VIRTOPSIA: USO DE LA TECNOLOGÍA DE IMAGEN EN EL ÁMBITO FORENSE

VIRTOPSY: USE OF IMAGING TECHNOLOGY IN THE FORENSIC FIELD

Durán Campos K.
Médico y Cirujana
Guatemala

Correspondencia: drakarenduran@gmail.com

Resumen: Sin la medicina forense, todo proceso investigativo sobre un delito de cualquier naturaleza carecería de fundamentos científicos que avalen un diagnóstico certero sobre las características propias del hecho en cuestión. La también llamada "medicina legal", se caracteriza por su ardua labor en el peritaje, que involucra múltiples ramas de esta ciencia, desde el estudio de aspectos psicológicos hasta el estudio postmortem del cadáver. Para poder llevar a cabo este peritaje, se debe hacer uso de los mejores y más recientes recursos tanto técnicos como tecnológicos que el entorno disponga. Esto es especialmente cierto en la práctica del estudio de cadáveres y la llamada "necropsia", donde el médico forense podrá apoyar sus conclusiones en la información aportada por imágenes diagnósticas.

Palabras clave: Medicina Forense, Virtopsia, Tomografía Computarizada, Resonancia Magnética, Radiografía, Fotogrametria, Reconstrucción 3D.

Abstract: Without forensic medicine, any investigative process on a crime of any nature would lack scientific foundations that support an accurate diagnosis of the characteristics of the fact in question. The so-called "legal medicine" is characterized by its hard work in expert opinion, which involves multiple branches of this science, from the study of psychological aspects to the postmortem study of the corpse. To carry out this expertise, use must be made of the best and most recent technical and technological resources available. This is especially true in the practice of studying corpses and the so-called "necropsy", where the forensic doctor can support his conclusions on the information provided by diagnostic images.

Keywords: Forensic Medicine, Virtopsy, Computed Tomography, Magnetic Resonance, Radiography, Photogrammetry, 3D Reconstruction.

INTRODUCCIÓN

Junto al avance de la tecnología a nivel global, en los últimos años las técnicas de radiología e imagen han sido pioneras en la medicina forense. Específicamente aquellas relacionadas a la resonancia magnética y tomografía axial computarizada, las cuales han sido utilizadas en este medio para realizar evaluaciones postmortem. Dentro de las técnicas utilizadas, también se puede encontrar la radiografía y el ultrasonido.

Estas se caracterizan por ser no invasivas, es decir, que no requieren insertar algún instrumento dentro del cadáver que pudiera dar lugar a alteración o destrucción de evidencia, salvo en las angiografías donde se inyecta medio de contraste, el cual es de mínimo riesgo. Adicionalmente, la imagenología permite almacenar la información derivada de indicios de manera permanente en sus archivos. Razón por la cual han sido métodos de elección para la documentación y análisis de casos forenses. (1)

El vocablo "virtopsia", acuñado en el año 2003, surge de la composición de los términos "virtual" y "autopsia" y hace referencia a un método multidisciplinario integrado por medicina forense, radiología, patología, física y biomecánica. Es importante aclarar que esta puede ser utilizada no solo en cadáveres, sino también en el sujeto vivo que ha sido víctima, o incluso, sospechoso. (1)

La virtopsia presenta varias ventajas para el médico moderno que apoya a la búsqueda de la justicia. Permite detectar detalles ocultos al examen físico externo, conocer el estado de los tejidos subcutáneos, investigar mecanismos de lesión con reconstrucciones tridimensionales, entre muchas otras aplicaciones. Por otro lado, también permite preservar la salud del galeno patólogo ya que no tiene contacto directo con secreciones, fluidos, gases tóxicos, ni con fuentes de contaminación y/o propagación de virus y bacterias. (2)

Adicionalmente es importante recordar que, en cualquier proceso relacionado a la muerte, la familia de la víctima es quién, por lo general, se lleva la peor parte. Tomando esto en consideración, la virtopsia permitiría el análisis de los tejidos blandos y el esqueleto de la cara sin necesidad de destruirles. Ofreciendo de esta forma, menos manipulación del cadáver, para poder llevar a cabo rituales comunes tras la defunción, como lo es el velatorio. Otra utilidad de importancia de este método se da cuando por causas religiosas o culturales, los familiares no permiten la necropsia, pero las técnicas de imagen pueden ofrecer hallazgos para descubrir la causa del fallecimiento sin vulnerar los deseos de la familia. (3)

En esta revisión bibliográfica se abordarán las diferentes y principales aplicaciones de la virtopsia en la identificación de armas y de personas, el esclarecimiento de hechos y causas de muerte y la reconstrucción tridimensional de los sucesos. Herramientas que permiten la correcta aplicación de la justicia, basados en hechos científicos y comprobables y que además, permiten el almacenamiento de evidencias.

PRINCIPIOS Y CARACTERÍSTICAS DE LA TOMOGRAFIA COMPUTARIZADA

Godfrey Hounsfield y Allan Cormack introdujeron la tomografía computarizada (TC) en el año 1972 como un método para reproducir imágenes axiales del cuerpo humano. Su primera aplicación en la rama forense fue llevada a cabo 5 años después, en 1977, cuando fue utilizada para analizar el patrón de una herida en el cráneo provocada por arma de fuego. (4)

La TC es una técnica que utiliza los principios de los rayos x y los sistemas informáticos para dar como resultado en principio, una reconstrucción primaria de la estructura estudiada y posteriormente una secundaria de cortes más finos que permite un estudio volumétrico. (3,4)

El equipo está constituido por un cuerpo vertical, que presenta un orificio central en donde se haya un tubo de rayos X que gira alrededor del sujeto de estudio. Este cuerpo vertical, también llamado “gantry, grúa, carcasa, garganta o estativo” emite radiaciones que pasan a través de la estructura estudiada, las cuales son modificadas según los diferentes tejidos y su coeficiente de absorción. Estas radiaciones a su vez son captadas por unos detectores de estado gaseoso o sólido que se encuentran en el lado opuesto. La ionización producida por el tubo de rayos x son transformadas en señales eléctricas que son enviadas a un computador, donde se convierten en imágenes digitalizadas que se asemejan a cortes bidimensionales del cuerpo. Las imágenes muy detalladas ofrecen información sobre fracturas, cuerpos extraños, gas o acumulación de fluidos, entre otros. (3)

A través de la figura 1 capturada por la autora, podemos reconocer las dos partes principales del equipo de Tomografía Computarizada:

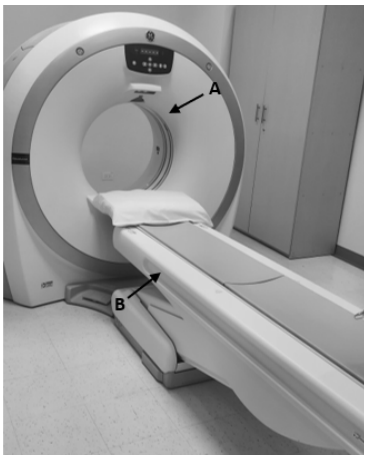

Figura 1. Equipo de Tomografía Computarizada. (a) Gantry (b) Mesa.

1. Tipos de reconstrucciones.

1.1. Reconstrucción multiplanar (MPR)

Permite obtener imágenes con una orientación diferente a la original (axial/transversal) y a partir de estos se forman imágenes con cortes sagitales, coronales, oblicuos, curvos o de trayecto libre. Las reconstrucciones curvas abarcan una estructura anatómica en una sola imagen por lo que son útiles para el estudio de uréteres y estructuras vasculares. (4)

Así lo evidenciamos en estas imágenes de la figura 2 capturadas por la autora.

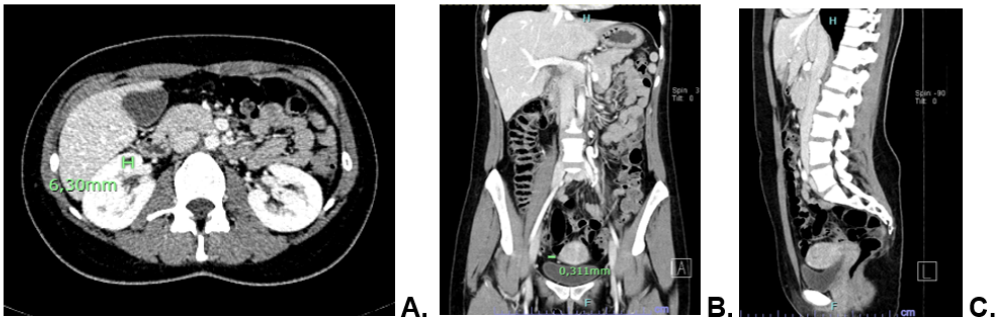

Figura 2. Tomografía axial computarizada de abdomen completo.

(a) Corte Axial (b) MPR en eje coronal (c) MPR en eje sagital

1.2. Reconstrucción volumétrica (3D)

Las imágenes son obtenidas mediante complejos algoritmos y una serie de operaciones que incluyen la adquisición, reensamblaje y edición de estas. Existen múltiples técnicas: Proyección de intensidad media (AIP), Proyección de máxima intensidad (MIP), Proyección de mínima intensidad (MinIP), Reconstrucciones de sombreada de Superficie (SSD), Representación de Volumen (VR) y la Segmentación de volumen. (4)

La unión de estas técnicas proporciona valor diagnóstico, al representar la anatomía de una forma tridimensional, facilitando la interpretación por parte de los médicos forenses y también en el ámbito judicial para la presentación de pruebas ante jueces y fiscales. (4)

PRINCIPIOS Y CARACTERÍSTICAS DE LA RESONANCIA MAGNÉTICA

Los primeros datos sobre del uso de la resonancia magnética datan del año 1946 en Estados Unidos, donde Edward Purcel de la Universidad de Harvard y Félix Bloch de la Universidad de Stratford, demostraron que ciertos núcleos atómicos bajo intensos campos magnéticos pueden absorber energía de radiofrecuencia, produciendo así una señal; Pasados 27 años, en 1973, Paúl Laterbury llevó este fenómeno al campo médico, abriendo la posibilidad a ser utilizado como generador de imágenes diagnósticas. (5)

Para llevar a cabo su función, utiliza electroimanes, creando campos magnéticos cuando circula la corriente por sus bobinas; los campos magnéticos estimulan átomos de hidrógeno que posteriormente producen una señal hacia los transductores, y que luego es transformada a una señal eléctrica y se convierte en una imagen. (3)

Estas imágenes pueden ser editadas de varias formas ya que se puede suprimir, recortar, aumentar o resaltar cualquier figura. Y esa es una de las grandes ventajas de la resonancia magnética, cada secuencia tiene un fin y una estructura determinados, para poder observar desde diferentes vistas la misma estructura, y así facilitar el diagnóstico acertado de quién la interprete. (3)

La resonancia magnética es útil para obtener imágenes de las partes del cuerpo que no son tejidos blandos o esqueléticos, especialmente para visualizar cerebro, médula espinal, nervios, músculos, ligamentos y tendones con mayor claridad. Se diferencia de la tomografía computarizada en que no utilizan radiación ionizante de rayos X. El equipo está conformado por: Jaula de Faraday, imán o campo magnético, sistema de gradientes, bobinas, sala de control y accesorios. (3)

En cuanto a las secuencias de lectura, básicamente son producto de las modificaciones y variantes de las secuencias básicas. Como se ha mencionado, para la formación de la imagen es necesaria la aplicación de pulsos de excitación. Poco tiempo después se mide la señal obtenida en forma de eco. Para esta medición, puede ser necesaria la aplicación de uno o más pulsos de refase o bien de gradientes. El conjunto de cada pulso de excitación y los pulsos de cambio de fase posteriores, son llamados ciclo de pulsos. Se denomina secuencia a esta repetición o serie de ciclos de pulsos y gradientes. (6)

1. Secuencia espín-eco

Este es el método más conocido y utilizado, y consiste en un pulso de excitación inicial de 90° que inclina el vector de magnetización al plano transversal, seguido de uno o dos pulsos de refase de 180° que producen uno o dos ecos, respectivamente. Cada eco representa una imagen. Esta secuencia de ecos produce el contraste entre diferentes tejidos lo que permite el fácil reconocimiento y que depende de la DP, T1 y T2. (6)

Para ajustar el contraste de la imagen, se elige el DP, T1 o T2 y se adecua con los siguientes parámetros: tiempo de repetición (TR) (relacionada a la cantidad de relajación del plano longitudinal), y tiempo de eco (TE) que maneja el desfase del elemento transversal de magnetización. (6)

La potenciación en DP se obtiene por la combinación de un TR largo y un TE corto. La potenciación en T1 con un TR corto y un TE largo y, por último, la potenciación en T2, con un TR

largo y un TE largo. Por lo general, en esta secuencia el tiempo de generación de imágenes potenciadas en T1 y T2 es menor a 10 minutos. (6)

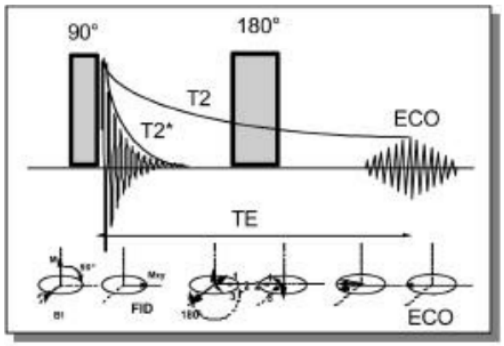

Figura 3. Esquema de la secuencia espín-eco. (6)

2. Secuencia inversión recuperación

A diferencia de la secuencia espín-eco, esta secuencia inicia con un pulso de excitación de 180° que invierte el vector de la magnetización longitudinal. Posteriormente durante la relajación (T1), se aplica un pulso de 90° que inclina el vector al plano transversal. Luego el proceso continúa con toda la secuencia del espín-eco. La ventaja de la secuencia inversión recuperación es la obtención de imágenes con una fuerte potenciación en T1; Su principal limitación es la aplicación de tiempos de repetición más largos para que suceda la relajación. (6)

Cuando el vector del tejido es 0 y su magnitud longitudinal también es 0, la aplicación del pulso de inversión va a suprimir la señal. Con este fundamento se clasifican algunas variantes de esta secuencia. La variante STIR (inversión recuperación con un tiempo de inversión corto), permite eliminar la señal de tejidos con T1 muy cortos como por ejemplo el tejido graso; Con un T1 largo, se pueden eliminar tejidos con esta misma longitud de T1, por ejemplo, el líquido cefalorraquídeo. A esta variante se le conoce como FLAIR. (6)

En esta secuencia, además de los parámetros TR y TE, se añade el TI (tiempo de inversión) que se define como el tiempo de aplicación del pulso de 90°, que determina el contraste de la imagen y posibilita la eliminación de la señal de los tejidos deseados; Por otro lado, es importante mencionar que la reconstrucción de la imagen puede realizarse tanto de modo real como de modo modular. (6)

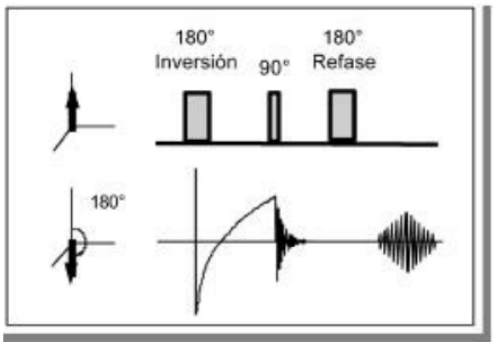

Figura 4. Esquema de la secuencia de inversión recuperación.

Se observa el pulso inicial de 180° que invierte la magnetización y el proceso siguiente. (6)

3. Secuencias de eco de gradiente con ángulo limitado (EG)

Estas secuencias se caracterizan por utilizar gradientes alternantes o inversos para obtener el eco, en vez del pulso de refase de 180°. Adicionalmente, también utiliza ángulos de excitación menores a 90° y un TR más corto, y es esta combinación de ángulo limitado y refase por gradientes, que permite adquirir las imágenes en menor tiempo. (6)

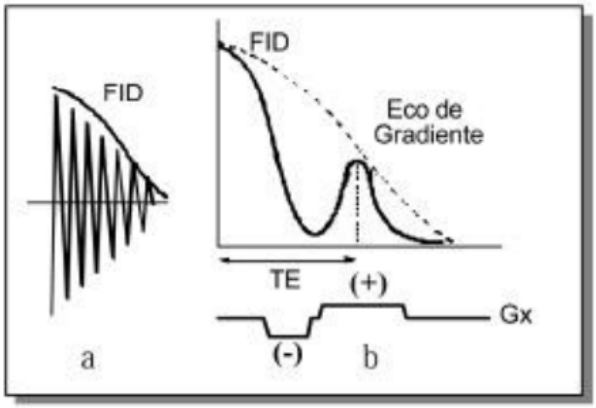

Figura 5. Refase por gradientes en la secuencia de eco de gradiente con ángulo limitado. (6)

En las secuencias de eco de gradiente de ángulo limitado, el contraste y la mejora de la imagen dependen del TE y del ángulo de inclinación. La potenciación en T1 surge de la aplicación de TE cortos y ángulos entre 40 y 60°. Para obtener una imagen limpia, se debe eliminar toda la magnetización transversal residual para evitar la contaminación del siguiente ciclo. Y para la potenciación en T2 se utilizan ángulos pequeños y TE más largos. (6)

4. Secuencia turbo espín-eco (TSE)

Una secuencia rápida basada en la secuencia RARE, que es una mejora sobre la secuencia SE multieco. En la TSE el ciclo de pulsos inicia con un pulso de excitación de 90° y la posterior generación de dos o más ecos. Esta secuencia se caracteriza por que cada eco se codifica con una fase distinta. El contraste obtenido es parecido al de la secuencia SE normal. Las diferencias radican en el aumento del brillo del tejido graso aún en T2, esto debido al "acoplamiento J", causado por la aplicación de múltiples pulsos de refase de 180°. También puede aparecer un artefacto por emborronamiento cuando se utilizan eco largos. (6)

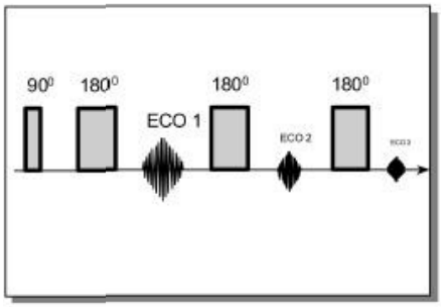

Figura 6. Secuencia multieco con 3 pulsos de refase de 180°, que a su vez, producen otros ecos. (6)

Las secuencias TSE se puede combinar con prepulsos preparatorios, como pulsos invertidos de 180° (IR-TSE) y técnicas de saturación de tejido adiposo (TSE-Spir) (6)

5. Secuencia GraSE

Es la secuencia rápida más moderna y compleja, en donde se combinan las secuencias TSE y EPI. Posterior al pulso de excitación, se generan múltiples ecos por espín por refase, mediante pulsos de 180°. Se consiguen múltiples vistas en cada TR con una codificación de fase distinta. Por lo que es posible adquirir imágenes de muy alta resolución en tiempos cortos. (6)

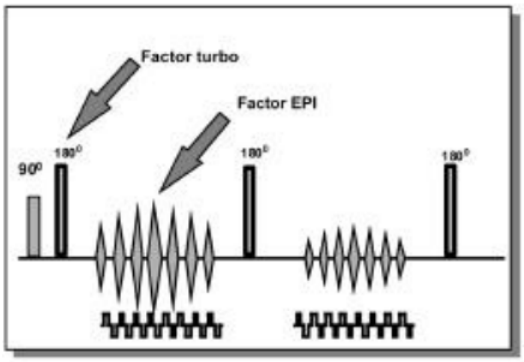

Figura 7. Esquema de la secuencia GraSE.
Se observa una combinación de ecos de espín y de gradiente. (6)

FOTOGRAMETRÍA DIGITAL Y ESCANEO DE SUPERFICIE EN 3D

Adicional a las técnicas imagenológicas de tomografía y resonancia magnética, la fotogrametría digital y el escaneo de superficie en 3D son utilizados para la identificación y correlación de los hallazgos externos y lesiones. (7)

Para lograr la digitalización de un objeto, se llevan a cabo 2 pasos. En el primero, la fotogrametría se realiza para predefinir puntos discretos del objeto. Posterior, se toman varias imágenes desde diferentes puntos de vista. Estas fotografías se transfieren a la computadora para continuar con el segundo paso. En este, se combinan las imágenes en base a los puntos de referencia, generando así la imagen final tridimensional. (7)

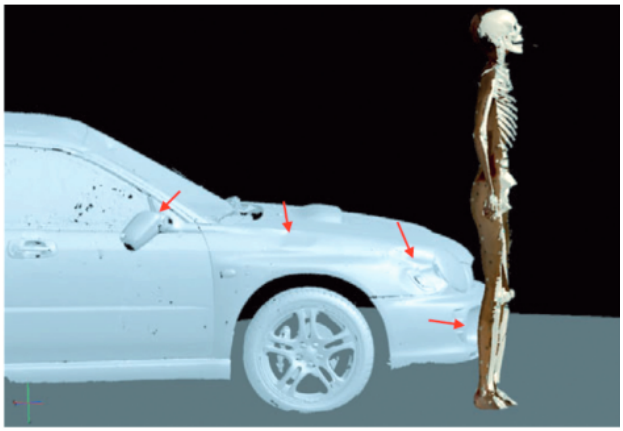

Figura 8. Reconstrucción de un accidente de tránsito por medio de la reconstrucción tridimensional. (7)

APLICACIONES DE LA VIRTOPSIA EN EL CAMPO FORENSE

La virtopsia puede dar lugar al reconocimiento de diversas lesiones y patologías de acuerdo con el sitio anatómico analizado y los hallazgos:

- Sistema Nervioso Central: hemorragias intracraneales y embolias gaseosas.
- Aparato Respiratorio: neumotórax, broncoaspiración, hemitórax.
- Aparato Cardiovascular: falla cardiaca, infarto agudo al miocardio, embolia aérea.
- Sistema Gastrointestinal: líquido en estómago y duodeno en caso de ahogamiento.
- Piel, tejido subcutáneo y músculos: hematomas, laceraciones, heridas y enfisema.
- Politraumatismos, fracturas y lesiones en el cuello por casos de estrangulamiento y ahorcamiento.
- Heridas punzocortantes y heridas por proyectil de arma de fuego. (8)

Las aplicaciones principales es la identificación de la fecha del suceso, identificación de sexo y edad, exámenes toxicológicos, búsqueda de objetos extraños, etc. (8)

IDENTIFICACIÓN DE LA CAUSA DE MUERTE E IDENTIFICACIÓN DEL CADÁVER

Un elemento fundamental en cualquier muerte es la determinación del momento y causa del deceso. Estos datos resultan de la ardua investigación y análisis de los profesionales; Para dar respuesta a estas interrogantes, es necesario analizar los fenómenos cadavéricos. Estos suceden a partir del momento de la muerte y pueden verse afectados por diversos factores. Se dividen en bióticos y abióticos. Estos últimos son consecuencia de la acción de los sucesos ambientales: enfriamiento, deshidratación, lividez cadavérica e hipostasis visceral. Por otro lado, los fenómenos bióticos acontecen por los cambios físicos y químicos propios del proceso de muerte: rigidez y espasmo cadavéricos. (8)

Para datar la muerte, es importante conocer la aparición cronológica de los fenómenos cadavéricos. Los más importantes aparecen en las primeras 48 horas, ya que son los que dan menos lugar a errores diagnósticos. Estos se caracterizan por presentar un aumento de la atenuación de tejido subcutáneo, pulmones y órganos sólidos; aparición de livideces reticulares en el pulmón, efecto hematocrito en grandes vasos, perdida de diferenciación de la sustancia gris y blanca y disminución de la densidad del parénquima. (8)

Como herramienta para el análisis de la aparición de estos sucesos se utilizan las diversas técnicas imagenológicas, específicamente la tomografía computarizada post mortem (PMCT), la angiografía por tomografía computarizada post mortem (PMMR) y la tomografía computarizada por emisión de positrones (PMCTA). (8)

Según los protocolos actuales, la PMCT se debe realizar inicialmente sin contraste, seguida de 3 fases angiográficas (venosa, arterial y dinámica). En el 2019, se aceptó la propuesta de Lausana, Suiza, para utilizar como medio de contraste, una mezcla de aceite de parafina y Angiofil en 6%; Según Tawfiq, et al. (2020), la

angio PMCT muestra mayor sensibilidad en la identificación de lesiones vasculares y esqueléticas a diferencia de la necropsia tradicional que proporciona más información anatómica y patológica de los órganos. (8)

Otro tipo de objetos que pueden ser detectados con la TC son los implantes médicos. El reconocimiento de estos objetos toma importancia en denuncias de mala praxis. Por otro lado, pueden contribuir a la identificación de cadáveres por el número de serie único en cada uno de estos. También pueden compararse radiografías antemortem con las imágenes producidas por la TC; Los implantes más utilizados son los implantes dentales. Los cuales son estudiados a profundidad por el departamento de Odontología forense. (7)

Junto con la información fidedigna brindada por las autoridades pertinentes, cuando los cadáveres preservan rasgos característicos es posible conocer la identidad del fallecido. La verificación de la identidad se hará solamente si la autoridad lo considera pertinente. Por otro lado, cuando un cadáver no está identificado o si este se encuentra en situaciones alteradas como en los casos de mutilados, calcinados, descomposición avanzada o esqueletizados, además de preservar muestras y registros para establecer la identidad, es imprescindible cotejar los datos con registros pre mortem disponibles (estudios de imagen, fichas dentales, huellas dactilares si se pudiera, estudio de ADN, etc.). (8)

Entonces, la necroidentificación es el resultado del análisis multidisciplinario y la metodología aplicada que deberá ajustarse a la individualidad de la situación. En el caso en el que no se conoce la identidad del difunto, se iniciará con el examen externo del cadáver (reconocimiento directo, cicatrices, tatuajes, accesorios y necroreseñas dactilares), luego sigue el examen interno (radiología, análisis dental, presencia de prótesis, ausencia de órganos, anomalías anatómicas, estudios serológicos, ADN, etc). (8)

En cuanto a la radiología y su relación con la identificación del cadáver, se aplica el procedimiento de la virtopsia donde se deberá centrar la atención en los detalles anatómicos que permiten la diferenciación entre individuos: callos de fracturas, calcificaciones, análisis de senos frontales, deformaciones, etc; Como se ha mencionado, es de gran utilidad contar con registros pre mortem de posibles individuos que permitan cotejar la información encontrada. (8)

APLICACIÓN EN EL ANÁLISIS DE HERIDAS POR ARMA DE FUEGO

Sánchez y Albarrán describen que el estudio de heridas por arma de fuego constituye una de las principales temáticas dentro del ámbito forense, ya que el análisis de los daños provocados por la bala, tanto en la víctima como en su entorno, permitirá sacar conclusiones sobre el hecho y con ello tratar de reconstruir la escena. Esto tomando en cuenta que cualquier arma de fuego permitirá la salida de proyectiles, gases, productos de combustión de la pólvora y la pólvora per se. (8)

Las lesiones resultado de heridas por arma de fuego, pueden clasificarse en:

- Heridas por proyectil único: Hace referencia a que el orificio de entrada es único para cada proyectil; es de morfología variada, dependiendo la zona del cuerpo sobre la que ingresa y la dirección. Por lo general, la herida es redondeada u ovalada, el tamaño del orificio depende tanto de la forma del proyectil, la distancia y dirección del disparo y la fuerza propia del arma utilizada. Calabuig menciona que existen 4 elementos que deben analizarse:

- El anillo de Fisch o de contusión: que puede ser concéntrico, excéntrico y completo o excéntrico incompleto y da certeza del orificio de entrada.

- El collarete de limpieza: hace referencia al halo de impurezas que deja la bala.

- El tatuaje de Chavigny: permite calcular la distancia a la cual se efectúa el disparo, presenta quemaduras, incrustaciones de granos de pólvora y ahumamiento.

- Trayectoria: puede ser única, múltiple, rectilínea y desviada por masa ósea. En general, el diámetro de la trayectoria aumenta a medida que el proyectil arrastra restos de huesos y tejidos. (8)

En cuanto al orificio de salida, este no siempre está presente en los casos en los que el proyectil se queda dentro del cuerpo o cuando la bala se fragmenta. Se diferencia del de entrada, en que tiene los bordes evertidos y que no existe un collarete de limpieza ni el anillo de Fisch. (8)

- Heridas por proyectiles múltiples: Encontradas en los casos de disparos de escopetas, en donde el estudio de las lesiones es diferente. Generalmente, una escopeta presenta de 1 a 3 cañones que dispara cartuchos con perdigones. Con estos, se producen heridas múltiples que se identifican por causar diferentes lesiones dependiendo de la distancia a la que se produjo el disparo. Se dice que, a mayor distancia, la dispersión de los perdigones y de las heridas producidas será mayor, y su penetración menor. (8)

- Lesiones por proyectiles a alta velocidad: Este tipo de bala causa una destrucción extraordinaria de los tejidos y órganos como resultado de las ondas expansivas ultrasónicas. El orificio de entrada puede tener similitudes al dejado por proyectiles únicos simples, aunque debido a la gran energía cinética que contienen, pueden dejar heridas de bordes irregulares. En cuanto al orificio de salida, si está presente, tiende a ser mucho más grande por el arrastre de las esquirlas de hueso y tejido. Hay una excepción, cuando la bala solo atraviesa tejidos blandos, ya que el orificio de salida puede incluso ser menor que el de entrada, por lo que es importante el estudio detallado para evitar errores. (8)

- Lesiones originadas por restos de pólvora: Tras un disparo, siempre quedan restos de pólvora que no alcanza a quemarse y que quedan incrustados en la piel, alrededor del orificio de entrada. Reciben el nombre de “tatuaje”. (8)

Hay daños causados por armas de fuego, cuya morfología dificulta la identificación de las aberturas de entrada o salida o el cálculo del número de proyectiles que pueden penetrar en el cuerpo. Así también en el caso de múltiples heridas que son causadas por un proyectil de arma de fuego que se cruzan en su trayectoria, pudiendo dificultar la determinación de la trayectoria individual de cada una de ellas. Es aquí donde entra la aplicación de la imagenología post mortem. (8)

También es de vital importancia en la determinación del calibre de un proyectil, el cual se refiere al diámetro de su base y es medida en milímetros o en pulgadas. Por otro lado, en cuanto al calibre del arma de fuego, hace referencia al diámetro interno del cañón. (9)

Aun cuando el estudio del calibre de un proyectil recuperado en la escena del crimen, o en la víctima, es realizado por un experto en balística, este análisis puede ser apoyado por estudios imagenológicos, que además ayudan a documentar la evidencia y preservar la cadena de custodia. (9)

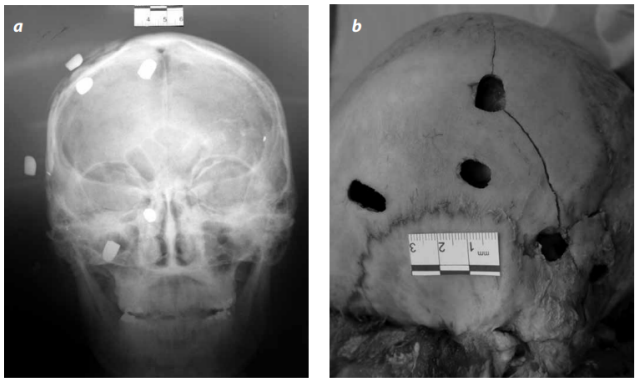

Figura 9. (a) Radiografía en la que se evidencian múltiples proyectiles de 6 mm en el cráneo (b) Durante la necropsia, se documentan las mismas lesiones en el hueso. (9)

La documentación radiológica de proyectiles recuperados durante la necropsia medicolegal, antes de su extracción y su comparación con la documentación posterior a esta, es de gran utilidad durante la sustentación del juicio oral, para probar la autenticidad de la evidencia. Además, también contribuye a preservar la seguridad de quienes procesan la muestra, al evitar manipular evidencia potencialmente peligrosa de manera inadecuada, por desconocer su contenido. (9)

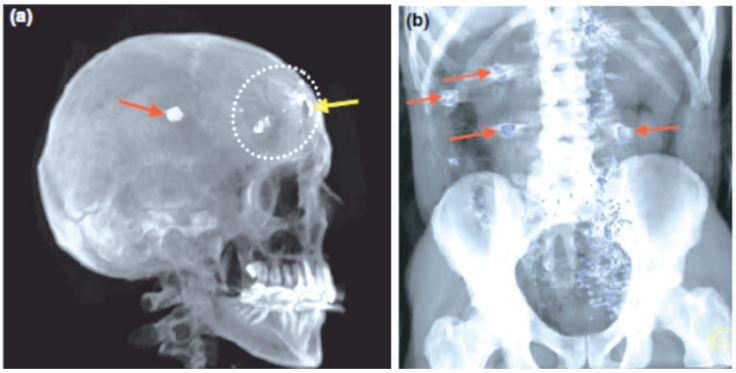

Figura 10. Reconstrucción tridimensional tomográfica en víctimas por herida de arma de fuego. (a) Reconstrucción de cráneo con bala al interior (flecha roja). En el hueso frontal, es visible el defecto circular de la entrada del proyectil (flecha amarilla). (b) Reconstrucción tridimensional mostrando 4 balas (flechas rojas) alojadas en la cavidad abdominal. (7)

En cuanto a la fotogrametría y la reconstrucción tridimensional, la reconstrucción basada en datos reales puede ser usada para comparar una herida de bala con una pistola específica, la cual pudo haber sido encontrada en la escena del crimen. Comprobando así, que la pistola en cuestión es la responsable del suceso además de

revelar la posición exacta de la pistola al momento de la detonación. Esto es de especial importancia sobre todo en casos sospechosos donde se debe dilucidar entre un suicidio o un homicidio. (7)

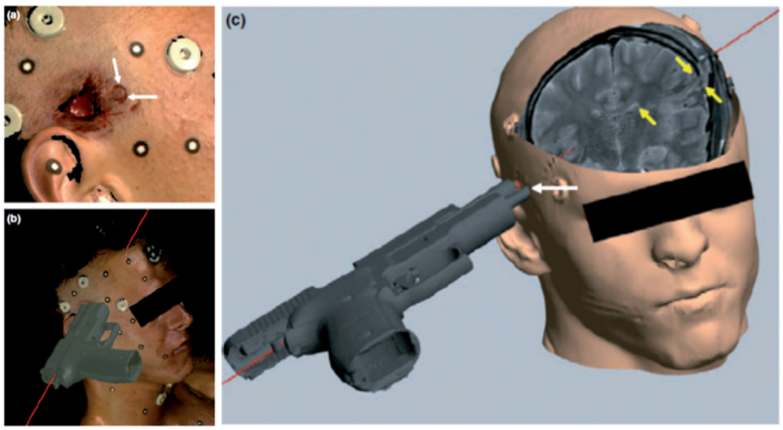

Figura 11. Reconstrucción tridimensional de una herida por arma de fuego en un caso de suicidio. (a) Modelo por fotogrametría del cráneo, que muestra una herida de proyectil en el temporal derecho y su orificio de entrada (flechas blancas) (b) La reconstrucción del arma encontrada en la escena, junto con el orificio de entrada, permite estimar la posición exacta del arma y el correspondiente trayecto del proyectil (línea roja) (c) Fusión de la fotogrametría y reconstrucción tridimensional, con la resonancia magnética. La posición del arma es la típica de un suicidio. (7)

APLICACIÓN EN EL ANÁLISIS DE HERIDAS POR ARMA BLANCA

Gisbert Calabuig, (2019) define la herida por arma blanca como aquella causada por "*instrumentos lesivos manejados manualmente que atacan la superficie corporal por un filo, una punta o ambos a la vez*". En estos casos los daños causados se limitan a la trayectoria que siguió el arma, a diferencia de los causados por arma de fuego donde hay daño a los tejidos circundantes. (8)

Los instrumentos utilizados pueden ser desde utensilios de uso común como cuchillo, tijeras, agujas, lápices, bolígrafos y destornilladores hasta instrumentos fabricados artesanalmente como los hechos en las cárceles. Los tipos de heridas se clasifican entonces, por el tipo de instrumento utilizado en cortantes, punzantes o punzo cortantes y corto contundentes. (8)

- Heridas cortantes o incisas: Se subdividen en típicas cuando son causadas por cuchillos, bisturíes, navajas y hojas de afeitar y atípicas en el caso de láminas de metal y trozos de cristal, vidrio o porcelana. Resultan cuando estos objetos de bordes afilados presionan sobre la piel con suficiente intensidad para producir una herida que tiene mayor longitud que profundidad siendo esta su característica principal. Como se puede observar en la Figura 11 el perfil de corte de este tipo heridas tiene forma triangular, con una base superficial y un vértice paralelo dirigido hacia la profundidad de los tejidos, con bordes particularmente regulares y limpios. Se suelen encontrar en cara, cuello y extremidades superiores tanto como heridas de defensa como en etiologías autolíticas. (8)

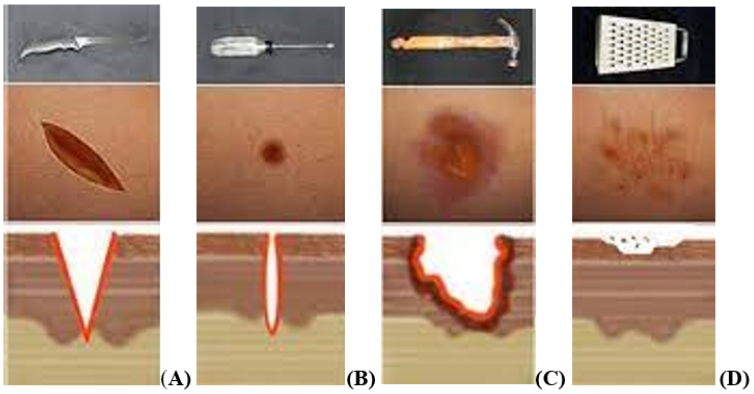

Figura 12. (A) Herida cortante (B) Herida Punzante (C) Herida Contusa (D) Herida Erosiva. (10)

- Heridas punzantes o penetrantes, las cuales son producidas por instrumentos cilindrocónicos alargados de punta afilada como alfileres, agujas, flechas, clavos, punzones, floretes y astas de animales. Estas se caracterizan por que la profundidad supera a la longitud. Existe un agujero de entrada en la piel, el trayecto y eventualmente un orificio de salida. En estos casos, la muerte está dada por la perforación de órganos provocando hemorragia interna. (8)

- Las heridas cortopunzantes asocian las características antes expuestas para las cortantes y penetrantes. La parte lesiva está formada por una hoja estrecha que termina en una punta afilada con uno o dos bordes afilados y cortantes. Las lesiones son provocadas por el movimiento del movimiento del eje axial de la hoja de forma perpendicular sobre la superficie corporal, por lo que predomina la profundidad sobre la longitud. (8)

- Heridas cortocontundentes son producidas por aquellos elementos que tienen un filo, pero están dotados de un gran peso que les proporciona fuerza adicional, afectando no solo las estructuras blandas si no también el esqueleto. Este tipo de instrumentos pueden ser hachas, cuchillos de carnicero, sables, machetes y hélices. Tienen bordes amplios, finos y bien definidos pero rodeados de una línea delgada de contusión. Debido a su rigidez, deja una mejor impresión en el hueso que en la piel y tejidos blandos, por lo que es posible identificar el arma por el examen de los restos óseos, especialmente el cráneo. (8)

Su etiología puede ser homicida, suicida o accidental. Los equipos forenses son los que analizarán las características de las lesiones para poder establecer el tipo de arma empleada, la magnitud de la violencia generada en el caso de existir un agresor, así como la posición de la víctima y de la herida. (8)

La importancia del reconocimiento de las lesiones por arma blanca es esencial para identificar el tipo de instrumento que produjo la herida, así como la región del cuerpo afectada, el tipo de desgarro en la ropa y la cantidad de sangre presente en la escena del rimen. También se analizará la trayectoria de la herida que ayudará a su vez a determinar que mano utilizó el agresor para perpetuar el ataque. (8)

Aplicando lo antes expuesto al procedimiento de virtopsia, se ha comprobado que la tomografía computarizada multicorte (MSCT) es una posible alternativa a la tradicional disección capa por capa en

casos de herida por arma blanca, brindando suficiente precisión. No pasa lo mismo con otro tipo de objetos, donde se necesita estudios complementarios para aumentar la precisión del análisis. (8)

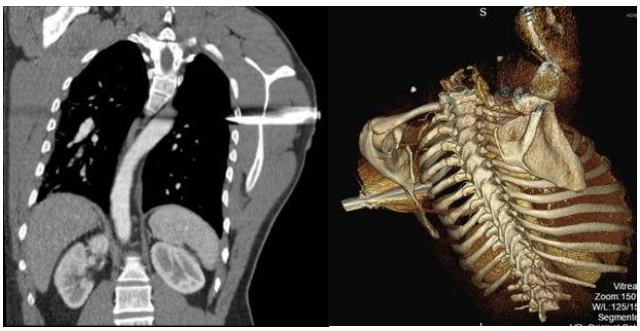

Figura 13. TC que evidencia un arma blanca en región escapular izquierda. (11)

En general, los fragmentos de metal, vidrio y grava mayores de 1 milímetro son visibles en varias proyecciones de radiografías simples. El plástico pintado y la madera tienden a ser radiopacos, al contrario de otros materiales orgánicos que son radiolúcidos por lo que no son visibles en esta técnica, por lo que la TC es la mejor opción. (12)

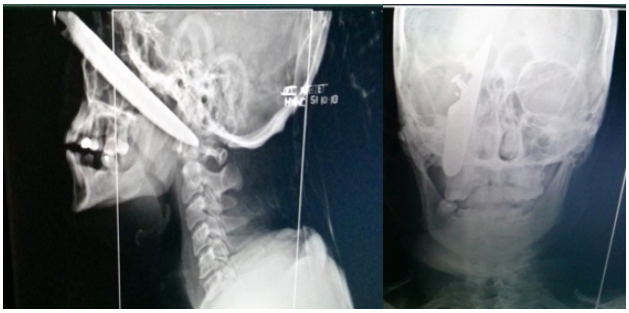

Figura 14. Radiografía de cráneo en vista lateral (izquierda) y anteroposterior (derecha). Muestra imagen radiopaca de aproximadamente 15 centímetros, próxima al globo ocular. (11)

APLICACIÓN EN CASOS DE ASFIXIA: ESTRANGULACIÓN, AHORCAMIENTO Y AHOGAMIENTO

Dentro del ámbito forense, encontramos a la asfixiología. Esta se encarga del análisis y estudio de todos los fenómenos causados por el impedimento del paso del aire en las vías respiratorias resultando en alteraciones bioquímicas de la sangre. (8)

Diferentes autores clasifican a las asfixias según su mecanismo de acción:

- Mecánicas: sofocación externa e interna.
- Traumáticas: ahogamiento, estrangulación por manos o por cuerda.
- Químicas: efectos de sustancias que evitan que el aire entre a los pulmones o que se mezcle con vapores tóxicos desprendidos. También puede ocurrir por inhalación de humo o vapores corrosivos.

- Patológicas: ocurren como consecuencia de algún padecimiento médico, por ejemplo, los cuadros de anafilaxia donde hay inflamación en glotis que obstruye la tráquea y con ello el paso del aire hacia los pulmones. (8)

Otros clasifican a la asfixia por su etiopatogenia:

- Por acción mecánica externa:
  - Cervical: ahorcamiento y estrangulación manual o a lazo.
  - Orificios respiratorios: sofocación
  - Tórax-abdomen: compresión torácica o abdominal.
  - Diafragma: crucifixión y suspensión reversa.
- Por ocupación de vías respiratorios
  - Medios sólidos: cuerpos extraños o sepultamiento.
  - Medios líquidos: sumersión
  - Medios gaseosos: gases inertes.
- Por ausencia de aire respirable
  - Confinamiento (8)

El estrangulamiento es definido por Vargas Alvarado como *"la construcción mortal ejercida en el cuello, mediante lazo, o directamente con las manos, de modo tal que es una fuerza activa de origen externo que produce oclusión de las vías respiratorias y no el peso del cuerpo"*. Para su análisis, se estudian las lesiones externas, el surco de estrangulación completo, estigmas ungueales, la equimosis que queda por la presión de los dedos y contusiones del cuerpo. Para el estudio de las lesiones internas, se consideran las hemorragias en el cuello, cianosis, oscurecimiento y fluidez sanguínea. (Vargas Alvarado, 2013) (8)

La radiología contribuye a la identificación de lesiones en la región del cuello, que orientan a la diferenciación entre la etiología homicida y un suicidio, por ejemplo. Particularmente, la radiografía del esqueleto laríngeo y el hueso hioides es útil para este fin, ya que el hallazgo de fracturas a este nivel es indicativo de estrangulación. Sin embargo, su ausencia tampoco permite descartar esta etiología, por lo que habrá que correlacionar con los hechos y la necropsia. (9)

En las asfixias provocadas por fuerzas mecánicas externas se encuentra el ahorcamiento, el cual es definido como un síndrome patológico cuyo desenlace es la muerte la cual es producida por la supresión de oxígeno y el aumento de los niveles de dióxido de carbono en la sangre resultado de la limitación o bloqueo total de la respiración. El análisis forense contempla 4 modalidades: accidental, homicida, suicida o tortura. Para su investigación debe considerarse el surco, dirección, profundidad, continuidad, sitio anatómico y aspecto del cadáver. (Bayona Santana & Villalonga Costa, 2019) (8)

En este contexto, surge la "fractura del ahorcado", que hace referencia a 2 tipos de lesiones del axis, la segunda vértebra cervical, que se diferencian por su mecanismo de producción, pero que clínicamente son muy parecidas. El primer tipo de lesión es causado por un mecanismo de hiperextensión con fracturas pediculares axiales bilateral y destrucción del complejo ligamentoso del disco intervetebral C2-C3. En el segundo se aplica el término "espondilolistesis traumática del axis" y es causado por un mecanismo combinado de flexión o extensión más una carga axial, y consiste en fractura del arco natural del axis, usualmente bilateral con diversos grados de lesión tanto del disco como de los ligamentos. (8)

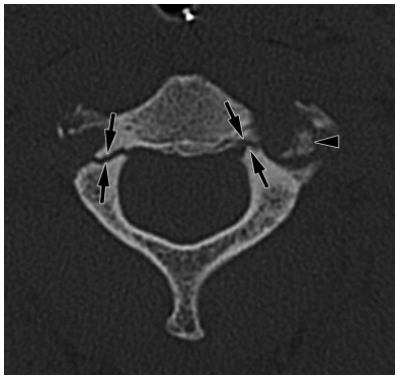

Figura 15. Tomografía donde ser visualiza la fractura del ahorcado. Fractura bilateral de los pedículos. (13)

La fractura del ahorcado es visualizada con facilidad a través de las imágenes radiológicas, por lo que a través de la radiografía y tomografía se logra caracterizar estás lesiones tanto en el cadáver, como en el sujeto que haya sido víctima de violencia. Effendi propuso una clasificación que luego fue modificada por Levine y Edwards y que está basada en el estudio radiográfico simple en la vista lateral. Esta clasificación divide las fracturas del arco neural del axis como tipos I, Ia, II, IIa y III. (8)

- Tipo I: la fractura se produce por hiperextensión y carga axial sin daño a los discos ni ligamentos. Presentan un desplazamiento anterior <3 mm sin angulación o simplemente no se desplazan.
    - Tipo Ia: En cada lado no son paralelas, la línea de la fractura puede involucrar el foramen transversal en solo 1 lado.
- Tipo II: Provocadas por hiperextensión y carga axial, seguido por flexión y compresión, permitiendo desplazamiento anterior del completo occipital-C1-C2. Hay lesión del ligamento longitudinal posterior o del disco C2-C3. Radiológicamente se caracteriza por desplazamiento anterior >3 mm con angulación del cuerpo del axis.
    - Tipo IIa: Generalmente va de anterior-inferior a posterior-superior, con poca subluxación y más angulación.
- Tipo III: Son las más asociadas a muerte y secuelas neurológicas permanentes. Causadas por un mecanismo de flexión y compresión, provocando una luxación del axis sobre C3 con desplazamiento anterior y severa angulación. (8)

Por otro lado, el ahogamiento es desencadenado por el ingreso de líquido o materia semilíquida en las vías respiratorias. En estos casos se debe distinguir si es provocada por sumersión completa o incompleta y si es accidental o provocada. Se concibe como accidental si la víctima ha perdido la conciencia o las fuerzas (síncopes, etilismo, convulsiones, etc.) y como resultado cae en un cuerpo de agua cercano. Cuando es provocada, se introduce el término "asfixia por sumersión", también llamada "*ahogamiento azul de Pajot"*. (8)

Algunos autores señalan que después de la inspiración profunda que realizarían los individuos antes de hundirse bajo el agua, habría un período de apnea voluntaria que se mantendría hasta que las bajas concentraciones de O2 y la hipercapnia (altos niveles de CO2) obliguen a una inspiración forzada, conduciendo a una inhalación masiva de líquido. Posteriormente habría disnea o polipnea, junto con movimientos respiratorios descoordinados e incluso un cuadro convulsivo, finalizando en el cese definitivo de la respiración secundario a la anoxia cerebral irreversible (3)

El ingreso de la columna líquida en las vías respiratorias inunda los alvéolos pulmonares y provoca efectos mecánicos inmediatos, específicamente y en la materia de la imagenología forense, provocará lesiones en el tejido pulmonar que podrán ser observadas a través de estos métodos; tales como dilatación alveolar, adelgazamiento y rotura de las paredes alveolares y de capilares perialveolares y enfisema hidroaéreo. (3)

Por otra parte, en el sistema gastrointestinal, con ayuda de la resonancia magnética, puede mostrar una gran cantidad de líquido con partes sólidas en estómago y duodeno. (3)

Figura 16. Corte coronal de resonancia magnética y autopsia a individuo fallecido por ahogamiento. (3)

OTRAS APLICACIONES DE LA VIRTOPSIA

1. Golpes con objetos romos

La evaluación radiológica de este tipo de golpes se inicia a menudo con rayos x. Las radiografías pueden demostrar fracturas, dislocaciones, aire libre y gas subcutáneo. La PMCT puede brindar más información a través de imágenes multiplanares que revelen lesiones de tejidos blandos y colecciones líquidas, también puede definir mejor el alcance y el patrón de lesiones esqueléticas. (14)

Figura 17. Reconstrucción en 3D de una PMCT.

Muestra una fractura-dislocación de la columna cervical, así como múltiples fracturas en cráneo y extremidades en un peatón que fue atropellado por un tren de metro. (14)

2. Abuso

Ciertas fracturas sufridas durante la niñez son típicamente relacionadas con traumatismos accidentales, como las fracturas espirales en la tibia de niños que empiezan a caminar y las fracturas de clavícula en edad escolar. Sin embargo, cuando se evalúa en el contexto clínico, los hallazgos de imágenes clásicos pueden respaldar acusaciones de abuso. De hecho, algunas lesiones son tan específicas de trauma no accidental, que los diagnósticos alternativos son altamente improbables. (14)

Las lesiones características incluyen múltiples fracturas de costillas posteriores, fracturas metafisarias de huesos largos, fracturas por compresión del cuerpo vertebral, intestino delgado, hematomas y muchas patologías intracraneales como las lesiones cerebrales del tipo cizallamiento. Además, las fracturas múltiples en varias etapas de curación son altamente sospechosas. (14)

Al igual que en la práctica clínica, el examen esquelético, es la primera línea de evaluación en los casos de muertes en infantes; Caffey describió por primera vez niños con hematomas subdurales y fracturas inusuales de huesos largos, en su artículo histórico de 1946. Hoy, la radiografía es el estudio esquelético de elección en casos sospechosos de maltrato infantil. (14)

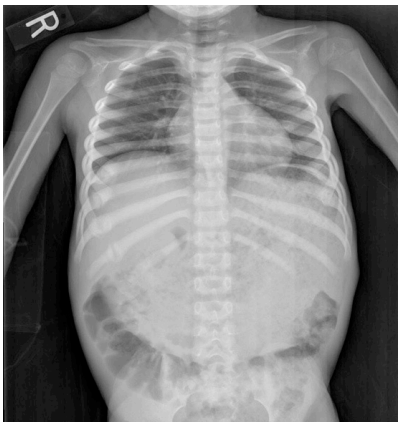

Figura 18. Radiografía de tórax de trauma no accidental

Muestra múltiples fracturas bilaterales de costillas en varias etapas de curación. (14)

La Asociación Americana de Pediatría publicó por primera vez sus recomendaciones respecto al uso de protocolos de diagnóstico por imágenes de traumas no accidentales, en el año 1991. (14)

La PMCT puede ser un complemento útil de los rayos x, al detallar las fracturas y lesiones de los tejidos blandos. Se ha encontrado que la PMCT puede proporcionar información adicional que puede no ser detectada en la autopsia, respecto a la extensión, el patrón y la cronicidad del trauma en recién nacidos, bebes y niños en casos de muerte inesperada. Tanto la PMCT como la resonancia magnética, pueden utilizarse para detectar patologías intracraneales. El alto contraste de los tejidos blandos en la resonancia magnética también brinda la posibilidad de descubrir hematomas subcutáneos, que son los hallazgos más comunes del abuso infantil. (14)

Los moretones pueden no ser evidentes en la inspección externa y, a menudo, requiere de una amplia disección para diferenciarla de otras causas de pigmentación de la piel, como las manchas mongólicas congénitas. (14)

De manera análoga al abuso infantil, los adultos son frecuentemente maltratados por personas conocidas como miembros de la familia o parejas. Los patrones de lesiones por abuso en adultos no son tan características como en los niños. Los huesos maduros carecen de fisis por lo que no se observa la clásica fractura metafisaria que se observa en los niños; Sin embargo, ha sido demostrado que las lesiones en la cabeza, el cuello y la mandíbula son comunes de la violencia doméstica. Estas son seguidas de las lesiones de las extremidades superiores, que a menudo son lesiones defensivas. Similar a lo ocurrido en niños, las lesiones múltiples en varias etapas de curación y patrones específicos de lesión aumentan la probabilidad de abuso. (14)

3. Lesión térmica

La PMCT se puede utilizar fácilmente en restos severamente carbonizados para descubrir hallazgos ocultos como proyectiles o cuerpos extraños. Las imágenes post mortem no contribuyen al diagnóstico de inhalación de humo; sin embargo, puede revelar patología adicional como fracturas, lesiones de órganos vitales y aspiración, así como documentar la extensión de la lesión por quemadura. Se debe diferenciar entre fracturas térmicas que tienden a ser suaves y lineales y que ocurren en el hueso expuesto, de las fracturas traumáticas que son más irregulares y se encuentran tanto en huesos expuestos como no expuestos. Otros factores de confusión incluyen fracturas por escombros que caen o aquellas producidas durante la extinción o del fuego. Sin embargo, en la evaluación externa y en la propia necropsia, son igualmente difíciles de diferenciar las fracturas relacionadas con incendios, de otros tipos de fracturas. (14)

Se ha informado lucencia moteada en médula ósea sometida a lesión térmica en la PMCT bidimensional. El cráneo comúnmente se fractura durante el comienzo de una lesión térmica extensa, con la tabla exterior, y puede estar asociado con un hematoma epidural térmico y encogimiento térmico del cerebro. El hematoma epidural térmico, se distinguen de las traumáticas por que cruzan la línea media y no respeta las inserciones durales en las líneas de sutura del cráneo. La lesión térmica en las vísceras restantes es igualmente evidente por el encogimiento y los cambios de atenuación reconocibles en la PMCT, que pueden simular patología y lesión. (14)

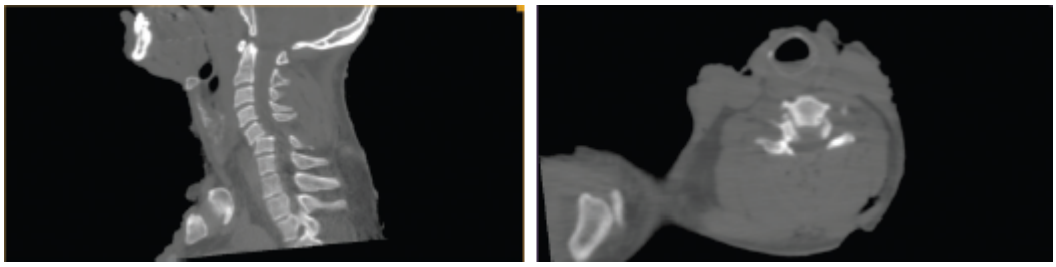

Figura 19. PMCT de la columna cervical.
(izquierda) muestra una dislocación de C5-C6 en un hombre que no logró salir de un vehículo en llamas. (derecha) muestra perdida de tejido en la región anterior del cuello al nivel de la dislocación por lesión térmica (14)

CONCLUSIÓN

Las tecnologías avanzadas de imágenes radiológicas están totalmente integradas en la práctica de la medicina clínica. La integración de esta tecnología en la práctica de la medicina forense se ha producido más lentamente, principalmente debido a cuestiones de disponibilidad y costo.

Muchos estudios han indicado como estas tecnologías complementan la necropsia tradicional, facilitando el estudio del cadáver y del sujeto vivo con técnicas no invasivas o mínimamente invasivas. Logran la identificación de objetos extraños, caracterizan las lesiones y evidencian hallazgos no visibles al examen externo.

Sus aplicaciones son múltiples como se ha establecido en el contenido de esta revisión, lo que permite al equipo forense multidisciplinario la correlación de hallazgos y al diagnóstico fidedigno con carácter netamente científico. Además, permite documentar dichos descubrimientos, proporcionando armas para la sustentación de casos en el juicio oral de cualquier caso que así lo requiera.

BIBLIOGRAFIA

1. Escobar KY. Las ciencias forenses y la innovación tecnológica. Gac. Int. Cienc. Forense. 2019; 3: 1-16. Disponible en: https://www.uv.es/gicf/4A1_Escobar_GICF_34.pdf

2. García AN, Betín A, Gil AM. Virtopsia. Su pertinencia como herramienta de apoyo judicial en Colombia. Rev. de la facultad de derecho y ciencias forenses. 2019; (3). 45-58. Disponible en: https://ojs.tdea.edu.co/index.php/mforenses/article/view/675

3. Najar AP, Fuentes EJ. Uso de la resonancia magnética y la tomografía computarizada en diagnóstico postmortem. MedUNAB, 2017; 20(2): 190-200. Disponible en: https://www.redalyc.org/journal/719/71964821010/html/

4. Del Valle D, Morales A, Garcia J. El uso de la tomografía computarizada al servicio de la medicina forense en la investigación de las lesiones. Boletin Galego de Medicina Legal e Forense 2020; (26) Disponible en: http://www.agmf.es/az/boletin26USOTOMOGRAFIA.pdf

5. Intriago D, Astudillo A, Cordero C. Repositorio Institucional de la Universidad de Cuenca. 2012. Disponible en: http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/3812/1/TECI03.pdf

6. Lafuente J, Hernández L. Técnica de la imagen por resonancia magnética. Hospital General Universitario Gregorio Marañón. 2016; 5 (1). 9-26. Disponible en: https://www.serme.es/wp-content/uploads/2016/05/capitulo1p.pdf

7. Najar AP. Virtopsia: Radiología en medicina forense. Salud Andinea.2012; 1(1). 60-76. Disponible en: https://revia.areandina.edu.co/index.php/Nn/article/view/311/340

8. Gallo RA. Relevancia de la virtopsia como método de inspección corporal no invasivo en las ciencias forenses. Fundación H.H. Barceló, Facultad de Medicina, Especialización en medicina legal. 2023. Disponible en: http://repositorio.barcelo.edu.ar/greenstone/collect/snrd/index/assoc/HASH0165/62b6b06b.dir/BRC_Tesis_GalloRoberto.pdf

9. Montes GA, Otálora AF, Archila GA. Aplicaciones de la radiología convencional en el campo de la medicina forense. Rev. Colomb Radiol. 2013; 24(4). 3805-3817. Disponible en: https://www.webcir.org/revistavirtual/articulos/marzo14/colombia/col_esp_a.pdf

10. Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses. 2012; 1(1). Disponible en: http://evirtual.uaslp.mx/FMed/912/Documentos%20compartidos/UNIDAD%203/descripcion_e_identificacion_de_lesiones.pdf

11. Garrido B, Illán A, Sánchez J, Ots JR, García I. Herida penetrante por arma blanca. Rev Chilena de cirugía. 2017; 69(6): 436-437. Disponible en: https://www.elsevier.es/es-revista-revista-chilena-cirugia-266-articulo-herida-penetrante-por-arma-blanca-S037938931730039X

12. Albarrán ME, Sánchez JA. Lesiones por arma blanca: lesiones, diagnóstico y problemas médico-legales. 2019; 4(27) Disponible en: https://www.ucm.es/data/cont/docs/1653-2019-04-27-107-2017-12-06-Tema%202.%20Lesiones%20originadas%20por%20armas%20blancas.pdf

13. Zezo. Hangsman´s Fracture. RadiologyKey: Fastest Radiology Insight Engine. 2019. Disponible en: https://radiologykey.com/hangmans-fracture/

14. Elifritz JM, Nolte KB, Hatch GM, Adolphi NL, Gerrard C. Forensic radiology. Elsevier. 2014: 3448-3458. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/280570697_Forensic_Radiology