

EL USO DE ESCÁNERES DE SUPERFICIES PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DIGITALES.

WALTER G RENNE, MARK LUDLOW, CLINTON D STEVENS.

Walter G Renne. DMD. Medical University of South Carolina. James B. Edwards College of Dental Medicine, Charleston, SC, EE. UU.

Mark Ludlow. DDS. Medical University of South Carolina. James B. Edwards College of Dental Medicine, Charleston, SC, EE. UU.

Clinton D Stevens. DDS. Práctica privada, Tulsa, OK, EE. UU.

RESUMEN

LA DIGITALIZACIÓN DEL GREMIO ODONTOLÓGICO ha traído un profundo cambio a las posibilidades de los clínicos actuales. Casi todo lo que hacemos en la clínica dental moderna se basa en alguna forma de tecnología digital, desde casos restauradores sencillos hasta complejos casos quirúrgicos, incluyendo el uso de implantes, ortodoncia y el diseño de sonrisa orientado hacia la cara. El uso de flujos de trabajo y métodos de fabricación digitales está eliminando rápidamente los errores y problemas comunes que aparecen al aplicar enfoques tradicionales. El elemento clave de todo esto es la adquisición de buenos datos para poder trabajar con ellos, a través del escaneo digital. El propósito de este artículo es ofrecer una visión general de cómo funcionan las tecnologías de escaneo de superficies, cómo son evaluadas y cómo se comparan con los métodos analógicos en términos de precisión y utilización potencial.

Correspondencia a:

Walter G. Renne.
renne@musc.edu



Walter G Renne



Mark Ludlow



Clinton D Stevens

INTRODUCCIÓN

GRACIAS A LA INTRODUCCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DIGITALES, se han logrado avances significativos a la hora de ofrecer soluciones predecibles y rentables a los pacientes. Por ejemplo, los errores de producción que suelen afectar a las prótesis fabricadas por métodos convencionales son prácticamente eliminados con la utilización de flujos de trabajo digitales. Errores como la distorsión del material de impresión, los errores de colado y puesta en revestimiento y la deformación de las estructuras de las prótesis parciales removibles pueden ser eliminados utilizando técnicas digitales (Ragain y cols. 2000; Schaefer y cols. 2012). Otros problemas como la expansión de la escayola, los errores de montaje cruzado de modelos, la contracción de polimerización, las transferencias del registro de mordida y la fractura de cera y modelos de escayola son prácticamente cosa del pasado (Ragain y cols. 2000; Schaefer y cols. 2012). Iniciar estos procesos de forma digital, es decir, con un escáner digital, mejora aún más el resultado. La transferencia de impresiones a los laboratorios dentales implica tradicionalmente envíos en la parte trasera de camiones o aviones a lo largo de grandes distancias y es posible que los modelos y las impresiones se pierdan o sufran fracturas o distorsiones (Alkurt y cols. 2016). La utilización de las impresiones digitales permite una transferencia casi instantánea de la impresión al laboratorio mediante redes seguras y adecuadas. En el caso de la ortodoncia, se está produciendo una revolución digital porque ya no es necesario almacenar los modelos físicos durante media década en habitaciones costosas, ya que todo se almacena con seguridad en la nube, lo que libera más espacio para el tratamiento de los pacientes (Martin y cols. 2015).

Para el clínico, el uso de un escáner intraoral (IOS, *intra-oral scanner*) es el punto de conectividad *plug and play* a la nueva realidad digital. Este es un cambio bienvenido para los pacientes en comparación con las impresiones físicas tradicionales, según varios estudios (Wismeijer y cols. 2014; Gjelvold y cols. 2016; Haddadi y cols. 2018a). Del mismo modo, los clínicos prefieren trabajar con escáneres intraorales (Lee y Gallucci 2013). Esto se puede deber a la drástica disminución del tiempo de trabajo clínico y del porcentaje de repeticiones cuando se utilizan flujos de trabajo digitales (Grünheid y cols. 2014; Yuzbasioglu y cols. 2014; Joda y Brägger 2016). A pesar de las numerosas ventajas de los flujos de trabajo digitales y la evidente preferencia por utilizar un IOS en lugar de una impresión física, muchos clínicos siguen siendo reacios a incorporar las impresiones digitales en su práctica. En EE. UU., solo alrededor del 26 % de los dentistas han adoptado la tecnología de impresión digital, mientras que en muchas otras partes del mundo las tasas de adopción son más bajas (Leeson 2020). Algunas de las razones de esta falta de adopción son razonablemente intuitivas: muchos clínicos se sienten cómodos con las impresiones tradicionales que aprendieron en la universidad, carecen de formación sobre la aplicación de las tecnologías digitales en su práctica clínica, y se enfrentan a tener que elegir entre un número cada vez mayor de IOS, que requieren una inversión inicial sustancial en comparación con una caja de cubetas y material de impresión (Stevens 2020).

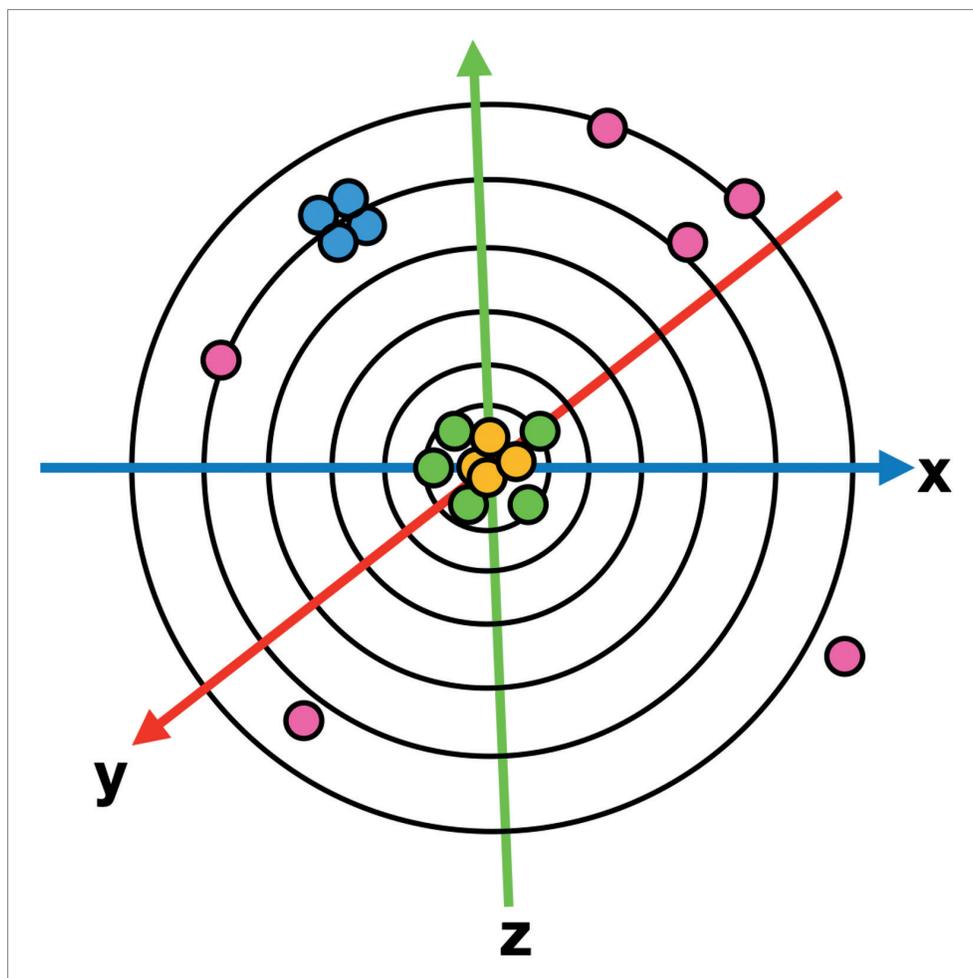


Figura 1.

Cuatro escenarios diferentes. Azul es preciso pero no veraz, rosa no es ni veraz ni preciso, verde es veraz pero no preciso y naranja es tanto preciso como veraz.

COMPRESIÓN DE LA FUNCIÓN Y EXACTITUD DE UN ESCÁNER IOS

CUANDO SE HABLA DE LA EXACTITUD DE LOS ESCÁNERES, ya sean escáneres IOS u otros tipos de escáneres de superficie, es importante comprender que la exactitud, tal y como es definida por la Organización Internacional de Normalización (ISO, *International Organization for Standardization*), está compuesta por dos elementos: la veracidad y la precisión (ISO 1994). La veracidad se define por cuánto un objeto escaneado se desvía de la realidad (modelo estándar de referencia). Un escáner con mayor veracidad hace que un objeto tridimensional (3D) se acerque más al objeto original. La precisión representa la repetibilidad de las mediciones. Un escáner con mayor precisión proporciona resultados más consistentes con escaneados repetidos (Figura 1). La veracidad y la precisión están relacionadas, pero no son interdependientes. Por ejemplo, un escáner puede ser muy preciso, pero exhibir poca veracidad; en este caso, escaneará consistentemente un objeto con una desviación de tamaño similar cada vez.

La exactitud de un IOS depende del sustrato que se está escaneando. El índice de refracción, la reflectividad y la translucidez de lo que se está escaneando cambian la cantidad de luz recibida por el sensor del IOS, lo que puede afectar a la calidad de los datos tridimensionales capturados (Bocklet, Renne, Mennito y cols. 2019; Dutton, Ludlow, Mennito y cols. 2020). Cuando se proyecta un patrón de luz desde el escáner sobre una superficie, la luz reflejada de vuelta hacia el interior del sensor es utilizada para calcular la ubicación de todos los puntos de interés de datos (POI, *points of interest*). Si un sustrato en particular absorbe más luz, este hecho puede influir en la exactitud. Los diferentes tejidos dentarios y materiales dentales tienen diferentes propiedades ópticas. Li y cols. (2017) constataron que los escáneres eran menos exactos cuando escaneaban sustratos más translúcidos. Esto ha sido confirmado por otro grupo de investigación, que descubrió que los sustratos escaneados tienen un profundo impacto tanto en la veracidad como en la precisión de varios escáneres intraorales con materiales como esmalte fino, resina compuesta o cerámica translúcida, que producen escaneados menos exactos; mientras que los materiales opacos como la escayola y la dentina producen escaneados con mayor nivel de veracidad (Dutton, Ludlow, Mennito y cols. 2020). Esta puede ser la razón por la que se observa tanta variabilidad en la literatura, ya que un estudio puede utilizar un modelo de escayola, mientras que otro estudio utiliza un modelo de metal colado, y otro estudio puede utilizar un tipodonto o un modelo de cerámica. En este caso se pueden obtener resultados muy diferentes utilizando el mismo escáner debido a la diferencia en el índice de refracción de los modelos. Para abordar esta variable, se han realizado diseños de estudio sobre cadáveres humanos frescos, que pueden representar los sustratos más realistas para probar la exactitud de un IOS (Bocklet, Renne, Mennito y cols. 2019; Mennito, Evans, Nash y cols. 2019).

Las condiciones de iluminación también pueden tener un gran impacto en la veracidad y precisión de los escáneres. Las condiciones de iluminación usadas en investigación varían y no están estandarizadas entre los estudios. Algunos investigadores pueden utilizar una habitación oscura, algunos usan lámparas fluorescentes, algunos usan lámparas incandescentes y otros pueden usar diodos emisores de luz (LED). Mientras que algunos escáneres funcionan mejor en la oscuridad total, otros funcionan mejor con introducción de luz (Revilla-León y cols. 2020b; Revilla-León y cols. 2020d; Wesemann y cols. 2020).

La experiencia del clínico o los clínicos que realizan el estudio y el patrón o los patrones de escaneado utilizados también son factores que pueden influir en los resultados del estudio (Resende, Barbosa, Moura y cols. 2020). Sería injusto que un investigador con 10 años de experiencia con el escáner "x" lo comparara con el escáner "y", que nunca ha utilizado. Desafortunadamente, esto es muy frecuente en el mundo de la investigación. Para dar respuesta a este dato, en varios estudios se han asegurado de calibrar a los clínicos o de usar clínicos experimentados para cada tipo de escáner (Bocklet, Renne, Mennito y cols. 2019; Mennito, Evans, Nash y cols. 2019; Dutton, Ludlow, Mennito y cols. 2020; Vág, Nagy, Bocklet y cols. 2020). El patrón de escaneado desempeña un papel fundamental en la veracidad y precisión de algunos escáneres, especialmente cuando se escanean arcadas completas y, por lo tanto, se debe prestar atención a ello en el diseño del estudio (Mennito y cols. 2018; Latham y cols. 2020). Al realizar un estudio de investigación, es importante comprender y estar familiarizado no solo con el escáner sino también con el patrón de escaneado recomendado por el fabricante.

Otra variable que es extremadamente importante al evaluar estudios sobre IOS es el método utilizado para crear el modelo estándar de referencia. El modelo estándar de referencia es un modelo digital de un objeto que se acerca todo lo posible a la realidad en lo relativo a sus dimensiones. Esto es crítico, ya que es el modelo con el que se comparan todos los demás escaneados. Desafortunadamente, muchos diseños de estudio dependen de escáneres de laboratorio anticuados para crear los modelos estándar de referencia. Esto no es lo ideal, ya que muchos escáneres de laboratorio crean objetos tridimensionales con grandes errores, por lo que las comparaciones realizadas con estos modelos no son relevantes (Emir y Ayyildiz 2019). En lugar de utilizar un escáner de laboratorio dental, se recomienda utilizar un escáner industrial, como el ATOS. El ATOS es un escáner sin contacto de luz azul estructurada que funciona utilizando múltiples cámaras que registran la proyección de las rayas sobre el objeto que se está midiendo con gran precisión. Según el fabricante, cuyas afirmaciones sobre la exactitud han sido verificadas por varios investigadores externos (Dold, Bone, Flohr y cols. 2014; Mendricky 2016), para escaneados del tamaño de una mandíbula este escáner tiene una veracidad de 3 μm y una precisión de 2 μm .

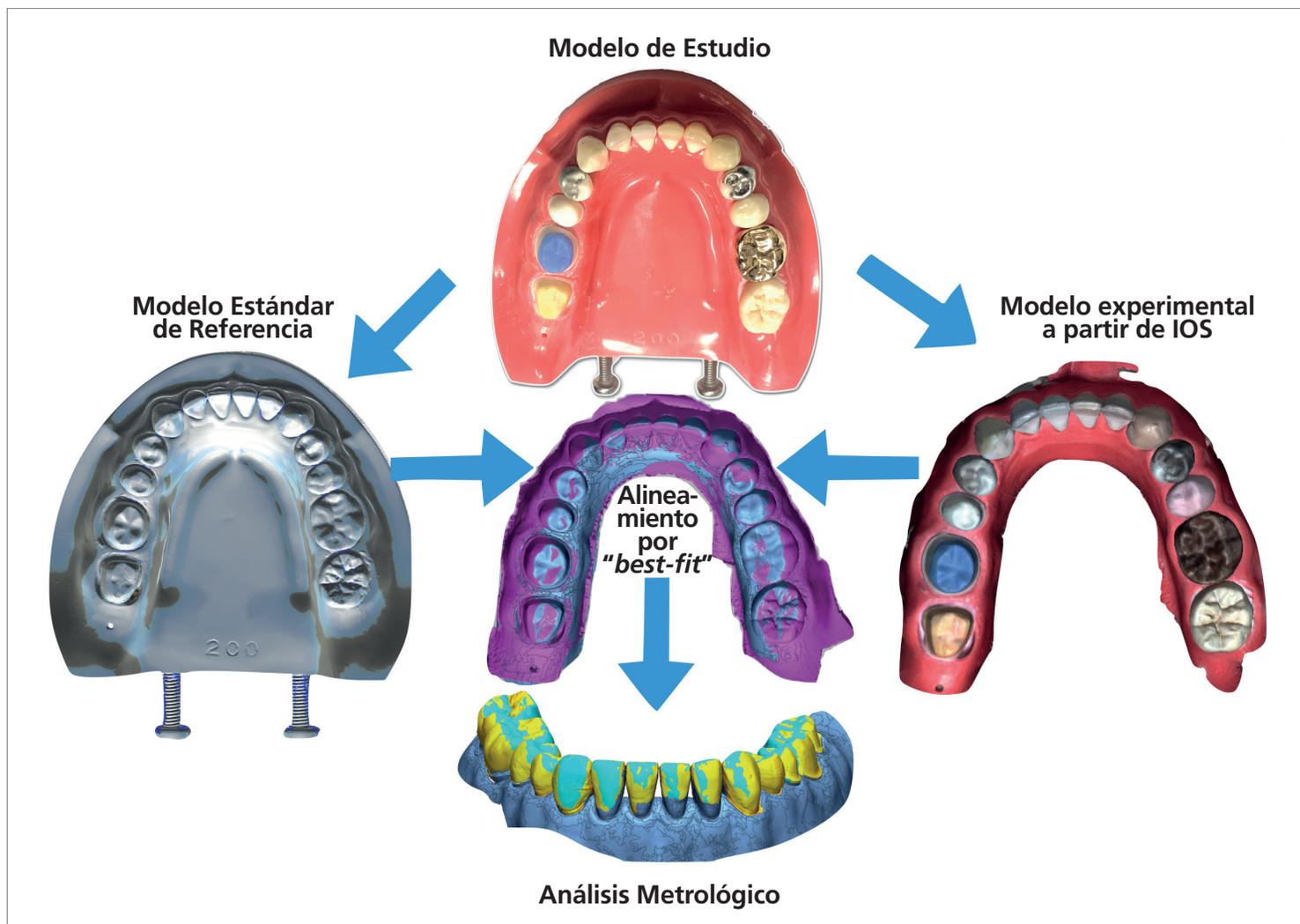


Figura 2. Secuencia clásica de trabajo de metrología en la que se genera un modelo estándar de referencia a partir de un modelo de estudio, usando un escáner industrial. Se utiliza un IOS para generar un modelo de estudio. El programa informático utilizará el alineamiento mediante parámetros de *best-fit* para combinar los dos y generar un mapa de las desviaciones codificado por colores.

La metodología utilizada para evaluar los modelos de estudio y compararlos con el modelo estándar de referencia también es importante en investigación. El método más común para la comprobación de la veracidad de los sistemas IOS es la superposición de escaneados completos en el archivo del estándar de referencia (Figura 2), utilizando algoritmos iterativos de tipo *best-fit* sin tener en cuenta el punto de origen de escaneado, tal como desarrollaron Besl y McKay (1992) (Figura 2). El problema con los algoritmos iterativos tipo *best-fit* es que los dos modelos están tan alineados como pueden estar, independientemente del hecho de que, en la mayoría de los casos, estos dos píxeles no son idénticos en una posición anatómica o verdadera. Por lo tanto, las desviaciones calculadas en los programas informáticos de metrología basadas en esta alineación dan como resultado una desviación media artificialmente baja; en otras palabras, los datos se vuelven más precisos de lo que realmente son (Vág, Nagy, Simon y cols. 2019).

Por último, el *software* de los escáneres también es dinámico, y está sujeto a actualizaciones frecuentes. Estas actualizaciones pueden tener un impacto dramático en la exactitud de los escáneres. El mismo escáner puede casi duplicar su precisión con nada más que una actualización de *software* (Haddadi y cols. 2018b). En resumen, la experiencia del operador, el patrón de escaneado, las condiciones de iluminación, los sustratos que se escanean, la versión del *software*, la calidad del modelo estándar de referencia y las técnicas de medición de alineación en 3D pueden afectar a la veracidad y la precisión de un IOS y a la forma de evaluarlos.

UNA REVISIÓN DE LAS CAPACIDADES ACTUALES DE LOS ESCÁNERES INTRAORALES, DE LABORATORIO Y FACIALES

IOS: cuadrantes y sextantes

Desde hace varios años ha quedado claro que incluso los escáneres intraorales anticuados tienen una veracidad y precisión increíbles al escanear un solo diente, sextantes e incluso cuadrantes (Lee y cols. 2017; Renne, Ludlow, Fryml y cols. 2017; Mennito y cols. 2018). Por ejemplo, CEREC Bluecam (Dentsply Sirona) comunicó una veracidad de $7,5 \pm 1,8 \mu\text{m}$ escaneando un solo diente (Lee y cols. 2017), lo que lo convertía en uno de los escáneres más precisos para un solo diente, incluso en comparación con escáneres más recientes usados en la actualidad (Mennito y cols. 2018; Bocklet, Renne, Mennito y cols. 2019; Mennito, Evans, Nash y cols. 2019; Dutton, Ludlow, Mennito y cols. 2020). Sin embargo, una vez que se escaneaban segmentos más grandes, como un sextante, la veracidad cae a más de $50 \mu\text{m}$, y para una arcada completa la veracidad cae en picado a un error de más de $150 \mu\text{m}$ (Renne, Ludlow, Fryml y cols. 2017). Interesantemente, al escanear estas áreas más pequeñas, en la mayoría de los escáneres del mercado, el patrón de escaneado no parece tener un impacto en la precisión (Mennito y cols. 2018). Un estudio de patrón de escaneado realizado por Mennito y cols. (2018) es de particular interés porque su modelo estándar de referencia estaba hecho con Telio CAD (Ivoclar Vivadent AG). Este material es una sustancia dentaria artificial con un índice de refracción de 1,49, parecido al del esmalte (1,63) y la dentina (1,54) (Meng, Yao, Yao y cols. 2009). Su estudio demostró que el patrón de escaneado no afectaba a la precisión del escaneado del cuadrante. Más recientemente, la siguiente generación de escáneres de tipo rotacional ha mostrado una precisión similar para áreas de un solo diente, con una precisión del escáner de tan solo $19 \mu\text{m}$ (Zimmerman y cols. 2020).

McCracken y cols. hicieron una encuesta entre 1777 dentistas sobre cuál era su técnica de impresión preferida para las coronas unitarias: el 77 % utilizaba PVS, el 12 % empleaba poliéster y solo el 9 % utilizaba impresiones ópticas/digitales (McCracken, Louis, Litaker y cols. 2018). Descubrieron que la mayoría de las impresiones físicas eran impresiones de doble arcada por sextantes hechas con cubetas de plástico. Este tipo de impresión es una de las técnicas de impresión menos precisas, ya que la flexión de la cubeta de plástico provoca una distorsión de la impresión, que suele quedar más ancha en sentido vestíbulo-lingual y más corta en sentido mesio-distal (Santayana de Lima y cols. 2014). En un estudio se comprobó que, cuando se utilizaba material de impresión en una cubeta de plástico de doble arcada, los muñones de escayola eran casi $30 \mu\text{m}$ más pequeños en sentido mesio-distal en comparación con otras técnicas (Ceyhan y cols. 2003). Por lo tanto, en comparación con las técnicas analógicas más comunes para segmentos pequeños, las impresiones digitales son iguales o mejores que las impresiones convencionales (CI, *conventional impressions*), afirmación que está bien respaldada por los datos de los resultados clínicos (Chochlidakis y cols. 2016; Tsirogiannis y cols. 2016; Ahlholm y cols. 2018). Aunque en la literatura hay poca o ninguna evidencia que haya evaluado la exactitud de los sistemas de IOS en situaciones clínicas difíciles, como preparaciones muy profundas o zonas con contaminación. A diferencia de la última generación de escáneres IOS, a los que les costaba escanear clínicamente zonas profundas, la mayoría de los escáneres modernos tienen una gran profundidad de campo, que oscila entre 15 y 20 mm, y son capaces de escanear zonas profundas. Además, los autores opinan que las mejores representaciones de color de los nuevos sistemas IOS son una ayuda para la detección de márgenes en zonas profundas. Estudiando la literatura, podemos derivar algunas conclusiones de los estudios de ajuste marginal. Se ha demostrado que la digitalización directa con IOS conduce a coronas de mejor ajuste que las técnicas de digitalización indirecta (Freire y cols. 2020). En un reciente metaanálisis, Hasanzade y cols. (2020) concluyeron que los flujos de trabajo digitales completos que utilizan IOS dan lugar a restauraciones con una adaptación comparable o mejor que los flujos de trabajo convencionales.

IOS: arcadas completas dentadas

Cuando la veracidad y la precisión de los modelos generados por los escáneres intraorales son evaluadas y comparadas con las de los modelos fabricados a partir de impresiones convencionales de arcadas completas dentadas, se puede llegar a una conclusión menos clara sobre qué método es superior. Es importante mencionar que, a diferencia del trabajo por cuadrantes, para los escaneados de arcadas completas el patrón de escaneo desempeña un papel importante (Müller y cols. 2016; Mennito y cols. 2018; Mennito, Evans, Nash y cols. 2019; Latham y cols. 2020; Oh y cols. 2020). Ender y cols. (2016) comunicaron que los sistemas de IOS mostraban mejor veracidad que las impresiones de alginato o poliéter en arcadas completas, pero sin llegar al nivel del PVS. En un estudio más reciente, se utilizó un maxilar de cadáver fresco dentado. La muestra fue escaneada primero con el escáner ATOS para crear un modelo estándar de referencia, y luego escaneada con 7 sistemas de IOS, tomando a continuación impresiones convencionales (CI) con PVS (Mennito, Evans, Nash y cols. 2019). Este estudio encontró que muchos sistemas modernos de IOS ofrecieron un resultado igual de bueno que el grupo de CI, que ofrecía una veracidad de arcada completa de 37 μm . Recientemente, otro estudio (Dutton, Ludlow, Mennito y cols. 2020) evaluó la veracidad en arcadas completas en un modelo estándar de referencia especial que contenía dientes restaurados con oro, *composite* de alta y baja translucidez, material para muñones azul y blanco, amalgama, disilicato de litio y óxido de zirconio, además de dientes naturales con dentina y esmalte. Escanearon este modelo estándar de referencia con el dispositivo ATOS Capsule y luego con 7 sistemas de IOS, encontrando que, para algunos escáneres, el material escaneado no influía en la precisión, y que los escáneres más modernos podían lograr una veracidad de arcada completa por debajo de 25 μm (Dutton, Ludlow, Mennito y cols. 2020). Por lo tanto, aunque no se puede decir que todos los IOS sean capaces de realizar impresiones precisas de arcadas completas dentadas, varios de los escáneres de última generación se acercan a o igualan la exactitud de una CI tomada con PVS.

IOS: arcadas edéntulas

Hace diez años, era imposible imaginar que los sistemas de IOS se usarían para escanear arcadas edéntulas. Sin embargo, hoy en día no es raro que los clínicos escaneen tramos edéntulos amplios o incluso arcadas completamente desdentadas (Figura 3). Tradicionalmente, a los escáneres les costaba mucho trabajar sobre áreas edéntulas lisas, ya que estas áreas carecen de los puntos de interés comunes y diferenciados para que los algoritmos de fusión combinen entre sí nubes de puntos independientes. Hayama y cols. (2018) encontraron que los escáneres con un tamaño de cabezal más grande funcionaban mejor en las áreas desdentadas (Figura 4). Esto se debe posiblemente a que un campo de visión más grande es capaz de capturar más áreas diferenciadas con más superposiciones comunes entre los escaneados. Interesantemente, en este estudio todos los escáneres IOS se comportaron mejor que la CI en un modelo estándar de referencia de mandíbula parcialmente desdentada. Recientemente, se descubrió que el escáner Primescan era extremadamente preciso *in vitro* en los tejidos blandos de tramos edéntulos, con una veracidad de 24 μm y una precisión de 19 μm en arcadas edéntulas (Schimmel y cols. 2020). Estos valores parecen llamativamente bajos para tejidos blandos. En contraste, otro estudio encontró una veracidad de 78 μm para el dispositivo Primescan en arcadas desdentadas, 145 μm para Trios 3 y 182 μm para Medit i500 (Cao y cols. 2020). Por supuesto, un tejido artificial de plástico puede escanearse de forma muy diferente al tejido real. Mennito y cols. encontraron una tendencia interesante en un estudio sobre cadáveres: las impresiones físicas comprimieron los tejidos blandos alrededor de 120 μm , mientras que los escáneres produjeron errores en la dirección contraria, infravalorando las dimensiones de los tejidos blandos en 106-236 μm , en dependencia del escáner utilizado (Mennito, Evans, Nash y cols. 2019). En un estudio clínico, Tregerman y cols. (2019) observaron que las estructuras de prótesis parciales removibles hechas a partir de impresiones digitales intraorales ajustaban mejor que las hechas a partir de impresiones convencionales. Uno de los autores (W.R.) de este artículo tiene actualmente un trabajo en fase de revisión por expertos en el que informa de la veracidad y precisión de los escaneados realizados sobre cadáver fresco completamente desdentado utilizando diferentes sistemas de IOS. Los resultados mostraron una exactitud increíble de los sistemas modernos de IOS sobre tejidos blandos reales. Sin embargo, todavía es necesario establecer mejores técnicas para capturar los límites de los tejidos blandos y los registros interoclusales.

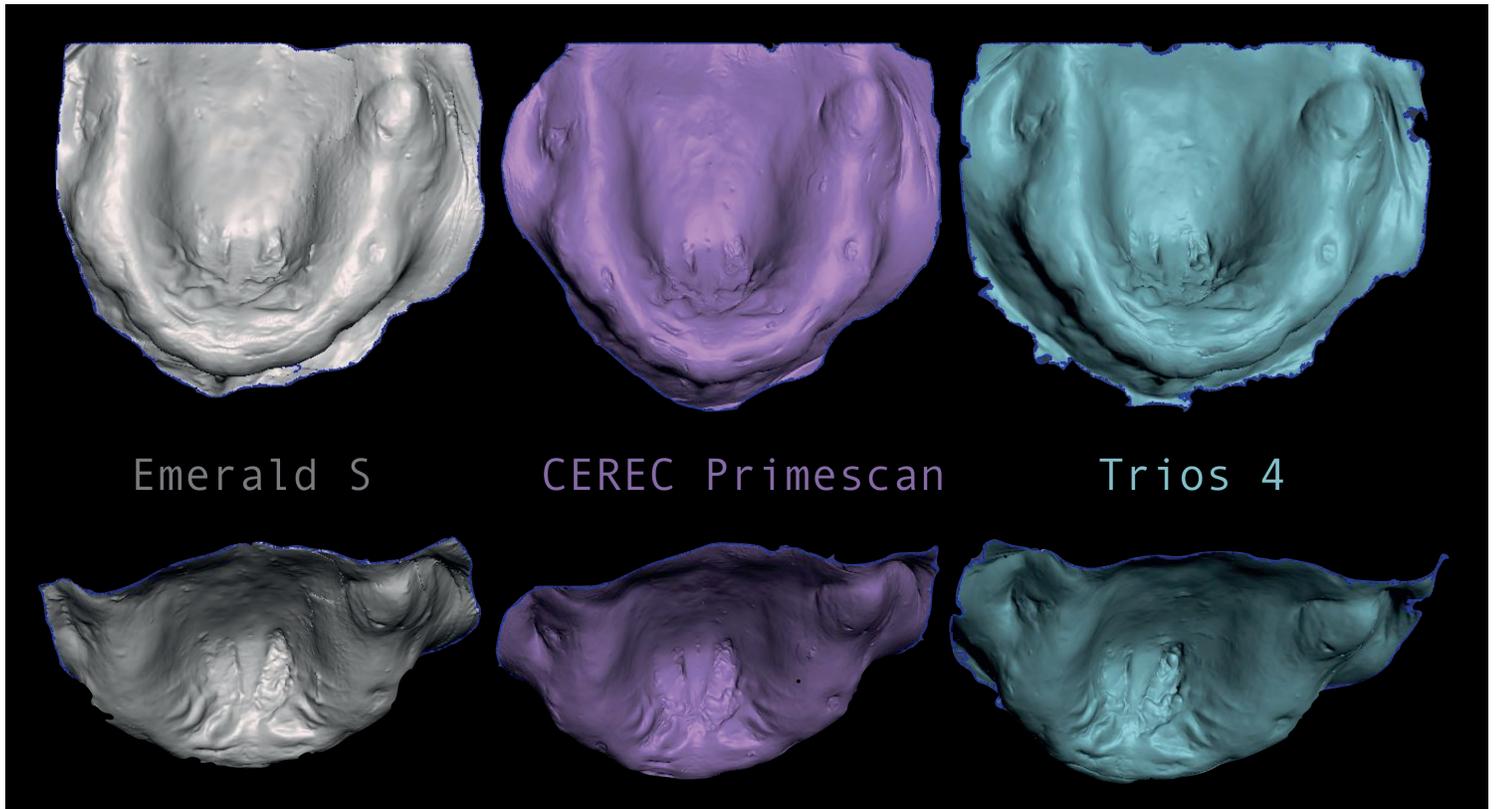


Figura 3. Un mismo paciente escaneado con tres sistemas diferentes de IOS.



Figura 4. Tamaños de cabezal de escáner de diferentes sistemas comparados en una misma fotografía.

IOS: implantes

Posiblemente, ningún campo ha sido objeto de mayor estudio que la precisión de los sistemas de IOS sobre los pilares de escaneado (*scan bodies*) de los implantes. El foco de atención principal de la literatura se ha centrado en los escaneados de arcadas completas con implantes y 4-6 pilares de escaneado que abarcan la arcada edéntula. La exactitud es la principal preocupación con vistas al ajuste pasivo de las restauraciones definitivas sobre implantes, aunque no existen muchos datos sobre la exactitud necesaria para obtener ajuste pasivo de las prótesis sobre implantes de arcada completa y la desviación que es aceptable clínicamente. En un estudio clínico realizado con técnicas convencionales, Jokstad y Shokati (2015) encontraron que las faltas de ajuste inferiores a 100 μm en prótesis fijas de arcada completa sobre implantes seguían permitiendo la pasividad de la supraestructura protésica, mientras que los desajustes de 100- 230 μm , aunque no eran completamente pasivos, no tenían un impacto real en parámetros clínicos como los niveles óseos periimplantarios, observados después de una media de 19 años de seguimiento en 30 pacientes. En los casos de arcada completa sobre implantes, es evidente que tanto el diseño del pilar de escaneado como el patrón de escaneado tienen un impacto en la exactitud de los modelos generados a partir de los sistemas de IOS. Mizumoto y cols. (2020) encontraron una desviación superior a 170 μm en distancia y una desviación angular superior a 0,5° en un modelo maxilar con 4 análogos de implantes dentales. Otro estudio, centrado en tramos más pequeños con menor distancia entre los pilares de escaneado, encontró desviaciones inferiores a 75 μm , lo que sugiere que los IOS se comportan mejor cuando la distancia entre los implantes es menor (Motel y cols. 2020). Revilla-León y cols. (2020c) encontraron desviaciones aún más pequeñas, con una veracidad de 18,9 μm y 11,5 μm , para dos pilares de escaneado evaluados sobre un tipodonto parcialmente desdentado. En un estudio controlado aleatorizado que comparaba las impresiones analógicas con las digitales para restauraciones tipo *All-on-4*, no hubo diferencias en los resultados clínicos a los 12 meses, siendo el grupo de impresiones digitales mucho más eficiente en cuanto al tiempo (Gherlone y cols. 2016). En una revisión sistemática reciente, Wulfman y cols. (2020) evaluaron más de 208 artículos y llegaron a la conclusión de que las impresiones ópticas de múltiples implantes en pacientes desdentados pueden ser igual de precisas que las impresiones físicas de pilares ferulizados. Así pues, parece que los sistemas modernos de IOS son capaces de escanear con precisión las prótesis de arcada completa implanto-soportadas, y son igual de buenos, o mejores, que el patrón de oro, impresiones de poliéter con cubeta fenestrada de pilares ferulizados. Algunos clínicos son reacios a creer que un escaneado mediante IOS pueda ser lo suficientemente preciso para las prótesis implanto-soportadas de arcada completa, y han adoptado principios de fotogrametría para contribuir a aumentar la precisión (Del Corso y cols. 2009; Bergin y cols. 2013; Peñarrocha-Diago y cols. 2017). En la literatura existe evidencia contradictoria y no está claro si esta tecnología de estereofotogrametría es necesaria, ya que algunos artículos muestran grandes resultados y otros muestran de hecho peores resultados que un IOS estándar (Agustín-Panadero y cols. 2015; Revilla-León y cols. 2020a). Interesantemente, en un estudio reciente, el sistema de fotogrametría evaluado proporcionó los valores menos precisos, con la mayor discrepancia tridimensional en las posiciones de los pilares de los implantes entre todos los grupos, mientras que el escaneado estándar mediante IOS arrojó resultados mucho mejores (Revilla-León y cols. 2020a). En resumen, ciertos sistemas IOS tienen más problemas con tramos edéntulos amplios e implantes extremadamente angulados, pero los resultados clínicos generales parecen ser los mismos que con las técnicas convencionales (Wulfman y cols. 2020).



Figura 5.

Los escáneres de laboratorio son capaces de escanear prótesis para técnicas de copiado de prótesis removibles con las que se puede fresar o imprimir una copia exacta de la prótesis.

Escáneres de laboratorio

Los escáneres extraorales desempeñan un papel esencial para los laboratorios dentales, ya que digitalizan las impresiones analógicas de los clínicos para facilitar los flujos de trabajo digitales modernos. Los laboratorios están altamente incentivados para trabajar digitalmente, ya que ello reduce los costes de producción y permite un tiempo de respuesta más eficiente, siendo al mismo tiempo la única manera de facilitar dar respuesta al número cada vez mayor de recetas pidiendo cosas producidas únicamente por vías digitales, como las soluciones implantológicas individualizadas para el paciente y las coronas monolíticas de óxido de zirconio (Makhija, Lawson, Gilbert y cols. 2016; Joda y cols. 2017). Recientemente, se han utilizado escáneres de laboratorio para escanear prótesis removibles para flujos de trabajo de copia de prótesis removibles, lo que permite hacer réplicas exactas de las prótesis existentes (Figura 5). Al igual que con los sistemas de IOS, no todos los escáneres de laboratorio ofrecen el mismo rendimiento. En la evaluación de 8 escáneres de laboratorio diferentes se comprobó que los escáneres con luz azul funcionan mejor que los escáneres por láser o luz blanca, con una variabilidad en la veracidad que oscila entre $17\ \mu\text{m}$ y $33\ \mu\text{m}$ para un modelo estándar de referencia de arcada completa (Emir y Ayyildiz 2019). En un estudio anterior de Bohner y cols. no se encontraron diferencias significativas en términos de veracidad entre los escáneres intraorales y extraorales (Bohner, De Luca Canto, Marció y cols. 2017), mientras que otro estudio determinó que los escáneres intraorales eran más precisos para captar dientes anteriores tallados, independientemente de la geometría de la preparación dentaria, en comparación con los escáneres extraorales y las impresiones convencionales de PVS (Carbajal y cols. 2017). Algunos de los dispositivos de la última generación de escáneres intraorales se encuentran dentro del mismo rango de desviación para arcadas completas que los escáneres de laboratorio modernos (Emir y Ayyildiz 2019).

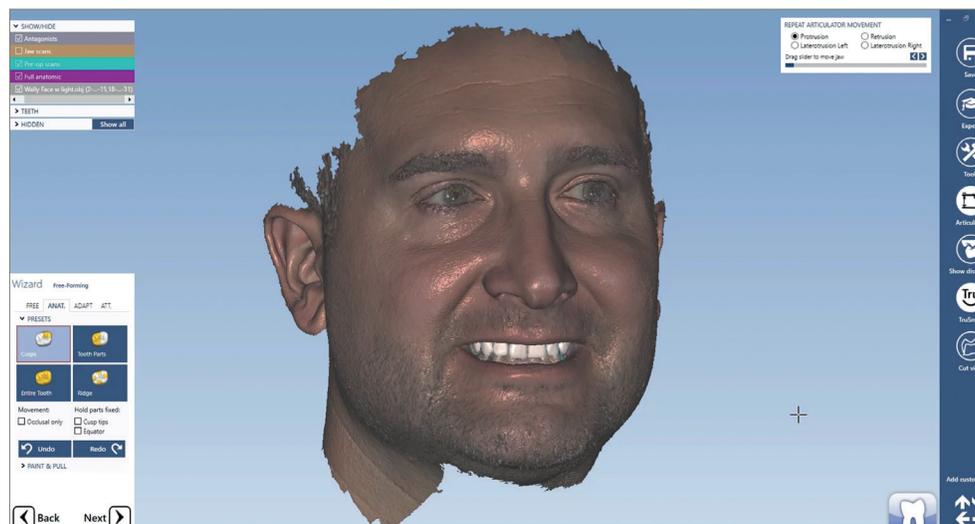


Figura 6.

Este escaneado facial fue generado utilizando el dispositivo Atec Space Spider, modelando una nueva sonrisa en exocad. Esto permite una visualización 3D y un análisis del diseño de la sonrisa dentro de la cara del paciente en tiempo real.

Escáneres faciales

Los escáneres faciales se están popularizando como una forma de tomar registros de la morfología facial. Los análisis faciales son importantes para varias disciplinas, como la cirugía oral maxilofacial, la ortodoncia y la prostodoncia (Figura 6). En el pasado, el análisis facial incluía fotografías bidimensionales (2D), un pie de rey y un transportador de ángulos para medir laboriosamente las proporciones faciales (Berlin, Berssenbrügge, Runte y cols. 2014). Afortunadamente, este proceso analógico está siendo reemplazado por escaneados faciales en 3D que pueden ser incorporados directamente a los modernos programas de CAD (Figura 3) (Huang y cols. 2016). Existe una gran disparidad en la calidad y el precio de los escáneres faciales, lo que hace difícil sacar conclusiones basadas en la evidencia sobre su precisión. Algunos escáneres incorporados a los *smartphones* utilizan LIDAR y fotogrametría, mientras que otros son escáneres de metrología industrial que cuestan más que los escáneres de laboratorio modernos. Amornvit y Sanohkan (2019) compararon 4 dispositivos diferentes, incluyendo un iPhone X, un escáner industrial y un escáner facial integrado en un aparato de CBCT; el costoso escáner industrial fue el único que funcionó con la suficiente precisión como para ser clínicamente útil. Recientemente, se han lanzado sistemas específicos para el campo dental en un intento de aumentar la precisión y disminuir el coste. Piedra-Cascón y cols. (2020) encontraron que la Bellus 3D Face Camera Pro ofrecía una veracidad de $0,91 \mu\text{m}$ cuando se la comparaba con las mediciones con calibre digital de puntos de referencia antropométricos faciales. Este es un nivel de veracidad suficiente para ser muy útil en la planificación de grandes casos restauradores orientados hacia la cara. En el futuro, se espera que el nivel de veracidad de estos escáneres extraorales portátiles rivalice con el de los escáneres de laboratorio modernos.

CONCLUSIÓN

EN LA ACTUALIDAD, la recogida de datos con los escáneres de superficie iguala o supera la exactitud de los métodos tradicionales en la mayoría de las aplicaciones clínicas. Además de una excelente precisión, los sistemas de escaneo intraoral ofrecen ventajas significativas con respecto a las impresiones analógicas, entre ellas, ser más agradables para el paciente, una mayor efectividad en términos de coste y tiempo, y el hecho de permitir una integración perfecta en los flujos de trabajo de manufacturación modernos, que son decididamente digitales. Quedan algunos obstáculos con respecto a los flujos de trabajo para arcadas/tramos edéntulos y a una planificación del tratamiento verdaderamente integrada y orientada hacia la cara, pero es solo una breve cuestión de tiempo hasta que la adquisición de datos digitales se convierta en la regla, y no en la excepción, para el diagnóstico y el tratamiento de los pacientes en las clínicas dentales.

RELEVANCIA CLÍNICA

EL USO DE UN ESCÁNER INTRAORAL permite a los clínicos, no solo obtener el mismo nivel de precisión o un nivel superior en comparación con los métodos tradicionales de toma de impresión, sino que también les proporciona resultados más eficientes y agradables para el paciente, así como acceso a flujos de trabajo digitales que amplían en gran medida sus capacidades diagnósticas y terapéuticas para optimizar la atención al paciente.

IMPLICACIONES PARA LA INVESTIGACIÓN

LAS CAPACIDADES ACTUALES DE LOS ESCÁNERES DE SUPERFICIE ya igualan o superan las de sus homólogos analógicos. Las investigaciones futuras deben dirigirse a los campos que todavía necesitan mejoras, como la captura de tejidos dinámicos, los límites en desdentados y los registros interoclusales en pacientes edéntulos, junto con la integración del escaneado facial con los datos intraorales y de CBCT. Las mejoras en el *software* para facilitar su uso y la integración armoniosa de los programas de planificación en clínica, en laboratorio y para casos de implantes, conducirán sin duda a un crecimiento exponencial en la adopción de los escáneres digitales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahlholm P, Sipilä K, Vallittu P, Jakonen M, Kotiranta U. (2018) Digital versus conventional impressions in fixed prosthodontics: A review. *Journal of Prosthodontics* **1**, 35-41.
- Agustín-Panadero R, Peñarrocha-Oltra D, Gomar-Vercher S, Peñarrocha-Diago M. (2015) Stereophotogrammetry for recording the position of multiple implants: Technical description. *The International Journal of Prosthodontics* **6**, 631-636.
- Alkurt M, Yeşil Duymus Z, Dedeoglu N. (2016) Investigation of the effects of storage time on the dimensional accuracy of impression materials using cone beam computed tomography. *The Journal of Advanced Prosthodontics* **5**, 380-387.
- Amornvit P, Sanohkan S. (2019) The accuracy of digital face scans obtained from 3D scanners: An in vitro study. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **24**, 5061.
- Bergin JM, Rubenstein JE, Mancl L, Brudvik JS, Raigrodski AJ. (2013) An in vitro comparison of photogrammetric and conventional complete-arch implant impression techniques. *The Journal of Prosthodontics* **4**, 243-251.
- Berlin NF, Berssenbrügge P, Runte C, Wermker K, Jung S, Kleinheinz J, Dirksen D. (2014) Quantification of facial asymmetry by 2D analysis - A comparison of recent approaches. *Journal of Craniomaxillofacial Surgery* **3**, 265-271.
- Besl PJ, McKay ND. (1992) A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **2**, 239-256.
- Bockett C, Renne W, Mennito A, Bacro T, Latham J, Evans Z, Ludlow M, Kelly A, Nash J. (2019) Effect of scan substrates on accuracy of 7 intraoral digital impression systems using human maxilla model. *Orthodontics & Craniofacial Research* **22 Suppl 1**, 168-174.
- Bohner L, De Luca Canto G, Marció BS, Laganá DC, Sesma N, Tortamano Neto P. (2017) Computer-aided analysis of digital dental impressions obtained from intraoral and extraoral scanners. *The Journal of Prosthodontics* **5**, 617-623.
- Cao Y, Chen JK, Deng KH, Wang Y, Sun YC, Zhao YJ. (2020) Accuracy of three intraoral scans for primary impressions of edentulous jaws. *Journal of Peking University (health sciences)* **1**, 129-137.
- Carbajal Mejía JB, Wakabayashi K, Nakamura T, Yatani H. (2017) Influence of abutment tooth geometry on the accuracy of conventional and digital methods of obtaining dental impressions. *The Journal of Prosthodontics* **118**, 392-399.
- Ceyhan JA, Johnson GH, Lepe X. (2003) The effect of tray selection, viscosity of impression material, and sequence of pour on the accuracy of dies made from dual-arch impressions. *The Journal of Prosthodontics* **2**, 143-149.
- Chochlidakis KM, Papaspyridakos P, Geminiani A, Chen CJ, Feng JJ, Ercoli C. (2016) Digital versus conventional impressions for fixed prosthodontics: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of Prosthodontics* **116**, 184-190.e12.
- Del Corso M, Abà G, Vazquez L, Dargaud J, Dohan Ehrenfest DM. (2009) Optical three-dimensional scanning acquisition of the position of osseointegrated implants: an in vitro study to determine method accuracy and operational feasibility. *Clinical Implant Dentistry and Related Research* **3**, 214-221.
- Dold P, Bone MC, Flohr M, Preuss R, Joyce TJ, Deehan D, Holland J. (2014) Validation of an optical system to measure acetabular shell deformation in cadavers. *Journal of Engineering in Medicine* **8**, 781-786.
- Dutton E, Ludlow M, Mennito A, Kelly A, Evans Z, Culp A, Kessler R, Renne W. (2020) The effect different substrates have on the trueness and precision of eight different intraoral scanners. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry* **2**, 204-218.
- Emir F, Ayyıldız S. (2019) Evaluation of the trueness and precision of eight extraoral laboratory scanners with a complete-arch model: A three-dimensional analysis. *Journal of Prosthodontic Research* **4**, 434-439.
- Ender A, Attin T, Mehl A. (2016) In vivo precision of conventional and digital methods of obtaining complete-arch dental impressions. *The Journal of Prosthodontics* **3**, 313-320.
- Freire Y, Gonzalo E, López-Suárez C, Peláez J, Suárez MJ. (2020) Evaluation of the marginal fit of monolithic crowns fabricated by direct and indirect digitization. *Journal of Prosthodontic Research* **9** [en prensa]. doi: 10.2186/jpr.JPR_D_20_00003.
- Gherlone E, Capparé P, Vinci R, Ferrini F, Gastaldi G, Crespi R. (2016) Conventional versus digital impressions for "All-on-Four" restorations. *The International Journal of Oral and Maxillofacial Implants* **2**, 324-330.
- Gjelvold B, Chrcanovic BR, Korduner EK, Collin-Bagewitz I, Kisch J. (2016) Intraoral digital impression technique compared to conventional impression technique. A randomized clinical trial. *Journal of Prosthodontics* **4**, 282-287.
- Grünheid T, McCarthy SD, Larson BE. (2014) Clinical use of a direct chairside oral scanner: an assessment of accuracy, time, and patient acceptance. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* **5**, 673-682.

- Haddadi Y, Bahrami G, Isidor F. (2018a) Evaluation of operating time and patient perception using conventional impression taking and intraoral scanning for crown manufacture: A split-mouth, randomized clinical study. *The International Journal of Prosthodontics* **31**, 55-59.
- Haddadi Y, Bahrami G, Isidor F. (2018b) Effect of software version on the accuracy of an intraoral scanning device. *The International Journal of Prosthodontics* **4**, 375-376.
- Hasanzade M, Aminikhah M, Afrashtehfar KI, Alikhasi M. (2020) Marginal and internal adaptation of single crowns and fixed dental prostheses by using digital and conventional workflows: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Prosthodontic Research* **12**, S0022-3913(20)30412-1 [en prensa]. doi: 10.1016/j.prosdent.2020.07.007.
- Hayama H, Fueki K, Wadachi J, Wakabayashi N. (2018) Trueness and precision of digital impressions obtained using an intraoral scanner with different head size in the partially edentulous mandible. *Journal of Prosthodontic Research* **3**, 347-352.
- International Standardization Organization. (1994) 5725-1: Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1: General principles and definitions.
- Joda T, Brägger U. (2016) Patient-centered outcomes comparing digital and conventional implant impression procedures: A randomized crossover trial. *Clinical Oral Implants Research* **12**, e185-e189.
- Joda T, Ferrari M, Gallucci GO, Wittneben JG, Brägger U. (2017) Digital technology in fixed implant prosthodontics. *Periodontology 2000* **1**, 178-192.
- Jokstad A, Shokati B. (2015) New 3D technologies applied to assess the long-term clinical effects of misfit of the full jaw fixed prosthesis on dental implants. *Clinical Oral Implants Research* **10**, 1129-1134.
- Latham J, Ludlow M, Mennito A, Kelly A, Evans Z, Renne W. (2020) Effect of scan pattern on complete-arch scans with 4 digital scanners. *The Journal of Prosthetic Dentistry* **1**, 85-95.
- Lee JJ, Jeong ID, Park JY, Jeon JH, Kim JH, Kim WC. (2017) Accuracy of single-abutment digital cast obtained using intraoral and cast scanners. *The Journal of Prosthetic Dentistry* **2**, 253-259.
- Lee SJ, Gallucci GO. (2013) Digital vs. conventional implant impressions: efficiency outcomes. *Clinical Oral Implants Research* **1**, 111-115.
- Leeson D. (2020) The digital factory in both the modern dental lab and clinic. *Dental materials* **1**, 43-52.
- Li H, Lyu P, Wang Y, Sun Y. (2017) Influence of object translucency on the scanning accuracy of a powder-free intraoral scanner: A laboratory study. *The Journal of Prosthetic Dentistry* **1**, 93-101.
- Makhija SK, Lawson NC, Gilbert GH, Litaker MS, McClelland JA, Louis DR, Gordan VV, Pihlstrom DJ, Meyerowitz C, Mungia R, McCracken MS, National Dental PBRN Collaborative Group. (2016) Dentist material selection for single-unit crowns: Findings from the National Dental Practice-Based Research Network. *Journal of Dentistry* **55**, 40-47.
- Martin CB, Chalmers EV, McIntyre GT, Cochrane H, Mossey, PA. (2015) Orthodontic scanners: what's available? *Journal of Orthodontics* **2**, 136-143.
- McCracken MS, Louis DR, Litaker MS, Minyá HM, Oates T, Gordan VV, Marshall DG, Meyerowitz C, Gilbert GH, National Dental PBRN Collaborative Group. (2018) Impression techniques used for single-unit crowns: Findings from the National Dental Practice-Based Research Network. *Journal of Prosthodontics* **8**, 722-732.
- Medricky R. (2016) Determination of measurement accuracy of optical 3D scanners. *MM Science Journal* **12**, 1565-1572.
- Meng Z, Yao XS, Yao H, Liang Y, Liu T, Li Y, Wang G, Lan S. (2009) Measurement of the refractive index of human teeth by optical coherence tomography. *Journal of Biomedical Optics* **3**, 034010.
- Mennito AS, Evans ZP, Lauer AW, Patel RB, Ludlow ME, Renne WG. (2018) Evaluation of the effect scan pattern has on the trueness and precision of six intraoral digital impression systems. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry* **2**, 113-118.
- Mennito AS, Evans ZP, Nash J, Bocklet C, Lauer A, Bacro T, Cayouette M, Ludlow M, Renne WG. (2019) Evaluation of the trueness and precision of complete arch digital impressions on a human maxilla using seven different intraoral digital impression systems and a laboratory scanner. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry* **4**, 369-377.
- Mizumoto RM, Yilmaz B, McGlumphy Jr EA, Seidt J, Johnston WM. (2020) Accuracy of different digital scanning techniques and scan bodies for complete-arch implant-supported prostheses. *The Journal of Prosthetic Dentistry* **1**, 96-104.
- Motel C, Kirchner E, Adler W, Wichmann M, Matta RE. (2020) Impact of different scan bodies and scan strategies on the accuracy of digital implant impressions assessed with an intraoral scanner: An in vitro study. *Journal of Prosthodontics* **4**, 309-314.
- Müller P, Ender A, Joda T, Katsoulis J. (2016) Impact of digital intraoral scan strategies on the impression accuracy using the TRIOS Pod scanner. *Quintessence International* **4**, 343-349.
- Oh KC, Park JM, Moon HS. (2020) Effects of scanning strategy and scanner type on the accuracy of intraoral scans: A new approach for assessing the accuracy of scanned data. *Journal of Prosthodontics* **6**, 518-523.
- Peñarrocha-Diago M, Balaguer-Martí JC, Peñarrocha-Oltra D, Balaguer-Martínez JF, Peñarrocha-Diago M, Agustín-Panadero R. (2017) A combined digital and stereophotogrammetric technique for rehabilitation with immediate loading of complete-arch, implant-supported prostheses: A randomized controlled pilot clinical trial. *The Journal of Prosthetic Dentistry* **5**, 596-603.
- Piedra-Cascón W, Meyer MJ, Methani MM, Revilla-León M. (2020) Accuracy (trueness and precision) of a dual-structured light facial scanner and interexaminer reliability. *The Journal of Prosthetic Dentistry* **124**, 567-574.
- Ragain JC, Grosko ML, Raj M, Ryan TN, Johnston WM. (2000) Detail reproduction, contact angles, and die hardness of elastomeric impression and gypsum die material combinations. *The International Journal of Prosthodontics* **3**, 214-220.
- Renne W, Ludlow M, Fryml J, Schurch Z, Mennito A, Kessler R, Lauer A. (2017) Evaluation of the accuracy of 7 digital scanners: An in vitro analysis based on 3-dimensional comparisons. *The Journal of Prosthetic Dentistry* **1**, 36-42.
- Resende C, Barbosa T, Moura GF, Tavares L, Rizzante F, George FM, Neves F, Mendonça G. (2020) Influence of operator experience, scanner type, and scan size on 3D scans. *The Journal of Prosthetic Dentistry* [en prensa]. doi: 10.11607/ijp.6224.
- Revilla-León M, Att W, Özcan M, Rubenstein J. (2020a) Comparison of conventional, photogrammetry, and intraoral scanning accuracy of complete-arch implant impression procedures evaluated with a coordinate measuring machine. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, S0022-3913(20)30220-1 [en prensa]. doi: 10.1016/j.prosdent.2020.03.005.
- Revilla-León M, Jiang P, Sadeghpour M, Piedra-Cascón W, Zandinejad A, Özcan M, Krishnamurthy VR. (2020b) Intraoral digital scans-Part 1: Influence of ambient scanning light conditions on the accuracy (trueness and precision) of different intraoral scanners. *The Journal of Prosthetic Dentistry* **3**, 372-378.
- Revilla-León M, Smith Z, Methani MM, Zandinejad A, Özcan M. (2020c) Influence of scan body design on accuracy of the implant position as transferred to a virtual definitive implant cast. *The Journal of Prosthetic Dentistry* [en prensa]. doi: 10.1016/j.prosdent.2020.03.019.
- Revilla-León M, Subramanian SG, Özcan M, Krishnamurthy VR. (2020d) Clinical study of the influence of ambient light scanning conditions on the accuracy (trueness and precision) of an intraoral scanner. *Journal of Prosthodontics* **2**, 107-113.
- Santayana de Lima LM, Borges GA, Junior LH, Spohr AM. (2014) In vivo study of the accuracy of dual-arch impressions. *Journal of International Oral Health* **3**, 50-55.
- Schaefer O, Schmidt M, Goebel R, Kuepper H. (2012) Qualitative and quantitative three-dimensional accuracy of a single tooth captured by elastomeric impression materials: an in vitro study. *The Journal of Prosthetic Dentistry* **3**, 165-172.
- Schimmel M, Akino N, Srinivasan M, Wittneben JG, Yilmaz B, Abou-Ayash S. (2020) Accuracy of intraoral scanning in completely and partially edentulous maxillary and mandibular jaws: An in vitro analysis. *Clinical Oral Investigations* [en prensa]. doi: 10.1007/s00784-020-03486-z.
- Stevens CD. (2020) Impression-making in 2020: How long before analog methods are obsolete? *Compendium of Continuing Education in Dentistry* **3**, 178-179.
- Tregerman I, Renne W, Kelly A, Wilson D. (2019) Evaluation of removable partial denture frameworks fabricated using 3 different techniques. *The Journal of Prosthetic Dentistry* **4**, 390-395.
- Tsirogiannis P, Reissmann DR, Heydecke G. (2016). Evaluation of the marginal fit of single-unit, complete-coverage ceramic restorations fabricated after digital and conventional impressions: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry* **3**, 328-335.
- Wesemann C, Kienbaum H, Thun M, Spies BC, Beuer F, Bumann A. (2020) Does ambient light affect the accuracy and scanning time of intraoral scans? *The Journal of Prosthetic Dentistry*, S0022-3913(20)30239-0 [en prensa]. doi: 10.1016/j.prosdent.2020.03.021.
- Wismeijer D, Mans R, van Genuchten M, Reijers HA. (2014) Patients' preferences when comparing analogue implant impressions using a polyether impression material versus digital impressions (Intraoral Scan) of dental implants. *Clinical Oral Implants Research* **10**, 1113-1118.
- Vág J, Nagy Z, Simon B, Mikolicz Á, Kövér E, Mennito A, Evans Z, Renne W. (2019) A novel method for complex three-dimensional evaluation of intraoral scanner accuracy. *International Journal of Computerized Dentistry* **3**, 239-249.
- Vág J, Nagy Z, Bocklet C, Kiss T, Nagy Á, Simon B, Mikolicz A, Renne W. (2020) Marginal and internal fit of full ceramic crowns milled using CAD/CAM systems on cadaver full arch scans. *BMC Oral Health* **1**, 189.
- Wulfman C, Naveau A, Rignon-Bret C. (2020) Digital scanning for complete-arch implant-supported restorations: A systematic review. *The Journal of Prosthetic Dentistry* **124**, 161-167.
- Yuzbasioglu E, Kurt H, Turunc R, Bilir H. (2014) Comparison of digital and conventional impression techniques: evaluation of patients' perception, treatment comfort, effectiveness and clinical outcomes. *BMC Oral Health* **14**, 10.
- Zimmermann M, Ender A, Mehl A. (2020) Local accuracy of actual intraoral scanning systems for single-tooth preparations in vitro. *Journal of the American Dental Association* **2**, 127-135.