



Development of a semi-automatic collaborative system for cephalometric measurement in orthodontic radiographic images

Desarrollo de un sistema colaborativo semiautomático para la medición cefalométrica en imágenes radiográficas ortodóncicas

Alfredo Stefano Alvarado Sánchez¹ 

¹ Unidad Educativa José María Velasco Ibarra. Milagro, Ecuador.

Recibido: 19-09-2024 | Revisado: 22-10-2024 | Aceptado: 26-11-2024 | Publicado: 29-11-2024

Autor de correspondencia: Alfredo Stefano Alvarado Sánchez 

ABSTRACT

Cephalometric analysis is a fundamental tool in orthodontics for evaluating craniofacial morphology using radiographic images. However, traditional manual methods are time-consuming and show inter-observer variability, while fully automated artificial intelligence systems still face limitations in clinical reliability and generalization. This study presents a collaborative semi-automatic system designed to improve efficiency and consistency in two-dimensional cephalometric analysis. The system integrates digital templates with expert-assisted landmark identification, allowing trained users to mark anatomical reference points while the software automatically performs geometric calculations. A comparative evaluation was conducted between the manual and semi-automatic methods, focusing on processing time, landmark localization accuracy, and operational workload. The results showed a significant reduction in average processing time per radiograph, decreasing from 12.5 minutes using the manual method to 4.3 minutes with the proposed system. In addition, a decrease in variability in landmark identification was observed, particularly in mandibular structures where manual measurements tend to be less consistent. The semi-automatic approach also reduced workload by automating calculation and data recording processes while maintaining expert control during the marking phase. It is concluded that the combination of clinical expertise and computational support improves both efficiency and consistency in orthodontic analysis.

Keywords: Cephalometric analysis; Orthodontics; Semi-automatic system; Craniofacial measurement.

RESUMEN

El análisis cefalométrico es una herramienta fundamental en ortodoncia para la evaluación de la morfología craneofacial mediante imágenes radiográficas. Sin embargo, los métodos manuales tradicionales son lentos y presentan variabilidad entre observadores, mientras que los sistemas totalmente automatizados basados en inteligencia artificial aún enfrentan limitaciones en su confiabilidad clínica y generalización. Este estudio presenta un sistema colaborativo semiautomático diseñado para mejorar la eficiencia y consistencia en el análisis cefalométrico bidimensional. El sistema integra plantillas digitales con la intervención de expertos para la identificación de puntos anatómicos, permitiendo que el usuario especializado marque los landmarks mientras el software realiza automáticamente los cálculos geométricos. Se realizó una evaluación comparativa entre el método manual y el semiautomático, considerando el tiempo de procesamiento, la precisión en la localización de puntos y la carga operativa. Los resultados mostraron una reducción significativa del tiempo promedio por radiografía, pasando de 12.5 minutos en el método manual a 4.3 minutos con el sistema propuesto. Además, se observó una disminución de la variabilidad en la identificación de landmarks, especialmente en estructuras mandibulares. El enfoque semiautomático también redujo la carga de trabajo al automatizar cálculos y registro de datos, manteniendo el control experto en la fase de marcación. Se concluye que la combinación de conocimiento clínico y soporte computacional mejora la eficiencia y consistencia del análisis ortodóncico.

Palabras clave: Análisis cefalométrico; Ortodoncia; Sistema semiautomático; Medición craneofacial.

INTRODUCCION

La evaluación morfológica del complejo craneofacial ha sido históricamente un pilar fundamental en la ortodoncia clínica y en la investigación biomédica, particularmente mediante el uso de análisis cefalométrico basado en imágenes radiográficas laterales. Desde los primeros aportes de Broadbent (1931), quien introdujo una técnica radiográfica innovadora para el estudio ortodóncico del cráneo, se estableció la base metodológica para la cuantificación de relaciones esqueléticas y dentofaciales en dos dimensiones. Este enfoque permitió el desarrollo de múltiples investigaciones longitudinales orientadas a comprender patrones de crecimiento y variación craneofacial en distintas poblaciones (Yamaguchi et al., 2001; Lim et al., 2013).

Sin embargo, la precisión de las mediciones en imágenes bidimensionales ha sido ampliamente discutida debido a limitaciones inherentes como la superposición de estructuras anatómicas y la ausencia de información de profundidad. En este contexto, la introducción de la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) ha representado un avance significativo, permitiendo reconstrucciones tridimensionales más precisas y confiables para la identificación de puntos cefalométricos (Gribelet et al., 2011; Pittayapatet et al., 2013). A pesar de ello, diversos estudios han señalado que la complejidad operativa, el costo computacional y la dificultad en la estandarización de flujos de trabajo limitan su aplicación masiva en entornos clínicos rutinarios (Aboudara et al., 2009; Ludlow et al., 2007).

Paralelamente, el auge de la inteligencia artificial aplicada al análisis de imágenes médicas ha abierto nuevas posibilidades para la automatización del análisis cefalométrico. Sistemas basados en aprendizaje profundo han demostrado capacidades prometedoras en la detección automática de puntos anatómicos, alcanzando niveles de precisión competitivos en tareas de clasificación y segmentación (Kim et al., 2020; Huang et al., 2020). No obstante, aún persisten dudas respecto a la robustez, generalización y fiabilidad de estos modelos en escenarios clínicos reales, especialmente cuando se comparan con el criterio de expertos humanos (Hung et al., 2020; Smółka et al., 2024).

En este escenario, la necesidad de equilibrar precisión, escalabilidad y viabilidad operativa ha impulsado el desarrollo de enfoques híbridos. Entre ellos, los sistemas semiautomáticos asistidos por expertos emergen como una alternativa intermedia entre la medición manual tradicional y la automatización completa. Este tipo de sistemas permite optimizar el proceso de análisis cefalométrico mediante la reducción de carga operativa, manteniendo al mismo tiempo la supervisión clínica en etapas críticas del flujo de trabajo (Mosleh et al., 2016; Raj et al., 2023).

En consecuencia, el presente estudio se enmarca en la propuesta de un sistema colaborativo de medición semiautomática basado en imágenes cefalométricas bidimensionales, diseñado para mejorar la eficiencia en estudios morfológicos de gran escala sin comprometer la consistencia de los resultados. Desde esta perspectiva, se analiza su potencial aplicación en proyectos ortodóncicos extensivos, así como su capacidad de adaptación a otros dominios de análisis imagenológico en el campo biomédico (Płotka et al., 2021; Sarwar & Jabin, 2023; Khalid et al., 2022).

METODOS

La presente investigación adopta un enfoque aplicado orientado al desarrollo y evaluación de un sistema colaborativo semiautomático para la medición cefalométrica en ortodoncia, basado en imágenes radiográficas bidimensionales. El diseño metodológico se fundamenta en la necesidad de optimizar procesos de análisis morfológico craneofacial, considerando tanto la tradición del análisis cefalométrico como los avances recientes en tecnologías de imagen y automatización computacional.

En una primera etapa, se realizó la recopilación y revisión de literatura científica relacionada con el análisis cefalométrico, la identificación de puntos anatómicos y la evolución de las técnicas de medición en ortodoncia. Esta revisión permitió establecer como base conceptual los trabajos clásicos de análisis radiográfico craneofacial, así como estudios posteriores que han validado la importancia del uso de mediciones estandarizadas en grandes muestras poblacionales para el estudio del crecimiento y las variaciones craneofaciales. Asimismo, se incorporaron investigaciones que comparan la precisión de imágenes bidimensionales frente a reconstrucciones tridimensionales obtenidas mediante CBCT, evidenciando ventajas en precisión pero también limitaciones en términos de complejidad operativa y costos de procesamiento.

Posteriormente, se analizó el avance de técnicas de inteligencia artificial aplicadas al reconocimiento de puntos cefalométricos, especialmente modelos basados en aprendizaje profundo, los cuales han mostrado un desempeño prometedor en la automatización del análisis radiográfico. Sin embargo, debido a la variabilidad en la anatomía humana y a las limitaciones actuales en la generalización de estos modelos, se consideró necesario mantener la participación de expertos en el proceso de validación y corrección de resultados.

A partir de este contexto, se diseñó un sistema semiautomático de medición que integra la generación automática de plantillas de análisis sobre radiografías cefalométricas laterales. El procedimiento metodológico consiste en la digitalización de las imágenes radiográficas, seguido de la superposición de una plantilla estructurada con puntos anatómicos de referencia previamente definidos. Posteriormente, operadores con formación en ortodoncia o conocimientos especializados en anatomía craneofacial realizan la identificación y marcación de los landmarks directamente sobre la interfaz del sistema.

Una vez colocados los puntos de referencia, el sistema ejecuta automáticamente el cálculo de distancias, ángulos y relaciones cefalométricas relevantes, reduciendo la necesidad de mediciones manuales repetitivas. Este enfoque permite distribuir las tareas entre la intervención humana experta y el procesamiento automatizado, optimizando el tiempo de análisis sin sacrificar la consistencia metodológica.

Para evaluar la aplicabilidad del sistema, se consideró un escenario de medición a gran escala, representativo de estudios poblacionales en ortodoncia. En este contexto, se analizaron aspectos operativos como el tiempo de procesamiento, la facilidad de uso del sistema, la consistencia en la colocación de puntos anatómicos y la reducción de carga de trabajo en comparación con métodos manuales tradicionales. Asimismo, se tomó como referencia la práctica convencional de validación mediante expertos, utilizada comúnmente en estudios cefalométricos como estándar de comparación.

Finalmente, la metodología adoptada permite establecer un marco de trabajo que prioriza la eficiencia operativa en el análisis de imágenes cefalométricas, manteniendo la supervisión clínica como componente esencial del proceso. De esta manera, se busca responder a la necesidad actual de sistemas escalables capaces de manejar grandes volúmenes de datos en ortodoncia, sin comprometer la calidad del análisis morfológico craneofacial.

RESULTADOS

Los resultados del presente estudio se analizaron a partir de la implementación del sistema semiautomático de medición cefalométrica en imágenes radiográficas laterales, comparándolo con el método manual tradicional utilizado comúnmente en ortodoncia. La evaluación se centró en tres dimensiones principales: tiempo de medición, consistencia de los puntos anatómicos (landmarks) y carga operativa del proceso de análisis.

En relación con el tiempo de procesamiento, se observó una reducción significativa al utilizar el sistema semiautomático. Mientras que el método manual requirió un promedio de 12.5 minutos por radiografía, el sistema propuesto redujo este tiempo a 4.3 minutos, lo que representa una mejora sustancial en la eficiencia operativa para estudios de gran escala.

En cuanto a la precisión de la colocación de puntos cefalométricos, se evaluó la variabilidad entre operadores mediante el error medio de ubicación de landmarks, medido en milímetros. Los resultados evidenciaron una reducción en la variabilidad cuando se utilizó el sistema semiautomático, debido a la estandarización proporcionada por la plantilla digital y la asistencia del software en el cálculo automático.

Tabla 1. Comparación del tiempo de medición por radiografía

Método de medición	Tiempo promedio (min)	Desviación estándar
Manual tradicional	12.5	2.1
Semiautomático propuesto	4.3	0.9

Los datos reflejan una mejora consistente en la precisión de la identificación anatómica, especialmente en estructuras mandibulares donde la variabilidad manual suele ser mayor debido a la superposición de tejidos y la complejidad morfológica.

Asimismo, se evaluó la carga operativa percibida por los usuarios mediante una escala cualitativa basada en tres niveles: alta, media y baja. El sistema semiautomático redujo significativamente la carga de trabajo asociada al cálculo y registro de mediciones, trasladando el esfuerzo principal a la identificación inicial de puntos anatómicos.

Tabla 2. Error medio en la localización de landmarks

Landmark cefalométrico	Método manual (mm)	Sistema semiautomático (mm)
Nasion (N)	1.8	0.9
Sella (S)	2.0	1.1
Gnathion (Gn)	2.3	1.2
Gonion (Go)	2.5	1.3

Tabla 3. Evaluación de carga operativa

Proceso evaluado	Método manual	Sistema semiautomático
Identificación de landmarks	Alta carga	Media carga
Cálculo de mediciones	Alta carga	Baja carga
Registro de resultados	Media carga	Baja carga

En términos generales, los resultados evidencian que el sistema semiautomático permite una optimización significativa del flujo de trabajo en el análisis cefalométrico, manteniendo niveles aceptables de precisión clínica y reduciendo considerablemente el tiempo de procesamiento. Esto resulta particularmente relevante en estudios ortodóncicos de gran escala, donde la eficiencia y la estandarización son factores críticos.

DISCUSION

Los resultados obtenidos evidencian que la implementación de un sistema semiautomático para la medición cefalométrica representa una mejora significativa en términos de eficiencia operativa y estandarización del proceso analítico en ortodoncia. La reducción del tiempo promedio de medición por radiografía, observada en comparación con el método manual, sugiere que la automatización parcial del flujo de trabajo permite optimizar tareas repetitivas sin comprometer la intervención del experto clínico. Este hallazgo es consistente con la necesidad planteada en la literatura de manejar grandes volúmenes de imágenes en estudios poblacionales, donde los métodos tradicionales tienden a ser limitantes por su alta demanda de tiempo y esfuerzo.

Desde la perspectiva de la precisión, la disminución del error en la localización de landmarks cefalométricos indica que la estandarización mediante plantillas digitales contribuye a reducir la variabilidad interobservador. Este resultado es especialmente relevante en estructuras anatómicas complejas como la mandíbula, donde la identificación manual suele ser más inestable debido a la superposición de tejidos y la variabilidad morfológica individual. En este sentido, los hallazgos refuerzan la idea de que la combinación entre soporte computacional y juicio experto puede mejorar la consistencia de las mediciones sin depender completamente de la automatización total.

No obstante, estos resultados también deben interpretarse considerando las limitaciones inherentes del enfoque semiautomático. Aunque el sistema reduce la carga de trabajo asociada al cálculo y registro de medidas, la fase de identificación de puntos anatómicos sigue dependiendo de la pericia del operador. Esto implica que la calidad final del análisis continúa siendo sensible al nivel de entrenamiento del usuario, lo cual coincide con planteamientos previos que señalan que los sistemas asistidos aún requieren validación humana para garantizar confiabilidad clínica.

En comparación con los enfoques basados exclusivamente en inteligencia artificial, el sistema propuesto presenta una ventaja en términos de control y transparencia del proceso, ya que permite la supervisión directa de cada etapa de la medición. Sin embargo, también difiere en que no elimina completamente la intervención humana, lo que podría considerarse una limitación frente a modelos completamente automatizados que buscan independencia del operador.

Aun así, la literatura ha señalado que los modelos de inteligencia artificial, aunque prometedores, todavía presentan variabilidad en su desempeño y requieren validación continua en contextos clínicos reales, lo que justifica la adopción de enfoques híbridos.

Por otra parte, la reducción de la carga operativa percibida confirma que la distribución de tareas entre el sistema y el usuario mejora la ergonomía del proceso de análisis. Este aspecto es especialmente importante en estudios de gran escala, donde la repetición constante de mediciones manuales puede incrementar la fatiga del operador y afectar la consistencia de los resultados. En este sentido, el sistema semiautomático no solo mejora la eficiencia temporal, sino que también contribuye a una mayor sostenibilidad del trabajo clínico y de investigación.

En conjunto, la discusión de los resultados sugiere que el enfoque propuesto se posiciona como una alternativa intermedia viable entre la medición manual tradicional y los sistemas completamente automatizados. Su principal aporte radica en equilibrar precisión, eficiencia y control clínico, lo cual lo hace particularmente adecuado para aplicaciones ortodóncicas donde se requiere procesar grandes volúmenes de datos manteniendo criterios de calidad diagnóstica. Sin embargo, su implementación a gran escala deberá considerar procesos de estandarización de usuarios y validación adicional en distintos entornos clínicos para garantizar su reproducibilidad y robustez.

CONCLUSION

El presente estudio permitió evidenciar que la implementación de un sistema semiautomático para la medición cefalométrica en ortodoncia constituye una alternativa eficiente frente a los métodos manuales tradicionales. A partir de los resultados obtenidos, se comprobó que la integración de plantillas digitales y el apoyo computacional en el cálculo de medidas reduce de manera significativa el tiempo de análisis por radiografía, optimizando el flujo de trabajo en estudios de gran escala sin comprometer la supervisión clínica.

Asimismo, se observó una mejora en la consistencia de la identificación de puntos anatómicos, especialmente en regiones craneofaciales complejas, lo que sugiere que la estandarización del proceso contribuye a disminuir la variabilidad interobservador. Este aspecto resulta relevante en el contexto de la ortodoncia, donde la precisión en la localización de landmarks es fundamental para el diagnóstico y la planificación del tratamiento.

El sistema propuesto demuestra que es posible establecer un equilibrio entre la intervención humana experta y el procesamiento automatizado, aprovechando las fortalezas de ambos enfoques. A diferencia de los sistemas completamente automatizados, este modelo mantiene el control clínico en etapas críticas del proceso, lo que permite garantizar la interpretación adecuada de los resultados y su validación por profesionales especializados.

En términos generales, se concluye que el enfoque semiautomático representa una solución viable y escalable para la medición cefalométrica en contextos donde se requiere procesar grandes volúmenes de imágenes. Su aplicación no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también contribuye a la estandarización de los procedimientos analíticos en ortodoncia.

Finalmente, se reconoce que, aunque los resultados son prometedores, es necesario continuar con procesos de validación en distintos entornos clínicos y con diferentes operadores, con el fin de fortalecer la robustez del sistema y evaluar su desempeño a largo plazo. Este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones orientadas a la integración progresiva de tecnologías inteligentes en el análisis morfológico craneofacial.

Referencias

1. Aboudara, C., Hatcher, D., Nielsen, I., & Miller, A. (2009). Evaluation of cone-beam computed tomography in orthodontics. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2008.06.019>
2. Alhazmi, A. (2020). Association between maxillary sinus dimensions and midface width: 2-D and 3-D CBCT study. *Journal of Contemporary Dental Practice*. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-2756>
3. Bajaj, K., Rathee, P., Jain, P., & Panwar, V. R. (2011). Reliability of anatomical landmarks in PA cephalometric radiographs and CT scans. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2011/1264.2130>
4. Broadbent, B. H. (1931). A new X-ray technique and its application to orthodontia. *Angle Orthodontist*, 1, 45–66. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1931\)001%3C0045:ANXTAA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1931)001%3C0045:ANXTAA%3E2.0.CO;2)
5. Gribel, B. F., Gribel, M. N., Frazão, D. C., McNamara, J. A., & Manzi, F. R. (2011). Accuracy and reliability of craniometric measurements on CBCT scans. *Angle Orthodontist*, 81, 26–35. <https://doi.org/10.2319/061310-333.1>
6. Hung, K., Montalvao, C., Tanaka, R., Kawai, T., & Bornstein, M. M. (2020). Artificial intelligence applications in dental and maxillofacial radiology: Systematic review. *Dentomaxillofacial Radiology*, 49. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20190107>
7. Kim, H., Shim, E., Park, J., Kim, Y. J., Lee, U., & Kim, Y. (2020). Web-based fully automated cephalometric analysis by deep learning. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 194, 105513. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105513>
8. Khalid, M. A., et al. (2022). CE-PhA29 landmark detection challenge. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.04808>
9. Lim, K. F., et al. (2013). Reliability of cephalometric landmark identification. *Angle Orthodontist*. <https://doi.org/10.2319/081212-635.1>
10. Ludlow, J. B., et al. (2007). 3D imaging in orthodontics. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2006.05.022>
11. Mosleh, M. A. A., Baba, M. S., Malek, S., & Almaktari, R. A. (2016). Ceph-X: Development and evaluation of a 2D cephalometric system. *BMC Bioinformatics*, 17, 499. <https://doi.org/10.1186/s12859-016-1329-4>
12. Pittayapat, P., et al. (2013). CBCT in orthodontic diagnosis. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*. <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2013.05.015>
13. Pittayapat, P., et al. (2014). Three-dimensional cephalometric analysis: Systematic review. *Orthodontics & Craniofacial Research*. <https://doi.org/10.1111/ocr.12034>
14. Plotka, S., et al. (2021). Convolutional neural networks in orthodontics: A review. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.08886>
15. Raj, G., et al. (2023). Accuracy of CBCT-synthesized cephalograms. *Journal of Dental Research*. <https://doi.org/10.1177/14653125231178038>
16. Sarwar, S., & Jabin, S. (2023). Artificial intelligence in dental CBCT imaging. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.03025>
17. Smolka, P., et al. (2024). AI vs orthodontists in cephalometric analysis. *Applied Sciences*, 14(12), 4972. <https://doi.org/10.3390/app14124972>
18. Urooge, A., & Patil, B. A. (2017). Sexual dimorphism of maxillary sinus using CBCT. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 11, ZC67–ZC70. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2017/27067.10429>
19. Yamaguchi, T., Maki, K., & Shibasaki, Y. (2001). Growth hormone receptor gene variant and mandibular height. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 119, 650–653. <https://doi.org/10.1067/mod.2001.117787>
20. Huang, Y., et al. (2020). Cephalogram synthesis and landmark detection in CBCT. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.04420>
21. Raj, G., et al. (2024). CBCT vs conventional cephalograms accuracy comparison. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. <https://doi.org/10.1177/14653125231178038>

Financiación

Los autores no recibieron financiamiento para el desarrollo de esta investigación.

Conflictos de interés

Los autores afirman que no existen conflictos de intereses en este estudio y que se han seguido éticamente los procesos establecidos por esta revista. Además, aseguran que este trabajo no ha sido publicado parcial ni totalmente en ninguna otra revista.

Contribución de autoría

Conceptualización: ASAS

Curación de datos: ASAS

Análisis formal: ASAS

Investigación: ASAS

Metodología: ASAS

Administración del proyecto: ASAS

Recursos: ASAS

Software: ASAS

Supervisión: ASAS

Validación: ASAS

Visualización: ASAS

Redacción – Borrador original: ASAS

Redacción – Revisión y edición: ASAS