

Imagen médica en veterinaria e investigación

DAVID PÉREZ-BENITO¹, MARÍA DE LA JARA FELIPE MAESTRE¹,
PATRICIO LÓPEZ EXPÓSITO¹, JUAN JOSÉ VAQUERO^{1,2}

¹ Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Bioingeniería, Leganés

² Instituto de Investigación Sanitaria Gregorio Marañón, Madrid

Introducción: por qué la imagen médica es clave en veterinaria e investigación

La imagen médica se ha convertido en una herramienta esencial en la veterinaria moderna y en la investigación biomédica. Su valor no se limita a confirmar un diagnóstico: permite localizar lesiones, valorar la extensión de una enfermedad, planificar intervenciones, monitorizar la respuesta a un tratamiento y documentar la evolución de un paciente de forma objetiva. En animales, donde la exploración clínica puede verse limitada por la especie, el comportamiento, el tamaño o la imposibilidad de expresar síntomas, la imagen aporta una ventana directa al interior del organismo y ayuda a tomar decisiones con mayor seguridad.

En la práctica clínica veterinaria, la radiografía fue durante décadas la técnica de referencia para estudiar huesos, tórax y abdomen. Con el desarrollo de la ecografía, la tomografía computarizada, la resonancia magnética y la medicina nuclear, el diagnóstico por imagen ha evolucionado desde una visión principalmente anatómica hacia una evaluación más completa, capaz de integrar

estructura, función y fisiología^[1]. Esta evolución ha cambiado la forma de abordar muchas enfermedades: hoy no sólo interesa saber si existe una masa o una fractura, sino también si el tejido está vascularizado, si infiltra estructuras vecinas, si presenta actividad metabólica o si responde al tratamiento prescrito.

La veterinaria presenta además una particularidad que la diferencia de la medicina humana: la enorme diversidad de pacientes. Un protocolo adecuado para un

te en especies exóticas, animales de producción o modelos experimentales de pequeño tamaño.

En investigación, las técnicas de imagen tienen un papel igualmente decisivo. Permiten estudiar procesos biológicos en animales vivos de forma no invasiva y repetida en el tiempo. Esto resulta muy valioso en estudios longitudinales, en los que el mismo animal puede ser evaluado antes, durante y después de una intervención. De este modo se reduce la variabilidad entre individuos, se obtiene

“El desarrollo de la imagen médica veterinaria ha transformado la práctica clínica: permite mirar más allá de la exploración externa, confirmar sospechas, descubrir lesiones ocultas, planificar procedimientos y seguir la evolución de un paciente con criterios objetivos.”

perro no siempre sirve para un gato, un caballo, un ave, un reptil o un ratón de laboratorio. Las diferencias anatómicas, fisiológicas y de comportamiento condicionan la elección de la técnica, el posicionamiento, los parámetros de adquisición, la necesidad de sedación o anestesia y la interpretación de los hallazgos. Esta variedad exige flexibilidad y conocimiento específico, especialmen-

te en especies exóticas, animales de producción o modelos experimentales de pequeño tamaño. se contribuye al uso responsable de animales de experimentación, alineándose con los principios de reducción y refinamiento^[2].

El objetivo de este artículo es revisar las principales modalidades de imagen utilizadas en veterinaria y en investigación, explicando sus fundamentos, aplicaciones y limitaciones con un lenguaje cla-



Figura 1. Ecosistema de imagen veterinaria.

ro, pero manteniendo la precisión necesaria. No se pretende presentar una comparación competitiva entre técnicas, sino mostrar que cada modalidad responde a preguntas distintas. La elección adecuada depende del problema clínico o científico, del paciente, de los recursos disponibles y de la información que se necesita obtener.

Fundamentos generales para elegir una técnica de imagen

La elección de una modalidad de imagen debe partir de una pregunta concreta: qué se necesita saber y con qué grado de precisión. No todas las técnicas ofrecen el mismo tipo de información. Algunas muestran muy bien la anatomía; otras permiten estudiar el flujo sanguíneo o la

actividad metabólica; y otras se orientan a procesos celulares o moleculares. Por ello, resulta útil distinguir entre imagen anatómica, funcional y molecular, aunque en la práctica estas categorías se solapan cada vez más.

La imagen anatómica describe la forma, el tamaño, la posición y la relación espacial de órganos y tejidos. Radiografía, ecografía, tomografía computarizada y resonancia magnética pertenecen a este grupo. La radiografía ofrece una proyección bidimensional rápida; la ecografía muestra cortes dinámicos en tiempo real; la tomografía computarizada reconstruye volúmenes a partir de rayos X; y la resonancia magnética aporta un contraste excepcional de tejidos blandos. Estas técnicas son indispensables para localizar lesiones, valorar fracturas, detectar masas, estudiar cavidades corporales o planificar cirugías.

La imagen funcional añade información sobre cómo trabaja un órgano o sistema. Ejemplos claros son el Doppler ecográfico, que permite estudiar flujos sanguíneos; TC (Tomografía Computarizada) RM (Resonancia Magnética), que valoran perfusión y vascularización; o determinadas secuencias de resonancia que analizan difusión, movimiento del agua o actividad cerebral. Este tipo de información es especialmente útil cuando la alteración funcional aparece antes que el cambio anatómico visible.

La imagen molecular va un paso más allá y permite visualizar procesos biológicos a escala celular o molecular. PET (Tomografía por emisión de positrones o positron emission tomography por sus siglas en inglés), SPECT (single-photon emission computed tomography o tomografía computarizada de emisión monofotónica) y algunas aplicaciones

avanzadas de RM, ecografía u óptica utilizan trazadores o sondas que se acumulan según el metabolismo, la expresión de receptores, la inflamación, la hipoxia o la actividad enzimática. Su interés es enorme en oncología, neurología, cardiología e investigación preclínica, aunque su uso clínico veterinario todavía está limitado por disponibilidad, coste, infraestructura y requisitos de radioprotección.

Además del tipo de información, deben considerarse varios criterios técnicos. La resolución espacial indica la capacidad para diferenciar estructuras pequeñas. Es crucial en animales de pequeño tamaño y en modelos de investigación, donde una lesión de pocos milímetros puede tener relevancia. La TC suele ofrecer excelente detalle óseo y anató-

mico; la RM destaca en tejidos blandos; la ecografía depende de la frecuencia del transductor, la ventana acústica y la experiencia del operador. La imagen nuclear sin embargo sacrifica resolución espacial a cambio de gran sensibilidad funcional.

La resolución temporal describe la capacidad de captar procesos rápidos. Es fundamental en estudios cardíacos, respiratorios o vasculares. La ecografía es especialmente ventajosa porque permite ver el movimiento en tiempo real. En cambio, la RM y la PET suelen requerir adquisiciones más largas, aunque existen técnicas rápidas y sistemas de sincronización con respiración o electrocardiograma que mejoran la calidad en estudios dinámicos.

También pesan factores prácticos: coste, disponibilidad, dura-

ción de la exploración, necesidad de sedación o anestesia y seguridad. Radiografía y ecografía son rápidas, relativamente económicas y ampliamente disponibles. La TC es más costosa, pero rápida y muy útil en urgencias y planificación quirúrgica. La RM y la imagen molecular requieren más tiempo, equipamiento especializado y, con frecuencia, anestesia general. En cuanto a seguridad, la radiografía, TC, PET y SPECT emplean radiación ionizante, por lo que deben aplicarse bajo criterios justificados, y de protección radiológica.

Por último, la especie condiciona la elección. En pequeños animales, casi todas las modalidades son técnicamente posibles. En equinos, el tamaño limita el acceso a TC y RM de cuerpo completo, aunque existen equipos adapta-

COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE IMAGEN VETERINARIA

Resumen orientativo de características prácticas y diagnósticas

TÉCNICA	RESOLUCIÓN ESPACIAL	COSTE	DURACIÓN DEL ESTUDIO	PORTABILIDAD	RADIACIÓN IONIZANTE	ANESTESIA / SEDACIÓN
 CT	Alta, especialmente para hueso, pulmón y anatomía 3D	Alto	Corta: minutos, aunque depende del protocolo	Baja-media: generalmente fijo; existen CT móviles, pero son menos comunes	Sí, dosis mayor que radiografía convencional	Frecuente: sedación o anestesia, sobre todo en pequeños animales, exóticos o estudios largos
 Imagen molecular PET, SPECT, gammagrafía	Baja anatómicamente; alta sensibilidad funcional/metabólica	Muy alto	Larga: desde decenas de minutos hasta horas, incluyendo captación del trazador	Muy baja	Sí, por radiofármacos	Frecuente: sedación o anestesia para evitar movimiento durante la adquisición
 Ecografía	Media-alta; dependiente del operador, frecuencia de la sonda y profundidad	Bajo-medio	Corta-media: minutos	Muy alta: equipos portátiles y de mano	No	Normalmente no; puede requerirse sedación si el animal no colabora o en procedimientos guiados
 Resonancia Magnética MRI	Muy alta para tejidos blandos, sistema nervioso, músculo y articulaciones	Muy alto	Larga: normalmente decenas de minutos	Muy baja: equipos grandes y fijos	No	Casi siempre anestesia o sedación profunda, porque requiere inmovilidad prolongada

Figura 2. Comparativa de técnicas de imagen veterinaria.

dos para extremidades o estudios en estación. En animales de producción se priorizan técnicas portátiles, rápidas y coste-efectivas. En animales exóticos y de laboratorio, el tamaño, el estrés, la anestesia y la resolución requerida son determinantes.

Radiografía: técnica básica y de primera línea

La radiografía continúa siendo una de las técnicas más utilizadas en veterinaria^[3,4]. Su permanencia no se debe a falta de alternativas, sino a una combinación muy difícil de igualar: rapidez, bajo coste relativo, disponibilidad, facilidad de implementación y utilidad clínica inmediata. En muchos pacientes es la primera prueba de imagen, especialmente en traumatología,

tórax y abdomen. También es frecuente en animales grandes gracias a equipos portátiles que permiten trabajar en campo, establos o explotaciones ganaderas.

Su fundamento se basa en el uso de rayos X, una radiación electromagnética capaz de atravesar el tejido. Al iluminar el animal con un tubo de rayos X, los distintos tejidos atenúan el haz en diferente medida según su densidad y composición. El hueso y el metal absorben más radiación; el aire absorbe muy poca; los tejidos blandos atenúan la radiación en valores intermedios entre aire y hueso. Esta diferencia de absorción genera una imagen bidimensional, normalmente en tonos de grises, que representa la proyección de la estructura tridimensional.

La simplicidad aparente de la radiografía no debe confundirse

con ausencia de complejidad. La imagen final depende de la energía del haz, la exposición, la distancia, la geometría, el posicionamiento, la presencia de movimiento y la calidad del detector. La digitalización ha mejorado mucho el flujo de trabajo y permite ajustar contraste y brillo después de la adquisición para obtener la imagen óptima, y el soporte digital facilita el archivo y la comparación de estudios. Sin embargo, una imagen mal posicionada o adquirida con una proyección inadecuada no puede corregirse y por lo tanto podría inducir errores diagnósticos.

En tórax, la radiografía es fundamental para valorar la silueta cardíaca, los pulmones, el mediastino, la pleura y la pared torácica. Permite detectar patrones pulmonares, neumonías, edema, derrames pleurales, neumotórax,

ANATOMÍA vs FUNCIÓN vs METABOLISMO

Esquema conceptual de la información que aportan las técnicas de imagen

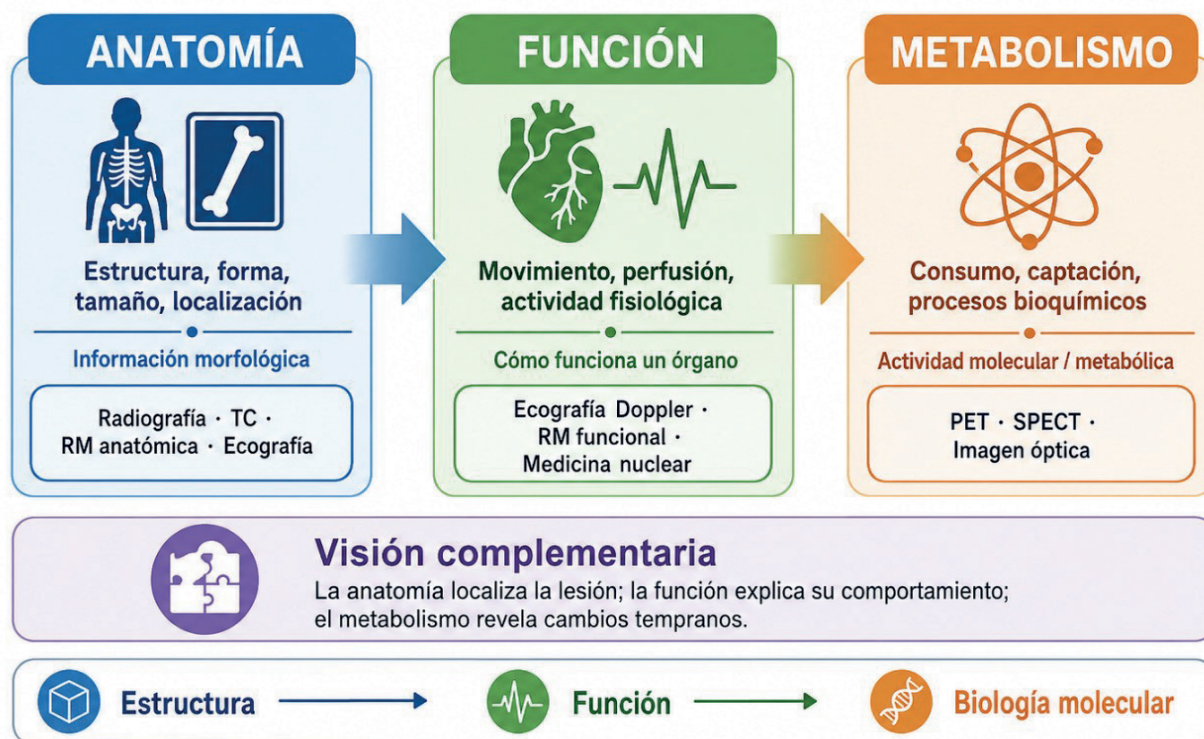


Figura 3. Diferencias del tipo de información en función de la modalidad utilizada.

masas, colapso traqueal o signos compatibles con metástasis. Aunque la TC es más sensible para lesiones pequeñas, la radiografía sigue siendo esencial por su rapidez y disponibilidad, especialmente en urgencias respiratorias.

En abdomen, la radiografía ayuda a valorar tamaño y posición de órganos, presencia de gas, cuerpos extraños, obstrucciones, cálculos urinarios, líquido libre o pérdida de detalle seroso. Muchas alteraciones abdominales requieren ecografía para caracterizar mejor tejidos blandos, pero la radiografía ofrece una visión global rápida. En reproducción, también se utiliza al final de la gestación para contar fetos cuando los esqueletos están mineralizados y valorar posibles problemas relacionados con el parto.

En el sistema musculoesquelético, la radiografía es probablemente la modalidad inicial más importante. Permite diagnosticar fracturas, luxaciones, displasias, deformidades, artrosis, lesiones óseas proliferativas o líticas y alteraciones del crecimiento. Es

Por eso suelen ser necesarias al menos dos proyecciones ortogonales. Además, la capacidad para diferenciar tejidos blandos es limitada, especialmente en abdomen. La radiografía tampoco proporciona información funcional directa y utiliza radiación ionizante, aunque las dosis suelen ser bajas si el procedimiento está bien justificado y optimizado.

A pesar de estas limitaciones, la radiografía mantiene un valor extraordinario. Es rápida, robusta y versátil. En un contexto de medicina veterinaria real, donde el tiempo, el coste, el acceso y el bienestar del animal son factores decisivos, sigue siendo una técnica de primera línea y una puerta de entrada a exploraciones más avanzadas.

Ecografía: imagen en tiempo real y herramienta versátil

La ecografía es, junto con la radiografía, una de las técnicas más extendidas en veterinaria^[3,4].

“El futuro de la imagen veterinaria dependerá de mejorar el acceso, formar especialistas, estandarizar protocolos, validar biomarcadores y utilizar con prudencia herramientas como la inteligencia artificial.”

indispensable para controlar la consolidación de fracturas, comprobar implantes ortopédicos y documentar la evolución tras cirugía.

Las limitaciones son bien conocidas. La principal es la superposición: una radiografía comprime en una sola imagen todas las estructuras atravesadas por el haz.

Su principal fortaleza es la posibilidad de obtener imágenes en tiempo real sin utilizar radiación ionizante. Esto la convierte en una herramienta segura, repetible y muy útil en sujetos jóvenes, gestantes, críticos o sometidos a seguimientos frecuentes. Además, los equipos pueden ser portátiles, lo que permite su uso en consulta, quirófano, urgencias, campo,

explotaciones ganaderas o laboratorios de investigación.

Su fundamento se basa en ultrasonidos: cuando las ondas sonoras de alta frecuencia emitidas por un transductor atraviesan los tejidos, se reflejan parcialmente en las interfaces entre estructuras con diferente impedancia acústica. Los ecos que regresan al transductor se transforman en señales eléctricas y después en imágenes. Las estructuras líquidas, como vejiga o quistes simples, suelen verse negras (o “anecoicas”); los tejidos blandos aparecen en escala de grises; y el gas o el hueso generan reflexiones intensas y sombras acústicas que dificultan la visualización de estructuras que hay detrás de ellos.

La frecuencia del transductor es un elemento clave. Las altas frecuencias ofrecen mejor resolución espacial, pero penetran menos; las frecuencias bajas penetran más profundamente, pero con menor detalle. Por ello, en animales pequeños o estructuras superficiales se emplean transductores de mayor frecuencia, mientras que en animales grandes o exploraciones abdominales profundas se usan frecuencias menores. En investigación con pequeños animales, existen sistemas de biomicroscopía por ultrasonidos que alcanzan resoluciones muy elevadas, útiles para estudiar embriones, vasos pequeños, tumores o corazón de roedores.

El modo B, o bidimensional, es la base de la ecografía clínica. Permite valorar morfología de órganos, presencia de líquido, masas, cambios de ecogenicidad, grosor de paredes y relaciones anatómicas. El Doppler añade información sobre flujo sanguíneo. El Doppler color muestra dirección y presencia de flujo, mientras que el Doppler espectral permite medir velocidades y patrones hemodi-



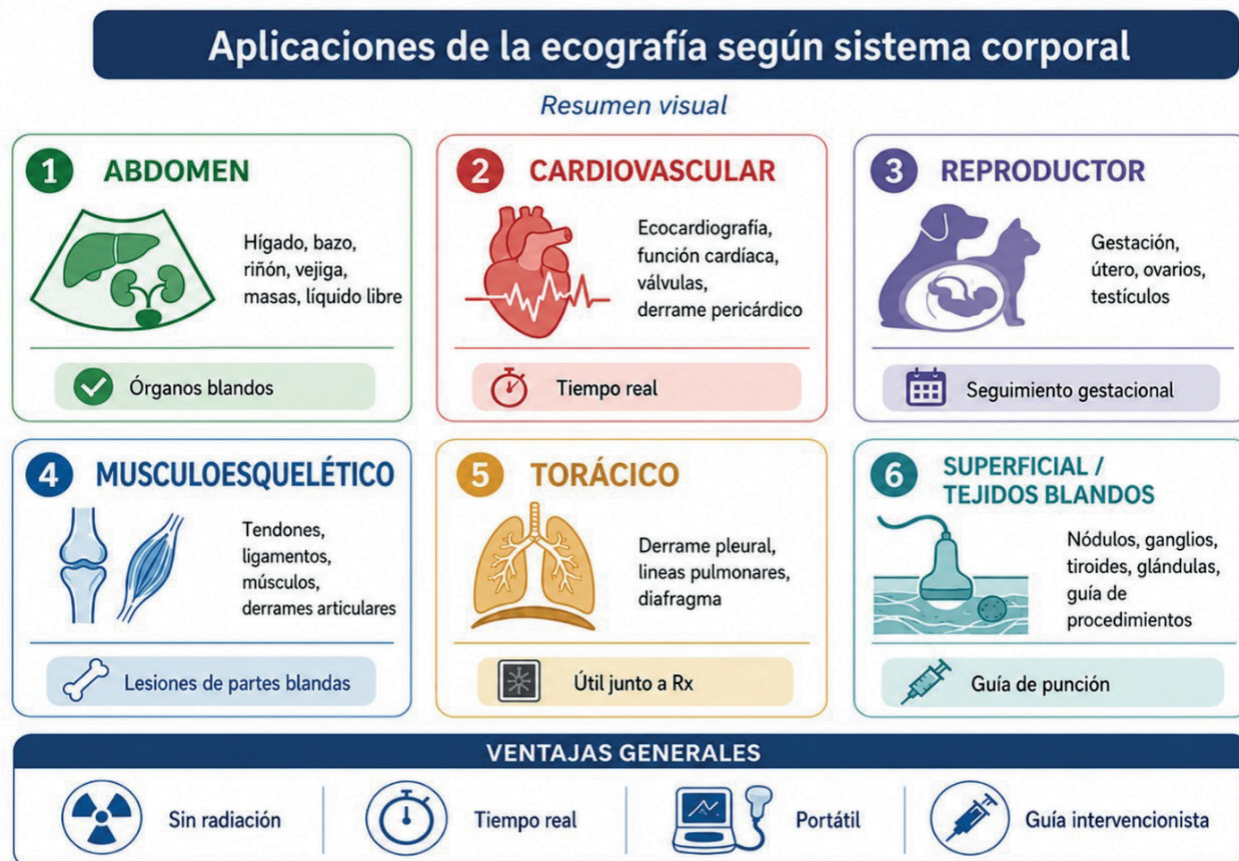


Figura 4. Aplicaciones y ventajas de la imagen de ultrasonidos.

námicos. Estas herramientas son imprescindibles en cardiología, estudios vasculares, hipertensión pulmonar, *shunts*, masas vascularizadas y seguimiento de procesos inflamatorios o tumorales.

La ecografía de contraste ha ampliado sus posibilidades utilizando microburbujas u otros agentes que permanecen principalmente en el espacio vascular y modifican la señal ecográfica. Esto permite estudiar perfusión, vascularización y patrones de realce en lesiones hepáticas, esplénicas, renales o tumorales. En investigación, las microburbujas pueden emplearse para analizar angiogénesis, respuesta a terapias antiangiogénicas o cambios microvasculares. También se han desarrollado contrastes dirigidos a dianas moleculares, aunque su

uso sigue siendo más experimental que clínico.

Otra técnica complementaria es la elastografía, que estima la rigidez de los tejidos. Un tejido más rígido puede sugerir fibrosis, inflamación crónica, lesión tendinosa o determinadas masas, aunque la interpretación depende del órgano, la especie y el contexto. En medicina musculoesquelética, especialmente en caballos y pequeños animales, la ecografía permite valorar tendones, ligamentos, músculos y algunas articulaciones, detectar roturas fibrilares, hematomas, fibrosis o evolución de la cicatrización.

En abdomen, la ecografía es una técnica de primera elección. Permite examinar hígado, bazo, riñones, vejiga, tracto gastroin-

testinal, páncreas, adrenales y cavidad peritoneal. Ayuda a detectar masas, inflamación, líquido libre, obstrucciones, alteraciones urinarias y cambios compatibles con enfermedades sistémicas. En reproducción, permite confirmar gestación, valorar viabilidad fetal, estudiar útero y ovarios, diagnosticar piometra, quistes o muerte embrionaria, y monitorizar ciclos reproductivos. En grandes animales, es indispensable para el manejo reproductivo bovino y equino.

La ecocardiografía permite evaluar cámaras cardíacas, grosor de paredes, función contráctil, válvulas y flujos intracardíacos, y es gran utilidad en enfermedad valvular mitral, cardiomiopatías, malformaciones congénitas, derrame pericárdico o hipertensión pulmonar. Ninguna otra técnica

ofrece con tanta accesibilidad una evaluación dinámica del corazón en tiempo real.

La ecografía también guía procedimientos. Biopsias, punciones, drenajes, cistocentesis, aspirados de masas o colocación de catéteres pueden realizarse con mayor precisión y seguridad al visualizar la aguja y las estructuras vecinas. En urgencias, protocolos ecográficos rápidos permiten detectar líquido libre, derrame pericárdico, alteraciones pulmonares o distensión vesical en pocos minutos.

Sus limitaciones principales son la experiencia del operador y la dificultad para atravesar gas o hueso. La obesidad, el movimiento, el dolor, la conformación del animal o una mala ventana acústica reducen la calidad. Aun así, por su seguridad, coste, portabilidad y capacidad di-

námica, la ecografía es una de las modalidades más valiosas tanto en clínica veterinaria como en investigación longitudinal.

Tomografía computarizada (TC): precisión anatómica y estudio tridimensional

La tomografía computarizada, o TC, representa un salto importante respecto a la radiografía convencional. Ambas utilizan rayos X, pero la TC adquiere múltiples proyecciones alrededor del paciente y, mediante algoritmos de reconstrucción, genera cortes transversales del cuerpo. A partir de estos cortes se obtienen imágenes en planos axial, sagital y coronal, así

como reconstrucciones tridimensionales. La gran ventaja es la eliminación de la superposición de estructuras, una de las principales limitaciones de la radiografía.

Durante el estudio, el tubo de rayos X y los detectores giran alrededor del animal. El sistema registra cómo se atenúa la radiación al atravesar los tejidos y convierte esa información en valores de densidad. En clínica se utilizan unidades Hounsfield, que permiten diferenciar aire, grasa, tejidos blandos, agua, hueso o material metálico. Esta capacidad cuantitativa facilita comparaciones, mediciones y seguimiento de lesiones. En equipos modernos, la adquisición es muy rápida, lo que reduce el tiempo de anestesia y resulta especialmente útil en urgencias.

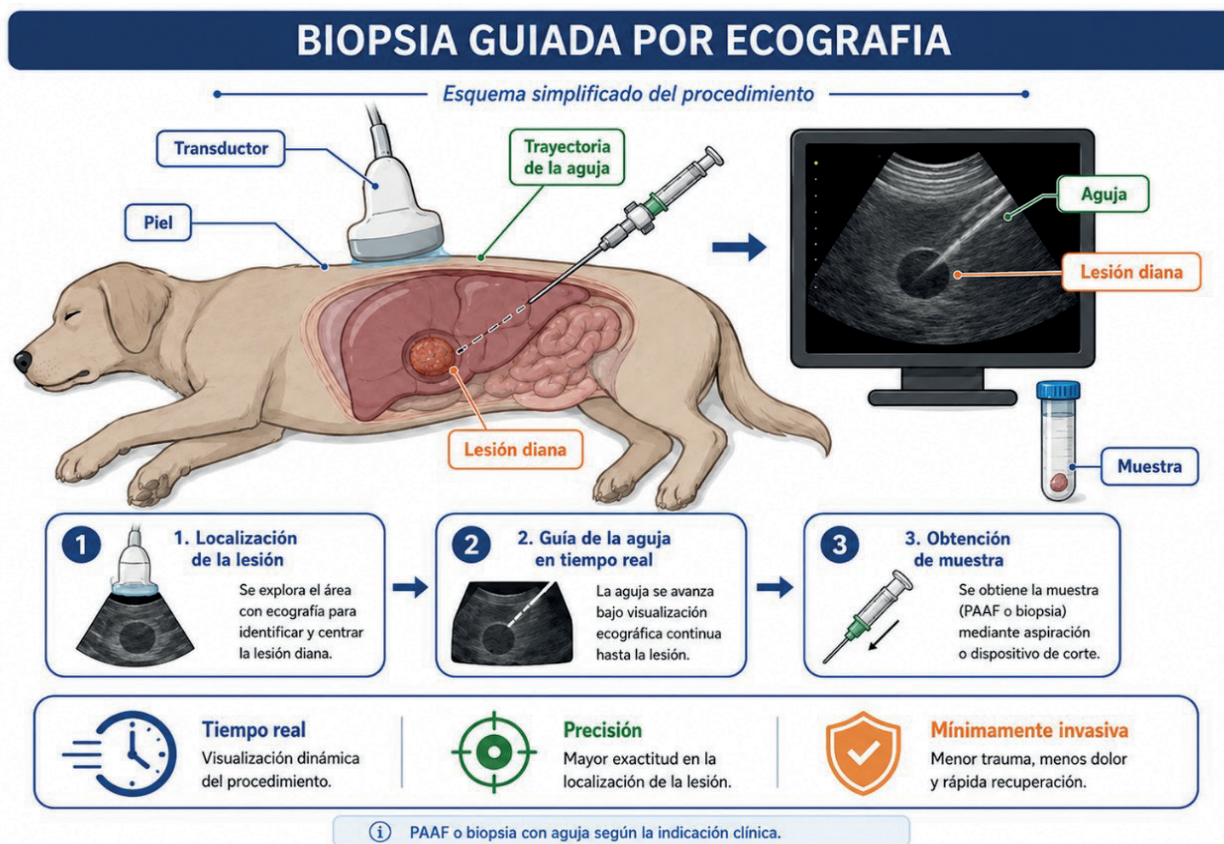


Figura 5. Utilidad de los ultrasonidos para intervenciones.

En investigación con pequeños animales se utilizan sistemas micro-CT, capaces de alcanzar resoluciones del orden de decenas de micras. Generalmente emplean geometría de haz cónico, con una fuente de foco pequeño y detectores de área que capturan un volumen completo en cada rotación. Esta tecnología permite estudiar hueso trabecular, cráneo, dientes, pulmones, implantes, biomateriales y modelos de enfermedad con gran detalle. Aunque la TC no es una técnica molecular en sentido estricto, puede combinarse con otras modalidades funcionales para proporcionar referencia anatómica precisa.

Una de sus aplicaciones veterinarias más frecuentes es el estudio del cráneo, cavidad nasal, senos paranasales, bullas timpánicas, órbitas, mandíbula y dientes. Estas regiones tienen una anatomía compleja y la radiografía puede resultar insuficiente. La TC permite valorar masas nasales, procesos inflamatorios crónicos, traumatismos craneofaciales, enfermedad dental avanzada, otitis media, alteraciones maxilofaciales y malformaciones. En oncología, es especialmente útil para delimitar tumores, valorar invasión ósea y planificar cirugía o radioterapia.

En tórax, la TC ofrece una sensibilidad superior a la radiografía para detectar nódulos pulmonares pequeños, metástasis, consolidaciones, atelectasias, enfermedad bronquial o lesiones mediastínicas. Esto la convierte en una herramienta clave para la estadificación tumoral y seguimiento terapéutico. En abdomen, el uso de contraste intravenoso permite caracterizar masas, estudiar vasos, detectar realce tumoral, necrosis, inflamación o alteraciones urinarias. En muchos casos, la TC complementa a la ecografía cuando la anatomía es compleja o se necesita una planificación quirúrgica precisa.

El sistema musculoesquelético es otra de sus grandes áreas de aplicación. La TC permite detectar fracturas complejas, lesiones articulares, luxaciones, deformidades, enfermedad vertebral, lesiones líticas o proliferativas y alteraciones óseas sutiles. Las reconstrucciones 3D son particularmente útiles en cirugía ortopédica, maxilofacial, torácica o reconstructiva, porque facilitan comprender la anatomía, planificar abordajes, diseñar guías quirúrgicas o incluso producir modelos mediante impresión 3D.

La angio-TC amplía el campo de aplicación al sistema vascular. Mediante contraste intravenoso se puede estudiar anatomía arterial y venosa, anomalías congénitas, trombos, *shunts* portosistémicos, vascularización tumoral o relación de una masa con grandes vasos. Los estudios dinámicos, aunque más exigentes, aportan información sobre perfusión y realce temporal de tejidos.

Sus ventajas son claras: alta resolución anatómica, rapidez, ausencia de superposición, reconstrucción multiplanar, posibilidad de cuantificación y excelente visualización ósea y pulmonar. Sus limitaciones también deben considerarse. Utiliza radiación ionizante en dosis superiores a la radiografía; requiere sedación o anestesia para evitar movimiento; el coste es mayor; y el contraste de tejidos blandos, aunque útil, suele ser inferior al de la RM. Además, los medios de contraste pueden estar contraindicados o requerir precaución en pacientes con determinadas alteraciones renales o hemodinámicas.

En investigación, la TC permite medir volúmenes tumorales, densidad ósea, consolidación de fracturas, integración de implantes, cambios pulmonares o evolución de lesiones de forma repetida.

Su precisión, rapidez y capacidad cuantitativa la convierten en una herramienta fundamental para estudios preclínicos y traslacionales.

Resonancia magnética (RM): excelencia en tejidos blandos y sistema nervioso

La resonancia magnética es una técnica avanzada especialmente valiosa por su excelente contraste de tejidos blandos y por no utilizar radiación ionizante^[5]. Es una modalidad central en neurología, musculoesquelético, oncología y estudios preclínicos. A diferencia de la TC, que se basa en la atenuación de rayos X, la RM utiliza un campo magnético intenso, gradientes de campo magnético y pulsos de radiofrecuencia para generar señales procedentes principalmente de los protones del agua y la grasa de los tejidos.

De forma simplificada, los protones del organismo se alinean parcialmente con el campo magnético principal. Cuando se aplica un pulso de radiofrecuencia, estos protones absorben energía y modifican su estado, se “excitan”. Al volver al equilibrio, disipan el exceso de energía, se “relajan”, en forma de señales de radiofrecuencia que son captadas por antenas o bobinas. Esa señal de relajación es diferente dependiendo del tejido de donde procedan, determinando así el contraste de la imagen. Este proceso de “excitación-relajación” de los protones se puede hacer de diferentes maneras denominadas “secuencias”, y por ello, la RM no produce una única imagen, sino múltiples tipos de imagen según el protocolo utilizado.

Las secuencias T1 muestran muy bien la anatomía y la grasa, y son

Comparación de imagen torácica en veterinaria

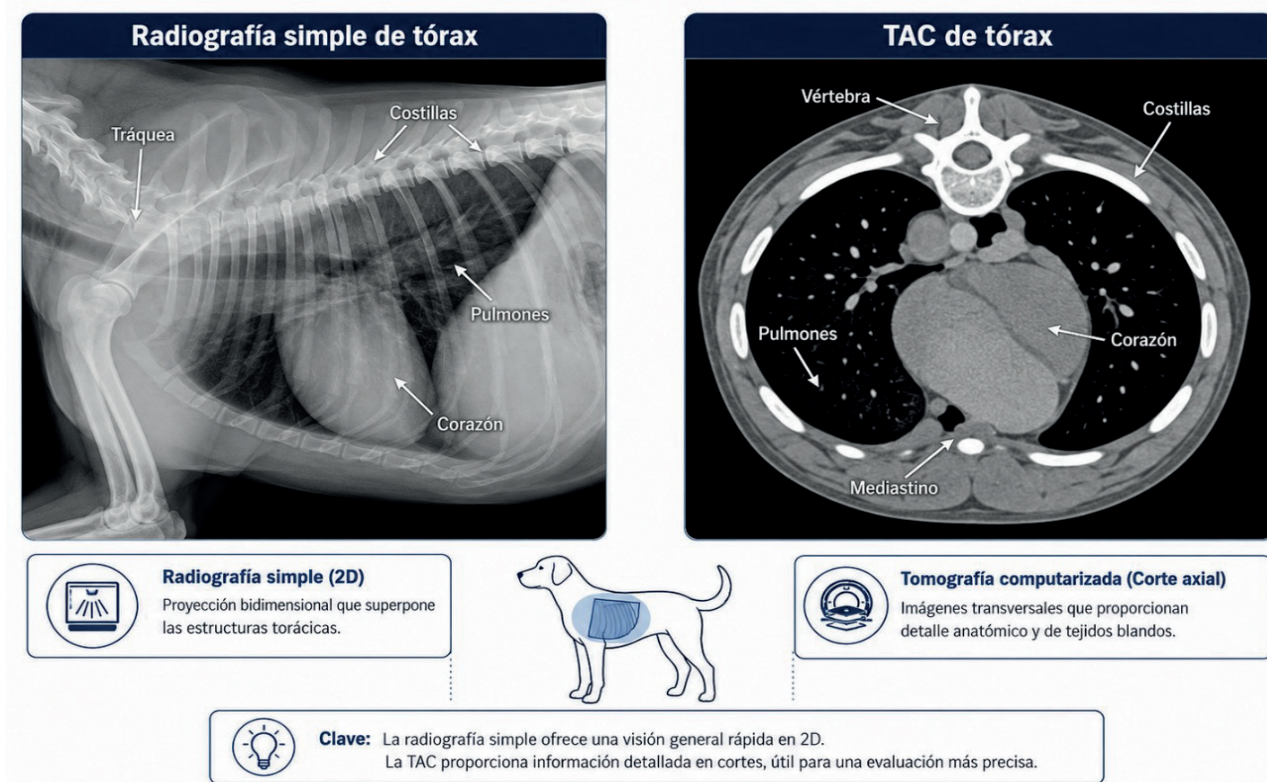


Figura 6. En la imagen radiológica todas las estructuras se solapan en una imagen 2D, y que la tomografía es una imagen 3D y el sujeto puede analizarse rodaja a rodaja.

útiles antes y después de administrar contraste. Las secuencias T2 resaltan líquidos y facilitan identificar edema, inflamación, quistes o lesiones con alto contenido acuoso. La secuencia STIR suprime la señal de la grasa y ayuda a detectar edema en hueso, músculo y tejidos blandos. FLAIR atenúa la señal del líquido cefalorraquídeo y es especialmente útil en encéfalo y médula para revelar lesiones que podrían quedar enmascaradas por el líquido. La difusión, por su parte, estudia el movimiento microscópico del agua y puede aportar información sobre la celularidad, isquemia o determinados procesos inflamatorios.

La RM permite además aplicaciones funcionales y cuantitativas. La espectroscopia puede estu-

diar metabolitos en tejidos; la perfusión valora aporte sanguíneo; la RM dinámica con contraste analiza realce y permeabilidad; y en investigación se emplean técnicas para estudiar conectividad, función cerebral o cambios microestructurales. Estas posibilidades hacen de la RM una plataforma muy flexible, capaz de integrar información anatómica, funcional y en algunos casos molecular en una misma exploración.

En neurología veterinaria, la RM es la técnica de referencia para estudiar encéfalo y médula espinal. Permite diagnosticar tumores, inflamación, malformaciones, lesiones vasculares, hernias discales, siringomielia, meningoencefalitis, edema, hemorragias o enfermedades degenerativas.

Su capacidad para diferenciar sustancia blanca, sustancia gris, líquido cefalorraquídeo y tejidos circundantes supera claramente a la radiografía y a menudo a la TC, especialmente cuando el problema se localiza en tejidos blandos.

En el sistema musculoesquelético, la RM permite valorar cartílagos, ligamentos, tendones, médula ósea, músculo y partes blandas. Es útil en lesiones deportivas, cojera compleja, patología articular, masas, traumatismos y planificación quirúrgica. En oncología, ayuda a delimitar la extensión local de tumores, valorar invasión de estructuras vecinas, diferenciar edema de tejido tumoral y planificar cirugía, radioterapia o seguimiento. En regiones como cabeza, cuello, columna, pelvis



Comparación visual entre TC y RM en perro

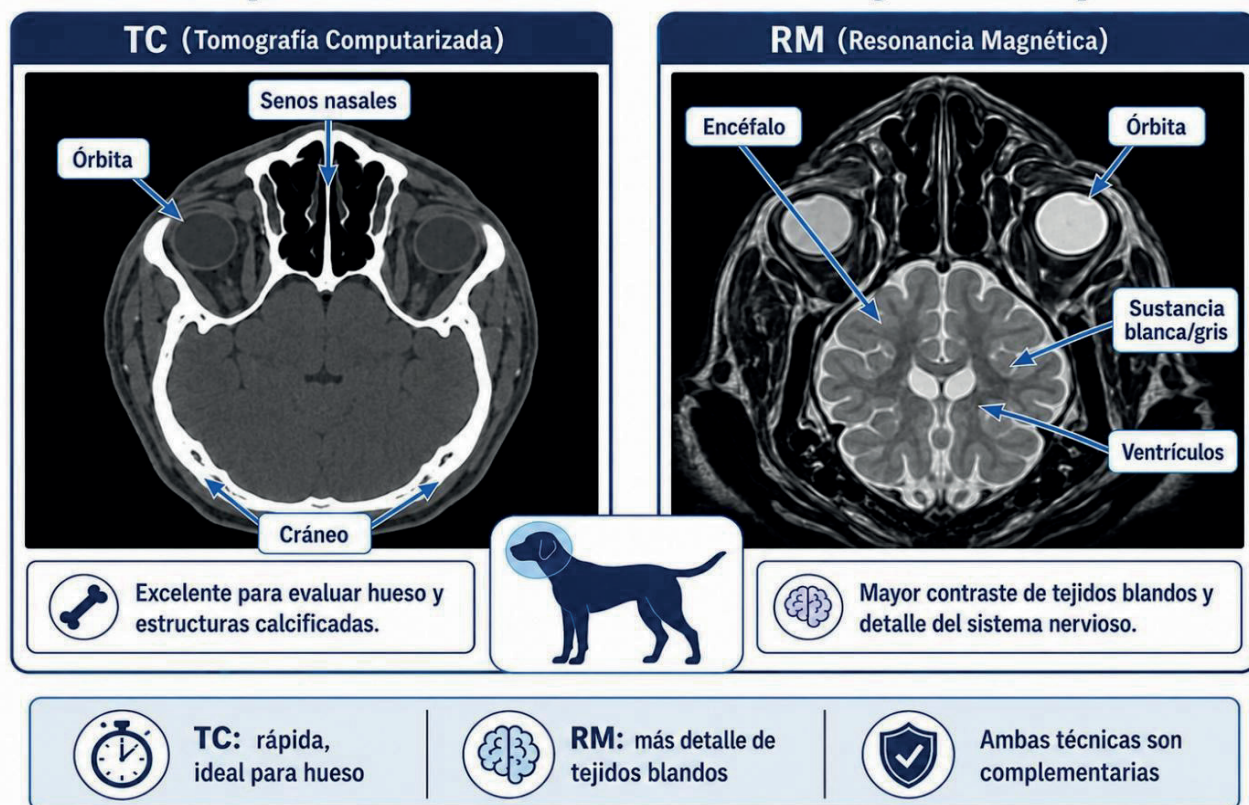


Figura 7. Diferencias del contraste de los tejidos entre la técnica CT y la RM.

o tejidos blandos profundos, su aporte puede ser decisivo.

En investigación preclínica, la RM se utiliza para estudiar modelos de enfermedad neurológica, tumoral, cardiovascular, muscular o inflamatoria. En animales pequeños pueden emplearse equipos de alto campo y bobinas específicas que proporcionan gran detalle anatómico. La posibilidad de repetir exploraciones sin radiación la hace muy adecuada para estudios longitudinales, especialmente cuando se necesita observar progresión de enfermedad, respuesta a terapia o cambios funcionales en el mismo animal.

La RM también tiene limitaciones importantes. Sus exploraciones son más largas que las de TC, por lo que generalmente requie-

ren anestesia general o inmovilización estricta. Es más costosa y menos disponible. Además, la calidad de la imagen depende de una relación compleja entre resolución espacial, tiempo de adquisición y relación señal-ruido: mejorar un parámetro suele exigir sacrificar otro. También existen contraindicaciones o precauciones con implantes metálicos, dispositivos electrónicos, material ferromagnético y monitorización anestésica compatible con RM.

A pesar de estos retos, la RM es insustituible cuando se necesita caracterizar tejidos blandos con detalle. Su ausencia de radiación, su versatilidad de contraste y sus aplicaciones funcionales la convierten en una herramienta de enorme valor clínico y científico.

Medicina nuclear e imagen molecular: funcionalidad, metabolismo y precisión biológica

La medicina nuclear aporta una dimensión distinta al diagnóstico por imagen. Mientras que la radiografía, la TC o la RM muestran principalmente anatomía, las técnicas de imagen molecular (que así también se designan) permiten estudiar procesos fisiológicos, metabólicos y moleculares en funcionamiento^[6]. Esta capacidad es especialmente importante porque muchas enfermedades producen alteraciones funcionales antes de que aparezcan cambios anatómicos evidentes.

El principio común es la administración de un radiotrazador, que es una molécula marcada con un isótopo radiactivo que se distribuye en el organismo según un proceso biológico concreto. La molécula en sí misma participa en una función específica como puede ser metabolismo de glucosa, actividad ósea, función tiroidea, perfusión en tejidos, inflamación, infección o expresión de receptores. El isótopo integrado en esa molécula emite una radiación que se detecta desde el exterior identificando su localización. Esas señales se procesan y se reconstruyen generando una imagen 3D que refleja la distribución de esa función y la variación con el tiempo representando la biología del tejido y no su forma.

La gammagrafía planar, la SPECT y la PET son las modalidades nucleares principales. En gammagrafía, una cámara detecta fotones gamma emitidos por el radiotrazador y produce imágenes bidimensionales. Es una técnica

relativamente sencilla dentro de la medicina nuclear y ha tenido gran utilidad en estudios óseos, tiroideos y de perfusión. En veterinaria, la gammagrafía ósea ha sido especialmente relevante en caballos, donde puede detectar remodelado óseo o lesiones de estrés antes de que sean visibles en radiografía.

La SPECT, o tomografía computarizada por emisión de fotón único, puede entenderse como una evolución tomográfica de la gammagrafía. La cámara gira alrededor del paciente y adquiere múltiples proyecciones que se reconstruyen en tres dimensiones. Para saber de dónde viene cada fotón, se utilizan colimadores físicos que dejan pasar solo la radiación que llega desde ciertas direcciones. Estos colimadores permiten formar la imagen, pero reducen la sensibilidad porque bloquean una parte importante de los fotones. La combinación SPECT/TC mejora mucho la localización anatómica precisa.

La PET, o tomografía por emisión de positrones, utiliza radionúclidos que emiten positrones. Tras recorrer una corta distancia, el positrón se aniquila con un electrón y se generan dos fotones gamma emitidos en direcciones casi opuestas. El equipo detecta ambos fotones en coincidencia y define una línea de respuesta sin necesidad de colimadores físicos. Esta colimación electrónica proporciona mayor sensibilidad que SPECT y facilita una cuantificación más precisa. Por ello, la PET es una de las herramientas más potentes para estudiar metabolismo, receptores, proliferación o respuesta terapéutica.

Los radiotrazadores condicionan mucho la logística. En SPECT se utilizan isótopos como tecnecio-99m, yodo-123 u otros emisores gamma, a menudo con vidas medias compatibles con distribución regional. En PET se emplean isótopos como carbono-11, nitrógeno-13, oxígeno-15 o flúor-18.

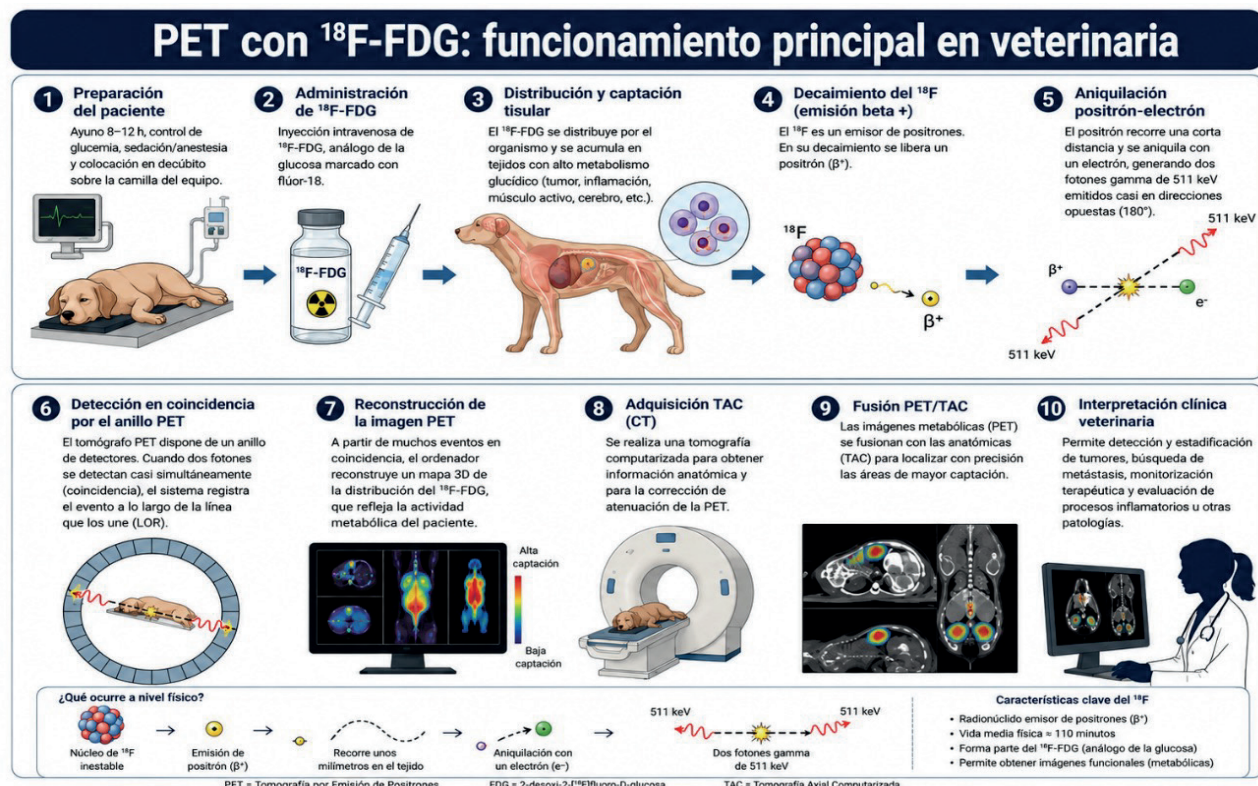


Figura 8. Proceso para la realización de una imagen PET/CT.

Algunos tienen vidas medias muy cortas y requieren ciclotrón cercano y una radiofarmacia especializada para poder realizar la síntesis del trazador in situ. En veterinaria clínica, estas técnicas tienen aplicaciones en oncología, endocrinología, neurología, cardiología, inflamación e infección. Pueden ayudar a detectar tumores, estadificar enfermedad, identificar metástasis, valorar la respuesta al tratamiento o localizar focos funcionales difíciles de ver con imagen anatómica.

Sus limitaciones son relevantes: coste elevado, necesidad de instalaciones autorizadas, radioprotección, gestión de residuos, personal especializado y disponibilidad de radiofármacos. En animales grandes, la geometría de los equipos PET puede ser restrictiva, mientras que gammacámaras o sistemas SPECT más abiertos pueden adaptarse mejor a ciertas indicaciones. Aun así, el valor diferencial de estas técnicas es claro: permiten observar la biología del paciente vivo y anticipar información que la anatomía por sí sola no siempre puede ofrecer.

La multimodalidad (combinación de una técnica de imagen anatómica y otra funcional) ha sido decisiva para que estas técnicas sean más interpretables. Una captación elevada en PET o SPECT puede indicar un foco biológico activo, pero sin una referencia anatómica precisa puede ser difícil saber si corresponde a ganglio, músculo, hueso, tumor o inflamación. La fusión con TC o RM resuelve en gran parte este problema. Además, la TC aporta mapas de atenuación y la RM permite añadir información de tejidos blandos sin radiación adicional. Por ello, los sistemas híbridos son una forma de aumentar la precisión diagnóstica y la confianza en la interpretación.

Desde el punto de vista tecnológico, la diferencia entre SPECT y PET también influye en la forma de diseñar equipos para animales. En SPECT, el colimador determina gran parte del equilibrio entre sensibilidad y resolución: orificios más estrechos mejoran la localización, pero dejan pasar menos fotones; orificios más amplios mejoran la calidad de la imagen, pero reducen detalle. En PET, la resolución depende de factores como el tamaño de los cristales, la distancia recorrida por el positrón antes de aniquilarse, la no colinealidad exacta de los fotones, las interferencias de la dispersión y los eventos aleatorios, y el algoritmo de reconstrucción. Estos detalles explican por qué los equipos para pequeños animales pueden alcanzar resoluciones superiores a las clínicas, pero también por qué suelen estar diseñados para campos de visión reducidos.

Otras modalidades emergentes y complementarias

Además de las modalidades consolidadas, existen técnicas emergentes o complementarias que están ampliando el campo de la imagen veterinaria y preclínica. Muchas tienen todavía una aplicación principalmente experimental, pero algunas empiezan a incorporarse a procedimientos clínicos especializados. Su interés reside en aportar información adicional sobre procesos superficiales, celulares, vasculares o metabólicos, o en guiar intervenciones de forma menos invasiva.

La imagen óptica preclínica incluye fluorescencia y bioluminiscencia. La fluorescencia se basa en sondas capaces de emitir luz tras ser excitadas por una fuente externa^[7]. Puede emplearse para estudiar vascularización tumoral,

inflamación, distribución de fármacos o expresión de marcadores. La bioluminiscencia utiliza luz generada por células o microorganismos modificados que expresan enzimas emisoras de fotones, y es muy útil en modelos de infección, oncología o terapia génica. Ambas técnicas permiten seguimientos longitudinales en animales pequeños, con alta sensibilidad y bajo coste relativo.

Su principal limitación es la penetración de la luz en los tejidos. En animales grandes o lesiones profundas, la señal se atenúa mucho según penetra en el tejido, y la localización espacial es menos precisa que en TC, RM o PET. Por ello, la imagen óptica es especialmente potente en modelos de roedores y otros animales pequeños. En veterinaria clínica, una aplicación en expansión es la cirugía guiada por fluorescencia, con indocianina verde, por ejemplo, para valorar perfusión, delimitar tejidos o mapear ganglios linfáticos centinela en oncología.

La endoscopia avanzada ha evolucionado desde una herramienta visual hacia una plataforma diagnóstica y terapéutica mínimamente invasiva. Las cámaras de alta definición, la endoscopia rígida y flexible, la artroscopia, la laparoscopia y la toracoscopia permiten explorar cavidades, tomar biopsias, extraer cuerpos extraños o realizar tratamientos localizados con menor agresión que la cirugía abierta. Cuando se combina con fluoroscopia, ecografía endoscópica, TC o navegación, puede aumentar la precisión de procedimientos complejos.

La tomografía de coherencia óptica, conocida como OCT, utiliza luz para obtener imágenes de muy alta resolución de estructuras superficiales. Tiene especial interés en oftalmología, dermato-

logía y mucosas, donde permite estudiar capas finas con detalle casi microscópico. La fotoacústica combina luz y ultrasonidos: un pulso luminoso produce una expansión térmica mínima en el tejido, generando ondas acústicas que se detectan con transductores. Esta técnica puede aportar información sobre oxigenación, hemoglobina y vascularización, por lo que resulta prometedora en oncología, inflamación y estudios vasculares.

La termografía registra patrones de temperatura superficial. No es una técnica anatómica específica, pero puede detectar cambios asociados a inflamación, alteraciones vasculares, lesiones musculoesqueléticas o asimetrías térmicas. En caballos, por ejemplo, se ha utilizado como herramienta complementaria en cojeras o lesiones deportivas. Su interpretación exige cautela, porque la temperatura depende del ambiente, el pelaje, la humedad, el ejercicio, la manipulación y otros factores externos.

Estas modalidades no sustituyen a las técnicas principales, sino que amplían el repertorio disponible. Su incorporación dependerá de la validación clínica, la estandarización de protocolos, la facilidad de uso y la demostración de que aportan información relevante para la toma de decisiones. En investigación, ya desempeñan un papel importante en el desarrollo de fármacos, terapias dirigidas, biomateriales y modelos de enfermedad.

Aplicación en investigación veterinaria y traslacional

En investigación veterinaria y biomédica, la imagen permite estudiar enfermedades y terapias de forma no invasiva, repetible y cuantificable. Su papel es

especialmente importante en la medicina traslacional, que busca conectar los hallazgos de laboratorio con aplicaciones clínicas en animales y humanos. Las técnicas de imagen permiten observar procesos dentro de un organismo vivo, en condiciones fisiológicas más cercanas a la realidad que muchos ensayos in vitro.

Una de sus principales ventajas es la posibilidad de realizar estudios longitudinales. En lugar de sacrificar grupos de animales en distintos tiempos para analizar cambios, se puede estudiar al mismo individuo repetidamente. Esto permite seguir el crecimiento de un tumor, la consolidación de una fractura, la evolución de una lesión neurológica, la vascularización de un tejido o la respuesta a un fármaco. El propio animal actúa como su control, lo que reduce variabilidad y mejora la calidad estadística de los datos.

tos innecesarios. Una reciente iniciativa de la Agencia Europea del Medicamento (EMA) ha impulsado el uso de controles virtuales en la investigación preclínica. Estos controles virtuales consisten en modelos de datos que sustituyen a los grupos de animales de control y, mediante el análisis de macrodatos e inteligencia artificial, permiten comparar los resultados del grupo tratado directamente con los registros clínicos digitalizados de los controles, lo que reduce drásticamente el número de animales utilizados.

La imagen también actúa como biomarcador cuantitativo. No se trata solo de observar una lesión, sino de medirla. Volumen tumoral, densidad mineral ósea, grosor de pared, fracción de eyección, captación de radiotrazador, perfusión, difusión o rigidez tisular pueden convertirse en variables objetivas. Estas medidas permiten compa-

“ En investigación veterinaria y biomédica, la imagen permite estudiar enfermedades y terapias de forma no invasiva, repetible y cuantificable. Su papel es especialmente importante en la medicina traslacional, que busca conectar los hallazgos de laboratorio con aplicaciones clínicas en animales y humanos.”

Este enfoque tiene una dimensión ética relevante. Al obtener más información de cada animal, se puede reducir el número total necesario y refinar los procedimientos experimentales. La imagen contribuye así a los principios de las 3R: reemplazo, reducción y refinamiento. Aunque no elimina la necesidad de estudios histológicos o moleculares finales, sí permite diseñar experimentos más eficientes, detectar cambios tempranos y evitar procedimien-

rar grupos, evaluar tratamientos, definir criterios de respuesta y detectar cambios antes de que sean evidentes clínicamente.

En el desarrollo de fármacos, la imagen ayuda a estudiar biodistribución, eficacia, toxicidad y mecanismos de acción. En oncología experimental, por ejemplo, permite evaluar si una terapia reduce volumen tumoral, disminuye metabolismo, altera vascularización o induce necrosis.



En ingeniería de tejidos y biomateriales, facilita analizar integración de implantes, formación de hueso nuevo, degradación de materiales o respuesta inflamatoria. En neurología, permite estudiar progresión de enfermedades, neuroinflamación o efectos de terapias celulares.

Retos actuales: coste, acceso, estandarización e inteligencia artificial

El avance de la imagen veterinaria ha ampliado enormemente las posibilidades diagnósticas, pero también plantea retos. El primero es el coste y el acceso. Radiografía y ecografía están relativamente extendidas, pero TC, RM, PET o SPECT requieren inversiones elevadas, instalaciones adecuadas, mantenimiento, personal especializado y, en medicina nuclear, infraestructura de radioprotección. Esto genera diferencias entre centros de referencia, hospitales universitarios y clínicas pequeñas o rurales.

La disponibilidad condiciona la equidad diagnóstica. Dos animales con la misma enfermedad pueden recibir abordajes distintos según la localización geográfica, los recursos del centro o la capacidad económica del propietario. En investigación ocurre algo similar: no todos los grupos tienen acceso a plataformas de imagen avanzada. La colaboración entre centros, el uso compartido de equipamiento y las redes de investigación pueden ayudar a optimizar recursos.

La formación es otro reto importante. Obtener una imagen no equivale a interpretarla correctamente, es necesario conocer la técnica, ajustar parámetros, reconocer artefactos, entender limitaciones y correlacionar los hallazgos con la clínica. En vete-

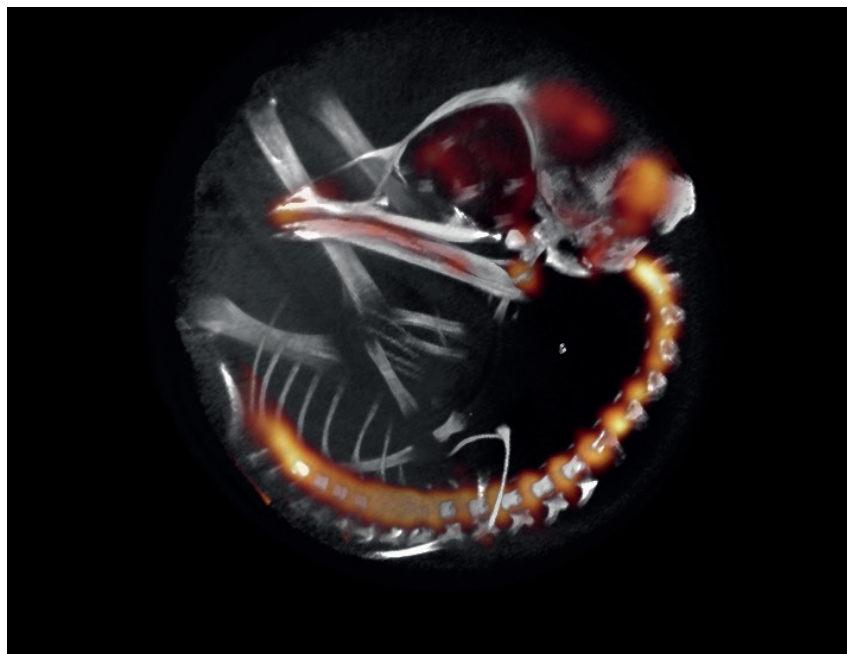


Figura 9. Imagen PET/CT de un embrión de *gallus gallus* en el huevo. En grises se visualiza el tejido óseo en formación, y en color la activación del sistema central y otras estructuras en la cabeza.

rinaria, la variabilidad anatómica entre especies añade complejidad. La formación continuada y la especialización en diagnóstico por imagen son esenciales para evitar errores y aprovechar todo el potencial de las modalidades disponibles.

La estandarización de protocolos también es necesaria. Diferencias en posicionamiento, sedación, parámetros de adquisición, uso de contraste o criterios de medición dificultan comparar resultados entre centros. En investigación, la falta de estandarización puede comprometer la reproducibilidad y validez de biomarcadores. Avanzar hacia protocolos adaptados a especie, tamaño y objetivo clínico o experimental mejoraría la calidad de los estudios y facilitaría bases de datos multicéntricas.

El bienestar animal debe ocupar un lugar central. Muchas técnicas avanzadas requieren sedación o anestesia, con riesgos y costes añadidos. La inmovilización, el estrés, el dolor y el tiempo de

procedimiento deben minimizarse. La decisión de realizar una prueba debe estar justificada por el beneficio esperado y adaptarse al estado del paciente. En investigación, la imagen debe integrarse en diseños que reduzcan daño y maximicen información útil.

La inteligencia artificial abre oportunidades muy interesantes puesto que puede ayudar en la segmentación automática de órganos y lesiones, reducción de ruido, reconstrucción de imágenes, detección de patrones, cuantificación de volúmenes y apoyo al diagnóstico. También puede acelerar el análisis de grandes bases de datos en investigación, pero su uso requiere validación rigurosa, datos representativos de distintas especies y supervisión profesional. La IA no debe sustituir el criterio veterinario, sino actuar como una herramienta de apoyo que mejore eficiencia, reproducibilidad y acceso.

Otro desafío emergente es la gestión de datos. Las técnicas

actuales generan volúmenes de información cada vez mayores: estudios de TC con cientos de cortes, secuencias de RM multiparamétricas, vídeos ecográficos, estudios dinámicos con contraste o imágenes híbridas PET/TC y PET/RM. Almacenar, organizar, anonimizar, compartir y analizar estos datos requiere infraestructuras digitales adecuadas. En investigación, además, es imprescindible conservar metadatos sobre especie, peso, anestesia, parámetros de adquisición, dosis de contraste o radiotrazador y tiempos de adquisición para que los resultados puedan reproducirse.

Finalmente, el desarrollo tecnológico debe ir acompañado de validación. No basta con trasladar protocolos de medicina humana a animales. Las diferencias de tamaño, fisiología, frecuencia cardíaca, respiración, metabolismo y anatomía obligan a adaptar parámetros. Un biomarcador validado en humanos puede no comportarse igual en un perro, un gato, un caballo o un ratón. Por ello, el futuro de la imagen veterinaria requerirá estudios específicos por especie, bases de datos bien anotadas y colaboración entre clínicos, físicos, ingenieros, radiólo-

gos, especialistas en anestesia e investigadores básicos.

Conclusiones

La imagen médica veterinaria es hoy una herramienta indispensable para comprender, diagnosticar y tratar enfermedades en animales, así como para avanzar en la investigación biomédica. Su desarrollo ha transformado la práctica clínica: permite mirar más allá de la exploración externa, confirmar sospechas, descubrir lesiones ocultas, planificar procedimientos y seguir la evolución de un paciente con criterios objetivos. También ha cambiado la investigación, al permitir estudiar procesos vivos de forma longitudinal y de una forma menos invasiva.

Ninguna modalidad es universalmente superior. La clave está en elegir la técnica en función de la pregunta clínica o científica. Una fractura simple no requiere la misma aproximación que un tumor infiltrativo, una enfermedad neurológica, una alteración cardíaca o un estudio de respuesta a una terapia experimental. En muchos casos, la mejor estrategia es combinar información anatómica, funcional y molecular. Esta integración permite comprender mejor la enfermedad, seleccionar trata-

mientos y evaluar la respuesta de forma más precisa.

En veterinaria, la imagen tiene además un valor particular por la diversidad de especies y contextos. Debe adaptarse al tamaño, anatomía, comportamiento y situación clínica de cada animal. En investigación, su contribución ética y científica es notable: reduce variabilidad, permite diseños longitudinales, mejora la cuantificación y favorece el uso responsable de animales. En medicina comparada, las enfermedades espontáneas de animales de compañía ofrecen modelos valiosos para comprender patologías humanas y desarrollar terapias más efectivas.

El futuro de la imagen veterinaria dependerá de mejorar el acceso, formar especialistas, estandarizar protocolos, validar biomarcadores y utilizar con prudencia herramientas como la inteligencia artificial. La tecnología seguirá avanzando, pero su verdadero valor residirá en aplicarla con criterio, precisión y sensibilidad hacia el bienestar animal. Bien utilizada, la imagen médica no sólo mejora el diagnóstico: ayuda a comprender la enfermedad, personalizar los tratamientos y conectar la veterinaria clínica con la investigación traslacional.

Bibliografía

1. Application of Advanced Imaging Modalities in Veterinary Medicine: A Review doi: 10.2147/VMRR.S367040 (https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9166686/?utm_source=).
2. In Vivo Imaging in Pharmaceutical Development and Its Impact on the 3Rs DOI: 10.1093/ilar/ilw019 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28053073/>
3. Imaging techniques in Veterinary Medicine. Part I: Radiography and Ultrasonography. DOI:10.1016/j.ejro.2021.100382 (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352047721000629?utm_source=)
4. Imaging techniques in veterinary medicine. Part II: Computed tomography, magnetic resonance imaging, nuclear medicine. DOI: 10.1016/j.ejro.2022.100467 (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36570419/>)
5. The development of brain magnetic resonance approaches in large animal models for preclinical research doi: 10.1093/af/vfz024 <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6951960/>
6. Veterinary Nuclear Medicine. Scintigraphical Methods - review DOI:10.2754/avb199968040231 <https://actavet.vfu.cz/68/4/0231/>
7. In vivo fluorescence imaging: success in preclinical imaging paves the way for clinical applications DOI:10.1186/s12951-022-01648-7 https://link.springer.com/article/10.1186/s12951-022-01648-7?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article