



ESTUDIO IN VITRO DEL EFECTO DEL DISEÑO DE LOS
MARCADORES FIDUCIALES EN LA PRECISIÓN Y EXACTITUD
DEL SISTEMA PIC APP

MÁSTER DE PRÓTESIS, IMPLANTOPRÓTESIS Y ESTÉTICA DENTAL

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

MADRID 2025

AUTOR: ALMA PATRICIA BALDERA RODRÍGUEZ

TUTOR: JAIME OREJAS PÉREZ

RESUMEN

Los escáneres intraorales (IOS) han transformado la odontología digital al permitir la captura precisa de modelos 3D de las estructuras orales. Dentro de este flujo de trabajo digital, el diseño de los scan bodies (SB) resulta determinante para garantizar la precisión y exactitud en la rehabilitación sobre implantes. Diversos estudios han demostrado que las propiedades geométricas, los materiales y las configuraciones de los SBs influyen directamente en la fidelidad de los registros digitales, pudiendo generar distorsiones o errores si no están correctamente diseñados.

En contraste, los sistemas basados en fotogrametría, como el sistema PIC Dental, han mostrado no ser dependientes a estas variables al emplear principios de captación específicos y unos marcadores fiduciales específicos, el equivalente a los SBs, denominados PIC Transfers. Estos están diseñados con una morfología en “bandera” y con puntos de referencia que permiten obtener una transferencia altamente precisa de la posición tridimensional de los implantes.

La literatura actual expone que los IOS ven afectada su exactitud por el tipo de SB empleado; sin embargo, este factor no había sido tenido en cuenta, dado que el sistema PIC Dental solo podía emplear los PIC transfers. Recientemente, PIC Dental ha desarrollado una nueva versión denominada PIC transfers mini, especialmente diseñada para casos clínicos con espacio reducido y para ser usada en combinación con los convencionales, a fin de favorecer la visibilidad durante las captaciones intraorales. Sin embargo, aún no existe evidencia científica sobre su desempeño en términos de precisión y exactitud.

Por ello, este estudio se centrará en evaluar si los nuevos PIC transfers mini afectan la precisión y exactitud del sistema PIC app en impresiones de arcadas completas rehabilitadas con múltiples implantes.

Palabras clave: Ajuste pasivo, app, cuerpo de escaneo, exactitud, fotogrametría, impresiones digitales, precisión, rehabilitaciones sobre implantes, sistema PIC dental.

ABSTRACT:

Intraoral scanners (IOS) have transformed digital dentistry by enabling the precise capture of 3D models of oral structures. Within this digital workflow, the design of scan bodies (SBs) plays a crucial role in ensuring accuracy and precision in implant-supported rehabilitations. Several studies have demonstrated that the geometric properties, materials, and configurations of SBs directly influence the fidelity of digital records, potentially causing distortions or errors if not properly designed.

In contrast, photogrammetry-based systems such as the PIC Dental system have shown not to depend on these variables, as they employ specific capture principles and fiducial markers equivalent to SBs, known as PIC transfers. These are designed with a “flag-like” morphology and reference points that allow a highly precise transfer of the three-dimensional implant position.

Current literature indicates that IOS accuracy is affected by the type of SB used; however, this factor had not been previously considered, since the PIC Dental system could only employ PIC transfers. Recently, PIC Dental has developed a new version called PIC transfers mini, specifically designed for clinical cases with limited space and intended to be used in combination with the conventional ones to improve visibility during intraoral captures. Nevertheless, no scientific evidence is yet available regarding their performance in terms of accuracy and precision.

Therefore, this study will focus on evaluating whether the new PIC transfers mini affect the precision and accuracy of the PIC app system in full-arch impressions of multiple-implant rehabilitations.

Keywords: Accuracy, app, digital impressions, implant-supported restorations, passive fit, PIC dental system, photogrammetry, scan body, trueness

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. DIGITALIZACIÓN EN EL CAMPO DE LA ODONTOLOGÍA | 1 |
| 1.1 Concepto de digitalización | 1 |
| 1.2 La digitalización en la odontología..... | 1 |
| 1.3 Objetivos de la digitalización | 2 |
| 2. ESCÁNERES INTRAORALES | 2 |
| 2.1 Escáneres intraorales en odontología | 2 |
| 2.2 Tecnología de los escáneres intraorales | 4 |
| 2.3 Limitaciones de los escáneres intraorales..... | 5 |
| 2.4 Scan Bodies (SBs)..... | 14 |
| 3. USO DE LA FOTOGRAMETRÍA EN LA ODONTOLOGÍA | 16 |
| 3.1 Fundamentos de la fotogrametría..... | 16 |
| 3.2 Fotogrametría aplicada en la implantología..... | 17 |
| 3.3 Funcionamiento del sistema PIC Dental y PIC app | 19 |
| 3.4 Marcadores fiduciales (PIC transfers) | 20 |
| 4. EXACTITUD Y PRECISIÓN | 22 |
| 5. AJUSTE PASIVO | 23 |
| 5.1 Definición de ajuste pasivo..... | 23 |
| 5.2 Importancia del ajuste pasivo en rehabilitaciones completas sobre implantes | 24 |
| 5.3 Técnicas para evaluar el ajuste pasivo en clínica/in vivo..... | 24 |
| JUSTIFICACIÓN DEL TEMA ELEGIDO | 27 |
| HIPÓTESIS Y OBJETIVOS | 28 |
| Hipótesis nula:..... | 28 |
| Objetivo principal:..... | 28 |
| Objetivos específicos: | 28 |
| MATERIAL Y MÉTODOS | 29 |
| RESULTADOS | 35 |
| Exactitud de las mediciones | 35 |
| Precisión de las mediciones | 35 |
| DISCUSIÓN | 37 |
| Limitaciones del estudio | 40 |
| CONCLUSIONES | 42 |
| REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍAS | 43 |

INTRODUCCIÓN

1. DIGITALIZACIÓN EN EL CAMPO DE LA ODONTOLOGÍA

1.1 Concepto de digitalización

La digitalización es un proceso mediante el cual las imágenes o documentos analógicos o físicos se convierten en formatos digitales, esto permite que los datos puedan ser almacenados, procesados y transmitidos de manera electrónica. Según la Real Academia Española (RAE) el término “digitalizar” se define como la acción de registrar datos en formato digital o transformar información continua, es decir, imágenes fotográficas, sonidos o libros en valores numéricos. Cada número o conjunto de números representa una parte de la información continua original. De esta forma, los datos se convierten en una serie de números que pueden ser almacenados y procesados en un ordenador.

1.2 La digitalización en la odontología

La informática dental, también conocida como ciencia de la información aplicada a la odontología, es un área interdisciplinaria que integra tecnologías de la información, análisis de datos y sistemas de comunicación dentro del ámbito odontológico. Esta área se dedica a crear, implementar y evaluar herramientas digitales que mejoren la gestión, análisis y el uso de la información dental para así optimizar la atención al paciente, la investigación y la enseñanza. (1)

En los últimos años, el campo de la odontología ha experimentado una evolución significativa con la utilización de diversas tecnologías digitales en diversos aspectos de la práctica profesional, permitiendo así, la transformación de los procedimientos y tratamientos dentales. La odontología digital incluye una variedad de técnicas y herramientas, entre ellas se destaca las imágenes en tres dimensiones, los sistemas CAD/CAM para el diseño y la fabricación, los IOS y los láseres dentales. (2) Esto ha beneficiado significativamente el trabajo debido a que anteriormente los procesos para la toma de impresiones dentales, creación de modelos y fabricación de prótesis dentales eran procedimientos que requerían de mucho tiempo. (3) Sin embargo con la introducción de estas técnicas y herramientas se ha podido agilizar el trabajo, mejorar la precisión y fiabilidad y promover un enfoque más personalizado y centrado en el paciente. (2)

1.3 Objetivos de la digitalización

La incorporación de tecnologías digitales en odontología ha mejorado significativamente la precisión diagnóstica, la eficiencia clínica y la personalización del tratamiento esto es respaldado por un artículo de Gawali et al. llamado "The Evolution of Digital Dentistry: A Comprehensive Review" en el cual expone que la digitalización permite optimizar el flujo de trabajo, reducir tiempos clínicos y mejorar la experiencia del paciente, al facilitar procedimientos como la toma de impresiones y la fabricación de restauraciones. (3)

La digitalización en odontología ha potenciado la participación del paciente mediante herramientas visuales que clarifican las alternativas de tratamiento, incrementando su satisfacción y compromiso con este. Además, ha ampliado las opciones terapéuticas, permitiendo avances significativos en prótesis dental, ortodoncia e implantes, transformando la odontología restauradora con tratamientos más personalizados y mejorando los resultados funcionales y estéticos. (2)

2. ESCÁNERES INTRAORALES

2.1 Escáneres intraorales en odontología

Los IOS representan un avance significativo en la odontología contemporánea, especialmente en el campo de la rehabilitación oral. Estos dispositivos permiten obtener representaciones digitales tridimensionales (3D) de los arcos dentales y tejidos blandos de manera precisa, eliminando la necesidad de recurrir a las técnicas tradicionales de impresión con materiales, que en muchas ocasiones resultan incómodas para el paciente y susceptibles a errores dimensionales. La capacidad de generar imágenes detalladas y de alta resolución mejora la personalización de las restauraciones dentales, garantizando un ajuste óptimo y una mejor adaptación a la anatomía individual del paciente. Estructuralmente, los IOS están compuesto por varios componentes principales; el captador/emisor que se divide en cabezal de escaneo y cuerpo del dispositivo. El cabezal, que es la parte que se introduce en la boca, contiene los sensores ópticos y las fuentes de luz responsables de proyectar un patrón lumínico sobre las estructuras orales para capturar la información morfológica necesaria y generar un modelo 3D virtual con gran fidelidad. Por su parte, el cuerpo del escáner sostiene y conecta el cabezal con el sistema interno de procesamiento, permitiendo una

manipulación ergonómica por parte del operador durante la toma de registros. En su interior, el escáner integra un procesador que convierte la información óptica capturada en archivos digitales, habitualmente en formatos STL, que posteriormente son visualizados y gestionados en tiempo real a través de un ordenador o pantalla táctil. Todo este flujo de trabajo es gestionado mediante un software especializado que procesa y ajusta los datos para la posterior fabricación de restauraciones, prótesis o guías quirúrgicas mediante tecnologías CAD-CAM. Gracias a estas características, los IOS no solo mejoran la eficiencia y la comodidad para el paciente, sino que también optimizan los tiempos clínicos y reducen los errores asociados a la manipulación de materiales de impresión convencional. (4–6)

En este contexto, como se ha mencionado anteriormente los IOS han ganado terreno debido a su capacidad para generar impresiones digitales tridimensionales (archivos STL) de alta resolución, que permiten planificar y fabricar restauraciones completas mediante flujos de trabajo digitales, mejorando la eficiencia clínica y la experiencia del paciente. No obstante, cuando se trata de escaneos de arcadas completamente edéntulas, la precisión y exactitud del escaneo son críticas, ya que la ausencia de referencias anatómicas dentarias limita los puntos de orientación para el escáner, generando desafíos para obtener un modelo virtual exacto. Estudios como los de Cheng et al. (7) y Vitai et al. (8) han confirmado que la exactitud de los IOS varía entre dispositivos y está influenciada por múltiples factores como las condiciones ambientales, la experiencia del operador, características específicas de los escáneres, cuerpos de escaneo utilizados, entre otros. Aunque la tecnología digital ha avanzado considerablemente, todavía se observan diferencias importantes respecto a las impresiones convencionales, especialmente en lo que respecta a la obtención de un ajuste pasivo adecuado, esencial para prevenir problemas mecánicos como el aflojamiento o la fractura de las prótesis. (7,8) En la actualidad, no existe una norma universalmente aceptada que defina el margen de error clínico permitido en arcadas edéntulas, investigaciones como las de Estibalez-Recasens et al. (9) y Abdelrehim et al. (10) coinciden en que ciertos niveles de desajuste pueden ser tolerados sin provocar complicaciones significativas. Ambos sugieren que un desajuste horizontal de hasta 345 μm y uno vertical de

hasta 160 μm podrían considerarse clínicamente aceptables, el ajuste pasivo ideal sigue siendo deseable, pero existen rangos funcionales dentro de los cuales las rehabilitaciones implantosoportadas pueden mantenerse estables y predecibles. (9,10)

2.2 Tecnología de los escáneres intraorales

Los IOS utilizan una cámara portátil junto con un ordenador y software especializado para capturar con exactitud la geometría tridimensional de la cavidad oral, empleando formatos digitales como el STL, que describe geometrías compuestas por superficies triangulares. No obstante, existen diversos formatos que pueden capturar características adicionales como el color y la textura, adecuados para diferentes necesidades clínicas. Todas las cámaras de los IOS funcionan proyectando luz sobre los tejidos, capturando esta información como imágenes o vídeos que luego son procesados por el software para generar modelos digitales precisos. (11)

Según Richert et al. en su revisión titulada “Intraoral Scanner Technologies: A Review to Make a Successful Impression” exponen que la precisión en la captura de la geometría dental es crucial para tratamientos efectivos y personalizados. Los IOS utilizan diferentes tecnologías de medición de distancia a objetos, es decir, principios ópticos que permiten determinar la posición espacial de cada punto de la superficie dental y reconstruir su forma tridimensional. Entre estas se incluyen la triangulación óptica, la técnica confocal, el muestreo de frente de onda activa y la fotogrametría, todas ellas fundamentales para garantizar la fidelidad y exactitud de los modelos digitales obtenidos. A continuación, se detallan las diferentes tecnologías mencionadas:

- Triangulación: Es un método matemático que se usa para localizar un objeto en el espacio basándose en los ángulos y posiciones que son medidos desde dos perspectivas diferentes usando un rayo láser proyectado. Cuando la luz se refleja en el objeto, el sistema calcula el ángulo de incidencia o punto de reflexión y, de este modo, determina la distancia desde la fuente del láser hasta la superficie del objeto. Este proceso puede utilizar dos sensores distintos o un solo sensor con un prisma para obtener las dos vistas requeridas, ya sea al mismo tiempo o en tiempo distintos. Esta técnica es muy útil en odontología digital para

determinar con exactitud la forma de un diente o una zona específica dentro de la boca. (11,12)

- Técnica confocal: Es utilizada para obtener imágenes de alta resolución a través de la captura enfocada en diferentes profundidades. Esta técnica depende de la habilidad para ajustar el enfoque en distintos niveles de profundidad, permitiendo así reconstruir una imagen tridimensional del objeto examinado mediante la combinación de múltiples imágenes enfocadas a diferentes distancias. Una desventaja que presenta es que requiere una operación cuidadosa y un equipo sofisticado, lo que puede presentar desafíos en entornos clínicos donde el espacio o la rapidez son factores críticos. (11)
- Muestreo de frente de onda activa: Es una tecnología avanzada que utiliza un enfoque dinámico para la obtención de imágenes. En este sistema, un módulo de apertura se mueve en un patrón circular alrededor del objeto, capturando imágenes desde múltiples ángulos. Este movimiento permite calcular con precisión la distancia y profundidad del objeto basándose en el patrón de luz reflejada capturado por la cámara, lo que da resultado a reproducciones detalladas y tridimensionales. (11)
- Fotogrametría: Es una técnica que determina las coordenadas tridimensionales de un objeto a partir del análisis de imágenes capturadas desde diferentes ángulos. Se basa en la proyección de luz pasiva y un software para analizar las imágenes capturadas por una cámara estándar. (11)

2.3 Limitaciones de los escáneres intraorales

2.3.1 Tipo de escáner (tecnología)

La elección del tipo de escáner intraoral tiene una influencia determinante en la precisión de las impresiones digitales de arcadas completas sobre implantes. Las variaciones en la tecnología de captura de datos y las especificaciones técnicas de los escáneres afectan directamente la fidelidad de las reproducciones digitales, siendo algunos dispositivos capaces de cumplir con los estándares clínicos aceptables, mientras que otros no. (8)

Un estudio comparativo de doce IOS realizado por Mangano et al. demostró que el tipo de dispositivo influye de forma significativa en la precisión de las

impresiones digitales para arcadas completas sobre implantes. Utilizando técnicas de superposición mesh/mesh y nurbs/nurbs para evaluar la exactitud, el estudio evidenció diferencias significativas entre los equipos. Escáneres como el ITERO ELEMENTS 5D y el CS 3700 destacaron por sus bajos márgenes de error, lo que los posiciona como opciones confiables en la captura de detalles esenciales para la planificación protésica (13) Esto evidencia la importancia de seleccionar adecuadamente el tipo de escáner, valorando no solo su eficacia tecnológica, sino también su capacidad de responder adecuadamente a las exigencias clínicas de los tratamientos implantológicos en arcadas completas.

2.3.2 Patrón de escaneo

El escaneo intraoral de arcadas completamente edéntulas rehabilitadas con múltiples implantes presenta desafíos únicos que requieren técnicas de escaneo precisas y metodológicamente adaptadas. Una técnica destacada es el escaneo en zigzag, que facilita la captura integral de los cuerpos de escaneo al cubrir de manera exhaustiva las superficies oclusal, vestibular y lingual. Para optimizar la precisión, algunos estudios sugieren iniciar el escaneo desde la superficie oclusal y continuar hacia las superficies vestibular y lingual, utilizando movimientos ondulantes que eviten la segmentación de la imagen. Asimismo, se ha demostrado que unir los cuerpos de escaneo mediante resinas compuestas o dispositivos geométricos mejora la continuidad del escaneo, facilitando el reconocimiento espacial por parte del software y aumentando la exactitud de la digitalización. Estas técnicas ajustadas no solo aumentan la fidelidad de los modelos digitales, sino que también contribuyen a la eficiencia del procedimiento, permitiendo adaptaciones más precisas y resultados protésicos de mayor calidad. (14)

De igual manera, se ha comprobado que las variaciones en los métodos de escaneo influyen directamente en la fidelidad y precisión de las impresiones digitales. Los resultados de un estudio realizado por Jamjoom et al. indican que ciertas configuraciones mejoran notablemente la exactitud del modelo digital. En particular, se encontró que la estrategia palatino-oclusal-vestibular es la más eficaz, optimizando la captura de la compleja topografía de los arcos desdentados. (15)

Un análisis comparativo de cuatro diferentes técnicas de escaneo por Mizumoto et al. resalta la necesidad de seleccionar de forma precisa el patrón de escaneo para maximizar tanto la precisión como la exactitud de las impresiones obtenidas. Las variaciones significativas en los resultados de precisión observadas entre las distintas técnicas enfatizan la influencia crucial de la estrategia de escaneo empleada. Esta estrategia es vital para capturar adecuadamente la geometría tanto de los implantes como del tejido edéntulo, siendo un factor determinante en la producción precisa de la prótesis. La adecuada elección del patrón de escaneo, que debe alinearse con la topografía específica del arco y las características de los implantes, es esencial para minimizar los errores de digitalización y elevar la calidad de las impresiones digitales. (16)

2.3.3 Área de escaneo

La precisión de las impresiones digitales se ve considerablemente afectada por el tamaño del área escaneada, siendo este un factor crítico en arcadas completamente edéntulas. A medida que se amplía el campo de escaneo, especialmente hacia los extremos del arco, se incrementan los errores de alineación, lo que compromete la exactitud del modelo tridimensional. (17,18) Esta problemática se intensifica en arcadas sin dientes debido a la ausencia de referencias anatómicas naturales, que dificultan el mantenimiento de una trayectoria precisa durante el escaneo. (19) Además, se ha observado que los arcos de mayor tamaño presentan mayores desafíos para lograr capturas consistentes, mientras que en arcos más pequeños los errores son significativamente menores, lo que demuestra un mejor manejo del escaneo en zonas reducidas. (18)

El estudio "Influence of different palatal morphologies on the accuracy of intraoral scanning of the edentulous maxilla: A three-dimensional analysis" analiza cómo la morfología palatina influye en la precisión del escaneo intraoral en maxilares desdentados. Mediante el uso de tipodontos con diferentes profundidades palatinas, con y sin rugosidades, se evidenció que los paladares de profundidad media ofrecen los mejores resultados en términos de precisión y exactitud. Asimismo, se observó que las rugosidades palatinas actúan como referencias naturales que mejoran significativamente la precisión en paladares profundos,

facilitando el empalme de imágenes durante el escaneo. En conjunto, estos hallazgos destacan la relevancia de considerar las características anatómicas del paladar al seleccionar estrategias de escaneo digital, ya que dichas variables pueden influir directamente en la calidad de los registros y, por ende, en el ajuste y la funcionalidad de las prótesis en pacientes edéntulos. (20) Frente a estas limitaciones, resulta fundamental adaptar la técnica de escaneado al tamaño y morfología del arco, así como seleccionar escáneres con mejor rendimiento en extensiones amplias.

2.3.4 Experiencia del operador

En la odontología moderna, se ha demostrado que la precisión de los IOS está significativamente influenciada por la experiencia del operador. Un estudio llamado “Influence of operator experience on the complete-arch accuracy and time-based efficiency of three intraoral scanners” subrayó que los operadores con conocimiento previo en sistemas de impresión digital alcanzan resultados más precisos y eficientes, lo que resalta la importancia del dominio técnico en el manejo de estas tecnologías. (21) Además, se observó que incluso en condiciones de angulación y profundidad desafiantes de los implantes, los operadores más experimentados lograron mantener altos niveles de precisión, demostrando que la experiencia puede compensar las limitaciones típicas de los procedimientos de impresión digital. (22)

Por otro lado, Pesce et al. examinaron cómo la experiencia del operador afecta la precisión en situaciones clínicas de implantología, mostraron que los profesionales más experimentados no solo realizan escaneos más exactos, sino que también se adaptan mejor a las diferentes configuraciones de los implantes. (23) Este hallazgo es corroborado por otro estudio realizado por Resende et al. que señala que la falta de experiencia se asocia con una reducción en la exactitud y la precisión de los escaneos de arcos completos, lo que puede resultar en complicaciones durante los tratamientos rehabilitadores. (17)

En su conjunto, estos estudios resaltan la vital importancia de recibir una formación adecuada y acumular experiencia práctica para el uso eficiente de los IOS.

A diferencia de los IOS, cuya precisión y exactitud pueden verse comprometidas por la experiencia del operador como se ha expuesto previamente, la literatura disponible muestra que el sistema PIC Dental no se ve influenciado por este factor. En el estudio clínico de Estibalez-Recasens et al., se describe que este sistema permite registrar la posición tridimensional de los implantes sin verse afectado por variables como el operador, el patrón de escaneado, la saliva o la presencia de largos tramos edéntulos. Esto es debido a que el sistema PIC emplea capturas fotogramétricas controladas, en lugar de reconstruir la información a partir de múltiples imágenes sucesivas, como ocurre con los IOS. Este enfoque permite obtener reproducciones más estables, independientemente de la habilidad del operador, lo que proporciona una ventaja importante en la toma de impresiones digitales para rehabilitaciones de arcada completa. (9)

2.3.5 Saliva, sangre y movilidad de tejidos

Según el artículo de Mangano et al. (13), la efectividad de los IOS puede verse notablemente afectada por la presencia de fluidos como la saliva y la sangre, los cuales generan distorsiones ópticas mediante reflejos y refracciones que introducen artefactos en la imagen y reducen la precisión de las mediciones. Sin embargo, tecnologías como la microscopía confocal y la triangulación óptica han demostrado una mayor capacidad para mitigar estas interferencias, ya que permiten distinguir de manera más precisa la superficie dental de los fluidos circundantes. Además, la movilidad de los tejidos blandos representa otro desafío relevante durante el escaneo, ya que puede generar errores en el registro y la reconstrucción tridimensional del modelo. Por ello, es fundamental que el paciente mantenga una posición estable durante el procedimiento. No obstante, algunos dispositivos incorporan algoritmos que detectan y corrigen en tiempo real pequeños movimientos, lo que contribuye a mejorar tanto la fidelidad del escaneo como la eficiencia del proceso en condiciones clínicas reales. (13)

Del mismo modo el estudio de Tawfik et al. reafirma que la presencia de saliva durante el escaneo intraoral puede afectar de forma considerable la precisión en la transferencia de implantes. La humedad generada por la saliva modifica la reflectividad y la textura de las superficies, dificultando la captura de imágenes exactas. En consecuencia, se observó que un entorno bucal más seco mejora la

calidad del escaneo, lo que resalta la importancia de controlar la humedad antes y durante el procedimiento para garantizar registros digitales más precisos y confiables. (24)

2.3.6 Factores del ambiente

La iluminación ambiental representa un factor determinante en la precisión y eficacia de los IOS, ya que cada modelo responde de manera distinta a las condiciones lumínicas del entorno clínico. Por ejemplo, el iTero Element ofrece resultados más precisos bajo luz intensa de la lámpara dental, así como en ambientes con iluminación general de sala, lo que favorece una captura de imagen más exacta y reduce errores en la digitalización. En contraste, el CEREC Omnicam demuestra un rendimiento óptimo en completa ausencia de luz ambiental, evidenciando una menor sensibilidad a las interferencias externas y una mejor adaptación a entornos controlados. Por su parte, el TRIOS 3 mejora su precisión cuando se utiliza en condiciones de iluminación moderada, como las que se presentan en una sala dental sin luz directa, esto refuerza la necesidad de adaptar el entorno lumínico según las características tecnológicas del escáner empleado. (25)

Además de la iluminación, es esencial mantener la temperatura ambiental entre 20 y 21°C, con una presión del aire alrededor de 750 a 760 \pm 5 mmHg y una humedad del 45%. Estas condiciones meticulosamente controladas aseguran la estabilidad en la captura de datos y aumentan la confiabilidad de los escaneos, evitando problemas como la condensación en la lente del escáner que podría distorsionar las imágenes y comprometer la calidad del escaneo. (14)

2.3.7 Profundidad y angulación de los implantes

Diversas investigaciones han abordado el efecto de la angulación de los implantes en la precisión de las impresiones digitales realizadas con IOS, como la de Carneiro Pereira et al. destacando que la angulación es un factor clave, ya que angulaciones de hasta 15 grados permiten conservar una buena exactitud en el escaneo, sin embargo, cuando este ángulo se incrementa por encima de dicho umbral, la capacidad del escáner para capturar de manera fiel la posición de los implantes se ve comprometida, afectando negativamente la calidad de la imagen y, por ende, la exactitud de la transferencia protésica. (14) En contraste, Geramipanah et al. señalan que la angulación de los implantes no presentó un

impacto significativo sobre la precisión de las impresiones digitales al emplear dos IOS distintos, lo que sugiere que los avances tecnológicos actuales permiten que estos dispositivos toleren variaciones en la angulación sin afectar la exactitud de los resultados. (18)

Mientras tanto el estudio de Sallorenzo y Gómez-Polo demuestra que la angulación de los implantes puede influir positivamente en la precisión de los IOS en arcadas edéntulas. Al comparar modelos con implantes paralelos frente a otros con inclinaciones mesiales y distales, se observó una reducción en los errores de medición tanto lineales como angulares en los casos angulados. Este efecto fue más pronunciado al utilizar un escáner diseñado específicamente para implantes, la PiC Camera (PIC Dental), aunque también se evidenció con el escáner convencional TRIOS 3. Según los autores, esta mejora se debe a que la disposición angulada genera una geometría más heterogénea, que ofrece puntos de referencia adicionales durante el escaneo. Esto resulta especialmente útil en arcadas completamente desdentadas, donde la ausencia de estructuras anatómicas complica la alineación digital. Por tanto, lejos de comprometer la exactitud, la angulación de los implantes puede facilitar una captura más precisa de su posición y orientación, optimizando la calidad de las impresiones digitales en rehabilitaciones complejas. (26)

La profundidad de los implantes ha sido evaluada como un posible factor que podría comprometer la precisión de los IOS en arcadas completamente edéntulas; sin embargo, la evidencia científica disponible indica que su impacto no es significativo. Según Giménez et al., aunque los implantes colocados a diferentes profundidades entre 2 mm y 4 mm por debajo de la encía podrían, en teoría, dificultar la captura precisa de los SBs, los resultados no mostraron diferencias estadísticamente significativas en la precisión de las impresiones digitales. (22) Este hallazgo sugiere que la profundidad no altera de manera relevante la exactitud de la digitalización, al menos cuando se emplean tecnologías avanzadas como el muestreo de frente de onda activa. Asimismo, una revisión sistemática realizada por Zhang et al. concluye que la profundidad de los implantes no afecta la precisión de los IOS de arcos edéntulos, siendo otros factores como la distancia interimplante o la angulación los que juegan un rol más determinante en la exactitud de las imágenes digitales. Por tanto, se

puede afirmar que la profundidad de los implantes, por sí sola, no representa un obstáculo crítico para obtener impresiones digitales precisas en rehabilitaciones implantosoportadas de arcadas completas. (27)

2.3.8 Distancia entre implantes

La distancia entre implantes ha sido identificada como un factor crítico que afecta la precisión y la exactitud de las impresiones digitales realizadas mediante IOS, especialmente en arcadas edéntulas completas. Según un estudio llamado “Effects of inter-implant distance on the accuracy of intraoral scanner: An in vitro study” a medida que la distancia entre los implantes aumenta, se incrementan los errores tanto en la exactitud como en la precisión de los modelos digitales generados. Este fenómeno se evidenció al comparar distancias de 7 mm, 14 mm y 21 mm, donde las distancias mayores produjeron mayores distorsiones, aunque no siempre fueron clínicamente significativas. (28) Tanto Carneiro Pereira et al. como Zhang et al. coinciden en que la distancia interimplantaria influye de forma decisiva en la precisión de las impresiones digitales. Mientras los primeros proponen un rango óptimo de entre 16 y 22 mm para garantizar una superposición de imágenes fiable y una correcta transferencia de la posición implantaria al diseño protésico (14), Zhang et al. advierten que cuanto más distancia haya, más desviaciones lineales y tridimensionales habrá, reduciendo la fidelidad del modelo digital en rehabilitaciones de arcadas completas. (27)

La pérdida de exactitud en los escaneos digitales se acentúa notablemente en arcadas edéntulas completas, donde la extensión del campo de escaneo y la distancia acumulada entre implantes generan una mayor susceptibilidad a errores. Esta situación es aún más crítica en arcos amplios, donde las distorsiones tienden a concentrarse en las zonas distales, como consecuencia de la acumulación progresiva de errores durante el cosido de imágenes. Además, la ausencia de referencias anatómicas en las áreas posteriores de la arcada dificulta la alineación precisa, lo que incrementa la imprecisión del modelo digital final. (18,29)

2.3.9 Transformación del archivo STL en el modelo de trabajo - Best-fit

Al realizar impresiones digitales con IOS el modelo digital inicial que se obtiene no corresponde directamente al modelo de trabajo final. Este requiere una

transformación específica a través de un proceso de ajuste óptimo ("best fit"). (30)

El concepto de best-fit hace referencia a la técnica utilizada para alinear y superponer diferentes capturas digitales con el objetivo de generar un modelo tridimensional lo más fiel posible. Desde un punto de vista técnico, este método consiste en lograr el mejor alineamiento entre dos mallas bi o tridimensionales, generalmente en formato STL. Este procedimiento es fundamental dentro del flujo digital, ya que se aplica en distintas etapas para minimizar errores y garantizar que la representación virtual de las estructuras dentales sea precisa y fiable. (30)

Durante este proceso, los cuerpos de escaneo se alinean con las bibliotecas CAD de implantes utilizando programas como EXOCAD. Este paso es crucial, pero introduce una variable adicional de error, la cual depende tanto de la precisión del algoritmo de ajuste como de la calidad de la alineación entre los datos del escaneo y las referencias de la biblioteca CAD, cualquier desajuste o distorsión durante esta alineación puede alterar la posición espacial y la angulación de los implantes en el modelo de trabajo final. (30)

El impacto del proceso de "best-fit" en la precisión y exactitud de los modelos digitales es de mucha importancia. La precisión, puede verse comprometida debido a posibles acumulaciones de desajustes durante el proceso de "best-fit", lo cual puede llevar a variaciones notables entre los distintos modelos digitales generados para un mismo escenario clínico. (30)

En cuanto a la exactitud, que evalúa cuán cercanas están las mediciones al valor real, también se encuentra afectada. Los errores en la alineación entre los SBs y la biblioteca CAD durante el "best-fit" pueden causar que el modelo final no refleje adecuadamente la situación clínica verdadera. Estos errores son críticos y pueden afectar la calidad del resultado final, así como la confiabilidad de los procedimientos clínicos que dependen de estos modelos. (30)

En relación con lo anterior, el estudio de Orejas-Pérez et al. muestra que el proceso de best-fit no siempre refleja de manera exacta la posición real de los implantes. Para ello, los autores escanearon un mismo caso con dos IOS, Trios 3 y True Definition y con un escáner extraoral Identica Light con el objetivo de

evaluar si la precisión de los modelos digitales definitivos se ve afectada tanto por el alineamiento de los scan bodies con la biblioteca CAD como por el tipo de escáner utilizado. (31) A partir de cada escaneo generaron dos modelos distintos: uno alineado únicamente con el tercio oclusal del SB y otro utilizando la malla completa, aplicando en ambos casos el algoritmo Iterative Closest Point, encargado de superponer ambas superficies. Esta metodología permitió comprobar que los escaneos obtenidos con IOS eran mucho más sensibles a la cantidad de malla del SB utilizada para el alineamiento. Al variar entre el tercio oclusal y la malla completa, las distancias y angulaciones interimplantarias cambiaban de manera considerable, llegando en algunos casos a superar los límites clínicamente aceptables. Esto indica que las mallas generadas por IOS son menos estables y que el algoritmo de best-fit tiende a compensar sus imperfecciones, introduciendo nuevas desviaciones. Por el contrario, los modelos obtenidos con el escáner extraoral se mantuvieron prácticamente iguales independientemente de la porción de malla empleada, lo que evidencia una mayor consistencia. En conjunto, el estudio confirma que el best-fit puede ser una fuente relevante de variabilidad y que su impacto depende del tipo de escáner y de la calidad del STL. (31)

2.4 Scan Bodies (SBs)

Los SBs, también conocidos como captadores intraorales, son componentes esenciales que utilizan los IOS para transferir de manera digital la posición tridimensional de los implantes dentales. Estos dispositivos sirven como referencia clave en el proceso de captura de datos y son determinantes para la correcta digitalización de la posición de los implantes en el arco edéntulo. Entre los múltiples factores que influyen en la precisión y exactitud de una impresión digital, los SBs destacan por su impacto en la fidelidad de los registros obtenidos. (32) Esta investigación, se centrará en gran medida en el análisis de los SBs, considerando su diseño, material y geometría, como el principal factor que puede condicionar la precisión y exactitud.

Numerosos estudios han evidenciado que el diseño de los SBs influye de manera decisiva en la precisión de las impresiones digitales. Flügge et al. señalan que características como la geometría, el tamaño y la cantidad de superficie disponible para el escaneo afectan directamente la calidad de la captura óptica.

En particular, los SBs de menor tamaño o con formas más complejas tienden a generar mayores errores, ya que ofrecen menos referencias visuales para el escáner y dificultan la reconstrucción precisa del eje central. (33) A esta conclusión se suman los trabajos de Gehrke et al., Pachiou et al. y Revilla-León et al., quienes resaltan que factores como la orientación de los biseles, la altura, el diámetro y la posición del SB también impactan de manera significativa en la calidad del escaneo intraoral. Según estos autores, los SBs con formas redondeadas y biseles orientados hacia la zona lingual facilitan capturas más precisas, mientras que las superficies con aristas marcadas tienden a provocar distorsiones. Además, los diseños simples, bien definidos y con una altura adecuada, junto con una correcta emergencia del SB, mejoran notablemente la fidelidad y precisión del registro digital. (34–36)

La incorporación de modificaciones en el diseño de los SBs, como extensiones laterales o estructuras horizontales, ha demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar la precisión y la fidelidad del escaneo digital, especialmente en arcadas edéntulas donde la falta de referencias anatómicas compromete el proceso de captura. Estas extensiones proporcionan puntos de referencia adicionales que optimizan la unión de imágenes y reducen los errores de registro, facilitando así la obtención de impresiones digitales más estables y exactas. Además, la combinación de estas mejoras con técnicas complementarias como la fotogrametría intraoral potencia aún más la calidad del escaneo. (37,38)

Li et al. plantean que la utilización de superficies anodizadas de titanio en los SBs reduce significativamente la reflectividad, favoreciendo una captura óptica más eficiente sin necesidad de modificar los protocolos clínicos. (37) En sintonía con estos hallazgos, Revilla-León et al. resaltan que el titanio, por sus propiedades ópticas y mecánicas superiores frente al PEEK, mejora notablemente la calidad del escaneo. (36) Además, ambos estudios coinciden en que el diseño de los SBs mediante la incorporación de geometrías específicas y marcadores ópticos codificados, no solo facilita la correcta identificación de los implantes, sino que también minimiza las discrepancias lineales y angulares, contribuyendo así a obtener impresiones digitales más precisas y confiables. (36,37)

La evidencia actual resalta que la optimización del diseño de dispositivos auxiliares y SBs es un factor clave para mejorar la precisión del escaneo intraoral en rehabilitaciones sobre arcadas edéntulas. Pan et al. demostraron que modificaciones como la incorporación de bases de resina o referencias anatómicas artificiales, como dientes, incrementan notablemente la exactitud y la precisión del escaneo. (39) De manera complementaria, Azevedo et al. evaluaron técnicas como el “splinting” que es la unión de múltiples SBs mediante resina o alambres para aumentar su estabilidad y la colocación de marcadores artificiales sobre la mucosa, las cuales no lograron mejorar sustancialmente la exactitud respecto a los SBs convencionales. (40) Ambos estudios coinciden en que la combinación de un diseño geométrico optimizado y la elección de un escáner adecuado, resulta determinante para obtener registros digitales precisos, reforzando así la importancia de integrar dispositivos bien diseñados con tecnologías de captura avanzadas y protocolos de escaneo cuidadosamente planificados. (39,40)

3. USO DE LA FOTOGRAMETRÍA EN LA ODONTOLOGÍA

3.1 Fundamentos de la fotogrametría

La fotogrametría apareció a mediados del siglo XIX, es una disciplina integral que combina el arte, la ciencia y la tecnología para capturar información detallada de objetos y entornos mediante el análisis de imágenes y patrones de energía electromagnética. Esta ciencia ha evolucionado a lo largo de los siglos, transformándose desde métodos ópticos-mecánicos hasta la adopción de tecnologías digitales avanzadas. La transición ha incluido la sustitución de equipos ópticos-mecánicos por soluciones de visión computarizada que procesan imágenes digitales, facilitando así la interpretación y medición en tres dimensiones a partir de fotografías. (41)

La fotogrametría es aplicable en una variedad de contextos, que van desde la conversión de datos bidimensionales en coordenadas tridimensionales hasta la estimación de áreas y volúmenes. (41)

Un ejemplo preciso dentro de este campo es la estereofotogrametría, que se especializa en la obtención de coordenadas tridimensionales a partir de múltiples imágenes fotográficas tomadas desde diferentes ángulos. Esta técnica utiliza la

triangulación, identificando puntos comunes en diversas imágenes y estableciendo líneas visuales desde la cámara hasta estos puntos para determinar su ubicación en tres dimensiones. (42)

3.2 Fotogrametría aplicada en la implantología

La fotogrametría ha revolucionado la odontología digital al ofrecer una herramienta no invasiva que, mediante la captura de múltiples fotografías, permite generar modelos tridimensionales extremadamente precisos de la cavidad oral. (43) Esta tecnología ha superado las limitaciones de las técnicas convencionales, proporcionando métodos avanzados para el análisis, la planificación y la visualización de tratamientos a través de modelos digitales detallados de la arcada dental. (44) El proceso comienza con la adquisición de múltiples imágenes superpuestas tomadas desde distintos ángulos, utilizando IOS o cámaras fotográficas, que posteriormente son procesadas por un software especializado capaz de detectar características únicas y reconstruir un modelo tridimensional mediante técnicas de triangulación y generación de mallas. (43)

En este contexto, surge el sistema PIC Dental, desarrollado en España en 2010 por el ingeniero Adrián Hernández, quien aplicó los principios de la fotogrametría específicamente al ámbito de la implantología con el objetivo de lograr una captura ultra precisa de la posición de múltiples implantes. A diferencia de los IOS convencionales, el sistema PIC emplea cámaras calibradas que capturan imágenes simultáneas de los PIC transfers colocados en los implantes, permitiendo calcular con extrema exactitud su posición tridimensional en el espacio. Este sistema minimiza los errores de distorsión acumulativa y proporciona datos de alta fidelidad, esenciales para rehabilitaciones de arcadas completas.

Esta técnica ha significado una revolución en la implanto-prótesis, ofreciendo notables mejoras sobre las técnicas convencionales gracias a su alta precisión en la captura de datos. Este método no solo optimiza la planificación y documentación de los tratamientos dentales, sino que también eleva la calidad de las prótesis dentales al dar un resultado más exacto y directo al registrar la posición de los implantes. Aunque enfrenta desafíos, como la necesidad de procedimientos adicionales para capturar información de los tejidos blandos, sus beneficios son superiores que sus desventajas. La fotogrametría ofrece

tratamientos más eficaces y estéticamente superiores, marcando un avance significativo en la capacidad de los profesionales para proporcionar soluciones personalizadas que atiendan de manera precisa las necesidades de los pacientes. (43–45)

A partir del lanzamiento del sistema PIC Dental en 2010, que marcó el inicio del uso clínico de la fotogrametría en implantología, comenzaron a surgir otros sistemas basados en principios ópticos similares. El primero en aparecer fue iCam4D (Imetric) en 2018, al que siguieron nuevas soluciones como OxoFit en 2022, y, posteriormente, una generación de dispositivos presentada en 2024, entre ellos Palm (Scedent), Grammee (BlueSkyBio), FastMap (X-Nav Technologies) y MicronMapper (ClaroNav). Todos estos sistemas realizan capturas extraorales mediante marcadores ópticos específicos para reconstruir con estabilidad geométrica la posición tridimensional de múltiples implantes. (46) Por otra parte, en 2024 apareció Aoralscan Elite (Shining 3D), el primer escáner intraoral en integrar un sistema de fotogrametría directamente en boca, lo que permite registrar la posición de los implantes mediante SBs codificados sin necesidad de una captura adicional. Más recientemente, en 2025, DOF presentó Freedom Air, un escáner intraoral que incorpora la opción de realizar fotogrametría extraoral, combinando la versatilidad del escaneo intraoral con la estabilidad de los sistemas fotogramétricos externos. (46)

Sin embargo, se ha demostrado que el sistema PIC Dental sigue ofreciendo mejores resultados en términos de exactitud lineal y angular, estudios como el de Revilla-León et al. (36) y Pozzi et al. (47) han confirmado que PIC Dental logra una mayor exactitud tridimensional en comparación con otros métodos. De forma similar, Liu et al. (48) y Faria et al. (49) evaluaron diferentes técnicas basadas en fotogrametría y ayudas prefabricadas, concluyendo que, aunque representan avances importantes, todavía no alcanzan la precisión que proporciona el sistema PIC. Estos resultados refuerzan el liderazgo de PIC Dental como una de las tecnologías más confiables para la captura digital de implantes en odontología.

Como avance más reciente dentro de esta tecnología, el sistema PIC Dental ha desarrollado recientemente la PIC app, una versión portátil de su tecnología de fotogrametría que es exclusiva para iOS y compatible con los modelos iPhone

12 Pro hasta iPhone 16 Pro. Esta aplicación utiliza un algoritmo propio capaz de reconocer los PIC transfers y reconstruir la posición tridimensional de los implantes a partir de una secuencia de fotografías tomadas con la cámara del dispositivo. Su finalidad es ofrecer una alternativa más accesible al sistema tradicional, manteniendo la filosofía de precisión y exactitud que caracteriza a la marca, pero con un formato más sencillo, ligero y adaptable a la práctica clínica diaria. (46)

3.3 Funcionamiento del sistema PIC Dental y PIC app

El artículo “Using stereophotogrammetric technology for obtaining intraoral digital impressions of implants” por Pradíes et al. expone que el sistema PIC Dental utiliza una tecnología fotogramétrica avanzada diseñada para facilitar la obtención precisa de la posición tridimensional de los implantes dentales. Este método es esencial para determinar las coordenadas exactas y las distancias entre implantes, facilitando así la producción de estructuras protésicas a medida con tecnología CAD/CAM.

Este sistema está compuesto por:

- Marcadores fiduciales: Estos pilares diseñados con forma de bandera y conocidos como PIC transfers, se atornillan directamente sobre los implantes. Cada pilar posee cuatro puntos blancos únicos que facilitan su identificación precisa.
- Cámara estereoscópica: Posee un flash infrarrojo, esta cámara puede capturar 64 imágenes por segundo con una precisión de menos de 10 μm en menos de 20 segundos. Esta cámara registra la posición de los PIC transfers, facilitando la orientación y ubicación exacta de cada implante, vinculando cada uno de los elementos y permitiendo calcular con exactitud los ángulos y las distancias entre los implantes. La capacidad de la cámara para registrar la posición espacial de cada implante sin contacto directo reduce los errores típicos de las técnicas de impresión convencional.
- Software especializado: El sistema incluye el software PIC Pro, que gestiona los datos de los pacientes y combina la información de la biblioteca virtual con los archivos STL generados, apoyando el diseño de la prótesis dental.

El proceso con el sistema PIC comienza con la colocación de los pilares PIC transfers en los implantes, seguido de la captura fotográfica con la cámara estereofotogramétrica, que se posiciona a unos 20 centímetros de la boca del paciente. Esta captura registra la posición exacta de los implantes y dicha información se almacena en un archivo STL conocido como archivo PIC file. Este archivo detalla la posición de cada implante, incluyendo ángulos y distancias para la fabricación precisa de la rehabilitación. (50) El sistema PIC dental ofrece versatilidad durante el proceso de captura, habilitando la realización de modificaciones tales como desmontar y reubicar los PIC transfers. Esta capacidad es particularmente útil cuando los implantes están muy cerca uno de otro o se encuentran en ángulos convergentes, lo que ayuda a asegurar un registro preciso en condiciones desfavorables. (51)

En cuanto al funcionamiento de la PIC app, el registro de la posición de los implantes se obtiene mediante una serie de fotografías realizadas desde distintos ángulos alrededor de los PIC transfers. Habitualmente se capturan entre 15 y 25 imágenes, lo que permite reunir la información necesaria para reconstruir la posición tridimensional de los implantes. Todas las tomas se realizan a una distancia de 20 a 30 cm, siguiendo la secuencia establecida por la aplicación: primero una fotografía frontal desde una posición central; después, varias tomas adicionales variando la inclinación del dispositivo hacia arriba y hacia abajo; y finalmente el mismo procedimiento desde las vistas laterales derecha e izquierda. Una vez finalizada la toma, la aplicación procesa todas las fotografías mediante un algoritmo fotogramétrico que reconoce los marcadores, identifica los puntos coincidentes entre ellas y calcula la ubicación espacial de cada implante. A diferencia del sistema PIC convencional que utiliza un dispositivo específico capaz de capturar gran cantidad de imágenes de forma simultánea y bajo condiciones óptimas y estables, la PIC app depende de una secuencia de fotografías tomadas manualmente, lo que hace que el procedimiento sea más flexible, aunque también más sensible al movimiento y a la calidad individual de cada imagen. (46)

3.4 Marcadores fiduciales (PIC transfers)

Los PIC transfers son captadores intraorales diseñados con una forma característica de bandera que se coloca directamente sobre los implantes

dentales. Estos aditamentos específicos se atornillan manualmente a los implantes o pilares protésicos (MultiUnit) con un torque de 10 Ncm para garantizar su estabilidad durante el proceso de escaneo. Cada PIC transfer es codificado en el software del sistema antes de iniciar la captura, asegurando su correcta identificación y posicionamiento en el modelo digital. Su diseño está optimizado para ser perfectamente visible por las dos lentes de la cámara estereoscópica, lo que facilita la creación de un modelo tridimensional altamente preciso sin necesidad de retirar o reposicionar los componentes entre grabaciones. De esta manera, los PIC transfers actúan como referencias tridimensionales fundamentales para la reconstrucción espacial exacta de los implantes, mejorando la exactitud y reduciendo los errores de distorsión que pueden afectar otros métodos de captura digital. (9)

Se ha podido demostrar que los PIC transfers permite una transferencia altamente precisa y exacta de la posición de los implantes, sin afectar negativamente la calidad de la impresión digital. Sallorenzo y Gómez-Polo evaluaron la precisión y exactitud del PIC Dental frente a un escáner intraoral convencional, observando mejores resultados para el sistema de fotogrametría gracias a que el PIC transfer elimina la necesidad de unir múltiples imágenes, reduciendo así la acumulación de errores, especialmente en arcadas completamente edéntulas. (26) De forma complementaria, Tohme et al. confirmaron que la fotogrametría basada en PIC Dental superó a la impresión convencional y al escaneo intraoral digital, destacando que el PIC transfer capta la posición tridimensional de los implantes de manera independiente de los tejidos blandos o referencias anatómicas, lo que resulta particularmente ventajoso en pacientes desdentados. (52)

Asimismo, estos hallazgos son corroborados por la investigación de Revilla-León que comparó diferentes sistemas de estereofotogrametría, tanto intraorales como extraorales, destacando que el PIC Dental, alcanzó los mejores valores de precisión angular y exactitud lineal. Además, reafirmó la eficacia del PIC transfer como herramienta fiable para capturar la posición de implantes en arcadas edéntulas completas sin comprometer la calidad de la impresión digital. (36)

4. EXACTITUD Y PRECISIÓN

En el contexto de las normas ISO 5725-5, las definiciones de exactitud y precisión son cruciales para comprender como evaluar y mejorar la calidad de los métodos de medición en diferentes disciplinas, sobre todo en la odontología digital. Estos conceptos son claves dentro de los IOS. (53)

- Exactitud: Indica si el promedio de varias mediciones se acerca al valor real. Evalúa si hay un sistema sistemático en las mediciones, permitiendo ajustar el método para acercarse más al valor real.
- Precisión: Mide la variación de los resultados entre sí cuando se realizan varias mediciones bajo las mismas condiciones. Es esencial para lograr un ajuste pasivo entre los implantes y la prótesis. Se dividen en dos tipos:
 - o Repetibilidad: Capacidad de obtener resultados consistentes cuando la medición se repite en las mismas condiciones y con el mismo operador.
 - o Reproductibilidad: Evalúa si el método sigue siendo confiable cuando se usa en diferentes condiciones.

Según la investigación “Trueness of 12 intraoral scanners in the full-arch implant impression: a comparative in vitro study” por Mangano et al. los IOS dos factores fundamentales: exactitud y precisión. Para garantizar la exactitud de los modelos que se obtienen, se hace necesario compararlo con un sistema de referencia altamente preciso, por ejemplo, una máquina de medición por coordenadas (CMM) o un escáner industrial, ya que estos equipos tienen una exactitud certificada de $\leq 5 \mu\text{m}$.

Sin embargo, debido a las limitaciones que impiden el uso de dichos dispositivos en la boca, la validación de la exactitud in vivo resulta compleja, por esto, la mayoría de los estudios se realizan en entornos controlados con modelos de yeso. Para la evaluación de la precisión, no se necesita una referencia externa, ya que esta se determina mediante la repetición de escaneo intraorales sobre un mismo objeto y el posterior análisis de la variabilidad entre ellos. (13)

En estudios in vitro, se han desarrollado diversos métodos para medir la exactitud de los IOS, siendo el más común la superposición de mallas digitales

obtenidas sobre una malla de referencia obtenida con un escáner industrial o de escritorio certificado. (13)

5. AJUSTE PASIVO

5.1 Definición de ajuste pasivo

El ajuste pasivo se puede definir como la alineación óptima entre los componentes de una prótesis implantosoportada, en la cual no existen discrepancias ni espacios entre la estructura protésica y los pilares del implante. Esto forma un contacto simultáneo y uniforme entre todas las superficies en la unión atornillada, asegurando así que no se genere ninguna tensión indeseada en el sistema implante-prótesis. (54)

El ajuste pasivo disminuye la transmisión de estrés mecánico, evitando sobrecargas que puedan afectar la estabilidad ósea y la longevidad tanto del implante como de la prótesis, favoreciendo su durabilidad y funcionalidad a largo plazo. (54)

En el proceso de fabricación de una prótesis, las distorsiones pueden ocurrir en diversas etapas, desde la toma de impresiones hasta la creación de la prótesis definitiva. Aunque las alteraciones en cada fase individual pueden ser mínimas, su acumulación a lo largo del proceso puede resultar en una distorsión significativa, generando tensión interna en la estructura protésica.

Según un estudio llamado "Cement fixation and screw retention: parameters of passive fit. An in vitro study of three-unit implant-supported fixed partial dentures" por Heckmann y colaboradores expone que aproximadamente un 50% del total de las distorsiones finales se deben a la toma de impresiones y el otro 50% a las diversas fases de fabricación en el laboratorio. Esto quiere decir, que realizar una técnica de impresión precisa es fundamental para el éxito de la rehabilitación. Existen otros factores que pueden afectar el ajuste pasivo como es la extensión de la prótesis, tipo de conexión, método de fabricación, entre otros. (55)

La magnitud de la discrepancia permitida entre el pilar del implante y la subestructura protésica es objeto de duda, con múltiples opiniones sobre el límite aceptable. Previamente Branemark y colaboradores expusieron que el límite de la discrepancia no debe de superar los 10 μm para garantizar una adecuada

integración y funcionalidad (56), sin embargo, según datos actualizados provenientes de la revisión sistemática de Abdelrehim et al. y el estudio clínico de Estibalez-Recasens et al., se considera que un desajuste horizontal de hasta 345 μm y uno vertical de hasta 160 μm podrían ser clínicamente aceptables, sin que ello genere complicaciones biológicas ni mecánicas relevantes. Estos hallazgos coinciden en que, aunque lograr un ajuste completamente pasivo es clínicamente difícil, ciertos niveles de discrepancias pueden ser tolerados sin comprometer la estabilidad o la longevidad de las rehabilitaciones sobre implantes. (9,10) Aunque existen distintas opiniones sobre las cifras exactas, hay un acuerdo generalizado en que cuanto menor sea la discrepancia, mejor será el desempeño a largo plazo, tanto en estabilidad mecánica como éxito biológico. (56)

5.2 Importancia del ajuste pasivo en rehabilitaciones completas sobre implantes

Una diferencia importante entre los dientes y los implantes radica en su conexión con el entorno bucal, mientras los dientes están conectados al alvéolo dental mediante el ligamento periodontal el cual permite cierta movilidad, los implantes están en contacto directo con el hueso lo que resulta en movimientos más limitados. Los dientes naturales, gracias a este ligamento realizan un desplazamiento axial promedio dentro del alvéolo que varía de 25 a 30 μm verticalmente y de 56 a 108 μm lateralmente. Sin embargo, los implantes al carecer de ligamento periodontal, poseen movimientos más restringidos limitándose a 3-5 μm verticalmente y 10-50 μm en dirección vestíbulo-lingual. Esta diferencia subraya la rigidez propia de los implantes comparado con la flexibilidad fisiológica de los dientes naturales. (57)

Esta falta de amortiguación que presentan los implantes hace que cualquier tensión o desajuste se transmita directamente al hueso, aumentando la posibilidad de reabsorción ósea. Dicha característica destaca la necesidad de asegurar un ajuste pasivo adecuado en la prótesis sobre implantes para evitar complicaciones biomecánicas y así asegurar el tratamiento a largo plazo. (58)

5.3 Técnicas para evaluar el ajuste pasivo en clínica/in vivo

En la evaluación del ajuste pasivo existen varias técnicas que ayudan a asegurar la funcionalidad a largo plazo y el éxito de las rehabilitaciones sobre implantes,

abordando con precisión los desafíos biomecánicos y técnicos de estos tipos de tratamientos. Diversos artículos describen las siguientes técnicas: (59,60)

- Evaluación visual y táctil directa: Es un proceso cuidadoso que combina la observación directa bajo condiciones de iluminación y ampliación óptimas con el tacto, utilizando una sonda dental para detectar diferencias significativas en el margen entre la prótesis y los pilares.
- Prueba de presión con los dedos: Es una técnica que implica aplicar presión de manera alterna en los extremos distales de la prótesis implantosoportadas. Este método es crucial para identificar movimientos o levantamientos en la prótesis que puede sugerir un mal asentamiento.
- Radiografías: Este procedimiento es crucial, permite la inspección detallada de la adaptación de la prótesis en las zonas subgingivales, que permanecen ocultas en la evaluación clínica. Esta técnica es de suma importancia para examinar la interfaz prótesis-implante, asegurando así que el ajuste sea el adecuado.
- Test de Sheffield: Es una técnica que consiste en apretar un tornillo en el extremo distal de la prótesis implantosoportada. Este método permite verificar la integridad del ajuste de toda la estructura. Al ajustar el tornillo, se observa que no haya espacios o levantamiento en los otros pilares de soporte, lo que indicaría la falta de ajuste pasivo.
- Materiales reveladores: Se emplean medios reveladores como pastas indicadoras de presión y siliconas de impresión. Estos se aplican entre la prótesis y los pilares de los implantes para identificar y visualizar cualquier área de contacto deficiente o mal adaptación. Al aplicar estos materiales y la prótesis en su posición, las zonas donde el ajuste no es óptimo quedan marcadas de forma clara.
- Prueba de resistencia del tornillo: Es un método en el que se monitorea la cantidad de torque requerido para apretar completamente los tornillos de una rehabilitación sobre implantes. Esta técnica permite determinar si se está aplicando una fuerza excesiva, lo que indicaría alta tensión y posibles áreas de mal ajuste dentro de la estructura de la prótesis. Al medir de forma cuidadosa el esfuerzo necesario para alcanzar el cierre completo

del tornillo, se puede identificar irregularidades en la adaptación de la estructura.

JUSTIFICACIÓN DEL TEMA ELEGIDO

El uso del sistema PIC Dental ha demostrado ser altamente fiable para registrar con exactitud y precisión la posición de implantes dentales, especialmente en rehabilitaciones de arcadas completas. Dentro de este sistema, los PIC transfers convencionales han sido validados ampliamente en la literatura como componentes eficaces que no afectan la precisión ni la exactitud del escaneo digital. Sin embargo, la reciente incorporación de los PIC transfers mini, diseñados para situaciones clínicas con espacio limitado y pensados para complementar al estándar, ha generado dudas sobre su rendimiento real. Hasta la fecha, no existen estudios que evalúen su impacto en la calidad del registro digital, lo que plantea la necesidad de analizar si mantienen los estándares clínicos establecidos o si podrían comprometer la calidad del escaneo.

La realización de este estudio es de gran importancia, ya que aportará evidencia científica sobre una herramienta recientemente incorporada a la práctica clínica, permitiendo fundamentar mejor la toma de decisiones en el ámbito odontológico. Asimismo, los resultados obtenidos podrían impactar positivamente en la optimización del flujo digital en implantología, permitiendo elegir de manera más precisa los componentes según las necesidades de cada paciente.

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Hipótesis nula:

- El tipo de PIC transfer utilizado no influye en la precisión ni en la exactitud del registro de la posición de múltiples implantes en arcadas completas mediante el sistema PIC app.

Objetivo principal:

- Evaluar si el tipo de PIC transfer empleado en las impresiones de arcada completa con múltiples implantes afecta a la precisión y exactitud del sistema PIC app.

Objetivos específicos:

1. Analizar la precisión del sistema PIC app al utilizar PIC transfers estándar, PIC transfers mini y PIC transfers combinados.
2. Determinar la exactitud del sistema PIC app al utilizar PIC transfers estándar, PIC transfers mini y PIC transfers combinados.

MATERIAL Y MÉTODOS

En este estudio experimental in vitro de carácter comparativo se realizaron noventa capturas mediante el sistema de fotogrametría extraoral PIC app. El protocolo fue aprobado por el Comité de Ética de Investigación de la Universidad Europea de Madrid, y las pruebas se desarrollaron en las instalaciones de PIC Dental entre enero y junio de 2025.

Para la obtención de los registros se utilizó un modelo mecanizado de titanio con seis posiciones roscadas distribuidas equitativamente a lo largo de la arcada, diseñado para permitir la conexión directa de pilares multi-unit (MU) sin necesidad de implantes ni análogos (Figura 1). Este modelo fue previamente medido con una máquina de medir coordenadas (CMM), obteniéndose las distancias euclídeas y las angulaciones reales entre las posiciones interimplantarias. Dichas mediciones se establecieron como patrón de referencia o gold standard frente al cual se evaluaron las captaciones obtenidas con la aplicación PIC app.

El estudio incluyó un total de noventa captaciones digitales, distribuidas en tres grupos experimentales de treinta registros cada uno. El primer grupo combinó PIC transfers mini y estándar (Figura 1A), el segundo se realizó utilizando exclusivamente PIC transfers mini (Figura 1B) y el tercero empleó únicamente PIC transfers estándar (Figura 1C). Los dos primeros grupos fueron obtenidos específicamente para este trabajo, mientras que los registros correspondientes al grupo de PIC transfers estándar procedieron de un estudio previo realizado bajo las mismas condiciones metodológicas y utilizando el mismo modelo de titanio, los cuales fueron cedidos por su autor con fines comparativos.

Antes de iniciar el proceso de captura, se seleccionó cuidadosamente el lote de PIC transfers a utilizar y se determinó la ubicación exacta de cada uno sobre los pilares del modelo (Figura 2A, 2B y 2C). La captura de los datos se efectuó mediante la aplicación PIC app, desarrollada para dispositivos iOS, que emplea la cámara de un iPhone 12-16 Pro como sistema de registro fotogramétrico. El procedimiento comenzó con una fotografía central del modelo, seguida de una serie de capturas adicionales desde distintas angulaciones, desplazándose progresivamente de abajo, arriba y derecha a izquierda hasta completar el

barrido tridimensional de la arcada, manteniendo en todo momento una distancia de captura aproximada de 20 a 30 cm (Figura 3). Una vez finalizada la toma, la aplicación indicó la correcta adquisición mediante el mensaje “Éxito” (Figura 4).

Posteriormente, se seleccionó en la interfaz el tipo de aditamento empleado, en este caso MU, y la aplicación identificó automáticamente cada PIC transfer a partir de su codificación interna (Figura 5). A partir de las imágenes obtenidas, el sistema calculó las coordenadas tridimensionales de los ejes longitudinales de los marcadores y generó un archivo PIC file, cuya malla coincide exactamente con la de las librerías de Exocad, garantizando la compatibilidad geométrica y evitando la introducción de errores adicionales durante las etapas posteriores de alineación “best-fit” (Figura 6). En total se obtuvieron noventa PIC files, a partir de los cuales se calcularon las distancias euclídeas y las angulaciones relativas entre los distintos marcadores, expresadas en micrómetros (μm) y grados ($^\circ$), respectivamente.

Los archivos generados fueron posteriormente importados al software Geomagic Control X (Figura 7), donde se identificaron los planos de cada pilar MU (Figura 8A), se trazaron las líneas (Figura 8B) y los puntos de referencia (Figura 8C), y se extrajeron las coordenadas espaciales correspondientes (Figura 9). Estos datos fueron transferidos a una hoja de cálculo de Excel para su análisis numérico y la obtención de los resultados finales. En cada captación se analizaron todas las combinaciones posibles entre los seis pilares ($n = 15$), lo que generó un total de 1.350 mediciones lineales y 1.350 mediciones angulares.

La exactitud se definió como la diferencia absoluta entre las mediciones obtenidas mediante el sistema PIC app y las registradas con la CMM, tanto en valores lineales (μm) como angulares ($^\circ$). La precisión, por su parte, se definió como la variabilidad o dispersión de las mediciones dentro de cada grupo experimental, expresada mediante la varianza. Para cada tipo de marcador se calcularon las estadísticas descriptivas correspondientes: media, desviación estándar, mediana, rango intercuartílico e intervalo de confianza del 95 %, este último estimado mediante el método de Wald.

La normalidad de las variables se evaluó con la prueba de Shapiro–Wilk, y según el comportamiento de los datos, se aplicó un ANOVA de una vía para las

variables con distribución paramétrica o la prueba de Kruskal–Wallis en caso contrario. Cuando se observaron diferencias significativas entre grupos, se realizaron comparaciones múltiples con corrección de Bonferroni. La homogeneidad de las varianzas se verificó mediante la prueba de Levene. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa Stata BE 17 (StataCorp, College Station, TX, EE. UU.), estableciendo un nivel de significación de $p < 0,05$.



Figura 1. Modelo mecanizado de titanio con seis pilares MU diseñado para la conexión directa de PIC transfers. A. Modelo con PIC transfers combinados (mini y estándar) B. Modelo con PIC transfers mini. C. Modelo con PIC transfers estándar.

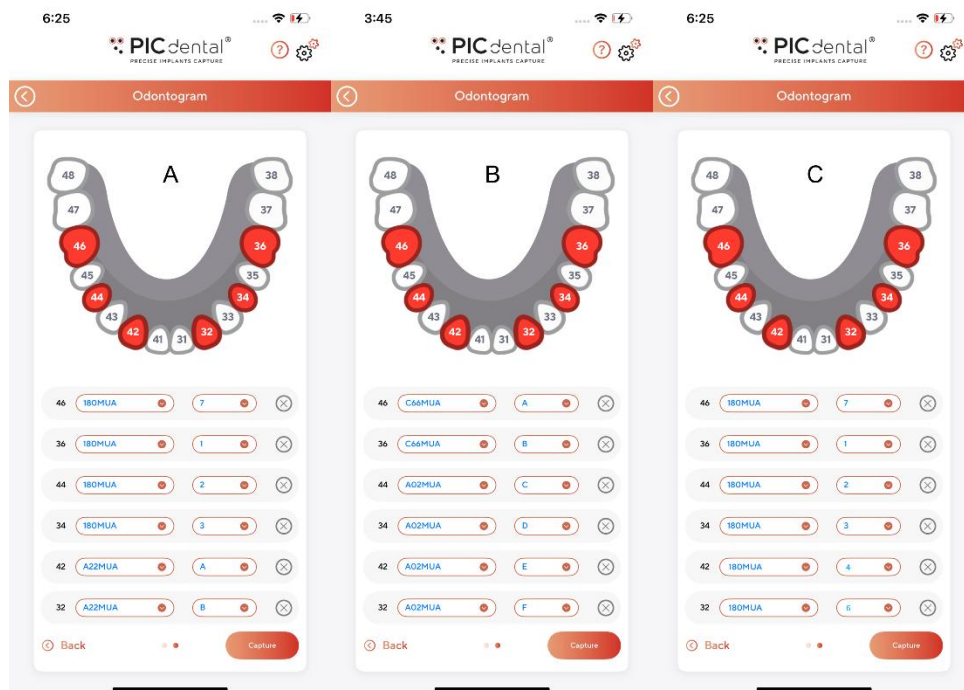


Figura 2. Capturas de pantalla del registro de los lotes de PIC transfers en la interfaz de la aplicación PIC app. A. Registro en la aplicación PIC app de los lotes de los PIC transfers combinados. B. Registro en la aplicación PIC app de los lotes de los PIC transfers mini. C. Registro en la aplicación PIC app de los lotes de los PIC transfers estándar.

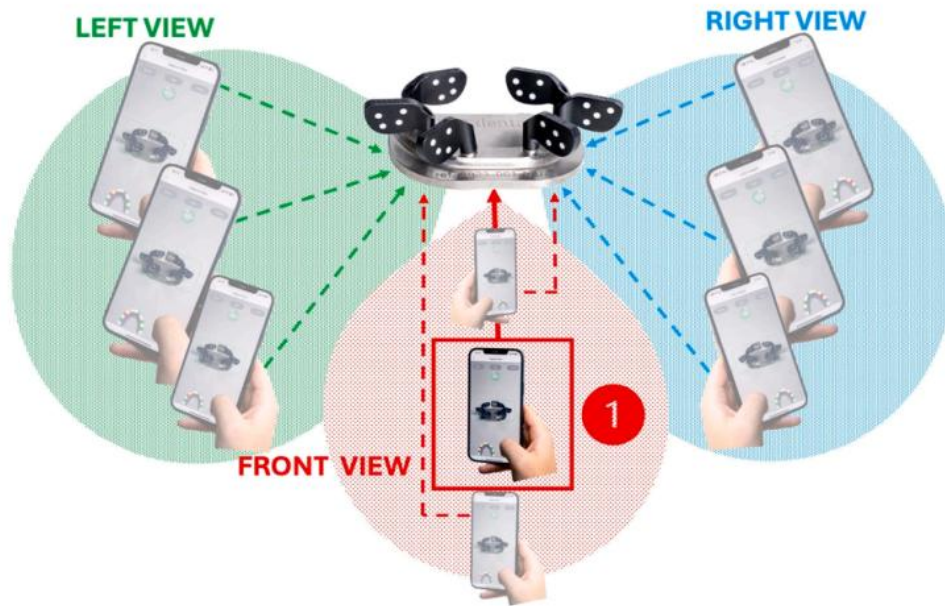


Figura 3. Representación esquemática de la secuencia de capturas recomendada para la PIC app. Imagen adaptada de: Santamaría-Laorden A, Martínez-Marugán A, Andreu-Vázquez C, Orejas-Pérez J. Complete arch implant capture using a photogrammetry algorithm and smartphone app: An in vitro study. J Prosthet Dent. 2025

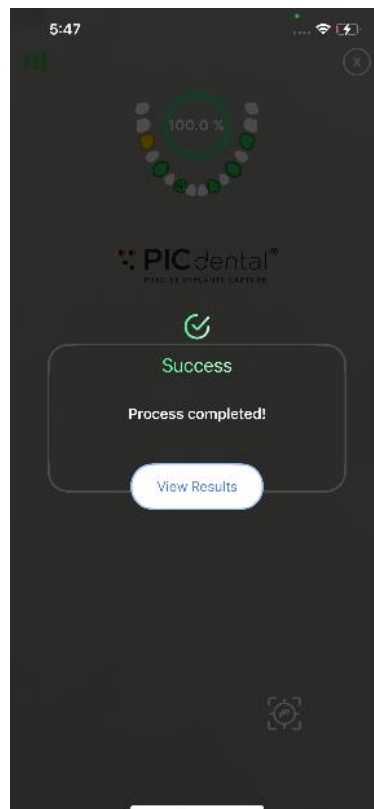


Figura 4. Confirmación del éxito de la captura.

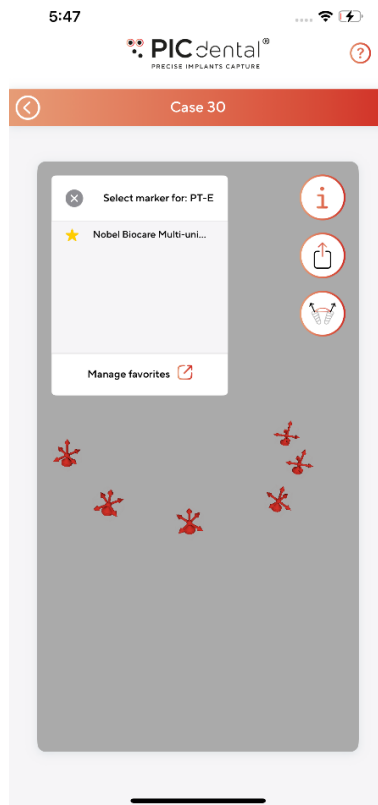


Figura 5. Selección del tipo de aditamento (MU) en la aplicación PIC app.

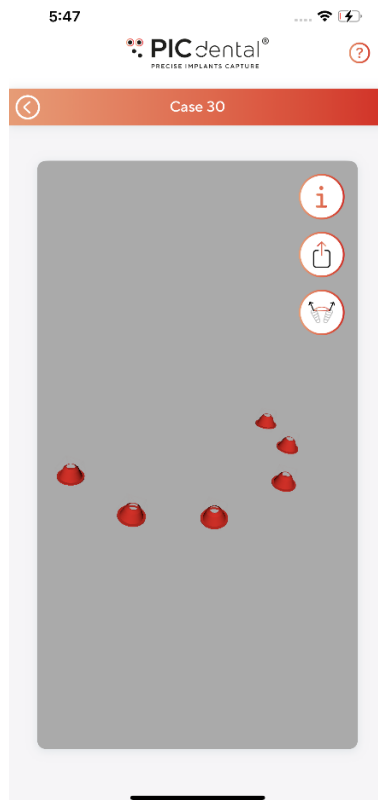


Figura 6. Visualización del archivo PIC file generado por la aplicación PIC app tras la captura.

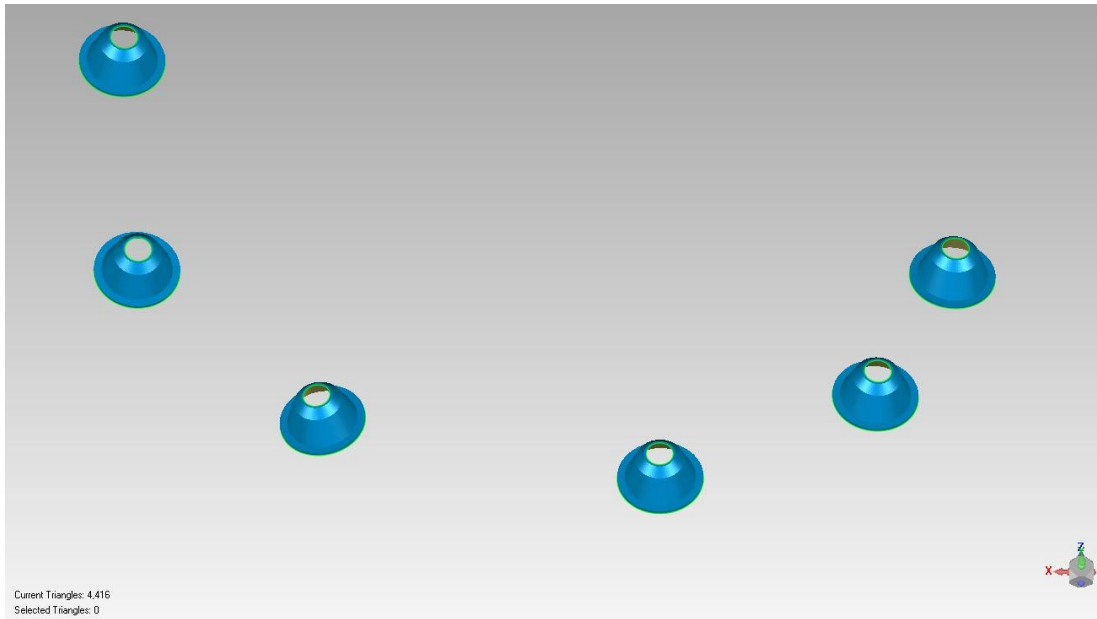


Figura 7. Visualización inicial del PIC file en Geomagic Control X con los pilares MU.



Figura 8. Procedimiento de definición geométrica de cada marcador en el software Geomagic Control X. A. Generación del plano de referencia tangente a la superficie superior del marcador. B. Trazado de la línea axial correspondiente al eje longitudinal del marcador. C. Determinación del punto de referencia central sobre la base del marcador para la obtención de coordenadas tridimensionales.

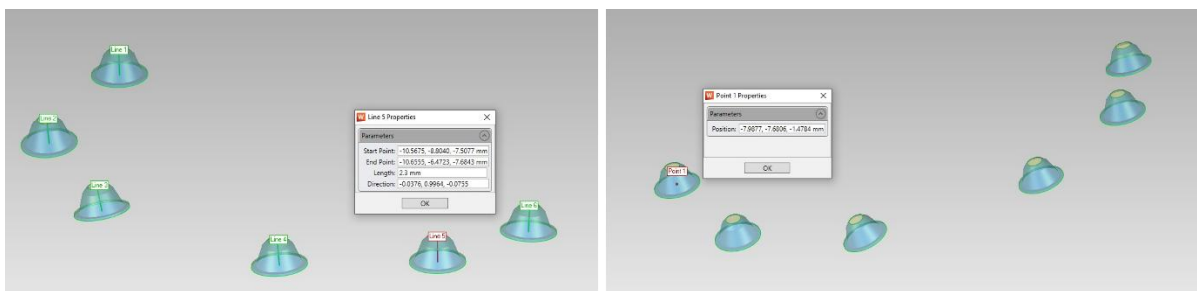


Figura 9. Obtención de las coordenadas tridimensionales en el software Geomagic Control X.

RESULTADOS

Exactitud de las mediciones

En cuanto a las discrepancias lineales, la prueba de Kruskal-Wallis reveló diferencias estadísticamente significativas entre los tres tipos de marcadores utilizados ($p < 0,001$; Figura 1A). Las estadísticas descriptivas completas para las discrepancias lineales y angulares se presentan en la Tabla 1. El análisis Posthoc con corrección de Bonferroni mostró que las discrepancias fueron significativamente mayores con los PIC transfers mini en comparación con los PIC transfers estándar (diferencia media = $17,79 \mu\text{m}$; $p < 0,001$) y con los PIC transfers combinados (diferencia media = $31,91 \mu\text{m}$; $p < 0,001$). Asimismo, las discrepancias fueron significativamente menores con los PIC transfers combinados frente a los estándar (diferencia media = $14,22 \mu\text{m}$; $p < 0,001$).

Respecto a las discrepancias angulares, también se encontraron diferencias significativas entre los grupos según la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0,001$; Figura 1B). Las comparaciones por pares indicaron que los PIC transfers mini presentaron discrepancias angulares significativamente mayores que los estándar (diferencia media = $0,14^\circ$; $p < 0,001$) y que los combinados (diferencia media = $0,18^\circ$; $p < 0,001$). Los PIC transfers combinados mostraron menores discrepancias angulares en comparación con los estándar (diferencia media = $0,04^\circ$; $p = 0,003$).

Precisión de las mediciones

La prueba de Levene evidenció diferencias significativas en la varianza de las mediciones lineales entre los tres grupos ($W_0 = 6,9757$; $gl = 2,42$; $p = 0,002$). Los PIC transfers mini mostraron la menor precisión (mayor varianza), mientras que la mayor precisión lineal se observó al utilizar PIC transfers combinados.

En cuanto a la precisión angular, también se observaron diferencias significativas ($W_0 = 611,40$; $gl = 2,42$; $p < 0,001$). Al igual que en las mediciones lineales, los PIC transfers combinados presentaron la mayor precisión (menor varianza), y los PIC transfers mini, la menor.

| Tipo de PIC Transfer utilizado | Discrepancias lineares (μm) | Discrepancias angulares (grados) |
|--------------------------------|--|----------------------------------|
| Mini | | |
| Media \pm DE | 48.61 \pm 31.08 | 0.30 \pm 0.31 |
| Mediana [p25, p75] | 45.09 [29.80, 63.67] | 0.18 [0.08, 0.35] |
| 95%IC | (15.53, 17.86) | (0.27, 0.33) |
| Mínimo | 0,03 | <0.01 |
| Máximo | 168,44 | 1,11 |
| Estándar | | |
| Media \pm DE | 30.92 \pm 20.88 | 0.16 \pm 0.09 |
| Mediana [p25, p75] | 29.85 [12.58, 46.60] | 0.18 [0.08, 0.24] |
| 95%IC | (28.98, 32.85) | (0.15, 0.17) |
| Mínimo | 0,01 | <0.01 |
| Máximo | 87,62 | 0,42 |
| Combinado | | |
| Media \pm DE | 16.79 \pm 12.54 | 0.11 \pm 0.08 |
| Mediana [p25, p75] | 14.32 [6.29, 25.71] | 0.11 [0.05, 0.18] |
| 95%IC | (45.73, 51.49) | (0.11, 0.13) |
| Mínimo | 0,01 | <0.01 |
| Máximo | 66,93 | 0,33 |

DE, desviación estándar
p, percentil
IC , intervalo de confianza

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de las discrepancias generales en las medidas lineales y angulares de los diferentes PIC transfers utilizados.

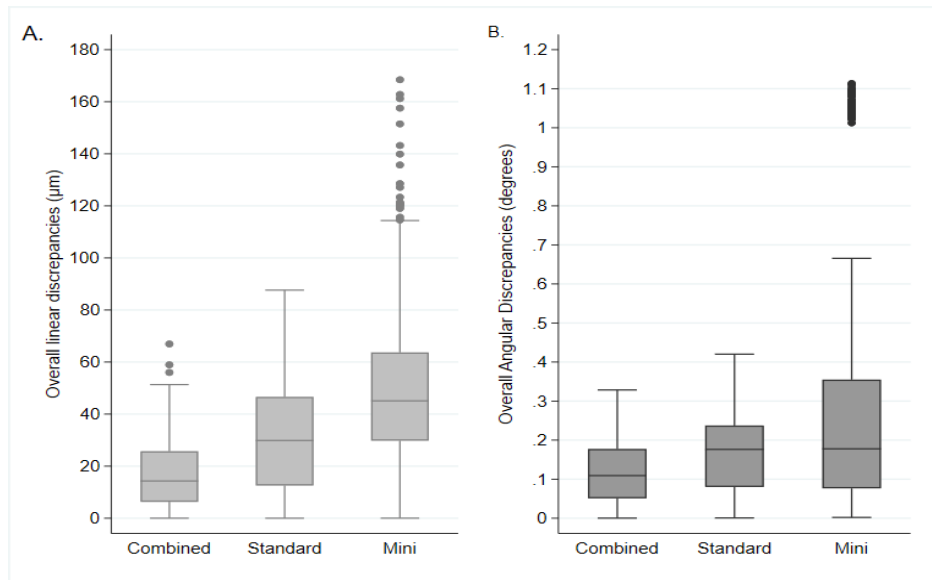


Figura 1. Box plot de las discrepancias lineales y angulares según el tipo de PIC transfers empleados. A. Medidas lineales. B. Medidas angulares.

Los diagramas de caja representan la mediana, los percentiles 25 y 75, y los percentiles representan valores adyacentes.

DISCUSIÓN

Se rechazó la hipótesis nula que planteaba que el tipo de PIC transfer empleado no afectaba en la precisión y exactitud del sistema PIC app. Los resultados mostraron que las tres configuraciones evaluadas presentaron diferencias estadísticamente significativas tanto en las mediciones lineales como en las angulares.

Este estudio evaluó la exactitud y la precisión de un sistema de fotogrametría extraoral empleando un teléfono móvil y una app basada en fotogrametría llamado PIC app. Se empleó tres configuraciones de PIC transfers: mini, combinados y estándar. Los resultados obtenidos demostraron que la elección del marcador influye de manera clara en la calidad del registro, evidenciando que el tipo de PIC transfer influye directamente en la precisión y exactitud del registro digital.

La literatura reciente ha consolidado la fotogrametría como una de las técnicas más fiables para las rehabilitaciones completas implantosoportadas. Revilla-León et al. demostraron que ofrece una exactitud superior al escaneo intraoral, destacando su utilidad en impresiones de arcadas completas. (36) Esta diferencia se debe a que, mientras los IOS pueden ver comprometida su precisión y exactitud por factores como el patrón de escaneado, la experiencia del operador, los problemas derivados del proceso de best-fit o la ausencia de referencias en arcadas edéntulas extensas, la fotogrametría calcula la posición tridimensional de los implantes a partir de múltiples imágenes tomadas desde diferentes ángulos, evitando así que los errores se acumulen a lo largo de la arcada. (38) Diversos estudios coinciden en que, tanto en su versión extraoral como intraoral, la fotogrametría proporciona valores de exactitud lineal y angular superiores a los obtenidos con los IOS, mostrando un comportamiento más estable incluso en situaciones clínicas complejas. (36,61) Además, al no depender de un recorrido continuo de escaneo ni de la habilidad del operador para ejecutar la técnica, reduce la variabilidad entre registros y permite obtener modelos digitales más consistentes, favoreciendo así condiciones óptimas para lograr un ajuste pasivo adecuado en prótesis completas. (46,61) En conjunto, la evidencia indica que la fotogrametría es una opción fiable, superando al escaneo

intraoral en situaciones donde es fundamental mantener la exactitud del modelo digital o cuando se requieren registros de alta precisión. (46)

De manera similar, Ma et al. observaron que la fotogrametría extraoral presenta una menor desviación lineal media en comparación con el escaneado intraoral y la impresión convencional. No obstante, subrayaron que la precisión y la exactitud del registro digital no dependen únicamente de la tecnología utilizada, sino también de factores como la geometría y el diseño de los componentes, en particular los SBs (62). Esta afirmación coincide con lo descrito por Azevedo et al., quienes concluyeron que los diseños con geometría optimizada y codificación estructural definida mejoran la determinación del eje del implante y reducen los errores acumulativos (40).

En el presente estudio, la precisión, entendida como la capacidad del sistema para reproducir consistentemente las mediciones, se vio afectada por el tipo de marcador empleado. Los PIC transfers combinados mostraron menor varianza entre los registros, indicando mayor estabilidad y consistencia en las captaciones. Por el contrario, los PIC transfers mini evidenciaron un desempeño significativamente inferior, con discrepancias más elevadas y menor precisión. Estos resultados refuerzan la influencia crítica del diseño de los marcadores en la calidad del escaneo, incluso al utilizar tecnologías avanzadas como la fotogrametría. Este comportamiento concuerda con lo descrito por Pachiou et al. quienes subrayan que las características físicas de los SBs, como su altura, diámetro y la facilidad con la que el escáner puede captar su forma tienen un impacto directo en la calidad del escaneo. (35) Una posible explicación de los resultados es que los PIC transfers mini, al tener una menor altura y volumen, ofrecen una superficie más limitada para ser detectada con precisión por los algoritmos de reconstrucción espacial. Esta reducción en el área visible dificulta la identificación de sus referencias geométricas clave, lo que incrementa la probabilidad de errores en la determinación del eje del implante y, por tanto, en la fidelidad del registro. Además, su menor tamaño puede hacerlos más sensibles a pequeños movimientos o variaciones en el ángulo de captación, factores que afectan directamente tanto la exactitud como la precisión. (35,40)

En esta misma línea, Pozzi et al. evaluaron la exactitud de una nueva tecnología de fotogrametría para impresiones sobre implantes, concluyendo que permite obtener resultados más exactos que los IOS convencionales, especialmente en arcadas completas. Aunque su estudio no analizó directamente el impacto del tipo de marcador, destacaron que ciertas características físicas como el tamaño, la forma o la visibilidad del SB pueden facilitar su detección por el sistema y, en consecuencia, influir en la calidad del modelo digital generado (63). En este contexto, los hallazgos del presente estudio, que muestran un mejor desempeño con PIC Transfers combinados, suponemos que al estar los PIC Transfers mini delante facilitan la visión de los posteriores, permitiendo una captación más precisa, amplia y estable de toda la arcada durante el proceso de reconstrucción tridimensional. Aunque no se evaluaron de forma individual las características estructurales de cada marcador, esta configuración habría proporcionado referencias geométricas complementarias que favorecieron una mayor fidelidad en el registro digital obtenido. Estos resultados refuerzan el potencial de la fotogrametría como una técnica fiable para rehabilitaciones extensas sobre implantes, al reducir errores acumulativos y mejorar la fidelidad tridimensional del registro.

En relación con estos resultados, cabe destacar que la literatura disponible hasta ahora es muy limitada, ya que prácticamente no existen estudios que analicen de forma específica cómo el diseño o el tamaño de los marcadores puede influir en la precisión de los sistemas basados en fotogrametría. Esto hace que la presente investigación represente una aportación relevante y novedosa dentro del campo. Aunque la reciente publicación de Santamaría-Laorden et al. no evaluó diferentes configuraciones de marcadores, sí analizó el rendimiento de un sistema de fotogrametría extraoral basado en smartphone, lo que permite establecer un primer punto de comparación. Sus resultados, que muestran un comportamiento similar en cuanto a las tendencias generales de exactitud y precisión, ayudan a contextualizar los hallazgos del presente estudio y refuerzan la coherencia de los datos obtenidos. (46) La congruencia entre ambos trabajos, pese a las diferencias metodológicas, subraya la solidez de los resultados y el carácter innovador de esta investigación.

Además, aunque en los últimos años han surgido diversos sistemas fotogramétricos la mayoría de las investigaciones se han centrado en compararlos con el sistema PIC, que continúa siendo el referente en este tipo de tecnología. Sin embargo, ninguno de estos estudios realiza una comparación con la PIC app, por lo que todavía no existe evidencia que permita contrastar su rendimiento frente a otras alternativas basadas en fotogrametría. Esta ausencia de literatura comparativa resalta aún más la importancia del presente trabajo, ya que aporta los primeros datos disponibles sobre un sistema móvil de fotogrametría extraoral y contribuye a ampliar el conocimiento en un área que sigue creciendo y desarrollándose dentro de la odontología digital.

Por último, la revisión sistemática de Gehrke et al. resalta que aún no existe un consenso claro en cuanto a los métodos para evaluar la precisión de los registros digitales en rehabilitaciones de arcada completa (34). Esta falta de estandarización subraya la necesidad de investigaciones como la presente, que aportan evidencia concreta sobre variables críticas en la digitalización implantológica.

En conjunto, los resultados de este estudio aportan evidencia sólida sobre la influencia del diseño de los marcadores fiduciales en la calidad de los registros obtenidos mediante fotogrametría. Mejorar el diseño en cuanto a su forma, tamaño y sistema de codificación podría aumentar la fidelidad de los registros digitales, además de facilitar la creación de procedimientos estandarizados aplicables a distintos sistemas de escaneado en rehabilitaciones completas sobre implantes. Garantizar una captura precisa no solo es esencial para lograr un adecuado ajuste pasivo, sino también para minimizar el riesgo de complicaciones biomecánicas y biológicas asociadas al tratamiento implantológico.

Limitaciones del estudio

Este estudio presenta algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta. Aunque se analizaron tres configuraciones de marcadores, hubiera sido útil incluir un mayor número de combinaciones o diseños para valorar si el comportamiento del sistema se mantiene en otros escenarios. La comparación con la literatura también resulta restringida, ya que apenas existen estudios que

evalúen específicamente el efecto del diseño del marcador en sistemas de fotogrametría, y todavía no hay investigaciones que analicen la PIC app bajo condiciones similares.

Además, los resultados proceden de un modelo in vitro, lo que, si bien permite trabajar en un entorno controlado, no refleja completamente las variables presentes en un contexto clínico real, como los movimientos del paciente, la presencia de tejidos blandos o las variaciones en la toma de imágenes.

CONCLUSIONES

1. El tipo de PIC transfer influye significativamente en la precisión y exactitud del sistema PIC app al registrar la posición de múltiples implantes en arcadas completas.
2. La mayor precisión del sistema PIC app se logra al emplear los PIC transfer combinados, seguido de los estándar, obteniéndose el peor resultado con los mini.
3. El sistema PIC app obtiene la mayor exactitud al emplear los PIC transfer combinados seguido de los estándar siendo el peor resultado con los mini.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍAS

1. Jayatissa P, Hewapathirane R. A REVIEW OF DENTAL INFORMATICS: CURRENT TRENDS AND FUTURE DIRECTIONS. (1).
2. Gawali N, Shah P, Gowdar I, Bhavsar K, Giri D, Laddha R. The Evolution of Digital Dentistry: A Comprehensive Review. *Journal of Pharmaceutical and Bioallied Sciences*. 3 de abril de 2024;16(Suplemento 3):S1920-S1922.
3. Jurshid Z. Digital Dentistry: Transformation of Oral Health and Dental Education with Technology. *Journal of Dentistry of Europe*. 20 de septiembre de 2023;17(4):943-4.
4. Lee Y, Ku HM, Jun MK. Clinical Application of Intraoral Scanners in Dentistry: A Narrative Review. *Oral*. 20 de diciembre de 2024;4(4):639-52.
5. Kihara H, Hatakeyama W, Komine F, Takafuji K, Takahashi T, Yokota J, et al. Accuracy and practicality of intraoral scanner in dentistry: A literature review. *J Prosthodont Res*. abril de 2020;64(2):109-13.
6. Mangano F, Gandolfi A, Luongo G, Logozzo S. Intraoral scanners in dentistry: a review of the current literature. *BMC Oral Health*. diciembre de 2017;17(1):149.
7. Cheng J, Zhang H, Liu H, Li J, Wang HL, Tao X. Accuracy of edentulous full-arch implant impression: An in vitro comparison between conventional impression, intraoral scan with and without splinting, and photogrammetry. *Clin Oral Implants Res*. mayo de 2024;35(5):560-72.
8. Vitai V, Németh A, Sólyom E, Czumbel LM, Szabó B, Fazekas R, et al. Evaluation of the accuracy of intraoral scanners for complete-arch scanning: A systematic review and network meta-analysis. *J Dent*. octubre de 2023;137:104636.
9. Estibalez-Recasens M, Serrano-Granger C, Santamaría-Laorden A, Andreu-Vázquez C, Orejas-Pérez J. Precision of stereophotogrammetry in complete arch implant recordings: A clinical study. *J Prosthet Dent*. enero de 2025;S0022391325000058.

10. Abdelrehim A, Etajuri EA, Sulaiman E, Sofian H, Salleh NM. Magnitude of misfit threshold in implant-supported restorations: A systematic review. *J Prosthet Dent.* septiembre de 2024;132(3):528-35.
11. Richert R, Goujat A, Venet L, Viguie G, Viennot S, Robinson P, et al. Intraoral Scanner Technologies: A Review to Make a Successful Impression. *J Healthc Eng.* 2017;2017:1-9.
12. Kravitz ND, Groth C, Jones PE, Graham JW, Redmond WR. Intraoral Digital Scanners. 2014;(6).
13. Mangano FG, Admakin O, Bonacina M, Lerner H, Rutkunas V, Mangano C. Trueness of 12 intraoral scanners in the full-arch implant impression: a comparative in vitro study. *BMC Oral Health.* diciembre de 2020;20(1):263.
14. Carneiro Pereira AL, Souza Curinga MR, Melo Segundo HV, Da Fonte Porto Carreiro A. Factors that influence the accuracy of intraoral scanning of total edentulous arches rehabilitated with multiple implants: A systematic review. *J Prosthet Dent.* junio de 2023;129(6):855-62.
15. Jamjoom FZ, Aldghim A, Aldibasi O, Yilmaz B. Impact of intraoral scanner, scanning strategy, and scanned arch on the scan accuracy of edentulous arches: An in vitro study. *J Prosthet Dent.* junio de 2024;131(6):1218-25.
16. Mizumoto RM, Yilmaz B, McGlumphy EA, Seidt J, Johnston WM. Accuracy of different digital scanning techniques and scan bodies for complete-arch implant-supported prostheses. *J Prosthet Dent.* enero de 2020;123(1):96-104.
17. Resende CCD, Barbosa TAQ, Moura GF, Tavares LDN, Rizzante FAP, George FM, et al. Influence of operator experience, scanner type, and scan size on 3D scans. *J Prosthet Dent.* febrero de 2021;125(2):294-9.
18. Geramipannah F, Sadighpour L, Payaminia L. Investigation of the effects of arch size and implant angulation on the accuracy of digital impression using two intraoral scanners: An in vitro study. *Clin Exp Dent Res.* diciembre de 2023;9(6):983-92.

19. Donmez MB, Mathey A, Gäumann F, Mathey A, Yilmaz B, Abou-Ayash S. Scan accuracy and time efficiency of different implant-supported fixed partial denture situations depending on the intraoral scanner and scanned area: An in vitro study. *J Prosthet Dent.* junio de 2024;131(6):1198-207.
20. Sorrentino R, Ruggiero G, Leone R, Di Mauro MI, Cagidiaco EF, Joda T, et al. Influence of different palatal morphologies on the accuracy of intraoral scanning of the edentulous maxilla: A three-dimensional analysis. *J Prosthodont Res.* 2024;68(4):634-42.
21. Lin WC, Lee CC, Lee SY, Peng CY, Lin CC. Influence of operator experience on the complete-arch accuracy and time-based efficiency of three intraoral scanners. *J Dent Sci.* enero de 2025;20(1):620-5.
22. Giménez B, Özcan M, Martínez-Rus F, Pradíes G. Accuracy of a Digital Impression System Based on Active Wavefront Sampling Technology for Implants Considering Operator Experience, Implant Angulation, and Depth. *Clin Implant Dent Relat Res [Internet].* enero de 2015 [citado 21 de marzo de 2025];17(S1). Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/cid.12124>
23. Pesce P, Bagnasco F, Pancini N, Colombo M, Canullo L, Pera F, et al. Trueness of Intraoral Scanners in Implant-Supported Rehabilitations: An In Vitro Analysis on the Effect of Operators' Experience and Implant Number. *J Clin Med.* 16 de diciembre de 2021;10(24):5917.
24. Tawfik MHA, El Torky IR, El Sheikh MM. Effect of saliva on accuracy of digital dental implant transfer using two different materials of intraoral scan bodies with different exposed lengths. *BMC Oral Health.* 23 de noviembre de 2024;24(1):1428.
25. Revilla-León M, Jiang P, Sadeghpour M, Piedra-Cascón W, Zandinejad A, Özcan M, et al. Intraoral digital scans—Part 1: Influence of ambient scanning light conditions on the accuracy (trueness and precision) of different intraoral scanners. *J Prosthet Dent.* septiembre de 2020;124(3):372-8.

26. Sallorenzo A, Gómez-Polo M. Comparative study of the accuracy of an implant intraoral scanner and that of a conventional intraoral scanner for complete-arch fixed dental prostheses. *J Prosthet Dent*. noviembre de 2022;128(5):1009-16.
27. Zhang YJ, Shi JY, Qian SJ, Qiao SC, Lai HC. Accuracy of full-arch digital implant impressions taken using intraoral scanners and related variables: A systematic review. *Int J Oral Implant*. 2021;
28. Thanasrisuebwong P, Kulchotirat T, Anunmana C. Effects of inter-implant distance on the accuracy of intraoral scanner: An *in vitro* study. *J Adv Prosthodont*. 2021;13(2):107.
29. Natsubori R, Fukazawa S, Chiba T, Tanabe N, Kihara H, Kondo H. In vitro comparative analysis of scanning accuracy of intraoral and laboratory scanners in measuring the distance between multiple implants. *Int J Implant Dent*. diciembre de 2022;8(1):18.
30. Orejas-Perez J, Gimenez-Gonzalez B, Ortiz-Collado I, Thuissard IJ, Santamaria-Laorden A. In Vivo Complete-Arch Implant Digital Impressions: Comparison of the Precision of Three Optical Impression Systems. *Int J Environ Res Public Health*. 3 de abril de 2022;19(7):4300.
31. Pérez JO, Vázquez CA, Suárez A, Laorden AS. Effect of the scan body alignment process on the accuracy of virtual definitive implant casts: a pilot study. *J Adv Prosthodont*. 2025;17(5):279.
32. Mizumoto RM, Yilmaz B. Intraoral scan bodies in implant dentistry: A systematic review. *J Prosthet Dent*. septiembre de 2018;120(3):343-52.
33. Flügge TV, Att W, Metzger M, Nelson K. Precision of Dental Implant Digitization Using Intraoral Scanners. *Int J Prosthodont*. 2016;29(3):277-83.
34. Gehrke P, Rashidpour M, Sader R, Weigl P. A systematic review of factors impacting intraoral scanning accuracy in implant dentistry with emphasis on scan bodies. *Int J Implant Dent*. 1 de mayo de 2024;10(1):20.

35. Pachiou A, Zervou E, Tsirogiannis P, Sykaras N, Tortopidis D, Kourtis S. Characteristics of intraoral scan bodies and their influence on impression accuracy: A systematic review. *J Esthet Restor Dent*. diciembre de 2023;35(8):1205-17.
36. Revilla-León M, Gómez-Polo M, Drone M, Barmak AB, Kois JC, Alonso Pérez-Barquero J. Accuracy of complete arch implant scans recorded by using intraoral and extraoral photogrammetry systems. *J Prosthet Dent*. febrero de 2025;S0022391325000848.
37. Li Y, Fang H, Yan Y, Geng W. Accuracy of intraoral scanning using modified scan bodies for complete arch implant-supported fixed prostheses. *J Prosthet Dent*. noviembre de 2024;132(5):994.e1-994.e8.
38. Brakoč J, Todorović A, Mangano FG, Glišić M, Šćepanović M. Accuracy of intraoral photogrammetry versus direct digital implant impressions in the fully edentulous lower jaw: An in vitro study. *J Dent*. mayo de 2025;156:105654.
39. Pan Y, Tsoi JKH, Lam WY, Zhao K, Pow EH. Improving intraoral implant scanning with a novel auxiliary device: An in-vitro study. *Clin Oral Implants Res*. 2021;32(12):1466-73.
40. Azevedo L, Marques T, Karasan D, Fehmer V, Sailer I, Correia A, et al. Effect of splinting scan bodies on the trueness of complete arch digital implant scans with 5 different intraoral scanners. *J Prosthet Dent*. julio de 2024;132(1):204-10.
41. Fryer J. *Small-Format Aerial Photography - Chapter 3 - Photogrammetry*. Elsevier B.V.; 2010.
42. Gangapurwala P. *Methods of Stereophotogrammetry: A Review*. SSRN Electron J. 2021
43. Madhavan S, Venugopal V, Kuriachan T. Capturing Precision: The Role of Photogrammetry in Modern Dentistry. *J Adv Med Dent Sci Res*. junio de 2024;12(6).

44. Knyaz VA, Zheltov SY. PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES FOR DENTISTRY ANALYSIS, PLANNING AND VISUALISATION. 2008;
45. Ortorp A, Jemt T, Back T. Photogrammetry and Conventional Impressions for Recording Implant Positions: A Comparative Laboratory Study. Clin Implant Dent Relat Res. enero de 2005;7(1):43-50.
46. Santamaría-Laorden A, Marugán AM, Andreu-Vázquez C, Orejas-Pérez J. Complete arch implant capture using a photogrammetry algorithm and smartphone app: An in vitro study. J Dent. octubre de 2025;161:105969.
47. Pozzi A, Agliardi E, Lio F, Nagy K, Nardi A, Arcuri L. Accuracy of intraoral optical scan versus stereophotogrammetry for complete-arch digital implant impression: An *in vitro* study. J Prosthodont Res. 2023;68(1):172-80.
48. Liu M, Fu XJ, Lai HC, Shi JY, Liu BL. Accuracy of traditional open-tray impression, stereophotogrammetry, and intraoral scanning with prefabricated aids for implant-supported complete arch prostheses with different implant distributions: An in vitro study. J Prosthet Dent. septiembre de 2024;132(3):602.e1-602.e9.
49. Faria JC, Sampaio-Fernandes MA, Oliveira SJ, Malheiro R, Sampaio-Fernandes JC, Figueiral MH. Precision of Photogrammetry and Intraoral Scanning in Full-Arch Implant Rehabilitation: An In Vitro Comparative Study. Appl Sci. 29 de enero de 2025;15(3):1388.
50. Pradíes G, Ferreiroa A, Özcan M, Giménez B, Martínez-Rus F. Using stereophotogrammetric technology for obtaining intraoral digital impressions of implants. J Am Dent Assoc. abril de 2014;145(4):338-44.
51. Regidor E, Ortiz-Vigón A, Albizu N, Cagigal LZ. Photogrammetry in implant dentistry. Gaceta Médica. enero de 2023;
52. Tohme H, Lawand G, Chmielewska M, Makhzoume J. Comparison between stereophotogrammetric, digital, and conventional impression techniques in implant-supported fixed complete arch prostheses: An in vitro study. J Prosthet Dent. febrero de 2023;129(2):354-62.

53. International Organization for Standardization. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 5: Alternative methods for the determination of the precision of a standard measurement method [Internet]. Ginebra, Suiza: International Organization for Standardization; 1998 jul. Report No.: ISO 5725-5:1998(E). Disponible en: <https://www.sis.se/std-611331>
54. Ferreiroa A, Celemín A. Ajuste pasivo en implantoprótesis [Internet]. Gaceta Dental. 2011. Disponible en: <https://gacetadental.com/2011/10/ajuste-pasivo-en-implantoprtesis-4225/>
55. Heckmann SM, Karl M, Wichmann MG, Winter W, Graef F, Taylor TD. Cement fixation and screw retention: parameters of passive fit: An *in vitro* study of three-unit implant-supported fixed partial dentures. Clin Oral Implants Res. agosto de 2004;15(4):466-73.
56. Wise M. Fit of implant-supported fixed prostheses fabricated on master casts made from a dental stone and a dental plaster. J Prosthet Dent. noviembre de 2001;86(5):532-8.
57. Kim Y, Oh T, Misch CE, Wang H. Occlusal considerations in implant therapy: clinical guidelines with biomechanical rationale. Clin Oral Implants Res. febrero de 2005;16(1):26-35.
58. Sahin S, Çehreli MC. The Significance Of Passive Framework Fit In Implant Prosthodontics: Current Status: Implant Dent. junio de 2001;10(2):85-92.
59. Mukhopadhyay P. The Passive Fit Concept- A Review of Methods to Achieve and Evaluate in Multiple Unit Implant Supported Screw Retained Prosthesis. J Dent Oral Sci [Internet]. 1 de mayo de 2021 [citado 25 de febrero de 2025]; Disponible en: <https://maplespub.com/article/The-Passive-Fit-Concept-A-Review-of-Methods-to-Achieve-and-Evaluate-in-Multiple-Unit-Implant-Supported-Screw-Retained-Prosthesis>
60. Abduo J, Bennani V, Waddell N, Lyons K, Swain M. Assessing the Fit of Implant Fixed Prostheses: A Critical Review. 2010. 25(3).

61. Pozzi A, Arcuri L, Carosi P, Laureti A, Londono J, Wang H. Photogrammetry Versus Intraoral Scanning in Complete-Arch Digital Implant Impression: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Clin Implant Dent Relat Res.* junio de 2025;27(3):e70059.
62. Ma B, Yue X, Sun Y, Peng L, Geng W. Accuracy of photogrammetry, intraoral scanning, and conventional impression techniques for complete-arch implant rehabilitation: an in vitro comparative study. *BMC Oral Health.* diciembre de 2021;21(1):636.
63. Pozzi A, Laureti A, Tawil I, Chow J, Azevedo L, Fehmer V, et al. Intra Oral Photogrammetry: Trueness Evaluation of Novel Technology for Implant Complete-Arch Digital Impression In Vitro. *Clin Implant Dent Relat Res.* junio de 2025;27(3):e70049.