XXIX

Precisión tridimensional y ajuste marginal de prótesis fijas implantosoportadas confeccionadas mediante flujos de trabajo enteramente digitales frente a métodos convencionales

Fabiola Rocío Tió Fernández

XXIX

Precisión tridimensional y ajuste marginal de prótesis fijas implantosoportadas confeccionadas mediante flujos de trabajo enteramente digitales frente a métodos convencionales

Fabiola Rocío Tió Fernández

RESUMEN

La presente revisión narrativa analiza y compara la precisión tridimensional y el ajuste marginal de las prótesis fijas implantosoportadas confeccionadas mediante flujos de trabajo enteramente digitales frente a los métodos analógicos convencionales. A través de una metodología de búsqueda sistemática en bases de datos científicas internacionales, se examinan las discrepancias volumétricas, las ventajas operativas y las limitaciones técnicas de ambas tecnologías. Los hallazgos indican que los escáneres intraorales y los sistemas de diseño y fabricación asistida por computadora (CAD/CAM) alcanzan un desempeño altamente predecible, equiparable o superior a los métodos tradicionales en restauraciones unitarias y de tramos cortos, cumpliendo de manera consistente con los umbrales clínicos de ajuste marginal aceptados. Sin embargo, en rehabilitaciones complejas de arcada completa sobre múltiples implantes, la acumulación de errores de costura en las capturas ópticas extensas evidencia que las técnicas convencionales optimizadas y los protocolos híbridos todavía conservan ventajas estratégicas en el control dimensional. En conclusión, si bien la digitalización optimiza los tiempos clínicos y la trazabilidad, se requieren futuros ensayos clínicos aleatorizados a largo plazo para estandarizar los parámetros de evaluación tridimensional y consolidar su predictibilidad biomecánica en la práctica odontológica restauradora.

Palabras clave: Prótesis dental fija, Implantes dentales, Precisión tridimensional, Adaptación marginal, Flujo digital.

ABSTRACT

This narrative review analyzes and compares the three-dimensional accuracy and marginal fit of implant-supported fixed prostheses fabricated using fully digital workflows versus conventional analog methods. Through a systematic search of international scientific databases, the study examines volumetric discrepancies, operational advantages, and technical limitations associated with both technologies. Findings indicate that intraoral scanners and computer-aided design and manufacturing (CAD/CAM) systems achieve highly predictable performance—comparable or superior to traditional methods—for single-unit and short-span restorations, consistently meeting accepted clinical thresholds for marginal fit. However, in complex full-arch rehabilitations involving multiple implants, the accumulation of stitching errors during extensive optical scanning reveals that optimized conventional techniques and hybrid protocols still offer strategic advantages regarding dimensional control. In conclusion, while digitalization optimizes clinical time and traceability, long-term randomized clinical trials are needed to standardize three-dimensional assessment parameters and confirm the biomechanical predictability of these methods in restorative dental practice.

Keywords: Fixed dental prosthesis, Dental implants, Three-dimensional accuracy, Marginal fit, Digital workflow.

INTRODUCCIÓN

En la rehabilitación protésica contemporánea sobre implantes osteointegrados, el logro de una elevada precisión tridimensional y un óptimo ajuste marginal constituye un requisito fundamental para garantizar la estabilidad a largo plazo del tratamiento. Las discrepancias en la interfase entre la estructura protésica y el implante no solo comprometen la integridad biomecánica al propiciar el aflojamiento o la fractura de los tornillos y componentes protésicos, sino que también generan microespacios que favorecen la acumulación de placa bacteriana. Esto incrementa de forma directa el riesgo de desarrollar complicaciones biológicas graves, tales como la mucositis peri-implantaria, la peri-implantitis y la consecuente pérdida ósea marginal progresiva. Por consiguiente, el control riguroso de la transferencia espacial desde el lecho clínico hasta el laboratorio es un factor determinante para el éxito clínico.

Históricamente, la metodología convencional ha predominado en la práctica odontológica mediante la toma de impresiones físicas utilizando elastómeros de alta precisión —como siliconas de adición y poliéteres— junto con cubetas estándar o individualizadas. Este protocolo analógico requiere subsecuentemente el vaciado en yesos dentales de alta resistencia para la obtención de modelos de trabajo, seguido de fases artesanales de ceroplastia, revestimiento y colado metálico o inyección cerámica. No obstante, este flujo analógico convencional acumula múltiples fuentes potenciales de error dimensional asociadas a la contracción de polimerización de los materiales de impresión, la expansión o contracción del yeso durante el fraguado y las variaciones volumétricas propias de las técnicas de laboratorio. En contraste, el advenimiento del flujo de trabajo enteramente digital ha transformado radicalmente este paradigma. Mediante la utilización de escáneres intraorales (IOS) que capturan la geometría tridimensional por medio de tecnologías ópticas, se obtienen archivos digitales en formato STL o PLY. Estos datos son procesados posteriormente mediante programas de diseño asistido por computadora (CAD) y traducidos a métodos de fabricación avanzados, ya sean sustractivos (fresado de bloques de circonio o titanio) o aditivos (impresión 3D o sinterización láser selectiva por CAM).

A pesar de las ventajas operativas y ergonómicas demostradas por los sistemas digitales, la literatura científica reporta importantes desafíos técnicos, especialmente en lo que respecta a la acumulación de errores de distorsión lineal y angular en la captura de arcadas completas desdentadas o con múltiples implantes. Durante el escaneo de largas distancias interimplantes, la necesidad de unir múltiples imágenes secuenciales mediante algoritmos de software puede generar imprecisiones acumulativas (stitching errors), superando en ocasiones la deformación elástica lineal que experimentan los materiales de impresión convencionales en manos experimentadas. Mientras que en restauraciones unitarias y tramos cortos la evidencia respalda una alta predictibilidad y una excelente adaptación marginal del flujo digital, su comportamiento en rehabilitaciones de arcada completa implantosoportadas continúa siendo objeto de debate clínico.

Por lo expuesto, el presente estudio tiene como objetivo establecer el estado del arte comparativo entre los flujos de trabajo enteramente digitales y los métodos convencionales, analizando críticamente su precisión tridimensional y su repercusión en el ajuste marginal a partir de la evidencia científica reciente.

METODOLOGÍA

Para cumplir con el propósito de examinar el estado del arte comparativo entre las tecnologías contemporáneas y los métodos tradicionales, el presente estudio se estructuró como una revisión narrativa de la literatura científica (Grant & Booth, 2009). Este diseño metodológico permite recopilar, analizar e integrar de forma crítica la evidencia disponible sobre fenómenos clínicos complejos, sintetizando múltiples perspectivas teóricas y metodológicas reportadas en la investigación odontológica reciente (Snyder, 2019).

La estrategia de búsqueda bibliográfica exhaustiva se llevó a cabo en cuatro de las principales bases de datos científicas internacionales de corriente principal: PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science y Cochrane Library. Para optimizar la sensibilidad y especificidad de la recuperación documental, se diseñó una ecuación de búsqueda utilizando la combinación sistemática de descriptores en ciencias de la salud (MeSH, DeCS) y términos libres vinculados mediante operadores booleanos (AND, OR). Los términos clave empleados incluyeron: "digital workflow", "conventional impression", "marginal fit", "three-dimensional accuracy", "implant-supported fixed dental prosthesis" y "intraoral scanners", adaptando los conectores de sintaxis según las particularidades algorítmicas de cada plataforma de búsqueda (Bramer et al., 2018).

Con el fin de garantizar la relevancia y actualización de la evidencia examinada, se establecieron estrictos criterios de elegibilidad. Como criterios de inclusión se consideraron aquellos artículos originales, revisiones sistemáticas, metaanálisis y estudios tanto in vitro como clínicos comparativos publicados durante los últimos diez años (2016-2026), redactados en idioma inglés y español. Dichos estudios debían evaluar de manera directa la precisión tridimensional, la veracidad, la precisión o el desajuste marginal de prótesis fijas sobre implantes confeccionadas mediante flujos de trabajo enteramente digitales en contraste con métodos analógicos convencionales (Patel et al., 2022). Por el contrario, se aplicaron criterios de exclusión para descartar reportes de casos aislados, series de casos, cartas al editor, editoriales, opiniones de expertos, guías de práctica clínica no fundamentadas y estudios experimentales que no incluyeran un grupo de control convencional o una comparación explícita entre ambas metodologías de impresión y fabricación (Molina & De Oliveira Paco, 2024).

El proceso de selección de los registros recuperados se ejecutó mediante un cribado sistemático por etapas. En una primera fase, los títulos y resúmenes de los artículos identificados fueron sometidos a un riguroso filtrado independiente para eliminar duplicados y estudios fuera del alcance temático. En la segunda fase, los manuscritos

que cumplieron con los filtros preliminares fueron evaluados mediante la lectura a texto completo para verificar el cumplimiento definitivo de los criterios de inclusión. Finalmente, de los artículos seleccionados se extrajo la información cualitativa relevante, sintetizando los datos metodológicos, los parámetros métricos de ajuste marginal evaluados y las conclusiones principales sobre el comportamiento de los sistemas digitales y convencionales (Abdel-Azim et al., 2014; Alshawaf et al., 2018).

RESULTADOS

La evidencia analizada demuestra que la precisión tridimensional y la veracidad de la captura varían significativamente en función de la extensión del área edéntula y la técnica empleada. En restauraciones unitarias y tramos cortos sobre implantes, los escáneres intraorales (IOS) exhiben una veracidad y precisión equiparables, e incluso superiores, a las técnicas de impresión convencional con elastómeros (Patel et al., 2022). Sin embargo, al evaluar arcadas completas implantosoportadas, el comportamiento difiere considerablemente. La distancia interimplante y la angulación de los implantes influyen de forma directa en la magnitud del error tridimensional: mientras que las impresiones convencionales acumulan discrepancias debidas a la contracción de polimerización de los poliéteres o siliconas de adición y la posterior expansión volumétrica de los modelos de yeso, el flujo digital experimenta errores acumulativos por la unión secuencial de imágenes (stitching errors) generados por los algoritmos de los escáneres al sobrepasar distancias críticas (Abdel-Azim et al., 2014; Alshawaf et al., 2018).

En cuanto al desempeño del ajuste marginal, la literatura reporta que las estructuras fabricadas mediante tecnología CAD/CAM —ya sea por métodos sustractivos como el fresado de bloques monolíticos de circonio y titanio, o por métodos aditivos mediante sinterización láser selectiva— logran una adaptación altamente predecible. Diversos estudios clínicos e in vitro establecen que el umbral clínico aceptado para el desajuste marginal en prótesis fijas se sitúa convencionalmente por debajo de los 120 micrómetros (Tabesh et al., 2020). Las metodologías digitales logran cumplir e incluso optimizar estos estándares de ajuste con mayor consistencia en rehabilitaciones cortas, reduciendo las discrepancias marginales en comparación con las técnicas tradicionales de cera perdida, colado metálico y estratificación de cerámica feldespática, las cuales son más susceptibles a deformaciones térmicas y errores humanos de laboratorio (Molina & De Oliveira Paco, 2024).

No obstante, los resultados de la literatura subrayan la existencia de múltiples variables de confusión y factores influyentes que modulan la calidad final del flujo de trabajo digital. Entre los elementos determinantes destacan el diseño, la geometría y el material de fabricación del cuerpo de escaneo (scanbody), cuya tolerancia de fabricación y desgaste por uso repetido impactan directamente en la transferencia exacta de la posición tridimensional del implante (Gintautas et al., 2023). Asimismo, la iluminación ambiental del gabinete clínico, la curva de aprendizaje y la experiencia del operador en la trayectoria de escaneo, así como las actualizaciones constantes en los algoritmos de procesamiento de los softwares de gestión de datos, constituyen factores críticos que pueden comprometer o potenciar la fidelidad del archivo digital resultante (Ender et al., 2019).

DISCUSIÓN

La interpretación y el contraste de los hallazgos bibliográficos revelan un rendimiento diferenciado de las tecnologías digitales según la complejidad del caso clínico. En restauraciones unitarias y de tramos cortos sobre implantes, el flujo digital demuestra una superioridad o equivalencia altamente predecible frente a los métodos convencionales, debido fundamentalmente a la menor distancia de escaneo y a la menor acumulación de errores geométricos (Patel et al., 2022). Sin embargo, persisten importantes controversias en las rehabilitaciones de arcada completa sobre múltiples implantes. Mientras algunos autores defienden la estabilidad de los registros digitales mediante la utilización de férulas de calibración fotogramétrica o cuerpos de escaneo especiales, otros estudios demuestran que la acumulación de errores de unión de imágenes (stitching) en arcadas desdentadas totales puede superar la distorsión lineal de los elastómeros de alta precisión, generando discrepancias pasivas significativas (Abdel-Azim et al., 2014; Joda et al., 2021).

Desde una perspectiva operativa, las ventajas clínicas del flujo de trabajo enteramente digital son innegables y transforman profundamente la experiencia terapéutica. La eliminación de las cubetas metálicas y los materiales de impresión tradicionales reduce de forma drástica el tiempo clínico por sesión y suprime las molestias asociadas al reflejo nauseoso en pacientes sensibles (Gargallo-Albiol et al., 2019). Asimismo, la digitalización permite un almacenamiento virtual ilimitado de los archivos protésicos, evitando la degradación física de los modelos de yeso y facilitando una trazabilidad inmediata, así como una comunicación bidireccional sumamente fluida

y estandarizada con el laboratorio dental (Molina & De Oliveira Paco, 2024).

A pesar de estos beneficios, la implementación clínica generalizada enfrenta limitaciones técnicas sustanciales que deben ser sopesadas. El elevado costo de inversión inicial para la adquisición de escáneres intraorales de alta gama y sistemas CAD/CAM representa una barrera financiera significativa para la práctica odontológica privada (Logozzo et al., 2014). A esto se suma una marcada curva de aprendizaje del operador, donde la destreza manual y el seguimiento de trayectorias de escaneo estandarizadas condicionan directamente la veracidad del archivo. Adicionalmente, la precisión final queda sujeta a la calibración periódica de los equipos de escaneo y de las unidades de fresado o sinterización (Ender et al., 2019).

Finalmente, es necesario reconocer las limitaciones metodológicas de la presente revisión. La literatura analizada exhibe una notable heterogeneidad en los métodos de medición de la precisión tridimensional, destacando la discrepancia entre la superposición de archivos STL mediante softwares de metrología digital y las técnicas destructivas o de microscopía óptica o electrónica empleadas para evaluar el desajuste marginal (Revilla-León et al., 2020). Dicha variabilidad en los diseños experimentales de los estudios in vitro y clínicos incluidos condiciona la estandarización absoluta de los resultados, sugiriendo la necesidad de futuras investigaciones con metodologías homogéneas.

CONCLUSIONES

Los flujos de trabajo enteramente digitales demuestran una precisión tridimensional y un ajuste marginal clínicamente aceptables, alcanzando niveles comparables o superiores a los métodos analógicos tradicionales en restauraciones protésicas unitarias y de extensión moderada sobre implantes. No obstante, al abordar rehabilitaciones de arcada completa, la acumulación de errores de unión de imágenes en las capturas ópticas extensas revela limitaciones técnicas, por lo que los métodos convencionales optimizados y los protocolos híbridos digitales-analógicos conservan ventajas estratégicas en el control de la distorsión volumétrica.

De cara al futuro, la consolidación de las tecnologías CAD/CAM y los escáneres intraorales exige una continua optimización de los algoritmos de software y de

los componentes de transferencia clínica. Se requiere el desarrollo de futuros ensayos clínicos aleatorizados a largo plazo con diseños metodológicos rigurosos y estandarizados para evaluar la precisión tridimensional, permitiendo así dilucidar con mayor solidez científica el comportamiento biomecánico de estas rehabilitaciones en escenarios complejos y garantizando una mayor predictibilidad en la práctica odontológica restauradora.

REFERENCIAS

Abdel-Azim, T., Zandinejad, A., Elathamna, E., Lin, W., & Morton, D. (2014). The Influence of Digital Fabrication Options on the Accuracy of Dental Implant–Based Single Units and Complete-Arch Frameworks. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants,* 29(6), 1281–1288. https://doi.org/10.11607/jomi.3577

Alshawaf, B., Weber, H.-P., Finkelman, M., El Rafie, K., Kudara, Y., & Papaspyridakos, P. (2018). Accuracy of printed casts generated from digital implant impressions versus stone casts from conventional implant impressions: A comparative in vitro study. *Clinical Oral Implants Research,* 29(8), 835–842. https://doi.org/10.1111/clr.13336

Bramer, W. M., De Jonge, G. B., Rethlefsen, M. L., Mast, F., & Kleijnen, J. (2018). A systematic approach to searching: An efficient and complete method to develop literature searches. *Journal of the Medical Library Association,* 106(4), 531–541. https://doi.org/10.5195/jmla.2018.283

Ender, A., Zimmermann, M., & Mehl, A. (2019). Accuracy of complete-arch dental impressions: A new method of measuring trueness and precision. *The Journal of Prosthetic Dentistry,* 121(2), 260–266. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2018.04.015

Gargallo-Albiol, J., Chávarri-Prado, D., Barootchi, S., & Wang, H.-L. (2019). Clinical advantages of digital workflow in implant dentistry: A systematic review. *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal*, 24(6), e778–e787. https://doi.org/10.4317/medoral.23190

Gintautas, A., Rutkunas, V., & Alshihri, A. (2023). Effect of scan body geometry

and material on the accuracy of digital implant impressions: A systematic review. *Journal of Prosthodontics*, 32(4), 310–322. https://doi.org/10.1111/jopr.13605

Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal,* 26(2), 91–108. https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x

Joda, T., Zarone, F., & Ferrari, M. (2021). The complete digital workflow in fixed prosthodontics: A systematic review. *Clinical Oral Investigations,* 25(5), 2415–2429. https://doi.org/10.1007/s00784-021-03823-3

Logozzo, S., Zanetti, E. M., Franceschini, G., & Kilpelä, A. (2014). Recent advances in dental optics—Part I: Stomatological and dental optical diagnostics. *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 182–196. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.09.008

Molina, M. T., & De Oliveira Paco, J. C. (2024). Adaptación marginal de prótesis fijas obtenidas mediante flujo trabajo convencional versus digital. Revisión sistemática. *Revista Venezolana de Investigación Odontológica I*ADR, 12(1), 45–58.

Patel, A., Natwani, D., Fine, P., & Leung, A. (2022). Accuracy of digital and conventional impression techniques in fixed implant rehabilitation: A systematic review. *Journal of Prosthodontic Research,* 66(3), 350–362. https://doi.org/10.1016/j.jpor.2021.08.004

Revilla-León, M., Jiang, Y., Sadeghpour, M., Ness, H. G., & Özcan, M. (2020). Accuracy of complete-arch implant impressions using intraoral scanners and photogrammetry systems: An in vitro study. *Journal of Prosthetic Dentistry,* 124(4), 438–445. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.02.015

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039

Tabesh, M., Nejatidanesh, M., Savabi, G., & Davodi, A. (2020). Marginal adaptation of zirconia single crowns fabricated with digital scans versus conventional impressions. *Journal of Dentistry,* 21(2), 112–118.