



Facultad Ciencias de la Salud

Especialidad de Ortodoncia

Tema:

“Uso de la pseudocoloración multicapas en la evaluación de la corticalización del cóndilo
comparación entre dos métodos en tomografía CONE BEAN”

Tesis para la obtención del Título de:

“Especialista en Ortodoncia”

Presentado por:

Dra. Patricia Ximena Iza Pilaquina.

Tutor:

Dra. Marjory Vaca.

Quito, diciembre de 2025

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el grado de corticalización del cóndilo mandibular mediante tomografía computarizada de haz cónico (CBCT), comparando dos métodos diagnósticos: la visualización con pseudocoloración multicapas, adaptada del protocolo propuesto por Chung et al. (2025), y la visualización convencional en escala de grises. El diseño fue retrospectivo, transversal y observacional, con una muestra de 85 CBCT pertenecientes al banco de imágenes del posgrado de ortodoncia de la Universidad Hemisferios (2022–2025), correspondientes a 49 mujeres y 36 hombres, con edades entre 9 y 65 años.

Cada método diagnóstico se aplicó en cortes sagitales y coronales del cóndilo mandibular utilizando el software 3D Slicer (v. 5.8.1), identificando la cortical condilar según su grado de formación y clasificándolos en: Ausencia de hueso cortical (Etapa I), Formación parcial de hueso cortical. (Etapa II) Formación completa del hueso cortical. (Etapa III). (Lei et al., 2013).

La fiabilidad intraobservador fue elevada (ICC = 0.90). Los análisis estadísticos revelaron una asociación significativa entre la edad y el grado de desarrollo condilar tanto en escala de grises ($F = 525.28$, $p < 0.001$) como en pseudocolor ($F = 865.91$, $p < 0.001$) evidenciando una progresión esperada de corticalización con la edad. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los lados derecho e izquierdo, ni entre los tipos de corte coronal y sagital, respecto al grado de desarrollo cortical condilar. Al comparar ambos métodos, la prueba de independencia mostró una asociación muy significativa ($p < 0.001$), y el coeficiente Kappa de Cohen indicó una concordancia moderada ($\kappa = 0.57$).

Se concluye que la visualización con pseudocoloración multicapas en la evaluación de la corticalización del cóndilo, aunque ofrece resultados en su mayoría similares a los

obtenidos en el método convencional, difiere y permite una evaluación más precisa en los casos cercanos a los límites de clasificación. Es decir, la pseudocoloración multicapas facilitaría distinguir con mayor claridad las áreas de corticalización incompleta, ampliando el rango de edades en que se observan etapas iniciales o parciales del desarrollo cortical condilar. Asimismo, se determinó que la formación inicial de la cortical ocurre entre los 12 y 14 años, mientras que la corticalización completa se consolida durante la segunda y tercera década de vida.

Palabras clave: Corteza condilar, CBCT, articulación temporomandibular, corticalización, métodos diagnósticos, ortodoncia.

Declaración De Aceptación De Norma Ética Y Derechos

El presente documento se ciñe a las normas éticas y reglamentarias de la Universidad Hemisferios. Así, declaro que lo contenido en este ha sido redactado con entera sujeción al respeto de los derechos de autor, citando adecuadamente las fuentes. Por tal motivo, autorizo a la Biblioteca a que haga pública su disponibilidad para lectura dentro de la institución, a la vez que autorizo el uso comercial de mi obra a la Universidad Hemisferios, siempre y cuando se me reconozca el cuarenta por ciento (40%) de los beneficios económicos resultantes de esta explotación.

Además, me comprometo a hacer constar, por todos los medios de publicación, difusión y distribución, que mi obra fue producida en el ámbito académico de la Universidad Hemisferios.

De comprobarse que no cumplí con las estipulaciones éticas, incurriendo en caso de plagio, me someto a las determinaciones que la propia Universidad plantee.



Firmado electrónicamente por:
PATRICIA XIMENA IZA
PILAQUINGA

Validar únicamente con FirmaEC

Patricia Ximena Iza Pilaquinga

C.I: 1725211518

Dedicatoria

Primero, agradezco a Dios, quien ha sido mi guía en cada paso de mi vida, mi fuente de sabiduría y fortaleza especialmente durante mi carrera. Sin su presencia, nada de esto habría sido posible.

A mis padres, por su amor incondicional, sus sacrificios silenciosos y por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mis hermanos, por ser mi apoyo constante, por sus palabras de ánimo y por estar siempre conmigo.

Y a ti, mi amor, gracias por ser mucho más que un apoyo. Gracias por tus palabras de ánimo cuando más las necesitaba, y por creer en mí incluso en mis momentos de duda. Tu amor, tu compañía y tu fe en mí hicieron más liviano este camino. Esta meta también es tuya.

A mis primos, y amigos cercanos que por el cariño y confianza que han depositado en mí, confiando en mi como profesional, siendo fundamental su colaboración como pacientes para lograr esta meta en mi vida.

Agradezco también a la Universidad Hemisferios y al cuerpo docente del Posgrado de Ortodoncia, por su compromiso académico, su guía constante y por brindarme las herramientas necesarias para mi formación profesional.

A todos ustedes, con todo mi amor y gratitud, dedico este logro. Esta meta no es solo mía, es también el reflejo del apoyo y amor que me han brindado siempre.

Tabla de contenidos

Resumen	9
Abstract	11
Introducción	13
Marco Teórico	15
Metodología	23
Resultados	30
Discusión.....	37
Conclusiones	39
Referencias	40

Índice de figuras

Figura 1. Distribución porcentual de las etapas de corticalización condilar según el método de visualización.....	30
Figura 2. Distribución del estado de desarrollo condilar en visualización en escala de grises	31
Figura 3. Distribución del estado de desarrollo condilar en visualización en pseudocoloración	31
Figura 4. Frecuencia de etapas de corticalización condilar por edad (escala de grises)	32
Figura 5. Frecuencia de etapas de corticalización condilar por edad (pseudocoloración)	33
Figura 6. Concordancia diagnóstica entre la visualización en escala de grises y pseudocoloración.....	35

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla de colorimetría para diagnóstico odontológico en 3D.	26
Tabla 2. Escala de pseudocolor y rangos de unidades Hounsfield para la evaluación condilar.	27
Tabla 3. Grado de Corticalización respecto al sexo en escala de grises	34
Tabla 4. Grado de corticalización respecto al sexo en pseudocoloración	34

Uso de la Pseudocoloración multicapas en la Evaluación de la Corticalización del Cóndilo Comparación entre dos Métodos en tomografía CONE BEAN

Patricia Ximena Iza Pilaquinga

Universidad Hemisferios

pxiza@estudiantes.uhemisferios.edu.ec

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el grado de corticalización del cóndilo mandibular mediante tomografía computarizada de haz cónico (CBCT), comparando dos métodos diagnósticos: la visualización con pseudocoloración multicapas, adaptada del protocolo propuesto por Chung et al. (2025), y la visualización convencional en escala de grises. El diseño fue retrospectivo, transversal y observacional, con una muestra de 85 CBCT pertenecientes al banco de imágenes del posgrado de ortodoncia de la Universidad Hemisferios (2022–2025), correspondientes a 49 mujeres y 36 hombres, con edades entre 10 y 65 años.

Cada método diagnóstico se aplicó en cortes sagitales y coronales del cóndilo mandibular utilizando el software 3D Slicer (v. 5.8.1), identificando la cortical condilar según su grado de formación y clasificándolos en: Ausencia de hueso cortical (Etapa I), Formación parcial de hueso cortical. (Etapa II) Formación completa del hueso cortical. (Etapa III). (Lei et al., 2013).

La fiabilidad intraobservador fue elevada ($ICC = 0.90$). Los análisis estadísticos revelaron una asociación significativa entre la edad y el grado de desarrollo condilar tanto en escala de grises ($F = 525.28, p < 0.001$) como en pseudocolor ($F = 865.91, p < 0.001$) evidenciando una progresión esperada de corticalización con la edad. No se encontraron

diferencias estadísticamente significativas entre los lados derecho e izquierdo, ni entre los tipos de corte coronal y sagital, respecto al grado de desarrollo cortical condilar. Al comparar ambos métodos, la prueba de independencia mostró una asociación muy significativa ($p < 0.001$), y el coeficiente Kappa de Cohen indicó una concordancia moderada ($\kappa = 0.57$).

Se concluye que la visualización con pseudocoloración multicapas en la evaluación de la corticalización del cóndilo, aunque ofrece resultados en su mayoría similares a los obtenidos en el método convencional, difiere y permite una evaluación más precisa en los casos cercanos a los límites de clasificación. Es decir, la pseudocoloración multicapas facilitaría distinguir con mayor claridad las áreas de corticalización incompleta, ampliando el rango de edades en que se observan etapas iniciales o parciales del desarrollo cortical condilar. Asimismo, se determinó que la formación inicial de la cortical ocurre entre los 12 y 14 años, mientras que la corticalización completa se consolida durante la segunda y tercera década de vida.

Palabras clave: Corteza condilar, CBCT, articulación temporomandibular, corticalización, métodos diagnósticos, ortodoncia.

Abstract

The present study aimed to evaluate the degree of corticalization of the mandibular condyle using cone-beam computed tomography (CBCT), comparing two diagnostic methods: multilayer pseudocolor visualization, adapted from the protocol proposed by Chung et al. (2025), and conventional grayscale visualization. The design was retrospective, cross-sectional, and observational, with a sample of 85 CBCT scans from the image bank of the Orthodontics postgraduate program at Universidad Hemisferios (2022–2025), corresponding to 49 females and 36 males, aged between 10 and 65 years.

Each diagnostic method was applied to sagittal and coronal slices of the mandibular condyle using 3D Slicer software (v. 5.8.1). The condylar cortex was identified according to its degree of formation and classified as follows: absence of cortical bone (Stage I), partial formation of cortical bone (Stage II), and complete formation of cortical bone (Stage III) (Lei et al., 2013).

Intra-observer reliability was high (ICC = 0.90). Statistical analyses revealed a significant association between age and the degree of condylar development in both grayscale visualization ($F = 525.28$, $p < 0.001$) and pseudocolor visualization ($F = 865.91$, $p < 0.001$), showing the expected progression of corticalization with age. No statistically significant differences were found between the right and left sides, nor between sagittal and coronal slice types, regarding the degree of cortical development. When comparing both methods, the independence test showed a highly significant association ($p < 0.001$), and Cohen's Kappa coefficient indicated moderate agreement ($\kappa = 0.57$).

It is concluded that multilayer pseudocolor visualization in the assessment of condylar corticalization, although largely consistent with the results obtained through the conventional method, differs by providing a more precise evaluation in cases near the classification

boundaries. That is, the multilayer pseudocolor technique allows clearer distinction of areas with incomplete corticalization, broadening the age range in which early or partial stages of condylar cortical development are observed. Likewise, initial cortical formation was found to occur between 12 and 14 years of age, while complete corticalization becomes consolidated during the second and third decades of life.

Keywords: Condylar cortex, CBCT, temporomandibular joint, corticalization, diagnostic methods, orthodontics.

Introducción

El crecimiento y desarrollo del esqueleto craneofacial se han considerado procesos determinantes para la formación de las relaciones oclusales, las funciones orofaciales y la armonía estructural del sistema estomatognático (Mizoguchi et al., 2013, p. 2). En este sentido, la mandíbula constituye el principal sitio de crecimiento, siendo el desarrollo del cóndilo la región de mayor actividad proliferativa debido a su cartílago condilar, el cual participa en la elongación del cóndilo y en el incremento de la altura de la rama mandibular, modificando el desarrollo craneofacial, la proporción facial y la función de la articulación temporomandibular (ATM) (Lei et al., 2013b, pp. 43–44; Bayrak et al., 2018, p. 2390).

La formación del cóndilo, la eminencia articular y la fosa de la ATM ocurre de manera simultánea, adquiriendo su morfología definitiva alrededor de los 20 años. La condrogénesis condilar inicia en la etapa fetal con la formación de cartílago secundario, que posteriormente es reemplazado por hueso mediante osificación endocondral durante la adolescencia, completándose entre los 20 y 25 años (Bayrak et al., 2018, p. 2390).

En la actualidad, las técnicas de imagen han permitido un análisis más detallado del crecimiento y la remodelación condilar. Entre ellas, la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) constituye una herramienta fundamental, pues ofrece reconstrucciones tridimensionales de alta resolución con una dosis de radiación menor que la tomografía convencional (TC) (Lo Giudice, 2020, p. 2). Sin embargo, la valoración de la corticalización condilar en cortes coronales y sagitales en escala de grises continúa siendo el método más utilizado, pese a sus limitaciones al diferenciar variaciones leves de densidad ósea. Esto puede generar errores diagnósticos en la determinación del estado de corticalización del cóndilo, lo cual afecta el diagnóstico integral y la planificación ortodóncica (Kim et al., 2021, pp. 3–4).

Ante estas limitaciones, la pseudocoloración multicapas se presenta como una alternativa innovadora que asigna escalas cromáticas a los valores de densidad ósea según las unidades Hounsfield, mejorando la identificación precisa del grado de desarrollo cortical. Al tratarse de una técnica relativamente nueva, utilizada previamente para identificar variaciones densitométricas en estructuras óseas, se vuelve indispensable compararla con la visualización convencional en escala de grises (Chung et al., 2025, pp. 411–414; Ma et al., 2023, pp. 2388–2389).

Siendo así, el objetivo del presente estudio será evaluar el grado de corticalización del cóndilo mandibular mediante tomografía computarizada de haz cónico (CBCT), comparando la visualización convencional en escala de grises con la pseudocoloración multicapas para determinar si existen diferencias en la precisión diagnóstica y en la identificación de las etapas de formación cortical del cóndilo mandibular. En este contexto, la hipótesis nula plantea que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados obtenidos mediante la técnica de pseudocoloración y el método convencional.

Comprobar esta hipótesis aportaría evidencia sobre la utilidad de la pseudocoloración multicapas como herramienta complementaria en la evaluación de la corticalización condilar, cuya aplicación clínica permitiría una comprensión más precisa del estado de la articulación temporomandibular. Todo ello favorecería una planificación ortodóncica y ortopédica más confiable y específica.

Marco Teórico

En la región cráneo facial existe una articulación de gran importancia que se caracteriza por su acción sinérgica ya que trabaja conjuntamente con músculos, ligamentos y coordinadamente con la articulación del lado opuesto para ejecutar movimientos mandibulares precisos, la articulación témporomandibular (ATM) es una articulación sinovial de tipo bicondíleo que tiene movimientos distintivos de bisagra (rotación dentro de la cavidad glenoidea) y deslizamiento (traslación del cóndilo mandibular) por lo que es considerada la articulación gínglimoartrodial de mayor impacto en la cinemática mandibular. Esta estructura anatómica junto con la acción de los músculos masticatorios, ligamentos y la íntima relación con la oclusión dental nos permite desarrollar diversas funciones en el sistema estomatognático como la deglución, fonación, masticación, modulación y comunicación, es así como cualquier trastorno en sus componentes puede afectar el funcionamiento de todo el sistema. (Alomar, *et al.*, 2007, p.170; Laquihuanaco Loza, *et al.*, 2022, p.50).

Embriológicamente, la articulación témporomandibular se origina a partir del primer arco faríngeo, en este proceso, el mesodermo participa en la formación de los componentes musculares y vasculares, mientras que el mesénquima derivado de la cresta neural da lugar a los elementos óseos y cartilagosos que conforman la articulación. El desarrollo morfológico y funcional de la ATM se inicia aproximadamente en la cuarta semana del desarrollo embrionario y se prolonga hasta alrededor de la décimo séptima semana de vida intrauterina, periodo en el cual se establecen sus principales componentes anatómicos y su organización estructural definitiva. (Loza, *et al.*, 2022, p.51).

Durante las semanas octava y novena, correspondientes a la fase inicial de formación de la ATM, se distinguen dos condensaciones mesenquimáticas denominadas blastemas: el blastema temporal, que dará origen a la porción petrosa del hueso temporal, y el blastema condilar, a partir del cual se desarrollará el cóndilo mandibular. A medida que avanza su fase

de desarrollo, entre las semanas décima y décimo séptima, se forman las cavidades articulares y el disco interarticular. Finalmente, en la etapa de maduración, se inicia la actividad hematopoyética proceso en el cual maduran las células sanguíneas en el interior de la médula ósea, a medida que avanza la maduración esquelética, la médula es remplazada por tejido adiposo, este cambio lleva a la consolidación de la corticalización ósea, proceso en el cual las superficies del cóndilo adquieren mayor densidad y resistencia, indicando el final del desarrollo condilar y la estabilización estructural de la articulación temporomandibular. (Mérida Velasco, *et al.*, 1999, p. 21; Bordoni & Brizuela, 2025, párr.3)

La articulación temporomandibular está constituida por el cóndilo mandibular, la cavidad glenoidea del hueso temporal y el disco articular, este último presenta un tejido conectivo fibroso o fibrocartílago, lo que le da la característica de ser flexible para adaptarse a los cambios que se producen durante las fuerzas masticatorias, a diferencia del resto de articulaciones que presentan cartílago hialino en su superficie. (Alomar, *et al.*, 2007, p. 170).

Así también el cóndilo mandibular constituye una estructura fundamental en la articulación temporomandibular, ya que su cartílago condilar funciona como un centro de crecimiento que regula el desarrollo morfofuncional de la mandíbula. Este cartílago mantiene una actividad de remodelación ósea subcondral continua desde la infancia hasta la edad adulta, en respuesta a diversos estímulos funcionales, los cuales pueden modificar las características morfológicas del cóndilo, produciendo variaciones en su tamaño, forma y orientación. (Caruso, *et al.*, 2017, p.1).

En el ámbito clínico, resulta esencial comprender la morfología del cóndilo mandibular y el proceso de corticalización condilar, ya que constituye un elemento fundamental para la correcta valoración funcional de la articulación temporomandibular. Por

tanto, un diagnóstico impreciso frente a alteraciones estructurales del cóndilo puede comprometer la planificación y los resultados terapéuticos. (Ma, *et al.*, 2023, p.2389)

Diversos estudios han demostrado que la formación del hueso cortical en la superficie condilar presenta una estrecha relación con la edad y el sexo del individuo; este proceso se inicia alrededor de los 12 años y alcanza su madurez entre los 21 y 22 años, observándose una finalización más temprana en mujeres que en varones. (Ma, *et al.*, 2023, p. 2391; Larheim, *et al.*, 2024, p. 53)

Los traumatismos y las cargas excesivas generadas por los movimientos mandibulares sobre las superficies articulares del cóndilo pueden alterar su proceso de remodelación ósea. Estas modificaciones estructurales pueden desencadenar patologías como la osteoartritis, que compromete el crecimiento mandibular, o la reabsorción condilar idiopática, asociada a la aparición de retrognatia mandibular y mordida abierta anterior. (Bag, *et al.*, 2014, p. 571, 572)

En general, el tiempo de evolución de las patologías que afectan la ATM se asocia estrechamente con la magnitud del daño estructural y funcional; una evolución prolongada de la disfunción incrementa significativamente el riesgo de deformidades esqueléticas orofaciales y de limitaciones biomecánicas en funciones esenciales como la masticación, la deglución y la fonación. (Seo, *et al.*, 2022, p. 1)

En este contexto, el ortodoncista debe priorizar un diagnóstico temprano y una evaluación integral de la articulación antes de iniciar cualquier intervención terapéutica. Asimismo, la planificación y ejecución de los procedimientos ortodónticos deben desarrollarse bajo un enfoque conservador, orientado a alcanzar una oclusión funcional y estéticamente armónica en el que se debe priorizar la preservación de la estabilidad condilar dentro de una posición de relación céntrica fisiológica, condición indispensable para

garantizar la armonía interarticular y la estabilidad oclusal a largo plazo. (Mishra, *et al.*, 2021, p. 123)

Entre las alternativas terapéuticas conservadoras para el manejo de estas alteraciones se encuentran las férulas estabilizadoras, las cuales contribuyen a restablecer la simetría facial comprometida por el desgaste de las superficies condilares. Este tipo de dispositivo favorece la rotación mandibular en el plano sagital, facilitando así el reposicionamiento de la mandíbula hacia una ubicación más centrada y equilibrada respecto al eje facial. (Musa, *et al.*, 2024, p.2,3)

En el campo de la ortodoncia, el diagnóstico por imagen de la articulación temporomandibular resulta fundamental para la valoración de la salud y función articular, así como para determinar la planificación del tratamiento ortodóncico. Tradicionalmente, la radiografía bidimensional fue el método principal para el estudio de la articulación temporomandibular; sin embargo, la superposición de estructuras anatómicas y su baja sensibilidad para detectar cambios en el cóndilo y el hueso temporal limitan su exactitud diagnóstica. En las radiografías laterales del cráneo, la superposición de imágenes anatómicas y la ausencia de tejidos blandos visibles reducen aún más su utilidad clínica. (Musa, *et al.*, 2024, p.2)

En la actualidad, la tomografía computarizada y las tecnologías tridimensionales han reemplazado en gran medida a la radiografía convencional, ofreciendo una mayor precisión y fiabilidad en la evaluación de las alteraciones esqueléticas y los procesos de remodelación condilar. (Caruso, *et al.*, 2017, p. 1).

Siendo así, la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) representa una alternativa más segura y eficiente, ya que proporciona una exposición radiológica menor que

la tomografía computarizada convencional. Esta tecnología, desarrollada inicialmente en 1982 y comercializada a partir de la década de 1990, ha experimentado un notable avance técnico. (Caruso, *et al.*, 2017, p. 1).

En consecuencia, la tomografía computarizada de haz cónico se ha consolidado una herramienta fundamental en el ámbito médico y odontológico debido a su alta capacidad para evaluar con precisión la integridad de las estructuras óseas. Esta técnica permite identificar alteraciones asociadas a disfunciones articulares, determinar el grado y la etapa de progresión de los cambios morfológicos, así como realizar un seguimiento detallado de la respuesta al tratamiento. Su resolución tridimensional la convierten en un método de elección para el estudio estructural de la ATM y otras áreas de interés clínico. (Naaz, *et al.*, 2024, p. 153)

Es importante señalar que la resonancia magnética constituye la técnica de elección para el diagnóstico de las disfunciones de la ATM, debido a su alta resolución y capacidad para diferenciar con precisión los tejidos blandos. Gracias a su elevado contraste tisular y la obtención de imágenes en cortes finos, la resonancia magnética permite una visualización detallada de las estructuras intra-articulares, incluyendo el disco articular, los ligamentos y la cápsula. Además, esta modalidad posibilita la evaluación dinámica de la biomecánica mandibular durante los movimientos de apertura y cierre, ofreciendo información esencial para el diagnóstico funcional y la planificación terapéutica. (Gharavi, *et al.*, 2022, p. 3)

Todas estas herramientas mencionadas permiten evaluar con precisión la morfología condilar, el grado de corticalización, la posición del disco articular y las relaciones espaciales entre los componentes óseos y musculares. El uso adecuado de estas técnicas contribuye a identificar tempranamente alteraciones estructurales o funcionales que podrían comprometer el éxito del tratamiento ortodóncico o generar disfunciones témporomandibulares posteriores. (Bag, *et al.*, 2014, p. 580)

Las imágenes obtenidas mediante tomografías convencionales se presentan en una escala de grises con un contraste limitado, lo que dificulta la diferenciación precisa de las estructuras anatómicas finas del cóndilo mandibular y los tejidos circundantes. En este sentido, la aplicación de técnicas de pseudocoloración en imágenes tomográficas se ha convertido en una herramienta complementaria valiosa, ya que permite realzar las variaciones de densidad ósea y mejorar la visualización de la cortical condilar, facilitando así una evaluación más precisa de su morfología y de los posibles cambios asociados a procesos adaptativos o patológicos. (Rahimian, *et al.*, 2022, p. 1).

La técnica de pseudocoloración en imágenes constituye un método de procesamiento digital que asigna escalas cromáticas a imágenes originalmente en escala de grises, con el propósito de resaltar variaciones sutiles en la densidad o el contraste radiográfico. Este procedimiento permite una mejor discriminación visual de las estructuras anatómicas y facilita la identificación de detalles que podrían pasar inadvertidos en representaciones monocromáticas, optimizando así la interpretación diagnóstica. (Rahimian, *et al.*, 2022, p. 1,2).

Los avances en las tecnologías digitales han potenciado de manera significativa el análisis de imágenes radiográficas, especialmente mediante el uso de softwares especializados que permiten aplicar mapas cromáticos sobre las regiones que presentan variaciones en la densidad y espesor óseo observadas en estudios de tomografía computarizada de haz cónico (CBCT). Este procedimiento transforma los niveles de intensidad en un espectro cromático perceptible, conocido como pseudocoloración, lo que facilita la diferenciación de zonas corticales y trabeculares del cóndilo mandibular. De este modo, se optimiza la apreciación visual de las características morfológicas y se mejora la precisión diagnóstica en la evaluación

de los procesos de remodelación ósea y corticalización dentro de la articulación témporomandibular. (Evli, *et al.*, 2025, p. 2)

En el estudio realizado por (Evli, *et al.*, 2025, p. 2, 4) evidenciaron que la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT), en conjunto con herramientas digitales de procesamiento de imágenes como el software *ImageJ*, constituye un método eficaz para la valoración de las etapas de fusión de la sincondrosis esenooccipital (SOS), parámetro fundamental como indicador del cierre de ventanas del crecimiento cráneo facial, lo que reduce significativamente la respuesta a terapias ortopédicas dependientes del crecimiento, como la expansión maxilar o la utilización de aparatos funcionales. Es así que la aplicación de técnicas de pseudocoloración permite una diferenciación más precisa de las variaciones de densidad ósea, optimizando la visualización de las estructuras anatómicas involucradas en el desarrollo esquelético; en el ámbito ortodóncico, esta metodología aporta información relevante para la determinación del grado de madurez ósea y la planificación terapéutica personalizada, favoreciendo la ejecución de tratamientos en el momento oportuno y asegurando la estabilidad funcional a largo plazo del sistema estomatognático.

Para la valoración de la cortical condilar, la pseudocoloración se ha consolidado como una herramienta innovadora para la evaluación precisa del grado de desarrollo óseo. Su aplicación en estudios recientes ha permitido establecer una clasificación objetiva del estado de maduración condilar en tres etapas: no desarrollado, caracterizado por la ausencia de formación cortical en la superficie del cóndilo; en desarrollo, donde se observa una cobertura parcial de hueso cortical en la superficie articular; y desarrollado, definido por la presencia completa de hueso cortical compacto que recubre la superficie condilar. Este enfoque cromático aplicado al análisis de imágenes obtenidas mediante tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) optimiza la visualización de los límites anatómicos y la interpretación de

la densidad ósea. En consecuencia, la pseudocoloración no solo representa un avance tecnológico significativo, sino también una herramienta analítica que contribuye a la estandarización de los criterios diagnósticos y a la mejora de la reproducibilidad en la investigación y en la práctica clínica ortodóncica. (Seo, *et al.*, 2022, p.3; Ma, *et al.*, 2023, p. 2390; Bayrak, *et al.*, 2018, p. 39).

Metodología

Este trabajo se desarrolló bajo un diseño observacional, correspondiente a un estudio retrospectivo, transversal y comparativo.

El universo del estudio estuvo conformado por 325 tomografías Cone Beam (CBCT), pertenecientes al banco de imágenes del posgrado de Ortodoncia de la Universidad Hemisferios, recopiladas durante el período comprendido entre 2022 y 2025. A partir de este universo, y en función de los criterios de inclusión y exclusión establecidos, se seleccionó una muestra final de 85 tomografías CBCT que incluyó 49 mujeres y 36 hombres.

Los criterios de inclusión consideraron tomografías pertenecientes a pacientes de ambos sexos, con edades comprendidas entre 9 y 65 años, registradas en el banco de imágenes del Posgrado de Ortodoncia de la Universidad Hemisferios. Se seleccionaron únicamente tomografías con un campo de visión (FOV) amplio que abarcaran ambas articulaciones temporomandibulares, obtenidas con un tamaño de imagen de 200×17.6 mm y un vóxel isotrópico de 0.40 mm (400 μ m), manteniendo la equivalencia entre el tamaño de píxel y el vóxel. Se excluyeron tomografías de pacientes con síndromes craneofaciales, tumores, malformaciones, pacientes que presenten patologías como osteofitos, quistes y erosiones en el cóndilo mandibular derecho o izquierdo, pacientes con tratamiento de ortodoncia, imágenes CBCT de mala calidad y con presencia de artefactos.

El protocolo de investigación fue aprobado por el Comité de Ética de la Universidad Hemisferios. Para proteger la identidad de los pacientes, no se incluyeron nombres ni datos personales en los registros, la recopilación de la información se efectuó con el tomógrafo Cone Beam Planmeca ProMax® MID y procesada mediante el software Romexis Viewer 4.6.2.R (18/10/2017), número de serie TFMP. Posteriormente se procedió a guardar la información de las tomografías en un disco duro de marca Adata de 2 terabyte.

Se llevó a cabo un proceso de capacitación en el manejo e interpretación de tomografías computarizadas Cone Beam (CBCT) utilizando el software 3D Slicer, versión 5.8.1. Esta capacitación se realizó en colaboración con el especialista Esteban Eduardo Espinoza Criollo, profesional del área de Radiología del Centro Radiológico Xplora, con tres años de experiencia en el campo. Como parte del proceso de calibración, se desarrolló una sesión práctica con el objetivo de estandarizar la orientación de las imágenes en los cortes axial, sagital y coronal necesarios para obtener una ubicación correcta del cóndilo mandibular que se va a visualizar dentro del software. Posteriormente, se realizó una prueba piloto, en la cual tanto el especialista como el operador realizaron mediciones en el 10% de la muestra total, correspondiente a 10 tomografías CBCT seleccionadas al azar, con el propósito de evaluar el nivel de confiabilidad de las mediciones antes de iniciar el análisis completo de los casos.

Mediante el software 3D Slicer 5.8.1 se procedió a realizar los cortes sagital y coronal de cada cóndilo derecho e izquierdo en cada tomografía, siguiendo los ejes longitudinales de las cabezas condilares y rama mandibular en sus respectivos cortes.

Una vez ubicados los cortes, se evaluó en primera instancia la superficie superior del cóndilo, en función del estado de la cortical ósea en base a la visualización convencional en escala de grises. La clasificación se estableció en tres categorías según Lei et al. (2013, pp. 43–44), quienes distinguieron tres grados de formación cortical: ausencia de formación cortical, formación parcial y formación completa, que en este estudio se denominaron Etapa I, Etapa II y Etapa III, respectivamente, con el fin de unificar la terminología empleada.

- **Etapa I. Ausencia de formación cortical:** No se observa una capa ósea cortical compacta ni continua en la periferia del cóndilo mandibular. La superficie condilar

carece de una línea hiperdensa bien definida, lo que indica ausencia de formación cortical discernible.

- **Etapa II. Formación parcial de hueso cortical:** Corresponde a un estado intermedio entre la ausencia y la completa formación de la cortical. Se identifica una capa ósea parcialmente compacta que recubre de forma discontinua la periferia condilar, con áreas de mayor densidad lineal, pero sin continuidad completa ni homogeneidad estructural.
- **Etapa III. Formación completa de hueso cortical:** Se evidencia una capa ósea cortical continua, homogénea y compacta que rodea la periferia del cóndilo. Radiográficamente se aprecia como una línea hiperdensa continua y bien delimitada en la superficie condilar superior, característica de un hueso maduro totalmente corticalizado.

En una segunda etapa, se llevó a cabo la evaluación mediante un método de pseudocoloración basado en unidades Hounsfield, siguiendo precedentes de estudios que han empleado mapas de color para resaltar las variaciones de densidad ósea en imágenes de CBCT (Kim et al., 2021, pp. 3–4; Chung et al., 2025, pp. 411–413). Este procedimiento permitió transformar los cortes originales sagitales y coronales en escala de grises en imágenes pseudocoloreadas que facilitan la identificación de variaciones densitométricas en la cortical condilar.

Este procedimiento permitirá transformar los cortes originales a escala de grises sagitales y coronales en imágenes pseudocoloreadas.

Para este fin, se empleará la *Tabla de colorimetría para diagnóstico odontológico en 3D*, registrada en el SENADI (SENADI-2025-49878) por Dávila en el 2025, bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0. Esta herramienta permitirá transformar los cortes originales en escala de

grises, tanto sagitales como coronales, en imágenes pseudocoloreadas en base a sus unidades Hounsfield (HU), la misma que fue diseñada para la evaluación de la densidad ósea en imágenes tomográficas Cone Beam (CBCT).

Cada rango de valores HU representa un nivel específico de densidad ósea, al cual se le asigna un color particular para facilitar la visualización y diferenciación de estructuras óseas mediante pseudocoloración como se evidencia en la Figura 1.

Tabla 1.

Tabla de colorimetría para diagnóstico odontológico en 3D.

Rango HU	Color asignado
0–150	Rojo oscuro (RGB 78, 0, 0)
150–250	Rojo medio (RGB 155, 0, 0)
250–350	Rojo brillante (RGB 255, 0, 0)
350–500	Naranja (RGB 255, 155, 0)
500–600	Amarillo (RGB 255, 255, 0)
600–850	Verde lima (RGB 155, 255, 0)
850–1000	Verde brillante (RGB 0, 255, 0)
1000–1250	Verde medio (RGB 0, 155, 0)
>1250	Verde oscuro (RGB 0, 100, 0)

Dávila, C. (2025). *Tabla de colorimetría para diagnóstico odontológico en 3D*

[Archivo digital], registrado en SENADI (SENADI-2025-49878), Licencia CC BY-NC-SA

4.0.

Tabla 2.

Escala de pseudocolor y rangos de unidades Hounsfield para la evaluación condilar.

UNIDADES HOUNSFIELD	COLOR (RGB)	VISUALIZACIÓN	CATEGORIZACIÓN
150–250	Rojo medio (155, 0, 0)	Se observa predominio del color rojo medio en las áreas subcortical y condilar, sin delimitación cortical evidente.	Ausencia de formación cortical
250–350	Rojo brillante- Naranja (255, 0, 0)	Se aprecia tonalidad rojo brillante sobre la superficie condilar, sin evidencia de línea cortical definida.	Ausencia de formación cortical
350–500	Naranja (255, 155, 0)	Se identifica la aparición de color naranja continuo en la superficie condilar, indicando incremento inicial de densidad ósea.	Formación parcial de hueso cortical
500–600	Naranja Amarillo (255, 255, 0)	Se observa una línea amarilla discontinua en la superficie condilar que abarca mínimo el 50 % o más de su contorno.	Formación parcial de hueso cortical
600 – 850	Amarillo – Verde	Se observa una línea amarilla predominante pero interrumpida en la superficie condilar, acompañada de áreas transicionales en tonalidad verde lima que abarcan menos del 25 % del contorno cortical.	Formación parcial de hueso cortical
850 – 1000	Verde Lima (155, 255, 0)	Se evidencia predominio de tonalidad verde lima que ocupa mínimo el 75 % de la superficie condilar, con zonas residuales aisladas de color amarillo que indican sectores de menor densidad.	Formación completa de hueso cortical

1000 - 1250	Verde Brillante (0, 255, 0)	Se observa una línea cortical continua, definida y de alta densidad en tonalidad verde brillante.	Formación completa de hueso cortical	Iza, P.,
1000–1250	Verde Medio (0, 155, 0)	La superficie condilar muestra una línea homogénea, compacta y bien delimitada en tonalidad verde medio, correspondiente a hueso cortical maduro.	Formación completa de hueso cortical	

Vaca, M., & Espinoza, E. (2025). *Escala de pseudocolor y rangos de unidades Hounsfield para la evaluación condilar* [Elaboración propia conjunta].

Tras aplicar la pseudocoloración, se observó la cortical condilar en los cortes coronal y sagital de 20 tomografías seleccionadas, que no formaron parte de este estudio. El propósito fue identificar las zonas de osificación según las tonalidades observadas, considerando que cada color representa un rango específico de densidad ósea. Se analizó el patrón cromático de cada cóndilo y se interpretó su correspondencia con el estado de corticalización, tomando como referencia la Figura 1, que muestra la escala de pseudocolores utilizada en este estudio, lo que permitió establecer una relación directa entre las tonalidades pseudocoloreadas y el estado de densidad ósea.

A partir de esta interpretación preliminar, y con el fin de estandarizar la evaluación del grado de corticalización condilar mediante la pseudocoloración multicapas, se elaboró, en colaboración con el radiólogo Esteban Espinoza y la ortodoncista Dra. Marjory Vaca, una tabla de correspondencia que integra los rangos de unidades Hounsfield con los colores representativos y las etapas de desarrollo cortical (Etapa I, II y III) como se muestra en la Figura 2.

Se documentó la observación de las zonas de corticalización condilar mediante ambas técnicas de visualización (convencional y pseudocoloración), registrando los resultados en

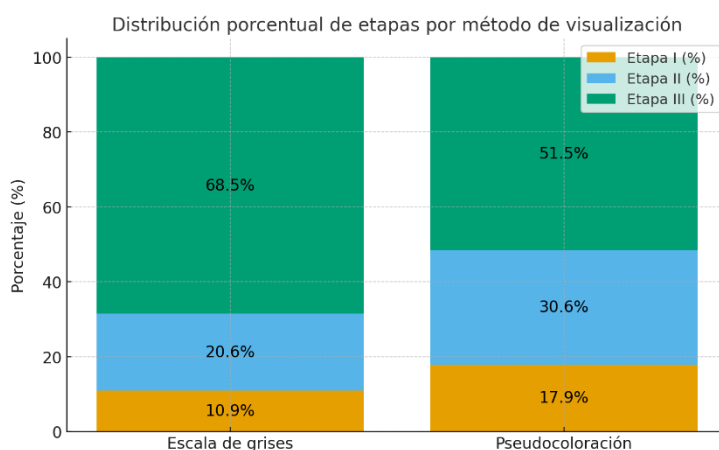
tablas elaboradas en Excel y fueron procesados con Python 3, empleando las librerías pandas, numpy, seaborn, matplotlib, scipy.stats, scikit-learn y openpyxl. Se realizaron análisis descriptivos para determinar la distribución de frecuencias en función del tipo de visualización (convencional y pseudocoloración multicapas), la edad y el sexo de los sujetos evaluados. La relación entre edad y estado de desarrollo evaluado en escala de grises se analizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, complementado con la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis como contraste de robustez. La asociación entre sexo y estado de desarrollo, así como entre lado/corte y estado de desarrollo, se examinó mediante tablas de contingencia y la prueba de chi-cuadrado de Pearson. Para evaluar la concordancia entre ambas técnicas de visualización se construyó una tabla 3×3, aplicando la prueba de chi-cuadrado de independencia y calculando el coeficiente Kappa de Cohen (no ponderado). Se estableció un nivel de significación de $\alpha = 0.05$.

Resultados

La muestra incluyó un total de 340 cortes (sagitales y coronales) correspondientes a 85 pacientes. En la evaluación en escala de grises, 37 observaciones (10.9 %) fueron clasificadas como Etapa I, 70 (20.6 %) como Etapa II y 233 (68.5 %) como Etapa III. En la evaluación mediante pseudocoloración, se registraron 61 observaciones (17.9 %) en Etapa I, 104 (30.6 %) en Etapa II y 175 (51.5 %) en Etapa III.

Figura 1.

Distribución porcentual de las etapas de corticalización condilar según el método de visualización



En ambos métodos, la Etapa III fue la más frecuente. Al comparar porcentajes entre métodos, se observó un aumento de 7.0 pp en Etapa I y 10.0 pp en Etapa II, junto con una disminución de 17.0 pp en Etapa III en la visualización con pseudocoloración respecto a la visualización convencional en escala de grises, lo que sugiere que la pseudocoloración permite identificar con mayor precisión y diferenciación las etapas más tempranas de la corticalización condilar. Se observó una asociación significativa entre la edad y las etapas de desarrollo condilar tanto en la evaluación en escala de grises como en la pseudocoloración.

Figura 2.

Distribución del estado de desarrollo condilar en visualización en escala de grises

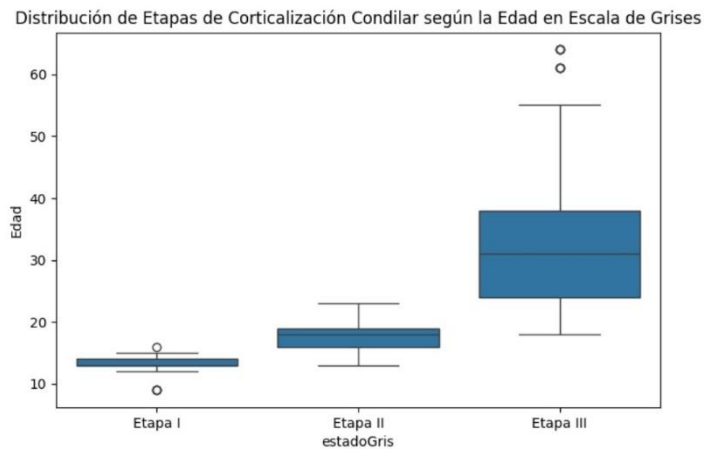
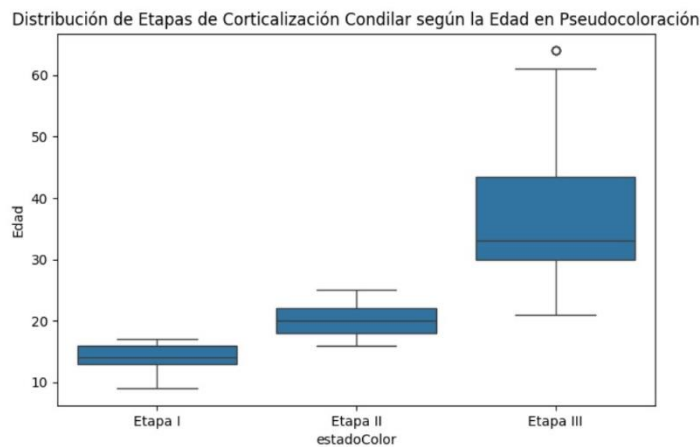


Figura 3.

Distribución del estado de desarrollo condilar en visualización en pseudocoloración

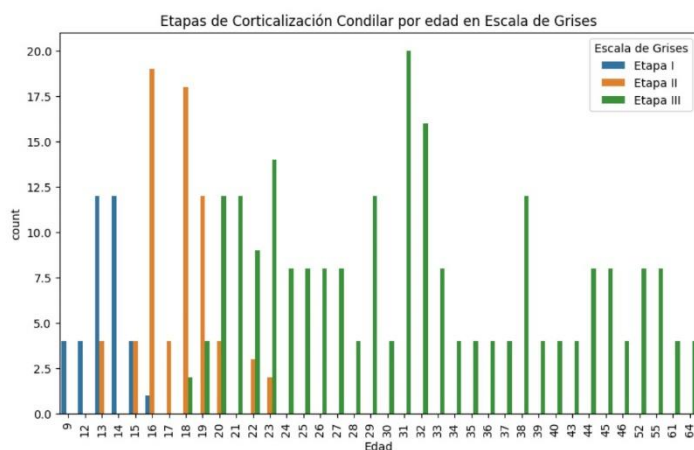


En la evaluación en escala de grises, el análisis ANOVA de un factor evidenció diferencias altamente significativas entre las edades correspondientes a cada etapa de corticalización ($F = 130.45$; $p = 1.106 \times 10^{-45}$). Estos hallazgos fueron corroborados por la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis, que igualmente confirmó la existencia de diferencias significativas entre los grupos ($p < 0.001$). En cuanto a los rangos de edad, la

Etapa I se presentó entre los 9 y 16 años ($n = 37$), la Etapa II entre los 13 y 23 años ($n = 70$) y la Etapa III desde los 18 hasta los 64 años ($n = 233$). En conjunto, estos valores evidencian un incremento progresivo de la edad a medida que avanza el grado de corticalización condilar.

Figura 4.

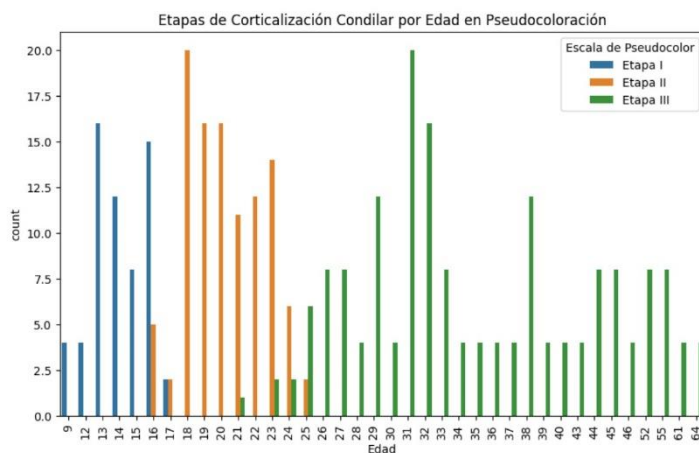
Frecuencia de etapas de corticalización condilar por edad (escala de grises)



En la evaluación mediante pseudocoloración, el análisis ANOVA de un factor mostró diferencias altamente significativas entre las edades de cada etapa ($F = 294.88$; $p = 9.368 \times 10^{-80}$). La prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis confirmó estos resultados, evidenciando nuevamente diferencias significativas entre los grupos ($p < 0.001$). En cuanto a los rangos de edad, la Etapa I se observó entre los 9 y 17 años ($n = 61$), la Etapa II entre los 16 y 25 años ($n = 104$) y la Etapa III entre los 21 y 64 años ($n = 175$), manteniendo el mismo patrón progresivo de aumento en la edad conforme avanza la maduración condilar.

Figura 5.

Frecuencia de etapas de corticalización condilar por edad (pseudocoloración)



Además, la pseudocoloración clasificó como Etapa I a individuos de mayor edad que aquellos identificados por la escala de grises, lo que sugiere que este método aplica un criterio más conservador y detallado para reconocer las fases iniciales de la corticalización condilar.

En la evaluación mediante visualización en escala de grises, no se observaron diferencias estadísticamente significativas en la distribución del grado de corticalización condilar entre sexos. En las mujeres, la mayor frecuencia correspondió a la Etapa III (135 casos), seguida de la Etapa II (48 casos) y la Etapa I (21 casos). En los hombres, predominó también la Etapa III (98 casos), seguida de la Etapa II (22 casos) y la Etapa I (16 casos).

La prueba de Chi-cuadrado indicó ausencia de asociación significativa entre el sexo y el estado de desarrollo condilar en la visualización en escala de grises ($\chi^2 = 2.717$; $p = 0.257$). Esto indica que, bajo este método de análisis, hombres y mujeres presentan una distribución comparable de las etapas de corticalización.

Tabla 3.*Grado de Corticalización respecto al sexo en escala de grises*

	Etapa I	Etapa II	Etapa III
Femenino	21	48	135
Masculino	16	22	98

Por otro lado, en la evaluación de imágenes mediante pseudocoloración, tampoco se evidenciaron diferencias significativas por sexo. En las mujeres, la Etapa III fue la más frecuente (101 casos), seguida de la Etapa II (64 casos) y la Etapa I (39 casos). En los hombres, se mantuvo un patrón similar, con predominio de la Etapa III (74 casos), seguida de la Etapa II (40 casos) y la Etapa I (22 casos).

Tabla 4.*Grado de corticalización respecto al sexo en pseudocoloración*

	Etapa I	Etapa II	Etapa III
Femenino	39	64	101
Masculino	22	40	74

La prueba de Chi-cuadrado no mostró asociación significativa entre el sexo y el estado de desarrollo en pseudocoloración ($\chi^2 = 0.876$, $p = 0.645$), confirmando que la distribución de las etapas condilares es similar entre hombres y mujeres en ambos métodos de visualización.

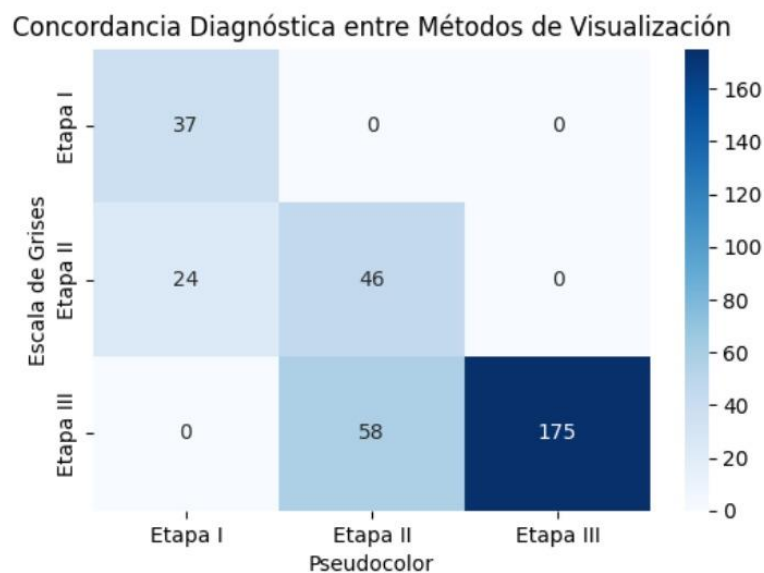
Al analizar si el lado evaluado (derecho o izquierdo) o el tipo de corte (sagital o coronal) podían influir en la clasificación de las etapas de corticalización condilar, tampoco se encontraron diferencias estadísticamente significativas en ninguno de los métodos. En la visualización en escala de grises, los resultados fueron $\chi^2 = 0.78$; $p = 0.676$ para el lado y $\chi^2 =$

0.75; $p = 0.687$ para el tipo de corte. De manera consistente, en la pseudocoloración se obtuvo $\chi^2 = 0.19$; $p = 0.909$ para el lado y $\chi^2 = 0.22$; $p = 0.895$ para el corte.

En conjunto, estos valores ($p > 0.05$) indican que las etapas de corticalización condilar no dependen del lado analizado ni del tipo de corte utilizado. Más bien, reflejan una característica anatómica propia de cada paciente, que se mantiene estable independientemente de la orientación de la imagen.

Figura 6.

Concordancia diagnóstica entre la visualización en escala de grises y pseudocoloración



Existe una coincidencia predominante en la diagonal principal, lo que indica que ambos métodos tienden a clasificar las observaciones en la misma etapa.

El análisis mediante el coeficiente Kappa de Cohen ($\kappa = 0.57$) evidenció una concordancia moderada entre ambas técnicas, lo que significa que los resultados coinciden en aproximadamente el 57 % de los casos más allá del azar.

Este hallazgo sugiere que la pseudocoloración ofrece una clasificación consistente y comparable con la obtenida por el método tradicional en escala de grises, aunque con ligeras discrepancias atribuibles a su mayor sensibilidad para distinguir las etapas iniciales de corticalización.

Discusión

La literatura señala de manera consistente que la corticalización subcondral del cóndilo mandibular avanza con la edad y presenta variaciones claras entre sus etapas, con diferencias leves entre hombres y mujeres (Lei et al., 2013). En nuestro estudio observamos que, al comparar ambos métodos, la pseudocoloración clasificó como Etapa I a pacientes ligeramente mayores que aquellos identificados mediante escala de grises. Esto sugiere que la pseudocoloración tiene un enfoque más conservador para reconocer el inicio del proceso cortical.

En la evaluación en escala de grises, las edades asociadas a cada etapa se mantuvieron dentro de lo esperado: la Etapa I se presentó principalmente entre los 9 y 16 años, la Etapa II entre los 13 y 23 años y la Etapa III desde los 18 años en adelante. Con la pseudocoloración, estos rangos se extendieron levemente, mostrando Etapa I hasta los 17 años y Etapa II entre los 16 y 25 años y la Etapa III desde los 21 en adelante. Este comportamiento evidencia un patrón de maduración más progresivo, en el que la pseudocoloración capta con mayor sensibilidad las transiciones entre etapas, especialmente en los límites de clasificación.

Al analizar los porcentajes, la pseudocoloración incrementó de forma notable la proporción de Etapa I y Etapa II, mientras redujo la Etapa III. Esto refuerza la idea de que este método distingue con mayor precisión los cambios iniciales del proceso, en comparación con la escala de grises.

Al contrastar nuestros hallazgos con lo reportado por Seo et al. (2022) y Lei et al. (2013), encontramos diferencias interesantes. Mientras estos autores señalan que la corticalización completa suele alcanzarse alrededor de los 22 a 24 años, en nuestra muestra todavía observamos casos sin corticalización definida incluso a los 16–17 años, y casos completamente corticalizados desde los 18 años. Esto podría reflejar diferencias

poblacionales, metodológicas o incluso la sensibilidad propia de la pseudocoloración para identificar áreas hipodensas que en escala de grises pasan desapercibidas.

La superposición de edades entre las Etapas II y III, en ambos métodos (Grises: 13–23 vs. 18–64; Pseudocoloración: 16–25 vs. 21–64) coincide con lo descrito por Ma et al. (2023), Bayrak et al. (2018) y Muthlakshmi et al. (2022), quienes destacan que la transición entre estas etapas suele ser amplia y heterogénea durante la segunda década de vida. Nuestros resultados, en conjunto, sugieren que la pseudocoloración tiende a retrasar la clasificación en Etapa III, lo que la convierte en una herramienta más rigurosa para identificar casos límite en el proceso de maduración cortical.

En cuanto a las diferencias por sexo, tanto en la escala de grises como en la pseudocoloración no se identificó una asociación estadísticamente significativa entre el sexo y las etapas de corticalización condilar en el análisis global (Grises: $\chi^2 = 2.717$; $p = 0.257$; Pseudocoloración: $\chi^2 = 0.876$; $p = 0.645$). Es decir, en el conjunto total de la muestra, hombres y mujeres se distribuyen de manera similar entre las etapas de maduración. Sin embargo, al analizar exclusivamente a los pacientes menores de 25 años, se observó que la mayoría de los casos clasificados en Etapa III correspondieron al sexo femenino. Este hallazgo sugiere que, en edades más tempranas, las mujeres podrían completar la corticalización ligeramente antes que los hombres, tal como señalan Seo et al. (2022) y Ma et al. (2023). Aunque esta tendencia no fue suficiente para generar una diferencia significativa en el análisis global, podría explicarse por la amplitud del rango etario de nuestra muestra y la concentración de etapas avanzadas en edades mayores, lo que minimiza las variaciones entre sexos cuando se observa el conjunto completo.

Conclusiones

En relación con el sexo, los resultados de este estudio mostraron que no existió una asociación estadísticamente significativa entre el sexo y las etapas de corticalización condilar en ninguno de los métodos de visualización utilizados (escala de grises y pseudocoloración). Esto indica que el grado de maduración cortical fue comparable entre el sexo femenino y masculino, por lo que el sexo no constituyó un factor determinante en la clasificación de la corticalización condilar en esta población.

Así también, los hallazgos de este estudio mostraron que la edad guarda una relación significativa con las etapas de corticalización condilar en ambos métodos de visualización. Esto coincide con lo señalado en estudios previos y confirma que la maduración del cóndilo ocurre de manera progresiva y ordenada, avanzando hacia etapas más desarrolladas a medida que aumenta la edad del paciente.

En el método de visualización mediante pseudocoloración, los sujetos fueron clasificados con cortical condilar no desarrollada a edades ligeramente mayores en comparación con la escala de grises. Esto sugiere que la pseudocoloración aplica un criterio más preciso y diferenciado, permitiendo observar una evolución más gradual del proceso de corticalización. De esta manera, este método contribuye a una evaluación más rigurosa en los casos cercanos a los límites entre etapas y amplía el rango etario en el que pueden identificarse características propias de la corticalización inicial.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones incluyan muestras más amplias y diversas, con análisis longitudinales que permitan establecer curvas de maduración condilar por sexo y población. Asimismo, la implementación de herramientas de pseudocoloración optimizadas, podría fortalecer la precisión diagnóstica y mejorar la reproducibilidad en la identificación de los diferentes estadios de corticalización condilar.

Referencias

- Alomar, X., Medrano, J., Cabratosa, J., Clavero, J. A., Lorente, M., Serra, I., Monill, J. M., & Salvador, A. (2007). Anatomy of the temporomandibular joint. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI*, 28(3), 170–183. <https://doi.org/10.1053/j.sult.2007.02.002>
- Bag, A. K. (2014). Imaging of the temporomandibular joint: An update. *World Journal of Radiology*, 6(8), 567. <https://doi.org/10.4329/wjr.v6.i8.567>
- Bayrak, S., Halıcıoğlu, S., Kose, G., & Halıcıoğlu, K. (2018). Evaluation of the relationship between mandibular condyle cortication and chronologic age with cone beam computed tomography. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 55, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2018.02.014>
- Bordoni, B., & Brizuela, M. (2025). Temporomandibular joint anatomy. In *StatPearls*. StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538486/>
- Caruso, S., Storti, E., Nota, A., Ehsani, S., & Gatto, R. (2017). Temporomandibular joint anatomy assessed by CBCT images. *BioMed Research International*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2916953>
- Chung, M., Zhang, W., Zhu, Y, Lv, Z., & Jiang, L. (2025). A novel system for classification for midpalatal suture ossification based on pseudocolored and multilayer reconstructed coronal slices: Indication for selection of maxillary expansion methods. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2024.10.019>
- Evli, C., Uzun, S., & Mağat, G. (2025). Evaluation of growth and development period according to spheno-occipital synchondrosis fusion stages in cone-beam computed tomography with ImageJ program. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92098-2>

- Gharavi, S. M., Qiao, Y., Faghihimehr, A., & Vossen, J. (2022). Imaging of the temporomandibular joint. *Diagnostics*, *12*(4).
<https://doi.org/10.3390/diagnostics12041006>
- Giudice, A. L., Rustico, L., Caprioglio, A., Migliorati, M., & Nucera, R. (2020). Evaluation of condylar cortical bone thickness in patient groups with different vertical facial dimensions using cone-beam computed tomography. *Odontology*, *108*(4), 669–675.
<https://doi.org/10.1007/s10266-020-00510-2>
- Kim, Y. H. (2023). *Medición automatizada del espesor cortical de la cabeza del cóndilo mandibular en imágenes CBCT mediante un método de aprendizaje profundo*. Random House Audio.
- Kim, Y. H., Shin, J. Y., Lee, A., Park, S., Han, S. S., & Hwang, H. J. (2021). Automated cortical thickness measurement of the mandibular condyle head on CBCT images using a deep learning method. *Scientific Reports*, *11*(1), 14852.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-94362-7>
- Larheim, T. A., Hol, C., Løseth, G., & Arvidsson, L. Z. (2024). Temporomandibular joint pathologies: Pictorial review. *British Journal of Radiology*, *97*(1153), 53–67.
<https://doi.org/10.1093/bjr/tqad021>
- Lei, J., Liu, M. Q., Yap, A. U., & Fu, K. Y. (2013). Formación subcondral condilar del hueso cortical en adolescentes y adultos jóvenes. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, *51*(1), 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2012.02.006>
- Loza, F. S. L., Ballón, W. M. C., & Jara, E. G. M. (2022). Articulación temporomandibular: Revisión general. *Revista Peruana de Morfología*, *3*(1), 50–56.
<https://doi.org/10.51343/revperuanamorfologia.v3i1.830>

- Ma, R. H., Feng, J. L., Bornstein, M. M., & Li, G. (2023). Relationship between development of the condylar cortex and the changes in condyle morphology: A cone-beam computed tomography (CBCT) observational study. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 13(4), 2388–2396. <https://doi.org/10.21037/qims-22-891>
- Mérida-Velasco, J. R., Rodríguez-Vázquez, J. F., Mérida-Velasco, J. A., Sánchez-Montesinos, I., Espín-Ferra, J., & Jiménez-Collado, J. (1999). Development of the human temporomandibular joint. *Anatomical Record*, 255(1), 20–33. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0185\(19990501\)255:1<20::aid-ar4>3.0.co;2-n](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0185(19990501)255:1<20::aid-ar4>3.0.co;2-n)
- Mishra, S. V., Kulshrestha, R., Tandon, R., Chauhan, A., Chandra, P., Mishra, A., & Shah, K. (2021). Temporomandibular joint and orthodontics – A contemporary review. *IP Indian Journal of Orthodontics and Dentofacial Research*, 7(2), 123–127. <https://doi.org/10.18231/j.ijodr.2021.022>
- Mizoguchi, I., Toriya, N., & Nakao, Y. (2013). Crecimiento de la mandíbula y características biológicas del cartílago del cóndilo mandibular. *Japanese Dental Science Review*, 49(4), 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2013.07.004>
- Musa, M., Awad, R., Izeldin, S., Zhao, Y., Wu, H., Wang, L., Al-hadad, S. A., Saif, B. S., Ahmed, M. M. S., & Chen, X. (2024). Quantitative and qualitative condylar changes following stabilization splint therapy in patients with temporomandibular joint disorders with and without skeletal lateral mandibular asymmetry: A cone beam computed tomographic study. *BMC Oral Health*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04119-7>
- Muthlakshmi, K. S. S., Krithika, C. L., & Asokan, K. (2022). Evaluación y correlación de la corticación condilar mediante cone-beam tomografía computarizada: Un estudio

retrospectivo. *Contemporary Clinical Dentistry*, 13(1), 30–34.

https://doi.org/10.4103/ccd.ccd_341_20

Naaz, D. S., Vasu, D. S. S., Neha, D. A., Sudhir, D. S., Kant, D. C. K., & Soni, D. K. (2024).

Diagnostic imaging of temporomandibular joint – A review. *Saudi Journal of Oral and Dental Research*, 9(7), 151–159. <https://doi.org/10.36348/sjodr.2024.v09i07.004>

Rahimian, A., Etehadtavakol, M., Moslehi, M., & Ng, E. Y. (2022). Comparing different algorithms for the pseudo-coloring of myocardial perfusion single-photon emission computed tomography images. *Journal of Imaging*, 8(12).

<https://doi.org/10.3390/jimaging8120331>

Seo, Y. S., Park, H. J., Yu, S. K., Jeong, S. R., & Ryu, J. W. (2022). Evaluation of cortical bone formation on mandibular condyle in asymptomatic adolescents and young adults using cone-beam computed tomography. *Life*, 12(12), 2032.

<https://doi.org/10.3390/life12122032>