

Microtomografía computarizada en endodoncia: Una revisión de literatura

Brenda Henríquez-Castillo,^{1*} Maribel Soria-Pérez,¹ Margarita Vega-Yslachin¹

¹ Facultad de Estomatología, Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH), Lima, Perú

RESUMEN

En años recientes, los investigadores en el campo biomédico y dental han empezado a emplear la microtomografía computarizada (micro-TC) para propósitos de investigación. Gracias a diversos avances tecnológicos en fuentes de rayos X y técnicas de imagenología el uso de micro-TC en estudios experimentales ha progresado notablemente. La micro-TC permiten a los científicos examinar microestructuras, variaciones en la densidad y transformaciones morfológicas. El presente artículo de revisión aborda los recientes desarrollos de la micro-TC en el análisis de la morfología del conducto radicular, representa uno de los mayores progresos en la investigación endodóntica, ya que se basa en imágenes de rayos X obtenidas en múltiples cortes que se combinan digitalmente para formar una imagen tridimensional (3D).

Palabras clave: endodoncia, microtomografía por rayos x, tratamiento del conducto radicular.

ABSTRACT

In recent years, researchers in the biomedical and dental fields have begun to employ micro-computed tomography (micro-TC) for research purposes. Thanks to various technological advances in X-ray sources and imaging techniques the use of micro-TC in experimental studies has progressed remarkably. Micro-TC allows scientists to examine microstructures, density variations, and morphological transformations. This literature review article addresses recent developments in micro-TC in the analysis of root canal morphology, representing one of the major advances in endodontic research, as it is based on X-ray images obtained in multiple slices that are digitally combined to form a three-dimensional (3D) image.

Keywords: endodontics, root canal therapy, x-ray microtomography.

INTRODUCCIÓN

La microtomografía computarizada (micro-TC) ha emergido como una alternativa superior a la tomografía computarizada convencional, ofreciendo una mejora significativa en la resolución y permitiendo

una caracterización tridimensional submilimétrica de muestras biológicas. Esta técnica ha encontrado aplicación en diversos campos biomédicos, destacándose especialmente en odontología, donde su incorporación ha sido muy aceptada (1).

La micro-TC es una técnica de investigación que permite generar modelos tridimensionales precisos, por su alta resolución, y obtener datos cuantitativos detallados (2). En endodoncia, se utiliza para evaluar la morfología del sistema de conductos radiculares en tres dimensiones sin necesidad de alterar o destruir los dientes. Al ser un método de imagen no destructivo, permite realizar múltiples escaneos del mismo espécimen y recopilar información valiosa sobre los cambios inducidos por diferentes procedimientos, lo que la convierte en una herramienta particularmente útil en la investigación endodóntica experimental.

Es fundamental en la terapia de conductos la eliminación de los agentes etiológicos responsables del proceso patológico, los cuales pueden ser de origen bacteriano, químico, mecánico o físico. Durante el diagnóstico, resulta crucial identificar las condiciones clínicas que han podido desencadenar la respuesta del tejido, tales como caries dental, dolor, inflamación, infecciones primarias o secundarias, lesiones apicales sintomáticas o asintomáticas, abscesos periapicales con o sin tracto sinusal, cavidades abiertas o cerradas y antecedentes de traumatismo dental (3). Comprender estos factores clínicos relacionados con el dolor pulpar y periapical ofrece información valiosa para planificar estrategias de tratamiento y anticipar los resultados de la terapia endodóntica.

***Correspondencia:** Brenda Henríquez-Castillo
E-mail: brenda.henriquez@upch.pe
Teléfono: +(51)16318700

ORCID

Brenda Henríquez-Castillo: <https://orcid.org/0000-0001-9702-2932>

Maribel Soria-Pérez: <https://orcid.org/0009-0007-8743-8943>

Margarita Vega-Yslachin: <https://orcid.org/0009-0000-5968-1478>

La micro-TC ofrece una visualización altamente precisa de la morfología del conducto radicular mediante imágenes tanto del conducto aislado como superpuesto a la estructura dentaria. Su capacidad para inclinar, rotar y ampliar regiones específicas de interés proporciona al operador una representación excepcionalmente precisa de la anatomía interna. Gracias a su versatilidad, la micro-TC se ha consolidado como un recurso de gran valor tanto para la docencia como para diversas aplicaciones en investigación y práctica clínica (4).

Diversos estudios han demostrado su utilidad en el análisis tridimensional del sistema de conductos. Park et al. (5) emplearon micro-TC combinada con software especializado para caracterizar con gran detalle las variaciones morfológicas y las curvaturas de las raíces mesiobucales de primeros molares maxilares, evidenciando la complejidad anatómica de estos dientes. De manera complementaria, Wiseman et al. (6) utilizaron micro-TC para comparar la eficacia de la irrigación mediante irrigación ultrasónica pasiva (PUI) y Endo-Activator en la eliminación de hidróxido de calcio en molares, demostrando que ambos sistemas permiten una adecuada penetración de la solución irrigante en la longitud de trabajo y conductos accesorios. No obstante, los autores destacaron la necesidad de investigar cómo estas mejoras en la limpieza podrían influir en el desenlace clínico del tratamiento.

Asimismo, investigaciones orientadas a la clasificación anatómica han revelado importantes limitaciones de los sistemas tradicionales. Chen et al. (7), al estudiar incisivos mandibulares, identificaron entre un 6 % y un 18 % de configuraciones canaliculares que no podían clasificarse según los criterios de Vertucci. Hallazgos similares fueron reportados por Segvi et al. (8), quienes observaron un 8.34 % de dientes con anatomías inclasificables. En conjunto, estas evidencias destacan el papel indispensable de la micro-TC para describir la complejidad morfológica del sistema de conductos y para identificar variaciones que podrían pasar desapercibidas con métodos de evaluación convencionales.

Aunque su uso ha sido ampliamente difundido en endodoncia, la micro-TC también constituye una herramienta valiosa para otras especialidades odontológicas al permitir una visualización interna detallada de las estructuras dentarias (9, 10). La presente revisión de literatura describe las adaptaciones necesarias en la infraestructura de micro-TC para adquirir imágenes de muestras dentales y obtener representaciones tridimensionales de alta precisión.

DEFINICIÓN

La micro-TC es una técnica de imagen basada en rayos X que permite escanear, examinar y modelar muestras en tres dimensiones mediante la reconstrucción virtual de secciones adquiridas durante la rotación del objeto en 360°. En estos sistemas, los vóxeles (píxeles volumétricos) generados por fuentes micro-focales de rayos X ofrecen una resolución espacial muy superior a la de la tomografía computarizada convencional, con tamaños que suelen oscilar entre 5 y 50 μm . A partir de proyecciones obtenidas desde distintos ángulos, los detectores de alta resolución permiten generar reconstrucciones tridimensionales que representan la distribución espacial de los coeficientes de atenuación lineal, los cuales dependen tanto de la energía de la fuente de rayos X como de la composición atómica del material examinado (11).

La muestra puede analizarse tridimensionalmente mediante micro-TC y técnicas de modelado matemático. Para reconstruir objetos 3D completos, se recopila una serie de secciones transversales obtenidas en un único ciclo de adquisición, seguidas de la reconstrucción fuera de línea del volumen final, comúnmente con matrices de 1024 \times 1024 vóxeles. Generalmente se emplean algoritmos de reconstrucción de haz cónico. Las imágenes pueden visualizarse en los planos coronal (X), sagital (Y) y axial (Z), aplicando intervalos de corte propios de la resolución del sistema. Una vez reconstruido el volumen, es posible examinar las secciones axiales y generar una representación tridimensional detallada del objeto, lo cual permite manipular digitalmente el modelo, incluidas funciones como "cortar" o "rotar" para una evaluación precisa (12).

HISTORIA

Los rayos X fueron descubiertos en 1895 por Wilhelm Roentgen, suceso que revolucionó la medicina diagnóstica al permitir la visualización interna del cuerpo de manera no invasiva. A finales de la década de 1970, Allan Cormack y Godfrey Hounsfield desarrollaron la tomografía computarizada (TC), por lo cual ambos recibieron el Premio Nobel debido al impacto de su contribución en las ciencias médicas.

Poco después, Elliott y Dover diseñaron un escáner de tomografía computarizada de alta resolución y construyeron el primer prototipo de microtomografía computarizada (micro-TC), capaz de obtener imágenes extremadamente detalladas, como las del caparazón de un caracol con una resolución de 12 μm (13).

Desde sus inicios, las imágenes radiográficas han sido una herramienta esencial en el campo médico. En la década de 1980, se introdujo el concepto de

tomografía computarizada de haz cónico (TCHC), que permitió la reconstrucción tridimensional de objetos a partir de múltiples proyecciones bidimensionales, basándose en principios matemáticos como la transformada de Radón (14).

A inicios de esa misma década, sin embargo, los sistemas de micro-TC no estaban ampliamente disponibles debido a limitaciones tecnológicas y de costos. Actualmente, los avances en hardware, detectores y algoritmos de reconstrucción han permitido que la micro-TC se utilice para analizar una amplia variedad de muestras, incluidos tejidos mineralizados como dientes y huesos. En esta técnica, la resolución se expresa en función del tamaño del vóxel, el cual se mide en micrómetros, indicando la capacidad del sistema para modelar estructuras diminutas. La micro-TC constituye así una técnica tridimensional no invasiva y no destructiva de gran valor para la caracterización de materiales biológicos y no biológicos (14).

FUNCIONAMIENTO

Los principios de la microtomografía computarizada se basan en la interacción de la radiación con la materia, descrita por la ley de Beer-Lambert. Según esta relación, la intensidad de la radiación transmitida a través de un objeto disminuye en función de su coeficiente de atenuación, información que es registrada por el detector y posteriormente convertida en imágenes bidimensionales (15). Estas imágenes, obtenidas desde múltiples ángulos, permiten representar virtualmente secciones internas del objeto sin necesidad de intervenir físicamente.

En el proceso de reconstrucción tomográfica, el objetivo es obtener una distribución bidimensional de la función $\mu(x, y)$, que describe el coeficiente de atenuación del material en cada punto de la sección. Para ello, se resuelve un problema matemático inverso utilizando algoritmos especializados implementados en diversos paquetes de software. La reconstrucción final genera un volumen tridimensional compuesto por vóxeles, lo que posibilita el análisis detallado de parámetros como la distribución de densidades, la detección de defectos estructurales y la evaluación de heterogeneidades internas (15).

MICROTOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA Y ENDODONCIA

La micro-TC constituye una herramienta fundamental en la investigación endodóntica, ya que permite obtener imágenes tridimensionales precisas de la anatomía radicular. (Figuras 1, 2, 3 y 4). Su capacidad para generar reconstrucciones 3D con elevada resolución espacial la convierte en un recurso esencial para la formación

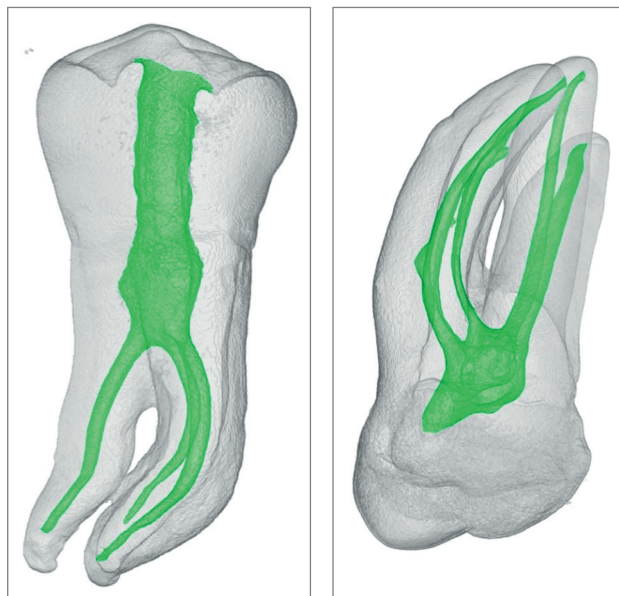


Figura 1. Primer premolar inferior con tres conductos radiculares (2 mesiales y 1 distal). Reconstrucción 3D por microtomografía computarizada. Cortesía: Angelo Torres (Facultad de Odontología de Ribeirão Preto - Universidad de São Paulo).

Figura 2. Primer molar superior con 4 conductos (Mv1, Mv2, MD y P). Reconstrucción 3D por microtomografía computarizada. Cortesía: Angelo Torres (Facultad de Odontología de Ribeirão Preto - Universidad de São Paulo).

preclínica y la evaluación de procedimientos como la preparación y obturación del sistema de conductos (1,4-7,8,9,11,12).

Rojo-Carpintero et al., (16) evaluaron la adaptación marginal y el sellado de diferentes materiales a base de silicato de calcio mediante micro-TC, lo que permitió cuantificar tridimensionalmente el volumen de vacíos, la porosidad interna y la presencia de discontinuidades en la interfaz dentina-material. A través de reconstrucciones volumétricas y segmentación digital, los autores identificaron con precisión los espacios presentes entre el material obturador y las paredes del conducto, así como la distribución y el tamaño de los poros internos, parámetros que las técnicas bidimensionales convencionales no permiten evaluar de manera fiable.

Los resultados mostraron que ProRoot MTA presentó el menor volumen de vacíos y ausencia de porosidad detectable. NeoPutty evidenció también baja porosidad y mínima discontinuidad marginal. En contraste, Biodentine exhibió mayores valores de porosidad y de vacíos marginales, lo que sugiere un sellado menos uniforme. Los autores enfatizan que la micro-TC constituye una herramienta objetiva,

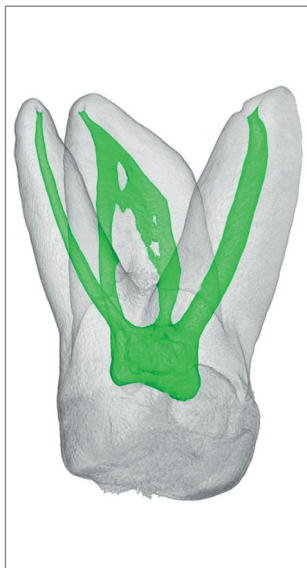


Figura 3. Molar superior con 3 raíces (2 vestibulares) y 1 Palatina con 2 conductos. Reconstrucción 3D por microtomografía computarizada. Cortesía: Angelo Torres (Facultad de Odontología de Ribeirão Preto – Universidad de São Paulo).

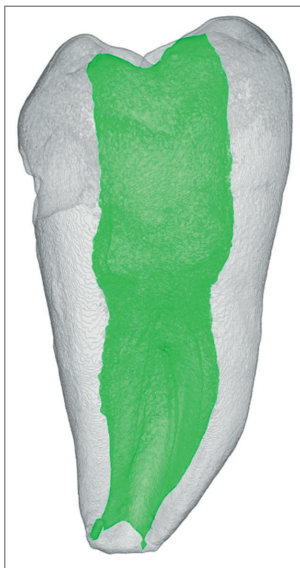


Figura 4. Molar inferior con conducto único. Reconstrucción 3D por microtomografía computarizada. Cortesía: Angelo Torres (Facultad de Odontología de Ribeirão Preto – Universidad de São Paulo).

reproducibles y no destructivos para el análisis tridimensional del comportamiento de los materiales, permitiendo comparaciones rigurosas de su capacidad de sellado (16).

Actualmente, la micro-TC es uno de los métodos más eficaces para el estudio de la microfiltración *in vitro*, debido a su naturaleza no invasiva y a su capacidad para detectar variaciones volumétricas y espaciales del material obturador. Este método permite cuantificar el sellado en zonas complejas como el istmo y la ramificación, mediante análisis de intensidad, segmentación y reconstrucción tridimensional. Asimismo, posibilita calcular el volumen de espacios internos y analizar la conformación del sistema de conductos antes y después de procedimientos de retratamiento, para lo cual el material obturador puede ser removido mediante técnicas mecánicas o químicas estandarizadas (17).

APLICACIONES EN OTRAS ESPECIALIDADES

La micro-TC presenta aplicaciones amplias que abarcan disciplinas como geología, biología, veterinaria, medicina, ingeniería, industria alimentaria y ciencias farmacéuticas, además de múltiples áreas de investigación científica (18).

En odontología, la micro-TC se ha consolidado como una herramienta de referencia para el estudio tridimensional de la microarquitectura, densidad y composición de los tejidos mineralizados. Su uso permite evaluar con precisión procesos de desmineralización y remineralización, cuantificar la cantidad de hidroxapatita en los tejidos duros, analizar el grosor y volumen de estructuras calcificadas, y estudiar la interacción hueso-implante, así como la densidad mineral ósea (19).

En implantología, la correcta evaluación de la estabilidad primaria y la osteointegración es fundamental. La micro-TC proporciona imágenes de alta resolución que facilitan la caracterización detallada de la interfaz hueso-implante, permitiendo visualizar el contacto con hueso cortical y trabecular y cuantificar parámetros como el *bone-to-implant contact* (BIC). Estas capacidades mejoran la interpretación de la formación ósea en la superficie del implante y contribuyen a determinar el éxito del proceso de osteointegración (18).

VENTAJAS

Una de las principales ventajas de la micro-TC es su carácter no destructivo, que permite examinar una misma muestra de forma repetida sin alterar su estructura interna. Ofrece una elevada resolución espacial en el rango micrométrico (5–20 μm), capaz de detectar variaciones mínimas en la densidad y el coeficiente de atenuación ($\approx 1\%$), superando la resolución alcanzada por la TCHC (75–200 μm). A diferencia del análisis histológico, no requiere procedimientos complejos de preparación de muestras y preserva la arquitectura interna para evaluaciones tridimensionales posteriores. Además, los datos obtenidos pueden archivarlos para comparaciones longitudinales o análisis morfológicos futuros (14,18,20).

ANÁLISIS DE IMÁGENES POR MICROTOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA

El análisis de imágenes obtenidas mediante micro-TC permite identificar con alta precisión características estructurales como porosidades, volúmenes, distancias, morfología, morfometría y distribución de materiales con distintas densidades. Asimismo, ofrece la posibilidad de generar reconstrucciones tridimensionales y videos de secciones seriadas de los datos adquiridos. (21,22)

La micro-TC facilita la distinción entre la morfología externa e interna del diente gracias a la capacidad de representar los tejidos duros con apariencia translúcida y la cámara pulpar y el sistema de conductos radiculares como estructuras opacas. Esta propiedad permite

medir áreas generales de la cámara pulpar, la relación de volúmenes entre el cuerno pulpar y el piso pulpar, así como los diámetros de los orificios radiculares en sentido bucal y lingual. Diversos estudios reportan que los métodos de triangulación pueden emplearse para analizar la morfología superficial y el volumen de cada conducto, mientras que técnicas independientes del modelo resultan útiles para evaluar diámetros y configuraciones canaliculares (23,24).

El conducto en "C" constituye una de las variaciones anatómicas más complejas del sistema de conductos radiculares (Figura 4). Este tipo de configuración presenta dificultades significativas durante la instrumentación y obturación, y se presenta con mayor frecuencia en segundos molares mandibulares. Su morfología no permanece constante a lo largo de la raíz, incluso bajo magnificación con microscopio operatario dental. La micro-TC proporciona cortes transversales de alta resolución en todo el trayecto radicular, mostrando variaciones considerables en la forma del conducto a distintos niveles. La reconstrucción tridimensional mediante representación de superficies posibilita la visualización desde múltiples ángulos. Se ha descrito que estos conductos suelen localizarse cerca de la superficie del surco radicular profundo asociado a raíces fusionadas, lo que ha permitido medir la profundidad del surco, el grosor radicular y establecer relaciones entre ambas variables. Además, facilita determinar la ubicación y morfología de los orificios canaliculares, la forma de la sección transversal, los niveles de fusión y de bifurcación a lo largo de toda la raíz (23).

Los conductos curvos representan otro desafío clínico debido al aumento del riesgo de perforación y transporte. Mediante la creación de un eje central virtual para cada conducto, es posible calcular la curvatura utilizando software especializado de modelado matemático. Este procedimiento implica cuantificar la velocidad de rotación del vector tangente en un punto específico del eje central e invertir este valor para obtener la curvatura. Investigaciones recientes han empleado micro-TC para evaluar la curvatura tridimensional interceptando los ejes mayor y menor del conducto en cada corte axial, utilizando programas dedicados de cada equipo (25).

La identificación de conductos adicionales, como los conductos radiculares medios mesiales, es clínicamente compleja debido a la posición de sus orificios. Si no se localizan, estos canales pueden albergar microorganismos y comprometer el éxito del tratamiento, originando periodontitis apical persistente. La micro-TC ofrece una visualización detallada de estos conductos accesorios, que suelen

ser más pequeños que los principales, superando las limitaciones de las técnicas de seccionamiento tradicional (25).

Los equipos de micro-TC, al adquirir proyecciones con rotación completa de 360°, permiten generar modelos tridimensionales de alta fidelidad del sistema de conductos radiculares. Esta capacidad ha posibilitado detectar variaciones anatómicas que previamente pasaban inadvertidas con métodos bidimensionales o con tomografía de menor resolución. En particular, se ha reportado que el 7.7% de los molares mandibulares presentan tres conductos en algún punto de la raíz mesial (25), una prevalencia sustancialmente mayor al 2.3% informado en estudios previos (26,27). Esta discrepancia se atribuye principalmente a la ausencia de micro-TC en las metodologías empleadas en dichas investigaciones, lo que limitaba la detección de conductos accesorios pequeños o de trayectorias complejas. Estos hallazgos, combinados con la visualización tridimensional completa proporcionada por la micro-TC, mejoran significativamente la identificación, localización y preparación de conductos adicionales durante los tratamientos endodónticos no quirúrgicos, contribuyendo a optimizar la calidad de la instrumentación y, por tanto, los resultados clínicos.

El delta apical constituye un complejo sistema de ramificaciones que permite el paso de vasos y nervios hacia el tejido pulpar. Esta región se caracteriza por la división del conducto radicular en tres o más ramas, siendo más frecuente en incisivos laterales mandibulares, segundos premolares mandibulares y segundos premolares maxilares. Tanto la radiografía periapical como la TCHC carecen de la resolución necesaria para identificar adecuadamente esta área. La micro-TC, gracias a su alta resolución, permite medir el diámetro de las ramificaciones del delta apical, el cual varía entre individuos; se ha reportado un diámetro medio de 132.3 µm, y solo el 24% supera los 180 µm. Además, posibilita evaluar la prevalencia, cantidad, morfología y extensión vertical de estas ramificaciones (28).

El istmo, definido como un pasaje en forma de cinta que conecta dos conductos y que puede contener tejido pulpar, restos necróticos o materia orgánica, constituye un sitio susceptible al crecimiento microbiano y a fracasos endodónticos posteriores. Su detección es especialmente difícil mediante radiografías bidimensionales debido a su orientación bucolingual. La eficacia de la TCHC para identificar istmos ha sido considerada limitada, sobre todo en raíces con variaciones anatómicas complejas. En contraste, estudios con micro-TC han permitido analizar estas estructuras y reportan una mayor prevalencia de istmos en la raíz mesial de primeros molares mandibulares, particularmente en la porción apical (29).

ANÁLISIS DE LA CONFORMACIÓN DEL CONDUCTO RADICULAR

La calidad de la preparación del conducto radicular constituye uno de los factores más determinantes para el éxito del tratamiento endodóntico. Una conformación inicial adecuada es esencial para optimizar los procedimientos posteriores, incluyendo el desbridamiento mecánico y la desinfección química. La micro-TC se ha consolidado como una herramienta precisa y no destructiva para analizar, con alta resolución, los cambios inducidos por la instrumentación.

Mediante este método es posible cuantificar alteraciones en la superficie del conducto expuesta al sistema de limas, evaluar el grado de transporte apical y coronal, determinar variaciones en el volumen y en el diámetro del conducto, así como medir la cantidad de dentina removida. Asimismo, la micro-TC permite comparar de manera confiable los cambios producidos antes y después de la preparación, incluso entre instrumentos del mismo sistema, pero con diferentes calibres o conicidades (30).

PROCEDIMIENTO DE IRRIGACIÓN Y LA ACUMULACIÓN DE RESTOS DENTINARIOS

Durante la instrumentación del sistema de conductos radiculares, se ha demostrado que los restos de tejido duro tienden a depositarse en las ramificaciones y zonas de difícil acceso anatómico. El uso de micro-TC ha permitido identificar de manera tridimensional estas áreas de acumulación mediante la evaluación de los vóxeles que representan tejidos blandos con apariencia similar al aire o a fluidos. En estas regiones es posible visualizar la presencia de debris dentinario retenido. Sin embargo, una limitación inherente a esta técnica es la imposibilidad de diferenciar con precisión entre tejido necrótico, remanentes pulpares y otros tipos de tejido blando presentes en el interior del conducto. De igual forma, los restos dentinarios presentan una densidad radiográfica comparable a la dentina circundante, lo que dificulta su discriminación exacta (31,32).

La micro-TC se ha consolidado como un método de referencia para evaluar la eficacia de los protocolos de irrigación y la eliminación de debris dentro del sistema de conductos radiculares. Su alta resolución espacial permite cuantificar con precisión el volumen de residuos remanentes y visualizar tridimensionalmente áreas anatómicas complejas, como istmos y ramificaciones laterales, que suelen presentar limitaciones al ser abordadas únicamente con instrumentación mecánica. Versiani et al. (2) demostraron diferencias significativas en la

capacidad de limpieza de los sistemas de irrigación con presión positiva y negativa, evidenciando que incluso con protocolos avanzados persisten zonas con remoción incompleta de tejido duro y debris, particularmente en regiones de difícil acceso.

De manera complementaria, Liu et al. (31) emplearon micro-TC para cuantificar tridimensionalmente el volumen de detritos acumulados antes y después de la activación del irrigante mediante técnicas como sweeps, PIPS y ultrasonido. Los autores demostraron que las modalidades basadas en láser, particularmente sweeps, ofrecieron una eliminación significativamente superior de residuos en áreas anatómicamente complejas como istmos y canales laterales, en comparación con la activación ultrasónica convencional. Estos hallazgos evidencian el valor de la micro-TC como estándar de referencia para analizar con precisión la eficiencia de las estrategias de irrigación, al proporcionar mediciones volumétricas reproducibles y una visualización detallada del sistema de conductos radiculares.

Aunque estos métodos no permiten evaluar los efectos químicos de las soluciones irrigantes sobre las paredes del conducto, algunos estudios han empleado agentes de contraste para identificar con mayor precisión las zonas alcanzadas por la irrigación (2). La micro-TC se ha convertido en una herramienta fundamental para la evaluación objetiva de la eficacia de los protocolos de irrigación en endodoncia.

En uno de los trabajos más representativos, Paqué et al. (32) utilizaron micro-TC para cuantificar la acumulación de tejido duro tras la preparación de conductos radiculares. Los autores reportaron que aproximadamente el 29.2 ± 14.5 % del volumen original del conducto contenía restos dentinarios en los segmentos analizados. Las reconstrucciones tridimensionales mostraron depósitos de residuos distribuidos en diversas áreas del sistema de conductos, lo que evidencia que ninguna técnica de instrumentación elimina por completo el debris.

EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL PROCEDIMIENTO DE OBTURACIÓN DEL CONDUCTO RADICULAR

El tratamiento endodóntico se considera exitoso cuando se logra una obturación tridimensional con adaptación uniforme a las paredes dentinarias y un sellado completo que impida la filtración de fluidos y microorganismos. La micro-TC es actualmente la técnica más eficaz para el análisis tridimensional de la calidad de la obturación (33).

Huang et al. (33) utilizaron micro-TC y nano-TC (nanotomografía computarizada) para cuantificar

vacíos remanentes asociados a distintos materiales obturadores. En todos los casos, el menor número de vacíos se observó en el tercio apical, y la nano-TC mostró una sensibilidad superior para su detección.

Jung et al. (34) compararon cortes histológicos con micro-TC, hallando una alta concordancia en la identificación de vacíos. La micro-TC permite además evaluar la penetración del material obturador en istmos y ramificaciones, representando los vacíos mediante diferentes intensidades y/o colores o haciendo transparente el material para facilitar su análisis tridimensional.

ANÁLISIS DEL MATERIAL OBTURADOR RESIDUAL EN EL CONDUCTO RADICULAR POSTERIOR A RETRATAMIENTOS ENDODÓNTICOS

El retratamiento ortógrado del sistema de conductos radiculares constituye la alternativa terapéutica de elección cuando un tratamiento endodóntico previo ha fallado. Kielbassa et al. (35) destacan que el objetivo principal del retratamiento es restablecer condiciones óptimas para la reparación perirradicular mediante la eliminación completa del material obturador existente. La persistencia de restos de obturación, sumada a deficiencias en el sellado radicular y a necesidades clínicas no resueltas, puede comprometer la salud periapical. Por ello, la calidad del nuevo sellado y de la restauración postendodóntica es determinante para alcanzar resultados clínicos favorables.

Aksel et al. (36) emplearon micro-TC para comparar la eficacia de distintas técnicas de remoción del material obturador durante el retratamiento endodóntico. En su investigación, analizaron el efecto complementario del XP-Endo Finisher tras el uso de ProTaper Universal Retreatment y la lima F3 ProTaper. El análisis tridimensional permitió cuantificar con precisión el volumen de dentina eliminado, los cambios inducidos en la arquitectura del conducto y la eficiencia de cada instrumento en la remoción del material obturador. Los autores reportaron que ProTaper Universal logró una reducción significativa del volumen de obturación; sin embargo, persistieron restos de material en todos los casos. La incorporación del XP-Endo Finisher mejoró la eliminación del material residual independientemente del sellador utilizado, aunque no fue capaz de erradicarlo completamente.

Por su parte, Kiraz et al. (37) evaluaron la eficacia del retratamiento endodóntico utilizando micro-TC, una técnica que permite determinar tridimensionalmente la cantidad de material de obturación remanente en cada fase del

procedimiento. Su investigación comparó sistemas rotatorios y reciprocantes durante la fase inicial de remoción, además de examinar el impacto de instrumentos suplementarios como XP-Endo Finisher, Self-Adjusting File y láser Er,Cr:YSGG. Los análisis realizados antes y después del retratamiento mostraron que, aunque los sistemas principales de instrumentación eliminaron una parte sustancial del material, ninguno logró una limpieza completa. Las técnicas suplementarias redujeron significativamente los residuos remanentes, destacando el XP-Endo Finisher como el método con mejores resultados, logrando una mayor eliminación del material con mínima remoción adicional de dentina. Los autores subrayan que la micro-TC proporciona una evaluación precisa, reproducible y no destructiva del retratamiento, revelando diferencias que no serían detectables mediante métodos convencionales (37).

Los hallazgos coinciden con la evidencia disponible: ningún sistema de retratamiento logra la eliminación completa del material obturador, lo que subraya la importancia de combinar técnicas y protocolos para optimizar la limpieza del sistema de conductos. La micro-TC continúa consolidándose como la herramienta más precisa para evaluar estos resultados, permitiendo comparaciones tridimensionales antes y después del retratamiento con un alto nivel de detalle estructural.

En este contexto, la microtomografía computarizada (micro-TC) se considera el método no destructivo más adecuado para evaluar los cambios morfológicos del conducto radicular durante la remoción del material obturador. Su alta resolución permite analizar con precisión el incremento en el área y volumen del conducto, así como cuantificar el porcentaje de material remanente tras diferentes protocolos de retratamiento (36).

CONCLUSIÓN

La micro-TC se ha consolidado como una de las herramientas más precisas para el análisis tridimensional del sistema de conductos radiculares. Su capacidad para revelar con detalle la morfología interna y externa de la pieza dentaria permite comprender variaciones anatómicas complejas y predecir el comportamiento del sistema frente a la preparación biomecánica. Además, facilita la evaluación cuantitativa de los cambios inducidos por la instrumentación, los protocolos de irrigación, los procedimientos de obturación y las técnicas de retratamiento, sin alterar la integridad estructural de las muestras.

Este nivel de detalle, inaccesible mediante técnicas convencionales como la radiografía periapical o la

TCHC, convierte a la micro-TC en una herramienta de gran valor tanto para la investigación como para la enseñanza preclínica, al permitir la observación directa de configuraciones reales del conducto radicular y de los resultados de diferentes intervenciones endodónticas.

No obstante, sus limitaciones técnicas, el costo elevado y la imposibilidad de aplicarla en pacientes impiden su incorporación a la práctica clínica diaria. Aun así, los avances actuales en el desarrollo de tecnologías de imagen de alta resolución apuntan hacia la futura posibilidad de obtener imágenes tridimensionales in vivo, lo que ampliaría significativamente su utilidad clínica.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Zhang Y, Weng X, Fu Y. CBCT and micro-CT analysis of the mandibular first premolars with C-shaped canal system in a Chinese population. *BMC Oral Health*. 2023;23(1):707.
- Versiani MA, Alves FR, Andrade-Junior CV, Marceliano-Alves MF, Provenzano JC, Rôças IN, et al. Micro-CT evaluation of the efficacy of hard-tissue removal from the root canal and isthmus area by positive and negative pressure irrigation systems. *Int Endod J*. 2016;49(11):1079-87.
- Rufasto-Goche KS, Vigo-Ayasta ER, Lizarbe-Castro MV, Salazar-Rodríguez MR. Etiología, fisiopatología y tratamiento de la periodontitis apical: revisión de la literatura. *Av Odontostomatol*. 2023;39(1):9-16.
- Versiani MA, Pécora JD, Sousa-Neto MD. Microcomputed tomography analysis of the root canal morphology of single-rooted mandibular canines. *Int Endod J*. 2013;46(9):800-7.
- Park JW, Lee JK, Ha BH, Choi JH, Perinpanayagam H. Three-dimensional analysis of maxillary first molar mesiobuccal root canal configuration and curvature using micro-computed tomography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2009;108(3):437-42.
- Wiseman A, Cox TC, Paranjpe A, Flake NM, Cohenca N, Johnson JD. Efficacy of sonic and ultrasonic activation for removal of calcium hydroxide from mesial canals of mandibular molars: A microtomographic study. *J Endod*. 2011;37(2):235-8.
- Chen M, Wang H, Tsauo C, Huang D, Zhou X, He J, et al. Micro-computed tomography analysis of root canal morphology and thickness of crown and root of mandibular incisors in Chinese population. *Clin Oral Investig*. 2022;26(1):901-10.
- Sevgi U, Johnsen GF, Hussain B, Piasecki L, Nogueira LP, Haugen HJ. Morphometric micro-CT study of contralateral mandibular incisors. *Clin Oral Investig*. 2023;28(1):20.
- Lee JK, Yoo YJ, Perinpanayagam H, Ha BH, Lim SM, Oh SR, et al. Three-dimensional modeling and concurrent measurements of root anatomy in mesial roots of mandibular first molars using microcomputed tomography. *Int Endod J*. 2015;48(4):380-9.
- Gaile M, Papia E, Zalite V, Loocs J, Soboleva U. Resin cement residue removal techniques: In vitro analysis of marginal defects and discoloration intensity using micro-CT and stereomicroscopy. *Dent J*. 2022;10(4):55.
- Plotino G, Grande NM, Pecci R, Bedini R, Pameijer CH, Somma F. Three-dimensional imaging using microcomputed tomography for studying tooth macromorphology. *J Am Dent Assoc*. 2006;137(11):1555-61.
- Gao X, Tay F, Gutmann J. Micro-CT evaluation of apical delta morphologies in human teeth. *Sci Rep*. 2016;6:36501.
- Grande NM, Plotino G, Gambarini G, Testarelli L, D'Ambrosio F, Pecci R, et al. Present and future in the use of micro-CT scanner 3D analysis for the study of dental and root canal morphology. *Ann Ist Super Sanita*. 2012;48(1):26-34.
- Gilli R, Mattea F, Martin G, Valente M. Microtomografía de rayos X para caracterizar volumen del canal radicular extraído en instrumentación endodóntica. *Anales AFA*. 2022;33(3):70-6.
- Espitia-Mendoza ÓJ, Mejía Melgarejo YH, Arguello Fuentes H. Tomografía computarizada: proceso de adquisición, tecnología y estado actual. *Tecnura*. 20(47), 119-135.
- Rojo-Carpintero M, Jiménez-Sánchez MC, Rodríguez-Lozano FJ, Segura-Egea JJ, Clavijo V, Forner-Navarro L, et al. Marginal adaptation and porosity of calcium silicate-based materials evaluated by micro-computed tomography. *Sci Rep*. 2025;15(1):e3729.
- Zhang P, Yuan K, Jin Q, Zhao F, Huang Z. Presence of voids after three obturation techniques in band-shaped isthmuses: a micro-computed tomography study. *BMC Oral Health*. 2021;21(1):227.
- Al Deeb M, Aldosari AA, Anil S. Osseointegration of tantalum trabecular metal in titanium dental implants: Histological and micro-CT study. *J Funct Biomater*. 2023;14(7):355.
- AlHezaimi K, Berdan Y, Rotstein I. Assessment of dentin mineral density of human teeth using micro-computed tomography in two kilovoltage levels. *Odontology*. 2023;111(4):904-9.
- Rhodes JS, Ford TR, Lynch JA, Liepins PJ, Curtis RV. Micro-computed tomography: A new tool for experimental endodontology. *Int Endod J*. 1999;32(3):165-70.
- Loiacono R, Gómez A, González Clavín MC, Pinasco LB, Vázquez DJ, Gualtieri AF, Rodríguez PA. Micro-CT evaluation of the presence of voids in endodontic obturation. *Acta Odontol Latinoam*. 2024;37(1):3-12.
- Kierklo A, Tabor Z, Pawińska M, Jaworska M. A microcomputed tomography-based comparison of root canal filling quality following different instrumentation and obturation techniques. *Med Princ Pract*. 2015;24(1):84-91.
- Fan B, Cheung GS, Fan M, Gutmann JL, Bian Z. C-shaped canal system in mandibular second molars: Part I - Anatomical features. *J Endod*. 2004;30(12):899-903.
- Nielsen RB, Alyassin AM, Peters DD, Carnes DL, Lancaster J. Microcomputed tomography: An advanced system for detailed endodontic research. *J Endod*. 1995;21(11):561-8.
- Marceliano-Alves MF, Lima CO, Bastos LG, Bruno AM, Vidaurre F, Coutinho TM, et al. Mandibular mesial root canal morphology using micro-computed tomography in a Brazilian population. *Aust Endod J*. 2019;45(1):51-6.
- de Pablo OV, Estevez R, Péix Sánchez M, Heilborn C, Cohenca N. Root anatomy and canal configuration of the permanent mandibular first molar: a systematic review. *J Endod*. 2010;36(12):1919-31.
- Peiris R, Malwatte U, Abayakoon J, Wettasinghe A. Variations in the root form and root canal morphology of permanent mandibular first molars in a Sri Lankan population. *Anat Res Int*. 2015;2015:803671.
- Gao X, Tay FR, Gutmann JL, Fan W, Xu T, Fan B. Micro-CT evaluation of apical delta morphologies in human teeth. *Sci Rep*. 2016;6:36501.
- Oliva Rodríguez R, Gastélum Zazueta AG, Hernández Molinar Y, Mariel Cárdenas J, Gutiérrez Cantú FJ, Silva-Herzog Flores D. Incidencia y tipo de istmos en primeros molares permanentes humanos: evaluación in vitro. *Int J Morphol*. 2017;35(4):1280-4.
- Pinto J, Lucas-Oliveira É, Bonagamba T, Guerreiro-Tanomaru J, Tanomaru-Filho M. Effect of voxel size of Micro-CT on the assessment of root canal preparation. *Odvotos-Int J Dent Sc*. 2023;25(2):93-102.

31. Yang Q, Liu MW, Zhu LX, Peng B. Micro-CT study on the removal of accumulated hard-tissue debris from the root canal system of mandibular molars when using a novel laser-activated irrigation approach. *Int Endod J.* 2020;53(4):529-38
32. Paqué F, Laib A, Gautschi H, Zehnder M. Hard-tissue debris accumulation analysis by high-resolution computed tomography scans. *J Endod.* 2009;35(7):1044-7.
33. Huang Y, Celikten B, de Faria Vasconcelos K, Ferreira Pinheiro Nicolielo L, Lippiatt N, Buyuksungur A, et al. Micro-CT and nano-CT analysis of filling quality of three different endodontic sealers. *Dentomaxillofac Radiol.* 2017;46(8):20170223.
34. Jung M, Lommel D, Klimek J. The imaging of root canal obturation using micro-CT. *Int Endod J.* 2005;38(9):617-26.
35. Kielbassa AM, Frank W, Madaus T. Radiologic assessment of quality of root canal fillings and periapical status in an Austrian subpopulation - An observational study. *PLoS One.* 2017;12(5):e0176724
36. Aksel H, Küçükkaya Eren S, Askerbeyli Örs S, Serper A, Ocak M, Çelik HH. Micro-CT evaluation of the removal of root fillings using the ProTaper Universal Retreatment system supplemented by the XP-Endo Finisher file. *Int Endod J.* 2019;52(7):1070-6.
37. Kiraz G, Üreyen Kaya B, Ocak M, Uzuner MB, Çelik HH. Micro-CT evaluation of the removal of root fillings using rotary and reciprocating systems supplemented by XP-Endo Finisher, the Self-Adjusting File, or Er,Cr:YSGG laser. *J Dent Sci.* 2023;18(4):1474-82.

CITAR ESTE ARTÍCULO COMO: Henríquez-Castillo B, Soria-Pérez M, Vega-Yslachin M. Microtomografía computarizada en endodoncia: Una revisión de literatura. *Rev Endod Per.* 2026; 3(1): 20-28

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES:

Supervisión: *Vega-Yslachin M.* Escritura, revisión y edición del manuscrito final: *Henriquez-Castillo B, Soria-Pérez M, Vega-Yslachin M.*

FINANCIAMIENTO: El presente trabajo fue autofinanciado.

FECHA DE RECEPCIÓN: 15 de mayo del 2026

FECHA DE ACEPTACIÓN: 18 de junio del 2026