

Protocolo para la medición volumétrica de cóndilos mandibulares mediante CBCT

Protocol for Mandibular Condyle Volumetric Measurement Using CBCT

Cristhian Andrés Unigarro Ortega

Odontólogo, Residente del programa de Ortodoncia y Ortopedia Maxilar

Carlos Humberto Martínez Cajas

Odontólogo, Magíster en Epidemiología, Especialización en Gerencia de Servicios de Salud, Especialización en Pedagogía y Docencia, Especialización en Informática Educativa.

Institución Universitaria Colegios de Colombia – UNICOC,
Programa de Especialización en Ortodoncia y Ortopedia Maxilar.
Santiago de Cali, Colombia.

Protocolo para la medición volumétrica de cóndilos mandibulares mediante CBCT

Resumen

Antecedentes: La medición volumétrica tridimensional del cóndilo mandibular constituye una herramienta esencial para el diagnóstico diferencial y el control terapéutico en ortodoncia, ortopedia y cirugía ortognática. No obstante, la falta de protocolos estandarizados accesibles y validados metodológicamente limita la reproducibilidad de los resultados entre observadores y centros académicos.

Objetivo: pretende identificar las características la precisión o reproductibilidad de validar un protocolo para la medición volumétrica de cóndilos mandibulares basado en imágenes CBCT empleando software de libre acceso. **Metodología:** Estudio de validación y reproducibilidad de un método de valoración del volumen condilar en el que se incluyeron imágenes de tomografías de haz conico (CBCT) de archivo. Se realizaron medidas repetidas (2 veces) por ocho(8) residentes de segundo año de especialización clínica. Se calcularon los coeficientes de correlación intraclase para valorar la reproductibilidad intra e interobservador. Se utilizo software de libre acceso (BlueSky Plan y Meshmixer). **Resultados:** Se evaluaron eligieron 10 cóndilos mandibulares Los resultados mostraron una excelente concordancia (ICC global > 0.96), con reproducibilidad intraobservador superior a 0.99. Lo que confirma la precisión del método. **Conclusión:** La validación de este protocolo ofrece una alternativa metodológicamente sólida y económicamente viable para la evaluación volumétrica condilar, contribuyendo a la estandarización de la investigación morfométrica y al monitoreo clínico de terapias funcionales y quirúrgicas.

Palabras clave: cóndilo mandibular; CBCT; volumetría tridimensional; reproducibilidad; validación metodológica; software libre.

Protocol for Mandibular Condyle Volumetric Measurement Using CBCT

Abstract

Background: Three-dimensional volumetric measurement of the mandibular condyle is an essential tool for differential diagnosis and therapeutic control in orthodontics, orthopedics, and orthognathic surgery. However, the lack of accessible and methodologically validated standardized protocols limits the reproducibility of results between observers and academic centers. **Objective:** To identify the characteristics of accuracy or reproducibility in validating a protocol for the volumetric measurement of mandibular condyles based on CBCT images using freely available software. **Methods:** Validation and reproducibility study of a method for assessing condylar volume, including archived cone beam computed tomography (CBCT) images. Repeated measurements (twice) were performed by eight (8) second-year clinical residents. Intraclass correlation coefficients were calculated to assess intra- and interobserver reproducibility. Open-access software (BlueSky Plan and Meshmixer) was used. **Results:** Ten mandibular condyles were evaluated. The results showed excellent agreement (overall ICC > 0.96), with intra-observer reproducibility greater than 0.99, confirming the accuracy of the method. **Conclusion:** The validation of this protocol offers a methodologically sound and economically viable alternative for condylar volumetric assessment, contributing to the standardization of morphometric research and the clinical monitoring of functional and surgical therapies.

Keywords: mandibular condyle; CBCT; three-dimensional volumetry; reproducibility; methodological validation; open-source software.

Introducción

La articulación temporomandibular (ATM) constituye uno de los componentes más complejos y dinámicos del sistema estomatognático. Su principal elemento óseo, el cóndilo mandibular, actúa como centro de crecimiento y eje biomecánico de la mandíbula, determinando la simetría facial, la estabilidad oclusal y la armonía funcional del aparato masticatorio (1). Desde el punto de vista anatómico, el cóndilo está conformado por hueso compacto en su superficie cortical y hueso esponjoso en su interior trabecular, adaptándose continuamente a las demandas mecánicas y funcionales (2).

Durante la ontogenia craneofacial, el cóndilo mandibular se origina como un centro de osificación secundaria, desarrollándose a partir del blastema condilar durante la sexta a octava semana de vida intrauterina. Su cartílago secundario presenta un patrón proliferativo único, capaz de responder a estímulos mecánicos y hormonales, lo que le otorga un papel fundamental en el crecimiento postnatal y la adaptación funcional mandibular (3,4). Esta plasticidad condilar explica su susceptibilidad a alteraciones morfológicas en presencia de factores patológicos o disfuncionales, tales como la hiperplasia condilar, la osteoartritis o las asimetrías craneofaciales (5,6).

La evaluación volumétrica tridimensional del cóndilo mandibular se ha convertido en un pilar diagnóstico en ortodoncia, ortopedia maxilar y cirugía ortognática. A diferencia de las mediciones bidimensionales obtenidas por radiografías panorámicas o cefalométricas, la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT, Cone Beam Computed Tomography) permite reconstrucciones tridimensionales con alta resolución espacial, bajo costo relativo y dosis reducidas de radiación (6,7). La posibilidad de segmentar digitalmente el cóndilo permite cuantificar su volumen y forma con alta precisión, aportando información objetiva para el diagnóstico, la planificación terapéutica y la investigación científica (7,8).

No obstante, la diversidad de software de análisis tridimensional y la ausencia de protocolos estandarizados han generado una gran variabilidad en los resultados entre diferentes estudios y operadores (9). Los programas comerciales, como,

Materialise Mimics o InVesalius ofrecen algoritmos de segmentación automatizada con alta precisión (10), pero su elevado costo y la necesidad de licencias restringen su disponibilidad en entornos académicos. Frente a ello, los softwares de libre acceso, como Blue Sky Plan y Meshmixer representan una alternativa viable, permitiendo realizar segmentaciones precisas y cálculos volumétricos fiables, siempre que se disponga de un protocolo validado y reproducible (11).

La validez y confiabilidad de las dimensiones obtenidas mediante procedimientos de medición dependerán de tres elementos fundamentales: a) la correcta delimitación anatómica del cóndilo, (b) la estandarización del proceso de segmentación, y (c) la evaluación estadística de la reproducibilidad intra e interobservador mediante el coeficiente de correlación intraclass (ICC). En la literatura, se considera que valores de ICC superiores a 0.90 reflejan una excelente confiabilidad (12,13).

Dentro de este contexto, el punto anatómico de referencia más confiable para definir el límite inferior del cóndilo ha sido motivo de debate. Estudios recientes han demostrado que la línula mandibular (ML) ofrece una estabilidad superior en comparación con la escotadura sigmoidea, ya que no se ve afectada por la hiperplasia condilar ni por la tracción muscular (14). Su identificación en cortes multiplanares CBCT permite establecer un límite constante que garantiza la repetibilidad del volumen condilar medido (14).

La estandarización de un protocolo accesible, reproducible y científicamente validado no solo tiene implicaciones académicas, sino también clínicas. En ortodoncia, permite cuantificar cambios condilares asociados a tratamientos funcionales, terapias ortopédicas o procedimientos quirúrgicos; en cirugía ortognática, contribuye a evaluar la estabilidad postoperatoria y el remodelado óseo; y en investigación, facilita la comparación de resultados interinstitucionales y longitudinales (7–10,14).

Por lo anterior, este estudio pretende identificar las características la precisión o reproductibilidad de validar un protocolo para la medición volumétrica de cóndilos

mandibulares basado en imágenes CBCT empleando software de libre acceso. Este estudio además pretende contribuir a la democratización del uso de herramientas digitales en investigación odontológica al proporcionar una metodología confiable, económica, reproducible y aplicable tanto en contextos académicos como clínicos.

Materiales y métodos

Se eligió un estudio de validación de Confiabilidad y reproducibilidad de un protocolo para la medición volumétrica de cóndilos mandibulares mediante el uso de tomografía computarizada de haz cónico (CBCT).

Para determinar el tamaño de muestra requerido para evaluar la concordancia intra e interobservador en la medición volumétrica de cóndilos mandibulares, se realizó un cálculo basado en el coeficiente de correlación intraclase (ICC). Se consideró como hipótesis nula (H_0) que la confiabilidad sería moderada ($ICC_0 = 0.6$) y como hipótesis alternativa (H_1) que alcanzaría confiabilidad excelente ($ICC_1 = 0.9$). Los parámetros de diseño incluyeron un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$, prueba bilateral) y una potencia estadística del 80% ($1-\beta = 0.80$). El cálculo se efectuó utilizando el comando `power icc` de Stata 19, bajo un modelo de efectos aleatorios y un diseño one-way de medición de concordancia (dos repeticiones por cóndilo). Los resultados indicaron que se requiere una muestra mínima de 14 cóndilos ($N=14$), cada uno evaluado dos veces, para detectar una diferencia de ICC de 0.3 (de 0.6 a 0.9) con los parámetros señalados.

Se incluyeron imágenes CBCT de alta resolución ($\leq 0,3$ mm de voxel), con campo de visión completo que incluyeran ambos cóndilos mandibulares. Estructuras anatómicas sin evidencia de fracturas, tumores o alteraciones degenerativas severas. Estas imágenes fueron evaluadas por 8 residentes de segundo año de la especialización en Ortodoncia y Ortopedia maxilar. Se seleccionaron cinco tomografías CBCT mediante muestreo aleatorio simple, generando un total de diez cóndilos (cinco derechos y cinco izquierdos). La muestra fue procesada por ocho observadores calibrados, todos con formación en ortodoncia y ortopedia maxilar.

Las imágenes fueron adquiridas con un equipo NewTom VGi evo (QR s.r.l., Verona, Italia), bajo los siguientes parámetros: 110 kVp, 3.2 mA, tiempo de exposición 3,6 s., Tamaño de voxel: 0,3 mm³. Campo de visión (FOV): 16 × 13 cm. Los archivos DICOM se exportaron para su análisis utilizando dos programas de libre acceso: Blue Sky Plan (Blue Sky Bio LLC, EE. UU.), empleado para la segmentación anatómica. Autodesk Meshmixer (Autodesk Inc., EE. UU.) utilizado para la limpieza de malla, segmentación de condilos y cálculo volumétrico.

Procedimiento de segmentación y análisis volumétrico

El protocolo metodológico se desarrolló en tres fases principales:

1. Preparación de archivos DICOM en Blue Sky Plan: Los archivos DICOM fueron importados en el software Blue Sky Plan y mediante una serie de pasos secuenciales dentro del programa, se procedió a aislar la mandíbula del cráneo, permitiendo su segmentación precisa de forma que únicamente permaneciera la mandíbula con sus respectivos cóndilos, constituyendo así la región anatómica de interés para el análisis posterior. Finalizada la segmentación, el volumen 3D fue renderizado y exportado en formato STL (Standard Tessellation Language). (Figura 1).

2. Procesamiento en Autodesk Meshmixer® y Segmentación tridimensional del cóndilo: Los modelos STL se limpiaron en Autodesk Meshmixer® eliminando artefactos. La segmentación se realizó mediante una serie de pasos secuenciales dentro del programa, delimitando exclusivamente el tejido cortical. Posteriormente, se utilizó la herramienta para definir manualmente el corte condilar en los planos vertical (flecha Roja), sagital (flecha azul), y transversal (flecha verde), (Figura 2) respetando los límites anatómicos siguientes:

- Superior: límite articular del cóndilo.
- Inferior: línea horizontal tangente al punto más superior de la língula mandibular (ML).
- Anterior y posterior: márgenes del cóndilo.
- Lateral y medial: corticales externas visibles en cortes axiales.

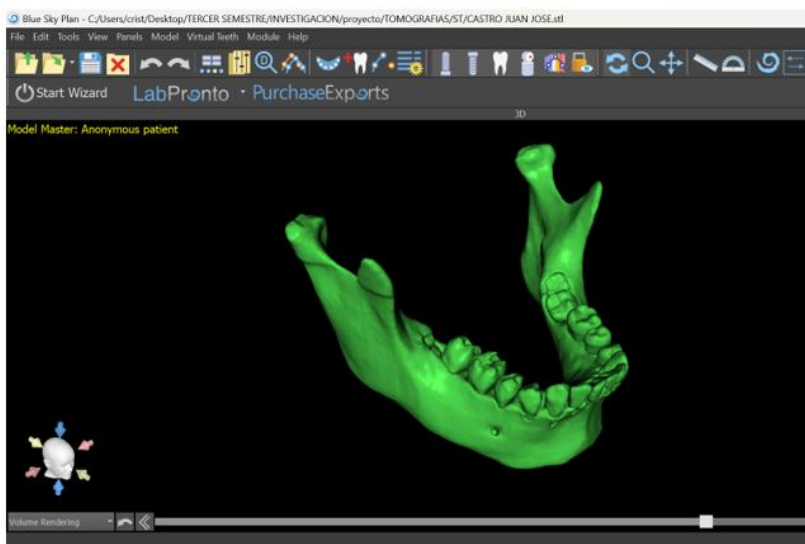


Figura 1. Interfaz gráfica de BlueSkybio con

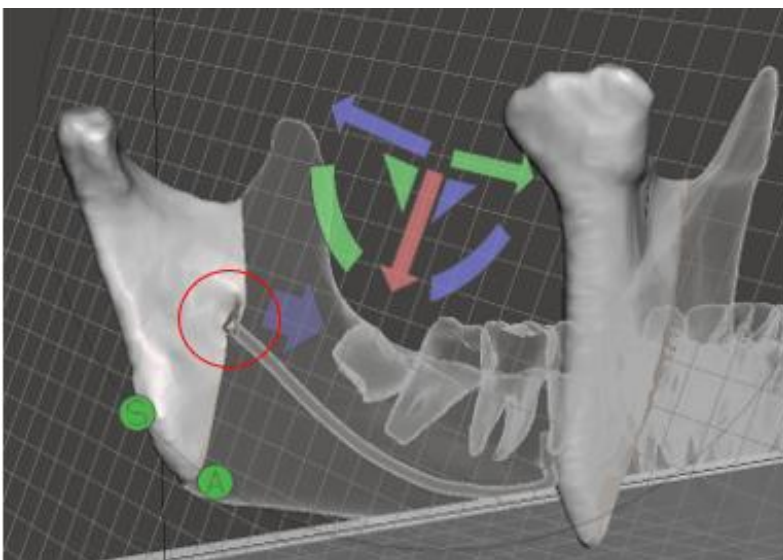


Figura 2. Identificación de límites anatómicos para segmentación (Autodesk Meshmixer®)

3. Procesamiento en Autodesk Meshmixer® y cálculo volumétrico: Posteriormente, mediante una serie de pasos secuenciales, se realizaron los ajustes necesarios para asegurar una definición precisa de la geometría condilar. Una vez optimizado el modelo, se utilizó la función “Compute Geometric Measures” para calcular el volumen total de cada cóndilo mandibular, expresado en centímetros cúbicos (cm³) (Figura 3)

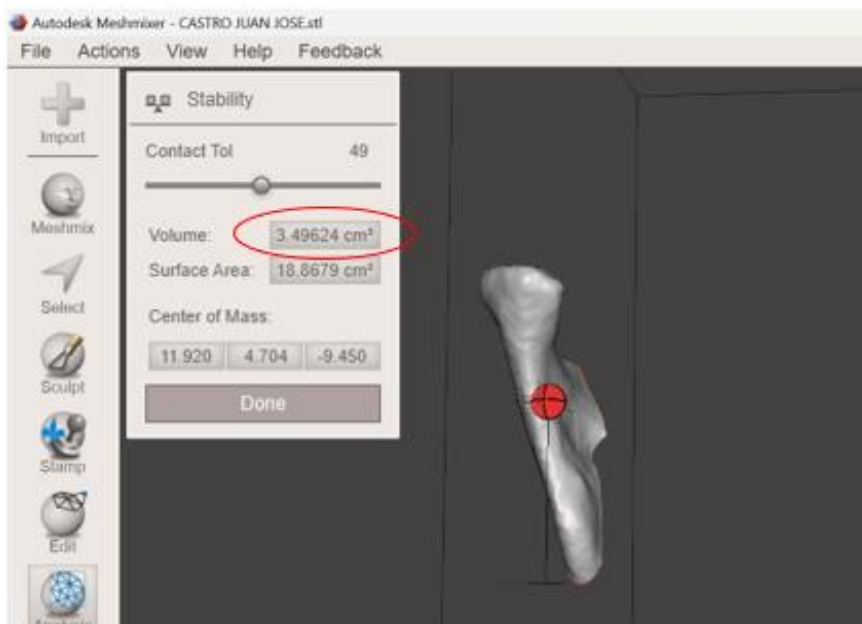


Figura 3. Cóndilos segmentados en Autodesk Meshmixer®

Los observadores participaron en una sesión de entrenamiento dirigida por el autor principal de la investigación. Durante esta fase, se emplearon imágenes piloto para el entrenamiento y estandarización de las mediciones. A cada observador se le suministró un protocolo detallado paso a paso, junto con un video descriptivo del procedimiento de cálculo de los cóndilos mandibulares, con el fin de garantizar una comprensión uniforme del método. Cada observador realizó dos mediciones independientes del volumen condilar, con una diferencia temporal de un mes para minimizar el sesgo de memoria.

Análisis estadístico

Los datos fueron registrados en hojas de Microsoft Excel para ser analizados en STATA/SE versión 19. El análisis consistió en el cálculo el coeficiente de correlación intraclase (ICC): modelo de efectos aleatorios de dos vías con concordancia absoluta. Entre los observadores El nivel de significancia estadística se estableció en $\alpha = 0,05$. Los valores de ICC se interpretaron según los criterios de Cicchetti (12): $< 0,40$: pobre; $0,40-0,59$: moderada; $0,60-0,74$: buena; $\geq 0,75$: excelente.

Consideraciones éticas

Esta investigación se encuentra enmarcada en una investigación principal que pretende valorar la variación del volumen condilar en pacientes que reciben tratamiento de ortopedia maxilar con fotobiomodulación (terapia laser de baja intensidad - LLLT). Los datos fueron tratados de manera confidencial y se garantizó la anonimización de todos los registros. El protocolo contó con aprobación del Comité de Ética en Investigación de UNICOC, conforme a los principios de la Declaración de Helsinki (2013).

Resultados

Se evaluaron 10 cóndilos mandibulares desde las CBCT que reposan en el archivo de imágenes del Centro de Investigación del Colegio Odontológico, Cali. El análisis volumétrico tridimensional permitió obtener valores precisos y reproducibles de los cóndilos mandibulares derechos e izquierdos. En la primera ronda de mediciones, el volumen promedio del cóndilo derecho fue de $1.326,42 \pm 0,107 \text{ mm}^3$, mientras que, el cóndilo izquierdo presentó un volumen promedio de $1.341,15 \text{ mm}^3 \pm 0,095$. En la segunda ronda, los valores medios fueron $1.324,87 \text{ mm}^3$ (derecho) y $1.339,72 \text{ mm}^3$ (izquierdo), sin diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$).

La comparación entre los promedios obtenidos por los ocho observadores mostró una dispersión mínima en torno a la media, lo cual sugiere una alta estabilidad en la delimitación anatómica del cóndilo. No se identificaron valores atípicos ni desviaciones sistemáticas relevantes.

Confiabilidad interobservador

En cuanto al análisis interobservador, los resultados mostraron una concordancia excelente en ambos cóndilos. Para la primera medición, el ICC global fue de 0.968 (IC 95%: 0.903–0.996) para el cóndilo derecho y de 0.982 (IC 95%: 0.944–0.998) para el izquierdo.

En la segunda medición, los valores fueron 0.964 (IC 95%: 0.891–0.995) y 0.982 (IC 95%: 0.940–0.998), respectivamente. Todos los valores de ICC superaron el umbral de 0.90, considerado excelente según los criterios de Cicchetti (12).

En las comparaciones interobservador, el promedio de diferencia absoluta entre mediciones fue inferior al 1,2%, y ningún observador presentó un sesgo clínicamente relevante.

La repetición del procedimiento produjo una reducción significativa del error estándar de medición (de 3,2% a 1,8%), lo que evidencia que el aprendizaje técnico del protocolo es rápido y reproducible. La variabilidad inicial entre observadores se redujo a menos del 2% tras el entrenamiento, consolidando la robustez del método.

Confiabilidad intraobservador

El análisis de confiabilidad intraobservador mostró valores excepcionales en todas las mediciones. El coeficiente de correlación intraclase (ICC) osciló entre 0.987 y 0.996, con un intervalo de confianza del 95% que osciló entre 0.968 y 0.999.

Estos resultados indican que, tras el proceso de capacitación basada en manual paso a paso y video explicativo se logra la aplicación del procedimiento de medición por observadores y estos resultan ser altamente concordantes.

Resultados estadísticos

Parámetro	Cóndilo Derecho (1ª Medición)	Cóndilo Izquierdo (1ª Medición)	Cóndilo Derecho (2ª Medición)	Cóndilo Izquierdo (2ª Medición)
ICC (Interobservador)	0.968	0.982	0.964	0.982
IC 95%	0.903–0.996	0.944–0.998	0.891–0.995	0.940–0.998
ICC (Intraobservador promedio)	0.992	0.994	0.991	0.993

Evaluador	Cóndilo Derecho ICC (IC 95%)	Cóndilo Izquierdo ICC (IC 95%)
0	0.999 (0.999-1.000)	1.000 (1.000-1.000)
1	0.993 (0.947-0.999)	1.000 (1.000-1.000)
2	1.000 (1.000-1.000)	0.999 (0.999-1.000)
3	1.000 (1.000-1.000)	1.000 (1.000-1.000)
4	1.000 (1.000-1.000)	1.000 (1.000-1.000)
5	1.000 (1.000-1.000)	1.000 (0.999-1.000)
6	1.000 (1.000-1.000)	1.000 (1.000-1.000)
7	0.999 (0.997-1.000)	1.000 (1.000-1.000)

La reproducibilidad intraobservador es excelente para todos los evaluadores, con valores ICC superiores a 0.99 en todas las comparaciones. Estos resultados indican que cada evaluador puede reproducir sus propias mediciones de manera altamente consistente. Estos resultados confirman que el protocolo posee altísima precisión, consistencia y estabilidad, tanto en la delimitación anatómica como en la cuantificación volumétrica tridimensional.

Desde un punto de vista clínico, las diferencias observadas son no significativas y clínicamente irrelevantes, lo que valida el uso del protocolo para aplicaciones diagnósticas y de investigación.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio confirman que el protocolo diseñado para la medición volumétrica de cóndilos mandibulares mediante CBCT utilizando software de libre acceso (Blue Sky Plan y Autodesk Meshmixer®) presenta excelente confiabilidad intra e interobservador, con valores de ICC superiores a 0.96 y errores de medición menores al 2%. Estas cifras reflejan un alto nivel de precisión y reproducibilidad, comparable al reportado por metodologías basadas en software comercial tal como se ha reportado en varios estudios lo que ratifica la utilidad de los softwares libres utilizados (10,15–18). En síntesis, el protocolo demostró ser altamente confiable, reproducible y accesible, ofreciendo un flujo de trabajo digital que cumple con los objetivos de valoración volumétrica tridimensional.

La reproducibilidad alcanzada sugiere que la combinación de herramientas digitales abiertas y un protocolo estandarizado puede sustituir con eficacia a programas de licenciamiento restrictivo, ampliando el acceso a metodologías de investigación tridimensional. Además, el corto tiempo de aprendizaje observado tras la calibración (reducción del error estándar de 3,2% a 1,8%) evidencia la viabilidad pedagógica del método, lo que facilita su incorporación en entornos académicos.

Diversos autores han explorado la evaluación volumétrica del cóndilo mandibular con diferentes enfoques metodológicos. Bayram et al, reportaron alta confiabilidad en la técnica de medición del volumen condilar físicos mediante comparación con

patrón de referencia que utilizó la técnica de desplazamiento de agua. Tras el aislamiento, el volumen condilar se seccionó en el plano sagital y se obtuvieron secciones de 0,3 mm de grosor con intervalos de 0,9mm a partir de reconstrucciones tridimensionales. Por otra parte, Bencherqui et al, (19) reportaron un ICC de 0.99 utilizando 3DSlicer en mediciones lineales de la mandíbula. La confiabilidad intraobservador de las técnicas de medición volumétrica por medio de segmentación ha sido reportada ampliamente mediante uso de distintos sistemas de cómputo alcanzando valores por encima de 0.95 como en el estudio de Oh et al en 2018, quienes evaluaron dimensiones en pacientes con asimetría (20). Del mismo modo, según la síntesis de Verlhest et al (9), quienes citan varios artículos, se evidencia que los valores de ICC (coeficiente de correlación intraclase) intra-observador variaron significativamente entre los estudios incluidos. Carvalho et al. (2010) reportó un ICC de 0.92 en 10 pacientes medidos con intervalo de 2 semanas, utilizando mediciones de distancia mediante software CMF. Goncalves et al. (2013) obtuvo un rango amplio de ICC que osciló entre 0.78 a 0.99 para diferentes regiones condilares en mediciones realizadas con intervalo de 1 mes. De Paula et al. (2013) alcanzó un ICC de 0.90 en 10 pacientes con intervalo de 10 días. Franco et al. (2013) reportó el más alto ICC intra-observador de 0.99 en 10 pacientes con intervalo de 15 días. Da Silva et al. (2018) demostró un ICC de 0.94 en 11 pacientes con intervalo de 1 mes, validando el protocolo completo de segmentación, registro y análisis. En todos casos, el nivel de acuerdo intra e interobservador fue similar del presente estudio, lo que sugiere una mejora atribuible al refinamiento del proceso de segmentación y al uso de la línula mandibular (ML) como límite anatómico inferior.

Asimismo, Fariña et al. (14) demostraron que la ML constituye un punto estable para la evaluación de crecimiento condilar, independientemente de procesos hiperplásicos o de remodelado óseo. Los resultados aquí obtenidos respaldan dicha afirmación, ya que el uso de esta referencia permitió una delimitación constante y fácilmente reproducible en todos los observadores.

En ortodoncia y ortopedia maxilar, la cuantificación volumétrica condilar tiene múltiples aplicaciones clínicas. Permite evaluar la simetría mandibular, monitorear el remodelado óseo durante tratamientos funcionales y detectar cambios morfológicos asociados a terapias ortopédicas o quirúrgicas. Además, su uso puede extenderse a la valoración de terapias regenerativas y biomodulación ósea, como el láser de baja intensidad (LLLT) o la terapia con campos electromagnéticos pulsados.

La estandarización de este protocolo también favorece la investigación multicéntrica. Al utilizar software libre y definiciones anatómicas universales, diferentes instituciones pueden comparar resultados sin depender de licencias comerciales o de metodologías cerradas. Esto contribuye a la democratización tecnológica en la investigación odontológica, permitiendo la expansión de estudios de mayor escala y metaanálisis de reproducibilidad.

En el ámbito quirúrgico, este método puede emplearse para cuantificar los cambios condilares posteriores a cirugías ortognáticas o a procedimientos reconstructivos mandibulares. La posibilidad de realizar mediciones tridimensionales pre y postoperatorias representa un avance en la precisión del seguimiento clínico.

La segmentación semiautomática del cóndilo es una limitante importante ya que el software utilizado no cuenta con conectores que potencien el uso de inteligencia artificial y aprendizaje profundo (Deep Learning); sin embargo, el interés en el uso y acceso de software libre y de código abierto ha permitido que en programas como ImageJ se realicen esfuerzos en este sentido; un estudio publicado en 2020 realizado por Brosset et al, reportó un coeficiente Dice 0.9461 entre la superposición de volúmenes manuales y aquellos obtenidos de forma automática, esta precisión obtenida respalda su viabilidad (21).

A futuro, la integración de redes neuronales convolucionales (CNN) podría optimizar el proceso de segmentación, reduciendo el tiempo operatorio y aumentando la consistencia entre observadores. Asimismo, la creación de bancos de datos 3D

validados permitiría el desarrollo de modelos predictivos del crecimiento mandibular y la evaluación longitudinal del remodelado condilar.

Conclusiones

El protocolo propuesto para la medición volumétrica de cóndilos mandibulares mediante CBCT y software de libre acceso (Blue Sky Plan y Meshmixer) presento alta confiabilidad (ICC superiores a 0,96). La incorporación de la llingula mandibular (ML) como límite anatómico inferior del cóndilo garantizó una referencia morfológica constante y reproducible, incluso en observadores con diferentes niveles de experiencia. El flujo de trabajo digital descrito —basado en segmentación semiautomática, limpieza de malla y cálculo volumétrico tridimensional— permitió una reconstrucción anatómica precisa con excelente concordancia inter e intraobservador, validando la factibilidad técnica del método.

Recomendaciones

La evaluación de cóndilo mandibular, así como otras estructuras craneofaciales puede ser abordada con el uso de extensiones (plug-ins) desarrolladas para programas de acceso libre y en ese sentido, la línea de investigación debe direccionar sus esfuerzos en el acceso o desarrollo de soluciones automatizadas basadas en lenguajes de aprendizaje profundo y redes neuronales convolucionales potenciadas por inteligencia artificial (IA).

Conflicto de interés

Los autores declaran la ausencia de conflictos de interés en la realización de este estudio. No se utilizaron productos comerciales que generaran incentivos financieros o promocionales para los investigadores.

Referencias bibliográficas

1. Wu Y, Lan Y, Mao J, Shen J, Kang T, Xie Z. The interaction between the nervous system and the stomatognathic system: from development to diseases. Int J Oral Sci. 15 de agosto de 2023;15(1):34.

2. Bordoni B, Brizuela M. Anatomy, Head and Neck, Temporomandibular Joint. En: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 [citado 13 de noviembre de 2025]. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538486/>
3. Petrovic AG. Mechanisms and regulation of mandibular condylar growth. Acta Morphol Neerl Scand. octubre de 1972;10(1):25-34.
4. Hinton RJ, Carlson DS. Regulation of Growth in Mandibular Condylar Cartilage. Semin Orthod. diciembre de 2005;11(4):209-18.
5. Tanaka E, Koolstra JH. Biomechanics of the Temporomandibular Joint. J Dent Res. 1 de noviembre de 2008;87(11):989-91.
6. Dhabale GS, Bhowate RR. Cone-Beam Computed Tomography for Temporomandibular Joint Imaging. Cureus. 14(11):e31515.
7. Melián-Rivas AN, Pilar-Godoy J, Boin-Bakit C, Souper-Moreno R, Córdova LA, Carrasco-Soto RR. Volumetric and Morphometric Condylar Assessment in Patients with Class II and Class III Skeletal Patterns Prior to Orthognathic Surgery: A CBCT 3D Study. Int J Morphol. diciembre de 2024;42(6):1576-84.
8. López-Ramírez JC, García-Cortes JO, Sánchez-Meraz W, Oliva-Rodríguez R, Gutiérrez-Cantú FJ, Cárdenas JM, et al. Análisis Morfológico del Cóndilo Mandibular por Tomografía Computarizada de Haz Cónico en Relación al Sexo en Población Mexicana. Int J Morphol. octubre de 2021;39(5):1420-8.
9. Verhelst PJ, Verstraete L, Shaheen E, Shujaat S, Darche V, Jacobs R, et al. Three-dimensional cone beam computed tomography analysis protocols for condylar remodelling following orthognathic surgery: a systematic review. Int J Oral Maxillofac Surg. febrero de 2020;49(2):207-17.
10. Abdullah JY, Abdullah AM, Hadi H, Husein A, Rajion ZA. Comparison of STL skull models produced using open-source software versus commercial software. Rapid Prototyp J. 7 de noviembre de 2019;25(10):1585-91.
11. Elkersh NM, Abdelrahman HH, Hassan MG. Evaluating free segmentation tools for CBCT-derived models: Cost-effective solutions. Orthod Craniofac Res. diciembre de 2024;27 Suppl 2:56-64.
12. Cicchetti DV. Guidelines, criteria, and rules of thumb for evaluating normed and standardized assessment instruments. Psychol Assess. 1994;6(4):284-90.
13. Shrout PE, Fleiss JL. Intraclass correlations: Uses in assessing rater reliability. Psychol Bull. 1979;86(2):420-8.
14. Fariña R, Bravo R, Villanueva R, Valladares S, Hinojosa A, Martinez B. Measuring the condylar unit in condylar hyperplasia: from the sigmoid notch or

from the mandibular lingula? Int J Oral Maxillofac Surg. 1 de julio de 2017;46(7):857-60.

15. Hu X, Cheung GSP, Zhang Y, Sun R, Dong F. Reliability and reproducibility of CBCT assessment of mandibular changes before and after treatment for Class III growing patients - an easy and quick way for evaluation. BMC Pediatr. 28 de noviembre de 2023;23(1):602.
16. Elrawdy AM, Amer ME, Algariah AK, Eid MH, Abu-Elsaoud AM, Ghoneim MM. Appraisal of the Accuracy and Reliability of Cone-Beam Computed Tomography and Three-Dimensional Printing for Volumetric Mandibular Condyle Measurements of a Human Condyle. Cureus. octubre de 2023;15(10):e46746.
17. El Bachaoui S, Verhelst PJ, De Faria Vasconcelos K, Shaheen E, Coucke W, Swennen G, et al. The impact of CBCT-head tilting on 3D condylar segmentation reproducibility. Dentomaxillofac Radiol. septiembre de 2023;52(6):20230072.
18. Lo Giudice A, Quinzi V, Ronsivalle V, Farronato M, Nicotra C, Indelicato F, et al. Evaluation of Imaging Software Accuracy for 3-Dimensional Analysis of the Mandibular Condyle. A Comparative Study Using a Surface-to-Surface Matching Technique. Int J Environ Res Public Health. 3 de julio de 2020;17(13):4789.
19. Bencherqui S, Barone S, Cevidanes L, Perrin JP, Corre P, Bertin H. 3D analysis of condylar and mandibular remodeling one year after intra-oral ramus vertical lengthening osteotomy. Clin Oral Investig. 25 de enero de 2024;28(1):114.
20. Oh MH, Kang SJ, Cho JH. Comparison of the three-dimensional structures of mandibular condyles between adults with and without facial asymmetry: A retrospective study. Korean J Orthod. 2018;48(2):73.
21. Brosset S, Dumont M, Bianchi J, Ruellas A, Cevidanes L, Yatabe M, et al. 3D Auto-Segmentation of Mandibular Condyles. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf. julio de 2020;2020:1270-3.