simulación matemática. *Pensamiento Matemático*, 8(2). [https://doi.org/Disponible en https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6636693](https://doi.org/Disponible%20en%20https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6636693)
- Cartagena, J. (2019). *Nuevos enfoques diagnósticos y terapéuticos en oncología veterinaria*. Universidad de las Palmas de la Gran Canaria. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=283345>.
- Castaño, F. (2021). La evaluación de la fiabilidad de un software requiere el reporte exhaustivo de Métricas de Rendimiento estandarizadas. *Computer and Electronic Sciences: Theory and Applications*, 3(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.17981/CESTA.02.02.2021.03>
- CEGID. (4 de abril de 2026). *Inteligencia Artificial: sistemas de soporte a la decisión clínica*. <https://www.cegid.com/ib/es/blog/inteligencia-artificial-sistemas-de-soporte-a-la-decision-clinica/>

- César- Juárez, et al. (2018). Uso y aplicación de la tecnología de impresión y bioimpresión 3D en medicina. *Revista de la Facultad de Medicina*, 61(6). <https://doi.org/https://doi.org/10.22201.fm.24484865e.2018.61.6.07>
- Chamorro, et al. (2022). Oncología de precisión: Un paciente, una enfermedad, un tratamiento. *Revista Salud Bosque*, 12(1), 1-8.
- Chandler, C.; Wilkinson, L. . (2020). Editing the veterinary genome: Promise and perils. . *Journal of Animal Science and Technology*, 62(1), 45-59.
- Chandler, J.; Wilkinson, J. . (2020). Ethical considerations of gene editing in companion animals. *Veterinary Ethics*, 28(3), 158-165.
- Chen X, et al. (2023). Artificial Intelligence Integration in Robotic Surgery: Enhancing Decision-Making. . *Surgical Technology Journal*, 40(1), 78-95.
- Chen, et al. (2020). Robotic Surgery: A Comprehensive Review. . *Journal of Surgical Robotics*, 12(3), 456-478.
- Chu, C. (4 de abril de 2026). *ChatGPT en medicina veterinaria, un potencial transformador para explorar*. Imveterinaria: https://www.imveterinaria.es/uploads/2025/09/imveterinaria_chatgpt_medicina_veterinaria__12922_09110211.pdf
- Cobos, D. (2021). Bioseguridad en el contexto actual. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 58(1). <https://doi.org/https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10002337>
- Coello, et al. (2024). *Caracterización del perfil citológico de la mucosa vaginal durante el ciclo estral en perras con ayuda de inteligencia artificial*. FAO AGRIS - International System for Agricultural Science and Technology. Disponible en <https://agris.fao.org/search/en/providers/124698/records/6942df4133b548daaa382238>.
- Crespo, et al. (2023). Explorando las Últimas Tendencias en Cirugía General: Innovación, Efectividad y Resultados del Paciente. *Tesla Revista Científica*, 3(2). <https://doi.org/10.55204/trc.v3i2.e268>
- CSUSES. (4 de ABRIL de 2026). *Sistemas basados en reglas*. https://www.cs.us.es/~fsancho/Blog/posts/Sistemas_Basados_en_reglas.md.html

- Cuenca, et al. (2022). Terapia de células T con receptores de antígenos quiméricos: revisión de la literatura. *Gaceta mexicana oncológica*, 21(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.24875/jgamo.21000181>
- Dantas-Torres, F. (2023). Artificial intelligence, parasites and parasitic diseases. *Parasites Vectors*, 16(340). <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s13071-023-05972-1>
- Desai, et al. (2021). Outcomes and applicability of a deep learning virtual tumor board (DLVTB) in community-dwelling colorectal cancer (CRC) patients. . *Journal of Clinical Oncology*, 39(15). https://doi.org/https://doi.org/10.1200/JCO.2021.39.15_suppl.e18635
- Diatchenko, et al. (2005). Genetic basis for individual variations in pain perception and the development of a chronic pain condition. *Hum Mol Genet*, 14, 135-143.
- Durán, C. (2025). Avances tecnológicos en la medicina veterinaria: un análisis bibliométrico. *Esprint Investigación*, 4(1), 515-524. <https://doi.org/https://doi.org/10.61347/ei.v4i1.127>
- Dyndyn, M. (2024). Application of information technologies in veterinary medicine. . *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*, 26(116). <https://doi.org/https://doi.org/10.32718/nvlvet11644>
- ElHadad, et al. (2024). Sistemas de Apoyo a la Decisión Clínica Impulsados por IA: Una búsqueda continua de potencial. *Cureus*, 16(4). <https://doi.org/10.7759/cureus.57728>
- El-Sayed, A.; Kamel, M. . (2020). Advanced applications of nanotechnology in veterinary medicine. . *Environmental Science and Pollution Research*, 27(16), 19073-19086. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-018-3913-y>
- Escartín, M. (2017). EL MALTRATO A LOS ANIMALES: CIENCIA, ÉTICA Y LITERATURA. *Cuadernos dieciochistas*, 18, 331-365. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14201/cuadieci201718331365>
- FAO UNO. (3 de abril de 2026). *¿Qué es una sola salud?* <https://www.fao.org/one-health/overview/one-health-overview/es>
- Gaceta Médica. (4 de abril de 2026). *Inteligencia artificial y machine learning: el futuro de la sanidad privada*. <https://gacetamedica.com/profesion/inteligencia-artificial-y-machine-learning-el-futuro-de-la-sanidad-privada/>
- Gálves, A. (2012). *Factores que influyen sobre la epidemiología de la leishmaniosis canina y sus vectores en la Comunidad de Madrid: obtención de modelos predictivos de riesgo mediante*

sistemas de información geográfica. Universidad Complutense de Madrid Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.14352/48089>.

Garberis, et al. . (2021). Prediction of distant relapse in patients with invasive breast cancer from deep learning models applied to digital pathology slides. *ESMO Congress*. Washington.

García, et al. (2021). Barreras y facilitadores a la implementación de la telemedicina en las Américas. *Revista Panamericana de Salud Publica*, 131(1 DOI: <https://doi.org/10.26633/RPSP.2021.131>).

García, et al. (feBRERO de 2021). Barreras y facilitadores a la implementación de la telemedicina en las Américas. *Revista Panamericana de Salud Publica*, 45(1 DOI: <https://doi.org/10.26633/RPSP.2021.131>).

García, et al. (2022). Blockchain y la ciberseguridad. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, 9(18), 15-20. <https://doi.org/10.29057/estr.v9i18.8695>

García, et al. (2024). Uso de herramientas digitales con inteligencia artificial en la enseñanza de la parasitología veterinaria. Revisión actual. *South Florida Journal of Development*, 5(12). <https://doi.org/10.46932/sfjdv5n12-082>

García, J. (4 de abril de 2026). *IA Explicable: Algoritmos y Métodos para Interpretar Modelos de Caja Negra*. GCJordi: <https://dev.to/gcjordi/ia-explicable-algoritmos-y-metodos-para-interpretar-modelos-de-caja-negra-3272>

González, E. et al. . (2023). Patient-Centered Outcomes in Modern Surgery: A Comprehensive Analysis. *Annals of Surgery*, 47(2), 210-230.

González, I. (2021). *Eficiencia de la telemedina en la mejora de los resultados postquirúrgicos*. Universitat Oberta de Catalunya. Disponible en <https://openaccess.uoc.edu/server/api/core/bitstreams/29420df5-3e1c-4557-b9db-ac9a9e1c9c33/content>.

Grandi, et al. (2025). Comparative evaluation of an AI-based counting system (OvaCyte™) and the McMaster counting method for quantification of strongyle eggs in sheep faeces. . *Veterinary Parasitology*, 338, (1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2025.110533>

Guachi, et al. (2025). Humanización en el cuidado crítico: más allá de la tecnología . . *Revista Científica De Salud BIOSANA*, 5(2), 288–299. <https://doi.org/https://doi.org/10.62305/biosana.v5i2.544>

- Gyles, C. (2019). 3D printing comes to veterinary medicine. . *The Canadian Veterinary Journal*, 60(10), 1033-1034. <https://doi.org/> <https://lc.cx/8gNM58>
- Hamon, M.; Hong, J. . (2013). New tools and new biology: recent miniaturized systems for molecular and cellular biology. . *Mol Cells*, 36(1), 485-506.
- Hawley, et al. (2010). Identification of single nucleotide polymorphisms within exon 1 of the canine muopioid receptor gene. . *Vet Anaesth Analg*, 37(1), 79-82. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2995.2009.00506.x>
- Hernández, et al. (2026). IMPLEMENTACIÓN CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE RASTREO Y GESTIÓN MÉDICA PARA MASCOTAS. *Revista académica Gente Clave*, 10(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.65050/rgc.v10n1a4>
- Homerovsky, E.; Ware, T. (2023). *Veterinary telemedicine: Tips for expanding your practice virtually*. American Association of Bovine Practitioners Conference Proceedings.
- Hunter, R.; Isaza R. (2017). Polypharmacy in zoological medicine. . *Pharmaceutics*, 9(1), 1-8. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics9010010>
- IA Veterinaria. (4 de abril de 2026). *IA Veterinaria. La eficiencia digital para veterinarios de ganado*. <https://iaveterinaria.com/>
- Iglesias, G.; Beker, M. . (2018). Enseñanza-aprendizaje de Genética en la carrera de Medicina Veterinaria (UNRN) mediante uso de TIC [Resumen de presentación de la conferencia]. *I Jornadas de Inclusión de Tecnologías Digitales en la Educación Veterinaria*. La Plata: SEDICI. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/71758>
- Imveterinaria. (3 de abril de 2026). *El potencial del Big Data en epidemiología veterinaria*. https://www.imveterinaria.es/uploads/2018/04/potencial_data_1688_20180409033750.pdf
- INESEM. (11 de abril de 2026). *Procesos ADME: absorción, distribución, metabolización y eliminación*. <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/procesos-adme-ii-distribucion-metabolizacion-y-eliminacion>
- Iqbal, et al. (2021). A novel blockchainbased integrity and reliable veterinary clinic information management system using predictive analytics for provisioning of quality health services. *IEEE Access*, 9, 8069–8098. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049325>

- Islam, et al. (2021). Consistency of decision support software-integrated telephone triage and associated factors: a systematic review. . *BMC medical informatics and decision making*, 21(1), 1-10.
- Johnson, B.; Mutharasan, R. . (2012). Biosensing using dynamic-mode cantilever sensors: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 32, 1-18.
- Jonas, H. (1995). *El principio de la responsabilidad. Ensayo de una ética para la civilización tecnológica*. Barcelona: Herder editorial.
- Kamm, et al . (2014). Creating living cellular machines. . *Ann Biomed Eng.*, 42(2), 445-459.
- Kirsal, E. et al. (2019). Comparison of Machine Learning Techniques for Prediction Problems, 927, pp. 713-723, (2019). . *Advances in Intelligent Systems and Computing*, , 9(27), 713-723. https://doi.org/https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-15035-8_69
- Klein, et al. (2017). Implementación clínica de la farmacogenómica para la medicina de precisión personalizada: barreras y soluciones. *Revista de Ciencias Farmacéuticas*, 106(9), 2368-2379. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.xphs.2017.04.051>
- LANDER, et al. “. (2019). Adopt a moratorium on heritable genome editing. *Nature* , 567, 165-168 . [https://doi.org/Disponibe en https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_nlinks&pid=S1886-5887201900030000300029&lng=en](https://doi.org/Disponibe%20en%20https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_nlinks&pid=S1886-5887201900030000300029&lng=en)
- Lascka, et al. (2007). Pathogen detection: A perspective of traditional methods and biosensors. . *Biosensors and Bioelectronics* , 22(1), 1205-1217.
- Lee, et al. (2009). Three-dimensional bioprinting of rat embryonic neural cells. . *Neuroreport*, 20(1), 798-803.
- Loaiza, A. (2022). La inteligencia artificial en oncología: contexto actual y una visión hacia la próxima década. *Medicina*, 43(4), 527-534. <https://doi.org/10.56050/01205498.1642>
- Lustgarden, et al. (2020). Veterinary informatics: Forging the future between veterinary medicine, human medicine, and One Health initiatives. . *JAMIA Open*, 3(2), 306–317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/jamiaopen/ooaa005>
- Macías, M. (2016). De la ficción a la realidad: órganos-en-chips al Servicio de la Ciencia y la Medicina. *Revista Odontológica Mexicana*, 20(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rodMex.2016.04.001>

- Marfanny, G. (2019). Interrogantes y retos actuales de la edición genética. *Rev. Bioética y Derecho*, 47(1). [https://doi.org/Disponibile en https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1886-58872019000300003](https://doi.org/Disponibile%20en%20https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1886-58872019000300003)
- Martínez, et al. (2023). Aportaciones de la epidemiología espacial para el seguimiento y control de la fiebre Q. Una revisión sistemática. *Anales de veterinaria de Murcia*, 37. [https://doi.org/Disponibile en https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9356691](https://doi.org/Disponibile%20en%20https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9356691)
- Mayeux, R. (2004). Biomarkers: Potential Uses and Limitations. *The Journal of the American Society for Experimental NeuroTherapeutics*, 1(2), 182-188.
- McKinney, et al. (2020). International evaluation of an AI system for breast cancer screening. *Nature*, 577(7788), 89-94. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1799-6>
- McNaught, A.; Wilkinson, A. . (1997). *IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed.* Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Medina, et al. (2015). Avances en el diseño de fármacos asistido por computadora. *Educación química*, 26(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.05.002>
- Mendoza, et al. (2013). Biosensores mecánicos en el área biológica y alimentaria; una revisión. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(2), 205-225.
- Montano, et al. (2021). Mobile triage applications: a systematic review in literature and play store. *Journal of Medical Systems*, 45(9), 86-96.
- Mordente, et al. (2015). Cancer biomarkers discovery and validation: State of the art, problems and future perspectives. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 9–26. [https://doi.org/Disponibe en https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_nlinks&pid=S0379-3982202300020010900033&lng=en](https://doi.org/Disponibe%20en%20https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_nlinks&pid=S0379-3982202300020010900033&lng=en)
- Moreno, M. (2021). *Simulación y testeo en realidad virtual de bacterias, virus y vacunas*. Universidad de El Salvador Disponible en <https://racimo.usal.edu.ar/id/eprint/8478>.
- MPM software. (21 de Mayo de 2025). *Plataformas y aplicaciones de eHealth | ¿Qué son y para qué sirven?* <https://www.mpmsoftware.com/es/blog/aplicaciones-de-ehealth/>
- Muhamediyeva, et al. (2023). Early diagnostics of animal diseases on the basis of modern information technologies. *AIP Conference Proceedings*, 2817(1). [https://doi.org/ https://doi.org/10.1063/5.0148280](https://doi.org/https://doi.org/10.1063/5.0148280)

- Muñoz, P. et al. (2020). Augmented and Virtual Reality Evolution and Future Tendency. *Applied Sciences*, 10(1), 322-. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app10010322>
- National Library of Medicine. (3 de abril de 2026). *SNOMED CT*. <https://www.nlm.nih.gov/healthit/snomedct/index.html>
- Neelapu, et al. (2018). Chimeric antigen receptor T-cell therapy - assessment and management of toxicities. . *Nat Rev Clin Oncol.* , 15(1), 47-62.
- Neto, A. (2024). Bioética y democracia en la sociedad digital. *Revista Bioética y Derecho*, 60(1). <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1344/rbd2024.60.42990>
- Nguyen, N. et al. . (2023). Advances in Surgical Techniques: A Comprehensive Review. . *Journal of Surgical Research*, 45(1), 78-95.
- Nowosh, N. (2019). *Biópsia líquida e suas aplicações em medicina veterinária: revisão*. USP <https://repositorio.usp.br/item/002944709>.
- Paguirigan, A.; Beebe, D.. . (2009). From the cellular perspective: exploring differences in the cellular baseline in microscale and microfluidic cultures. . *Integración Biológica*, 2, 182-195.
- Pereda, G. (2010). *Modelización matemática de la difusión de una epidemia de peste porcina entre granjas*. Universidad Compljutnse de Madrid Disponible en <https://www.mat.ucm.es/~ivorra/papers/Diego-Epidemiologia.pdf> .
- Pimbosa, et al. (2021). Cirugía de mínima invasión en veterinaria. *Polo del Conocimiento*, 6(3), 520-534. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2384>
- Polacheck, et al. . (2013). Microfluidic platforms for mechanobiology. . *Lab Chip.*, 13, 2252-2267.
- Pramanik, et al. (2020). Healthcare informatics and analytics in big data. *Expertices Systems Application*, 152. <https://doi.org/doi: 10.1016/j.eswa.2020.113388>.
- Reason Why. (6 de abril de 2026). *De los sesgos a la manipulación, la cuestión ética es ineludible en el desarrollo de la inteligencia artificial*. <https://www.reasonwhy.es/actualidad/desafios-etica-moral-inteligencia-artificial-desarrollo-tecnologia>
- Redmont, et al. (2024). The use of triaxial accelerometers and machine learning to classify dog behaviours. *Sensors*, 24(18). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s24185955>

- Redmont, et al. (2024). The use of triaxial accelerometers and machine learning to classify dog behaviours. . *Sensors*, 24(18). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s24185955>
- Revista Médica (12 de abril de 2026). *Gemelos digitales de pacientes para la salud personalizada*. <https://revistamedica.com/gemelos-digitales-pacientes-salud-personalizada/>
- Richeimer S.; Lee, J. (2016). Genetic testing in pain medicine----the future is coming. *Pract Pain Manag.*, 16(1).
- Rivera, et al. (2019). Las aplicaciones digitales como herramienta didáctica para el estudio de la Parasitología Médica. *Investigación En Educación Médica.* , 31(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.22201/facmed.20075057e.2019.31.18121>
- Roca, R.; McCarthy, R. . (2019). Impact of telemedicine on the traditional veterinarian-client-patient relationship. *Topics in companion animal medicine*, 37(10).
- Rochin, F. (2026). Principios de bioética en la educación y la investigación en la medicina veterinaria. *Brazilian Journal of Health Review*, 9(1), 1-11. <https://doi.org/10.34119/bjhrv9n1-151>
- Rodríguez, C. (2023). *Aplicación clínica de técnicas ómicas y Big Data en la caracterización molecular de dos enfermedades inmunomediadas en el perro*. Universidad Complutense de Madrid. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=380894>
- Rodríguez, C. (2023). *Aplicación clínica de técnicas ómicas y Big Data en la caracterización molecular de dos enfermedades inmunomediadas en el perro Diabetes insulino dependiente y leishmaniosis*. Universidad Complutense de Madrid Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.14352/115052>.
- Rodríguez, et al. (2024). Clínica felina con enfoque cat friendly: experiencia significativa desde el aprendizaje. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 15(1). <https://doi.org/10.22579/22484817.1056>
- Rosa, et al. (2022). Ciencia de datos en salud: desafíos y oportunidades en América Latina. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 33(6). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rmc-lc.2022.09.007>
- Rosado, et al. (2025). Telemedicina Veterinaria: estado del arte de las innovaciones que transforman el cuidado animal. *Universidad y Ciencia*, 14(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.22579/22484817.1056> Disponible en <https://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/download/8745/6417?inline=1>

- ROSENBAUM, L. (2019). The Future of Gene Editing -Toward Scientific and Social Consensus. *New England Journal of Medicine*, 18. <https://doi.org/10.1056/NEJMms1817082>.
- Rossi, et al. (2021). CRISPR/Cas9 technology and its applications in veterinary medicine. *Animals*, 11(3), 682-696. <https://doi.org/10.3390/ani11030682>.
- Sánchez, et al. (Abril-Junio de 2024). Inteligencia Artificial aplicada al diagnóstico médico: una revisión actual. *Vitalia*, 5(2 DOI: <https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v5i2.183>).
- Seraquive, et al. (2025). Edición Genética CRISPR-Cas9 en Parvovirus Canino. *Ciencia Latina*, 9(1). https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16581
- Sharma, R.; McKenna, D. (2019). Genome editing: Challenges and perspectives. *Annual Review of Genomics and Human Genetics*, 20(1), 413-435.
- Signal Pet. (4 de abril de 2026). Nueva investigación valida la IA de SignalPet en interpretación radiográfica. <https://www.signalpet.com/articles/new-research-validates-signalpets-ai-in-radiographic-interpretation/>
- Sousa, O. (2021). *Potencial aplicación de terapia celular en el trauma medular canino*. Universidad de la republica Uruguay.
- Springer, et al. (2024). Seeing the benefits, but not taking advantage of them: Dog and cat owners' beliefs about veterinary telemedicine. *Veterinary Record*, , 194(5).
- Su, et al. (2011). Microbial biosensors: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 26, 1788-1799.
- Tapia, et al. (2020). Procedimiento para el cultivo e identificación de células madre obtenidas de lipoaspirado humano con fines de investigación. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 37(3), 547-553. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2020.373.5201>
- Tinoco, et al. (2024). Tecnología blockchain aplicada en la medicina: Una revisión sistemática. *Revista Facultad de Medicina*, 24 (1). <https://doi.org/10.25176/rfmh.v24i1.5900>
- Toolify. (6 de marzo de 2026). *Ética en la inteligencia artificial: abordando sesgos y responsabilidad*. <https://www.toolify.ai/es/ai-news-es/tica-en-la-inteligencia-artificial-abordando-sesgos-y-responsabilidad-1698669>

- Townsend, et al. (2019). Curso modelado de nicho ecológico, version 1.0. *Biodiversity Informatics*, 14, 1-7. <https://doi.org/10.17161/bi.v14i0.8189>
- Universidad de Granada. (11 de abril de 2026). *Bioimprimen en 3D un modelo de melanoma maligno que permite identificar la respuesta y resistencia a quimioterapia*. <https://www.ugr.es/universidad/noticias/bioimprimen-3d-un-modelo-melanoma-maligno-respuesta-quimioterapia>
- Universo de la salud animal. (3 de abril de 2026). *Innovación tecnológica al servicio del bienestar animal*. <https://www.universodelasaludanimal.com/avicultura/tecnologia-aplicada-para-bienestar-animal/>
- Van Dorst, et al. (2010). Recent advances in recognition elements of food and environmental biosensors: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 26(1), 1178-1194.
- Vanguardia Veterinaria (11 de Abril de 2026). *Aplicación de la tecnología 4.0 en la medicina veterinaria y zootecnia*. <https://www.vanguardiaveterinaria.com.mx/aplicacion-de-la-tecnologia-4-0-en-la-medicina-veterinaria-y-zootecnia>
- Velásquez, et al. (2021). RECUPERACIÓN MEJORADA DESPUÉS DE LA CIRUGÍA: UN CAMBIO DE PARADIGMA EN CUIDADOS PERI OPERATORIOS. ARTÍCULO DE REVISIÓN. *Revista Venezolana de Cirugía*, 74(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.48104/rvc.2021.74.2.7>
- Veluzamy, et al. (2010). An overview of foodborne pathogen detection: In the perspective of biosensors. *Biotechnology Advances*, 28(1), 232-254.
- Veterinaria el Buen Pastor (6 de Abril de 2026). *Ética y Compasión en la Práctica Veterinaria*. <https://veterinariaelbuenpastor.com/etica-y-compasion-en-la-medicina-veterinaria/>
- Veterinaria el Buen Pastor (3 de abril de 2026). *Innovaciones en Tecnología para la Gestión Pecuaria*. <https://veterinariaelbuenpastor.com/tecnologia-aplicada-a-la-gestion-pecuaria/>
- Vetgirlom (6 de abril de 2026). *El estado actual de la ciberseguridad en medicina veterinaria*. <https://www.vetgirlontherun.com/es/the-current-state-of-cybersecurity-in-veterinary-medicine-vetgirl-veterinary-continuing-education-blog/>
- Vignaud, et al. (2005). *Parasitología práctica y modelos de enfermedades parasitarias en los animales domésticos*. Vignaud Disponible en <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/150936>.

- Villanueva, et al. (2024). Elaboración de innovaciones en inteligencia artificial para el diagnóstico veterinario: un cambio paradigmático en la atención médica animal. *CIBIOS- BUAP*, , 3(9), 8-17. [https://doi.org/Disponibile en https://csbiologicas.buap.mx/sites/default/files/CIBIOS_9_articulo_1.pdf](https://doi.org/Disponibile%20en%20https://csbiologicas.buap.mx/sites/default/files/CIBIOS_9_articulo_1.pdf)
- Walas, F. (2023). *Industria 5.0. Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático para optimizar procesos industriales*. Universidad Nacional Arturo Jauretche 10.13140/RG.2.2.19665.51049.
- Wang, L. et al. (2021). Augmented Reality in Surgery: Current State and Future Trends. *Annals of Surgery*, 38(2), 267-280.
- Wild, et al. (2023). A multispecies evaluation of digital wildlife monitoring using the Sigfox IoT network. *Animal Biotelemetry*, , 11(38). <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s40317-023-00326-1>
- Yáñez, G. (2025). Una introducción a la ética clínica veterinaria. *Revista de Bioética y Derecho*, 64(1). <https://doi.org/10.1344/rbd2025.64.48471>
- Yitbarek, D.; Dagnaw, G. (2022). Application of Advanced Imaging Modalities in Veterinary Medicine: A Review. *Veterinary Medicine: Research and Reports*, 13(1), 117-130. <https://doi.org/https://doi.org/10.2147/VMRR.S367040>
- Yitbarek, D.; Dagnaw, G. (2022). Application of Advanced Imaging Modalities in Veterinary Medicine: A Review. *Veterinary Medicine: Research and Reports*, 13(1), 117-130. <https://doi.org/https://doi.org/10.2147/VMRR.S367040>
- Zahari, A.; Baharuddin, E. (2023). Outdoor pet tracking and health monitoring system. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, 4(1), 72–78. <https://doi.org/https://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/eeee/article/view/10134>
- Zhang X, Zhang Y. (2015). Tissue Engineering Applications of Three Dimensional Bioprinting. *Cell Biochem Biophys*, 72(3), 777-782.
- Zhao, et al. (2025). Remote Vital Sensing in Clinical Veterinary Medicine: A Comprehensive Review of Recent Advances, Accomplishments, Challenges, and Future Perspectives. *Animals*, 15(7). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ani15071033>



ISBN: 978-9942-609-71-7

