

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Estomatología

SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ESTOMATOLOGÍA CON OPCIÓN TERMINAL EN

ORTODONCIA

**“EXACTITUD DE PROTOTIPO DE ESCÁNER 3D FOTOGRAFÍCO DE
CÓDIGO ABIERTO PARA USO ORTODONCICO”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN ESTOMATOLOGÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN ORTODONCIA**

PRESENTA:

Juan Eduardo Gómez Vázquez 220450005

DIRECTOR DE TESINA:

Carolina Samano Valencia ID 100526470

ASESOR DISCIPLINARIO:

Luis Raúl Cruz Peternell ID 100529018

ASESOR METODOLÓGICO:

Rosendo Gerardo Carrasco Gutiérrez ID 100008655

ASESOR EXTERNO:

Thomas Megel

LECTOR

Estela del Carmen Velasco León 1002225455

JUNIO 2022



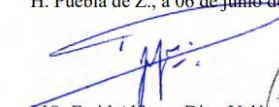
Oficio No. FESIEP/056/2022

C. Juan Eduardo Gómez Vázquez
Matrícula: 220450005
Alumno de la Maestría en Estomatología
Con opción Terminal en Ortodoncia
De la Facultad de Estomatología
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P R E S E N T E.

*El que suscribe, **MO. Farid Alfonso Dipp Velázquez**, Secretario de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Estomatología de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por este medio me permito informar a usted que esta Secretaría **aprueba la impresión de la Tesis titulada "Exactitud de prototipo de escáner 3d fotogramétrico de código abierto para uso ortodóncico"**, misma que presentará para realizar su examen profesional y obtener el grado de **Maestro en Estomatología con Opción Terminal en Ortodoncia**.*

Sin más por el momento, deseándole lo mejor, le reitero mi distinguida consideración.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Z., a 06 de junio de 2022.


MO. Farid Alfonso Dipp Velázquez
Secretario de Investigación y Estudios de Posgrado
Facultad de Estomatología




Facultad
de Estomatología


31 Poniente 1304, Col. Volcanes,
Puebla, Pue. C. P. 72410
01 (222) 229 55 00 Ext. 6400


BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE ESTOMATOLOGÍA
SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS RECEPCIONAL


Para obtener el Grado de: **Maestro en Estomatología con opción terminal en Ortodoncia**
Registro CIFE: 2021154 Fecha: 6 de junio del 2022

Título de la Tesis “EXACTITUD DE PROTOTIPO DE ESCÁNER 3D FOTOGAMÉTRICO DE CÓDIGO ABIERTO PARA USO ORTODÓNICO”

Nombre del alumno: Juan Eduardo Gómez Vázquez **Matrícula:** 220450005
Domicilio: SAN JOSE-URANGA 24-A, BARRIO DEL CALVARIO, 72700 SAN JUAN CUAUTLANCINGO, PUE.
Tel: 2299585586 **Fecha de ingreso a la Facultad:** enero 2020 **Firma:** 

Director de tesis: Carolina Sámano Valencia **Grado académico:** Doctorado en ciencia e ingeniería de materiales
Adscripción: Facultad de Estomatología **ID:** 100526470 **Tel:** 444 819 1822 **Firma:** 

Director disciplinario: Luis Raúl Cruz Peternell **Grado académico:** Maestría en Ortodoncia
Adscripción: Facultad de Estomatología **ID:** 100529018 **Tel:** 222 310 7805 **Firma:** 

Director metodológico: Rosendo Gerardo Carrasco Gutiérrez **Grado académico:** Maestría en salud pública
Adscripción: Facultad de Estomatología **ID:** 100008655 **Tel:** 222 505 3084 **Firma:** 

Lector: Estela del Calmen Velasco León **Grado académico:** Maestría en Ortodoncia y Ortopedia Maxilofacial
Maestría en Odontología Pediátrica
Adscripción: Facultad de Estomatología **ID:** 100225455 **Tel:** 222 323 4842 **Firma:** 

Nombre y firma de aprobación del Responsable de la Maestría en Estomatología con Opción terminal en Ortodoncia

MO. Laura Mónica López Pérez Franco **Firma:** 

La Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Estomatología, autoriza la impresión de la Tesis.


MO. Farid Alfonso Dipp Velázquez



Fecha: 6 de junio del 2022

Sello

AGRADECIMIENTOS

Primero que nadie, agradezco a mis padres por apoyarme en todos y cada uno de mis proyectos, incluyendo, pero no limitado, a la financiación de este posgrado, a mis intercambios académicos, etc, sin ellos nada hubiera sido posible.

El hombre, máquina de hacer chistes, cirujano dentista y maestro en ortodoncia que soy el día de hoy, todo se lo debo a ellos. Gracias, papá. Gracias, mamá. En verdad les agradezco todo su apoyo.

Agradezco a esa persona que ha estado presente en toda mi vida, siempre acompañándome desde la concepción, mi hermano gemelo, inspiración y modelo a seguir, la personificación del éxito.

Agradezco a mi novia, Olin Montero, por su apoyo, compañía y palabras de aliento en los momentos de frustración derivados de lo vivido en el posgrado.

Agradezco a mi amigo, Diego Vásquez, y todos mis compañeros de World of Warcraft por su compañía, y, por continuar asistiéndome en la guerra diaria contra el aburrimiento.

A todas mis mascotas, empezando por mi gato Azul y mi perro Coyote, los cuales esperan pacientemente la finalización de mi posgrado. Lamento haberlos dejado en Veracruz durante mis estudios. A mi perra Maléfica, la cual me enseñó a querer a los cockers, y que, con tan solo verla dormir, me brindo calma en los momentos difíciles. No puede faltar Clayton, mi cachorro que llego justo al final, para brindarme ese último empujoncito.

Agradezco al M.S.P Rosendo Carrasco Gutiérrez el cual, a pesar de las negativas, nunca dudo en el potencial de este proyecto, apoyándome desde el inicio hasta su finalización.

Agradezco a todos los profesores en la BUAP, UABC, UniValle y UNICOC que compartieron su conocimiento conmigo.

Finalmente agradezco al Dr. Andrés Felipe Lara Tafurt, por haberme hecho la invitación de pertenecer al pequeño y selecto grupo de buenos ortodoncistas. Espero estar a la altura.

¡GRACIAS A TODOS!

INTRODUCCIÓN

Los Modelos de estudio son esenciales no sólo para el diagnóstico y la planificación del tratamiento de ortodoncia, sino también para el seguimiento del caso, la comunicación con el paciente y la evaluación de los resultados del tratamiento. Al ser parte del expediente clínico deben guardarse durante 5 años, esto significa un problema de almacenamiento, durante el cual son propensos a perderse o fracturarse. Los modelos de estudio digitales eliminan los problemas relacionados con el almacenamiento físico de los modelos de yeso. Los escáneres comercializados al gremio odontológico ya sean extra o intraorales requieren de una fuerte inversión, lo cual representa una barrera de entrada a la odontología digital.

En los últimos años se ha visto un auge de proyectos de código abierto por dos factores: en primero la popularización de pequeñas computadoras de una sola placa como la Raspberry Pie y segundo que hoy en día la impresión 3D se ha vuelto muy accesible, estos dos factores permiten el diseño y fabricación de prototipos a muy bajo costo. Entre estos proyectos están los escáneres fotogramétricos. La fotogrametría es el arte y la ciencia de extraer información 3D de las fotografías, diversos estudios han demostrado la viabilidad de los escáneres fotogramétricos como una solución costo-efectiva capaces de competir contra sistemas de mayor costo.

El objetivo de este estudio fue evaluar la exactitud (veracidad y precisión) de un prototipo de scanner 3D fotogramétrico de código abierto al digitalizar modelos de yeso, el digitalizar los modelos eliminaría los problemas de almacenamiento, así como reduciría el costo de entrada a la odontología digital, haciéndola más accesible.

PALABRAS CLAVE

Photogrammetry, DiY 3D scanner, Open Source

I - ANTECEDENTES

I.I - ANTECEDENTES GENERALES

Exactitud

La norma ISO 5625 (Organización Internacional de Normalización) describe la exactitud con dos términos, la precisión y la veracidad.(1) Es importante tener en cuenta que en muchos estudios los términos concordancia y repetibilidad se utilizan de manera intercambiable para referirse a la precisión, y los términos exactitud y fiabilidad para referirse a la veracidad. Lo importante es tener en cuenta el significado de cada una para poder comparar diferentes estudios.

La precisión (concordancia y/o repetibilidad) describe la cercanía de las dimensiones de repetidas mediciones entre sí. Una alta precisión se relaciona con una medición más repetible y consistente. La veracidad (exactitud/fiabilidad) describe hasta qué punto las dimensiones obtenidas se desvía de las dimensiones reales del objeto medido. Para que un instrumento se considere exacto, debe tener alta precisión y veracidad.(1) (Figura 1)

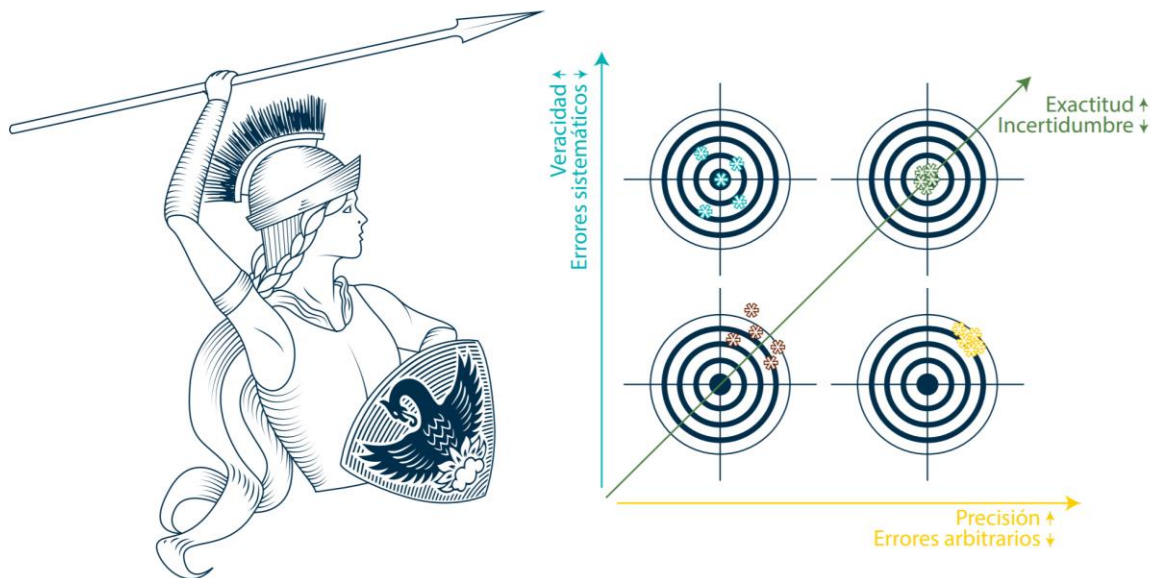


Figura 1 Exactitud: Veracidad y precisión. Fuente propia.

Modelos de estudio

Los modelos de estudio son réplicas tridimensionales exactas de los dientes del paciente. Son esenciales no sólo para el diagnóstico y la planificación del tratamiento, sino también para el seguimiento del caso, la comunicación con el paciente y la evaluación de los resultados del tratamiento(2). Hay dos maneras de obtenerlos:

1. La manera tradicional, la cual consiste en utilizar materiales de impresión para obtener una reproducción negativa de los dientes que posteriormente será corrida con yeso, obteniendo así la reproducción positiva de los dientes y los tejidos circundantes del paciente(3). El material de impresión más utilizado es el alginato(3,4), con una veracidad reportada de 150 μm mientras que el estándar de oro para obtener la mayor exactitud es usando vinyl siloxano con una cucharilla individual, obteniendo una veracidad de 17 μm (5)
2. La digitalización de la arcada del paciente, utilizando un escáner intraoral para obtener modelos digitales.

Los modelos de estudio son parte del expediente clínico, y de acuerdo con la NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SSA3-2012, Del expediente clínico deben ser guardados por un mínimo de 5 años después de la última cita del paciente(6).

En el caso de los modelos de yeso, esto significa un problema de almacenamiento, durante el cual son propensos a perderse o fracturarse(2,7). Los modelos digitales eliminan los problemas relacionados con el almacenamiento físico de los modelos, según un estudio nos ahorran hasta 17 m³ de espacio por cada mil pacientes(8).

Modelos Digitales

La digitalización de la arcada de un paciente puede ser de manera directa con un escáner intraoral o de manera indirecta, ya sea digitalizando la impresión negativa de la arcada del paciente o el modelo de yeso.

Digitalización Directa

El primer escáner intraoral disponible al público fue el sistema CEREC 1 en 1987. Funcionó con el principio de la "triangulación de la luz" y necesitaba una capa de polvo opaco en la superficie de los dientes preparados para mejorar la calidad de la digitalización(9). En las últimas 3 décadas la tecnología ha avanzado considerablemente, hoy en día existen en el mercado una gran variedad de escáneres intraorales: CEREC, LavaTM C.O.S, iTero, E4D y TRIOS son algunos ejemplos (5,10,11).

Digitalización Indirecta

Los modelos de estudio digitales se convirtieron en una realidad en 1999 con el lanzamiento al mercado de Orthocad, seguido por eModels en el 2001, ambos escáneres digitalizaban modelos de yeso. En la actualidad, es posible digitalizar los modelos directamente de la cucharilla de impresión, de este modo no es necesario correr el modelo(7). La tecnología utilizada en la digitalización de los modelos de yeso depende de cada escáner, los 3 métodos más comunes son: triangulación laser, luz estructurada y microtomografía. La literatura reporta una gran veracidad de los escáner extra orales, que varía entre 5 y 20 μm (10,12–15). La fuerte inversión requerida para adquirir y utilizar estos escáneres no se limita al momento de la compra del escáner, sino a la constante renovación de licencias anuales, convirtiendo a los escáneres de código abierto en una opción atractiva, digna de considerarse.

Fotogrametría

La fotogrametría es el arte y la ciencia de extraer información tridimensional (3D) de las fotografías. El proceso implica tomar fotografías superpuestas de un objeto, estructura o espacio, y convertirlas en modelos digitales bidimensionales (2D) o 3D(16). Se dice que la fotogrametría es tan antigua como la fotografía. En 1759, Lambert, un matemático alemán publicó un tratado sobre como reconstruir objetos tridimensionales a partir de dibujos en perspectiva. En 1839, Arago, un físico francés escribió que la fotografía podría servir para medir los edificios más altos e inaccesibles y reemplazar a los topógrafos. El primer fotogrametrista fue Laussedat, un oficial militar francés en 1849, pero fue Meydenbauer, un arquitecto alemán quien acuñó el término “fotogrametría” (17).

La fotogrametría es hoy en día una técnica de medición tridimensional bien establecida, utilizada rutinariamente en una amplia gama de disciplinas, desde su uso en estudios topográficos hasta su uso en el área de la salud. En ortodoncia se utiliza la fotogrametría para la digitalización del rostro del paciente, permitiéndonos realizar el diagnóstico y la planeación digital. (17–24).

El proceso fotogramétrico

La obtención de un modelo 3D a partir de la fotogrametría se divide en 8 pasos:(25)

1. TOMA DE FOTOGRAFIAS
2. EXTRACCIÓN DE RASGOS NATURALES
3. COMPARACIÓN DE IMÁGENES
4. RASGOS QUE COINCIDEN
5. ESTRUCTURA DE MOVIMIENTO
6. ESTIMACIÓN DE LOS MAPAS DE PROFUNDIDAD
7. MESHING
8. TEXTURING

Paso 1: Toma de fotografías Se toman las fotografías del objeto que se desea digitalizar. Se puede usar una o más cámaras o rotar el objeto frente a la cámara. Se busca tomar tantas fotografías sean necesarias para capturar todos los ángulos posibles del objeto(18,26). La toma de fotografías puede ser manual, o sistematizada valiéndonos de un escáner fotogramétrico.

Paso 2: Extracción de rasgos naturales Se extraen grupos distintivos de píxeles que son, en cierta medida, invariables a los puntos de vista cambiantes de la cámara durante la adquisición de la imagen. Por lo tanto, un rasgo del objeto debe tener descripciones de rasgos similares en todas las fotografías (25). El método de detección de rasgos más conocido es el algoritmo “transformación de características invariable en escala” (SIFT por sus siglas en inglés). El objetivo inicial del SIFT es extraer parches discriminantes en una primera imagen que puedan compararse con los parches discriminantes de una segunda imagen, independientemente de la rotación, la traslación y la escala. Como un detalle relevante sólo existe a cierta escala, los parches extraídos se centran en puntos de interés estables. La idea clave es que, en cierta medida, se puede utilizar la invariancia SIFT para hacer frente a las transformaciones de la imagen que se producen cuando los puntos de vista cambian durante la adquisición de la imagen(27,28).

Paso 3: Comparación de imágenes Se buscan imágenes que miren a las mismas zonas del objeto. Para ello, se utilizan técnicas de recuperación de imágenes para encontrar imágenes que compartan algún contenido sin el costo de resolver todas las coincidencias de rasgos a detalle. La idea es simplificar la imagen en un descriptor de imagen compacto que permite calcular la distancia entre todos los descriptores de imágenes de manera eficiente(25). Uno de los métodos más comunes para generar este descriptor de imagen es el enfoque de árbol de vocabulario. Pasando todos los descriptores de las características extraídas a él, hace una clasificación comparando sus descriptores con los de cada nodo de este árbol. Cada descriptor de rasgos termina en una hoja, que puede ser almacenada por un simple índice: el índice de esta hoja en el árbol. El descriptor de la imagen está entonces representado por esta colección de índices de hojas usadas. De esta forma es posible ver si diferentes imágenes comparten el mismo contenido comparando estos descriptores de imagen(29).

Paso 4: Rasgos que coinciden Se busca hacer coincidir todas las características entre los pares de imágenes candidatos(25). Primero se coinciden fotogramétricamente el conjunto de descriptores de las 2 imágenes de entrada. Para cada rasgo de la imagen A, obtenemos una lista de rasgos candidatos de la imagen B. Como el espacio de los descriptores no es un espacio lineal y bien definido, no se puede confiar en los valores de distancia absoluta para saber si la coincidencia es válida o no. Para eliminar los malos candidatos, se asume que sólo hay una coincidencia válida en la otra imagen. Por lo tanto, para cada descriptor de rasgo en la primera imagen, se buscan los 2 descriptores más cercanos y se utiliza un umbral relativo entre ellos. (28). Esto proporciona una lista de rasgos que coinciden con los candidatos basados sólo en un criterio fotogramétrico. Encontrar los 2 descriptores más cercanos en la segunda imagen para cada rasgo es computacionalmente

intensivo con un enfoque de fuerza bruta, pero existen muchos algoritmos optimizados. El más común es el de “Vecino más cercano aproximado” (ANN por sus siglas en inglés) (30).

Paso 5: Estructura de movimiento El este paso se busca comprender la relación geométrica que hay detrás de todas las observaciones proporcionadas por las imágenes de entrada, e inferir la estructura del objeto (puntos 3D) con la pose (posición y orientación) y la calibración interna de las cámaras. El algoritmo incremental es un proceso de reconstrucción creciente(25,31,32).

Paso 6: Estimación de los mapas de profundidad Para todas las cámaras que han sido resueltas por SfM, se busca recuperar el valor de profundidad de cada píxel. Para cada imagen, se selecciona las N mejores/cercanas cámaras alrededor. Se seleccionan los planos frontales-paralelos basados en la intersección del eje óptico con los píxeles de las cámaras vecinas seleccionadas. Esto crea un volumen W, H, Z con muchos candidatos de profundidad por píxel. Se estima la similitud para todos ellos(25,33).

Paso 7: Meshing En este paso se crea una representación de la superficie geométrica densa del objeto. Se fusionan todos los mapas de profundidad en un octágono global donde los valores de profundidad compatibles se fusionan en las celdas de octágono(25).

Paso 8: Texturación En este paso se texturiza la malla generada. Se utiliza el enfoque estándar de mapeo de UV(34).Para cada triángulo, se usa la información de visibilidad asociada a cada vértice para recuperar las texturas candidatas. Se filtran las cámaras sin un buen ángulo hacia la superficie para favorecer las cámaras fronto-paralelas y finalmente se promedian los valores de los píxeles(25,35).

Hoy en día, los pasos 2 al 8 se realizan de manera automática por software fotogramétrico especializado. Existen multitud de softwares para realizar la fotogrametría, que van desde los softwares gratuitos de código abierto hasta softwares con modelos de pago por suscripción(25,36–40).

Escáneres fotogramétricos

Los escáneres fotogramétricos son todos aquellos dispositivos o artilugios que nos permitan sistematizar la toma de fotografías para su uso en fotogrametría, su complejidad y costo son variables. Estos pueden ser sistemas complejos de múltiples cámaras sincronizadas (41–43) o de una sola cámara. (44) Importante recordar que la fotogrametría propiamente dicha, es decir la generación del modelo 3D, es realizada en computadoras por software especializado, el “escáner” solo sistematiza el primero de los ocho pasos previamente descritos, la toma de fotografías.

Escáneres fotogramétricos de código abierto

Los proyectos de código abierto son aquellos que fomentan la colaboración abierta, promoviendo el acceso universal a través de una licencia libre o de código abierto a los diseños o planos de un producto, y la redistribución universal de estos diseños o planos.(45)

OpenScan (Halle, Alemania) es un prototipo de escáner fotogramétrico desarrollado por Thomas Megel en busca de crear un escáner 3D de bajo costo, modular y de código abierto. Su prototipo está basado en la fotogrametría, y su modularidad permite el uso de diferentes cámaras, que van desde las cámaras sencillas como la de los teléfonos o el raspberry Pi hasta cámaras especializadas como son las DSLR. Para generar un modelo tridimensional, el prototipo de escáner toma fotografías desde distintos ángulos valiéndose de la tecnología 3D , y usando freeware fotogramétrico es posible crear un modelo 3D de alta exactitud (Veraz y preciso) con o sin textura(46).

OpenScan se vale de la tecnología de impresión 3D de modelado de deposición fundida (FDM), la cual se ha vuelto muy popular para la producción de prototipos funcionales, modelos conceptuales, etc. La impresión 3D FDM consiste en utilizar materiales plásticos térmicos para imprimir objetos 3D. (47)

I.II - ANTECEDENTES ESPECÍFICOS

Escáneres fotogramétricos para digitalizar tejidos blandos.

Las tecnologías fotogramétricas son ampliamente usadas en ortodoncia para la digitalización de los tejidos blandos, y la realización de mediciones antropométricas de forma digital, como mencionamos antes, los escáneres fotogramétricos pueden variar en su costo y complejidad, de tal forma que las soluciones comerciales siguen siendo bastante caras, lo que limita su accesibilidad. En la actualidad hay un empuje para utilizar esta tecnología para crear alternativas accesibles hechas a la medida.

Düppe K et al, evaluaron la fiabilidad y la concordancia de las medidas antropométricas faciales tomadas manualmente contra aquellas obtenidas con el sistema portable 3dMDtrio. El 3dMDtrio es un escáner fotogramétrico que consiste en 3 unidades modulares, cada módulo contiene tres cámaras de visión artificial y un sistema de flash que se sincroniza con los otros módulos para obtener 9 fotografías por captura. Generando automáticamente una malla de superficie de polígonos 3D continuos con un solo sistema de coordenadas x,y,z de todos los pares estéreo sincronizados obteniendo así el modelo en 3D de los pacientes. Encontraron que el modelo digital y las mediciones en el paciente son generalmente comparables en términos de fiabilidad y concordancia(41).

Dindaroglu et al, por su parte evaluaron la exactitud de la fotogrametría tridimensional (3D) comparándola con los métodos de antropometría directa y fotogrametría digital (2D). Para esto, 10 parámetros fueron medidos directamente de la cara de 80 pacientes, esos mismos parámetros fueron medidos usando fotogrametría bidimensional (2D) y fotogrametría tridimensional (3dMDflex System, 3dMD, Atlanta, Ga). La diferencia promedio más alta fue de 0.21 mm entre la medición directa y la fotogrametría tridimensional. Los autores concluyeron que las mediciones obtenidas mediante la fotogrametría tridimensional indican que puede ser un método exacto y fiable para su uso en ortodoncia(48).

Camison L et al, compararon el Vectra H1, un sistema fotogramétrico monoscópico portátil para su uso en la digitalización facial contra el sistema 3dMDface, un sistema fotogramétrico de dos unidades modulares, cada módulo contiene tres cámaras de visión artificial para un total de 6 cámaras. Se capturaron imágenes faciales de 26 participantes adultos con el sistema Vectra H1 y el sistema 3dMDface. Usando estadísticas de magnitud de error, 136 distancias lineales fueron comparadas entre los dos sistemas. Encontraron que las imágenes de la superficie facial en 3D producidas con el sistema Vectra H1 tienen suficiente exactitud para la mayoría de las aplicaciones clínicas(44).

Esto concuerda con el estudio de De Menezes et al, en el que evaluaron la exactitud del Vectra M3 para medir los tejidos blandos faciales de individuos sanos. Se obtuvieron puntos de referencia faciales tridimensionales del tejido blando de las caras de 10 pacientes, se calcularon 16 medidas lineales. Encontraron que el sistema fue repetible y los errores aleatorios siempre fueron inferiores a 1 mm, con esto concluyeron que el sistema fotogramétrico Vectra M3 puede evaluar las coordenadas de la cara con buena exactitud.(42)

Koban et al, compararon la exactitud de modelos obtenidos utilizando un iPad3 y un iPhone 4S contra el Sistema Vectra H1 al momento de digitalizar un Maniquí de plástico. Es importante recordar que el iPad3 y el iPhone 4S tenían una cámara de 5 megapíxeles y 9 megapíxeles respectivamente. Para obtener los modelos digitales del maniquí se tomaron 16 fotografías con la aplicación Autodesk 123D catch. (Esta aplicación fue descontinuada en enero del 2017(49)). Midieron la precisión de la reconstrucción 3D en 2 pasos. El primer paso consistió de 42 mediciones con una cinta métrica y el segundo, fue la medición de la desviación de superficie a superficie entre los modelos generados con el VectraH1 y los generados con el Autodesk 123D catch. Al comparar los modelos encontraron que los modelos computarizados de Autodesk 123d Catch ® sugieren una buena exactitud de la reconstrucción 3D, en comparación con la medición manual y el Vectra. Sin embargo, el tiempo de captura prolongado con múltiples imágenes es propenso a errores(50).

Salazar-Gamarra et al, evaluaron el uso de un teléfono celular con una cámara de 16 megapíxeles para realizar fotogrametría mesoscópica con el fin de utilizar el modelo tridimensional obtenido en la fabricación de prótesis faciales. Utilizaron la aplicación Autodesk 123D Catch para la obtención de los modelos tridimensionales. A pesar de que no se realizó ningún análisis para corroborar la exactitud del modelo obtenido, los autores consideraron que fue una réplica bastante aceptable, y de manera subjetiva se determinó que era suficiente para su uso en la fabricación de prótesis faciales(21).

Wellens et al, tomaron imágenes de 29 sujetos y de una cabeza de maniquí 3 veces utilizando su escáner fotogramétrico y un sistema disponible en el mercado. El sistema Stereo-face3D (SF3D), construido a medida por Wellens consta de 14 cámaras digitales réflex Canon EOS 1200D con lentes EF-S Canon 18-55 mm (Canon, Tokio, Japón) montados en un marco cuadrado de aluminio. Determinaron la variabilidad de la forma calculando el error cuadrático medio (RMSE) entre su escáner fotogramétrico y el escáner comercial. El RMSE entre sistemas fue de $1,6 \pm 0,34$ mm para el grupo de estudio y 1,38 mm para la cabeza del maniquí. La variabilidad se expresaba principalmente en las zonas de los párpados superiores, la punta nasal y el alae, y el mentón de la barbilla. Concluyeron que la precisión obtenida es competitiva con sistemas comerciales de última generación, sin requerir una inversión tan fuerte(43).

Escáneres fotogramétricos para digitalizar modelos

Tras la revisión bibliográfica solo se encontraron cinco(51–55) estudios acerca del uso de la fotogrametría para la digitalización de modelos dentales. Cada estudio armó su propio escáner fotogramétrico. La revisión bibliográfica mostro que los limitados estudios presentan una considerable heterogeneidad en cuanto a los métodos de evaluación, los escáneres evaluados (hardware y software), los grupos de control y los parámetros utilizados (fotos por rotación, ángulos de inclinación, etc.). Detalles técnicos de los escáneres fueron resumidos en la Tabla 1

Sobre la heterogeneidad de los escáneres, es importante recordar que la fotogrametría propiamente dicha, es decir, la generación del modelo 3D, se realiza en ordenadores mediante software especializado, el "escáner" sólo sistematiza el primer paso del proceso, la toma de fotografías(25).

Tabla 1. Detalles de todos los escáneres fotogramétricos de los 5 estudios incluidos

Estudio (año)	Detalles técnicos	Distancia Cámara - Objeto	Apertura/ISO	Velocidad del obturador	Profundidad de campo	Angulo de inclinación vertical	Angulo de rotación : Cámara/ Objeto Manual o automática	Numero de gotos por rotación / Total	Tratamiento de la superficie
Fu(51) (2017)	Canon EOS 600D lente 90 mm prime Meshlab	45 cm	F22/ND	N/D	N/D	0° and 40°	20° RMC	4/72	No
Santosi(52) (2018)	Canon 1200d DSLR lente 18-55 mm a 55mm Agisoft Photoscan	50cm (± 5cm)	F18/ND	N/D	5 cm	2 planos verticales, distancia o angulación no declarada	90 ° RMO	8 / 32	No Video Projector de video a una distancia de 75cm y en un ángulo de 50° para patrón aleatorio y ondulado
Stuani(53) (2019)	Canon EOS Rebel T3i lente Macro EF 100 mm 3DF Zephyr Free® software	45 cm	F32/100	N/D	N/D	0°, 45° y 90° del plano oclusal.	15° N/D	2/50	No
Alyaman(54) (2019)	Cámara de 20 megapíxeles Open Multi-View Geometry	N/D				1 plano, angulación N/D	30° RAC	24	No
Silvester & Hillson(55) (2020)	Canon EOS6D (20.2megapíxeles) lente macro 100 mm Agisoft Metashape	N/D	F11/100	1/40s	N/D	Brazo de madera ajustable, ángulos de 2°, 12°, 21°, 31° y 45°	22.5° RAO	5/80	No

1-N/D=No declarado. 2-RMC=Rotación Manual de la cámara. 3-RMO=Rotación Manual del objeto. 4-RAC=Rotación automática de la cámara. 5-RAO=Rotación automática del Objeto

Estudios de mediciones dimensionales

Dos estudios evaluaron la precisión de las mediciones dimensionales en los modelos digitales generados con escáneres fotogramétricos en comparación con las mediciones realizadas en el modelo físico con un calibre digital. (Tabla 2).

Fu et al(51), informaron de que las diferencias medias entre las mediciones de los modelos digitales y los modelos físicos eran de 0.011-0.402mm. Las diferencias medias no fueron significativas, excepto en el caso del perímetro de la arcada inferior ($P > 0.05$); todas las diferencias se consideraron clínicamente aceptables (< 0.5 mm). Del mismo modo, Stuani et al(53), encontraron un límite de acuerdo entre -0.433 y 0.611 mm entre las mediciones de los modelos digitales y físicos.

Estudios sobre la precisión de la superposición

Tres artículos evaluaron la precisión de superposición de los modelos digitales generados con los escáneres fotogramétricos. (Tabla 3).

Santosi et al(52), el escáner fotogramétrico utilizó un proyector para iluminar un patrón sobre el modelo de yeso para generar un modelo digital más preciso, después de la inspección de CAD informaron de una desviación estándar de mejor ajuste previo de ± 0.096 mm (Sin patrón), ± 0.081 mm (Patrón aleatorio) y ± 0.074 mm (Patrón ondulado).

Stuani et al(53), utilizaron la superposición para evaluar la precisión en los 5 modelos digitales obtenidos a partir de un único modelo de yeso con su sistema fotogramétrico, encontrando una diferencia media de precisión de -0.5 mm a 0.5 mm ± 0.171 .

Silvester y Hillson(55) informaron de una veracidad de 57 a 159 μm , encontrando que el uso de escáneres fotogramétricos para la adquisición de modelos era altamente reproducible (59 a 90 μm) y que los modelos digitales generados podían utilizarse para obtener datos cuantitativos brutos de tamaño y forma, sin embargo, los detalles de la superficie a escala más fina no se reproducen con precisión con el escáner fotogramétrico que evaluaron.

Estudios sin mediciones.

Alyaman et al(54), no reportaron haber realizado mediciones para evaluar la exactitud de su escaner, se se limitaron a un examen cualitativo a simple vista de los modelos digitales, pero reportaron que su escaner experimentó limitaciones en algunas áreas relativas a la calidad del objeto escaneado, como los objetos brillantes, transparentes y sin características. Sugirieron que estas limitaciones podrían ser compensadas si en un futuro se proyecte una luz sobre dichos objetos con el fin de añadir características que puedan extraerse posteriormente como puntos, tal como lo realizó el estudio de Santosi et al(56)(56).(52)

Tabla 2. Estudios de medidas dimensionales					
Estudio (año)	Control / Escaner de referencia	Descripción de la muestra (material)	Tamaño de la muestra	Metodo de evaluacion	Exactitud
Fu(51) (2017)	Modelo físico de yeso medido con un calibre digital equipado con una resolución de 0,01 mm	Conjuntos de modelos de yeso del maxilar superior e inferior.	60 modelos (30 juegos)	Medidas dimensionales entre pares de puntos predefinidos.	Veracidad, diferencias medias para: Anchura mesiodistal: 0,011 a 0,016 mm Anchura del arco: 0,108 a 0,154 mm.
Stuani(53) (2019)		Modelo de yeso del maxilar superior	1 modelo físico		Veracidad, altura y grosor -0,4 a 0,6 mm Precisión DE de $\pm 0,171$ y un coeficiente de repetibilidad de 0,474

Tabla 3. Estudios de precisión de la superposición					
Estudio (año)	Control / Escaner de referencia	Descripcion de la muestra (material)	Tamaño de la muestra	Metodo de evaluacion	Exactitud
Santosi(52) (2018)	Modelo de yeso digitalizado con un Atos II Triple Scan de GOM	Modelo de yeso del maxilar superior con pilares sin patrón, con patrón aleatorio y con patrón ondulado	1 modelo	Superposición con el modelo 3D obtenido del escáner de referencia para medir la veracidad	Inspección CAD prealineación mejor ajuste desviación estándar [mm] Sin patrón +0.096 Patrón aleatorio +0.081 Patrón Ondulado +0.074
Stuani(53) (2019)	El mismo modelo de yeso digitalizado 5 veces con el sistema fotogramétrico	Modelo de yeso digitalizado del maxilar superior	5 modelos digitales	Superposición con 5 modelos 3D obtenidos a partir del mismo modelo de yeso.	Precision -0.5 mm a 0.5 mm
Silvester& Hillson(55) (2020)	Modelo de yeso digitalizado con un escáner ATOS 80 de GOM	Modelo de yeso de los maxilares inferiores obtenido mediante una técnica de lavado de masilla en dos fases	17 modelos	Superposición con el modelo 3D obtenido del escáner de referencia para medir la veracidad.	Veracidad Diferencias medias 57 a 159 µm Precisión Diferencias medias 59 a 90 µm

Exactitud clínicamente aceptable para modelos de estudio

La impresión de alginato se utiliza habitualmente para obtener modelos de diagnóstico; presenta la menor precisión de los materiales de impresión convencionales, pero es lo suficientemente precisa ($162 \pm 71,3 \mu\text{m}$) para el diagnóstico ortodóntico(5).

Estudios previos por Asquith(57), Okunami(56) y Leifert(58) postularon los límites de la aceptabilidad clínica. Diferencias de menos de 0,5 mm para las mediciones de un solo diente y menos del 5 por ciento de la distancia de las mediciones de la anchura de la arcada, la longitud de la arcada y el perímetro de la arcada se postularon como los límites de la aceptabilidad clínica(56–58).

Para impresiones convencionales, el límite de los cambios realizando dimensiones lineales es de 0.5% de acuerdo a la especificación American National Standards Institute/ American Dental Association (ANSI/ADA) no.19 (59,60) y la norma ISO 4823(61). La exactitud de los modelos digitales también puede ser evaluada a través de mediciones lineales como se describe en la especificación ANSI/ADA no.132(62).

Importante recordar que el diente tiene un movimiento constante fisiológico en dirección mesio-distal de aproximadamente 30 a 100 μm (63), desviaciones por debajo de este rango son clínicamente aceptables(64).

En el caso de un modelo tallado para la preparación de coronas, hay reportes de entre 50-200 μm pero no existe un acuerdo sobre el límite clínicamente aceptable de la anchura máxima de la brecha marginal. McLean y von Fraunhofer concluyeron que 120 μm era la máxima apertura marginal tolerable después de examinar más de 1000 coronas(65,66).

II - PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el área clínica, ya sea privada o institucional los modelos de estudio pueden llegar a causar muchas molestias ya que, al ser parte del expediente clínico, deben ser guardados por un mínimo de 5 años después de la última cita del paciente. Esto representa un gran problema de almacenamiento, en promedio hasta 17 m³ de espacio por cada mil pacientes, también puede consumir mucho tiempo cada vez que se desee recuperar del almacén un modelo en específico, sin mencionar las posibilidades de que los modelos se pierdan o sufran fracturas, ni el costo al medio ambiente de almacenar cada modelo.

En cuanto al área educativa, la falta de acceso a un escáner con el cual digitalizar los modelos de estudio limita el alcance de las investigaciones que se pueden realizar en dichas instituciones, además de que nuevamente hay un problema de almacenamiento, así como al momento de heredar a los pacientes ya que se dificulta entregar el expediente completo o en buenas condiciones.

Un escáner 3D soluciona todos esos problemas, ahorrándonos espacio, tiempo y reduciendo la contaminación al medio ambiente, pero requiere de una fuerte inversión, esto pone a los escáneres 3D fuera del alcance de muchas personas y comunidades. Los escáneres fotogramétricos de código abierto representan una manera accesible costo-efectiva de digitalizar los modelos de estudio, lo cual nos lleva a la pregunta de investigación.

III - PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Un escáner 3D fotogramétrico de código abierto tiene exactitud para uso ortodóncico?

IV – JUSTIFICACIÓN

La fotogrametría es ampliamente utilizada en diversas disciplinas, incluyendo estomatología. Hay múltiples sistemas basados en fotogrametría que permiten digitalizar la cara de un paciente, lo cual nos permite desde realizar el diagnóstico de los 19 rasgos faciales incluidos en el examen facial descrito por William Arnett hasta diseñar prótesis maxilofaciales.

Estos sistemas tienen un alto costo, lo que llevo a la búsqueda de una fotogrametría más accesible. Diversos estudios han demostrado que, en ausencia de estos sofisticados sistemas, se podría utilizar cualquier cámara, incluso la cámara de un teléfono inteligente para capturar las fotografías de lo que se desea digitalizar, y luego realizar el procesamiento fotogramétrico en la computadora.

Esta búsqueda por una fotogrametría más accesible, llevo al desarrollo de proyectos de código abierto como lo son OpenScan, y Meshroom, los escáneres fotogramétricos de código abierto pudieran ser una manera accesible de digitalizar los modelos de yeso, lo cual eliminaría no solamente todos los problemas relacionados con el almacenamiento de los modelos físicos, sino que representaría la puerta de entrada a la odontología digital, y a las investigaciones que requieran análisis de desviación tridimensional.

V - HIPÓTESIS

- Hi: El escáner 3D fotogramétrico de código abierto tiene exactitud para uso ortodóncico.
- Ho: Un escáner 3D fotogramétrico de código abierto NO tiene exactitud para uso ortodóncico.

VI - OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

VI.I -OBJETIVO GENERAL

- Evidenciar la exactitud de prototipo de escáner 3D fotogramétrico de código abierto para uso ortodóncico.

VI.II - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Crear un prototipo de escáner 3D fotogramétrico siguiendo el diseño de OpenScan.
- Evaluar y comparar la distancia Inter canina entre los distintos modelos.
- Evaluar y comparar el Slo entre los distintos modelos.
- Evaluar y comparar el ancho de arcada anterior entre los distintos modelos.
- Evaluar y comparar el ancho de arcada posterior entre los distintos modelos.
- Evidenciar y comparar la veracidad del prototipo de escáner 3D fotogramétrico de código abierto usando el escáner 3Shape Tríos® como referencia.

VII - MATERIALES Y MÉTODO

VII.I - DISEÑO DE ESTUDIO

- Experimental
- Transversal
- Prospectivo
- Analítico

VII.II - POBLACIÓN Y MUESTRA

Se calculo el valor de n (ver anexo 1)

- 20 modelos de yeso tomados de un paciente con dentición permanente, sin extracciones y apiñamiento leve.
- 20 modelos digitales de los modelos de yeso obtenidos con el escáner 3Shape Tríos®
- 20 modelos digitales de los modelos de yeso obtenidos con el prototipo de escáner 3D fotogramétrico.

VII.III – CRITERIOS DE SELECCION

• VII.III.I - Criterios de inclusión

- Modelos de yeso de ambas arcadas de un paciente con dentición permanente, sin extracciones y apiñamiento leve.
- Modelos digitales de los modelos de yeso con un escáner 3Shape Tríos®
- Modelos digitales de los modelos de yeso por el prototipo de escáner.

• VII.III.II - Criterios de exclusión

- Cualquier modelo, físico o digital que se encuentre dañado o incompleto.
- Cualquier modelo digital que no se le pueda asignar la escala.

• VII.III.III – Criterios de eliminación

- En el caso de los modelos físicos, todos aquellos modelos que se dañen durante su manejo o almacenamiento.
- En el caso de los modelos digitales, todos aquellos que su archivo se encuentre corrupto.
- Cualquier modelo físico o digital, en el cual no sea posible realizar las mediciones lineales.

VII.IV - VARIABLES

VII.IV.I - VARIABLES DEPENDIENTES

<u>Variable Dependiente</u>		<u>Definición conceptual</u>	<u>Definición operacional</u>	<u>Escala de medición y unidades</u>
Mediciones lineales	Distancia Intercanina	Distancia lineal entre las cimas de las cúspides de los caninos	Se obtiene midiendo la distancia de canino a canino en el modelo.	Cuantitativa, razón, continúa, milímetros
	SIO	Suma de la longitud mesio-distal de los 4 incisivos superiores.	Se obtiene sumando el ancho mesio-distal de los 4 incisivos superiores en el modelo.	
	Ancho Arcada Anterior	Distancia lineal entre la fosa mesial del primer premolar derecho al primer premolar izquierdo.	Se obtiene midiendo la distancia de premolar a premolar en el modelo.	
	Ancho Arcada Posterior	Distancia lineal entre la fosa mesial del primer molar derecho al primer molar izquierdo.	Se obtiene midiendo la distancia de molar a molar en el modelo.	
Exactitud (ISO 5725-1)	Precisión	La precisión describe lo cerca que están las mediciones repetidas entre sí	Lo cerca que están las mediciones entre repetidas digitalizaciones del modelo.	Cuantitativa, razón, continúa, micrómetros
	Veracidad	La veracidad describe cuán lejos se desvía la medición de las dimensiones reales del objeto medido.	Lo cerca que están las mediciones entre el modelo del prototipo y el del escáner 3Shape Tríos®	Cuantitativa, razón, continúa, micrómetros

VII.IV.II - VARIABLES INDEPENDIENTES

<u>Variable Independiente</u>		<u>Definición conceptual</u>	<u>Definición operacional</u>	<u>Escala de medición y unidades</u>
<u>Cámara</u>	Raspberry Pi Camera Module v2.1	Sensor: Sony IMX219 8-megapixel	Usamos el módulo de cámara de Raspberry Pi para capturar las fotografías	Cualitativa nominal dicotómica
Rocío de tiza		Tiza color naranja en Spray	Se rociaron los modelos con spray de tiza para aumentar el número de rasgos únicos que puede detectar el algoritmo	Cualitativa nominal dicotómica

VII.V - CONCORDANCIA Y FIABILIDAD

Se capacito al investigador por un experto para el manejo del software fotogramétrico, así como para la medición de las variables del estudio. Un único examinador realizo todas las mediciones. Todas las mediciones lineales se realizaron dos veces con un intervalo de tiempo mínimo de un mes entre las dos evaluaciones para comprobar la fiabilidad intra-observador con el coeficiente de concordancia intraclase.

VII.VI - Ubicación espaciotemporal

- Casa del investigador principal
- Primavera 2020 – 2021

VII.VII - PROCEDIMIENTO, TÉCNICAS Y FUENTES DE RECOLECCIÓN

Slicing e impresión de piezas en 3D:

Los archivos *.STL fueron descargados de la cuenta oficial de OPENSCAN en thingiverse.com. Un archivo STL describe una superficie triangulada sin estructurar por la unidad normal y los vértices de los triángulos utilizando un sistema de coordenadas cartesianas tridimensionales.

Se utilizo el software Ultimaker Cura 4.12.1, el cual es una aplicación de código abierto LGPLv3 de slicing para impresoras 3D. (figura 2) Este software es necesario para convertir el archivo *.STL de las piezas que deseamos imprimir a *.Gcode, este proceso es conocido como "Slicing". G-Code significa "código geométrico" y es un lenguaje de programación para CNC que instruye a las máquinas dónde y cómo moverse.

Para la impresión de todas las piezas, excepto los engranajes se utilizó una impresora 3D (Creality Ender-3) de modelado de deposición fundida (FDM) con filamento PLA de 1.75mm (Matchbox), el tamaño de capa se ajustó a 0.2 mm, con un infill de 20% en patrón cubico a una temperatura de 200 grados centígrados en el extrusor y 60 grados en la cama. Para imprimir los engranajes, los cuales deben resistir las fuerzas de torque producidas por los motores, se imprimieron usando la configuración óptima para impresión de engranajes reportada por Kalavadiya et al(67), una capa de 0.08 mm, con un infill de 100% en patrón en curva de Hilbert a una temperatura de 200 grados centígrados en el extrusor y 70 grados en la cama.

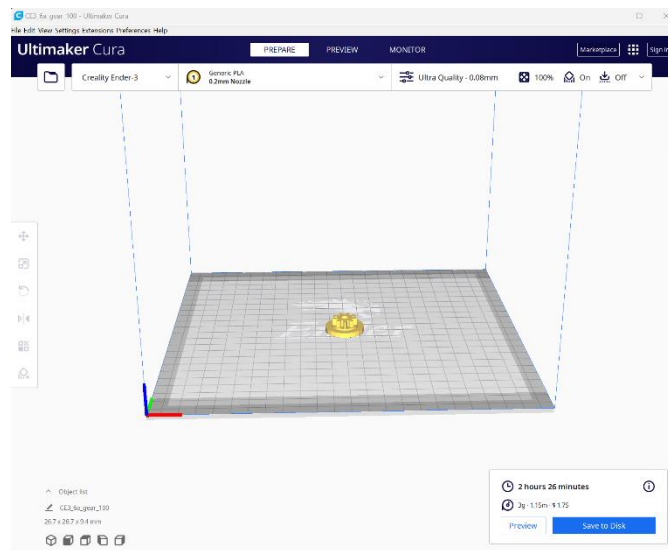


Figura 2 Captura de pantalla del software CURA. Slicing del archivo STL. Fuente propia.

Fotogrametría, obtención del modelo tridimensional La fotogrametría fue realizada en el software Meshroom 2021.1.0 64-bit, (figura 3) Meshroom es un software gratuito y de código abierto de reconstrucción 3D basado en el marco de AliceVision. Este software es el encargado de transformar el conjunto de fotografías en un modelo tridimensional.

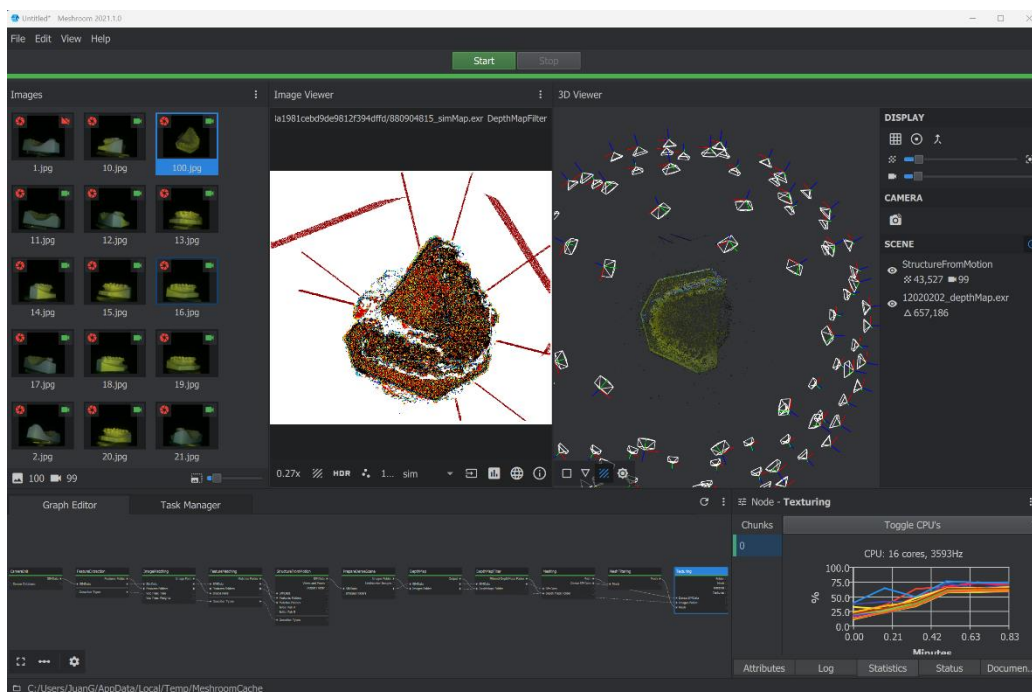


Figura 3 Captura de pantalla del software Meshroom. Fotogrametría terminada. Fuente propia.

Análisis de exactitud Como antes mencionado, la exactitud consiste en la precisión y la veracidad (ISO 5725-1). La precisión describe lo cerca que están las dimensiones de repetidas digitalizaciones entre sí. Una alta precisión se relaciona con un escaneo más repetible y consistente y la veracidad describe hasta qué punto las dimensiones del modelo se desvía de las dimensiones reales del objeto digitalizado. (anexo 4) Es decir no es suficiente que el escáner “sirva” (Veracidad), sino que además debe servir cuantas veces lo utilizamos. (precisión)

Se realizaron las mediciones lineales previamente descritas en los modelos de yeso con un vernier digital, (anexo 5) y en los modelos digitales utilizando el software Meshmixer. (figura 4) y se vació la información en una tabla de Excel. (anexo 2)

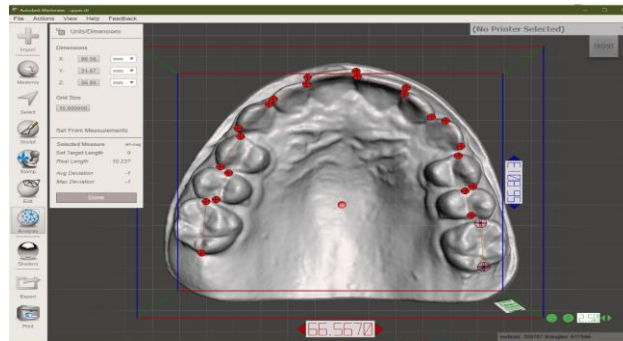


Figura 4 Captura de pantalla del software Meshmixer. Mediciones lineales. Fuente propia.

Resumen de procedimientos (ver anexo3)

1. Creación del prototipo de escáner 3D fotogramétrico.
2. Obtención de modelos de yeso.
3. Digitalización de los modelos de yeso con el prototipo y con el 3shape trios.
4. Se realizaron las mediciones lineales en los distintos modelos.
5. Análisis estadístico

VII.VIII - ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se vaciaron los datos en una hoja de Microsoft Excel, se realizó la estadística descriptiva y se llevó a cabo una comparación múltiple usando ANOVA para ver la diferencia significativa entre el control (modelo obtenido con el escáner 3Shape Trios) y los modelos digitalizados con el prototipo de escáner fotogramétrico. En el caso en que los datos no fueron paramétricos utilizamos la prueba de Kruskal Wallis.

VII.IX - LOGÍSTICA

VII.IX.I - RECURSOS HUMANOS

- Tesista:
- Director de tesis:
- Asesor disciplinario:
- Asesor metodológico:

VII.IX.II - RECURSOS MATERIALES

Hardware

- *Raspberry Pi 3 Model B +*
- *Raspberry Pi Shield*
- *Micro SD 16GB*
- *Raspberry Pi ring light*
- *Raspberry Pi Camera v2.1 de 8 megapixeles*
- *2x A4988 stepper driver*
- *1x Nema17 con 40Ncm*
- *1x Nema17 con 13Ncm*
- *Fuente de poder 12V / 2A con entrada de 5.5 / 2.1mm*
- *Tornillos, tuercas y heat inserts*
- *Impresora 3D Ender 3*
- *Escáner 3Shape Tríos®*
- *Computadora personal.*
 - *CPU: AMD Ryzen 7 3700X 8- Core @ 4.5 Ghz*
 - *RAM: 64GB DDR4 @3800 MHz*
 - *GPU: Nvidia GeForce RTX 2070*
 - *DISCO: 2x NVMe M.2 Corsair MP600 1 TB*

Software

- *Ultimaker Cura*
- *Meshroom*
- *Meshmixer*

Insumos

- *PLA Negro de 1.7 mm*
- *Alginato*
- *Yeso*

VII.IX.III - RECURSOS FINANCIEROS

Se utilizaron recursos propios del tesista-investigador para la fabricación del escáner 3D fotogramétrico, así como para la obtención de modelos de estudio y su digitalización.

Ética y Bioseguridad

La presente investigación, está catalogado como una investigación sin riesgo, esto de acuerdo al artículo 17 de la ley general de salud, en materia de investigación para la salud, así como el artículo 23 de la misma ley el cual describe que en caso de investigaciones con riesgo mínimo, la comisión de ética, por razones justificadas, podrá autorizar que el consentimiento informado se obtenga sin formularse por escrito, y tratándose de investigaciones sin riesgo, podrá dispensar al investigador la obtención del consentimiento informado.

Los modelos de estudio solo fueron identificados por un folio, los investigadores no recopilaban ni guardaron ninguna información adicional que pudiera identificar a ninguno de los pacientes voluntarios.

RESULTADOS

Fabricación del escáner fotogramétrico

Se logró la fabricación del “esqueleto” de plástico del escáner fotogramétrico, valiéndonos de una impresora de FDM (Ender-3) con filamento PLA de 1.75mm. Con ayuda del raspberry pie y los 2 motores de pasos se logró la sistematización de la toma de fotografías mientras se giraba e inclinaba el modelo ante la cámara. Figuras 5 y 6.



Figuras 5 y 6 Fotos del escáner fotogramétrico. Nótese como el modelo gira ante la cámara. Fuente propia

Con la sistematización de la rotación y de la inclinación del modelo, se logró la captura y transferencia de 100 fotografías por “digitalización” Figura 7

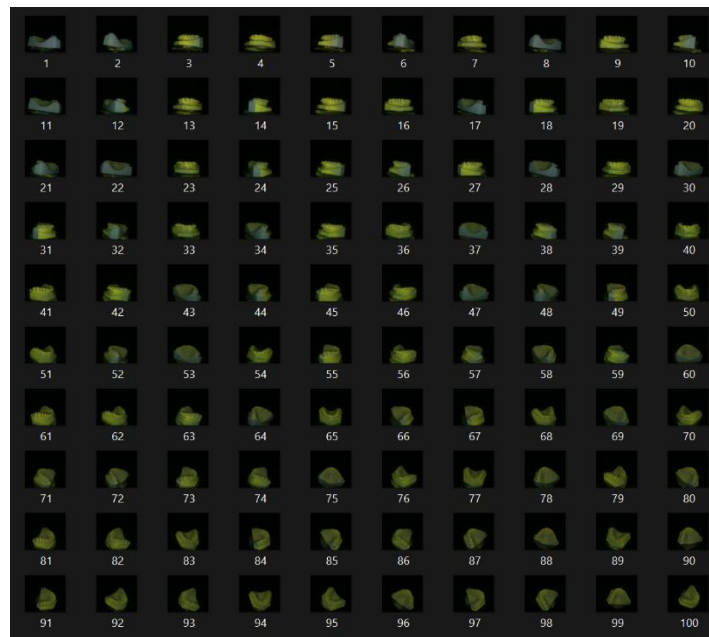


Figura 7 Captura de pantalla de las fotografías tomadas por el escáner fotogramétrico. Fuente propia

Procesamiento de las fotografías.

Las fotografías tomadas por nuestro escáner presentaron buen enfoque e iluminación con características comunes que pudieron ser detectadas por el algoritmo SfM, cada punto en la Figura 8 define un rayo de luz en el espacio tridimensional que comienza en la cámara y se extiende al objeto real.

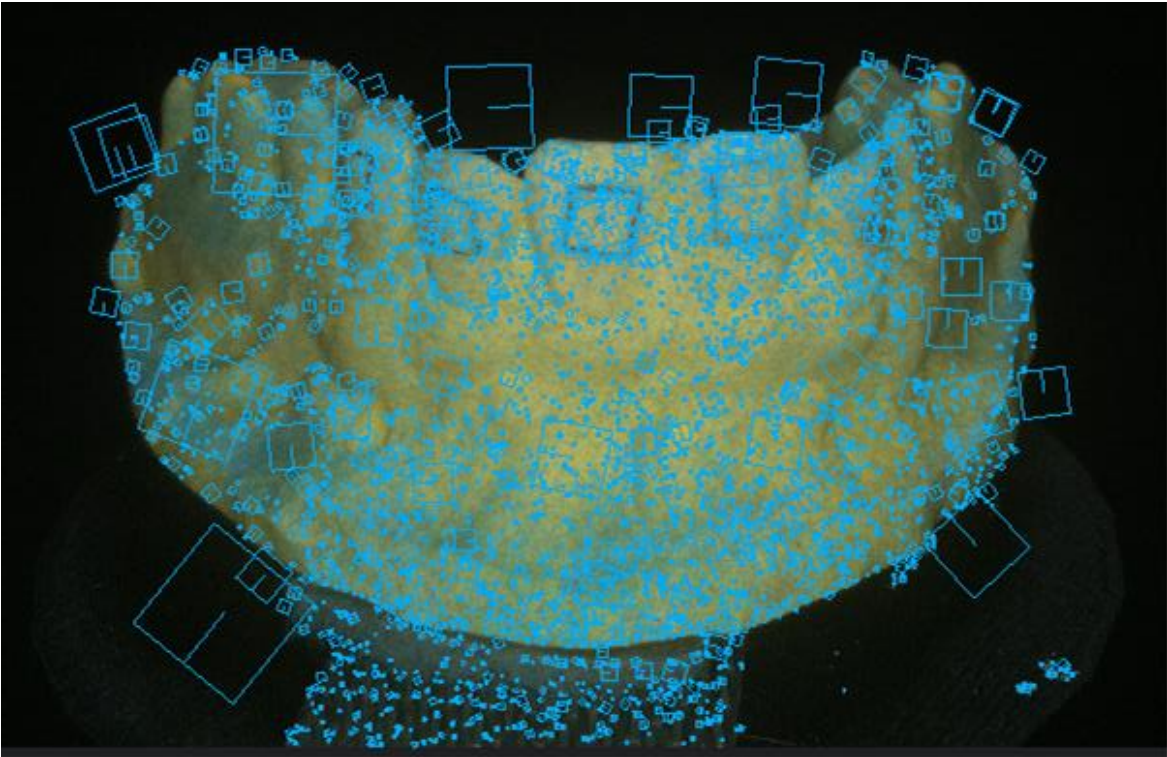


Figura 8 Captura de pantalla del software Meshroom. Puntos característicos detectados por SfM. Fuente propia.

La ubicación de las fotografías individuales pudo ser calculada y visualizada como una nube de puntos en 3D. Cada cuadrado en la Figura 9 representa una fotografía tomada por el escáner fotogramétrico desde diferente angulación.

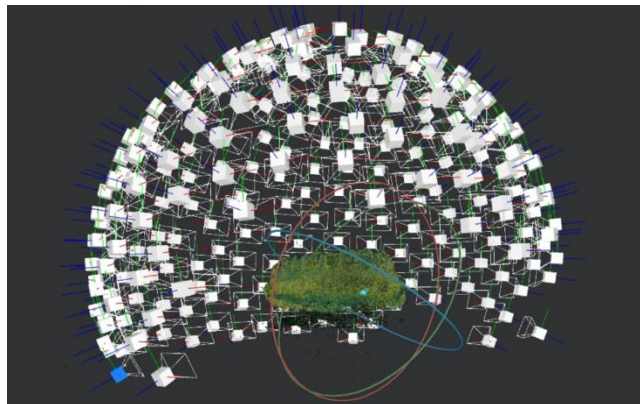


Figura 9 Captura de pantalla del software Meshroom. Nube de puntos en 3D. Fuente propia

El resultado final fue un modelo 3D renderizado y texturizado (Figura 10) que a simple vista parece reproducir los detalles del modelo de yeso, tras el análisis de mediciones lineales se determinó que cuenta con una diferencia promedio de 0.8 milímetros.

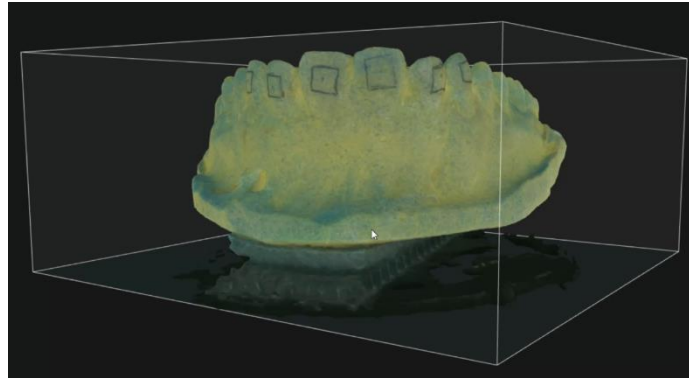


Figura 10 Captura de pantalla del software Meshroom. Modelo renderizado y texturizado. Fuente propia

Mediciones Lineales

La precisión del escáner 3D fotogramétrico, previa estandarización inter e intra observador (CCI de 0.99), se evaluó mediante mediciones entre pares de puntos determinados en los modelos físicos y digitales (Figura 11):

- Suma de los incisivos superiores (SIO)
- Distancia intercanina (DIC)
- Ancho de arcada anterior (AAA)
- Ancho de arcada posterior (AAP)

Descriptives					
	Grupos	SIO (2)	Distancia intercanina	Ancho de arcada anterior	Ancho de arcada posterior
N	YESO	5	5	5	5
	PROTOTIPO	5	5	5	5
	3SHAPE	5	5	5	5
Missing	YESO	0	0	0	0
	PROTOTIPO	0	0	0	0
	3SHAPE	0	0	0	0
Mean	YESO	30.2	37.8	35.1	58.3
	PROTOTIPO	31.5	38.9	36.1	58.3
	3SHAPE	30.6	36.8	35.3	57.9
Median	YESO	30.3	37.8	35.5	58.3
	PROTOTIPO	31.4	38.9	36.1	58.4
	3SHAPE	30.6	37.2	35.1	57.8
Standard deviation	YESO	0.388	0.141	0.547	0.582
	PROTOTIPO	0.255	0.0546	0.323	0.268
	3SHAPE	0.275	1.07	0.280	0.306
Minimum	YESO	29.7	37.6	34.4	57.5
	PROTOTIPO	31.2	38.8	35.7	57.8
	3SHAPE	30.3	35.0	35.0	57.6
Maximum	YESO	30.8	38.0	35.5	59.1
	PROTOTIPO	31.8	39.0	36.6	58.4
	3SHAPE	31.0	37.6	35.7	58.4

Figura 11 Estadística descriptiva de las 4 medidas para los 3 grupos. Fuente propia

Análisis estadístico

Para la medición lineal Sio, el grupo del escaner fotogramétrico presento una media de 31.5 ± 0.25 mm. Se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre el escáner fotogramétrico y los grupos de yeso y 3Shape. Figura 12-14

Group Descriptives					
	Grupos	N	Mean	SD	SE
SIO (2)	YESO	5	30.2	0.388	0.173
	PROTOTIPO	5	31.5	0.255	0.114
	3SHAPE	5	30.6	0.275	0.123

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
SIO (2)	20.9	2	12	<.001

Figura 12 y 13. Resumen estadístico y diferencia de medias entre los grupos Fuente propia

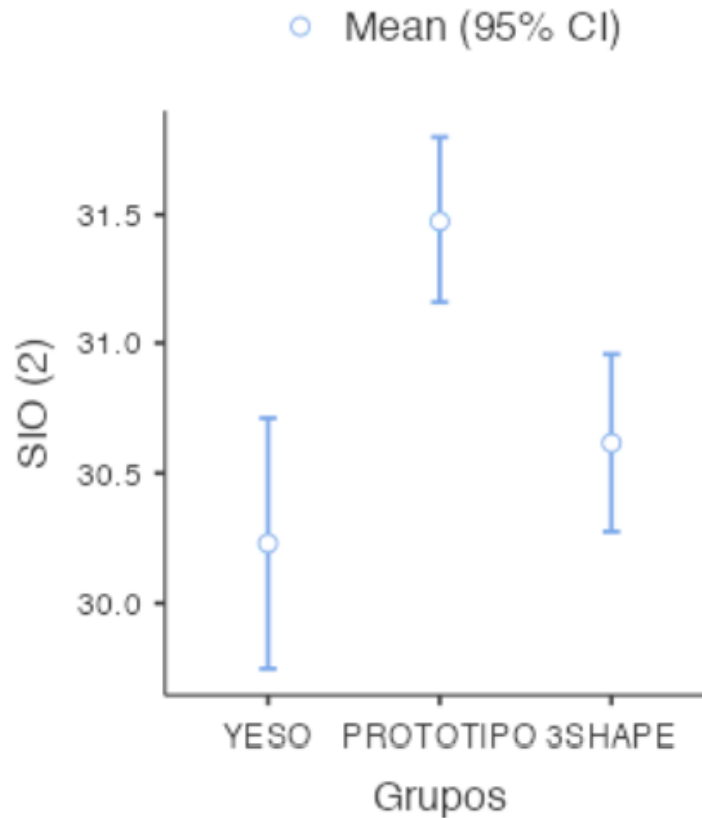


Figura 14. Gráfico de medias Fuente propia

Para la distancia intercanina, el grupo del escáner fotogramétrico presentó una media de 38.9 ± 0.05 , nuevamente se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre el grupo del escáner fotogramétrico y los grupos de yeso y 3shape. Figura 15 – 18

Group Descriptives					
	Grupos	N	Mean	SD	SE
Distancia intercanina	YESO	5	37.8	0.1412	0.0631
	PROTOTIPO	5	38.9	0.0546	0.0244
	3SHAPE	5	36.8	1.0681	0.4777

One-Way ANOVA					
		F	df1	df2	p
Distancia intercanina	Welch's	131	2	6.03	<.001
	Fisher's	14.0	2	12	<.001

Figura 15 y 16. Resumen estadístico y diferencia de medias entre los grupos. Fuente propia.

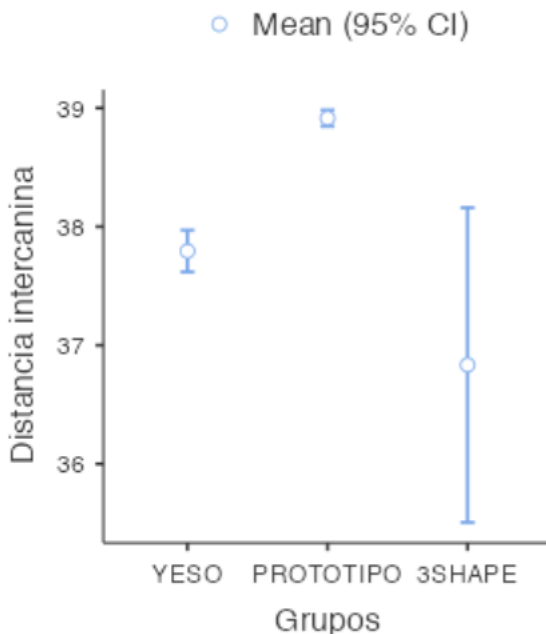


Figura 17. Gráfico de medias. Fuente propia.

Games-Howell Post-Hoc Test – Distancia intercanina				
		YESO	PROTOTIPO	3SHAPE
YESO	Mean difference	–	-1.12	0.960
	p-value	–	<.001	0.226
PROTOTIPO	Mean difference		–	2.080
	p-value		–	0.026
3SHAPE	Mean difference			–
	p-value			–

Figura 18. Games-Howell Post-Hoc Test. Fuente propia.

Para el ancho de arcada anterior, el grupo del escáner fotogramétrico presento una media de 36.1 ± 0.32 . En las mediciones de AAA existió diferencia solo entre el escáner fotogramétrico y el 3shape con una $p=0.007$. Figura 19-22.

Group Descriptives

	Grupos	N	Mean	SD	SE
Ancho de arcada anterior	YESO	5	35.1	0.547	0.245
	PROTOTIPO	5	36.1	0.323	0.144
	3SHAPE	5	35.3	0.280	0.125

One-Way ANOVA

		F	df1	df2	p
Ancho de arcada anterior	Welch's	10.4	2	7.60	0.007
	Fisher's	8.82	2	12	0.004

Figura 19 y 20 Resumen estadístico y diferencia de medias entre los grupos. Fuente propia.

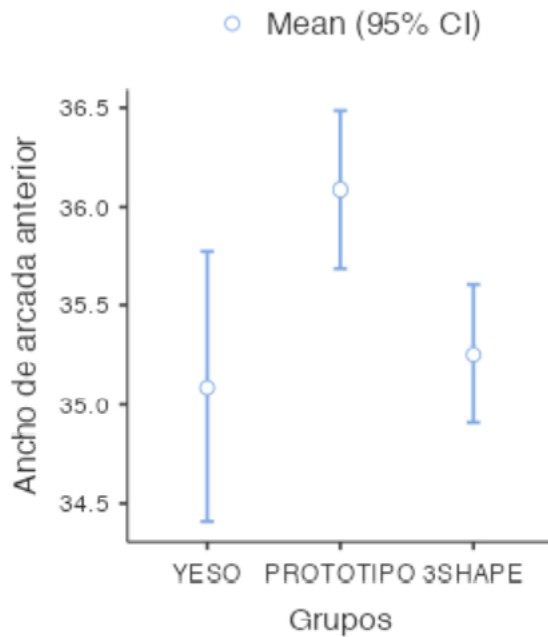


Figura 21. Gráfico de medias. Fuente propia.

Games-Howell Post-Hoc Test – Ancho de arcada anterior

		YESO	PROTOTIPO	3SHAPE
YESO	Mean difference	—	-0.994	-0.166
	p-value	—	0.027	0.823
PROTOTIPO	Mean difference		—	0.828
	p-value		—	0.007
3SHAPE	Mean difference			—
	p-value			—

Figura 22 Games-Howell Post-Hoc Test. Fuente propia.

Finalmente, para el ancho de arcada posterior, el grupo del escáner fotogramétrico presento una media de 58.3 ± 0.26 . No se encontró diferencia estadísticamente significativa entre ninguno de los grupos. Figura 23-26.

Group Descriptives					
	Grupos	N	Mean	SD	SE
Ancho de arcada posterior	YESO	5	58.3	0.582	0.260
	PROTOTIPO	5	58.3	0.268	0.120
	3SHAPE	5	57.9	0.306	0.137

One-Way ANOVA (Welch's)				
	F	df1	df2	p
Ancho de arcada posterior	2.25	2	7.53	0.172

Figura 23 y 24 Resumen estadístico y diferencia de medias entre los grupos. Fuente propia.

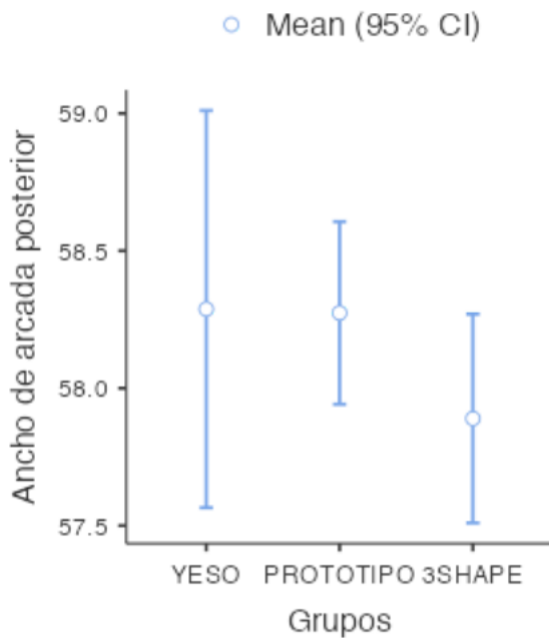


Figura 25. Grafico de medias. Fuente propia.

Games-Howell Post-Hoc Test – Ancho de arcada posterior				
		YESO	PROTOTIPO	3SHAPE
YESO	Mean difference	—	0.0140	0.398
	p-value	—	0.999	0.419
PROTOTIPO	Mean difference		—	0.384
	p-value		—	0.149
3SHAPE	Mean difference			—
	p-value			—

Figura 26. Grafico de medias. Fuente propia.

Discusión

Las impresiones convencionales siguen siendo el estándar de oro para la comparación, son utilizadas por varios estudios como métodos de control contra los sistemas intra y extraorales, incluyendo los escáneres fotogramétricos(68). Durante el flujo de trabajo de las impresiones convencionales, cada material manipulado y cada paso contribuirán a la discrepancia final. Esto incluye, pero no se limita, a la fijación del material de impresión, la retirada de la impresión y el fraguado del yeso(5,12).

A la revisión bibliográfica, solo se encontraron 2 artículos que evaluaran la exactitud de un escáner fotogramétrico mediante mediciones lineales, Fu(51) y Stuani(53), Comparado con nuestra diferencia promedio de 0.8mm, ambos lograron una mayor veracidad con sus respectivos escaners, Fu(51) con una diferencia promedio de 0.15 mm y Stuani(53) con una diferencia promedio de 0.17. Nuestra diferencia más grande fue de 1.2 mm o 2.9% en el caso del Sio, que es la suma del ancho mesio-distal de los 4 dientes anteriores, por lo cual podemos decir basándonos en el límite de aceptabilidad clínica anteriormente mencionada(56–58), que si bien es cierto hubo diferencia estadística, esta no implica una diferencia clínica.

Resulta interesante resaltar que en ambos estudios Fu(51) y Stuani(53), utilizaron cámaras réflex de 18 Megapíxeles con lentes macro, cuyo costo es de 1099 dólares y 799 dólares respectivamente, sin contar el costo del lente. En nuestro estudio utilizamos una cámara de 8 megapíxeles, sin lente macro. En el tiempo en el que realizábamos la investigación, salió al mercado una mejor cámara para la raspberry pi de 16 megapíxeles con autofocus, lo cual mejoraría nuestra exactitud.

Silvester y Hillson(55) informaron de una fuerte disminución de la densidad de la nube de puntos en conjuntos de imágenes de <70 imágenes, razón por la cual optaron por un conjunto de 80 imágenes. Los otros 4 estudios tenían conjuntos de 24(54), 32(52), 50(53) y 72 (51) imágenes. En el presente estudio utilizamos 100 imágenes para generar el modelo. También podríamos fijarnos en el software fotogramétrico utilizado por los distintos autores, Santosi et al(52), en 2018 utilizaron Agisoft Photoscan, que en 2019 pasó a llamarse Agisoft Metashape, añadiendo el uso de GPU e IA entre otras mejoras. Agisoft Metashape fue utilizado por Silvester y Hillson(55) en 2020. Stuani et al(53), utilizaron la versión limitada y gratuita de 3DF Zephyr, mientras que Fu et al(51), dicen haber utilizado el software de código abierto Meshlab, pero éste no es un software fotogramétrico, sino de manipulación de mallas(69). El presente estudio utilizó Meshroom, un software fotogramétrico gratuito de código abierto basado en el framework de AliceVision. El uso de un software fotogramétrico en particular sobre otro, puede tener un impacto significativo en la precisión reportada, como lo demuestran los múltiples estudios que comparan el efecto en la precisión cuando se utilizan diferentes softwares fotogramétricos para procesar los mismos conjuntos de datos(70,71).

Podría decirse que hay mejores soluciones de software fotogramétrico en el mercado que las utilizadas en los artículos encontrados durante la revisión bibliográfica, e incluso que el software utilizado por nosotros, por lo que podría plantearse la hipótesis de una posible mejora de la precisión en estos estudios si se utilizaran conjuntos de imágenes más grandes y/o un software fotogramétrico más potente y robusto como Capturing Reality(70,71).

Los dos mayores desafíos para la fotogrametría en general son las superficies brillantes y las superficies sin rasgos, los modelos de yeso cumplen con ambas características, ambos desafíos pueden ser superados con el tratamiento de la superficie del objeto objetivo(26).Se ha demostrado que la aplicación de polvo al objeto objetivo ayuda a su digitalización(72).Razón por la cual se utilizó spray de tiza para tratar la superficie de los modelos.

Como menciona Gruen(73), la fotogrametría parece a veces una "tecnología secreta" con la que el público no se ha familiarizado, a pesar de que está presente en nuestra vida cotidiana: Los videojuegos, las películas, los mapas, los sistemas biomédicos, los sistemas de detección automática de goles en los deportes, etc. Esta falta de familiaridad general con la tecnología fotogramétrica resulta problemática, ya que está aquí para quedarse. En palabras de John G. Fryer(74):

"A pesar de todas las emocionantes posibilidades de las técnicas de imagen en 3D, los usuarios de esta tecnología deben tener en cuenta [que] la luz seguirá viajando en línea recta y la comprensión de la geometría será tan válida mañana como hoy".

Esto es especialmente cierto si tenemos en cuenta que el hardware y el software necesarios para la fotogrametría son cada vez mejores.

Conclusión

- Los modelos digitales generados con el escáner fotogramétrico poseen suficiente exactitud para el diagnóstico, la planificación del tratamiento y su almacenamiento, lo que podría llevar en el futuro a prescindir de la necesidad del almacenamiento físico de los modelos, facilitando la organización clínica.
- Enfatizamos que la fotogrametría es un proceso perfectible, con mejoras constantes en el software, hardware y en las cámaras, es solo cuestión de tiempo en que se mejore su exactitud.

VIII - BIBLIOGRAFIA

1. International Organization for Standardization. ISO 5725-1:1994(en), Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions [Internet]. International Organization for Standardization. 1994 [cited 2020 Nov 9]. Available from: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5725:-1:ed-1:v1:en>
2. Chalmers E V, Martin CB, McIntyre GT, Dundee CL, Hospital D. An audit of plaster study models storage in hospital based orthodontic departments. *Clin Eff Bull.* 2015;34(January):29–30.
3. Gutiérrez E, Iglesias P. Los materiales dentales (Técnicas de ayuda odontológica/estomatológica) [Internet]. Editorial Editex; 2017. (Ciclos Formativos). Available from: <https://books.google.com.mx/books?id=c-8tDwAAQBAJ>
4. Lilley RC, Lambden P. The Tool Kit for Dental Risk Management [Internet]. Radcliffe Medical; 2002. (Radcliffe Series). Available from: <https://books.google.com.mx/books?id=aWjstgse1NIC>
5. Ender A, Attin T, Mehl A. In vivo precision of conventional and digital methods of obtaining complete-arch dental impressions. *J Prosthet Dent* [Internet]. 2016;115(3):313–20. Available from: doi:10.1016/j.prosdent.2015.09.011
6. SECRETARIA DE SALUD. NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SSA3-2012, Del expediente clínico. D Of. 2012;Cuarta sec.
7. Fleming PS, Marinho V, Johal A. Orthodontic measurements on digital study models compared with plaster models: A systematic review. *Orthod Craniofac Res.* 2011;14(1):1–16.
8. McGuinness NJ, Stephens CD. Storage of Orthodontic Study Models in Hospital Units in the U.K. *Br J Orthod* [Internet]. 1992 Aug 5;19(3):227–32. Available from: doi:10.1179/bjo.19.3.227
9. Mörmann WH. The evolution of the CEREC system. *J Am Dent Assoc.* 2006;137(9 SUPPL.):7–13.
10. Su T shu, Sun J. Comparison of repeatability between intraoral digital scanner and extraoral digital scanner: An in-vitro study. *J Prosthodont Res* [Internet]. 2015;59(4):236–42. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpor.2015.06.002>
11. Ray. Ray, Innovation in Imaging [Internet]. 2020 [cited 2020 Aug 7]. Available from: <http://www.raymedical.com/products/raydent-microscan/>
12. Renne W, Ludlow M, Fryml J, Schurch Z, Mennito A, Kessler R, et al. Evaluation of the accuracy of 7 digital scanners: An in vitro analysis based on 3-dimensional comparisons. *J Prosthet Dent* [Internet]. 2017;118(1):36–42. Available from: doi:10.1016/j.prosdent.2016.09.024
13. Flügge T V., Schlager S, Nelson K, Nahles S, Metzger MC. Precision of intraoral digital dental impressions with iTero and extraoral digitization with the iTero and a model scanner. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2013;144(3):471–8.
14. Kulczyk T, Rychlik M, Lorkiewicz-Muszyńska D, Abreu-Głowacka M, Czajka-Jakubowska A, Przysańska A. Computed tomography versus optical scanning: A comparison of different methods of 3d data acquisition for tooth replication. *Biomed Res Int.* 2019;2019:9–11.
15. Mangano FG, Veronesi G, Hauschild U, Mijiritsk E, Mangano C. Trueness and precision of four intraoral scanners in oral implantology: A comparative in vitro study. *PLoS One.* 2016;11(9).
16. Zulqar-Nain J, Burgess G, Zander HA. Photogrammetry. *J Periodontol* [Internet]. 1967 Nov;38(6 Part II):677–81. Available from: doi:10.1902/jop.1967.38.6_part2.677
17. Kraus K, Harley IA, Kyle S. Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans [Internet]. De Gruyter; 2011. (De Gruyter Textbook). Available from:

- <https://books.google.com.mx/books?id=tTf8MUhY29IC>
18. Luhmann T, Robson S, Kyle S, Boehm J. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging [Internet]. De Gruyter; 2013. (De Gruyter Textbook). Available from: https://books.google.com.mx/books?id=_f7oBQAAQBAJ
 19. Sánchez-Monescillo A, Sánchez-Turrión A, Vellon-Domarco E, Salinas-Goodier C, Prados-Frutos J. Photogrammetry Impression Technique: A Case History Report. *Int J Prosthodont*. 2016;29(1):71–3.
 20. Hernandez A, Lemaire E. A smartphone photogrammetry method for digitizing prosthetic socket interiors. *Prosthet Orthot Int*. 2017;41(2):210–4.
 21. Salazar-Gamarra R, Seelaus R, Da Silva JVL, Da Silva AM, Dib LL. Monoscopic photogrammetry to obtain 3D models by a mobile device: A method for making facial prostheses. *J Otolaryngol - Head Neck Surg* [Internet]. 2016;45(1):1–13. Available from: doi:10.1186/s40463-016-0145-3
 22. Leal JS, Aroeira RMC, Gressler V, Greco M, Pertence AEM, Lamounier JA. Accuracy of photogrammetry for detecting adolescent idiopathic scoliosis progression. *Spine J* [Internet]. 2019;19(2):321–9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2018.06.362>
 23. James MR, Robson S, Smith MW. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surf Process Landforms*. 2017;42(12):1769–88.
 24. Kournoutas I, Vigo V, Chae R, Wang M, Gurrola J, Abila AA, et al. Acquisition of Volumetric Models of Skull Base Anatomy Using Endoscopic Endonasal Approaches: 3D Scanning of Deep Corridors Via Photogrammetry. *World Neurosurg* [Internet]. 2019;129:372–7. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.05.251>
 25. AliceVision. AliceVision | Photogrammetric Computer Vision Framework [Internet]. 2020 [cited 2020 Aug 7]. Available from: <https://alicevision.org/>
 26. Dixit I, Kennedy S, Piemontesi J, Kennedy B, Krebs C. Which tool is best: 3D scanning or photogrammetry – It depends on the task. *Adv Exp Med Biol* [Internet]. 2019;1120:107–19. Available from: doi:10.1007/978-3-030-06070-1_9
 27. Rey Otero I, Delbraccio M. Anatomy of the SIFT Method. *Image Process Line*. 2014;4:370–96.
 28. Lowe DG. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int J Comput Vis* [Internet]. 2004;91–110. Available from: <https://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/ijcv04.pdf>
 29. Nister D, Stewenius H. Scalable Recognition with a Vocabulary Tree. In: 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 2 (CVPR'06) [Internet]. IEEE; 2006. p. 2161–8. Available from: <http://www.vis.uky.edu/~dnister/http://www.vis.uky.edu/~stewe/>
 30. Muja M, Lowe DG. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration. *VISAPP 2009 - Proc 4th Int Conf Comput Vis Theory Appl*. 2009;1:331–40.
 31. Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. EPnP: An accurate $O(n)$ solution to the PnP problem. *Int J Comput Vis*. 2009;81(2):155–66.
 32. Nister D. An efficient solution to the five-point relative pose problem. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* [Internet]. 2004 Jun;26(6):756–70. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1288525/>
 33. Hirschmüller H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 2008;30(2):328–41.
 34. Lévy B, Petitjean S, Ray N, Maillot J. Least squares conformal maps for automatic

- texture atlas generation. *ACM Trans Graph*. 2002;21(3):362–71.
35. Burt PJ, Adelson EH. A multiresolution spline with application to image mosaics. *ACM Trans Graph*. 1983;2(4):217–36.
 36. VisualSFM. VisualSFM : A Visual Structure from Motion System [Internet]. 2021 [cited 2020 Aug 7]. Available from: <http://ccwu.me/vsfm/>
 37. Schoenberger J. COLMAP — COLMAP 3.7 documentation [Internet]. github. 2020 [cited 2020 Aug 7]. Available from: <https://colmap.github.io/>
 38. Agisoft. Agisoft Metashape [Internet]. 2020 [cited 2020 Aug 7]. Available from: <https://www.agisoft.com/>
 39. RealityCapture. RealityCapture: Mapping and 3D Modeling Photogrammetry Software - CapturingReality.com [Internet]. 2021 [cited 2020 Aug 7]. Available from: <https://www.capturingreality.com/>
 40. 3Dflow. 3Dflow - Computer Vision Specialists - home of 3DF Zephyr [Internet]. 2021 [cited 2020 Aug 7]. Available from: <https://www.3dflow.net/>
 41. Düppe K, Becker M, Schönmeyr B. Evaluation of Facial Anthropometry Using Three-Dimensional Photogrammetry and Direct Measuring Techniques. *J Craniofac Surg* [Internet]. 2018;29(5):1245–51. Available from: 10.1097/SCS.0000000000004580
 42. De Menezes M, Rosati R, Ferrario VF, Sforza C. Accuracy and reproducibility of a 3-dimensional stereophotogrammetric imaging system. *J Oral Maxillofac Surg* [Internet]. 2010;68(9):2129–35. Available from: doi:10.1016/j.joms.2009.09.036
 43. Wellens HLL, Hoskens H, Claes P, Kuijpers-Jagtman AM, Ortega-Castrillón A. Three-dimensional facial capture using a custom-built photogrammetry setup: Design, performance, and cost. *Am J Orthod Dentofac Orthop* [Internet]. 2020 Aug;158(2):286–99. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0889540620301426>
 44. Camison L, Bykowski M, Lee WW, Carlson JC, Roosenboom J, Goldstein JA, et al. Validation of the Vectra H1 portable three-dimensional photogrammetry system for facial imaging. *Int J Oral Maxillofac Surg* [Internet]. 2018;47(3):403–10. Available from: doi:10.1016/j.ijom.2017.08.008
 45. Levine SS, Prietula MJ. Open Collaboration for Innovation: Principles and Performance. *Organ Sci* [Internet]. 2014 Oct;25(5):1414–33. Available from: <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/orsc.2013.0872>
 46. Megel T. DIY 3D Scanner - OpenScan [Internet]. 2021 [cited 2021 Feb 10]. Available from: <http://openscan.eu/>
 47. Long J, Gholizadeh H, Lu J, Bunt C, Seyfoddin A. Application of Fused Deposition Modelling (FDM) Method of 3D Printing in Drug Delivery. *Curr Pharm Des* [Internet]. 2017 Feb 20;23(3):433–9. Available from: <http://www.eurekaselect.com/146741/article>
 48. Dindaroğlu F, Kutlu P, Duran GS, Görgülü S, Aslan E. Accuracy and reliability of 3D stereophotogrammetry: A comparison to direct anthropometry and 2D photogrammetry. *Angle Orthod* [Internet]. 2016;86(3):487–94. Available from: doi:10.2319/041415-244.1
 49. Autodesk. 123D Apps & Products | Autodesk [Internet]. 2020 [cited 2020 Aug 7]. Available from: <https://www.autodesk.com/solutions/123d-apps>
 50. Koban KC, Leitsch S, Holzbach T, Volkmer E, Metz PM, Giunta RE. 3D Bilderfassung und Analyse in der Plastischen Chirurgie mit Smartphone und Tablet: eine Alternative zu professionellen Systemen? *Handchirurgie Mikrochirurgie Plast Chir* [Internet]. 2014;46(2):97–104. Available from: doi:10.1055/s-0034-1371822
 51. Fu X, Peng C, Li Z, Liu S, Tan M, Song J. The application of multi-baseline digital close-range photogrammetry in three-dimensional imaging and measurement of

- dental casts. PLoS One [Internet]. 2017;12(6):1–13. Available from: doi:10.1371/journal.pone.0178858
52. Santoši T, Budak I, Šokac M, Puškar T, Vukelić Đ, Trifković B. 3D digitization of featureless dental models using close range photogrammetry aided by noise based patterns. *Facta Univ Ser Mech Eng* [Internet]. 2018;16(3):297–305. Available from: doi:10.22190/FUME170620029S
 53. Stuani VT, Ferreira R, Manfredi GGP, Cardoso M V., Sant'Ana ACP. Photogrammetry as an alternative for acquiring digital dental models: A proof of concept. *Med Hypotheses* [Internet]. 2019;128(March):43–9. Available from: doi:10.1016/j.mehy.2019.05.015
 54. Alyaman M, Abd-Raheem A, Aldeiri F. Design of an automated extraoral photogrammetry 3d scanner. *Int Arab J Inf Technol*. 2019;16(3ASpecial Issue):533–9.
 55. Silvester CM, Hillson S. A critical assessment of the potential for Structure-from-Motion photogrammetry to produce high fidelity 3D dental models. *Am J Phys Anthropol* [Internet]. 2020;173(2):381–92. Available from: doi:10.1002/ajpa.24109
 56. Okunami TR, Kusnoto B, BeGole E, Evans CA, Sadowsky C, Fadavi S. Assessing the American Board of Orthodontics objective grading system: Digital vs plaster dental casts. *Am J Orthod Dentofac Orthop* [Internet]. 2007 Jan;131(1):51–6. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0889540606011759>
 57. Asquith J, Gillgrass T, Mossey P. Three-dimensional imaging of orthodontic models: a pilot study. *Eur J Orthod* [Internet]. 2007 Oct 1;29(5):517–22. Available from: <https://academic.oup.com/ejo/article-lookup/doi/10.1093/ejo/cjm044>
 58. Leifert MF, Leifert MM, Efstratiadis SS, Cangialosi TJ. Comparison of space analysis evaluations with digital models and plaster dental casts. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* [Internet]. 2009 Jul;136(1):16.e1-4; discussion 16. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19577140>
 59. Nassar U, Hussein B, Oko A, Carey JP, Flores-Mir C. Dimensional accuracy of 2 irreversible hydrocolloid alternative impression materials with immediate and delayed pouring. *J Can Dent Assoc (Tor)*. 2012;78(1).
 60. Nagrath R, Lahori M, Agrawal M. A Comparative Evaluation of Dimensional Accuracy and Surface Detail Reproduction of Four Hydrophilic Vinyl Polysiloxane Impression Materials Tested Under Dry, Moist, and Wet Conditions-An In Vitro Study. *J Indian Prosthodont Soc* [Internet]. 2014;14(December):59–66. Available from: doi:10.1007/s13191-014-0365-z
 61. International Organization for Standardization. ISO 4823:2015(en), Dentistry — Elastomeric impression materials [Internet]. International Organization for Standardization. 2015 [cited 2020 Aug 7]. Available from: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:4823:ed-4:v1:en>
 62. Amornvit P, Sanohkan S, Peampring C. Studying the Optical 3D Accuracy of Intraoral Scans: An in Vitro Study. *J Healthc Eng*. 2020;2020.
 63. Castellini P, Scalise L, Tomasini EP. Teeth mobility measurement: A laser vibrometry approach. *J Clin Laser Med Surg* [Internet]. 1998;16(5):269–72. Available from: doi: 10.1089/clm.1998.16.269
 64. Vögtlin C, Schulz G, Jäger K, Müller B. Comparing the accuracy of master models based on digital intra-oral scanners with conventional plaster casts. *Phys Med* [Internet]. 2016 Jun;1:20–6. Available from: doi:10.1016/j.phmed.2016.04.002
 65. Ahlholm P, Sipilä K, Vallittu P, Jakonen M, Kotiranta U. Digital Versus Conventional Impressions in Fixed Prosthodontics: A Review. *J Prosthodont*. 2018;27(1):35–41.
 66. Zarauz C, Valverde A, Martinez-Rus F, Hassan B, Pradies G. Clinical evaluation comparing the fit of all-ceramic crowns obtained from silicone and digital intraoral

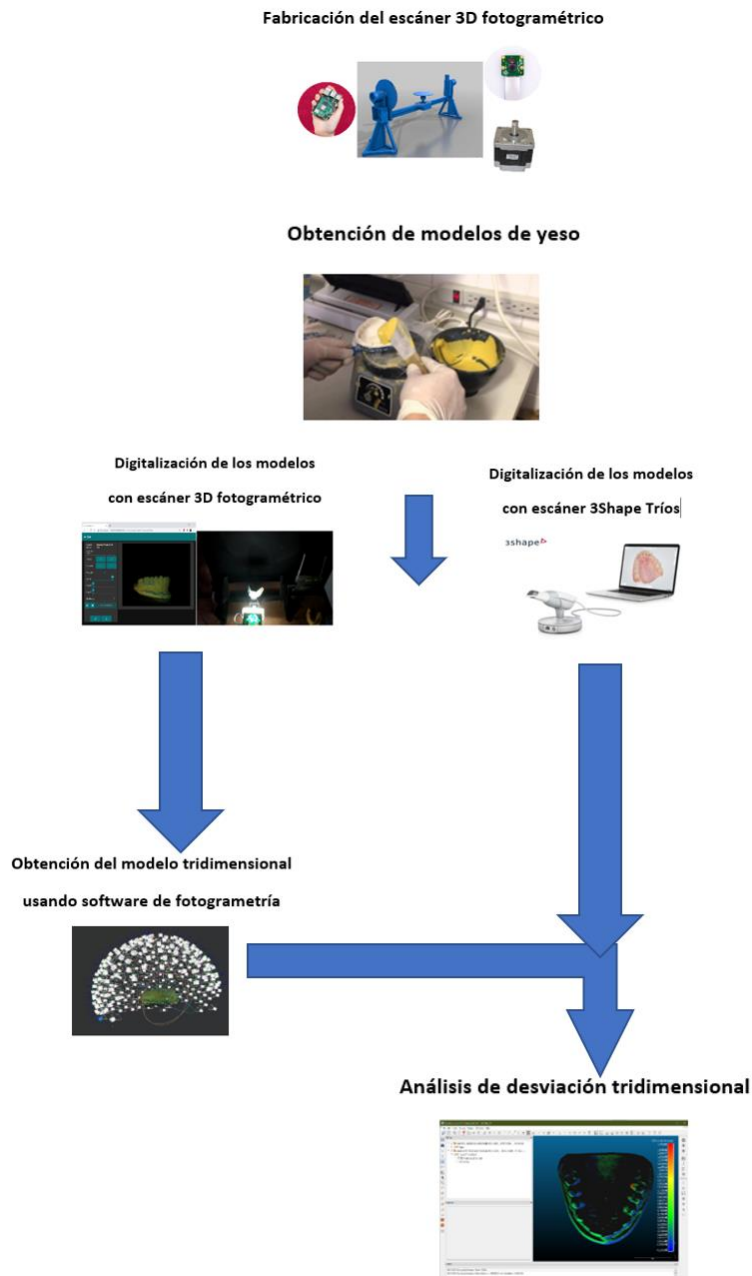
- impressions. *Clin Oral Investig*. 2016;20(4):799–806.
67. Kalavadiya R. Optimization of Infill Patterns for Spur Gear in 3D Printing using PLA. *Optimization of Infill Patterns for Spur Gear in 3D Printing using PLA*. 2018;(December 2017):1–7.
 68. Akyalcin S, Dyer DJ, English JD, Sar C. Comparison of 3-dimensional dental models from different sources: Diagnostic accuracy and surface registration analysis. *Am J Orthod Dentofac Orthop* [Internet]. 2013;144(6):831–7. Available from: doi:10.1016/j.ajodo.2013.08.014
 69. Cignoni P, Callieri M, Corsini M, Dellepiane M, Ganovelli F, Ranzuglia G. MeshLab: An open-source mesh processing tool. 6th Eurographics Ital Chapter Conf 2008 - Proc [Internet]. 2008;129–36. Available from: doi:10.2312/LocalChapterEvents.ItalChap.ItalianChapConf2008.129-136
 70. Brach M, Chan J, Szymanski P. Accuracy assessment of different photogrammetric software for processing data from low-cost UAV platforms in forest conditions. *iForest - Biogeosciences For* [Internet]. 2019 Oct 31;12(5):435–41. Available from: doi:10.3832/ifor2986-012
 71. Aati S, Rupnik E, Nejim S. Comparative study of photogrammetry software in industrial field. *Rev Française Photogrammétrie Télédétection* [Internet]. 2020;1(221):37–48. Available from: doi:10.52638/rfpt.2019.439
 72. Prudente MS, Davi LR, Nabbout KO, Prado CJ, Pereira LM, Zancopé K, et al. Influence of scanner, powder application, and adjustments on CAD-CAM crown misfit. *J Prosthet Dent* [Internet]. 2018;119(3):377–83. Available from: doi:10.1016/j.prosdent.2017.03.024
 73. Gruen A. Everything moves: The rapid changes in photogrammetry and remote sensing. *Geo-Spatial Inf Sci* [Internet]. 2021;24(1):33–49. Available from: <https://doi.org/10.1080/10095020.2020.1868275>
 74. Aber JS, Marzloff I, Ries J, Aber SEW. *Small-Format Aerial Photography and UAS Imagery: Principles, Techniques and Geoscience Applications* [Internet]. Elsevier Science; 2019. Available from: <https://books.google.com.mx/books?id=vUK0DwAAQBAJ>

ANEXOS

Anexo 2: Tabla de vaciado de las mediciones lineales

Modelo#	Yeso		Prototipo		3Shape Tríos	
Sio						
Distancia Inter canina						
Ancho de arcada anterior						
Ancho de arcada posterior						

Anexo 3: Esquema de procedimientos general



Anexo 4: Esquema de evaluación de la veracidad y la precisión

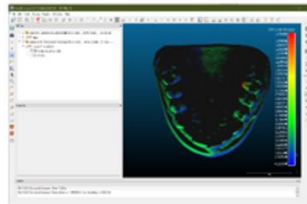
Utilizamos el mismo análisis de desviación tridimensional para evaluar la veracidad, y la precisión.

Lo que cambia es el set de datos que comparamos.

Para evaluar la veracidad, comparamos el modelo del prototipo contra el modelo del 3Shape Tríos.

Para evaluar la precisión, comparamos el modelo del prototipo contra repetidas digitalizaciones de sí mismo.

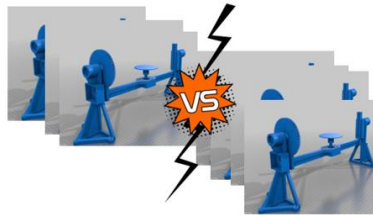
Análisis de desviación tridimensional



VERACIDAD



PRECISION



Anexo 5: Medición lineal en modelo físico. (Ejemplo: Ancho arcada anterior)

